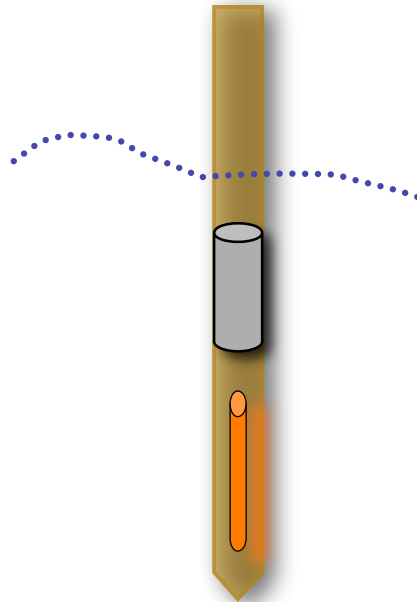


Deponering av kärnavfall i ^{djupa} borrhål !



*Leif Bjelm professor i Teknisk Geologi vid LTH, Lunds Universitet.
Augusti 2007*

Sammanställd på uppdrag av KASAM, med underlag från Utfrågningen i Stockholm 14-15 Mars 2007.

Introduktion

I Februari 2007 utgick inbjudan från KASAM, Statens Råd för Kärnavfallsfrågor, om en två dagars utfrågning om djupa borrhål för kärnavfallslagring. I praktiken bestod dagarna ett av ett antal inbjudna föredrag, utfrågning av riksdagspartiernas representanter samt en panelutfrågning med Göran Skytte som moderator. Utfrågningarna var väl besökta av olika aktörer, intressenter, myndigheter och enskilda företrädare. Vid utfrågningen medverkade ca 170 personer.

KASAM's formella inbjudan återges ordagrant nedan.

INBJUDAN TILL UTFRÅGNING OM DJUPA BORRHÅL DEN 14-15 MARS 2007

Som tidigare aviserats anordnar KASAM den 14-15 mars 2007 en utfrågning om djupa borrhål. Utfrågningen äger rum på IVA Konferenscenter, Grev Turegatan 16, Stockholm.

Bakgrund

Olika aktörer, däribland närmast berörda kommuner samt miljöorganisationer och regeringen, har vid olika tidpunkter uppmanat Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) att redovisa alternativ till den s.k. KBS-3 metoden för hur det använda kärnbränslet ska tas om hand. På senare tid har alternativet "Djupa borrhål" uppmärksammats i den offentliga debatten. I diskussionen har framförts att detta är det alternativ som KBS-3 metoden i första hand ska jämföras med. Under år 2006 har SKB och Miljöorganisationernas Kärnavfallsgranskning (MKG) tagit fram var sin rapport om djupa borrhål och kommit till olika slutsatser i frågan om ett sådant alternativ bör vidareutvecklas.

KASAM påbörjade år 2006 ett projekt för genomlysning av kärnavfallsfrågan. I enlighet med önskemål från Oskarshamns och Östhammars kommun, SKB och MKG har KASAM funnit det angeläget att frågorna kring djupa borrhål behandlas tidigt i genomlysningsprojektet. Även Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI) har ställt sig bakom detta tema för utfrågningen.

Utgångspunkter

Nyckelorden för genomlysningsprojektet är öppenhet och transparens. Dessa begrepp symboliserar en strävan att klarlägga dels problematiken i sak, dels hur värderingar kan styra vilka fakta som tas fram och hur de används i den offentliga debatten. Man kan argumentera för eller mot olika tänkbara metoder för att ta hand om kärnbränslet beroende på vilka värderingar man har i frågor som återtagbarhet, övervakning av ett förvar mm. Det är därför viktigt att värderingarna bakom analyser, förslag och argument lyfts fram samtidigt som det är nödvändigt att ta fram en så bra beskrivning som möjligt av olika metoders säkerhet och genomförbarhet.

Syfte

Syftet med utfrågningen är ge en så allsidig och neutral genomlysning av alternativet djupa borrhål som möjligt. Målgrupp för utfrågningen är allmänheten särskilt medborgare i aktuella kommuner, beslutsfattare vid industri och myndigheter, miljö- och intresseorganisationer, politiker på lokal och nationell nivå, samt media.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	3
SKB's utredningar om borrhäls teknik	5
Kärnavfallshantering i ett internationellt perspektiv.	6
Kärnavfallet - En internationell utblick avseende mängder.....	7
Alternativet Djupa borrhål.	8
Vad styr antalet Djupa borrhål för det svenska avfallet?.....	10
Hur många djupa borrhål krävs för att ta hand om Sveriges kärnavfall?	12
Var står borrhäls tekniken idag för en sådan uppgift?	13
Allmänt om borrhäls teknik.	14
Borrhäls metoder.	18
Under eller Överbalanserad borrhäls ning.....	19
Geologi och andra förutsättningar för djupborrningsprojektet i Lund.....	23
Effekten av underbalansering vid borrhäls ning.....	25
Några specifika frågor i samband med underbalanserad borrhäls ning och annan djup borrhäls ning.....	27
Finns utrustning och verktyg för djupborrnning i stor dimension, till stora djup, i hårt berg?	27
Exempel från en djupborrningsoperation med utgångspunkt i tidsåtgång, kostnader och ingående moment.....	28
Kapacitets- och kostnadsjämförelser.....	30
Var står borrhäls tekniken idag för borrhäls ning av Djupa borrhål och deponering av kärnavfall	33
Litteraturreferenser och övrigt bakgrundsmaterial.	35

Sammanfattning

Föreliggande rapport har sammanställts efter utfrågningen i mars 2007. Underlaget utgörs av den presentation som undertecknad föredrog under utfrågningen. Rapporten är utförd på uppdrag av KASAM men författaren ansvarar ensam för dess innehåll.

Det givna temat för denna studie om *Djupa borrhål* formulerades således:

Var står borrhåstekniken idag för en sådan uppgift?

En generellt ställd fråga där man refererar till teknikläget idag. Eftersom uppgiften att utreda alternativa deponeringsmetoder har legat och fortsatt ligger hos den kommande sökanden, SKB, har jag sett det befogat att även betrakta hur SKB uppfattat och bedömt alternativet ”Djupa borrhål” genom åren. Redan nu finns det anledning att konstatera att SKB genomfört två utredningar med explicit inriktning mot borrhåsteknik sedan 1989. Fysiska insatser med bäring på djupborrningsteknik och vida borrhål har ej utförts. Insatserna kommenteras vidare längre fram i denna rapport. En summering av SKB’s utredningar genom åren utges 2006 (R-06-58). En del räkneexempel presenteras då med avseende på antalet borrhål som man anser kommer att behövas fram till ca år 2050. Överslagsberäkningen i SKB rapporten ger därvid att 45 borrhål krävs enligt valda förutsättningar. Med samma förutsättningar, men baserat på andra kapacitetsdata givna av SKB, ger vid handen att det också kan räcka med 15 borrhål något som inte redovisas. För scenariot med dagens avfallsmängder, dvs. ca 4000 ton, skulle med samma antaganden < 10 borrhål behövas vilket heller inte presenterats.

Utfrågningen i mars 2007 har, som anges i KASAM’s inbjudan, sin grund i kravet på alternativa lösningar i samband med att ansökan lämnas in till Miljödomstolen. Det är nödvändigt att alternativa lösningar är väl utredda och analyserade, med tillräcklig ambition jämfört med huvudalternativet. Utfrågningen i mars syftade till att allsidigt belysa de djupa borrhållens alternativa status. Enligt gällande tidplan, och besked från SKB under utfrågningen, avser SKB lämna in ansökan någon gång under 2009. Med den ansökan och all annan tillståndsprövning, upphandling mm uppgav SKB på mötet att det kan dröja 10 år eller mer innan man kan börja deponera avfall enligt den föreslagna metoden KBS-3. En lång tid kan tyckas men å andra sidan en tid som kan användas för parallella/alternativa studier t.ex. de Djupa borrhållens potential. Dylå ambitioner har än så länge inte initierats men borde vara motiverade. Så resonerar man både i Storbritannien och i USA (CoRWM 2005, 2006. DOE 2000, 2005. EPA 2004, 2006)). Man menar att det är viktigt och nödvändigt att inför framtiden ha beredskap för alternativa lösningar eftersom utvecklingen kan gå i en riktning som gör det mer fördelaktigt eller tvingande att deponera kärnavfall i djupa borrhål. I USA föreslår DOE att man avsätter 5 MUSD/år för utvecklingsarbete och pilotförsök direkt kopplat till utförande av djupa borrhål. I Storbritannien ref.. är rekommendationen liknande i det att man önskar hålla dörrarna öppna för djupa borrhål så att man behåller den flexibilitet som utvecklingen i framtiden kan komma att motivera.

En del kommentarer i denna rapport är ganska grundläggande vilket har sin grund i att teknikområdet ”djupborrning” ligger vid sidan av vad de flesta åhörare, läsare, företrädare för industri och myndigheter normalt kommer i kontakt med. Det kan därför kanske vara svårt att bedöma och värdera frågor som har koppling till genomförbarhet, teknikstatus och huruvida anförda exempel är relevanta eller inte.

Det finns anledning att understryka att den ”djupborrande industrin”, även globalt sett, ännu inte fått visa vad den kan vad gäller borrhåll av mycket vida borrhål till t.ex. 4000 m djup i kristallint berg, t.ex. granit. Beställning av en sådan uppgift, trots årtionden av diskussioner och utredningar har helt enkelt inte kommit till stånd vare sig i Sverige eller utomlands. Erfarenhet av ett pilotprojekt borde vara den ofrånkomliga förutsättningen för varje seriös bedömning av de tekniska möjligheterna att genomföra djupa borrhål med kriterier för kärnavfallslagring. Det är inte möjligt, i en så komplex fråga, att avgöra och försvara ett sakligt grundat omdöme avseende möjligheten att borra med mycket stor diameter till t.ex. 4000 m ifall man inte kan referera till sådan verklig erfarenhet.

Bedömning av genomförbarheten för borrhåll av djupa och vida borrhål har hittills utgått från erfarenhet av *likartade borrhållsuppdrag med andra syften och förutsättningar*. Oftast har genomförbarhetsbedömningen gjorts utifrån en ren skrivbordanalys med utgångspunkt från erfarenheter från främst prospektering efter olja & gas eller från djupa vetenskapliga borrhåll.

Hittills uppnådda borrhåll i respektive borrhållsdimension utgör med andra ord inte ett mått på vad tekniken som sådan förmår utan svarar mot den målsättning som det aktuella jämförelseprojektet hade.

Vad gäller frågan om var borrhållstekniken står idag, som var en av huvudfrågorna vid mötet, uppgavs från en tillverkare ungefär följande slutsats: ”tekniken för borrhåll av stora och djupa borrhål till önskat djup i hårt berg är greppbar”. Undertecknads egna erfarenheter från bl.a. borrhåll till ca 3700 m utanför Lund i mycket hård gnejsgranit, dock i en mindre dimension och med ett helt annat syfte, styrker industrins uppfattning.

Kunskapen, globalt sett, att borra till betydligt större djup än 4000 m, i mindre dimensioner, är omfattande och utförs mycket ofta inom olja & gas prospekteringen. Detta innebär att tekniska system är förhanden för att hantera t.ex. laster, tryck och temperatur i sådan ”djupmiljö”. Det saknas däremot efterfrågan att borra mycket *vida* borrhål, t.ex. >750 mm, till > 4000 m djup i hårt kristallint berg t.ex. granit. Inom prospektering efter geotermisk energi har man vid åtskilliga tillfällen borrhåll djupare än 4000 m under extrema temperaturförhållanden och i kristallint berg. Dimensionen har då vanligtvis varit mellan 8 ½ - 17 ½ tum (215 – 445 mm) till fullt djup. I åtskilliga fall har produktion av ånga pågått från dessa brunnar under > 25 år.

Till frågan om med vilken precision man kan borra ett eller flera djupborrhål hänvisas till den styrda borrhållsteknik som utvecklats för att borra olje- och gasbrunnar i innehållande flera tiotals brunnar inom en begränsad yta på djup ofta om mer än 4000 m. Frihetsgraden är i praktiken total vad gäller styrning av den borrhållande utrustningen. Från vertikala enskilda borrhål till gradade borrhål i grupp och till utborrning i horisontell riktning från en vertikal utgångspunkt. I sådana borrhållsinstallationer är man kapabel att installera komplexa produktionsverktyg för produktion av olja och gas från specifika skikt i berggrunden. För att kunna genomföra dylika installationer och demonteringar krävs verktyg och teknik med extrema krav på säkerhet och precision. Det får anses som sannolikt att flera av dessa installationstekniker kan anpassas för annat krävande precisionsarbete som t.ex. installation av kapslar med kärnavfall i djupa vertikala eller gradade borrhål.

SKB's utredningar om borrh teknik

Inför utfrågningen har jag haft möjlighet att gå igenom såväl internationellt underlag som det som främst SKB tagit fram under ca 20 års aktivitet kopplat till frågan om möjligheten att kunna borra till stort djup, i stor dimension.

Jag finner därvid att det endast finns två utredningar som kan hänföras till kategorin ”borrteknisk utredning”. Det är: Juhlin C. & Sandstedt H., 1989 och Harrisson T. SKB, R-00-35, 2000. I synnerhet Juhlin et al. gör en mycket noggrann utredning med hjälp av en amerikansk borrh teknikkonsult och presenterar ett väl genomarbetat förslag till genomförande inklusive kostnadsberäkningar. Utredningen omfattar för övrigt också ett omfattande material rörande hydrogeologiska egenskaper och särdrag på de djup i urberget som lagring och borrh ning avses att utföras vid. Utredningen får betecknas som en milstolpe för sitt syfte och har lagt grunden för mycket av uppfattningen om de hydrogeologiska förhållandena på stort djup i den svenska urberggrunden. Vad gäller den borrh tekniska utredningen blev den tyvärr alltför ensidigt påverkad av vad borrh tekniken för letning och produktion av olja & gas då stod.

Utgångspunkten togs i konventionell rotationsborrh ning med s.k. mud. I teknisk mening en s.k. *Överbalanserad borrh ningsmetodik*. Resultatet av utredningen kom fram till en oerhört kostsam operation för att borra till önskade djup. Tiden för att borra blev så orimligt lång att kostnaden för ett 4000 m borrh hål blev minst 250 MSEK i dåtidens pengar. En för ändamålet oacceptabel kostnadsnivå. Tyvärr beaktades av någon anledning inte andra borrh tekniker, t.ex. *Underbalanserad borrh ning* (t.ex. rotationsborrh ning med luft) vid detta tillfälle. Även om metoden inte var vardagsvara vid den tiden så hade den under flera årtionden praktiserats i västra USA för geotermiska borrh ningsändamål. Det får ses som ytterst olyckligt ur utredningssynpunkt att man icke fick möjligheten att utreda detta alternativ också vid den tidpunkten. Utredarna 1989 betonade även vikten av att pilotförsök kom till stånd men därav blev inget.

Resultatet av 1989 års utredning har legat som referens vad avser djupborrh ningstekniken i praktiken till idag eller åtminstone till år 2000, se nedan. Man ställde sig under lång tid aldrig frågan om den teknik och de extremt höga kostnader som utredningen 1989 angav verkligen var adekvata. En serie av senare utredningar, utförda med olika kopplingar till frågan om djupborrh ningens vara eller icke vara har gång på gång hänvisat till den gamla utredningen utan att man sakligt ifrågasatt relevansen av 1989 års borrh tekniska utredning.

År 2000 presenterar emellertid Harrisson T, vid borrh företaget Deutag i Tyskland, på uppdrag av SKB, en mindre utredning om *Underbalanserad borrh ning* till 4000 m med stor dimension. Utredningen är tekniskt sett tämligen knapphändig och främst baserad på skrivbordsdata. Icke desto mindre belyses för första gången i SKB's regi användandet av underbalanserad borrh ning. Genomförbarheten vad avser borrh ning till ca 4000 m i mycket stor dimension bedöms av Harrisson i teknisk mening som möjlig trots att företaget vid det tillfället uppenbarligen hade högst begränsad egen erfarenhet. Harrissons kostnadsbedömning, 45 MSEK per borrh hål, får dock anses ligga klart i underkant med utgångspunkt från erfarenheterna från bl.a.

Lundaborrh ningen. Denna borrh ades till 3700 m i hårt kristallint berg och i en mindre dimension och behandlas längre fram i denna rapport. I SKB's uppföljande rapport 2006 (R-06-58) görs en bedömning av hur många borrh hål det skulle åtgå med Harrissons rapport som underlag.

Man använder därvid uppenbarligen de minst gynnsamma förutsättningarna och ger därför en för alternativet Djupa borrhål ensidigt negativ bild. Rapporten från 2006 kommenteras längre fram i denna rapport.

Djupborrningarna i Siljansringen under 1980 talet bör omnämnas. Två hål borrades vilka är de djupaste borrhålen i urberg som hittills utförts i Sverige. Man borrade till mer än 6000 m djup och använde *överbalanserad borrhåls teknik*. Framdriften var långsam, kostnaderna blev höga och man hade stora tekniska problem. Viktig erfarenhet vanns emellertid om djupborrning i hårt berg.

Kärnavfallshantering i ett internationellt perspektiv

De flesta länder förespråkar någon form av geologisk deponering av avfallet. Mer eller mindre fantasifulla förslag har kommit till genom åren t.ex. i djuphavssedimenten, i magma under vulkaner osv. Riskabla och okontrollerbara alternativ som inte ses som seriösa. Den kanske vanligaste konceptformen idag är den som bl.a. SKB utarbetat innebärande deponering i bergrum och tunnlar (se nedan). Alternativet deponering i mycket djupa borrhål har under lång tid utgjort ett av de vanligaste alternativen. Graden av utredning och utförda fullskaleförsök av djupa borrhål får tyvärr betraktas som ytterst ofullständig. Alternativet att inte deponera utan lagra avfallet på ett ytnära sätt finns också men har av SKB setts som en säkerhetsrisk och inte utretts i någon större utsträckning. Den mest genomarbetade konceptformen internationellt sett är geologisk deponering till måttligt djup som bär stora likheter med SKB-3 konceptet.

Till dags dato har dock ännu inget land fattat slutligt beslut om var och hur det radioaktiva avfallet skall hanteras. I Sverige har SKB under många år utarbetat ett koncept, som idag benämns SKB-3, vilket går ut på deponering i bergrum och tunnlar på ca 500 m djup i det svenska urberget. Avancerade system för inkapsling av avfallet har utarbetats så att spridning till biosfären av radionukleider skall försvåras.

Nationellt och internationellt ses SKB's alternativ som ett trovärdigt och genomförbart koncept. Platser för deponering, som undersöks sedan en längre tid, är Forsmark i Östhammars kommun samt ett område norr om Oskarshamns stad, nära kärnkraftverket. Finland avser att göra i stort sett som SKB och befinner sig beslutsmässigt, så vitt jag uppfattat det, något före Sverige i processen mot slutlig deponering. Det svenska konceptet innebär lagring i grundvattenmiljön och kallas därför för det "våta" alternativet.

I USA har man två koncept, ett för avfall från kärnkraftverken och ett för främst avfall från kärnvapenindustrin. I det första har man valt att arbeta med lagring/deponering i ett bergmassiv, Yucca Mountain, där tunnlar och bergrum byggs. I detta fall sker lagring ovanför grundvattennivån och kallas därför det "torra" alternativet. Viss kritik har framförts mot att alternativet inte är säkert med avseende på spridning till biosfären med tanke på bl.a. ändrade klimatförutsättningar innehållande våtare klimat med ändrade grundvattenförhållanden, oxidations- och erosionsprocesser som följd.

I det andra konceptet, i New Mexico, deponerar man avfallet från kärnvapenverksamhet i bergsalt på ca 700 m djup i horisontella gallerier. Saltformationen överlagras av en relativt tät formation om ca 150 m mäktighet. Även i detta fall anförs idag oro för att klimatförändringar kan riskera säkerheten hos deponien med t.ex. spridning till biosfären (Chapman & Gibb, 2003). Djupa Borrhål berörs även av USA så sent som 2006 (DOE m.fl.). Bibehållen

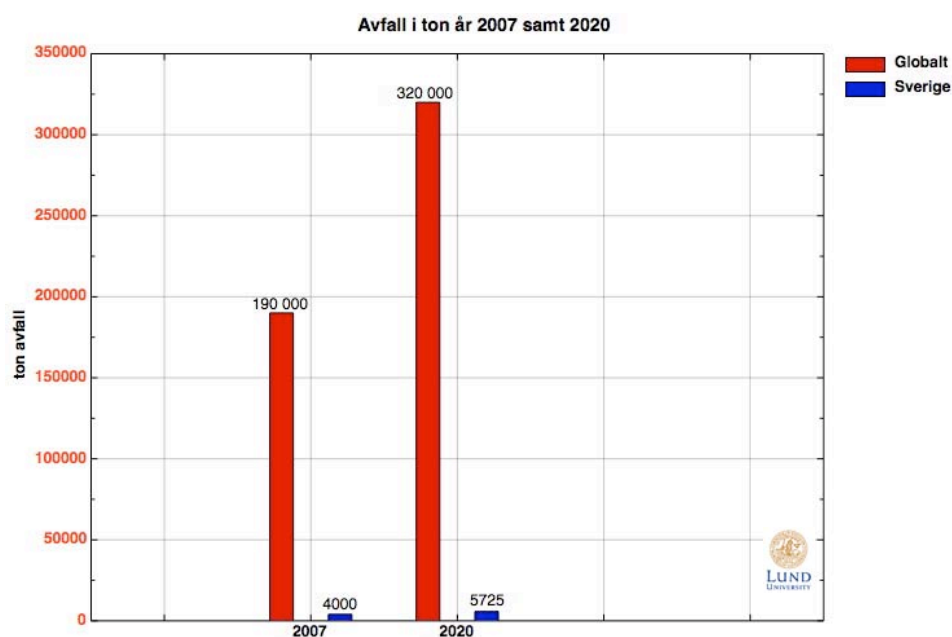
flexibilitet så länge som möjligt samt liten risk för spridning av nukleider till biosfären anföras som bärande argument.

England har i princip kommit fram till en uppfattning som påminner om SKB-konceptet. Beslut saknas dock ännu. Man påpekar också behovet av att behålla konceptet djupa borrhål som ett möjligt alternativ för framtida behov och med hänvisning till kravet att vidmakthålla framtida beslutsmässig flexibilitet (CoRWM 2006 & Nirex 2004).

Frankrike intar en särställning i det att man upparbetar sitt avfall och därför blir mängden avfall ytterst liten och behovet av att fatta beslut om hur slutlig lagring skall hanteras har ingen akut agenda men man arbetar efter koncept som innebär geologisk deponering/lagring. Även här nämns djupa borrhål i termer om ”särskilda behov och framtida flexibilitet”.

Kärnavfallet - En internationell utblick avseende mängder

För att kunna sätta Sveriges kärnavfallsproduktion i ett större perspektiv har en jämförelse med den globala situationen vid två tidpunkter tagits fram med hjälp av data från främst IAEA (Annual Report, 2006). Det antas att den avfallsmängd som ackumulerat till år 2020 är den mängd som SKB planerar att omhänderta i den anläggning som man avser söka tillstånd för 2009 (Fig. 1).



Anm: exkl. upparbetat

LB.20070228. Källa IAEA m.fl.

Fig. 1. Svensk och internationell kärnavfallsproduktion 2007 och 2020.

De radionukleider som präglar avfallet är ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu och ^{99}Tc .

Det finns olika slags avfall där bl.a. graden av radioaktivitet varierar. Frågan är också ifall avfallet skall deponeras på ett definitivt sätt eller om man i framtiden skall återvinna det. Tillfälliga lösningar av flera slag förekommer i länder som använder kärnkraft och länder där avfall uppstått från kärnvapenhantering.

Alternativet Djupa borrhål

I Sverige har främst SKB berört frågan från och till sedan åtminstone 1989. Man har hittills ansett att tekniska problem kopplade till borrhåstekniken, installationsmoment samt höga kostnader varit alltför överskuggande för att alternativet skall vara intressant. En del av underlaget för den uppfattningen redovisades ovan.

Djupa Borrhål berörs, så sent som 2006, i flera nationella utredningar bl.a. i Storbritannien och USA. Bibehållen flexibilitet så länge som möjligt samt liten risk för spridning av nukleider till biosfären anses som bärande argument.

I USA har man generellt sett lång tradition av produktions- och undersökningsborrningar av de mest skiftande slag och till stora djup. T.ex. i samband med lagring av kärnavfall och vid nukleära bombförsök i djupa borrhål. Enligt uppgift har försöken utförts vid omkring 1300 - 1900 m djup. Viktig erfarenhet har alldeles säkert vunnits, bl.a. i de s.k. Mercury-projekten, men tillgång till information är begränsad. I en del av försöken borrades med en mycket stor dimension, > 1 000 mm, dock till begränsat djup. Det föreligger ingen egentlig samsyn om vad som är avgörande fördelar resp. nackdelar med att lagra avfall i djupa borrhål.

Uppfattningarna går starkt isär. En viktig egenskap som ett mycket djupt förvar innebär, som sannolikt de flesta också håller med om, är att man väsentligt reducerar risken för kontakt med biosfären (Fig. 2.)

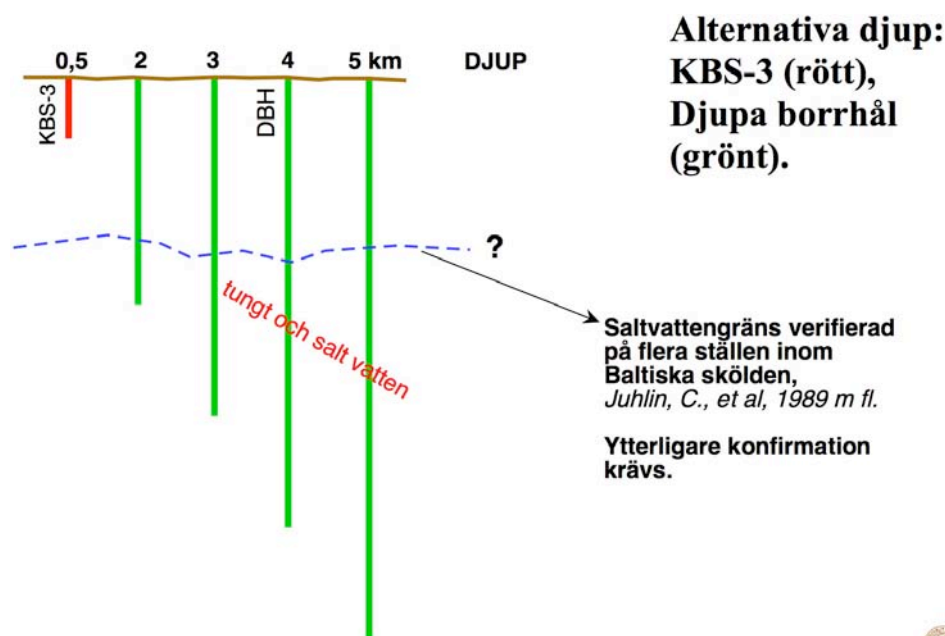


Fig. 2: Saltvattengränsen i förhållande till olika deponeringsdjup.

I det fall de hydrogeologiska förhållandena utgörs av ett densitetsstyrt, skiktat saltvatten på djup större än ca 1500 m, som i trakten av Oskarshamn, skulle risken för spridning av nukleider till ytnära delar starkt reduceras om deponering sker i djupa borrhål. Med en hydraulisk konduktivitet för graniten i fråga om $< 10^{-11}$ m/s så rör sig grundvattnet på djup om > 4000 m, som mest ett par hundra meter på 1 million år.

Förekomsten av saltvattensiktet är med säkerhet endast påvisad i ett djupare borrhål men det får anses som sannolikt att förhållandet gäller även för ett större område. Bristen på verifikation i fler borrhål är dock en begränsning för resonemangets mer allmänna giltighet. Djupt liggande saltvatten har påvisats på fler ställen i Sveriges berggrund men de geologiska förutsättningarna är inte jämförbara med förhållandena vid t.ex. Oskarshamn.

Beroende på avfallsets temperaturtillstånd ser man internationellt två olika deponeringsfall för de mycket djupa borrhålen. Det ena benämns "Low Temperature Very Deep Disposal, LTVDD" där avfallet har en temperatur av ca 350°C. Det andra benämns "High Temperature Very Deep Disposal, HTVDD" och där kan temperaturen bli ca 850 C° (Fig. 3). I det första fallet utgör behållaren och den geologiska formationen de aktiva barriärerna och är den deponeringsform som vanligtvis avses för de mycket djupa borrhålen. För det andra fallet är tanken att avfallsets höga temperatur smälter den omgivande bergmassan, i princip en geologisk magmatisk process. När temperaturen sedan sjunker sker en kristallisation med "förglasning" som följd. Tanken är att nukleiderna i detta nya tillstånd innesluts och fixeras. För delar av processen har laboratorieförsök utförts i England varvid konceptet till dels har verifierats (Chapman & Gibb, 2003).

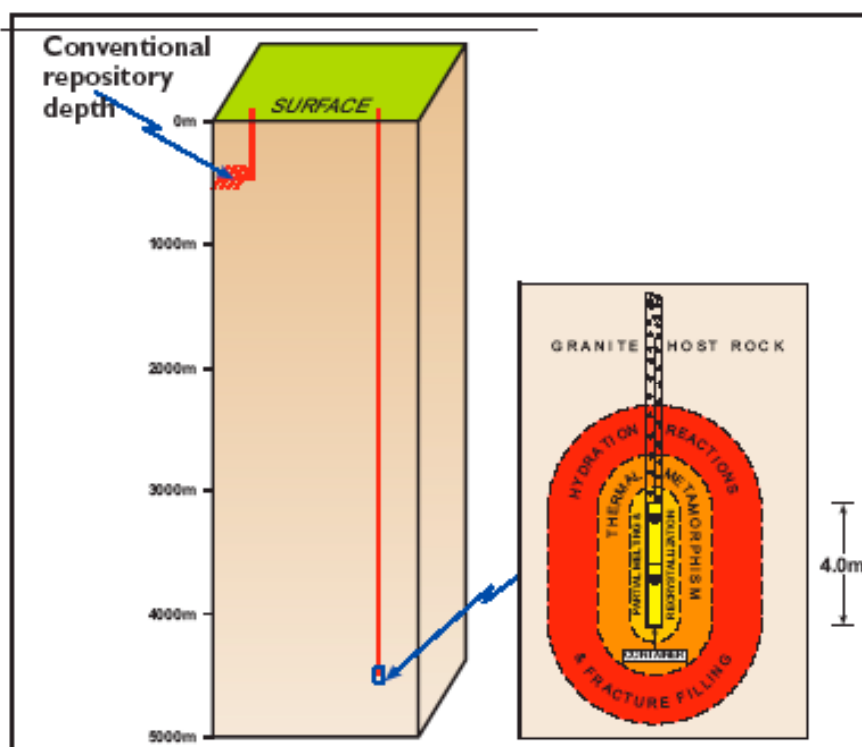


Fig. 3. "High Temperature Very Deep Disposal", ledande till mineralogisk inkapsling av avfallet (Chapman & Gibb, 2003).

Vad styr antalet Djupa borrhål för det svenska avfallet?

Det är uppenbart vid all form av planering för lagring/deponering att man måste känna till hur mycket som skall tas om hand, vad som skall tas om hand samt hur omhändertagandet fördelar sig i tid. I Sverige finns idag ca 4000 ton avfall som är tillfälligt omhändertaget och år 2020 beräknas ytterligare 1725 ton ha producerats dvs. totalt 5725 ton. År 2050 beräknas ytterligare 3575 ton ha skapats eller totalt 9300 ton.

Under åren har ett antal olika behållare med olika diameter och längd diskuterats för deponering i borrhål (SKB TR-9-04, 1992. Passtudien). För varje given kapseldiameter har anförts att det krävs en borrhålsdiameter som är 200 – 250 mm större än kapselns diameter. I Fig. 4 visas de flesta kombinationer som SKB genom åren använt som exempel i sina utredningar. Alternativen med grön ring i figuren har tillförts av undertecknad för att visa att redan med de givna förutsättningarna kan borrhålsdiameteren reduceras avsevärt om man väljer mindre borrhålskronor. Borrhålets diameter har mycket stor betydelse för val av borrhålsrustning, tillgång till utrustning, för den totala borrhålstiden och för kostnaden.

Kapslarnas/bränsleelementens **diameter** styr i högsta grad vilken borrhålsrustning som krävs. Därför bör möjligheten till optimering för Djupa borrhål värderas ytterligare.

Till idag finner man följande alternativa dimensioner i SKB's rapporter:

325 mm /BE
390 mm /BE
500 mm /KA

Borrhålsdiameterar som diskuterats är främst:

800 mm
750 mm
men t.ex. både
610 mm och 560 mm finns.

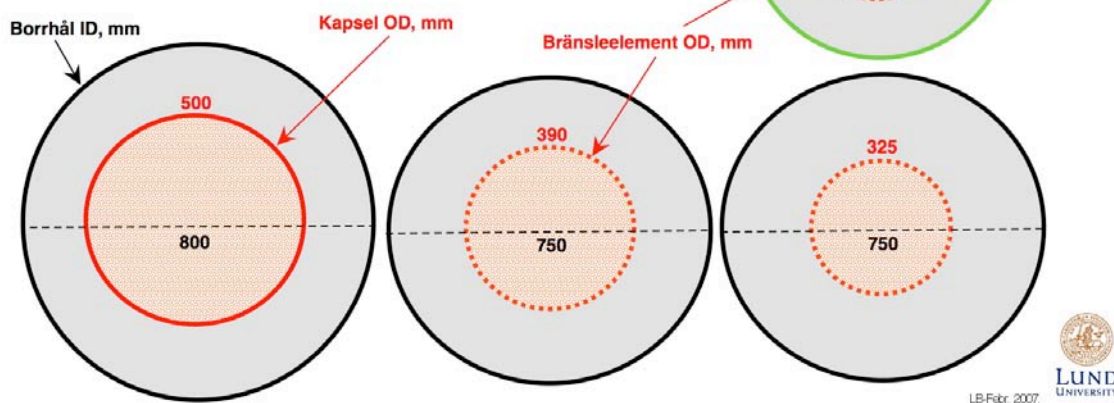
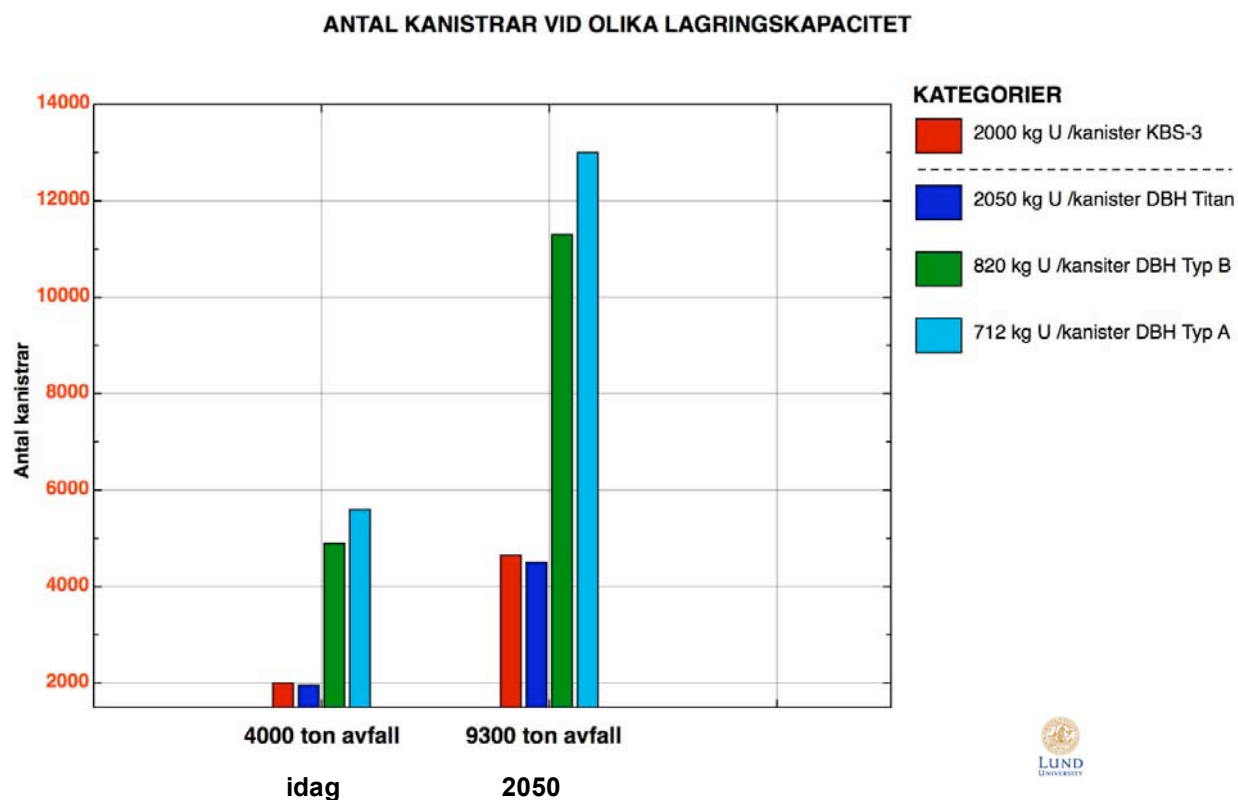


Fig. 4. Borrhålsdimensioner och kapseldimensioner.

Med ingångstal från mängden avfall som skal deponeras, tillgängliga/möjliga kapseldimensioner och kapslarnas kapacitet (kg Uran/kapsel) kan man uppskatta hur många

kapslar/kanistrar av vart slag som behövs för den mängd som finns omhändertagen idag respektive den som beräknas finnas 2050 enligt dataunderlag från SKB's utredningar. För att illustrera förhållandet hänvisas till Fig. 5 nedan. Man kan se att den s.k. KBS-3 kanistern har samma kapacitet som den mest effektiva borrhålskanistern DBH Titan nämligen ca 2000 kg uranavfall. Följden blir att antalet kanistrar totalt sett för de respektive avfallsscenarierna 2007 resp. 2050 blir ungefär detsamma för KBS-3 kanistern som för borrhålskanistern DBH Titan.



LB.20070228.Källa SKB mfl

Fig. 5. Kanistrar och lagringskapacitet vid olika avfallstillfällen.

Det anförts i ett antal utredningar av SKB att alternativet med Titankapsel inte skulle vara korrosionsbeständig i den aktuella miljön. Såvitt bekant har man inte tagit fram något alternativ till den effektiva Titankapseln vars diameter och höga lagringskapacitet tillåter deponering i betydligt smalare borrhål. Det borde annars vara en central uppgift för alternativet Djupa borrhål.

Hur många djupa borrhål krävs för att ta hand om Sveriges kärnavfall?

Förutsättningar som avgör hur många borrhål som åtgår för att ta hand om kärnavfallet är främst:

Lagringslängd, Antal meter av borrhålets längd som är tillgänglig för lagring.
1500 - 3000 m.

Lagringsdjup, Djupintervall inom vilket lagring är aktuell.
2000 - 5000 m.

Borrhålsdiameter ID, (även större borrhål är möjliga t.ex. 914 resp. 1066 mm)
560 - 800 mm

Kanister/kapsel diameter OD. (hittills utredda förslag)
325 – 500 mm

Akkumulerat avfall (2007 resp. 2050)
ca 4000 resp. ca 9300 ton.

Kapacitet radioaktivt avfall, kg U / kanisterkategori
712 – 2050 kg U / DBHA+B, KBS-3, DBH Titan

Kapsel/kanisterns längd m – omkring 6 m.

Antalet borrhål beror som synes på flera olika faktorer.

Främst kapsels/kanisterns kapacitet, kg U/kapsel, och indirekt borrhålets diameter. Tillgänglig lagringslängd i borrhålet och indirekt borrhålets djup är avgörande för hur många borrhål som går åt för att ta hand om t.ex. de 4000 ton som till idag ackumulerat som kärnavfall i Sverige eller 9300 ton som beräknas ha producerats fram till ca 2050.

Borrhålets diameter och borrhålslängd har avgörande betydelse för val av bormetod, borrarutrustning, kringutrustning samt för kostnaden för borrhållningen.

Överslagsberäkningen i SKB rapporten R-06-58, 2006 anger att **45 borrhål** krävs enligt valda förutsättningar för år 2050. Emellertid kan man med samma förutsättningar, men baserat på bättre lagringskapacitet med DBH Titan kapsel enligt data givna av SKB se att det räcker med **15 borrhål** något som inte redovisas av SKB.

För scenariot med dagens avfallsmängder, dvs. ca 4000 ton, skulle med samma antaganden **< 10 borrhål** vara tillräckligt. En väsentlig skillnad. I SKB's exempel förutsätts en borrhålsdiameter om ca 800 mm, en lagringslängd av ca 2000 m och ca 300 kapslar/borrhål. Sannolikt har man valt den minsta kapselkapaciteten dvs. 712 kg U/kapsel. Ifall man väljer den "bästa", 2050 kg/kapsel, blir resultatet som synes ett helt annat. Ifall man använder en lagringslängd om 3000 m istället för 2000 m blir lagringskapaciteten naturligtvis ännu bättre.

Borrhålsdiameterar om t.ex. 560 mm eller 610 mm har inte utretts trots att mindre kapseldimensioner, 325 mm, finns redovisade. Lagringskapaciteten per kapsel reduceras med ca 2/3 och därmed blir antalet borrhål som krävs för 4000 ton **ca 20 stycken**.

Det bör i sammanhanget uppmärksammas att det ur borrhåls synvinkel är en mycket stor skillnad att borra ett hål i 560 mm dimension till 4000 m jämfört med ett borrhål i 800 mm. Skillnaden består i väsentligt mindre tidsåtgång, färre moment och betydligt större tillgång till beprövad utrustning och därmed reducerade kostnader.

Det framgår av genomgången ovan att det finns betydligt fler alternativa situationer än vad som togs med i den sammanfattande rapporten 2006. Skillnaderna beroende på vilka förutsättningar man ansätter är så stora att det i det avseendet torde påverka helhetsbedömningen av borrhålsalternativet som sådant.

Var står borrhåls tekniken idag för en sådan uppgift?

Utifrån skrivningen angivet i rubriken ovan sammanfattas ett par saker så här halvvägs i rapporten.

Ett antal utredningar har gjorts i SKB's regi genom åren omkring Djupa borrhål, dess användbarhet och lämplighet som slutförvarslösning. Utredningarna är i ett fall, Juhlin et al. 1989, grundligt utförd vad avser genomförbarheten och kostnadsbilden. Tyvärr valdes endast en borrhåls metod för analysen och den metoden är icke relevant för uppgiften. Resultatet blev därför missvisande såväl ur teknisk som ur kostnadsmässig synvinkel. Resultatet har kastat sin skugga väldigt länge över senare utredningsarbeten och intresset att utreda alternativet Djupa borrhål ytterligare. En nyare men betydligt mindre ambitiös utredning kunde år 2000 konstatera att djupa vida borrhål bör borraras med luft. En i och för sig sedan länge känd metodik som tekniskt sett går ut på att borrhåls tekniken hydrostatiskt sett utförs som underbalanserad borrhåls tekniken. En mycket lägre kostnadsbild presenterades av Harrison 2000 men i utredningen SKB R-06-58 har man, såvitt framgår, inte fram någon kostnadsberäkning för det fallet.

Borrhåls tekniken idag, för utförande av djupa och vida borrhål i kristallint berg företrädesvis i granit, är hittills inte utredd ej heller prövad i sådan omfattning att en objektiv bedömning kunnat presenteras för de svenska myndigheterna.

På den negativa sidan har främst tekniska problem anförts vad avser t.ex. möjligheten att överhuvudtaget kunna borra i hårt berg, till stora djup och med stor dimension. I tillägg anförts att installationsprocessen av bränslekapslar i borrhål är en högriskoperation vilket i sig anförts som tillräckligt skäl för att avstå från alternativet. Andra menar att deponering i borrhål omöjliggör återvinning i en framtid för den händelse teknikutvecklingen skulle motivera det.

Kostnadsmässiga argument anförts ofta som förhinderande skäl till att ytterligare utreda alternativet Djupa borrhål. Ett icke helt övertygande argument eftersom hittills gjorda utredningar om Djupa borrhål icke nått en relevant nivå rent teknik- och metodmässigt sett. På grund härav har nästintill "arkeologiska" kostnadsuppfattningar bitit sig kvar i utredningsprocessen och icke belyst de Djupa borrhåls alternativstatus på ett objektivt sätt. Till trots för Harrisons utredning 2000 vilken faktiskt till slut identifierar borrhåls tekniken med tryckluft som en framkomlig väg görs ingen konsekvent uppdatering av vad kostnaden skulle bli med detta alternativ.

Istället hänvisar man i SKB R-06-58 till vad det skulle kosta att föra fram alternativet Djupa borrhål till "samma" kunskapsnivå som gäller för KBS-3 alternativet. Det är kanske inte den i sammanhanget mest relevanta vägen att gå för att belysa alternativet Djupa borrhål och dess kostnader.

I de kommande kapitlen kommer en del av de utestående teknikfrågorna att belysas med exempel från nyligen utförda borroperationer. Kostnadsbilden kommer även att belysas. Först för perspektivets skull lite grand om bl.a. borrhåtteknikens historia

Allmänt om borrhåtteknik

Man vet inte med säkerhet när eller var den första "maskinella" tekniken att borra genom jord och berg uppstod. De flesta anser dock att det var i det gamla Kina som man först var kapabel att ta sig mot djupen med hjälp av en bormaskinliknande utrustning. Utrustningen var mycket lik vad vi idag benämner Linstötbormmaskin. En mycket enkel maskin som med hjälp av en fallande mejsel successivt "hackar" sig ner genom jord och berg. En starkt förenklad teckning visas i Fig. 6 nedan och en samtida kinesisk Linstötmaskin framgår av Fig. 7.

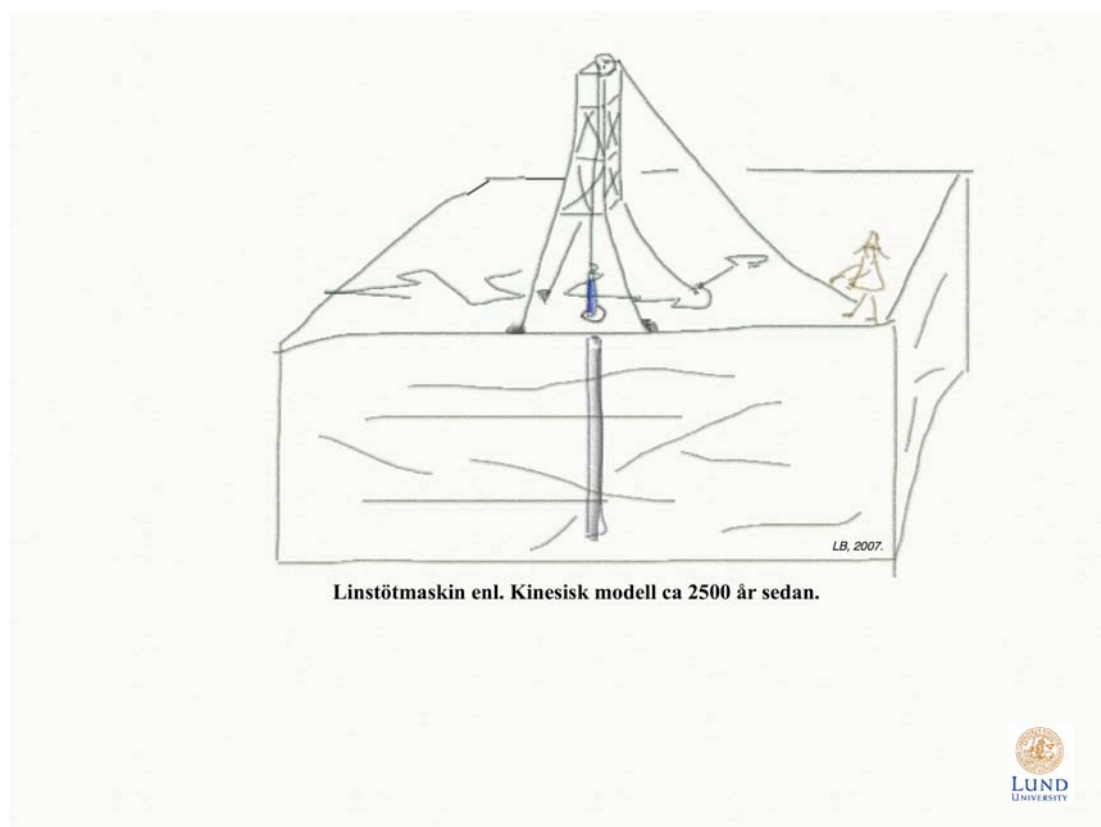


Fig. 6. Skiss av Kinesisk bormaskin använd för ca 2500 år sedan.

Bormaskinens stativ var sannolikt byggd i bambu och det borrhållande, snarare hackande, verktyget var troligen utformad som en cylinder gjord av en gröv bambustam. I änden på bamburöret satt hårda mineralflisor, troligen kvarts, så att det fallande röret effektivt kunde hacka sönder materialet i borrhålets botten. Genom en enkel men sinnrik klafffunktion inuti

röret pressades det lösborrade materialet upp genom röret när det föll mot botten i hålet. När man efteråt drog röret baklänges uppåt i hålet stängdes klaffen och materialet stannade i röret. Momentet upprepades till bamburöret var fullt och då tog man upp det till markytan och tömde det. På så vis höll man på tills man kom till de djup man önskade. Enligt de nedteckningar man funnit i kinesiska arkiv har man lyckats komma så djupt som ca 1500 m. En i sanning imponerande prestation. Syftet med borrhningarna var troligen att finna artesiskt grundvatten i arida områden i västra Kina.



Fig. 7. Samtida enkel kinesisk Linstötbormaskin (Källa: European Geoscience Union, 2004).

En modern fullt mekaniserad version av den gamla kinesiska borrar metoden framgår av Fig. 8. Linstötmaskinen på fotot utför brunnborrning år 2007 i Nicaragua. Borrningen utfördes till ca 350 m djup med en diameter om ca 445 mm.



Fig. 8. Modern Linstötmaskin på brunnborrningsarbete i Nicaragua vintern 2007. Foto förf.

En modern anläggning för borrning till stora djup och stor dimension är en arbetsplats som påminner om en industriverksamhet. Förutom själva borrarutrustningen behövs bl.a. pumpar, kompressorer, kraftverk, system för hantering av borrar kax, tankar för olika ändamål, dammar för lagring av borrar slam, miljöskyddsutrustning, brandskyddsutrustning, verkstäder av flera slag, transportfordon mm. Den yta som allt detta tar i anspråk är från ca 1 hektar och uppåt.

Vid val av borrar maskin (mast, understruktur, kraftpaket för lyft och rotation) är i praktiken det tyngsta tänkbara lyftet som kan bli aktuellt den typiskt dimensionerande parametern. Det är vanligtvis tyngden av längsta avsnittet av foderrör eller längsta strängen av borrar stål hängande i masten. För de borrar djup i stor dimension som diskuteras för kärnavfallsdeponering t.ex. 4000 m djup behövs en borrar rigg med en lyftkraft av minst 300 ton. Kapaciteten för att hantera vridkrafter över t.ex. borrar strängen bör svara mot en motoreffekt om minst 2000 kW. Ett system med s.k. "Top Head Drive" är att föredra jämfört med att vridkraften sitter i borrar bordet. En effektivare hantering av borrar stålen är ett av skälen att välja en "Top Head Drive".

Vanligtvis krävs tillstånd från de lokala miljöskyddsmyndigheterna i kommunen eventuellt även från Länsstyrelsen för utförande av stora borrar operationer. Det är frågan om buller, störande transporter, risk för spridning av borrar kemikalier till mark och grundvatten mm som prövas.

Ett exempel på hur en stor borrar operation kan se ut idag framgår av Fig. 9a och 9b.



Fig. 9a. Modern borrhälsplats under full operation för stora borrhälsdjup, ca 4000 m. Lund 2002/2003.



Fig. 9b. Borrhälsplats för borrhälsning till moderata djup ca 2000 m. Lund 2004.

Borrmetoder

Val av borrar metod styrs av syftet för borrarningen. För de enklaste fallen rör det sig om ren håltagning för sprängning, injektering eller liknade. Dylika tillämpningar är vanligast inom gruv- och anläggningsverksamheten.

En annan vanlig tillämpning av borrarning i jord eller berg är brunnborrning. Genom borrarningen skapas en rörbrunn som utgör den mekaniska förbindelsen till grundvattenmagasinet i undergrunden.

Ytterligare skäl till borrarning är utförande av mätningar t.ex. fysikaliska tillstånd i jord eller berg. Det upptagna borrhålet används därvid för att föra in mätsonder i bergmassan och fastställa t.ex. temperatur, grundvattenkvalitet eller bergets hållfasthet. Prospekteringsborrning är en annan vanlig tillämpning. Det rör sig om letning efter kol, olja, gas, geotermisk energi samt olika malmer och mineraler. Nära förknippat med prospekteringsborrning efter olja och gas ligger utförande av produktionsborrhål för olja, gas och geotermisk energi. I detta sammanhang utförs de djupaste, vidaste och mest komplexa borraroperationerna. Borrarningarna sker såväl till lands som till havs.

Borrarning för lagring och deponering av kärnavfall faller rent tekniskt nära verksamheten inom olje- och gasbollaringsindustrin, geotermiska borraroperationer och med delar av aktiviteterna inom gruvindustrin.

Med så olika syften är det lätt att förstå att såväl borrar teknik som metodik är olika och utförs på olika vis. Fysiskt handlar det också om utrustning som ryms alltifrån på ett lastbilsflak till en uppställning som behöver 2-3 fotbollsplaner. Man kan också mycket väl komma upp i en samlad vikt om allt från 500 till 50 000 ton.

Följande borrar metoder utgör de vanligaste inom respektive område omnämnt ovan. ÖB står för Överbalanserad borrarning och UB står för Underbalanserad borrarning. Bägge begreppen förklaras längre fram. Relevansen för kärnavfallsborrning anges i lämpliga fall.

1. Rotationsborrning med spolning / ÖB. (För vissa avsnitt vid djupa kärnavfallsborrhål)

2. Rotationsborrning med luft/skum / UB. (För djupa kärnavfallsborrhål)

3. Hammarborrning med luft/skum / UB. (För djupa kärnavfallsborrhål)

4. Mudhammarborrning / ÖB (hydraulhammare under utv. för stora dimensioner)

5. Wassarahammare/Vattendriven hydraulhammare för mindre dimensioner / Lätt ÖB borrarning.

6. Kärnbollarning / ÖB

7. Linstötbollarning – fallviktsprincip / Neutral eller lätt ÖB borrarning.

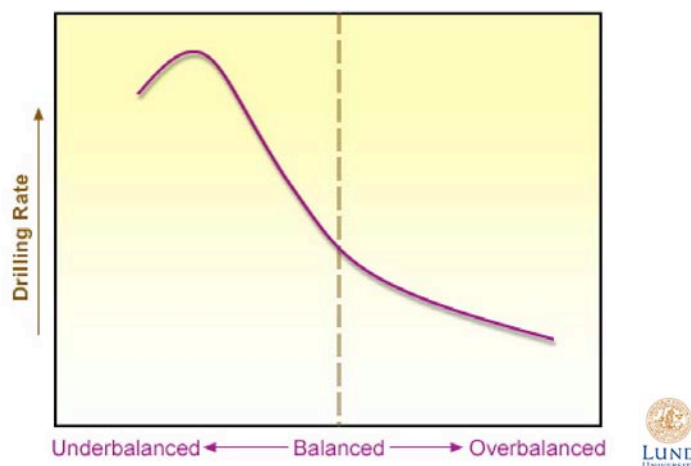
Oavsett borrar metod eller syftet med borrarningen är de geologiska parametrarna de viktigaste att ta hänsyn till för en lyckad borraroperation. Det är viktigt att borrarningen planeras efter bergartsammansättning och bergmassans strukturella, hydrauliska och mekaniska egenskaper.

Metod 1-3 enligt listan ovan är metoder som kan användas vid borrarning av djupa och vida borrhål. Metod 2 och 3 bedöms som bästa metoder för borrarning av borrhål för kärnavfall medan metod 1 kan komma att användas vid kompletterande insatser t.ex. vid öppning av en befintlig borrhålsdimension till en större dimension.

Under eller Överbalanserad borrarning

Begreppen har tidigare citerats under beskrivning av olika borrar metoder. *Under-* resp. *Överbalanserad* borrarning refererar till det hydrostatiska tillstånd som råder i borrhålet under borrarning. När vatten-/vätsketrycket i borrhålet är det samma som i omgivande jord- eller bergmassa är den hydrostatiska situationen neutral. När trycket eller fluidens densitet är lägre i borrhålet än vätsketrycket i omgivande formation har man en *Underbalanserad* situation och vice versa en *Överbalanserad* situation när förhållandena är de omvända.

I en underbalanserad situation reduceras de mothållande krafterna över borrhålsväggen och borrhålet kan när den geologiska formationen är dåligt konsoliderad riskera att bli instabil ifall det inte kläds in med skyddande foderrör etc. I hårt kristallint berg är bergmassan vanligtvis så hållfast att man kan borra underbalanserat utan att hamna i problem. Detta under förutsättning att operationen övervakas minutiöst samt att borrhålet rensas noggrant och ofta. Rent bergmekaniskt inträffar en ökning av bergspänningen i borrhålsväggen i takt med att borrhålet evakueras på vätska/vatten med hjälp av tryckluft. Bergmassan eller snarare bergarten blir sprödare och sönderdelas lättare då den utsätts för slag från t.ex. den slående borrhammarens borkrona. Resultatet för borraringsarbetet i underbalanserat tillstånd blir vanligtvis att neddrivningshastigheten blir högre än om borrhålet befunnit sig i överbalanserat tillstånd. Skillnaden är ofta stor, någonstans mellan 2-5 gånger snabbare penetration är vanligt (Fig. 10). Detta betyder mycket i tid när man skall borra djupa borrhål och man kan därför reducera kostnaderna avsevärt.



Förhållandet mellan det hydrostatiska trycket och borrarjunktshastigheten

LB.2007. LTH/unknown source

Fig. 10. Borrarjunktshastighetens koppling till det hydrostatiska trycket.

I fallet djupa borrhål för lagring av kärnavfall är två underbalanserade bormetoder för handen. Antingen rotationsborrning med luft och rullborkröna (Metod 1) eller hammarborrning med luft och slående borkröna (Metod 2). Användandet av borkning med luft, till stora djup, är generellt sett ovanlig. Olja & gasborkningsbranschen kan av säkerhetsskäl endast ytterst sällan använda sig av luftborkning på grund av explosionsrisken. Naturligtvis kan man använda sig av kvävgas för dessa tillämpningar, vilket också sker emellanåt, men kostnaden ökar då avsevärt.

Metod 1 har använts i stor utsträckning i USA vid prospektering och produktionsborkning för geotermisk energi. Oftast för ångproduktion vid höga tryck och temperaturer i intervallet 150-350°C. Djupen varierar vanligtvis mellan 1500 och 5000 m. Borkhålsdimensionen är vanligtvis inom intervallet 8,5 till 17,5 tum (215-445 mm). LTH har erfarenhet av att borkning med 12 ¼ tum (311 mm) borkröna till ca 3350 m i mycket hård gnejsgranit i samband med geotermisk prospektering i Lund 2002/2003. Penetrationshastigheten var då i medeltal 3 – 4 m/timme och borkningen utfördes i hårt berg under ca 1300 m borklängd. Borkningen fortsatte sedan till 3700 m med en 8,5 tums borkröna i ett måttligt underbalanserat tillstånd. Ett flödesschema av det system som användes i Lund framgår av Fig. 11 och 12.

Metod 2 har använts i mindre utsträckning för borkning till stora djup, i hårt berg. Det skall inte tas till intäkt för att metoden är mindre lämplig snarare att efterfrågan inte funnits. Det största djup borkrat som hammarborkning, med relativt stor borkröna, 12 ¼ tum (311 mm), som vi känner till är det utvecklingsförsök LTH och Lunds Energi utförde i samband med borkningarna i Lund 2002/2003 (Bjelm, Stanford 2006). I det sammanhanget användes hammarborkrutrustningen från 2878 till 2972 m djup, Fig. 13. En penetrationshastighet i klass med metod 1 uppnåddes dvs. ca 4 m/h.

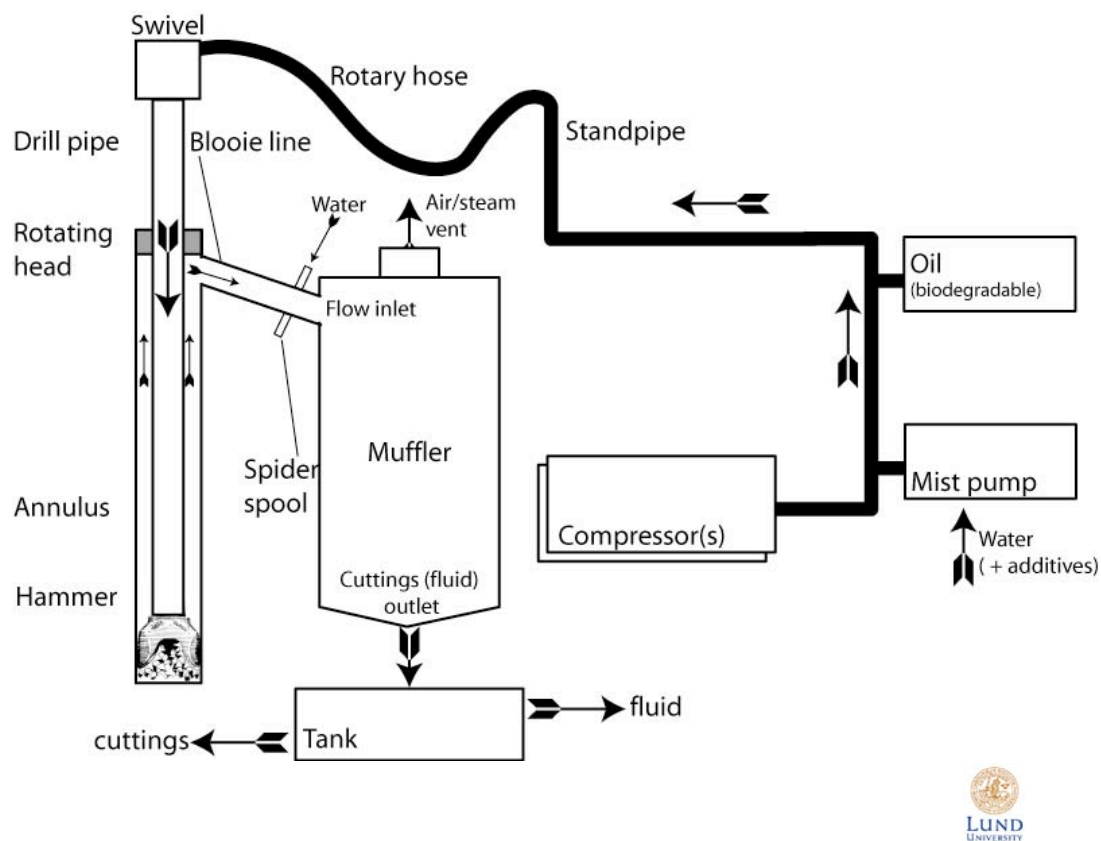


Fig. 11. System för underbalanserad borrhning använt i Lund 2002/2003.
Peter Jonsson, 2005. Teknisk Geologi, LTH/LU.



Fig. 12. Kompressoruppställning för luftborrning i Lund Febr. 2003.



Fig. 13. Hammarborrutröstning med 12 1/4" borrhkrona använd i Lund 2003.

Vid Lundaborrningen testades även en hydraulisk mudhammare vid ca 3600 m djup. Mudhammaren, med en 8,5 tums borrhkrona, var en prototyp tillverkad av bl.a. Wassara. Enligt tillverkaren uppförde sig utrustningen någorlunda tillfredsställande.

Vid borrhprojektet i Lund var internationellt sett en av de mest erfarna personerna inom underbalanserad borrhning projektets "Drilling Manager" som genomfört ett stort antal mycket djupa borrhål borrhade med luft, främst i USA. Inför skrivandet av denna rapport har ytterligare kontakt förekommit för kontroll av fakta samt för att få ytterligare teknisk information.

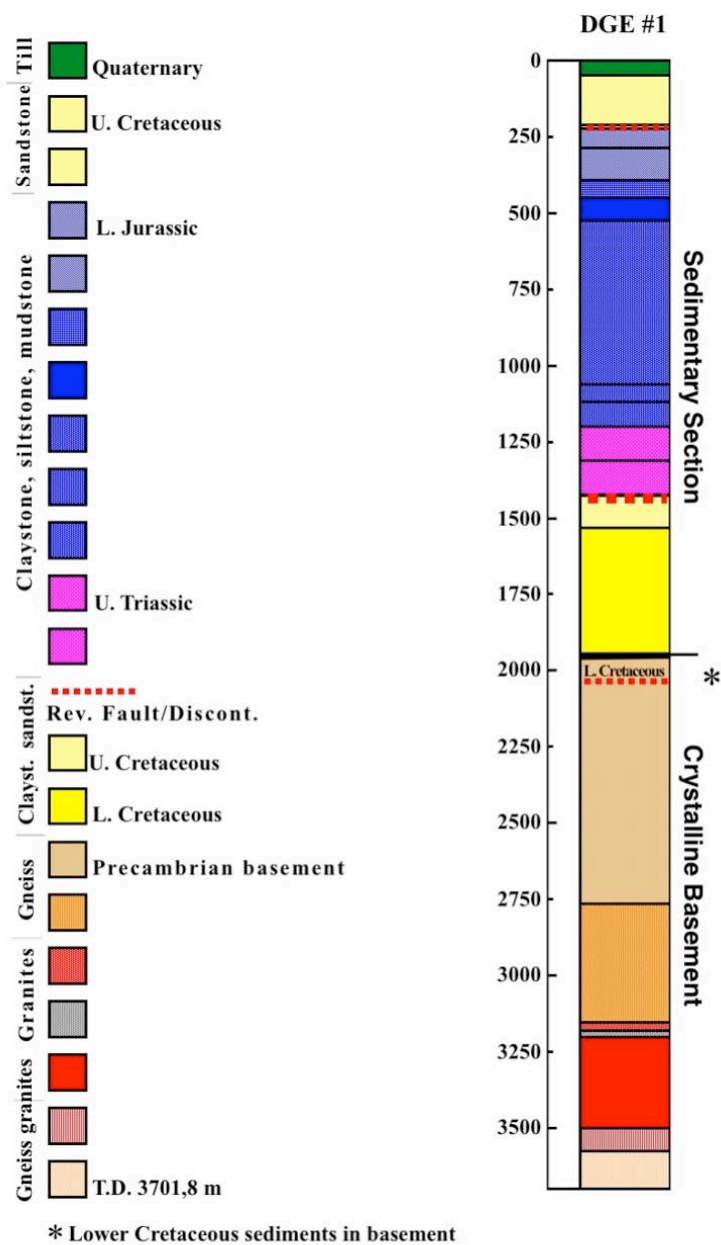
Geologi och andra förutsättningar för djupborrningsprojektet i Lund

Borrprojektet i Lund har refererats till ett flertal gånger i denna rapport. Det är därför på sin plats med en kort geologisk beskrivning och information om förutsättningar och målsättning med operationen. Viktigt för att rätt kunna bedöma värdet av uppnådda borrhållstekniska resultat med bäring på djupborrning för deponering av kärnavfall. Omfattande förundersökningar har utförts i området kring Lund under flera år av LTH (Alm & Bjelm Stanford 2006, Bjelm Stanford 2006 and Bjelm, & Rosberg GRC, San Diego 2006)

Inför djupborrningsprojektet, som syftade till produktion av geotermisk energi, utfördes dessutom en rad reflektionsseismiska mätningar för att på bästa sätt lokalisera borrhållplatser. Avsikten med projektet var att penetrera de djupgående spricksystemen utefter Romeleåsens sydvästra förkastningszon. Ett område som ingår i ett betydligt större strukturellt och tektoniskt komplex kallad Tornquistzonen. Genom att borra ca 3500 m, varav ca hälften i urberget, var prognosen att vattentemperaturen skulle kunna vara $> 100^{\circ}\text{C}$. I det fall spricksystemen dessutom är öppna med god vattenföring var tanken att hetvatten skulle pumpas upp och direktvärmewäxlas till det befintliga fjärrvärmenätet i Lund. Efter en del problem, med bl. a. fastborrning, kunde man slutligen nå 3700 m djup. Borrhållsdimension till ca 3350 m är $12\frac{1}{4}''$ (311 mm). Till 3700 m $8\frac{1}{2}''$ (216 mm). Merparten av borringen under ca 2050 m utfördes som underbalanserad borring (rotationsborring med luft och rullborrkrona). Även hammarborring med luft och slående borrhållskrona testades under ca 100 m med gott resultat (se tidigare borrhållstekniska kommentarer).

Högsta uppmätta temperatur var 85°C men vattenflödet i urberget var ytterst litet och helt otillräckligt för energiproduktion. Testerna flyttades därför längre upp i borrhålet till nivåer där sedimentära avlagringar förekommer. Genom perforering av foderrören kunde produktionstester genomföras med framgång. Ca 100 l/s kunde påvisas och temperaturen var istället ca 40°C . En acceptabel temperatur för en värmepumpsapplikation. Projektet fortsatte sedan med ett andra borrhål till de sedimentära avsnitten för att kunna återföra det salta vattnet. Inte lika goda egenskaper kunde påvisas i den andra brunnen varför projektet lades i malpåse.

I Fig. 14 visas det stratigrafiska resultatet efter utförd borring av borrhål DGE 01. Man kan bl.a. se att delar av lagerföljden repeteras pga. de kraftiga tektoniska rörelserna i deformationszonen. Förhållanden som stundtals gjorde borrhållsarbetet mycket svårt. Man kan utan vidare påstå att det var en stor teknisk utmaning att borra i en så komplex geologisk situation. Å andra sidan var det i den geologiska miljön prospektet förväntades. Vid borring av kärnavfallsborrhål undviker man sådan geologisk miljö.



Depth in metres.

Modified after SGU's stratigraphical evaluation. LB/LTH. 2003 05 14.

Fig. 14 . De geologiska förhållandena vid djupborrhål DGE 01 i Lund.

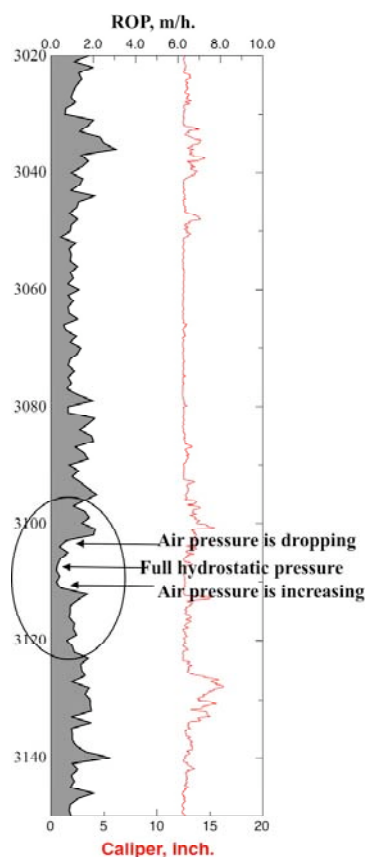
Effekten av underbalansering vid borrhning

I samband med beskrivningen av Metod 1 och 2 ovan framgår att man med hjälp av tryckluft evakuerar borrhålet på vätska i samband med borrhningens utförande.

Så länge tillflödet av grundvatten från formationen är begränsad så fungerar länshållningen och borrhålet befinner sig i underbalanserat tillstånd. Ifall tillflödet av vatten blir för starkt kan man tvingas täta sprickorna eller installera foderrör.

Penetrationshastigheten ökar avsevärt då man skapar en starkt underbalanserad situation i borrhålet och dess absoluta närhet i formationen. Bergmassan förskjuts till ett sprödare tillstånd när bergspänningen ökar och därvid spjälkas/splittas berget enklare av borrhållans mekaniska arbete än om fullt vattentryck rått i borrhålet. Effekten är särskilt uppenbar i mycket hårt kristallint berg av typ gnejs och granit. För att på ett säkert sätt använda underbalanserad borrhning är det i praktiken nödvändigt att den geologiska formationen är hållfast och kompetent. I annat fall är risken för instabilt borrhål och ras stor. De graniter som är aktuella i svensk berggrund är vanligtvis mycket kompetent berg.

För att illustrera effekten på penetrationshastigheten vid underbalanserad borrhning har jag valt ett exempel från Lundaborrningarna. Under borrhning i gnejsgranit mellan ca 3100 och 3120 m ströps lufttillförseln av serviceskäl under en kort period. Vattentrycket steg snabbt och penetrationshastigheten sjönk till en knapp tredjedel för att återgå lika snabbt när borrhålet åter evakuerades (Fig. 15).



Deep Geothermal in Lund. Dept. of Engin. Geology. LTH. Ib0306.

Fig. 15. Underbalansering och dess betydelse för penetrationshastigheten. Bjelm L., Stanford, California, January 30-February 1, 2006. SGP-TR-179

Rensning av borrhålet är A och O i samband med all form av borrhning och i synnerhet vid underbalanserad borrhning. Ifall man underlåter att rensa regelbundet är risken stor att man till slut fastnar i borrhålet på grund av att det lösborrade materialet kilar fast borrhållrustningen. Vid underbalanserad borrhning är det om möjligt ännu viktigare att hantera rensningen ytterst noggrant. I praktiken innebär det att man stoppar borrhningsarbetet efter 3-5 meters borrhning för att rensa borrhålet. Vid luftborrning innebär det oftast att man även tillför en mindre mängd skum eller vätska för att öka lyftkraften för det material som skall upp ur borrhålet. Evakueringen är ett kraftfullt moment och visas av Fig. 16.



Fig.16. Evakuering av borrhål vid underbalanserad borrning.

Några specifika frågor i samband med underbalanserad borrhning och annan djup borrhning

Nedan omnämns ett axplock av frågor som är viktiga i samband med djupborrningsoperationer.

Effektiv och säker rensning av borrhålet.

Instabila borrhål är ett faromoment särskilt i inkompetent berg.

Stora vattenflöde vid luftborrning reducerar penetrationshastigheten.

Borrhål med avdrift skapar risk för fastborrning.

Styrd borrhning i hårt berg utförs regelbundet men sällan på mycket stora djup.

Dimensionering av s.k. air-sub är sannolikt nödvändigt vid luftborrning till stora djup för att säkerställa att hammaren erhåller optimal luftmängd.

Uppborrning i två steg. I det fall man behöver ett borrhål med diametern 800 mm eller mer till t.ex. 4000 m är det möjligt att de nedersta ca 2000 m öppnas i två omgångar. Därvid galler att man i varje steg öppnar med borrhålets dubbla area.

Användning av grova borrhstänger är en alternativ metod att reducera behovet av luft.

Minutiös kontroll av borrhförloppet under borrhning.

Mycket detaljerad mätning av borrhålets egenskaper.

Finns utrustning och verktyg för djupborrning i stor dimension, till stora djup, i hårt berg?

Utrustning, komponenter och system finns för djupborrning i stor dimension men avsaknaden av genomförda pilotprojekt i hårt berg är ett otillfredsställande faktum. I all teknisk verksamhet är det nödvändigt med utprovning och tester för att få fram de bästa lösningarna och metoderna. För en del viktiga system och komponenter ges nedan översiktliga omdömen. Det är dock först i samband med upprättande av en teknisk beskrivning och ett borrhprogram som man har en *leverantörssäkrad* specifikation.

Summeringen nedan skall ses mot bakgrund av LTH's > 25 åriga erfarenhet av tung borrhning och prospektering avseende såväl geotermisk energi som olja & gas. Av intresse är också att LTH tillsammans med industrin medverkat vid utveckling av såväl borrhutrustning som borrhteknik.

I tillägg är det viktigt att betona att bakom de synpunkter som summeras nedan ligger en omfattande dialog med olika företrädare inom branschen. En handfull mycket erfarna borrhchefer och borrhingenjörer, främst från USA, ingår i LTH:s nätverk och har använts informellt i samband med utarbetande av denna rapport. Dessutom har några av branschens ledande leverantörer av utrustning och servicetjänster konfronterats med direkta frågor rörande möjligheten att borra till de djup och i det geologiska material som avses i denna utredning. Till sist men inte minst bör nämnas att kollegor vid Stanford University, Lawrence Livermore, MIT, Oregon Institute of Technology, Washington State University och DOE kontaktats i varierande grad under utredningsprocessen.

Nedan summeras vad som befunnits vara aktuell status för utrustning och komponenter för borrar till stora djup, i stor dimension och i hårt kristallint berg. *Det bör än en gång betonas att ett grundligt genomarbetat tekniskt underlag samt ett fullständigt borrarprogram måste tas fram innan man fullt ut kan bedöma genomförbarhet, bästa tillvägagångssätt och kostnader.*

Mast/derrick och understruktur finns för de laster/djup som är aktuella för kärnavfallsbörning. Det vill säga djup till > 4000 m.

Lyftkraft, vridkraft, pumpkraft och kompressorprestanda finns för den hantering som kan bli aktuell vid kärnavfallsbörning i Sverige till > 4000 m.

Borrkronor, borrstål och borrarutrustning med tillräckligt stor dimension, mekaniska och metallurgiska egenskaper finns för såväl rullande som slående borrar. Dock inte särskilt väl beprövade på mycket stora djup, i mycket stor dimension och i starkt förslitande bergarter.

Dimensionering av air-sub alternativt användning av grova borrstål kan bli nödvändig vid luftbörning för de allra största borrhålsdimensionerna. Sannolikt behövs tester för att komma fram till optimala luftförbrukningsegenskaper främst vid användning av hammarbörning.

System för styrd borrar finns till aktuella djup och dimensioner. Är emellertid inte särskilt väl beprövat på större djup i kristallint berg.

System för installation av diverse utrustning i djupa borrhål under extrema förhållanden finns framtaget inom olje- och gasindustrin. I vilken utsträckning dessa system och koncept är direkt applicerbara för installation av avfallskapslar eller liknande är inte utrett men bedöms som sannolik. Modifiering av befintliga system kommer att vara nödvändig.

Mätutrustning och utrustning för borrhålstester finns sedan länge framtaget för de behov som de djupa borrhålen kan komma att kräva.

Exempel från en djupbörningsoperation med utgångspunkt i tidsåtgång, kostnader och ingående moment

När en större borraroperation genomförs pågår arbetet dygnet runt. Det beror både på ekonomiska och tekniska förhållanden. Dagshyran för utrustningen är så hög att man måste vara effektiv och använda utrustningen hela dygnet. Av den totala tiden för en borraroperation är det normalt att ca 50% används för borrar. Resten åtgår till att gå upp och ner i borrhålet, göra mätningar och utföra installationer mm. I Fig. 17 kan man se hur fördelningen av olika moment kan se ut vid en större borraroperation. I Fig. 18 visas ett i ett diagram hur tid, moment och kostnader samverkar vid en större borraroperation. Den röda kurvan beskriver framdriften mot djupet som funktion av tid medan den gröna (stigande mot höger i diagrammet) anger hur kostnaden utvecklas som funktion av tid och moment.

Lunds Energi - Lund DGE#1 - Planned Well Cumulative Time by Category - LTH.
LUND, Mars 2003 / DHO.

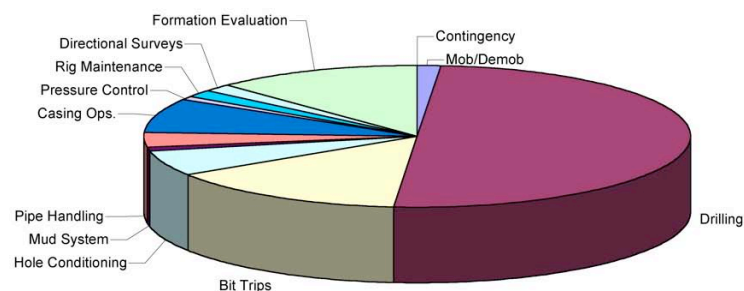


Fig. 17. Tidfördelning av olika moment vid en djupborrning. Lund 2002/2003.

Hur relationen tid, moment och kostnader samverkar under en borroperation visas av ett kumulativt diagram i Fig. 18.

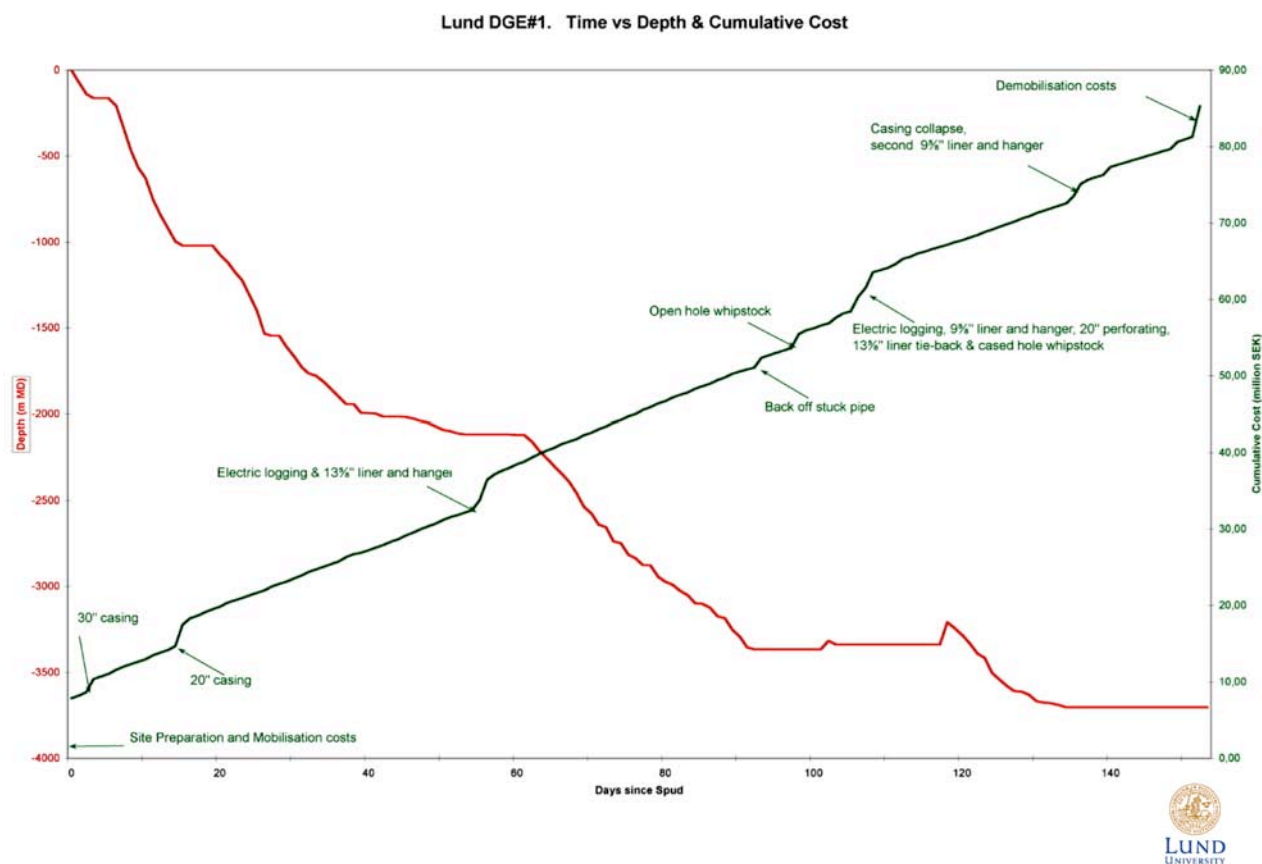


Fig. 18. Kumulativt tid, djup och kostnadsdiagram. Lund 2002/2003. Final Drilling Report DGE 01, 2003.

Kapacitets- och kostnadsjämförelser

Tillgång till god dokumentation från borrhjorprojekt utförda till stora djup i mycket hårt berg är begränsad. Inför denna rapport har skrivbordstudier av borrhjorkostnader utförda i SKB's regi jämförts med verkliga data, från den för Sveriges del enda moderna djupborrningen till stort djup, Lundaborrningen 2002/2003. Det föreligger väsentliga skillnader i upplägg och förutsättningar jämfört med om en djupborrning för kärnavfall skulle ha gjorts. De geologiska förhållandena i Lund är så komplexa och svårborrade att man aldrig hade funderat på att utföra kärnavfallsborrhål där. Därmed sagt att ifall man utför djupa borrhål, t.ex. till 4000 m, i trakten av Oskarshamn så kommer de berggrundsmässiga förhållandena att vara betydligt mer gynnsamma för borrning. En homogen bergmassa sannolikt med mycket liten sprickighet vilket innebär små problem med t.ex. tillströmmande vatten är gynnsamt för underbalanserad borrning. I Tab. 1. visas tidsåtgång och kapacitet för olika fall vid djupborrning. Observera att *uppskattade* fall jämförs med *verkliga*. Data från de uppskattade fallen kommer från SKB's utredningar genom åren. Både exempel med Underbalanserad och Överbalanserad borrning ingår i Tab. 1.

PROJEKT	BORRDJUP DIMENSION	BORRTID DAGAR	METER/ DAG	METER/ TIM	ANM.
SKB 89-39 Juhlin & Sandstedt, 1989 Uppskattad	0-4000 m Urberg 700 alt. 800 mm	535	7,5	0,31	<u>ÖB</u> Inkl. loggning, tester mm
SKB R-00-35 Harrison/Deutag. 2000 Uppskattad	0-4000 m Urberg 1168-832 mm	137*	29	1,22	<u>UB/mix</u> *Exkl. loggning, tester mm
Lund 1 LTH/Lunds Energi 2002/2003 Verklig	0-3701,8 m Sedim.+ Urberg 914-216 mm	134 (153 inkl. utvärd.& demob)	27 (24)	1,13 (1)	<u>ÖB/UB</u> Inkl. loggning, tester mm
Lund 1 LTH/Lunds Energi 2002/2003 Verklig	2080-3365 m (1285m) Urberg 311 mm	30 (ca 93 dagar om extrapolerat till 4000 m)	43	1,8	<u>UB</u> Inkl. logging, tester mm

Tab. 1. Jämförelse av borrhjorkapacitet utifrån uppskattade och verkliga fall. LB. LTH. 0703.

Uppenbart är att kapaciteten för den överbalanserade borrhälsmetoden som antogs i 1989 års utredning starkt avviker från de övriga. Flera av förutsättningarna är inte helt jämförbara men det tar inte bort de extrema skillnaderna. Det är tydligt att underbalanserad borrhälsning har fördelar vad avser kapacitet. Eftersom borrhästiden direkt påverkar den slutliga kostnaden är kapaciteten avgörande. Vid jämförelse mellan den underbalanserade borrhälsningen i Lund, och Harrison's uppskattning, ser man att kapaciteten blir högre i Lundaborrningen. Skillnaden beror bl.a. på skillnad i borrhälsdimension. Harrison antar mycket stor dimension och det förefaller som Harrison överskattar kapaciteten eller om man så vill att tidsåtgången underskattats. En jämförelse av kostnader framgår av Tab. 2.

PROJEKT	KOSTNAD BORRNING inkl. Tester & Logging.	KOSTNAD enbart BORRNING till 4000 m	Specifik KOSTNAD kr /meter ÖB eller UB
SKB 89-39 1989 Tentativ	251 MSEK	N	62750 ÖB * 4000 m
SKB R-00-35 2000 Tentativ	N	45 MSEK	11250 UB * 4000 m
Lund 1 2002-2003 Genomfört	85 MSEK	N	22960 ÖB + UB * 3701 m. djup, mindre dimension
Lund 1 2002-2003 Genomfört	18 MSEK	N	14000 UB * 1285 m borrhälsning, mindre dimension

Tab. 2. Kostnader och specifika kostnader kr/m för olika projekt. Valuta: SEK.

N = icke utrett. ÖB = Överbalanserad borrhälsning. UB = Underbalanserad borrhälsning.

Kostnad/m utgår från den s.k. "Daily Rental Cost" vilket utgör *samtliga* kostnader per dag för att driva operationen. Se även Tab. 1, för bakgrundsdata. Resultaten i denna och föregående tabell kan inte utan vidare appliceras för andra förutsättningar. LB. LTH. Febr. 2007.

Ganska stora skillnader föreligger alltså vad gäller såväl projekten som sådana som det faktum att tentativa fall jämförs med verkliga. Kostnaden för en överbalanserad borrhälsning blir med SKB's antaganden från 1989 ca 6 ggr dyrare per borrhälsad meter jämfört med SKB's utredning från 2000. Jämförelsen haltar något eftersom Harrison inte tar med kostnader för

t.ex. tester och borrhålsloggning i sina antaganden. Dessa skillnader till trots kan man utgå från att en underbalanserad operation är avsevärt mycket billigare än en överbalanserad operation.

Operationen i Lund utgör en viktig referens eftersom den faktiskt *har genomförts* som borring i urberg och har därför en *verklig* kostnadsbild. Avgörande skillnader föreligger dock vad gäller främst borrhålsdimensionerna. Borrdjupet är däremot jämförbart. Det teknikalternativ som är intressant att jämföra Lundaoperationen med är Harrisons utredning från 2000. Den specifika kostnaden skiljer sig på ett omvänt sätt mot vad som är rimligt. Harrison får en lägre specifik kostnad jämfört med Lund trots att han antar en borrhålsdimension för delar av borrhålet som vida överstiger 1000 mm. Den underbalanserade borringen i Lund utfördes överlag med endast 311 mm borrhålskrona. Alltså finns anledning att utgå från att Harrison underskattat kostnaden. Den underbalanserade operationen i Lund kostade 1,25 ggr. mer per meter jämfört med Harrisons antagna kostnad. Det bör tilläggas att såväl en hel del tester som borrhålsloggning ingår i kostnaderna för Lund.

Trots allt bör noteras att Harrisons ”teoretiska” borring och de verkliga kostnaderna från Lundaoperationen hamnar så att säga i en ”kostnadsdivision” för sig jämfört med operationer tänkta som överbalanserad borring.

I sammanhanget bör djupborringarna i Siljansringen under 1980 talet omnämnas. Syftet var att finna naturgas i det uppspruckna urberget. En kraterbildning med djupgående sprickor som bildats av ett mäktigt meteoritnedslag vid Siljan. Två hål borrades som är de djupaste borringar som hittills utförts i urberg i Sverige. Man borrade till mer än 6000 m djup och använde *överbalanserad borrhålsborrteknik*. Framdriften var långsam, kostnaderna blev höga och man hade stora tekniska problem.

Var står borrar-tekniken idag för borrar-ning av Djupa borrar-hål och deponering av kärnavfall?

I denna rapport har olika aspekter belysts med bäring på borrar-teknikens status för borrar-ning av vida och djupa borrar-hål för kärnavfallslagring. Den samlade bilden för möjligheten att kunna utföra sådana borrar-hål blir klart positiv. Avsaknaden av relevanta referensprojekt är negativt men skulle enkelt kunna avhjälpas. Industrin förfogar över teknologin och är med rimliga insatser och modifieringar med stor sannolikhet kapabla att klara utmaningen inom kort tid. Kontakter med tillverkare och expertis styrker denna uppfattning. Utredningen pekar också på att borrar-hål med betydligt mindre dimension också är möjliga för avfallslagring under förutsättning att man gör bästa val av kapslar för borrar-hål. Möjligheterna förändras därvid i väsentlig omfattning. Nedan sammanfattas läget för borrar-tekniken och en del nödvändiga insatser föreslås. Se även tidigare kapitel om borrar-teknik i denna rapport.

- Utrustning och komponenter med tillräcklig prestanda och lämpliga egenskaper finns för de flesta aktuella behoven.
- Referensprojekt till aktuella djup, i hårt berg, men i mindre dimension har utförts som underbalanserad borrar-ning t.ex. i samband med geotermisk prospektering
- Referensprojekt i *mycket stor dimension* till aktuella djup i hårt berg saknas.
- Mätteknik finns för de behov som kan bli aktuella i djupa borrar-hål för kärnavfallsdeponering.
- System för att kontrollera eller aktivt styra borrar-förloppet i en viss riktning finns.
- System och teknik för installation av diverse utrustning i djupa borrar-hål finns framtaget inom olje- och gasindustrin. I vilken utsträckning dessa är applicerbara för installation av avfallskapslar eller liknande är inte utrett men bedöms som möjliga att användas efter modifiering.
- Fullständig teknisk utredning inklusive framtagande av ett borrar-program är nödvändig för att kunna göra en slutlig bedömning av genomförbarheten.
- Identifiering av kritiska komponenter och nyckelföretag inom tillverknings- och utförandebranschen är en förutsättning i utredningsarbetet.
- Arbetet med att ta fram ett sådant underlag kan ta ett till ett år och bör utföras av en oberoende grupp. Direkt samverkan med borrar-ningsindustrin är nödvändig. I synnerhet erfarenheterna från USA är viktiga.
- Utredningen bör även omfatta alternativa borrar-program för olika avfallstyper.
- Kostnaden för en utredning enligt ovan uppskattas till 1,5 - 2 MUSD.
- Parallellt med utredningen borde en planering för en referensbollar-ning inledas och upphandlas inom två till två och ett halvt år.

Anmärkning.

Vid utveckling av befintlig borrhälssteknik för storskalig djupborrning, i stora dimensioner och i hårt berg, kan mycket väl vara av intresse för den geotermiska branschen eftersom man med förbättrad teknik kan utföra större brunnar till större djup och därmed producera mer elenergi från sådana brunnar. Gruvverksamhet på stora djup eller deponering och lagring av andra resurser är också tillämpningar som kan dra nytta av bättre djupborrningsteknik.

Litteraturreferenser och övrigt bakgrundsmaterial.

- Alm, P-G, Bjelm, L. Engineering Geology, Lund University, Sweden.
Towed array seismic exploration of the Tornquist zone.
Proceedings, Thirty-First Conference on Geothermal Reservoir Engineering.
Stanford University, Stanford, California, January, 2006.
- American Petroleum Institute, February 1985. Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe Properties. Bulletin 5C3.
- American Petroleum Institute, May 1990. Specification for Line Pipe. Specification 5L.
- Andersson, O, 1994. Deep drilling KLX02. Drilling and documentation of a 1700 m deep borehole at Laxemar, Sweden. TR 94-19, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 1994.
- ANDRA, Research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and perspectives. Dossier 2005. ANDRA, France., Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. June 2005.
- Angel, R R, 1957. Volume Requirements for Air or Gas Drilling. Pet. Trans. AIME, 210, 325–330.
- Batelle, Columbus April 1981. Geologic disposal of radioactive waste: Program plan for field test in salt. Ubbes, W. F.; Robinson, R. A. Battelle Columbus Labs., OH.
- Beyer, A H, Millhone R S, Foote R W, 1972. Flow Behaviour of Foam as a Well Circulating Fluid. SPE Paper 3986.
- Bjelm, L., 2005. Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005. Country Update, Sweden
Dept. of Engineering Geology, Lund Institute of Technology –
Lund University. 20040722, Sweden.
- Bjelm, L, 2006. Engineering Geology, Lund University, Sweden. Under Balanced Drilling and Possible Well Bore Damage in Low Temperature Geothermal Environments.
Proceedings, Thirty-First Conference on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January, 2006.
- Bjelm, L., and Rosberg, Jan-Erik, 2006. Recent Geothermal Exploration for Deep Seated Sources in Sweden. Engineering Geology, Lund University, Sweden.
Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 30, San Diego, Sept. 2006.
- Bjelm, L., 2006. Geophysical exploration, drilling, well completion and testing of deep-seated aquifers. ARGeo, Addis Abeba Dec. 2006.
Lund University. Dept. of Engineering Geology.

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

Cobbett, J S, 1981. Application of an Air Drilling Package in Oman. SPE Paper 9600.

CORWM, Managing our radioactive waste safely. CoRWM's recommendation to Government, July 31, 2006.

CoRWM, The long-term management of radioactive waste: the work of the Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM) Policy document 01/06 January 2006 ISBN 0 85403 624 5.

CoRWM, Committee on Radioactive Waste Management, "How CoRWM short-listed the options", document 1001.4, May 2005 and Committee on Radioactive Waste Management, "Outcome of short-listing", document 1340, September 2005.

DOE, Civilian Radioactive Waste Management Program Plan. DOE/RW-0520. U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management. febr. 2000.

DOE, Civilian Radioactive Waste Management System. U.S. Department of Energy. Yucca Mountain Site Characterization Office. Engineered Barrier System Degradation, Flow, and Transport Process Model Report. TDR-EBS-MD-000006 REV 00 ICN 01. July 2000.

DOE, 2005. Science and Technology program plan. DOE/RW-0576. Office of Civilian Radioactive Waste Management, Washington, D.C.

EPA, Technical support document for Section 194.32 and 33: Compliance recertification application Re-evaluation of select human intrusion activities. EPA, USA. March 2006.

EPA, U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2006. Technical Support Document For Section 194.23: Review of the 2004 Compliance Recertification Performance Assessment Baseline Calculation.

European Geoscience Union, 2004

Gibb, F., Very deep borehole disposal of high-level nuclear waste. Imperial Engineer Autumn 2005a-

IAEA. Annual report 2006.

Imperial Engineer, Autumn 2005.

Juhlin, C & Sandstedt H Storage of nuclear waste in very deep boreholes. Feasibility study and assessment of economic potential, SKB Technical report TR-89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1989.

Juhlin, C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B & Beswick J. The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth. SKB TR 98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998.

MIT, The Future of Nuclear Power. An interdisciplinary MIT study. Massachusetts Institute of Technology, 2003, ISBN 0-615-12420-8.

Mitchell, R F, 1981. Simulation of Air and Mist Drilling for Geothermal Wells. SPE Paper 10234.

Nirex Limited, UK, "Description of Long-term Management Options for Radioactive Waste Investigated Internationally" Nirex Report N/050, May 2002.

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

Russell, B A, 1993. How Surface Hole Drilling Performance was Improved 65 Percent. SPE Paper 25766.

Shale, L T, 1994. Underbalanced Drilling: Formation Damage Control During High-Angle or Horizontal Drilling. SPE Paper 27351.

Smellie, J, 2004. Recent geoscientific information relating to deep crustal studies SKB R0409, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Smith International Website for technical information.

SKB TR 93-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB 1992. Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. (På engelska.: Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB TR9 04 Svensk Kärnbränslehantering AB).

SKB R-00-35. 2000. Very deep borehole. Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability. Rapport av Tim Harrison.

SKB 2000a. Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD program som krävs för jämförelse med KBS-metoden. SKB R0028, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-04-21. Fud-program 2004. Program for research, development and demonstration of methods for final deposition of nuclear wastes, including social research, 412 pp.

SKB R-06-58 2006. Grundfelt & Wiborgh. Djupa borrhål - Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige.

The Royal Society, 2006. The long-term management of radioactive waste: The work of the Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM). Policy document 01/06. ISBN 0 85403 624 5.

Wallroth, T Very Deep Hole Concept, Geoscientific appraisal to conditions at large depths. SKB Progress Report U-96-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1996.

World Oil, October 1995 , Section: Drilling '95.
Amocos Test facility develops new drilling technology.

Informellt underlag

Ett omfattande arkivmaterial av tekniska handlingar och internrapporter från upphandlingar och borroperationer under perioden 1981 - 2005.

En handfull mycket erfarna borrhäfer och borraringsjörer, främst från USA och England, ingår i LTH:s nätverk och har använts i samband med utarbetande av denna rapport.

Dessutom har ett flertal av branschens ledande leverantörer av utrustning och servicetjänster konfronterats med direkta frågor rörande möjligheten att borra till de djup och i det geologiska material som avses i denna utredning.

Till sist men inte minst bör nämnas att kollegor vid Stanford University, Lawrence Livermore National Laboratory i Berkley, MIT, Oregon Institute of Technology, Washington State University och DOE kontaktats informellt i varierande grad under utredningsprocessen.