

R-01-30

Projekt JADE

Jämförelse av teknik

Håkan Sandstedt
Scandiaconsult Sverige AB

Raymond Munier
Svensk Kärnbränslehantering AB

Augusti 2001

Svensk Kärnbränslehantering AB

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



Projekt JADE

Jämförelse av teknik

Håkan Sandstedt
Scandiaconsult Sverige AB

Raymond Munier
Svensk Kärnbränslehantering AB

Augusti 2001

Förord

Slutsatserna från ett antal jämförelser av olika koncept för geologisk deponering innebär att KBS-3 systemet med vertikal deponering förblir referenssystem i SKB:s program, vilket lanserades 1992 med avsikt att påbörja deponering av använt kärnbränsle i svensk berggrund så snart som möjligt. Fältundersökningar planeras att genomföras stegvis, och påbörjas med platsundersökningar på mer än en plats och innefatta en kontinuerlig utvärdering och jämförelse av de geovetenskapliga förhållandena så väl som andra tekniska, sociala och ekonomiska frågeställningar av betydelse. Informationen som samlas in under platsundersökningarna används för platsanpassningen av förvarets utformning, vilket även detta är aktiviteter som bedrivs stegvis med ökande detaljeringsgrad i varje steg. Innan anpassningen av förvaret till en vald plats kan påbörjas ska alla tekniska system vara definierade.

I en studie 1992 (PASS - Project on Alternative System Study) identifierades flera varianter av KBS-3 systemet som intressanta och projektet JADE (Jämförelse av DEponeringsmetoder) initierades 1996 för att visa om någon eller några av dessa varianterna ska utredas vidare.

JADE-projektet fokuserar på detaljerade utredningar av viktiga tekniska frågeställningar i anslutning till horisontell deponering av kapslar med använt kärnbränsle kompletterat med en fördjupad jämförelse av alternativen och referenssystemet KBS-3 med vertikal deponering. Slutsatserna är att KBS-3 med vertikal deponering bibehålls som referensmetod, och att deponering i medellånga horisontella deponeringshål studeras ytterligare i syfte att klargöra deponeringsteknikens tekniska genomförbarhet liksom sätt att handskas med vatteninflöde. KBS-3 med deponering i horisontella deponeringshål studeras ej vidare.

Resultaten från JADE-projektet presenteras här, betydligt senare än vad som planerades vid projektstarten, vilket innebär att vissa resultat redan har använts i SKB:s fortsatta arbete. Denna rapport innehåller därför viss information som kan uppfattas som inaktuell.

Stockholm, augusti 2001



Håkan Sandstedt

Projektledare

Sammanfattning

Föreliggande rapport redovisar en teknisk jämförelse av tre deponeringsmetoder som alla är varianter av KBS-3 metoden:

- KBS-3 V, Vertikal deponering
- KBS-3 H, Horisontell deponering
- MLH, Medel Långa Hål

Jämförelsen baseras på nedanstående kriterier. Tyngdpunkten i jämförelsen ligger på kriterier som påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten och som svårigen kan påverkas genom olika tekniska utföranden.

- Teknisk genomförbarhet
- Geundersökningar
- Projektering
- Utbyggnad
- Deponering
- Miljö
- Mänskligt intrång efter förslutning

Samtliga deponeringsmetoder är tekniskt genomförbara. KBS-3 V har studerats mest ingående och rankas därför före de två andra metoderna.

Eftersom metoderna baseras på i princip samma grundlayout och deponeringsdjup föreligger inga avgörande skillnader mellan metoderna med avseende på ”Geundersökningar” och ”Projektering”.

Genom likartad utformning av deponeringstunnlar och deponeringshål kommer samma och väl beprövade bergschaktningsmetoder att tillämpas vid utbyggnaden av ett KBS-3 V och KBS-3 H förvar. Erforderliga bormaskiner för borrhningen av långa horisontella deponeringshål för MLH finns tillgängliga på marknaden men tekniken måste utvecklas vidare. MLH rankas därför i dagsläget efter KBS-3 V och H med avseende på ”Utbyggnad”. Det bedöms dock att MLH med måttliga utvecklingsinsatser kan nå samma tekniska mognad som KBS-3 V och H.

Med nuvarande utformning kommer bentonitbarriären för KBS-3 V att erhålla högre densitet och därmed lägre konduktivitet. En tydlig fördel för KBS-3 V och H är att deponeringen av kapslar utförs i individuella deponeringshål. Varje deponering blir en avslutad procedur vilket bedöms vara fördelaktigt från kvalitets- och säkerhetssynpunkt. Med hänsyn till bentonitbarriärens funktion och individuell deponering av kapslarna rankas KBS-3 V före KBS-3 H och MLH med avseende på ”Deponering”.

Med avseende på ”Miljö” finns det fördelar för MLH på grund av mindre utbruten bergvolym.

Baserat på dagen kunskapsläge om deponeringsmetoderna rankas KBS-3 V som den ”bästa tekniska lösningen” följt av KBS-3 H och sist MLH.

Executive summary

This report presents a comparison of the technical aspects of three disposal methods, all of which are variations of the KBS-3 method:

- KBS-3 V, Vertical disposal
- KBS-3 H, Horizontal disposal
- MLH, Medium Long Holes.

The comparison is based on the criteria listed below. Most weight has been given those criteria influencing the long-term function and safety of the repository that are difficult to alter. Such criteria can only be altered by adopting different technical designs.

- Technical feasibility
- Geological investigations
- Design
- Construction
- Deposition
- Environmental impact
- Human intrusion after sealing

It is practically possible to carry out all of the disposal methods. KBS-3 V has been studied most completely and therefore has been ranked before the other two methods with respect to "Technical feasibility".

In principle, the methods are based on the same repository layout and disposal depth, therefore there are no conclusive differences between the methods with respect to "Geological investigations" and "Design".

As the disposal tunnels and disposal holes have the same form in the KBS-3 V and KBS-3 H facilities, well-tested excavation methods will be adopted during the construction phase for these two alternatives. Machines suitable for boring the long, horizontal disposal holes of the MLH alternative are available on the market, but the technique must be developed further. Therefore, MLH is currently ranked after KBS-3 V and KBS-3 H with respect to "Construction". However, the present degree of technical development reached for KBS-3 V och H could also be achieved for the MLH alternative with a moderate amount of development work.

With the current design, the bentonite-barrier in KBS-3 V will have a higher density and therefore a lower conductivity than in the other alternatives. A clear advantage for KBS-3 V and H is that the canisters are disposed individually in deposition holes. Every disposal procedure will be a completed procedure, which is judged to be advantageous with respect to quality and safety. Considering the functioning of the bentonite barrier and the individual disposal of the canisters, KBS-3 V receives a higher ranking than KBS-3 H for the "Deposition" phase.

MLH is ranked higher than the other alternatives with respect to "Environmental impact" because of the smaller volume of excavated rock.

Based on information about the disposal methods at their current state of development, KBS-3V is considered to be the best technical solution, followed KBS-3 H and finally MLH.

Innehållsförteckning

| | |
|---|-----------|
| Förord | 3 |
| Sammanfattning | 5 |
| Executive summary | 7 |
| 1 Bakgrund | 11 |
| 2 Deponeringsmetoder | 13 |
| 2.1 Deponeringsmetoder för jämförelse | 13 |
| 2.2 Kapsel | 15 |
| 2.3 Beskrivning av KBS-3 V | 16 |
| 2.3.1 Utformning | 16 |
| 2.3.2 Tillredningsteknik | 18 |
| 2.3.3 Deponeringsteknik | 18 |
| 2.3.4 Återfyllnad och förslutning | 20 |
| 2.4 Beskrivning av KBS-3 H | 20 |
| 2.4.1 Utformning | 20 |
| 2.4.2 Tillredningsteknik | 21 |
| 2.4.3 Deponeringsteknik | 21 |
| 2.4.4 Återfyllnad och förslutning | 22 |
| 2.5 Beskrivning av MLH | 22 |
| 2.5.1 Utformning | 23 |
| 2.5.2 Tillredningsteknik | 24 |
| 2.5.3 Deponeringsteknik | 26 |
| 2.5.4 Återfyllnad och förslutning | 27 |
| 3 Metodik för jämförelse av teknik | 29 |
| 3.1 Allmänt | 29 |
| 3.2 Kriterier för jämförelse | 30 |
| 3.3 Borrard eller sprängd deponeringstunnel | 32 |
| 4 Beskrivning av kriterier för jämförelse och jämförelse med avseende på hierarkisk nivå 3 | 33 |
| 4.1 Teknisk genomförbarhet | 33 |
| 4.1.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse | 33 |
| 4.1.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på teknisk genomförbarhet | 35 |
| 4.2 Geundersökningar | 35 |
| 4.2.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse | 35 |
| 4.2.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på geundersökningar | 39 |
| 4.3 Projektering | 40 |
| 4.3.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse | 40 |
| 4.3.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på projektering | 46 |
| 4.4 Utbyggnad | 46 |
| 4.4.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse | 46 |
| 4.4.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på utbyggnad | 53 |
| 4.5 Deponering | 54 |
| 4.5.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse | 54 |
| 4.5.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på deponering | 64 |
| 4.6 Miljö | 65 |
| 4.6.1 Kriterier för jämförelse | 65 |
| 4.6.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på miljö | 66 |
| 4.7 Mänskligt intrång efter förslutning | 67 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.7.1 | Kriterier för jämförelse | 67 |
| 4.7.2 | Sammanfattning av jämförelse med avseende på mänskligt intrång efter förslutning | 67 |
| 5 | Jämförelse och värdering med avseende på hierarkisk nivå 2..... | 69 |
| 5.1 | Sammanfattning av jämförelsen med avseende på hierarkisk nivå 2 | 69 |
| 5.2 | Värdering | 71 |
| 5.2.1 | Teknisk genomförbarhet | 71 |
| 5.2.2 | Geundersökningar | 71 |
| 5.2.3 | Projektering | 72 |
| 5.2.4 | Utbyggnad | 72 |
| 5.2.5 | Deponering | 72 |
| 5.2.6 | Miljö | 73 |
| 5.2.7 | Mänskligt intrång efter förslutning | 74 |
| 6 | Jämförelse av deponeringsmetoder, bästa tekniska lösning | 75 |
| 7 | Referenser | 77 |

1 Bakgrund

KBS-3 metoden med vertikal deponering av kapslar utgör sedan 1984 referensmetod för deponering av använt kärnbränsle. KBS-3 metoden baseras på ett flerbarriärssystem där förvaret placeras i urberget, 400-700 meter under markytan, och det använda kärnbränslet placeras i koppar kapslar med en insats av gjutjärn som omges av en bentonit buffert.

Sedan 1984 har SKB utvecklat och värderat även andra deponeringsmetoder. Under 1986 till 1989 analyserades och jämfördes WP-Cavemetoden med KBS-3. Resultatet av utvärderingen visade att WP-Cavemetoden bedömdes kunna klara högt ställda krav vad gäller långsiktig funktion och säkerhet men att fördelarna med KBS-3 befanns överväga.

Tre andra metoder; Djupa borrhål (VDH), Långa hål (VLH), Medellånga hål (MLH) har därefter utvecklats och analyserats samt jämförts med KBS-3 V metoden. Resultatet har rapporterats i PASS /1/

Jämförelsen av förvarskoncept i PASS-studien delades upp i jämförelser av långsiktig funktion och säkerhet, teknik samt kostnader. Samtliga metoder ansågs uppfylla mycket högt ställda funktions- och säkerhetskrav. Resultatet blev dock att KBS-3 och MLH i ett första skede rangordnades på första plats. Utfallet av jämförelsen mellan KBS-3 och MLH blev inte entydig. Avseende teknik bedömdes KBS-3 som mer robust och mera flexibel i deponeringsprocessen. I fråga om kostnader fanns det en signifikant skillnad till förmån för MLH. Vid den slutliga bedömningen, där hänsyn togs till nackdelar för MLH i deponeringsprocessen, rangordnades KBS-3 före MLH.

För KBS-3 har även möjligheten att deponera kapslarna i horisontella borrhål borrade i väggen av deponeringstunnlarna studerats (KBS-3 H). Denna metod har bedömts attraktivt ur ekonomisk synvinkel då den totala längden av deponeringstunnlar kan reduceras jämfört med deponering i vertikala deponeringshål (KBS-3 V).

För att studera och jämföra olika deponeringsmetoder initierade SKB 1996 ett projekt benämnt JADE (Jämförelse Av DEponeringsmetoder). Syftet med projekt JADE var att fördjupa analyserna av tekniska nyckelfrågor avseende horisontella deponeringssystem samt att göra en detaljerad jämförelse av metoderna KBS-3 H (horisontell deponering) och MLH (deponering i medellånga horisontella deponeringshål) med referensmetoden KBS-3 V (vertikal deponering) /2/.

Resultatet av jämförelsen med avseende på Teknik redovisas i denna rapport.

2 Deponeringsmetoder

2.1 Deponeringsmetoder för jämförelse

Föreliggande jämförelse av deponeringsmetoderna baseras på layouter som har utarbetats för ett djupförvar typ KBS-3 med vertikal deponering av kapslarna med använt kärnbränsle. Jämförelsen i projekt JADE baseras på ett förvar bestående av 3.800 kapslar.

Jämförelsen omfattar följande tre deponeringsmetoder som alla är varianter av KBS-3 metoden:

- KBS-3 V, Vertikal deponering
- KBS-3 H, Horisontell deponering
- MLH, Medel Långa Hål.

KBS-3 V, vertikal deponering, utgör referensmetod i det svenska programmet. Deponering av kapslar sker i vertikalt borrade hål i botten av deponeringstunnlarna.

KBS-3 H, horisontell deponering, bedöms vara ekonomiskt attraktiv då antalet deponeringstunnlar reduceras. Deponering av kapslar sker i borrhål borrade horisontellt i väggarna av deponeringstunnlarna.

För MLH metoden deponeras kapslarna efter varandra i långa deponeringshål borrade i väggen av transporttunnlarna.

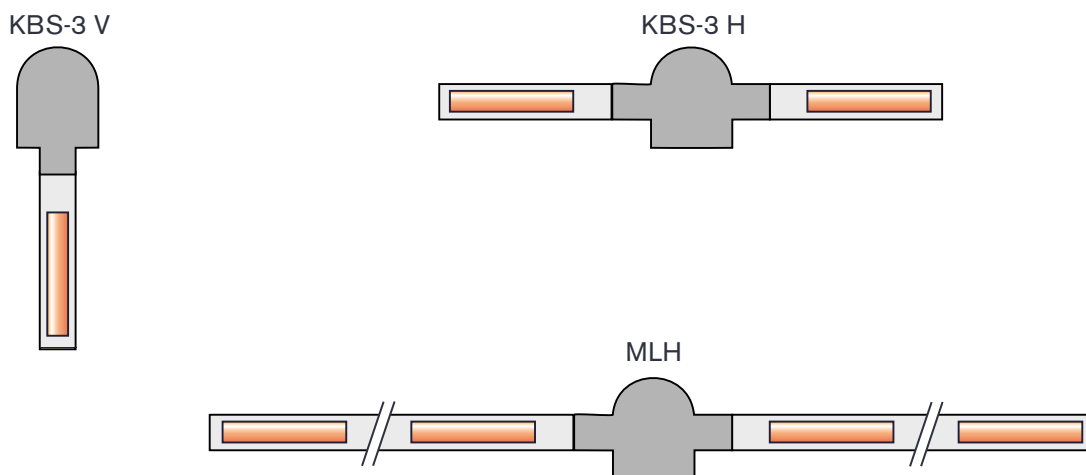
Metoderna illustreras schematiskt i figur 2-1.

Deponeringsmetoderna, KBS-3 V och MLH, har tidigare beskrivits och jämförts inom ramen för Projekt AlternativStudier för Slutförvar, PASS /1/.

Som underlag för den tekniska jämförelsen av deponeringsmetoderna har följande studier genomförts inom ramen för projekt JADE:

- Beskrivning av MLH metoden /3/
- Metod- och maskinutveckling för deponering av kapslar /4-6/
- Geovetenskapliga studier /7/
- Strålskyddets betydelse

En översiktlig beskrivning av de deponeringsmetoder som ingår i jämförelsen i projekt JADE redovisas bland annat i avsnitt 2.1 i denna rapport.



Figur 2-1 Figuren illustrerar schematiskt skillnaderna i layout mellan de olika deponeringsmetoderna. Enligt förutsättningarna för projekt JADE har jämförelsen med avseende på teknik och långsiktig funktion och säkerhet för KBS-3 V och H baserats på borrade deponeringstunnlar.

I tabell 2-1 redovisas en sammanställning över de viktigaste tekniska data för respektive deponeringsmetod. Tabell 2-1 är begränsad till transport- och deponeringstunnlar samt deponeringshål och utgör underlag för den jämförelse som redovisas i denna rapport.

Tabell 2-1 Tekniska specifikationer för olika deponeringsmetoder.

| Förvarsdel | KBS-3 V | KBS-3 H | MLH |
|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| Kapslar: | | | |
| Deponeringsposition | Vertikal | Horisontell | Horisontell |
| Dimension L/Ø (m) | 4,83/1,05 | 4,83/1,05 | 4,83/1,05 |
| Förvarsutformning | | | |
| Transporttunnlar, B*H (m) | 7*6,8 | 7*6,8 | 8*6 |
| Deponeringstunnlar, L (m) | 250 | 250 | - |
| Deponeringstunnlar, Ø (m). Borrade tunnlar ¹⁾ | 5,0 | 6,2 | - |
| Deponeringstunnlar, B*H (m). Borrade och sprängda tunnlar ²⁾ | 4,2*5 | 6,2*5 | - |
| Avstånd mellan deponeringstunnlar (m) | 40 | 60 | - |
| Deponeringshål Ø (m) | 1,75 | 1,75 | 1,75 |
| Deponeringshål L (m) | 7,83 | 7,83 | 250 |
| Avstånd mellan deponeringshål (m) | 6,3 | 7,1 (i resp. vägg) | 40 |
| Avstånd mellan kapslar (m) | 6,3 | 7,1 (i resp. vägg) | 1,2 |
| Bentonitbarriär | | | |
| Material | Kompakterad bentonit + bentonitpellets | Kompakterad bentonit | Kompakterad bentonit |
| Tjocklek vid deponering, sida/botten/topp (m) | 0,29/0,5/1,5 | 0,31/0,5/1,5 | 0,31/0,6/0,6 |
| Tjocklek efter svällning, sida/botten/topp (m) | 0,35/0,5/1,5 | 0,35/0,5/1,5 | 0,35/0,6/0,6 |
| Återfyllnad av deponeringstunnlar | | | |
| Plugg mellan bentonit och deponeringstunnel | 1 m bentonit/ bergkross (15/85) | 1 m bentonit/ bergkross (15/85) | - |
| Deponeringstunnel | Bentonit/bergkross (15/85) | Bentonit/bergkross (15/85) | - |
| Plugg mot transporttunnel | Betong ev. inklusive bentonit | Betong, ev. inklusive bentonit | Betong, ev. inklusive bentonit |

1) Underlag för jämförelse med avseende på teknik och långsiktig funktion och säkerhet

2) Underlag för jämförelse med avseende på ekonomi (kostnadskalkyl)

2.2 Kapsel

Studerade deponeringsmetoder baseras på SKB:s referenskapsel /8/ som är konstruerad för 12 BWR element inklusive boxar eller 4 PWR element. Kapseln är 4,83 m lång och har en diameter på 1,05 m (figur 2-2).

Det yttre korrosionsskyddande kopparkapseln är 50 mm tjock. Kopparkapseln har fyra svetsar, två längsgående och en svets för botten respektive lock.

Den tryckupptagande innerbehållaren består av gjutstål med separat hål för varje bränsleelement.

Vikten på kapseln inklusive använt bränsle är ca 25 ton /9/. Spalten mellan kopparkapseln och den inre behållaren är ca 1 mm.



Figur 2-2 SKB:s referenskapsel.

2.3 Beskrivning av KBS-3 V

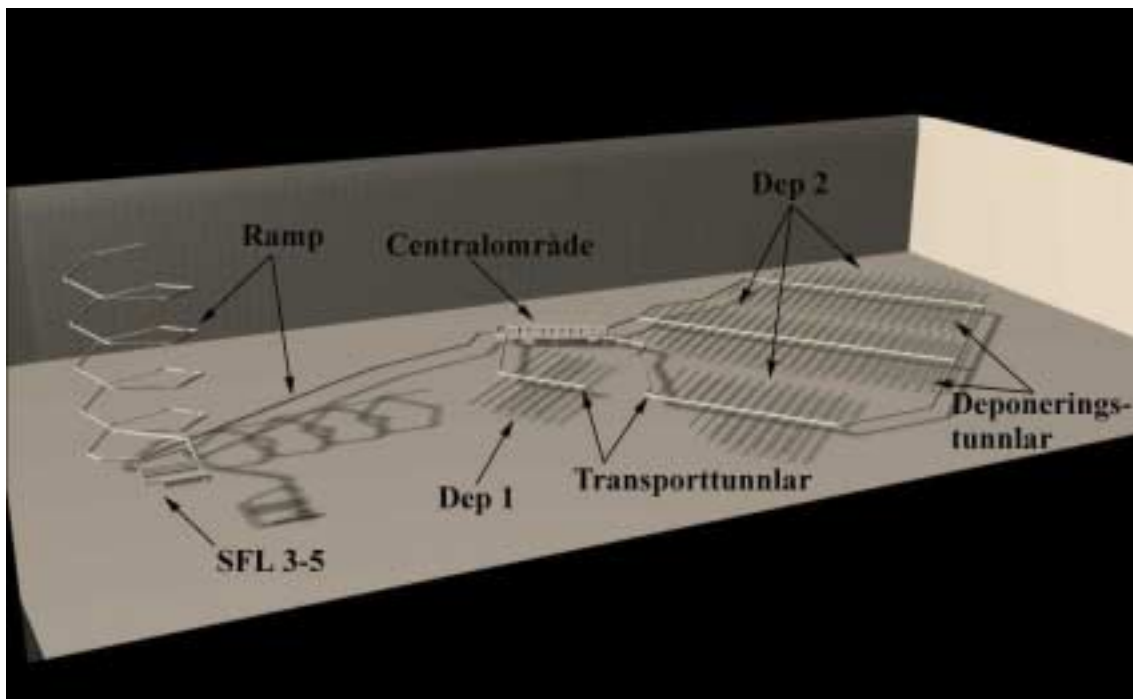
2.3.1 Utformning

Djupförvaret för det inkapslade bränslet förutsätts vara beläget på ca 500 m djup under markytan. Förvaret nås med ramp (kapslar och material) och hisschakt (personal).

Förvaret består av en central del innehållande serviceutrymmen, samt en deponeringsdel. Deponeringsdelen består av ett system av parallella deponeringstunnlar med tillhörande transporttunnlar, serviceutrymmen och ventilationsschakt. En principiell utformning av anläggningen redovisas i figur 2-3. Layouten kommer slutligen att bestämmas av lokala geologiska förhållanden, bergmassans termiska egenskaper samt värmeutvecklingen i det deponerade bränslet.

Utbyggnaden av djupförvaret avses ske i olika etapper 1-4:

- Etapp 1 utgörs av framtagning av underlag som erfordras för beslut om platsval.
- Etapp 2 utgörs av projektering och bygge av ovan- och underjordsanläggningar samt översiktliga undersökningar av de olika förvarsdelarna. Etapp 2 omfattar även detaljstudier av deponeringsområde 1.
- Etapp 3 utgör en fas av inledande drift och utvärdering. Deponering av ca 10% av kapslarna sker i deponeringsområde 1. Parallellt utförs detaljstudier av förvarsområden för den reguljära driften inkluderande deponeringsområde 2 och området för deponering av annat avfall.
- Etapp 4 utgörs av en fas av reguljär drift i vilken resterande kapslar deponeras i deponeringsområde 2. Vidare deponeras övrigt radioaktivt avfall (SFL 3-5).

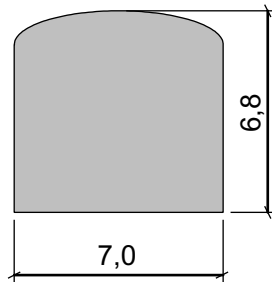


Figur 2-3 Principiell utformning av ett referensförvar enligt KBS-3.

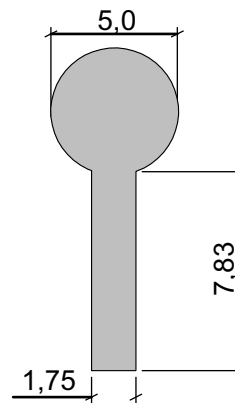
Kapslarna med det använda bränslet deponeras i vertikala hål borrarade i botten på deponeringstunnlarna. Kapslarna omgärdas av kompakterad bentonit och tunnlar återfylls med en blandning av bentonit och bergkross. Utformningen av transporttunnlar, deponeringstunnlar och deponeringshål framgår av figur 2-4.

Utrymmet som krävs för deponering av kapslar är styrande för storleken på deponeringstunnlarna.

Transporttunnel



Deponeringstunnel



Figur 2-4 Dimensioner för KBS-3 V (mått i meter). Måtten är preliminära och utgör underlag för föreliggande jämförelse av deponeringsmetoder

Förvaret är under deponeringsperioden uppdelat i två delar för att medge en enkel fysisk separering av deponeringsarbetet från övrig verksamhet såsom utsprängning/borrning och försegling av tunnlar. Byggandet av deponeringstunnlarna och borrhningen av deponeringshål planeras att ske i takt med deponeringen.

2.3.2 Tillredningsteknik

Tekniken för byggandet av transport- och deponeringstunnlar är ännu inte fastlagd. I denna studie förutsätts att transporttunnlarna tas ut genom borrhning och sprängning och att deponeringstunnlarna tas ut med tunnelborrningsteknik, TBM-teknik.

Tillfartsrampen ner till förvaret antas drivas med TBM-teknik. Lutningen på rampen bedöms bli högst 1:7. När rampen borrhats till förvarsdjup och fram till centralområdet drivs vertikala schakt till markytan med stigortsborrhning.

Centralområdet tas ut med konventionell borrhning- sprängningsteknik.

Deponeringshålen har en diameter på 1,75 m och djupet 7,83 m. Borrhningen inleds med att ett kärnborrhål borrhats i centrum. Utifrån detta undersökningshål bedöms det om positionen är lämplig för deponering med hänsyn till bergets egenskaper. Om bedömningen utfaller positivt borrhats deponeringshålet med fullborrningsteknik, i annat fall pluggas kärnborrhålet.

2.3.3 Deponeringsteknik

Olika deponeringstekniker har studerats och är beskrivna i /4/. Deponeringsfordon med kapsel omsluten av ett delbart strålskydd, alternativ 3, utgör underlag för den tekniska jämförelsen i projekt JADE. Med föreslagen maskinutrustning kan deponeringen utföras i en relativt liten tunnel och med ett omslutande strålskydd kring kapseln under hela deponeringsprocessen.

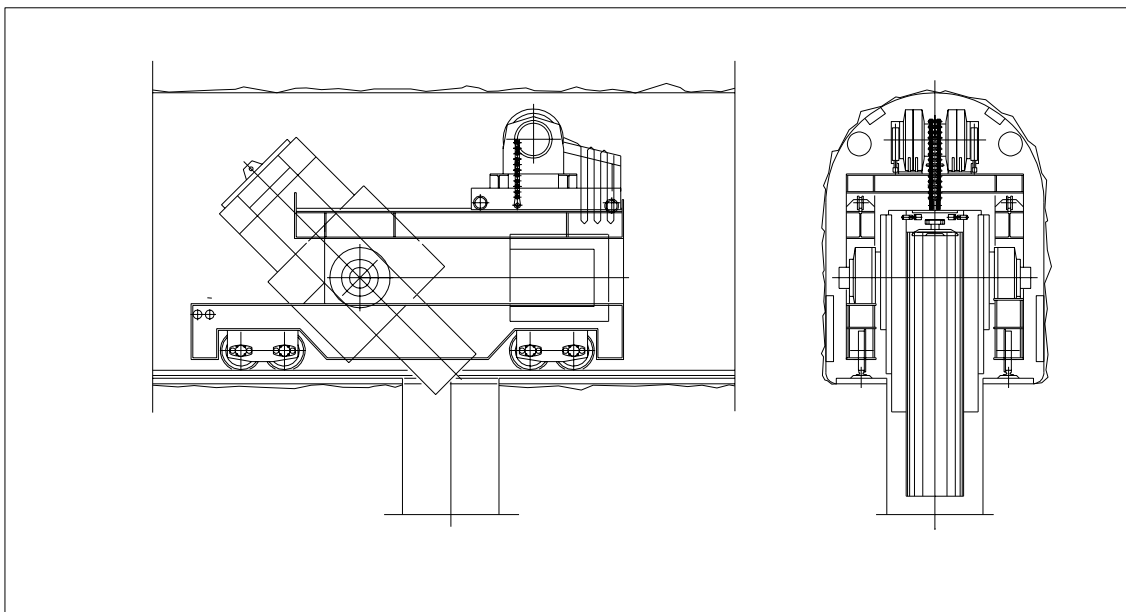
När kapseln anländer till djupförvaret transporteras den först ner till centralområdet på deponeringsnivån ca - 500 m. I en omlastningsstation på deponeringsnivån flyttas kapseln från transportbehållaren till en delbar, strålskyddande behållare anpassad till deponeringsfordonet och deponeringsprocessen.

Transporten av kapslarna från omlastningsstationen fram till respektive deponeringstunnel förutsätts ske med ett separat transportfordon på vilket kapseln förvaras liggande i den delbara, strålskyddande behållaren.

Deponeringsprocessen inleds med att botten på deponeringshålet avjämnas och att en bentonitplugg placeras i botten av deponeringshålet, varefter bentonitringar placeras i hålet motsvarande kapselns längd. För detta arbete används ett enklare, spårgående (ev. hjulgående) fordon försett med travers för hanteringen av bentonitpluggar och bentonitringar. När bentonitfordonet inte används parkeras det i transporttunneln.

Deponeringen utförs med ett spårbundet deponeringsfordon som kör i deponeringstunneln, se figur 2-5. Omlastning av kapseln från transport- till deponeringsfordon utförs vid mynningen av deponeringstunneln. Sedan transporteras kapseln liggande fram till deponeringshålet och positioneras. Vid deponering delas strålskyddet och strålskydd/kapsel reses vertikalt och sänks ner i deponeringshålet. Resningen utförs med en cardano-rörelse (samtidig rörelse i x- och z-led) där deponeringshålets övre del utnyttjas för rotation. Genom cardano-rörelsen kan höjden på deponeringstunneln reduceras. När kapseln står vertikalt finjusteras kapselns position och kapseln firas ner i det bentonitinklädda deponeringshålet. Strålskyddsväggar runt kapseln gör det möjligt att befinna sig vid deponeringsmaskinen under hela deponeringsskedet.

Efter deponering av kapseln fylls spalten mellan bentonit och borrhålsvägg med bentonitpellets. Ovanpå kapseln placeras ytterligare bentonitblock (1,5 m) och kvarstående hålrum fylls med vatten. Slutligen fylls övre delen av hålet upp med en blandning av bentonit och bergkross. Hålet täcks med en platta och stämp monterar mellan platta och tunneltak där så erfordras. Syftet med stämpan är att förhindra bentoniten från att svälla ut mot tunneln under tiden fram tills dess att deponeringstunneln har återfyllts.



Figur 2-5 Deponeringsfordon med kapseln omsluten av delbart strålskydd (teknik föreslagen av VBB Anläggning).

2.3.4 Återfyllnad och förslutning

När deponeringen är klar i ett antal deponeringstunnlar kan arbetet med förslutningen av dessa påbörjas. Härvid tas provisorisk vattendränning, eventuella stämp m.m. bort och tunnlar fylls med en blandning av bentonit och bergkross. Tunnelmyningarna tätas med en betongplugg, som tas bort i samband med återfyllnaden av transporttunneln.

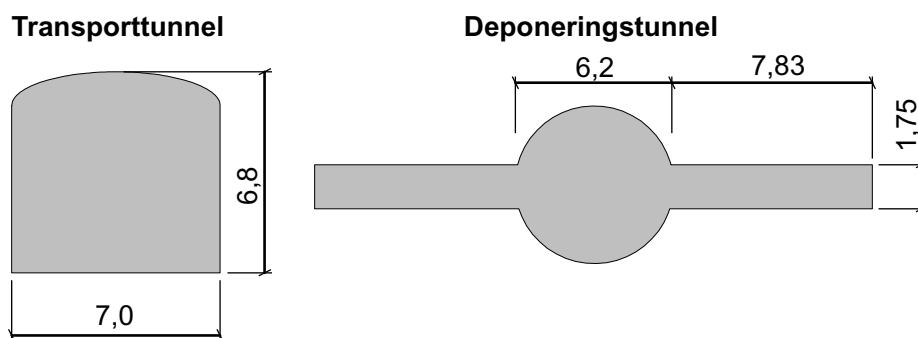
Efter avslutad deponering av samtliga kapslar försluts hela djupförvaret med en blandning av bentonit och bergkross. Rampen och schakten förses på vissa avsnitt med pluggar av kompakterad bentonit och betong. Syftet är att täta av och förhindra vatten-transport i de kanaler som kan uppstå parallellt med längdaxeln av de tunnlar och berggrum som sprängs ut i bergmassan.

2.4 Beskrivning av KBS-3 H

2.4.1 Utformning

Utformningen av ett djupförvar enligt KBS-3 H bygger på samma layout och dimensioner på deponeringshålen som KBS-3 V. Det utrymme som krävs för deponeringen är styrande för deponeringstunnelns dimensioner (figur 2-6).

Jämfört med KBS-3 V deponeras kapslarna i horisontella hål borrade i väggarna på deponeringstunnlarna, se figur 2-7. Kapslarna omgärdas av kompakterad bentonit och tunnlar återfylls med en blandning av bentonit och bergkross. Genom att deponeringshålen borrar i väggarna på deponeringstunnlarna kan dubbelt så många kapslar deponeras per deponeringstunnel. För att erhålla samma temperaturen i den omgivande bentoniten som för KBS-3 V måste avståndet mellan deponeringstunnlarna öka från 40 m till 60 m.



Figur 2-6 Dimensioner för KBS-3 H (mått i meter). Måtten är preliminära och utgör underlag för föreliggande jämförelse av deponeringsmetoder.

2.4.2 Tillredningsteknik

Samma teknik kommer att tillämpas för tillredning av olika bergutrymmen och för borrning av deponeringshål som för KBS-3 V.

2.4.3 Deponeringsteknik

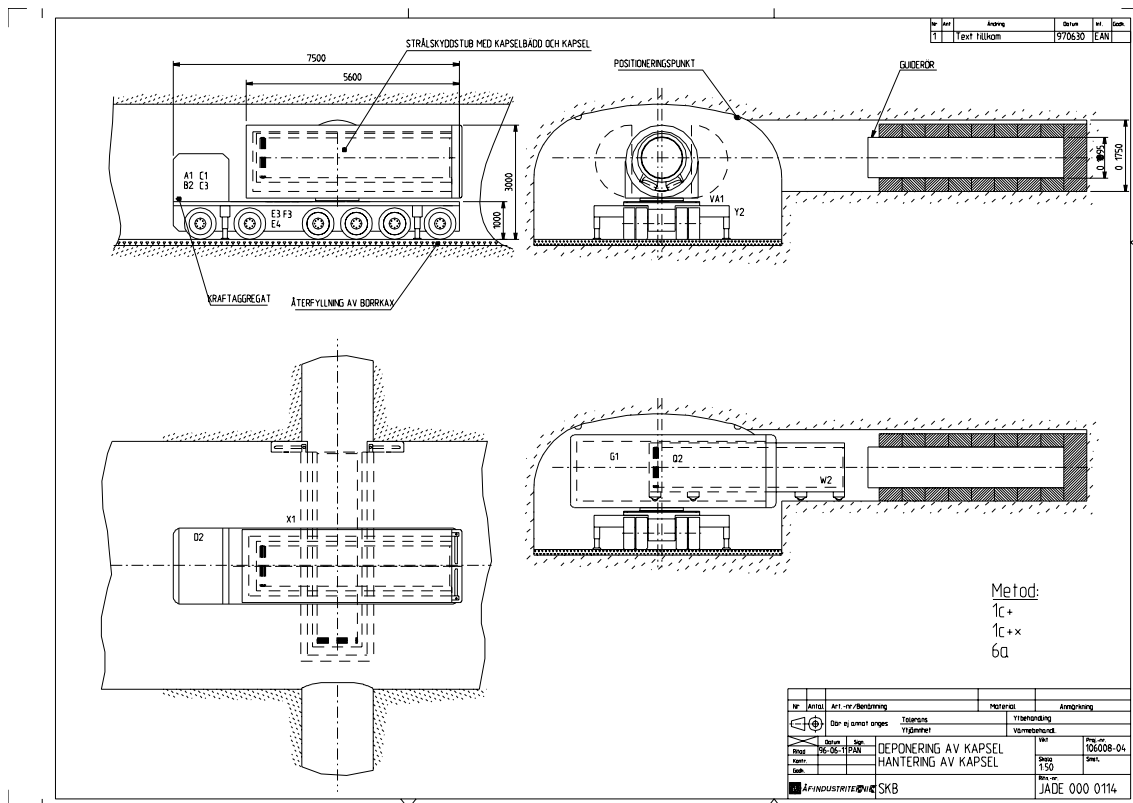
Olika deponeringstekniker har studerats för KBS-3 H /5/. Utredningsarbetet har ännu inte nått den tekniska mognad som erfordras för att ett val av lämplig deponeringsteknik skall kunna göras.

Föreslagna teknik och maskinutrustning för horisontell deponering har granskats av det Maskinråd /2/ som medverkat i projekt JADE rörande frågor om utvecklingen av deponeringsmaskiner. Maskinrådet har bedömt det tekniskt möjligt att utveckla en maskinutrustning som kan utföra erforderlig deponering med högt ställda krav på kvalitet och funktionssäkerhet.

Det är även tekniskt möjligt att modifiera föreslagen deponeringsteknik för MLH (se avsnitt 2.5.3) för deponering av kapslar enligt KBS-3 H metoden.

För transport och deponering av kapslar och inplacering av bentonit gäller i princip samma metodik som beskrivits för KBS-3 V.

Vid den tekniska jämförelsen som beskrivs i föreliggande rapport förutsätts att kapslar och bentonit kan deponeras och inplaceras i deponeringshålen så att samma kvalitet och funktionssäkerhet erhålls som för KBS-3 V.



Figur 2-7 Deponering i delar med guiderör (teknik föreslagen av ÅF-Industrieteknik).

2.4.4 Återfyllnad och förslutning

Återfyllnad och förslutning av djupförvaret kommer att utföras på samma sätt som beskrivits för KBS-3 V.

2.5 Beskrivning av MLH

Som underlag för jämförelsen av deponeringsmetoder har det upprättats en samlad beskrivning av MLH-metoden omfattande layout, byggande av förvaret samt en analys av hotbilder mot metoden. Målsättningen i utredningsarbetet var att basera metoden på blindborrningsteknik. Genom blindborrning av deponeringshålen behöver borrningen inte utföras mellan två tunnlar (transporttunnel och så kallad baktunnel) vilken tidigare ingick i metoden /1/.

Av beskrivningen av MLH metoden /3/ framgår det att lämpliga maskinutrustningar finns tillgängliga på marknaden för att borra horisontella, blinda deponeringshål med en diameter på 1,75 m. En analys av säkerhetsaspekterna vid arbeten i långa tunnlar med liten dimension (deponeringshål) som slutar blint visar, tillsammans med en jämförelse med traditionell gruv- och anläggningsverksamhet, att säkerhetsfrågorna bör kunna hanteras på ett bra sätt om arbetena planeras väl och att erforderliga åtgärder vidtas för att öka säkerheten. Speciell teknik och utrustning för förstärkningsarbeten i deponeringshålen behöver tas fram.

Deponeringshålen kommer inte att bli helt täta utan vatten kommer att läcka in och rinna längs hålens botten och ut mot transporttunneln. Mängden vatten kommer att bli beroende av resultatet av utförd injektering samt rådande geologiska förhållanden. För att inte inskränka på borrhålens diameter ryms hålen i erforderlig omfattning före eventuella förstärkningsarbeten.

Vid deponering kommer de kompakterade bentonitblocken att placeras på botten av deponeringshålen. Vid kontakt med vatten kommer bentoniten att suga upp vatten och börja svälla. Vid ett visst flöde, som i dagsläget inte är känt, kommer bentonitbarriären att börja degradera och bentonit kommer följa med vattenflödet ut ur tunneln. Det saknas i dagsläget kunskap om vilken effekt det inträngande vattnet har på bentoniten (svällning, degradering, erosion och själtätning etc.). För att studera påverkan på bentoniten från inläckande vatten erfordras bland annat försök under realistiska förhållanden.

Barriären av kompakterad bentonit är föreslagen att deponeras i ett paket tillsammans med kapseln. Genom rådande toleranser bedöms de kompakterade bentonitblocken kunna göras något mäktigare för MLH än för KBS-3 V, ca 31 cm jämfört med 29 cm. För att undvika excentrisk placering av kapseln är det inte lämpligt att fylla spalten ovanför paketet kapsel-bentonit med bentonitpellets. Genom mindre mängd bentonit erhålls en något lägre densitet hos bentonitbarriären efter svällning för MLH jämfört med KBS-3 V.

För att uppnå en likvärdig barriär för MLH kan inte samma uppbyggnad av barriären användas som för KBS-3 V. För att öka barriäreffekten kan det bli nödvändigt att öka den initiala densiteten hos de omgivande bentonitblocken, alternativt kan deponeringshålen borraras med större diameter för att rymma mera kompakterad bentonit.

En samlad beskrivning av MLH metoden framgår av /3/.

2.5.1 Utformning

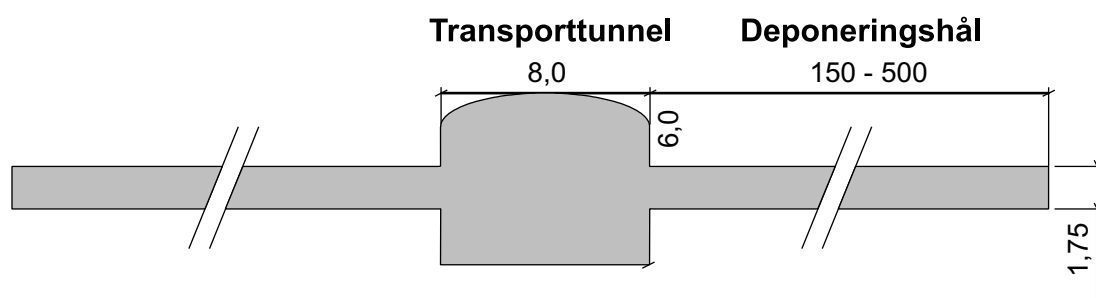
En utformning av ett djupförvar enligt MLH /3/ bygger på samma layout och dimensioner på deponeringshålen som för KBS-3 V och H. Jämfört med KBS-3 V och H ersätts systemet av deponeringstunnlar och deponeringshål med enbart långa, horisontellt borrarade deponeringshål. Kapslarna deponeras efter varandra (seriellt) åtskilda av kompakterad bentonit.

Till skillnad från den utformning av ett MLH-förvar som redovisades i PASS /1/ föreslås deponeringshålen att borraras med blindborrningsteknik. Detta innebär att de så kallade baktunnlarna, som erfordras när deponeringshålen borraras med horisontell stigortsborrning, inte längre behövs.

Utformningen av transporttunnlar och deponeringshål framgår av figur 2-8. Baserat på temperaturberäkningar (maximal temperatur i bentoniten kring kapseln) har avståndet mellan deponeringshålen beräknats till 40 m och avståndet mellan kapseländarna till 1,2 m. Kapslarna omgärdas av kompakterad bentonit. Transporttunnlarna återfylls med en blandning av bentonit och bergkross.

MLH är mindre utvecklad än referensmetoden KBS-3 V. Ett framtida utvecklingsarbete berör alla delar av metoden som borrhning av deponeringstunnlar, teknik för deponering av kapslar, teknik för tättnings- och bergförstärkningsarbeten, kvaliteten på den omgärdande bentonitbarriären efter svällning m.m. Speciellt bentonitbarriärens egenskaper och påverkan av inläckande vatten bedöms vara kritisk för metoden då detta påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten.

Det utrymmet som krävs vid borrhningen av deponeringshålen är styrande för transporttunnelns dimension (8,0 x 6,0 m). Med hänsyn till ett visst behov av kommunikation förbi området med borrhning har transporttunnelns bredd ökat med 1 m jämfört med KBS-3- metoden (ett alternativ kan vara att bygga nischer i anslutning till deponeringshålen).



Figur 2-8 Dimensioner för MLH (mått i meter). Måtten är preliminära och utgör underlag för föreliggande jämförelse av deponeringsmetoder.

2.5.2 Tillredningsteknik

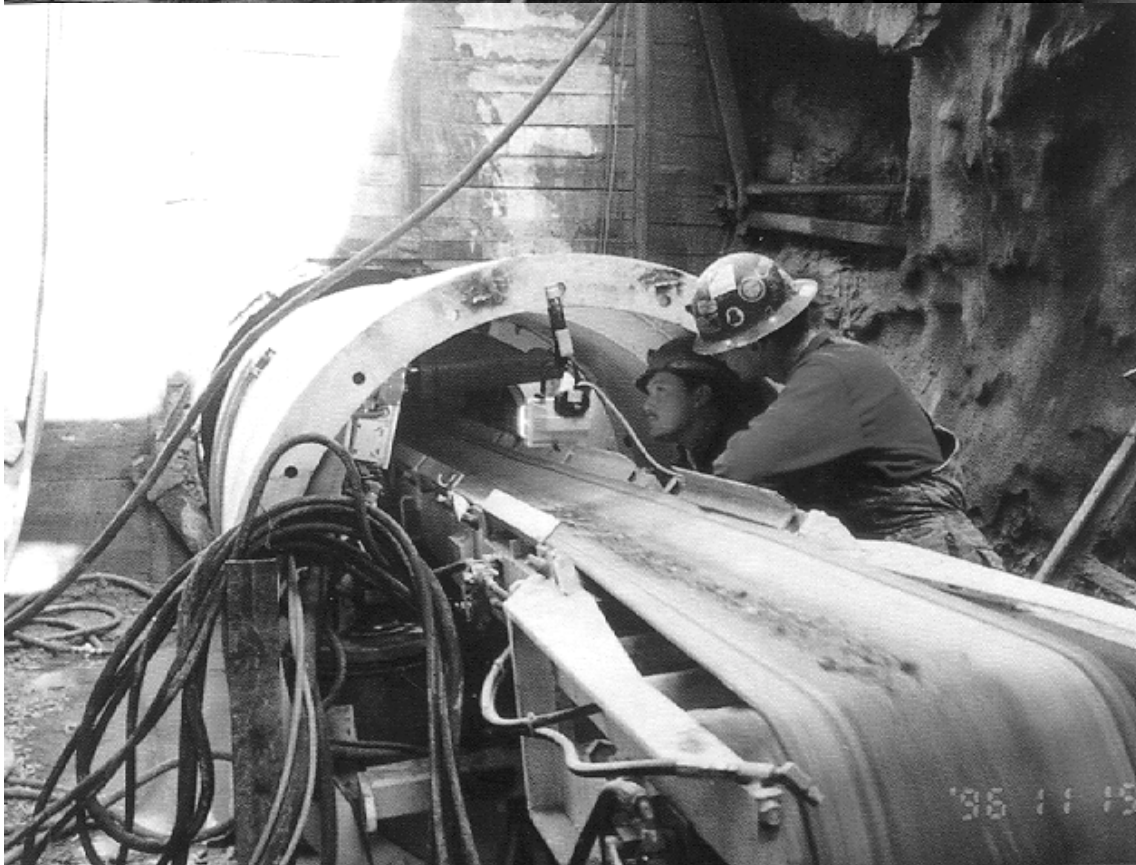
Samma teknik kommer att tillämpas för tillredning av olika bergutrymmen och transporttunneln som för KBS-3 V.

Borrhningen av deponeringshålen planeras att utföras med tunnelborrningsteknik. I figur 2-9 redovisas exempel på en lämplig maskin för borrhning av deponeringshål. Den har tillverkats i olika diametrar och maskinen på bilden har en diameter på 1,65 m. Borrkax transporteras ut med bandtransportör. Även om maskinen är liten går det att byta borrhkuttrar under borrhningen inne i tunnarna. Maskinens utformning möjliggör att en operatör sitter inne i maskinen under borrhning. För borrhningen av deponeringshålen förutsätts dock att borrhningen fjärrstyrs utifrån transporttunneln.

Maskintypen som visas i figur 2-9 kan också modifieras för borrhning av vertikala hål, och en maskin med diametern 1,75 m har använts för att borra fullstora, vertikala deponeringshål i Äspö HRL.

Borrhningen av deponeringshålen kommer att föregås av borrhningen av ett kärnborrhål för undersökning av berget. Baserat på resultatet från kärnborrhålet är det möjligt att fastställa lämplig längd på deponeringshålet samt planera erforderliga tättnings- och förstärkningsåtgärder.

För att utföra tättnings- och förstärkningsarbeten i deponeringshålen kommer det bli nödvändigt att ta fram nya maskinutrustningar och metoder.



Figur 2-9 Exempel på maskin för borrhning av långa horisontella deponeringshål /10/.

2.5.3 Deponeringsteknik

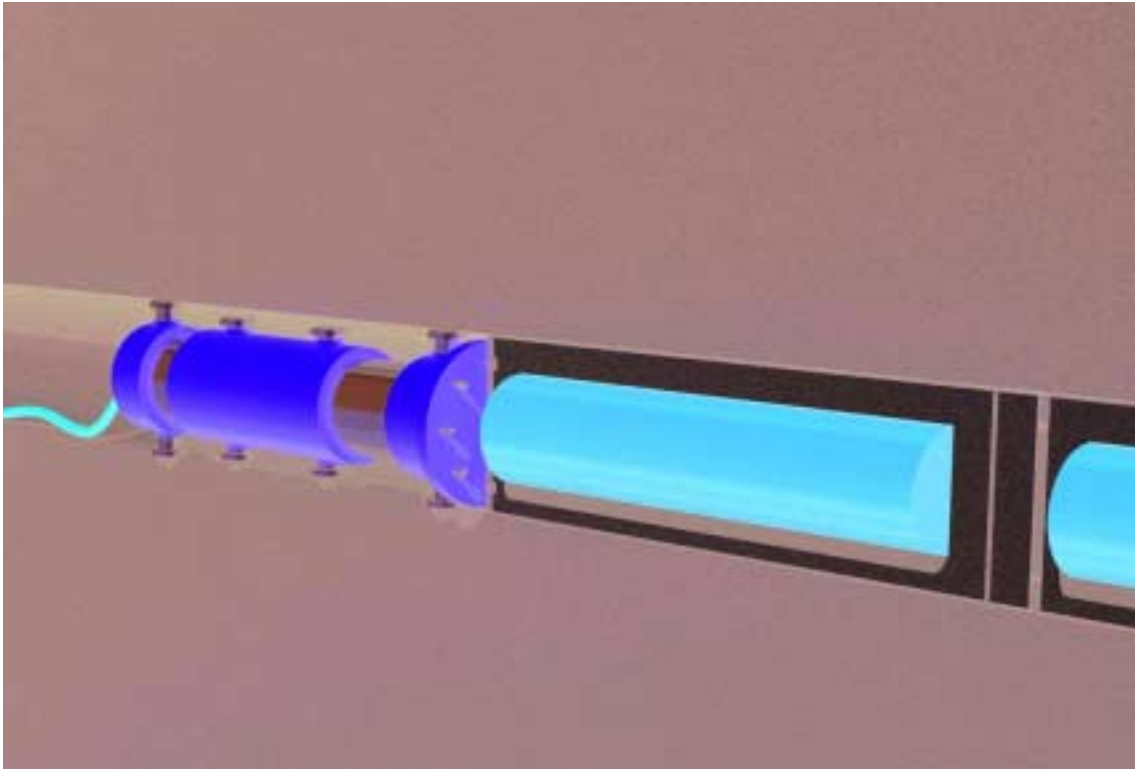
Olika deponeringstekniker har studerats för MLH, vilka är beskrivna i /6/. Utredningsarbetet har ännu inte nått den tekniska mognad som erfordras för att välja lämplig deponeringsteknik.

I utvecklingsarbetet har det identifierats några tekniska förutsättningar som bör vara uppfyllda vid deponering av kapslar enligt MLH:

- Maskinutrustningen måste vara robusta och med få rörliga delar.
- Deponering av hela paket, kapsel och bentonit är att föredra.
- Metoden bör vara skonsam mot berget i botten på deponeringshålet. Detta innebär att det bör finnas någon typ av glidskydd mellan berg och paketet bentonit-kapsel.
- Bentoniten skall skyddas mot droppande vatten vid inskjutning i deponeringshålet.

Föreslagna deponeringstekniker för deponering har granskats av Maskinrådet /2/, som har bedömt det tekniskt möjligt att utveckla en maskinutrustning som kan utföra erforderlig deponering med högt ställda krav på kvalitet och funktionssäkerhet.

Föreslagen metod för deponering av kapsel och bentonit i ett paket omslutet av ett kopparnät har vidareutvecklats av Josef Piroška. Det fördjupade utvecklingsarbetet omfattar bland annat en mera detaljerad utformning av det omslutande kopparnätet och tekniken för att skjuta in paketet bentonit-kapsel. Deponering av paketet bentonit-kapsel illustreras schematiskt i figur 2-10.



Figur 2-10 Deponering av paket bentonit-kapsel

2.5.4 Återfyllnad och förslutning

Återfyllnad av deponeringshålen är integrerad med deponeringen av bentonit och kapsel. I avsnitt av deponeringshålen där ingen kapsel placeras, t.ex. i områden med sämre bergförhållanden, försluts deponeringshålen med block av kompakterad bentonit. Dessa inplaceras med samma utrustning som används för deponering av paketen bentonit-kapsel.

Återfyllnad och förslutning av transporttunnlar och övriga delar av djupförvaret kommer att utföras på samma sätt som beskrivits för KBS-3 V.

3 Metodik för jämförelse av teknik

3.1 Allmänt

Jämförelsen av deponeringsmetoderna är begränsad till en jämförelse av de aktiviteter som berör deponeringsområdena. Jämförelsen omfattar byggande och förslutning av deponeringstunnlar och deponeringshål samt deponering av kapslar och bentonitbarriärer. Övriga delar av djupförvaret (nerfart, centralområde, transporttunnlar etc.) är i princip lika för de studerade metoderna. Eventuella skillnader som kan komma att identifieras i samband med framtida konstruktionsarbeten bedöms ej påverka valet av deponeringsmetod.

Studerade deponeringsmetoder är baserade på samma utformning av den kapsel som skall innehålla det använda bränslet.

Som underlag för jämförelsen har olika kriterier som kan påverka valet av deponeringsmetod med avseende på teknik sammanställts i en hierarkisk struktur. Jämförelsen koncentreras till kriterier som kan påverka den långsiktiga funktionen och säkerheten. Den hierarkiska strukturen redovisas i kapitel 3.2.

Jämförelser mellan olika deponeringsmetoder (komplicerade tekniska system) kan utföras med flera olika metoder. I PASS /1/ utfördes jämförelsen med avseende på teknik i två steg och med två olika metoder. I ett första steg utfördes jämförelsen genom en kvalitativ jämförelse mellan olika kriterier. Då olika kriterier har olika betydelse bedömdes det inte möjligt att göra en slutlig objektiv sammanvägning av dessa. Jämförelsen utfördes därför i ytterligare ett steg med hjälp av en grupp bestående av 6 experter. Jämförelsen baserades på samma hierarkiska struktur och utfördes med hjälp av metoden ”Analytical Hierarchy Process”(AHP) /1/, som är baserad på parvis jämförelse av olika kriterier. Genom metoden erhålls en bedömning av den relativa betydelsen av olika kriterier med avseende på den bästa tekniska lösningen.

Baserat på erfarenheten från PASS, samt kännedomen om de olika deponeringsmetoderna svagheter och styrkor, bedöms det i JADE inte nödvändigt att använda AHP för jämförelsen med avseende på teknik.

Jämförelsen med avseende på teknik som beskrivs i föreliggande rapport är utförd stegvis på basis av en kvalitativ jämförelse av olika kriterier enligt följande:

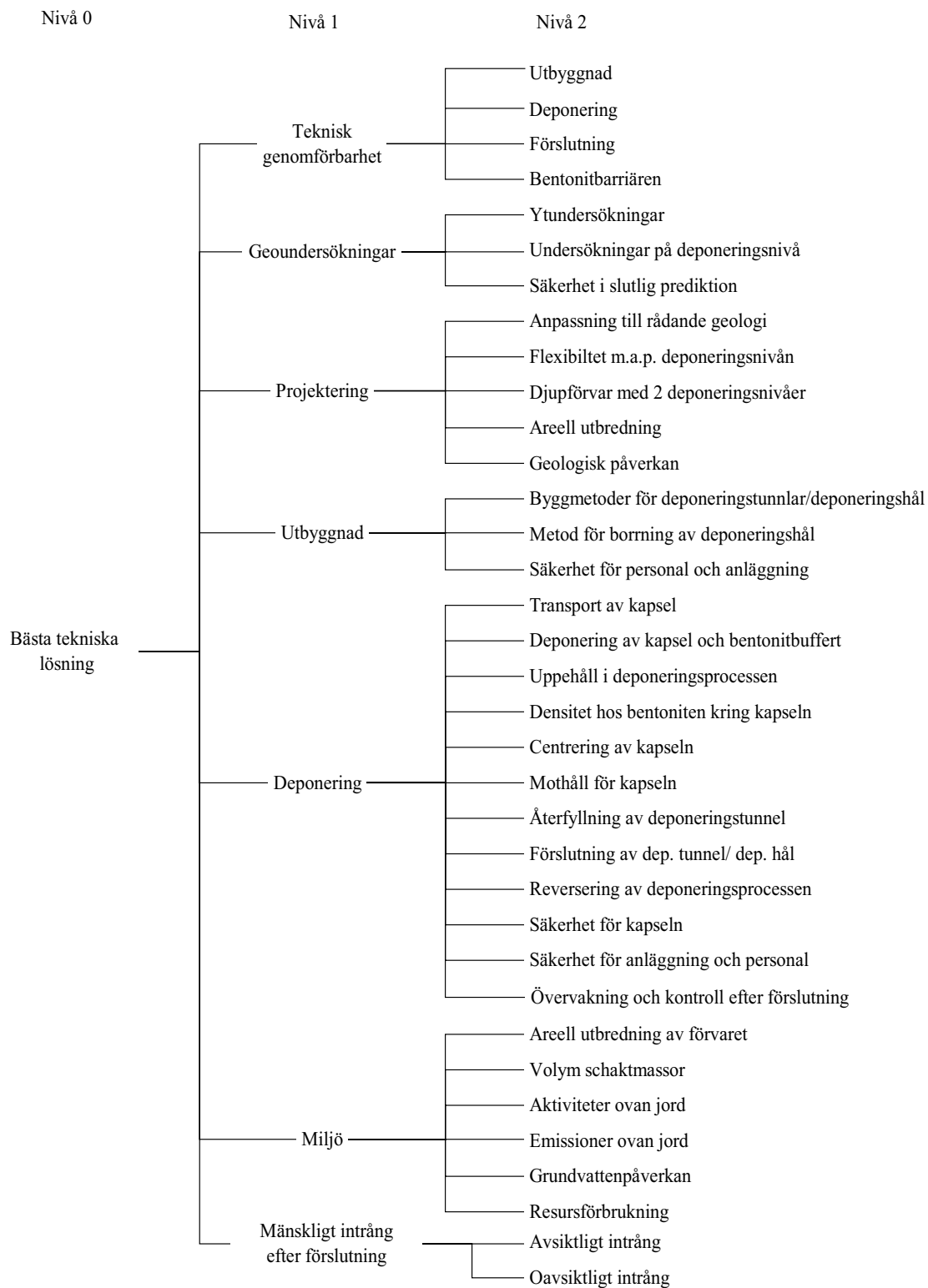
1. Beskrivning av de kriterier som ingår i jämförelsen och jämförelse med avseende på hierarkis nivå 3.
2. Jämförelse med avseende på hierarkis nivå 2.
3. Jämförelse med avseende på hierarkisk nivå 1, värdering och jämförelse med avseende på ”bästa tekniska lösning”.

De jämförelser mellan olika kriterier redovisas som bättre (+), sämre (-) eller lika (=) jämfört med referensmetoden KBS-3 V. + eller – inom parentes innebär att skillnaderna är små. Kommentaren ”ej relevant” innebär att en jämförelse inte kan göras på grund av skilda förutsättningar mellan metoderna.

I samband med värderingen av jämförelsen har en bedömning av behovet av teknikutveckling utförts för de olika deponeringsmetoderna.

3.2 Kriterier för jämförelse

Den hierarkiska strukturen för jämförelse är uppdelad på tre nivåer. I figur 3-1 redovisas kriterierna för jämförelse på hierarkisk nivå 1 och 2. Kriterierna för jämförelse på hierarkisk nivå 3 redovisas i kapitel 4.



Figur 3-1 Hierarkisk struktur för jämförelse.

3.3 Borråd eller sprängd deponeringstunnel

För KBS-3 V och H diskuteras två alternativa metoder för tillredning av deponeringstunnlarna. I SKB:s referensutformning antas dessa drivas med konventionell teknik genom borrhning och sprängning. Under senare år har möjligheten att driva dessa tunnlar med fullborrningsteknik diskuterats. Teknik för fullborrning av deponeringstunnlar redovisas bland annat i /16/.

Utförda analyser med avseende på långsiktig funktion och säkerhet, /11/, visar att flera fördelar erhålls med en borråd deponeringstunnel. Fördelarna med en borråd deponeringstunnel utgörs främst av följande faktorer:

- Mindre mäktighet på den störda zonen
- Mindre mängd främmande material (stabilare tunnlar med mindre behov av bergförstärkning)

En nackdel med borrade deponeringstunnlar är dock att arean och därmed mängden återfyllnadsmateria blir större på grund av den cirkulära formen på tunnlar. Genom en cirkulär form kommer onödigt mycket berg att behöva tas ut med hänsyn till den dimensionerande höjd/bredd på tunneln som erfordras för att utföra deponeringen av kapslarna.

Med hänsyn till fördelarna med avseende på långsiktig funktion och säkerhet har beslut tagits att den tekniska jämförelsen som redovisas i denna rapport skall baseras på borrade deponeringstunnlar för KBS-3 V och H.

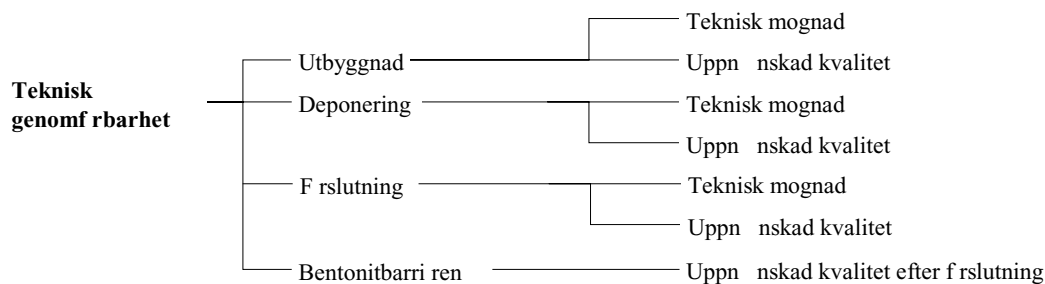
4 Beskrivning av kriterier för jämförelse och jämförelse med avseende på hierarkisk nivå 3

4.1 Teknisk genomförbarhet

4.1.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur

Utgångspunkten för jämförelsen är att alla studerade deponeringsmetoder har bedömts vara tekniskt genomförbara i fråga om utbyggnad samt deponering och förslutning. Möjligheten att uppnå önskad kvalitet för bentonitbarriären bedöms separat då kvaliteten påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten. Skillnader föreligger dock mellan metoderna vilka i varierande skala är baserade på ”känd teknik”, ”delvis känd teknik” och ”oprövad teknik”.



Figur 4-1 Hierarkisk struktur för jämförelse av teknisk genomförbarhet.

Utbyggnad

Jämförelsen av deponeringsmetoder avser för KBS-3 V och H att bygga deponeringstunnlar och borra ca 8 m djupa deponeringshål i botten eller i väggen på deponeringstunnlarna medan det för MLH avser borrning av ca 250 m långa horisontella deponeringshål.

Med önskad kvalitet avses bland annat möjligheten att med betryggande säkerhet för arbetare och anläggning, bygga stabila bergutrymmen med avsedd geometri och med specificerade krav på begränsad påverkan på omgivande berg.

KBS-3 metoden är baserad på beprövad teknik för borrning av deponeringstunnlar och deponeringshål.

För MLH kommer det att erfordras viss teknikutveckling och anpassning av känd teknik för borrning av deponeringshålen och för att utföra tättnings- och förstärkningsarbeten i långa horisontella deponeringshål med liten dimension.

Det bedöms fullt möjligt att för studerade metoder bygga planerade bergutrymmen med erforderlig kvalitet.

Deponering

För att deponera kapslar och bentonit i deponeringshålen erfordras maskinella utrustningar som kan hantera de tunga kapslarna och de bentonitblock som bygger upp bentonitbarriären. Hanteringen av kapslar och bentonit måste vara skonsam och kunna utföras under kontrollerade strålningsförhållanden för den personal som utför deponeringsarbetet.

Utveckling av deponeringstekniker och maskinell utrustning för KBS-3 V har pågått under flera år. Utvecklingsarbetet har hittills varit koncentrerat till konceptuella studier av olika utrustningar, pressning av bentonitblock samt test i full skala i Äspö HRL.

Vissa konceptuella studier har även utförts för KBS-3 H och MLH. Detta utvecklingsarbete har inte varit lika omfattande och försök i full skala av deponering i horisontella deponeringshål har inte utförts.

Förslutning

Deponeringstunnlarna för KBS-3 V och H planeras att förslutas med en blandning av bergkross och bentonit.

Försök med förslutning av deponeringstunnlar för KBS-3 V pågår i Äspö HRL. Försöken omfattar bland annat val av material samt metoder för packning. Transporttunnlarna och övriga bergutrymmen, som i princip är de samma för studerade deponeringsmetoder, kommer att förslutas med liknande metoder som deponeringstunnlarna.

För MLH förekommer inga deponeringstunnlar. Förslutningen av deponeringshålen ingår i deponeringsprocessen.

Bentonitbarriären

För att säkerställa den långsiktiga funktionen och säkerheten krävs det att bentonitbarriären efter svällning erhåller förutbestämda, specificerade egenskaper avseende svällningstryck, värmeledningsförmåga, hydraulisk konduktivitet etc.

För att säkerställa mycket höga krav på långsiktig funktion och säkerhet har det för KBS-3 V bedömts nödvändigt att fylla spalten mellan borrhålsvägg och bentonitbarriär med bentonitpellets för att barriären efter svällning och homogenisering skall få erforderlig densitet och hydraulisk konduktivitet (materialkrav framgår av /18/). För att säkerställa snabb svällning planeras resterande hålrum att fyllas med vatten.

Efterfyllning med bentonitpellets är tekniskt svårare att utföra vid horisontell deponering av kapslarna, KBS-3 H och MLH. Vid efterfyllnaden kommer pelletsen att hamna ovanpå och på sidan av den kompakterade bentonitbarriären. Detta innebär att olika mängd bentonit erhålls runt kapslarna som efter svällning inte kommer att hamna

centriskt i deponeringshålen. Genom denna excentriska placering av kapslarna bedöms det i dagsläget inte lämpligt att efterfylla med pellets vid horisontell deponering. Härigenom erhålls en barriär med något lägre densitet och därmed högre hydraulisk konduktivitet.

Efterfyllning med vatten blir vid horisontell deponering också svårare att utföra då det erfordras någon form av temporära barriärer som förhindra vattnet från att rinna ut från deponeringshålen.

4.1.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på teknisk genomförbarhet

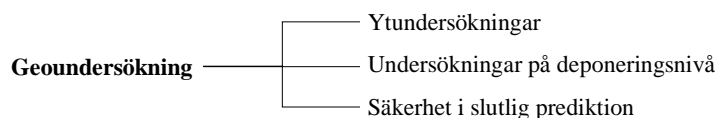
Tabell 4-1 Jämförelse med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3, Teknisk genomförbarhet

| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|--------------------------------|---|---------|-------------|
| Utbyggnad | Teknisk mognad | = | - |
| | Uppnå önskad kvalitet | = | = |
| Deponering | Teknisk mognad | - | - |
| | Uppnå önskad kvalitet | - | - |
| Förslutning | Teknisk mognad | = | Ej relevant |
| | Uppnå önskad kvalitet | = | Ej relevant |
| Bentonitbarriären | Uppnå önskad kvalitet efter förslutning | - | - |

4.2 Geoundersökningar

4.2.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur



Figur 4-2 Hierarkisk struktur för jämförelse av geologiska undersökningar.

Ytundersökningar

Ytundersökningar har flera syften och omfattar ett antal olika metoder (se /12/ för en allmän redogörelse). Bland annat används digital elevationsmodellering, olika geofysiska undersökningsmetoder vilka kompletteras med sprick- och bergartskartering, kärnborring mm. För förvarsutformning och byggande syftar ytundersökningarna främst till följande:

- Deterministiskt definiera diskontinuiteter av funktionsklass D1 och D2 (se /13/ för definitioner). Dessa avgränsar förvarsområdet (D1) och de block (D2) inom vilka deponeringstunnlar kan placeras.
- Definiera de hydrauliska egenskaperna, exempelvis konduktivitet i bergmassa och sprickzoner, anisotropi i blocken etc.
- Definiera sprickmatisens (D3-D4) egenskaper bland annat för användande i stokastiska simuleringar av bergmassan på förvarsdjup.
- Karakterisera bergmassan med avseende på bergspänningar, hållfasthet mm.

För de studerade deponeringsmetoderna gäller följande:

- Deponeringsnivån och grundlayouterna är den samma.
- Storleken på området som skall undersökas är i det närmaste identiska.
- Ingen skillnad föreligger avseende ”acceptabla” strukturer /13/ i anslutning till deponeringshålen.

Undersökningar på deponeringsnivån

Syftet med undersökningarna på deponeringsnivån, vilka utförs i och från schakt, ramper, transport- och deponeringstunnlar samt i deponeringshål, är bland annat att:

- Uppdatera den geologiska strukturmodell som definierades på basis av ytundersökningar.
- Fastställa blockgränser med större noggrannhet vilket möjliggör en detaljering av förvarslayouten.
- Definiera läget, riktningen, storleken och andra parametrar av betydelse /12/ med avseende på diskontinuiteter med funktionsklass D3. Dessa strukturer är kapselhåls-diskriminerande och påverkar bland annat deponeringstunnlarnas (KBS-3 V och H) och deponeringshålens (MLH) längd (optimering av layout).
- Uppdatera sprickmatisen (D3-D4) för analyser av långsiktig funktion och säkerhet, hydraulisk anisotropi mm.
- Godkänna eller överge ett bergblock för deponering eller en deponeringsposition på basis av fastställda kriterier.

För de studerade deponeringsmetoderna gäller följande:

- Undersökning av ramper, schakt, transporttunnlar och deponeringstunnlar (KBS-3 V och H) kommer att bedrivas med samma metodik.
- Undersökningar av deponeringspositionen genom kärnborrning bedrivs olika för KBS-3 V och H och MLH:
- KBS-3 V och H: Efter utbrytning av deponeringstunneln utförs kärnborrning i samtliga deponeringspositioner.

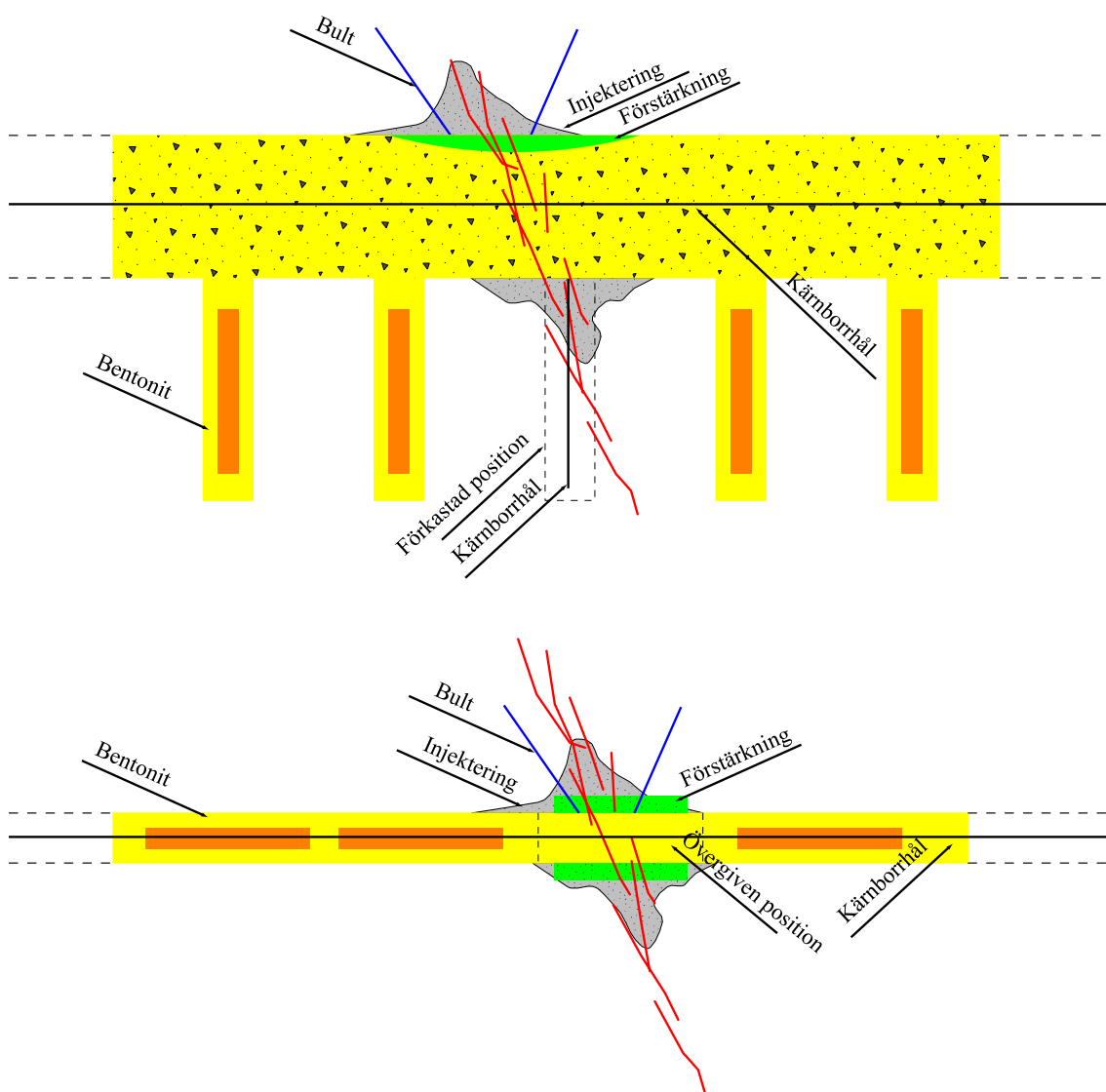
- MLH: Långa kärnborrhål borrar från transporttunnlarna (deponeringstunnlar utbryts ej i MLH).
- Kartering av deponeringshål sker på likartat sätt.

Det förekommer mindre skillnader mellan deponeringsmetoderna vad avser möjligheterna till undersökningar av förvarsområdet på deponeringsnivån. Informations-tätheten är proportionell mot mängden uttaget berg vilket skulle vara till fördel för KBS-3 V. Informationstätheten för KBS-3 H och MLH kan emellertid ökas med undersökningsborrningar och skillnaden mellan metoderna bedöms därför i praktiken vara försumbar.

Säkerhet i slutlig prediktion

För prediktion av strukturer med funktionsklass D1-D2 bedöms det ej föreligga några skillnader mellan deponeringsmetoderna. Layouten på förvaren är den samma och samma undersökningsmetodik används för studerade deponeringsmetoder. Skillnader i möjligheten att med precision lokalisera och karaktärisera strukturer av funktionsklasser D3-D4 bedöms emellertid föreligga mellan KBS-3 V och H och MLH. Dessa skillnader beror främst på att borrning, i berg som ej senare skall tas ut, enligt förutsättningarna för JADE, skall undvikas och att det i dagsläget inte finns geofysiska metoder som med tillräcklig upplösning, kan detektera strukturer (D3-D4) som är parallella med provdomänen (deponeringshålet).

Deponeringshålen i MLH kan emellertid under vissa förutsättningar betraktas jämförbara med deponeringstunneln i KBS-3 V och H (figur 4-3) vilket, i analogi med KBS-3 V och H, skulle medge kärnborrning för att förbättra geologiska prediktioner. Med detta betraktelsesätt skulle den skillnad som identifierats mellan metoderna i detta avseende vara liten.



Figur 4-3 Figuren illustrerar analogin mellan KBS-3 V och MLH. De delar av deponeringshålen (MLH) som måste förstärkas motsvaras i KBS-3 V av deponeringstunneln. Skillnaden mellan de båda metoderna ligger främst i materialet som används för återfyllnad. I KBS-3V och H används en blandning av bentonit och bergkross. Motsvarande i MLH består av kompakterad bentonit vilket har en avsevärt lägre konduktivitet.

I dagsläget betraktas borrhål för sondering som en osäker förutsättning då det ej finns någon godkänd metod framtagen för återfyllnad/tätning. Skulle emellertid borrhåll i MLH tunnlar kunna utföras utanför tunnelsektionen med bibehållen funktion är det författarnas bedömning att skillnaderna i predikterbarhet mellan de olika deponeringsmetoderna kan, ur alla praktiska hänseenden, anses vara marginella.

Baserat på dagens kunskap och förutsättningar bedöms, i enlighet med ovanstående resonemang, predikterbarheten vara bättre för deponering enligt KBS-3 V och H än för deponering enligt MLH. För utvärdering av betydelsen med avseende på långsiktig funktion och säkerhet måste skillnaderna, listade nedan, kvantifieras.

Följande skillnader har identifierats:

1. Informationstätheten i KBS-3 är högre på grund av större mängd uttaget berg och därmed undersökt bergvolym.
2. Deponeringshålen av typ MLH är ca 250 m långa (100-500 m). Extrapolering av strukturer från transporttunneln till deponeringshålet kan vara behäftad med mycket stora osäkerheter.
3. Strukturer av funktionsklass D3 kan skära deponeringshål av typ MLH utan att skäras av vare sig sonderande kärnborrhål eller transport/deponeringstunnel. Motsvarande kan även ske i KBS-3 V och H men kartering av ett borrat deponeringshål medför möjligheter att strukturellt beskriva och därmed extrapolera strukturerna till närmaste kapselposition. Deponeringshålet kan därmed överges utan att borraras, en möjlighet som MLH väsentligen saknar.
4. Det finns en risk att strukturer som är parallella med deponeringshålen för MLH aldrig detekteras och att dessa strukturer kan påverka förvarets långsiktiga funktion och säkerhet. Motsvarande kan även uppstå för KBS-3 V och H, t.ex. under botten på deponeringshålen. Men eftersom det inbördes avståndet mellan deponeringshålen är litet och att det är ytterst osannolikt att en struktur är helt plan och exakt parallell med deponeringstunneln är möjligheterna för prediktion av sådana strukturer större för KBS-3 V och H än för MLH även om prediktionerna är osäkra.

Med en given undersökningsinsats skulle den layout som teoretiskt upptar den minsta bergvolymen, KBS-3 H, erhålla den högsta informationstätheten vilket skulle vara till fördel för metoden. Förvarsområdets storlek styrs emellertid av bergblockens form, inbördes läge och storlek och inte minst av läget av SFL 3-5 i förhållande till övriga förvarsdelar samt uppdelningen av förvaret i två åtskilda deponeringsområden. Då förvarslayouterna är likartade och i praktiken kräver samma förvarsvolym bedöms ingen skillnad föreligga mellan deponeringsmetoderna i detta hänseende.

4.2.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på geundersökningar

Tabell 4-2 Jämförelse med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3 (hierarkisk nivå 2), Geundersökningar

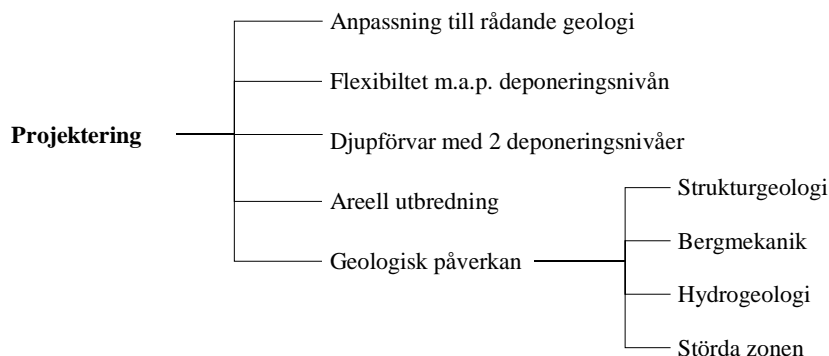
| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|--------------------------------|--------------------------------|---------|-----|
| Ytundersökningar | | = | = |
| Undersökningar på dep.nivån | | = | (-) |
| Säkerhet i slutlig prediktion | | = | = |

4.3 Projektering

4.3.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur

Med hänsyn till den tekniska utformningen av djupförvaren likställs KBS-3 V och H vid jämförelsen av deponeringsmetoderna.



Figur 4-4 Hierarkisk struktur för jämförelse av projektering.

Anpassning till rådande geologi

Samma grundlayout gäller för metoderna. Deponeringstunnlar (KBS-3 V och H), alternativt deponeringshål (MLH) byggs vinkelrätt från transporttunnlarna i ett ortogonalt system. Avståndet mellan deponeringstunnlar (KBS-3) eller deponeringshål (MLH) bestäms av den högsta tillåtna temperaturen i den omgivande bentoniten och bergets temperaturegenskaper.

Projekteringen kommer att förfinas under framtida layoutsleden baserat på tillgänglig geologisk information. Slutlig layout kommer att fastställas under byggnationen.

Med hänsyn till det ortogonala systemet (deponeringstunnlar och deponeringshål) och en tillåten övre begränsning på temperaturen i bentoniten finns det relativt små möjligheter till ändringar på layouten under byggandet av djupförvaret. Förändringarna kommer främst att innebära att olika positioner för deponeringstunnlar/deponeringshål överges eller inte. Samma krav på berget kring kapslarna gäller för de studerade deponeringsmetoderna.

Anpassningen av layouten till rådande geologi är något mer komplicerad för MLH än för KBS-3 V och H. Detta beror främst på att deponeringshålens praktiska borrlängder för MLH ligger inom intervallet 100-500 m.

Möjligheten att optimera tunnlaras riktning i förhållande till sprickmatrisen, spänningsfältet etc. bedöms vara likartad för studerade metoder.

Det bedöms inte vara någon signifikant skillnad mellan metoderna med avseende på möjligheten att anpassa layouten och kapselns position till rådande geologi.

Flexibilitet med avseende på deponeringsnivån

Utförda analyser avseende bergmekaniska förutsättningar visar att MLH är mer robust med avseende på variationer i riktning och storlek på rådande bergspänningar än KBS-3 V och H med borrade deponeringstunnlar. I en bergmassa med dels höga spänningar, dels varierande riktning på spänningarna finns det fördelar med MLH. Skillnaden bedöms dock vara av liten betydelse på aktuella deponeringsnivåer (400 - 700 m djup) och med de bergspänningar som normalt råder i svensk berggrund.

Med avseende på strukturgeologi och hydrogeologi har det inte identifierats några skillnader mellan metoderna som kan påverkas av olika deponeringsnivåer.

Det bedöms inte vara någon signifikant skillnad mellan metoderna med avseende på möjligheten att bygga förvaret på olika djup i bergmassan inom intervallet 400 – 700 m.

Djupförvar med två deponeringsnivåer

Samma grundlayout gäller för de olika metoderna. Skillnader förekommer med avseende på utformningen av deponeringstunnlar/deponeringshål.

Med hänsyn till rådande layout förekommer det ingen skillnad mellan metoderna med avseende på möjligheten att bygga ett förvar med flera deponeringsnivåer.

Areell utbredning

Djupförvarets storlek och areella utbredning beror dels på rådande geologiska förhållanden, dels på avståndet mellan deponeringstunnlar och deponeringshål.

Avståndet mellan deponeringstunnlar/deponeringshål och kapselpositioner har beräknats /14/ baserat på en antagen högsta temperatur i kontakten bentonit-kapsel och antagna termiska egenskaper för bentoniten och omgivande berg. I tabell 4-1 redovisas avståndet mellan deponeringstunnlar/ deponeringshål och kapslar samt en teoretisk area per kapsel för de olika metoderna. Beräkningen avser de avstånd som använts för jämförelsen av kostnader i JADE /14/ och är baserad på en högsta temperatur på 80°C hos bentoniten.

Som framgår av tabell 4-3 skiljer sig den teoretiska utbredningen av ett djupförvar relativt lite mellan metoderna där de horisontella deponeringsmetoderna ryms på något mindre yta.

Baserat på hypotetiska förvarsutformningar för A-, Be- och Ceberg /15/ framgår det emellertid att de geologiska förutsättningarna på aktuell plats för djupförvaret kommer att få mycket större betydelse för utbredningen av förvaret än vad som förutsatts för de teoretiska beräkningarna i tabell 4-1. Preliminära beräkningar (Munier, 1999) av erforderlig area (KBS-3 V) visar att det för A-, Be- och Ceberg i genomsnitt krävs ca 3-4 km² om SFL 3-5 skall rymmas inom förvarsområdet och ca 2-3 km² utan SFL 3-5.

Då både de teoretiska beräkningarna av den areella utbredningen och utrymmet som krävts för hypotetiska förvarsutformningar i A-, Be- och Ceberg är snarlika för studerade metoder, bedöms det inte föreligga någon skillnad mellan metoderna med avseende på behovet av markområde.

Tabell 4-3 Avstånd mellan deponeringstunnlar och kapslar

| Deponeringsmetod | Avstånd deponeringstunnlar / deponeringshål (m) | Avstånd mellan kapslar inkl. tillägg för dåligt berg (m) | Teoretisk area per kapsel (m ²) | Teoretisk area för 3800 kapslar (km ²) |
|------------------|---|--|---|--|
| KBS-3 V | 40 | 6,93 | 277 | 1,1 |
| KBS-3 H | 60 | 3,91 | 235 | 0,9 |
| MLH | 40 | 6,63 | 265 | 1,0 |

Geologisk påverkan

Strukturgeologi

En utredning om strukturgeologins betydelse för valet av deponeringsmetod baserad på tidigare undersökningar av bergmassan inom Äspöområdet har utförts /7/. Äspötypiskt berg från ca 350-450 m djup och data från den TBM borrade delen av Äspölaboratoriet användes som bas för sprickstatistik och de därpå baserade resonemangen. FracMan-analyser (Golder Associates) användes för beräkning av sprickintensiteter och konnektivitet för olika riktningar i bergmassan.

För tydlighet återges endast resultaten av de strukturgeologiska analyserna. För detaljer hänvisas till /7/.

1. Andelen kapselhålsdiskriminerande sprickor med kinematiska indicier (förkastningar) bedöms utgöra ca 1-2% av sprickmatrisen, d.v.s. av det totala antalet sprickor. Skall dessa beaktas vid jämförelsen av deponeringsmetoder är sannolikheten för skärning med sådana strukturer störst för vertikal deponering (KBS-3 V) och horisontell deponering i nordostlig riktning (KBS-3 H och MLH) medan den är lägre för horisontell deponering i NV riktning (KBS-3 H och MLH).
2. Andelen vattenförande, kapselhålsdiskriminerande sprickor bedöms utgöra ca 2% av sprickmatrisen. Denna grupp omfattar även vattenförande förkastningar (gäller enskilda diskontinuiteter; sprickzonerna ingår ej i analysen). För att optimera förvarslayouten ur denna aspekt bör kapselhålen orienteras vertikalt eller, vid horisontell deponering, mot NV.
3. Densiteten av kapselhålsdiskriminerande sprickor, enligt punkterna 1 och 2 ovan, bedöms vara tillräckligt låg (< 5 % av den totala densiteten), inom den studerade bergmassan, för att dessa ej skall behöva beaktas vid jämförelsen av bortfallet av kapselpositioner för KBS-3V och KBS-3H.

4. Analyser med FracMan /7/ visar att ingen signifikant skillnad i sprickintensitet kan påvisas i kapselhålen vid jämförelse av de olika deponeringsmetoderna (KBS-3).
5. Analyser med PAWorks och MAFIC /7/ visar att för de valda flödesriktningarna är spricknätverken mer konnekterade, det vill säga antalet potentiella flödeskanaler är större, i vertikal- än i horisontell led. Analyserna visar också att konnektionen är större för horisontell deponering i nordvästlig- än i nordostlig riktning.
6. Den bergart som på Äspö benämns finkornig granit bedöms /7/ generellt vara kapselhålsdiskriminerande som bergart på grund av dess höga sprickintensitet. MLH tunnlar, vilka på grund av sin längd i förhållande till de andra studerade kapselhålskonfigurationerna ej helt kan undvika denna bergart, bör riktas mot NV för att minimera skärningsytan av densamma i tunnarna. Denna riktning är dessutom gynnsam ur bergmekanisk synvinkel. Nackdelen med en sådan riktning på MLH är dock att tunnarna löper parallellt med de vattenförande strukturerna och den hydrauliska anisotropin vilket, om långa sprickor är vanliga, kan försvåra tätning.

Deponeringshål i MLH kommer borraras genom diskontinuiteter klassade som D3, för att bergvolymerna bortom dessa skall kunna utnyttjas. För att säkerställa ställda krav på långsiktig funktion och säkerhet krävs särskilda åtgärder för att förstärka och täta sådana avsnitt.

Bergmekanik

De bergmekaniska aspekterna av deponering i olika riktningar studerades av Clay Technology /7/ med bl.a. olika typer av numeriska koder. För de olika deponeringsmetoderna analyserades konstruktionernas stabilitet i relation till rådande bergspänningar och diskontinuitetsmatris i bergmassan närmast deponeringshålet (närfältsberget), samt den bergmekaniska inverkan på vattenomsättningen i närfältet.

Det primära resultatet av analyserna är att relativt små skillnader i funktionssätt har kunnat identifierats vid en jämförelse av de olika deponeringsmetoderna. En förutsättning är att deponeringshålen, inklusive MLH, kan orienteras i en från bergmekanisk synpunkt gynnsam riktning; deponeringshålens längdaxel riktas fördelaktigast parallellt med σ_1 (Största horisontalspänningen), vilken på Äspö stryker ca 310°.

Resultaten av de bergmekaniska studierna sammanfattas nedan:

1. MLH och KBS-3 V, med sprängd deponeringstunnel, är de deponeringsmetoder som är mest robusta; det vill säga vid en jämförelse med andra metoder påverkas dessa mindre av variationer i riktningen av σ_1 .
2. KBS-3 H, borrarad deponeringstunnel är det bästa alternativet om tunnelriktningen kan optimeras i förhållande till rådande spänningsförhållanden men samtidigt det alternativ som är känsligast för variationer i spänningsfältet. Endast måttliga variationer i orienteringen av σ_1 inom bergmassan förutsätts kunna accepteras.

Blockutfallen har studerats med två olika metoder vilka ger snarlika resultat. Clay Technology baserade beräkningarna på den för uppdraget upprättade förenklade bergstrukturen medan Golder Associates använde ett stokastiskt spricknätverk (DFN).

Analyserna kan ej påvisa någon signifikant skillnad i frekvensen blockutfall mellan de olika deponeringskoncepten.

Deponeringshålerna för MLH är mindre känsliga för variationer i det lokala spänningsfältet än deponeringstunnlar i KBS-3 V och H /7/. KBS-3 H kan dock, under gynnsamma förhållanden, vara bergmekaniskt stabilare än både MLH och KBS-3 V. Detta kräver emellertid att deponeringstunnlarna kan roteras till optimal riktning i förhållande till rådande spänningsfält. Det bedöms troligt att samtliga deponeringstunnlar och deponeringshål för MLH inom ett förvar kommer att orienteras i en och samma riktning vilket, om betydande variationer i spänningsfältet förväntas förekomma, är en nackdel för KBS-3 H och en fördel för MLH.

Det är viktigt att påpeka att de flesta av de bergmekaniska konsekvenserna går att åtgärda. Exempelvis kan instabilt berg åtgärdas med bultning och sprutbetong; inläckage av vatten kan i viss utsträckning åtgärdas med injektering utan att järn- och cementmängderna behöver bli så stora att de påverkar den kemiska miljön menligt på lång sikt /11/.

Hydrogeologi

Utförd studie /7/ visar att transmissiviteten Äspötypiskt berg är riktning beroende och varierar mellan (sonderingshål) $4 \cdot 10^{-7}$ (m^2/s) inom riktningintervall 120-140° och $2 \cdot 10^{-9}$ (m^2/s) inom 20-80°. Det vill säga transmissiviteten är ca 100 gånger större i vertikala plan med nordvästlig riktning än i motsvarande struktur i nordostlig riktning. I kärnbrorhål, vilka representerar flödet i horisontalplanet, har transmissiviteten beräknats till $2 \cdot 10^{-8}$ (m^2/s).

Medelavståndet mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet redovisas i tabell 4-4. Medelavståndet givet ett visst värde är kortare i vertikala kärnbrorhål än i horisontella sonderingshål.

Tabell 4-4 Aritmetiskt medelavstånd mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet större än ett visst givet värde.

| Transmissivitet (m^2/s) | Medelavstånd (m) |
|---|------------------|
| <i>Sonderingshål (subhorisontella)</i> | |
| $>10^{-5}$ | 70 |
| $>10^{-7}$ | 35 |
| $>10^{-9}$ | 20 |
| <i>Kärnbrorhål (subvertikala)</i> | |
| $>10^{-5}$ | 45 |
| $>10^{-7}$ | 14 |
| $>10^{-9}$ | 8 |

Undersökningarna av transmissivitetens anisotropi i bergmassan användes i /7/ som indata för en tillämpning av ett egenutvecklat geostatistiskt analysverktyg kallat BayMar (Bayesian Markov Geostatistisk Modell). De utförda geostatistiska analyserna visade att tydliga skillnader förelåg mellan olika riktningar på deponeringshålerna. För

beräkningarna användes en kritisk konduktivitet K'_{cr} , om 10^{-9} m/s /7/. Studierna visade att horisontell deponering (MLH och KBS-3 H) i 310° , d.v.s. parallellt med den hydrauliska anisotropin, resulterar i ca dubbelt så många acceptabla kapselpositioner som vid horisontell deponering i 040° (vinkelrätt mot den hydrauliska anisotropin). Sannolikheten för acceptans av kapselpositioner med vertikal deponering ligger mellan de ovan angivna ytterlighetsfallen. Analyserna med denna metoden visar att acceptansen av horisontella kapselpositioner orienterade mot NE är 30% medan vertikala kapselpositioner och horisontella kapselpositioner orienterade mot NV medför acceptans av 53% respektive 60%.

Ett antal skillnader har identifierats mellan metoderna med avseende på faktorer som är geologiskt betingade. De flesta bedöms inte vara signifikanta ur ett praktiskt hänseende. Det som emellertid främst skiljer MLH från KBS-3 V och H är den förras större känslighet för vattenföringen i bergmassan. De åtgärder som krävs för att täta eller stabilisera ett deponeringshål för MLH är tekniskt och framför allt praktiskt mer komplicerade att utföra än motsvarande för KBS-3 V och H.

Störda zonen

Vid utbrytning av en tunnel eller borrning av ett hål bildas en zon i berget kring tunnel eller borrhål med ökad uppsprickning. Mäktigheten på den störda zonen beror på tvärsnittets form och metoden för bergguttag. Den störda zonen ger upphov till en zon kring tunneln med högre konduktivitet som kan bidra till ett ökat vattenflöde längs tunneln.

I tabell 4-5 redovisas några exempel på den störda zonens mäktighet.

Tabell 4-5 Mäktighet på den störda zonen (se /17/ för detaljer).

| Typ av tunnel | Mäktighet på den störda zonen |
|---|-------------------------------|
| Sprängd deponeringstunnel. KBS-3, 4 x 5 m | 0,3 - 0,8 m |
| Borrad deponeringstunnel. KBS-3, Ø 5 m | < 0,03 m |
| Borrad deponeringshål, Ø 1,75 m | < 0,03 m* |

* Uppskattat värde

Som framgår av tabell 4-5 minskar påverkan avsevärt av den störda zonen om deponeringstunnlarna tas ut genom fullortsborrning.

Om deponeringstunneln för KBS-3 V och H tas ut genom borrning och sprängning kan inverkan av den störda zonen reduceras genom att deponeringshålen borrar djupare (mera kompakterad bentonit mellan kapsel och den störda zonen).

4.3.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på projektering

Tabell 4-6 Jämförelse med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3 (hierarkisk nivå 2), projektering.

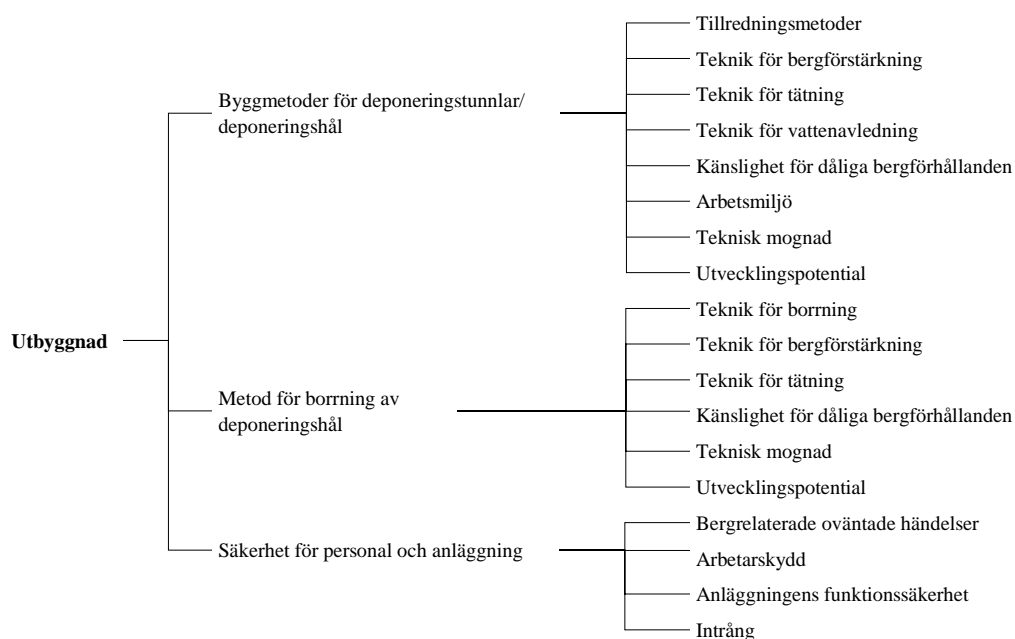
| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|---|--------------------------------|---------|-----|
| Anpassning till rådande geologi | | = | (-) |
| Flexibilitet m.a.v.s. på deponeringsnivån | | = | = |
| Djupförvar med 2 deponeringsnivåer | | = | = |
| Areell utbredning | | = | = |
| Geologisk påverkan | Strukturgeologi | = | (-) |
| | Bergmekanik | (-) | (+) |
| | Hydrogeologi | = | (-) |
| | Störda zonen | = | = |

4.4 Utbyggnad

4.4.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur

Jämförelsen med avseende på teknik för byggandet av deponeringstunnlarna omfattar en jämförelse mellan deponeringstunnlar för KBS-3 V och H och deponeringshål för MLH.



Figur 4-5 Hierarkisk struktur för jämförelse av utbyggnad.

Byggmetoder för deponeringstunnlar/deponeringshål (MLH)

Tillredningsmetoder

Deponeringstunnlarna för KBS-3 V och H förutsetts tillredas med TBM-borrning. Borrningen baseras på konventionell, befintlig teknik. Viss teknisk utveckling erfordras för att förenkla utdragningen av bormaskinen efter slutförd borrning, förenkla flyttningen mellan tunnlar och starten (påhugg) på borrningen av ny deponeringstunnel.

Eventuell rymning av tunnlar för att få plats med bergförstärkning kan utföras i samband med utdragningen av bormaskinen från deponeringstunneln (kuttrar fälls ut som ger större tunneldimension).

Maskinutrustningar för tunnelborrning i hårt, kristallint berg tillverkas av flera leverantörer. För borrning av deponeringshål för MLH är viss anpassning av befintlig teknisk utrustning till de förutsättningar som är aktuella för borrning av långa deponeringshål med diametern 1,75 m nödvändig, till exempel för kravet på rakhet och snabba flyttningar mellan deponeringshål. För att få plats med bergförstärkning kommer det bli nödvändigt att rymma deponeringshålen på vissa avsnitt.

Teknik för bergförstärkning

Konventionella metoder är tillämpbara för förstärkningsarbeten i borrhålen i deponeringstunnlar och deponeringshål. Bergförstärkningen kan utföras i samband med borrning eller efter avslutad borrning när maskinen har avlägsnats från deponeringstunneln.

För att utföra förstärkningsarbeten i långa deponeringshål med liten dimension (MLH) kommer det bli nödvändigt att utveckla nya maskinutrustningar. Vid behov skarvas bultarna till erforderlig längd.

Teknik för tätning

Konventionell teknik för tätning är tillämpbar med erforderliga modifieringar med avseende på höga vattentäck och täthetskrav samt eventuella krav på begränsning av injekterade mängder bruk.

Teknik för förinjektering i samband med tunnelborrning finns framtagen och har bland annat tillämpats vid den borrning som utfördes i Äspötunnelns nedre del.

Injekteringsarbeten kommer för MLH att utföras i två steg. I ett första steg planeras injekteringen utföras via det kärnborrhål som kommer att borrar längs med och inom tvärsnittet på deponeringshålen. I ett andra steg kommer kompletterande förinjektering att utföras under tunnelborrningen.

På grund av det trånga utrymmet i deponeringshålen för MLH är det inte rimligt att utrusta tunnelborrhållsmaskinen med utrustning för förinjektering. Förinjektering kan dock utföras under borrning med flyttbar utrustning när maskinen står still. Viss utrustning som bandtransportör för uttransport av schaktmassor måste dock avlägsnas.

Efterinjektering kommer att utföras vid behov för samtliga deponeringsmetoder.

Layouten för MLH med långa deponeringshål medför att inläckande vatten till deponeringshålen kommer att ackumuleras och rinna längs med deponeringshålen ut till transporttunnlarna. Med hänsyn till kravet på ett begränsat vatteninflöde kommer tätningsarbetena i deponeringshålen för MLH att bli mera omfattande än för KBS-3 V och H. För MLH är det dessutom, genom en layout med långa deponeringshål, svårare att undvika inläckage till deponeringshålen än för KBS-3 V och H där läget för deponeringshålen fastställs baserat på geologisk kartering i deponeringstunnlarna och efterföljande kärnbörning.

Teknik för vattenavledning

För KBS-3 V och H kommer konventionell teknik för vattenavledning kunna användas (droppkoppar, plåtar, rännor etc.).

För MLH kommer vattenavledning med rännor, rör eller dylikt inte att kunna användas på grund av det trånga utrymmet i deponeringshålen. Allt vatten kommer att ansamlas på och rinna ut längs botten på deponeringshålet som av detta skäl måste luta ut mot transporttunneln.

Känslighet för dåliga bergförhållanden

Med hänsyn till förutsättningarna för ett djupförvar bedöms risken för dåliga bergförhållanden vara liten. Genom den runda formen på deponeringstunnlar och deponeringshål erhålls ett naturligt stabilt tunneltvärsnitt. Nedfall av bergblock och spjälkning av berg på grund av ogynnsam sprickriktning och/eller höga bergspänningar kan lokalt skapa stabilitetsproblem. Erfarenhet från byggandet av Äspötunneln visar att omfattningen sannolikt blir liten och att de uppkomna problemen är hanterbara. Stora byggproblem erhålls dock om det inträffar ras över tunnelborrningsmaskinen.

MLH kommer att vara mera känslig för dåliga bergförhållanden då deponeringshålen genom sin långa längd med större frekvens kommer att passera genom områden med sämre bergförhållanden. Vid dåliga bergförhållanden kommer det bli svårare att utföra bergförstärkningsarbeten och tätningsarbeten för MLH än för KBS-3 V och H på grund av de långa deponeringshålen med liten dimension.

Det mest svårbemästrade bergtekniska problemet bedöms vara stora och plötsliga inflöden av grundvatten till tunnarna. Erfarenheter från bland annat Äspö HRL visar att vissa zoner, bland annat på grund av högt vattentryck, kan bli mycket svåra att tätta.

Vid ras över tunnelborrningsmaskinen kommer det för MLH att bli svårare att vidta olika åtgärder för att loss göra tunnelborrningsmaskinen på grund av det trånga utrymmet. Vidare är oväntade stora vattenflöden mer svårhanterliga för MLH än för KBS-3 V och H då deponeringshålen har liten dimension.

Arbetsmiljö

Arbetsmiljön vid börning av deponeringstunnlarna kan jämföras med de arbetsförhållanden som normalt råder vid tunnelborrningsmaskinen (till exempel vid tidigare börning på Äspö).

Det trånga utrymmet som råder vid borrhning av deponeringshål för MLH kommer att göra alla arbeten besvärligare än vid tunnelborrhning av mera normala tvärsnitt. Med god planering och speciellt anpassade maskinutrustningar för tättnings- och förstärkningsarbeten bedöms det dock vara möjligt att skapa acceptabla arbetsförhållanden även i de trånga deponeringshålen för MLH. Erforderliga arbeten i deponeringstunnlarna kommer dessutom i möjligaste mån att begränsas genom användningen av fjärrmanövrerad utrustning.

Teknisk mognad

Borrhning av deponeringstunnlar för KBS-3 med tillhörande förstärknings- och tättningsarbeten kan utföras med konventionell teknik.

För borrhning av långa horisontella deponeringshål för MLH är det nödvändigt att anpassa på marknaden tillgängliga maskinutrustningar för bland annat kravet på raket och snabba flyttningar mellan deponeringshål. Det har för MLH /3/ bedömts fullt möjligt att tillverka erforderlig borrhutrustning med de speciella krav som måste ställas för att borra långa deponeringshål med liten diameter. Erforderlig maskinell utrustning för att utföra förstärknings- och injekteringsarbeten i deponeringshålen bygger på känd teknik.

Utvecklingspotential

Erforderliga bergarbeten kan för KBS-3 V och H utföras med konventionell teknik. Inget speciellt utvecklingsbehov föreligger.

För MLH bedöms potentialen vara god för att utveckla lämpliga maskiner för borrhningen av deponeringshålen och den utrustning som erfordras för att utföra övriga arbeten i deponeringshålen. Vid utveckling av maskinutrustning och arbetsmetoder är det nödvändigt att ta hänsyn till säkerheten och den arbetsmiljö som råder i de mycket trånga deponeringshålen. Erforderligt utvecklingsarbete kommer främst att omfatta följande områden:

- TBM anpassad för borrhning av deponeringshål.
- Teknik för att utföra tättnings- och förstärkningsarbeten i de långa horisontella deponeringshålen, \varnothing 1,75 m.
- Teknik för att gjuta/montera tät inklädnad i vattenförande partier.

Identifierade hot mot MLH som svårligen kan påverkas genom teknisk utveckling är behovet av de tättningsinsatser som kommer att krävas på grund av det vatten som kommer att läcka in och rinna längs med deponeringshålen ut mot transporttunnlarna. Begränsningar av inläckaget erfordras med hänsyn till beständigheten hos den bentonitbarriär som omgärdar kapslarna.

Metod för borrarning av deponeringshål

Teknik för borrarning

Samma, beprövade metoder kommer att användas för borrarning av deponeringshål för KBS-3 V och KBS-3 H. Flera typer av bormaskiner finns på marknaden som kan borra korta, vertikala eller horisontella, deponeringshål. Vertikala hål i full skala har borrats av POSIVA i Finland med utrustning för stigortsborrarning. I Äspö HRL har vertikala deponeringshål borrats med en liten TBM. I princip samma TBM som framgår av figur 2-9 användes för borrarningen (aktuell TBM finns uppställd på Äspö). För frammatning av bormaskinen användes domkrafter som trycker mot foderrör monterade efter borrhuvudet. Borrkaxet har vid båda borrarningarna sugits upp med vakuumteknik.

För MLH ingår borrarning av deponeringshål, teknik för förstärkning, teknik för tätning, teknisk mognad och utvecklingspotential i jämförelsen av deponeringstunnlar/deponeringshål.

Teknik för förstärkning

För KBS-3 V och H planeras ingen förstärkning av deponeringshålen. Om hålen blir instabila överges deponeringshålen.

För MLH, se tillredningsmetoder för deponeringstunnlar/deponeringshål.

Teknik för tätning

För KBS-3 V och H utförs injektering vid behov från deponeringstunneln före borrarning av deponeringshålet.

För MLH, se tillredningsmetoder för deponeringstunnlar/deponeringshål.

Känslighet för dåliga bergförhållanden

Deponeringshålen kommer med hänsyn till kraven på långsiktig funktion och säkerhet att borras i bra berg.

För KBS-3 V och H borras deponeringshålen i botten eller i väggarna på deponeringstunnlarna och varje position bestäms baserat på noggrann geologisk kartering som verifieras med ett kärnborrhål. Risken för dåliga bergförhållanden och problem med instabila borrhål bedöms därför vara mycket liten.

Till skillnad från KBS-3 V och H kommer i MLH, allt inläckande vatten till deponeringshålen att ansamlas i hålen och med självfall rinna ut till transporttunnlarna. Detta vatten kan menligt komma att påverka bentonitbarriären vid deponeringen av kapslarna.

MLH bedöms vara känsligare för inläckande vatten än KBS-3 V och H där det finns möjlighet att styra vattenflöden längs deponeringstunnlarna förbi deponeringshålen. Genom en layout med långa deponeringshål är det ett önskemål för MLH att utnyttja bergmassan för deponering bortom eventuella vattenförande zoner (zoner klassade som D3).

Acceptabla inläckage till deponeringshålen håller på att analyseras. Fullskaleförsök pågår i Äspö HRL.

För MLH, se vidare känslighet för dåliga bergförhållanden för borring av deponeringstunnlar/deponeringshål.

Teknisk mognad

Tekniken för borring av deponeringshål för KBS-3 V och H baseras på väl beprövad teknik.

Beträffande värdering av tekniken för att borra långa horisontella deponeringshål tillhörande MLH metoden, se byggandet av deponeringshål.

Utvecklingspotential

Tekniken för borring av deponeringshål för KBS-3 V och H baseras på väl beprövad teknik.

MLH baseras på mindre beprövad teknik än KBS-3 V och H. MLH kommer att kräva vissa utvecklingsinsatser för borring av långa horisontella deponeringshål samt för att utföra injekterings- och bergförstärkningsarbeten i deponeringshålen. Det har inte identifierats några tekniska hot som indikerar att det inte går att bygga ett djupförvar enligt MLH-metoden.

Säkerhet för personal och anläggning

Bergrelaterade händelser

Risken för ras eller andra svårbemästrade bergförhållanden bedöms vara liten och lägre än vid traditionellt bergbyggande och gruvdrift:

- Djupförvaret förutsätter bra berg
- Bergschakt föregås av kärnboring
- Geologisk information och erfarenhet kommer kontinuerligt att insamlas från tillredning av:
 1. Transporttunnel
 2. Angränsande deponeringstunnlar/deponeringshål

För KBS-3 V och H kommer instabila bergförhållanden etc. att kunna åtgärdas med konventionella bergbyggnadsmetoder.

För MLH kommer eventuella ras eller andra typer av instabila bergförhållanden att bli svårare att åtgärda på grund av de långa deponeringshålen med liten dimension. Detsamma gäller vid oväntade, stora inflöden av vatten.

Arbetarskydd

Det råder i princip ingen skillnad mellan metoderna med avseende på arbetarskydd då layouten på anläggningarna i princip är densamma (tunnlar/deponeringshål som slutar blint). Erforderliga arbeten för att bygga djupförvaret kommer att kunna utföras med hög säkerhetsnivå med avseende på arbetarskydd och anläggningens funktionssäkerhet för studerade deponeringsmetoder.

Grundprincipen för byggande av berganläggningar är att det skall finnas två utrymningsvägar, alternativt tillgång till räddningskammare. Dessa förutsättningar kan uppfyllas för båda KBS-3 V och H och MLH. De små deponeringshålen i MLH ställer dock ökade krav på tekniker för kommunikation, utformning av räddningskammare etc.

Samma risk föreligger för de båda metoderna med avseende på bergutfall.

Med hänsyn till den lilla dimensionen bör deponeringshålen för MLH borras med fjärrstyrning, vilket minskar risken för personskador.

Anläggningens funktionssäkerhet

Det föreligger i princip ingen skillnad mellan metoderna med avseende på funktions-säkerhet då layouten på anläggningarna i princip är densamma.

Det kan föreligga vissa fördelar med MLH då den utbrutna tunnelvolymen är mindre och att det inte utförs någon separat borring av deponeringshål. För MLH krävs det inte heller någon länsumpning av deponeringshål. Mindre vatten bör totalt läcka in på grund av en mindre utbruten bergvolym. Det mindre behovet av bergarbeten, länsumpning etc. bedöms vara positivt med hänsyn till risken för brand under jord. Å andra sidan kan det lilla utrymmet i deponeringshålen skapa problem, som i dagsläget inte kan överblickas.

Intrång

Risken för intrång av utomstående personer för att sabotera anläggningen torde vara den samma för deponeringsmetoderna då layouten på anläggningarna i princip är lika.

Genom samma principiella layout är möjligheterna till oavsiktligt intrång den samma för alla tre metoderna.

4.4.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på utbyggnad

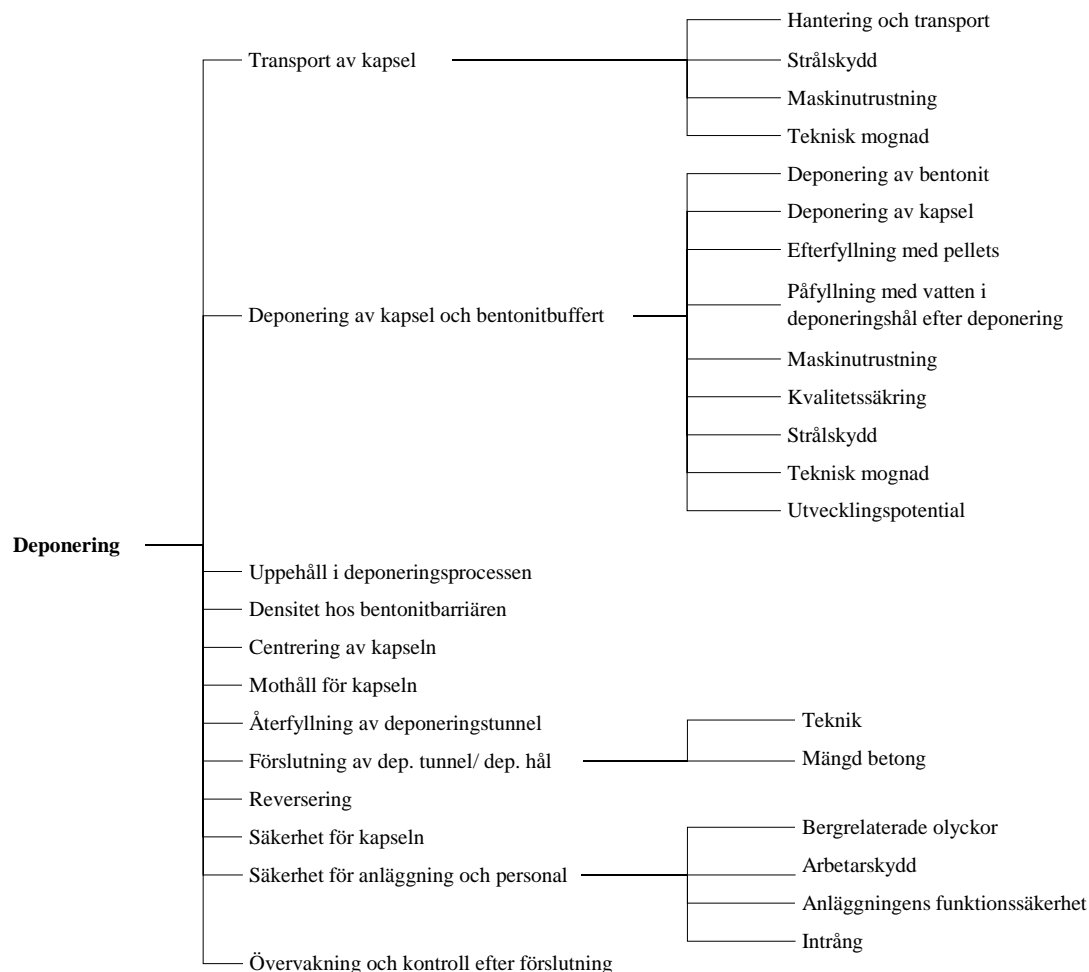
Tabell 4-7 Jämförelsen med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3, Utbyggnad.

| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH | |
|--|---|-----------------------------|-------------|-------------|
| Byggmetoder för deponeringstunnlar/ deponeringshål | Bergbrytningsmetoder | = | (-) | |
| | Teknik för bergförstärkning | = | (-) | |
| | Teknik för tätning | = | (-) | |
| | Teknik för vattenavledning | = | Ej relevant | |
| | Känslighet för dåliga bergförhållanden | = | - | |
| | Arbetsmiljö | = | = | |
| | Teknisk mognad | = | (-) | |
| | Utvecklingspotential | = | + | |
| | Metod för borrhning av deponeringshål | Teknik för borrhning | = | Ej relevant |
| | | Teknik för bergförstärkning | = | Ej relevant |
| Teknik för tätning | | = | Ej relevant | |
| Känslighet för dåliga bergförhållanden | | = | - | |
| Säkerhet för personal och anläggning | Teknisk mognad | = | Ej relevant | |
| | Utvecklingspotential | = | Ej relevant | |
| | Bergrelaterade oväntade händelser | = | - | |
| | Arbetarskydd | = | = | |
| | Anläggningens funktionssäkerhet | = | + | |
| | Intrång | = | = | |

4.5 Deponering

4.5.1 Beskrivning av kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur



Figur 4-6 Hierarkisk struktur för jämförelse av deponering.

Transport av kapseln

Alla transporter i transporttunneln planeras att utföras med en liggande kapsel och med ett omslutande strålskydd.

Dockning till deponeringsutrustningen planeras för KBS-3 V och H att utföras vid mynningen till deponeringstunnlarna. För MLH utförs dockningen inne i deponeringshålen. Dockningsoperationen är enklare för MLH då kapseln, omgärdad av bentonit, skjuts över till deponeringshålet utan någon roterande rörelse.

Skillnaden mellan metoderna med avseende på hantering av kapsel, strålskydd, kvalitetssäkring, krav på maskinutrustning och teknisk mognad (maskin och process) är liten och eventuella nackdelar för någon metod bedöms kunna hanteras genom en väl utvecklad maskinutrustning.

Deponering av kapsel och bentonitbuffert

Deponering av bentonit

För KBS-3 V placeras bentoniten i deponeringshålet före deponering av kapseln vilket ger goda möjligheter till att kontrollera utförandet och säkerställa kvaliteten hos bentonitbarriären före deponering av kapseln.

För KBS-3 H diskuteras två olika principer för inplaceringen av bentonitblocken. En möjlighet är att placera bentoniten i delar på samma sätt som för KBS-3 V. Under deponeringen skyddas bentonitbarriären av ett foderrör. En annan möjlighet är att deponera bentonit och kapsel samtidigt. Det bedöms också möjligt att tillämpa samma deponeringsprocess för KBS 3 H som föreslagits för MLH.

Föreslagen deponeringsteknik för MLH innebär att kapsel och bentonit deponeras i ett paket, omslutet av ett nät av kopparskenor. Hela paketet skjuts in på botten av deponeringshålet. Föreslagen deponeringsutrustning är robust och inbegriper få hanteringsmoment. Genom att bentoniten omsluts av ett kopparnät och skyddas mot droppande vatten är risken mycket liten att bentoniten skadas under inskjutningen.

Vid vertikal deponering bygger deponeringsmetoden på att kapseln firas ner, hängande i lod genom gravitation. Vid horisontell deponering skjuts kapseln in med hjälp av ett foderrör som skydd för bentoniten eller i ett paket, bentonit-kapsel.

Metoden för inplacering av bentonit bedöms vara enklast för MLH och omfattar få hanteringsmoment. Deponeringsmetoden för KBS-3 V är mer utvecklad och säkrare i hanteringen än för KBS-3 H. Fullskalig deponering av bentonitblock har utförts med lyckat resultat för KBS-3 V vid Äspö HRL. Tekniska frågor som studerats är bland annat länshållning av deponeringshålen, gjutningen av en helt horisontell bottenavjämning, inplaceringen av bentonitblocken samt åtgärder för klimatconditionering i deponeringshålet.

Med föreslagna metoder för KBS-3 V och H byggs bentonitbarriären upp i deponeringshålet av lösa block före deponeringen av kapseln. Fördelar med metoden är att resultatet enkelt kan kvalitetssäkras genom okulär besiktning. Tydliga nackdelar är att insidan på hålet i bentoniten där kapseln skall placeras inte kommer att bli helt slät och att det finns viss risk för påverkan av inläckande grundvatten under tiden mellan inplacering av bentoniten och deponeringen av kapseln. För KBS-3 V erfordras en avjämning av botten på deponeringshålet för att det skall vara möjligt att deponera bottenblocket av bentonit i horisontell position. Vid deponeringen av kapseln föreligger det viss risk att bitar av bentonit skrapas loss och läger sig i botten på hålet (kapsel i retur för rensning av hålet). Med hänsyn till oklarheterna kring föreslagna deponeringstekniker för KBS-3 H förutsätts i denna jämförelse att det går att bygga en deponeringsutrustning som uppfyller samma högt ställda krav på säkerhet som för KBS-3 V.

Deponering av kapsel

För KBS-3 V firas kapseln ner i deponeringshålet efter en cardano-rörelse (samtidig rotation i x-z led) i deponeringstunneln. Med hänsyn till den snäva toleransen, 10 mm mellan kapsel och bentonit, finns det risk att kapseln skrapar emot bentonitbarriären vid deponeringen. Fullskaliga deponeringsförsök, både med och utan strålskyddad kapsel, har utförts med lyckat resultat för KBS-3 V vid Äspö HRL. Försöken har omfattat utveckling, konstruktion och deponering med utrustningar för både aktiva och inaktiva kapslar.

För KBS-3 H har två olika deponeringsprinciper föreslagits. Båda är tekniskt komplicerade med många hanteringsmoment. För tekniken där bentonit och kapsel deponeras separat finns det risk att bentoniten skadas vid både inplaceringen och vid urdragning av foderröret. Tekniken kräver mycket god riktning på kapseln för att den inte skall fastna i foderröret. För tekniken där bentonit och kapsel deponeras i ett paket föreligger risken att ”deponeringsspaden” med paketet kapsel-bentonit inte kan rotera på grund av att t.ex. bergflisor och bentonitfragment kilar fast paketet så att det inte kan rulla ur spaden (”byråladseffekt”). Det kan då i nästa moment bli svårt att dra ut ”deponeringsspaden” från deponeringshålet.

Föreslagen deponeringsteknik för MLH innebär att kapsel och bentonit placeras i ett paket omslutet av ett nät av kopparskenor och skjuts in i det långa deponeringshålet. Kapseln skyddas av både kopparnät och omgivande bentonit.

Hittills utfört utrednings- och utvecklingsarbete visar att det är mera komplicerat att deponera kapslar i horisontella än vertikala deponeringshål. En bidragande svårighet vid horisontell deponering är att kapseln måste skjutas in i deponeringshålet. Föreslagna deponeringsmetoder medför många och relativt komplicerade rörelser. Deponeringsmetoden för KBS-3 V är mer utvecklad och bedöms vara säkrare i hanteringen än för KBS-3 H.

Jämfört med KBS-3 V och H är föreslagen deponeringsteknik för MLH baserad på deponering av bentonit och kapsel i ett paket. Föreslagen teknisk utrustning är robust och inbegriper få hanteringsmoment. Samma fördelar föreligger som beskrivits ovan för deponering av bentoniten.

En tydlig fördel för KBS-3 V och H är att deponeringen av kapslar i singulära deponeringshål är en avslutad deponeringsprocess där tidigare deponerade kapslar inte påverkar deponeringen av kommande kapslar.

Efterfyllningen med pellets

Med nuvarande utformning av KBS-3 V metoden erfordras efterfyllning med bentonitpellets för att erhålla önskad densitet hos bentonitbarriären.

Efterfyllningen kan göras relativt enkelt för KBS-3 V i torra hål medan det blir avsevärt svårare om spalten mellan bergvägg och bentonitbarriär fylls med vatten.

Efterfyllnad bör undvikas vid horisontell deponering då det är svårt att utföra och kräver någon form av temporär barriär samt att kapseln efter svällning inte hamnar centriskt i deponeringshålet.

Påfyllning med vatten i deponeringshål

För att erhålla snabb svällning och vattenmättnad av bentoniten planeras spalten mellan kapsel och bentonit att fyllas med vatten. Påfyllning med vatten kan utföras relativt enkelt i vertikala deponeringshål, KBS-3 V metoden.

För KBS-3 H kommer det att erfordras någon form av barriär som håller vattnet på plats.

För MLH antas bentoniten successivt svälla ut och fylla upp spalten mellan bentonit och berg. Erforderlig tid för svällning kommer att styras av mängden inläckande vatten och hur snabbt bentoniten tätar av tunneln. Risk föreligger för degradering av bentonitbarriären på grund av inläckande vatten. En alternativ metod kan vara att placera temporära barriärer i deponeringshålen på lämpliga platser för att förhindra att vatten läcker ut och att bentoniten sväller.

Tekniken för vattenfyllning, om detta blir ett krav, måste utvecklas för KBS-3 H och MLH.

Maskinutrustning

Utvecklingen av maskinutrustningar har kommit olika långt för de olika deponeringsmetoderna. Fullskaliga deponeringsförsök, både med och utan strålskyddad kapsel, har utförts med lyckat resultat för KBS-3 V vid Äspö HRL. Försöken har omfattat utveckling, konstruktion och deponering med utrustningar för både aktiva och inaktiva kapslar. För KBS-3 V har SKB tillverkat och provat maskinutrustning för deponering av kapslar med och utan strålskydd i full skala. För KBS-3 H och MLH föreligger enbart översiktliga förslag till maskinutrustningar på ritbordet.

Beskrivning av olika deponeringsmetoder och deponeringsutrustningar framgår översiktligt av kapitel 2.

Baserat på dagens kunskap om maskinutrustningar och deponeringsprocesserna rankas utrustningarna i följande ordning med hänsyn till komplexitet. Lägst nummer utgör den minst komplicerade utrustningen:

1. MLH. Föreslagen utrustning och deponeringsteknik innefattar relativt få och tekniskt mindre komplicerade arbetsmoment (skjuta - koppla loss - dra tillbaka).
2. KBS-3 V. Föreslagen utrustning skall kunna rotera kapseln med en cardano-rörelse och sedan fira ner kapseln när rätt vertikal position har säkerställts. Alla operationer skall utföras med fullgott strålskydd. Deponeringstekniken medför flera arbetsmoment och lyft av en tung kapsel.
3. KBS-3 H. Förutsättningen för deponering är relativt lika med motsvarande för KBS-3 V. Lämplig maskinutrustning bedöms saknas i dagsläget.

Kvalitetssäkring

Kvalitetssäkringen omfattar kontroll av bentonitbarriären före deponering, kontroll av deponeringsproceduren samt kontroll av att kapseln har intagit rätt slutgiltig position. För KBS-3 V kommer kontrollen av inplaceringen av bentonitbarriären att kunna

utföras okulärt och utan risk för strålning. Efterföljande kontroll av deponeringen av kapseln kommer också till stor del att kunna utföras okulärt med TV-monitorer.

Förutsättningarna för kvalitetssäkring för KBS-3 H kommer i princip att vara densamma som för KBS-3 V. Vid deponering i paket är behovet av kontroll mindre under deponeringen då bentonitbarriären byggs i hop med kapseln i centralområdet.

Jämfört med KBS-3 V och H föreslås kapsel och bentonit för MLH att deponeras i ett ”paket”. Genom deponering i paket skyddas kapseln av omgivande bentonit och kontrollen reduceras till påverkan av den omgivande bentoniten samt ”paketets” slutliga läge. De långa deponeringshålen och svårigheten till okulär besiktning inne i deponeringshålet medför att kvalitetssäkringen är mer beroende av en dokumenterbar deponeringsprocess än olika kontrollaktiviteter.

Vid en jämförelse mellan metoderna bedöms förutsättningarna för kvalitetssäkring vara bättre för KBS-3 V och H jämfört med MLH på grund av närheten till deponeringstunneln och med bättre möjlighet till okulär övervakning av olika arbetsmoment.

Strålskydd

Ett fullgott, omslutande strålskydd under hela deponeringsprocessen är en förutsättning och ett konstruktionskrav som måste uppfyllas.

Utfört utvecklingsarbete avseende deponeringsutrustningar visar att ett fullgott strålskydd under hela deponeringsprocessen kan åstadkommas för studerade deponeringsmetoder. Efter deponering skyddas personal från strålning av den omslutande bentoniten.

Det bedöms inte föreligga någon skillnad mellan metoderna med avseende på strålskydd.

Teknisk mognad

Föreslagen deponeringsteknik för KBS-3 V har studerats under flera år både med avseende på maskinutrustning och bentonitbarriärens egenskaper efter deponering. Fullskaleförsök har utförts vid Äspö HRL.

För KBS-3 H har utvecklingsarbetet ej nått samma mognad. I dagsläget erfordras fördjupade studier av några alternativa deponeringstekniker som underlag för val av teknik för fullskaleförsök.

För MLH har utvecklingsarbetet kommit något längre än för KBS-3 H och en deponeringsteknik, baserad på deponering av bentonit och kapsel i ett paket har föreslagits. Den föreslagna maskinutrustningen är robust och baserad på känd teknik.

Baserat på dagens kunskap om utrustningar och processer rankas utrustningarna i följande ordning m.h.t. teknisk mognad. Lägst nummer utgör den minst komplicerade utrustningen:

1. KBS-3 V
2. MLH
3. KBS-3 H

Utvecklingspotential

Det bedöms vara fullt möjligt att utveckla lämpliga deponeringstekniker och maskinutrustningar för studerade deponeringsmetoder.

Uppehåll i deponeringsprocessen

Vid uppehåll i deponeringsprocessen är det nödvändigt att säkerställa bentonitbarriärens funktion och kapselns position i deponeringshålet. För studerade deponeringsmetoder innebär detta att kapseln måste förhindras att röra sig ut mot deponeringstunneln, alternativt transporttunneln för MLH, samt att vatten finns tillgängligt för bentonitens svällning. Beroende på tiden för uppehåll i deponeringsprocessen kommer det att behöva installeras en mothållande temporär barriär som håller kapseln på plats (mothåll). Vid horisontell deponering kan det även bli nödvändigt att fylla på med vatten bakom den temporära barriären.

Deponeringsprocessen utgör för KBS-3 V och H en slutförd process för varje kapsel där deponeringen av föregående kapslar i mycket liten omfattning påverkar deponeringen av nästa kapsel. För KBS-3 H kan vissa speciella åtgärder komma att erfordras, t.ex. för att säkerställa att deponeringshålen är fyllda med vatten.

För MLH deponeras kapslarna efter varandra i ett långt deponeringshål. Med hänsyn till vattenflöde längs deponeringshålen kan det, beroende på flödets storlek, vara nödvändigt att snabbt slutföra deponeringen och försluta tunnlarna. Om krav föreligger på avbrott i deponeringen kan deponeringshålen förslutas med temporära barriärer för att undvika degradering av betontbarriären.

Konstruktionslösningar har ännu inte tagits fram för ovan beskrivna temporära mothåll. Det bedöms dock vara möjligt att tillverka dessa mothåll och barriärer som uppfyller ovan beskrivna kravspecifikationer för studerade deponeringsmetoder.

Med hänsyn till möjliga tekniska åtgärder föreligger ingen större skillnad mellan metoderna med avseende på möjligheten att göra uppehåll i deponeringsprocessen.

Densitet hos bentonitbarriären

Densiteten hos bentonitbarriären för de olika deponeringsmetoderna redovisas i tabell 4-8. Önskemålet är att använda en relativt vattenmättad bentonit för att tidigt erhålla ett högt värmeledningstal. För att uppnå erforderlig densitet hos bentoniten efter svällning är det med nuvarande utformning och föreslagen bentonitkvalitet nödvändigt att återfylla med bentonitpellets.

Vid horisontell deponering ryms mera kompakterad bentonit i deponeringshålen då mindre toleranser erfordras i deponeringsprocessen när bentonitbarriären placeras på botten av deponeringshålen (toleranser i bara en riktning).

Efterfyllnad med bentonitpellets bör undvikas vid horisontell deponering då mera bentonit kommer att hamna ovanpå kapseln vilket efter svällning medför en excentrisk position av kapseln.

Tabell 4-8 Densitet hos bentoniten. Utförd översiktlig beräkning baseras på kompakterad bentonit med en densitet på ca 2060 kg/m³ och en vattenkvot på 17 % samt efterfyllnad med pellets med en densitet på 1000 kg/m³ och en vattenkvot på 10 %.

| Metod | Tjocklek hos bentoniten före svällning | Densitet efter svällning utan återfyllnad med pellets | Densitet efter svällning med återfyllnad av pellets |
|---------|--|---|---|
| KBS-3 V | 29 cm | 1800 | 2000 |
| KBS-3 H | 31 cm | 1950 | - |
| MLH | 31 cm | 1950 | - |

Med nuvarande utformning erhålls lägre densitet hos bentonitbarriären vid horisontell deponering än vid vertikal deponering. En översyn erfordras av utformningen och funktionen av bentonitbarriären vid horisontell deponering. För att åtgärda detta kan följande åtgärder vidtagas, ensamma eller tillsammans:

- Ökad tjocklek på bentonitbarriären vid deponering (deponering med mindre toleranser).
- Öka densiteten hos bentoniten (lägre vattenhalt).
- Öka storleken på deponeringshålet för att rymma mera bentonit och därigenom uppnå samma barriäreffekt (något högre k-värde men längre läckagevägar).

Centrering av kapseln

Utförda beräkningar av Clay Technology visar att kapseln kommer att hamna centriskt i deponeringshålet om samma mängd bentonit placeras runt om kapseln. Utan efterfyllnad med bentonitpellets är ovanstående villkor uppfyllt för studerade metoder.

Vid deponering enligt KBS-3 V kommer tjockleken på spalten mellan bentonitbarriär och bergvägg att variera något. Vid efterfyllnad kommer olika mängd pellets att hamna runt kapseln på olika nivåer och sidor av kapseln. Vid svällning kommer kapseln att få en viss excentrisk position i deponeringshålen. Denna excentricitet har bedömts acceptabel och ligger inom accepterade toleranser för kapselns position efter svällning.

Efterfyllnad med pellets vid horisontell deponering medför att mera bentonit hamnar på ovansidan av kapslarna. Detta innebär att kapslarna efter svällning erhåller en excentrisk position i deponeringshålen. En centrisk position eftersträvas vilket innebär att efterfyllnad med pellets bör undvikas vid horisontell deponering.

Mothåll för kapseln

När bentoniten börjar svälla kommer kapseln att pressas utåt i deponeringshålet mot den fria ytan (deponeringstunnel för KBS-3 V och H). För att motverka denna rörelse erfordras en relativt snabb återfyllnad av deponeringstunnlarna, alternativt deponerings-

hållet för MLH. Om återfyllnad inte är möjlig av logistiska eller tidsmässiga skäl kan det bli nödvändigt att installera en mothållande barriär (stämp).

För MLH är det möjligt att paketet bentonit-kapsel efter svällning genom skjuv- och kohesionskrafter förhindras att röra sig ut mot transporttunneln. Rörelsen hos de sist deponerade kapslarna kan förhindras genom placering av en temporär mekanisk barriär i deponeringshålet i anslutning till transporttunneln. Den mekaniska barriären ersätts vid lämplig tidpunkt av en betongbarriär.

Behovet av och utformningen av mothållande barriärer (stämp) likväl som mothållande effekt av skjuv- och kohesionskrafter måste studeras vidare. För KBS-3 V studeras dessa frågor i Äspö HRL.

Återfyllning av deponeringstunnel

Återfyllnad av deponeringstunnlar erfordras för KBS-3 V och H medan återfyllnaden av deponeringshålen för MLH ingår i deponeringsprocessen.

Utprovning av teknik för återfyllnad av deponeringstunnlarna studeras i Äspö HRL. Frågeställningar som studeras är tekniken för packning och val av material inkluderande andelen bentonit för att uppnå erforderlig kvalitet hos återfyllnaden.

Kompakterad bentonit mellan kapsel och deponeringstunnlar, alternativt transporttunnlar för MLH, säkerställer att kontrollerad strålningsnivå upprätthålls för den personal som utför återfyllnadsarbetet.

Samma metodik för återfyllnad kommer att tillämpas för återfyllnad av transporttunnlarna och deponeringstunnlarna.

Återfyllnadsarbetet bedöms kunna utföras med fullgod kvalitet för studerade deponeringsmetoder.

Förslutning av deponeringstunnel/ deponeringshål

Deponeringstunnlarna för KBS-3 V och H och deponeringshålen för MLH skall efter deponering förslutas med temporära betongpluggar. Pluggarna byggs med konventionell teknik. Vissa fördelar föreligger för MLH då pluggarna kommer att få avsevärt mindre diameter.

Reversering

Reversering innebär att deponeringsprocessen avbryts och att kapseln transporteras tillbaka till deponeringstunneln/transporttunneln. Möjligheten till reversering utgör ett konstruktionskrav för deponeringsutrustningen. Kravet på reversering är uppfyllt för studerade deponeringsmetoder.

Säkerhet för kapseln

För studerade deponeringsmetoder kommer i princip samma utformning av transport-systemet för kapslar och bentonitblock att användas fram till positionen för omlastning till deponeringsutrustningen. För KBS-3 V och H planeras omlastningen att utföras vid mynningen av deponeringstunnlarna. För MLH sker omlastningen till deponeringsutrustningen vid mynningen av deponeringshålen, alternativt i centralområdet.

Med hänsyn till högt ställda krav på säkerhet vid hantering och på utformningen av deponeringsteknik och maskinutrustning är risken för skador vid hanteringen av kapslarna ytterst liten och densamma för studerade deponeringsmetoder.

Vid svällningen av bentoniten finns en viss risk för ojämn svällning på grund av varierande vatteninflöden till olika delar av deponeringshålen. Ojämn svällningen kan ge upphov till böjmoment och spänningar i kapseln. Efterfyllnad med vatten som för KBS-3 V minskar risken för ojämn svällning.

Säkerhet för anläggning och personal

Bergrelaterade händelser

Risken för ras etc. är mycket liten och avsevärt lägre under deponeringsskedet än under tunneldrivningen då olika bergutrymmen är säkrade med erforderlig bergförstärkning.

Arbetarskydd

Det föreligger i princip ingen skillnad med avseende på arbetarskydd då layouten för djupförvaret i princip är densamma för studerade deponeringsmetoderna (tunnlar, alternativt deponeringshål som slutar blint).

Samma risk föreligger för nedfallande sten för de olika metoderna.

Deponeringen skall utföras med ett omslutande strålskydd i transport- och deponeringstunnlar. Målsättningen är att ingen personal skall vistas i deponeringstunnlarna (KBS-3 V och H) eller i deponeringshålen (MLH) vid deponering. I undantagsfall kan det bli nödvändigt för personal att arbeta inne i deponeringstunnlarna för att avhjälpa fel. För MLH, kan det t.ex. vid montage av temporära barriärer, bli nödvändigt att utföra arbeten inne i deponeringshålen. Ingen risk föreligger dock för strålning på grund av avskärmande bentonit och temporära barriärer.

Om någon typ av maskinutrustning fastnar i deponeringstunnlarna eller i deponeringshålen så kommer olika åtgärder att bli svårare att utföra för MLH på grund av de långa horisontella deponeringshålen.

Anläggningens funktionssäkerhet

Det föreligger i princip ingen skillnad mellan studerade deponeringsmetoder med avseende på funktionssäkerhet då de olika djupförvaren har samma layout (tunnlar som slutar blint).

Vissa fördelar kan föreligga för MLH då den utbrutna tunnelvolymen är mindre och att det inte utförs någon separat borrning av deponeringshål. För MLH krävs det inte heller någon läns-pumpning av deponeringshål. Mindre volym vatten kommer totalt att läcka in till ett MLH-förvar på grund av mindre utbruten bergvolym.

En mindre omfattning av bergarbeten, läns-pumpning etc. för MLH bör vara positiv m.h.t. risken för brand under jord.

Intrång

Risken för och möjligheten till intrång av utomstående personer med avsikt att sabotera anläggningen torde vara den samma för studerade deponeringsmetoder på grund av samma layout på djupförvaret.

Övervakning och kontroll efter förslutning

En jämförelse med avseende på övervakning och kontroll efter förslutning delas upp i skedena; deponering, förslutning av deponeringstunnlar (avser KBS-3 V och H) och förslutning av förvaret. Nedan redovisas kor dessa olika skeden:

1. Under deponeringsskedet finns det för KBS-3 V och H möjlighet att dokumentera homogeniseringsprocessen genom mätning, alternativt provtagning, under tidsperioden mellan deponering av kapslarna och förslutning av deponeringstunnlarna. Motsvarande kontroll är inte möjlig att utföra för MLH då kapslarna deponeras omgärdade av bentonit efter varandra i ett lång hål.
2. Efter återfyllning av deponeringstunnlarna begränsas kontrollen till mätningar av t.ex. temperaturutbredning i berget och grundvattenkvalitet i berget nära kapslarna. Kontroll av homogeniseringsprocessen kan också utföras genom mätningar i bentoniten kring deponerade inaktiva provkapslar som placeras på förvarsnivån i anslutning till deponeringsområdena. Möjligheten till kontroll genom mätning med givare i anslutning till deponerade kapslar behöver utredas i detalj men bedöms av författarna till denna rapport var svåra att utföra, bland annat med hänsyn till långa tidsperspektiv, mätnoggrannheter och svårigheten att montera givarna på ett lämpligt sätt.
3. Efter förslutning av deponering- och transporttunnlarna och hela djupförvaret kommer kontrollen att begränsas till mätningar i borrhål och på markytan. Mätningarna omfattar bland annat temperaturutbredning, grundvattenkemi etc. Förutsättningarna för dessa mätningar är den samma för både KBS-3 V och H och MLH

Med hänsyn till den korta tid som kapslarna och omgivande bentonit finns åtkomliga för eventuell kontroll, några månader, samt de höga krav som ställs på kapslar, bentonit och deponeringsmetoder bedöms det inte föreligga någon skillnad mellan metoderna med avseende på möjligheten att utföra övervakning och kontroll efter förslutning. Förutsättningarna för mätningar från markytan är den samma för KBS-3 och MLH.

4.5.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på deponering

Tabell 4-9 Jämförelse med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3, Deponering

| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|---|--|---------|-----------------|
| Transport av kapslarna | Hantering och transport av kapsel | = | = |
| | Strålskydd | = | = |
| | Maskinutrustning | = | = |
| | Teknisk mognad | = | = |
| Deponering av bentonitbuffert och kapsel | Deponering av bentonit | - | + |
| | Deponering av kapsel | - | + |
| | Efterfyllning med pellets | - | - |
| | Påfyllning med vatten i deponeringshålen | - | - |
| | Maskinutrustning | (-) | + |
| | Kvalitetssäkring | = | - |
| | Strålskydd | = | = |
| | Teknisk mognad | - | - |
| | Utvecklingspotential | = | = |
| Uppehåll i deponeringsprocessen | | = | - |
| Densitet hos bentonitbarriären | | - | - |
| Centrering av kapseln ¹⁾ | | = | = |
| Mothåll för kapsel | | = | + ²⁾ |
| Återfyllnad av deponeringstunnel | Teknik för återfyllnad | = | Ej relevant |
| Förslutning av deponeringstunnel/deponeringshål | Teknik | = | + |
| | Mängd betong | - | + |
| Reversering | | = | = |
| Säkerhet för kapsel | | = | = |
| Säkerhet för anläggning och personal | Bergrelaterade oväntade händelser | = | = |
| | Arbetarskydd | = | = |
| | Anläggningens funktionssäkerhet | = | = |
| | Intrång | = | = |
| Övervakning och kontroll | Efter deponering av kapsel | = | - |
| | Efter förslutning av förvar | = | = |

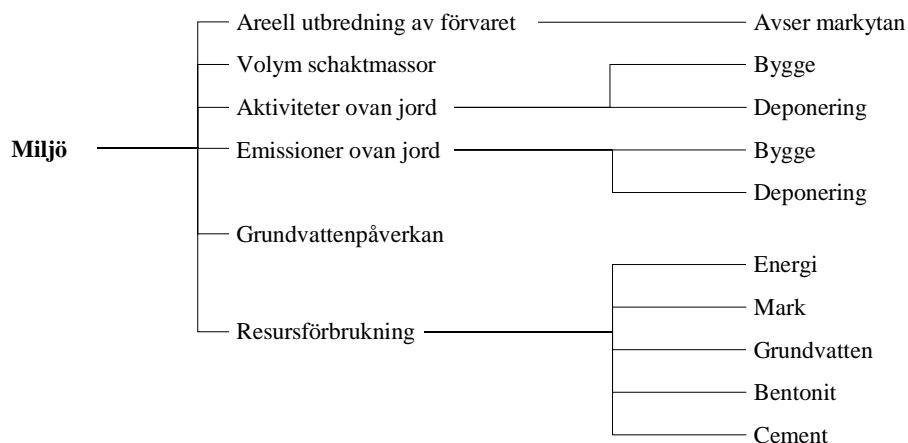
¹ Med föreslagna tekniska lösningar centreras kapseln i deponeringshålet för alla tre metoderna. Densiteten hos bentonitbarriären blir något lägre vid horisontell deponering då ingen efterfyllnad utförs med bentonitpellets.

² Den mothållande förmågan hos bentonitbarriären i deponeringshålet måste utredas vidare.

4.6 Miljö

4.6.1 Kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur



Figur 4-7 Hierarkisk struktur för jämförelse av miljö.

Areell utbredning av förvaret

Den areella utbredningen av djupförvaren blir i princip lika för studerade deponeringsmetoder. Rådande geologiska förhållanden på aktuella platser för djupförvaret kommer att bli styrande för djupförvarets geografiska utbredning.

Volym schaktmassor

Volymen schaktmassor påverkar bland annat behovet av bergdeponier ovan jord och omfattningen av masshanteringen (transportarbete). Som framgår nedan är den utbrutna bergvolymen för deponeringstunnlar och deponeringshål avsevärt lägre för MLH än för KBS-3 V och H:

| | |
|---------|-----------------------------|
| KBS-3 V | 607 000 m ³ (tf) |
| KBS-3 H | 522 999 m ³ (tf) |
| MLH | 66 000 m ³ (tf) |

Aktiviteter ovan jord

Utformningen av ovanjordsanläggningen kommer i princip att bli den samma för studerade deponeringsmetoder. Genom en mindre utbruten bergvolym kommer masshanteringen att bli mindre omfattande för MLH än för KBS-3.

Emissioner ovan jord

Genom en mindre utbruten bergvolym, och därigenom mindre masshantering, kommer mindre emissioner att erhållas för MLH jämfört med KBS-3 V och H.

Grundvattenpåverkan

Genom en mindre utbruten bergvolym kommer volymen inläckande grundvatten att bli mindre för MLH än för KBS-3 V och H.

Resursförbrukning

Med resursförbrukning avses här följande faktorer:

- Uttagen mängd berg
- Uttagen mängd grundvatten
- Åtgång av energi för att bygga och driva djupförvaret
- Åtgång av cement, stål och tillsatser
- Åtgång av bentonit för förslutning av förvaret

Genom en mindre utbruten bergvolym kommer resursförbrukningen att bli lägre för MLH än för KBS-3 V och H.

4.6.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på miljö

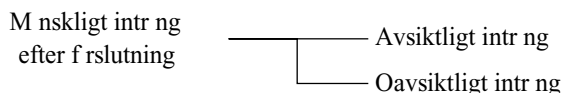
Tabell 4-10 Jämförelsen med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3, Miljö.

| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|--|--|----------------|------------|
| Areell utbredning av förvaret | Avser på markytan | = | = |
| Volym schaktmassor | | = | + |
| Aktiviteter ovan jord | Bygge | = | + |
| | Deponering | = | + |
| Emissioner ovan jord | Bygge | = | + |
| | Deponering | = | + |
| Grundvattenpåverkan | | = | + |
| Resursförbrukning | Energi | = | + |
| | Mark | = | + |
| | Grundvatten | = | + |
| | Bentonit | = | + |
| | Cement | = | + |

4.7 Mänskligt intrång efter förslutning

4.7.1 Kriterier för jämförelse

Hierarkisk struktur



Figur 4-8 Hierarkisk struktur för jämförelse av mänskligt intrång efter förslutning.

Avsiktligt intrång

Risken och möjligheterna för avsiktligt intrång till djupförvaret är den samma då layouten i princip är lika för studerade deponeringsmetoder.

Oavsiktligt intrång efter förslutning

Risken för oavsiktligt intrång till djupförvaret genom t.ex. gruvbrytning och borring är mycket liten då förvaret inte kommer att placeras i områden med malmpotential och att djupet ner till förvaret är betydande.

Den horisontella ytan av en liggande kapsel blir större än för en stående kapsel, 5,07 m² jämfört med 0,87 m². Om djupförvaret täcker ett område på 1 km² blir sannolikheten 50,4·10⁻⁶ för att träffa en horisontellt liggande kapsel och 8,8·10⁻⁶ för att träffa på en stående kapsel vid en slumpmässig borring.

Med hänsyn till liten sannolikhet att någon skall borra i området för djupförvaret till aktuella djup samt den lilla sannolikheten att borra igenom en kapsel beaktas inte oavsiktligt intrång vid jämförelsen av deponeringsmetoderna.

4.7.2 Sammanfattning av jämförelse med avseende på mänskligt intrång efter förslutning

Tabell 4-11 Jämförelse med KBS-3 V med avseende på hierarkisk nivå 3 (hierarkisk nivå 2), Mänskligt intrång efter förslutning.

| Kriterium Hierarkisk nivå 2 | Kriterium Hierarkisk nivå 3 | KBS-3 H | MLH |
|--------------------------------|--------------------------------|---------|-----|
| Avsiktligt | | = | = |
| Oavsiktligt | | = | = |

5 Jämförelse och värdering med avseende på hierarkisk nivå 2

5.1 Sammanfattning av jämförelsen med avseende på hierarkisk nivå 2

Jämförelsen med avseende på hierarkisk nivå 2 redovisas i tabell 5-1. Tabellen ger en översikt över de fördelar och nackdelar som föreligger för de olika deponeringsmetoderna. Jämförelsen redovisas som bättre (+), sämre (-) eller lika (=) jämfört med KBS-3 V. + eller – inom parentes innebär att skillnaderna är små. Kommentaren ”ej relevant” innebär att en jämförelse inte kan göras på grund av helt skilda förutsättningar mellan metoderna.

Tabell 5-1 Sammanfattning av jämförelsen med avseende på hierarkisk nivå 2

| Kriterium Hierarkisk nivå 1 | Kriterium Hierarkisk nivå 2 | KBS-3 H | MLH |
|--|---|-------------------------------|-------------|
| Teknisk genomförbarhet | Utbyggnad | = | = |
| | Deponering/förslutning | - | - |
| | Bentonitbarriären | - | - |
| Geundersökningar | Ytundersökningar | = | = |
| | Undersökningar på deponeringsnivån | = | (-) |
| | Säkerhet i slutlig prediktion | = | = |
| Projektering | Anpassning till rådande geologi | = | (-) |
| | Flexibilitet m.a.p. deponeringsnivån | = | = |
| | Djupförvar på två dep.nivåer | = | = |
| | Areell utbredning | = | = |
| Utbyggnad | Geologisk påverkan | = | (-) |
| | Tillredningsmetoder för deponeringstunnlar/deponeringshål | = | - |
| | Metoder för borrhning av deponeringshål | = | Ej relevant |
| | Säkerhet för personal och anläggning | = | = |
| | Deponering | Transport av kapsel | = |
| Deponering av kapsel och bentonitbuffert | | - | - |
| Uppehåll i deponeringsprocessen | | = | = |
| Densitet hos bentoniten | | - | - |
| Centrering av kapseln | | = | = |
| Mothåll för kapseln | | = | + |
| Återfyllning av dep.tunneln | | = | Ej relevant |
| Förslutning av dep.tunnel/dep.hål | | = | + |
| Reversering | | = | = |
| Säkerhet för kapseln | | = | = |
| Säkerhet för anläggning och personal | | = | = |
| Övervakning och kontroll efter förslutning | | = | (-) |
| Miljö | | Areell utbredning av förvaret | = |
| | Volym schaktmassor | = | + |
| | Aktiviteter ovan jord | = | + |
| | Emissioner ovan jord | = | + |
| | Grundvattenpåverkan | = | + |
| | Resursförbrukning | = | + |
| Mänskligt intrång efter förslutning | Avsiktligt intrång | = | = |
| | Oavsiktligt intrång | = | = |

5.2 Värdering

5.2.1 Teknisk genomförbarhet

Studerade deponeringsmetoder har bedömts vara tekniskt genomförbara. Metoderna är dock i varierande skala baserade på ”känd teknik”, ”delvis känd teknik” eller ”oprövad teknik”.

KBS-3 V som utgör referensmetod i det svenska programmet är till övervägande del baserad på känd och beprövad teknik. För att klargöra osäkerheter och optimera olika förvarskomponenter pågår fullskaletester vid Äspö HRL.

KBS-3 H metoden innebär att deponeringshålen borrar horisontellt i väggarna på deponeringstunnlarna. För att bygga förvaret kommer samma metoder att tillämpas som vid byggande av ett KBS-3 V förvar. Den stora skillnaden jämfört med KBS-3 V är att kapslarna deponeras i horisontella deponeringshål. Detta innebär att maskinutrustningar behöver utvecklas som skjuter eller lyfter in bentonitblock och kapslar i deponeringshålen. Utförda konceptuella studier visar att fördjupade analyser och tester i full skala erfordras för att utveckla lämplig deponeringsmetodik och maskinell utrustning.

För MLH metoden ersätts deponeringstunnlarna och deponeringshålen med långa, horisontella deponeringshål. För att borra dessa ca 250 m långa hål med diametern 1,75 m behöver befintliga maskinutrustningar anpassas för bland annat kravet på raket och snabba flyttningar mellan deponeringshål. Det bedöms fullt möjligt att tillverka erforderlig borrarutrustning med de speciella krav som måste ställas för att borra dessa deponeringshål. Speciell maskinutrustning behöver också tas fram för att utföra injekterings- och förstärkningsarbeten i deponeringshålen. Deponeringstekniken och erforderlig maskinell utrustning för deponering av bentonit och kapslar behöver utvecklas och slutligen provas i full skala.

Beskrivna osäkerheter avseende byggandet av deponeringstunnlar och deponeringshål samt deponering av bentonit och kapslar bedöms kunna hanteras genom teknisk utveckling. En tydlig skillnad mellan vertikal och horisontell deponering är att bentonitbarriären med nuvarande utformning efter homogenisering, får lägre densitet och därmed högre konduktivitet.

5.2.2 Geundersökningar

Inga skillnader föreligger mellan studerade metoderna vad avser möjligheterna till förundersökningar från markytan. Med en given undersökningsinsats bedöms informationstätheten bli likartad för metoderna. Även om deponeringsområdets storlek teoretiskt varierar något styr i praktiken bergblockens form och inbördes läge erforderliga undersökningsinsatser.

Förutsättningarna för undersökningar på förvarsnivån är snarlika för studerade metoder. En viss nackdel för MLH föreligger då förutsättningarna för föreliggande utredning inte tillåter borrhål i deponeringshålets närområde. Deponeringshålen i MLH är emellertid topologiskt identiska med deponeringshål och deponeringstunnlar enligt KBS-3 V och H vilket skulle medföra att sådana borrhål kan tillåtas även i MLH. Det erfordras

emellertid ett visst utvecklingsarbete avseende metoder att täta och försegla undersökningsborrhålen på ett sådant sätt att långsiktig funktion och säkerhet inte äventyras. Det är författarnas bedömning att det föreligger mycket små skillnader mellan metoderna vad avser förutsättningarna för att utföra undersökningar på deponeringsnivån.

Äspötypiskt berg har studerats för att utreda huruvida sprickmatriens egenskaper påverkar deponeringsmetoderna olika. Skillnader föreligger främst mellan horisontell deponering, KBS-3 H och MLH, och vertikal deponering, KBS-3 V. Skillnaderna har bedömts vara marginella och saknar praktisk betydelse. Detta under förutsättning att sprickmatrien inte uppvisar någon utpräglad anisotropi med avseende på orientering och längd.

5.2.3 Projektering

De skillnader som föreligger mellan metoderna avseende undersökningar på deponeringsnivån bedöms endast marginellt påverka projekteringen av tunnelsystemen.

Det förstärkningsarbetet som bedrivs i deponeringstunnlarna i KBS-3 V och H skall även utföras i deponeringshål i MLH. Den signifikanta skillnaden mellan metoderna i detta avseende är dimensionen på tunnarna - deponeringshålen. Utrustning och arbetsplattformar måste utvecklas eller modifieras för förstärkningsarbete i MLH tunnlar. De bentonitpluggar som krävs för avskärmning av kapselhålsdiskriminerande strukturer i deponeringshålen för MLH saknar motsvarighet i deponeringstunnlarna för KBS-3 V och H. Utformningen av dessa pluggar behöver studeras med avseende på bland annat längd och bentonitkvalitet.

5.2.4 Utbyggnad

Metoderna för att bygga deponeringstunnlar och borra deponeringshål för KBS-3 V och KBS-3 H är den samma och baserade på känd teknik. Härigenom föreligger inga skillnader med avseende på byggmetoder och säkerhet för personal och anläggning.

För MLH kommer befintliga maskinutrustningar att behöva anpassas, bland annat med hänsyn till kravet på raket och snabba flyttningar mellan deponeringshål. Konventionell teknik kommer att tillämpas för att utföra förstärknings- och injekteringsarbeten. Det lilla tvärsnittet på deponeringshålen, \varnothing 1,75 m, medför behov av att utveckla arbetsplattformar för att utföra dessa arbeten. Baserat på dagens kunskap bedöms det tekniskt genomförbart att utföra dessa arbeten med hög säkerhet för personal och anläggning och med höga krav på kvalitet och utförandet.

5.2.5 Deponering

Konceptuella studier har utförts för att ta fram lämpliga tekniker och maskinutrustningar för deponering av bentonit och kapslar. Utvecklingsarbetet har bedrivits längst för KBS-3 V där det i dagsläget har utförts deponeringsförsök i full skala i Äspö HRL. En fördel med vertikal deponering är att gravitationen utnyttjas för att fira ner bentonit och kapsel i deponeringshålet. För horisontell deponering, KBS-3 H och MLH, har det

identifierats flera möjliga deponeringstekniker men ett utvecklingsarbete återstår innan det är möjligt att rekommendera lämplig teknik för fortsatt utveckling. För MLH har det föreslagits tekniker där bentonit och kapsel deponeras samtidigt i ett paket. Deponering av hela paket som skjuts i på botten av deponeringshålet har fördelar som att kapseln och bentoniten skyddas från påverkan och att deponeringen kan utföras med få och enkla deponeringsrörelser.

För referensmetoden KBS-3 V efterfylls spalten mellan bentonit och deponeringshål med bentonitpellets för att barriären efter svällning och homogenisering skall erhålla erforderlig densitet och låg hydraulisk konduktivitet. För att påskynda svällningen fylls kvarstående spalter i bentoniten med vatten efter deponering av kapseln. Vid homogeniseringen kommer bentoniten att utveckla ett svälltryck som är proportionellt mot bentonitens densitet. Detta medför att kapseln kommer att hamna centriskt i deponeringshålet när samma mängd bentonit placeras runt kapseln vilket är fallet för KBS-3 V.

Vid horisontell deponering placeras bentonit och kapseln på botten av deponeringshålet. Om bentonitpellets placeras i spalten ovanför kapsel och bentonit kommer kapseln vid svällning att pressas ner mot deponeringshålets botten. Kapseln kommer att erhålla en excentrisk position i deponeringshålet. För att undvika excentrisk placering av kapseln förutsätts det i dagsläget att det inte utförs någon efterfyllnad med pellets vid horisontell deponering. Detta innebär att bentonitbarriären vid horisontell deponering kommer att få något lägre densitet och därmed högre konduktivitet.

För MLH kommer paketen bentonit-kapslar att placeras efter varandra i ca 250 m långa horisontella deponeringshål. Inläckande vatten kommer att rinna längs deponeringshålens botten och ut mot transporttunnlarna. Detta innebär att flödet successivt kommer att öka ut mot transporttunneln. Det är i dagsläget inte klarställt hur stort vattenflödet som kan tolereras utan att negativ påverkan (bland annat erosion) erhålls på bentonitbarriären. Vid svällning är det också möjligt att deponeringshålen successivt täpps igen av svällande bentonit.

Vid deponering av kapslar i individuella deponeringshål, KBS-3 V och H, blir varje kapsel en avslutad deponeringsprocedur vilket bedöms vara fördelaktigt ur kvalitets- och säkerhetssynpunkt. Fördelar med KBS-3 V och H är också att övervakningen och kontrollen av deponeringen underlättas genom möjligheten till okulär besiktning.

Vid ett eventuellt fortsatt utvecklingsarbete av deponeringstekniker för horisontell deponering är det nödvändigt att se över den tekniska uppbyggnaden av bentonitbarriären. Översynen bör omfatta tjockleken på barriären (diametern på deponeringshålen), bentonitkvalitet och tekniken för inplacering av bentonit och kapsel samt påverkan av inläckande vatten.

En tydlig skillnad mellan metoderna är att MLH saknar deponeringstunnlar som måste återfyllas med en blandning av bentonit och bergkross. Återfyllnaden är kostsam och tekniskt inte helt okomplicerad.

5.2.6 Miljö

Påverkan på miljön vid byggandet och driften av djupförvaret, förutom eventuell påverkan kopplad till hanteringen av radioaktivt material, kommer i princip vara

proportionella till volymen utbrutet berg. Utbrutet berg skall transporteras upp till markytan och till deponi, transporterna genererar emissioner av avgaser och buller, utpumpade vattenvolymer skall avbördas och renas etc. Genom den avsevärt mindre utbrutna bergvolymen kommer det att bli mindre miljöpåverkan vid byggandet av ett MLH förvar än ett KBS-3 V och H förvar. De utbrutna bergvolymerna är jämfört med andra stora bergprojekt som gruvor och trafiktunnlar i Stockholm (t.ex. Södra Länken) inte speciellt stora och arbetena kommer att utföras under en lång tidsperiod. Miljöpåverkan bör vid jämförelse av deponeringsmetoderna ges liten betydelse jämfört med faktorer som påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten.

5.2.7 Mänskligt intrång efter förslutning

Med hänsyn till samma layout för de olika djupförvaren föreligger det ingen skillnad med avseende på mänskligt intrång under varken driftstiden eller efter förslutning av djupförvaret.

6 Jämförelse av deponeringsmetoder, bästa tekniska lösning

I tabell 6-1 presenteras en slutlig jämförelse mellan studerade deponeringsmetoder med avseende på ”bästa tekniska lösning”. I tabellen jämförs deponeringsmetoderna KBS-3 H och MLH med referensmetoden KBS-3 V. Jämförelsen redovisas som bättre (+), sämre (-) eller lika (=) med referensmetoden.

Tabell 6-1 Jämförelse med avseende på bästa tekniska lösning.

| Kriterium på hierarkisk nivå 1 | KBS-3 V | KBS-3 H | MLH |
|-------------------------------------|------------|---------|-----|
| Teknisk genomförbarhet | Ref. metod | - | - |
| Geundersökningar | Ref. metod | = | = |
| Projektering | Ref. metod | = | = |
| Utbyggnad | Ref. metod | = | - |
| Deponering | Ref. metod | - | - |
| Miljö | Ref. metod | = | + |
| Mänskligt intrång efter förslutning | Ref. metod | = | = |

Av tabell 6-1 framgår det att KBS-3 V bedöms vara den bästa, eller vara likvärdig, med övriga studerade metoder med avseende på studerade kriterier förutom med avseende på ”Miljö”.

Utförd utredning visar att deponeringsmetoderna är tekniskt genomförbara. Eftersom KBS-3 V har studerats mest ingående, utvecklingsarbetet har pågått under lång tid och att gjorda bedömningar kan basera på utförda fullskaliga försök i Äspö HRL, värderas metoden före de två andra studerade metoderna. Detta innebär inte att KBS-3 H och MLH är sämre metoder ur teknisk synvinkel utan att fördjupade studier erfordras för att en värdering skall kunna göras med samma signifikans.

Eftersom metoderna baseras på i princip samma grundlayout och deponeringsdjup föreligger inga avgörande skillnader mellan metoderna med avseende på ”Geundersökningar” och ”Projektering”.

KBS-3 V och KBS-3 H baseras på samma utformning av deponeringstunnlar och deponeringshål. Skillnaden är att deponeringshålen borrar vertikalt i botten eller horisontellt i väggen på deponeringstunnlarna. Genom likartad utformning kommer samma, och väl beprövade bergschaktningsmetoder att tillämpas vid utbyggnaden av förvaret.

Erforderliga bormaskiner för borrhningen av deponeringshålen för MLH finns tillgängliga på marknaden. Borrhning av deponeringshål i aktuell dimension och i hårt kristallint berg är dock inte lika förekommande som tunnelborrhning i de dimensioner som är aktuella för deponeringstunnlar för KBS-3 V och H. För MLH erfordras också ny utrustning för att utföra injekterings- och förstärkningsarbeten i de små och långa deponeringshålen. MLH-metoden måste därför i dagsläget rankas efter KBS-3 V och H-metoden med avseende på ”Utbyggnad”. Det bedöms dock att MLH med måttliga utvecklingsinsatser kan nå samma tekniska mognad som KBS-3 V och H.

Som framförts tidigare skall tyngdpunkten vid en jämförelse läggas på kriterier som påverkar den långsiktiga funktionen och säkerheten. Med nuvarande utformning kommer bentonitbarriären att erhålla högre densitet och därmed lägre konduktivitet vid vertikal deponering. Detta beror på möjligheten att efterfylla spalten mellan berg och utsidan på bentonitbarriären med bentonitpellets. För att påskynda bentonitens vattenmättnad och homogeniseringsprocess finns det ett önskemål att efterfylla kvarstående spalter med vatten. Denna vattenfyllning kan enkelt utföras i vertikala hål. Om vattenfyllning blir ett krav, måste speciella metoder utvecklas för vattenfyllning vid horisontell deponering. Med hänsyn till bentonitbarriärens funktion rankas KBS-3 V före metoderna med horisontell deponering.

En tydlig fördel för KBS-3 V och H är att deponeringen av kapslar utförs i individuella deponeringshål. Varje deponering blir en avslutad deponeringsprocedur vilket bedöms vara fördelaktigt från kvalitets- och säkerhetssynpunkt.

Utveckling av deponeringstekniker och maskinella utrustningar har nått olika lång men det bedöms möjligt att utveckla väl fungerande tekniker och utrustningar för studerade deponeringsmetoder.

Med avseende på "Miljö" finns det fördelar för MLH på grund av mindre utbruten bergvolym. Skillnaden mellan metoderna är i praktiken liten då utbrutna bergvolymen för studerade metoder är måttliga jämfört med andra stora anläggningsprojekt och gruvverksamhet. Dessutom blir den årliga belastningen måttlig p.g.a. lång bygg- och driftstid.

Baserat på dagen kunskap om deponeringsmetoderna rankas metoderna i nedanstående ordning med avseende på "bästa tekniska lösning". Lägsta nummer utgör den bästa metoden.

1. KBS-3 V
2. KBS-3 H
3. MLH

Genom ett fortsatt tekniskt utvecklingsarbete bedöms det fullt möjligt att utveckla studerade metoder till väl fungerande djupförvarskoncept. För horisontell deponering är det nödvändigt att se över uppbyggnaden av bentonitbarriären och behovet av efterfyllnad med vatten. För MLH utgör inflödet av vatten till det långa deponeringshålet en speciell förutsättning som måste studeras i detalj. Eventuell påverkan på bentonitbarriären samt eventuella krav på ett begränsat inflöde av grundvatten måste studeras. För att slutligen nå samma tekniska mognad är det nödvändigt att utföra fullskaleförsök med horisontell deponering på samma sätt som det nu utförs i Äspö HRL för referensmetoden KBS-3 V, vertikal deponering.

7 Referenser

- /1/ SKB., 1992. Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS), Slutrapport. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 2/ Sandstedt, H, Munier, R, Pers, K, Birgersson L, Ageskog , L, 2001. Project JADE, Comparison of repository systems, Summary of results. TR-01-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /3/ Sandstedt, H, Munier, R, Wichmann, C, et al., 2001. Projekt JADE, Beskrivning av MLH metoden. R-01-29. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /4/ Jansson, L, Nicklasson, A, Jendenius, H, et al., 2001. Projekt JADE, Metod och maskinbeskrivning av utrustning för deponering av kapslar i vertikala deponeringshål. R-01-35. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /5/ Kalbantner, P., 2001. Projekt JADE, Metod och maskinbeskrivning av utrustning för deponering av kapslar i horisontella deponeringshål. R-01-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /6/ Kalbantner, P., 2001. Projekt JADE, Metod och maskinbeskrivning av utrustning för deponering av kapslar i medellånga deponeringshål. R-01-34. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /7/ Munier, R, Follin S, Rhén, I, Gustavsson G, Pusch R, 2001. Projekt JADE, Geovetenskapliga studier. R-01-32. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /8/ SKB., 1995. Kärnkraftsavfallens behandling och slutförvaring., FUD program 95, Stockholm. FUD program 95. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /9/ Werme, L and Eriksson, J, 1995. Copper canister with cast inner component. Amendment to project on Alternative Systems Study (PASS), SKBTR 93-04. SKB TR 95-02. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- /10/ Wallis, S, 1997. "Knoxville smallbore". World Tunneling and subsurface excavation, Vol: Mars; pp 53-57.
- /11/ Birgersson, L, Pers, K, and Wiborgh, M., 2001. Project JADE, Comparison of repository systems with regards to the long-term function and safety. TR-01-18. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /12/ Andersson, J, A, Almén, K-E, Ericsson, L. O, et al., 1997. Parametrar av betydelse att bestämma vid geovetenskaplig platsundersökning. SKB Report R-97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /13/ SKB, 1999. SR 97. Waste, repository design and sites. SKB TR-99-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /14/ Ageskog, L., 2001. Projekt JADE, Jämförande kostnadsanalys mellan olika deponeringsmetoder. R-01-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- /15/ Munier, R, Sandstedt, H, and Niland, L., 1997. Förslag till hypotetiska förvarsutformningar av förvar enligt KBS-3 för Aberg, Beberg och Ceberg. SKB Rapport R-97-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /16/ Wichmann, C and Isaksson, T., 1997. Mekaniserad tunneldrivning av deponeringstunnlar-Jämförelse mellan maskinkoncept. Arbetsrapport AR D-97-14. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /17/ Emsley S, Olsson O, Stenberg L, Alheid H-J, Falls S, 1997. ZEDEX - A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR 97-30, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co
- /18/ Bäckblom, G., 1996. Preliminär utformning av djupförvarets närområde. Arbetsrapport AR D-96-011. Svensk Kärnbränslehantering AB.