

# Projekt JADE

## Beskrivning av MLH-metoden

Håkan Sandstedt, Raymond Munier  
Scandiaconsult Sverige AB

Curt Wichmann  
Nitro Consult

Therese Isaksson  
KTH, Jord och Bergmekanik

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

## Beskrivning av MLH-metoden

Håkan Sandstedt, Raymond Munier  
Scandiaconsult Sverige AB

Curt Wichmann  
Nitro Consult

Therese Isaksson  
KTH, Jord och Bergmekanik

Augusti 2001

*Nyckelord:* JADE, deponering av använt kärnbränsle, medellånga hål, tunnelborrning

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

## 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 utredning tillhör en serie rapporter inom ramen för projekt JADE, jämförelse av deponeringsmetoder.

Jämförelser mellan KBS-3 och MLH har tidigare utförts inom ramen för SKB:s verksamhet vilka resulterat i att KBS-3 rangordnats före MLH som metod. De tekniska förutsättningarna för MLH har emellertid förändrats vilket medfört ett behov av en uppdatering av kunskapsläget om metoden som ett led i projekt JADE.

I denna utredning sammanfattas nuvarande kunskap om deponeringsmetoden MLH med avseende på geologiska förutsättningar, metoder för borring av långa horisontella deponeringshål, förstärkning och tätning, deponering av kapslar samt kostnad. Jämförelser görs med referensmetoden KBS-3.

Ett MLH- förvar bedöms vara känsligt för inläckande vatten till deponeringshålen under själv deponeringsprocessen. Detta innebär att MLH med dagens kunskap främst rekommenderas för bergmassor med relativt låg vattenföring.

Utredningen visar att MLH har en betydande ekonomisk potential men är tekniskt omogen i relation till KBS-3; det är främst tekniken för deponering som behöver utvecklas vidare.

Det är författarnas bedömning att deponeringsmetod och maskinutrustningar som uppfyller de högt ställda kraven på funktion och säkerhet kan utvecklas inom en snar framtid vilket gör att MLH ej kan förkastas som deponeringsmetod.

## **Abstract**

This report constitutes a part of a series of reports within project JADE, comparison of deposition methods.

A comparison of the deposition methods MLH and KBS-3 has earlier been performed and KBS-3 was judged to be more advantageous than MLH. However, the prerequisites for the comparison have changed with time and an updated evaluation of MLH was therefore required.

In this report, the current knowledge of MLH is summarized with focus on geological prerequisites, methods for boring long, horizontal deposition holes, reinforcement and sealing, deposition and cost. Comparisons with KBS-3 are performed sequentially.

An MLH-repository is judged to be more sensitive to ingress of water to the deposition holes during the deposition process. This implies that a MLH repository based on today's knowledge is basically recommended for bedrock with fairly low water bearing capacity.

It has been demonstrated that MLH has considerable economic potential compared to KBS-3. However, the method is judged to be more technically immature than KBS-3. Particularly, methods and equipment for deposition of canisters need to be developed further.

Methods and equipment for deposition can be developed, which fulfill the demands on function and safety, in the near future. MLH cannot therefore be rejected as deposition method.

# Innehållsförteckning

<b>Förord</b> .....	<b>3</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Bakgrund</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Förutsättningar</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Förundersökningar</b> .....	<b>15</b>
3.1 Allmänt .....	15
3.2 Jämförelse av MLH och KBS-3 .....	16
3.2.1 Layouter .....	17
3.2.2 Transporttunnlar .....	18
3.2.3 Deponeringstunnlar .....	18
3.2.4 Deponeringshål .....	18
3.3 Exempel .....	20
3.3.1 KBS-3 .....	22
3.3.2 MLH .....	23
3.4 Diskussion .....	24
3.5 Slutsatser - förundersökningar .....	24
<b>4 Metoder för tunnelborrning</b> .....	<b>27</b>
4.1 Förutsättningar för tunneldrivning .....	27
4.2 Möjliga borrningstekniker .....	28
4.2.1 Borrning av deponeringshål med tunnelborrningsmaskiner-TBM .....	28
4.2.2 Maskiner för stigortsborrning, RBM .....	34
4.3 Borrprestanda .....	35
4.4 Jämförelse av bormetoder .....	35
<b>5 Arbetarskydd</b> .....	<b>39</b>
<b>6 Bergförstärkning</b> .....	<b>41</b>
6.1 Allmänt .....	41
6.2 Injektering .....	42
6.2.1 TBM och BORPAK .....	43
6.2.2 RBM .....	43
6.3 Förstärkning .....	44
<b>7 Hypotetisk förvarsutformningar för MLH</b> .....	<b>45</b>
<b>8 Deponeringsmetoder</b> .....	<b>47</b>
8.1 Allmänt .....	47
8.2 Påverkan på bentonitbufferten av vatten vid deponeringen .....	48
8.3 Deponering med metod framtagen av VBB .....	49
8.4 Deponeringsmetoder framtagna av ÅF-industriteknik .....	50
8.4.1 MLH 4 .....	50
8.4.2 Metod utvecklad av SH Konsult .....	52
<b>9 Hotbilder</b> .....	<b>55</b>
9.1 Inledning .....	55

9.2	Val av borrh metod.....	55
9.3	Borring av deponeringshål .....	56
9.3.1	Maskinhaverier .....	56
9.4	Geologiska hotbilder .....	57
9.5	Stabilitet och tätning före deponering .....	58
9.5.1	Instabilitet .....	58
9.5.2	Vatteninläckage .....	60
9.5.3	Ojämnheter i sulan .....	60
9.6	Stabilitet och tätning under deponering .....	60
9.6.1	Tunnelinstabilitet .....	61
9.6.2	Vatteninläckage .....	61
<b>10</b>	<b>Kostnadsberäkningar .....</b>	<b>63</b>
10.1	Ekonomisk riskvärdering .....	64
10.1.1	Exempel på kostnadsökningar vid tunnelbyggen .....	64
10.1.2	Sammanställning av kostnadsberäkningarna .....	67
10.2	Sammanfattning av riskvärderingen .....	69
<b>11</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>71</b>

# 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/.

Den utformning av MLH metoden som redovisas i föreliggande rapport baseras på tunnelborrningsteknik vilket medför att förvaret kan byggas utan så kallade baktunnlar /1/. Detta möjliggör en lägre anläggningskostnad till skillnad från den utformning som tidigare redovisats i PASS vilken var baserad på horisontell stigortsborrning. Baktunnlar kan utgöra möjliga transportvägar för grundvatten vilket undviks med nu förslagen utformning.

I rapporten redovisas layout och byggandet av förvaret, deponeringsprocessen och en kostnadsanalys för borrhningen av deponeringshål. Vid arbetet med layouten har hänsyn tagits till rådande kunskapsläge vad avser borrhning av tunnlar med en diameter inom intervallet 1,6 - 2,4 m.



Föreliggande rapport utgör ett av flera underlag för jämförelsen av deponeringsmetoderna och utgör en uppdatering av en tidigare redovisad beskrivning av MLH metoden /1/.

## 2 Förutsättningar

Föreliggande utredning är baserad på den generiska layout som upprättats av SKB för ett djupförvar av typ KBS-3 med vertikal deponering av kapslar.

Layouten för KBS-3 är upprättad på en så kallad layout E-nivå baserad på generiska data om svensk berggrund på 500 meters djup samt från de erfarenheter SKB fått genom undersökningar av olika typområden och från Äspölaboratoriet. Hänsyn har också tagits till bedömda förhållanden avseende infrastruktur och andra förutsättningar på markytan. Layout E är generell och behäftad med osäkerheter bland annat avseende lagrets slutliga utbredning.

Layouten, enligt KBS-3 metoden, är utformad så att deponeringstunnlar, 100 - 500 meter långa, drivs vinkelrätt från transporttunnlarna. Deponeringstunnlarna dimensioneras för att rymma erforderlig maskinell utrustning för deponering och återtag av kapslar. I botten på deponeringstunnlarna borras 7,8 m djupa deponeringshål med diametern 1,75 m.

Principiella skillnader i layout mellan KBS-3 och MLH föreligger vilket får till följd att förvarskomponenterna för respektive deponeringsmetod får olika funktioner. MLH utgörs av transporttunnlar och 100 - 500 m långa, horisontella deponeringshål medan KBS-3 utgörs av transporttunnlar, deponeringstunnlar och deponeringshål. Detta innebär att deponeringstunnlar i egentlig mening saknas i MLH (se även avsnitt 3.2.1 för definitioner).

Djupförvarets utformning styrs bland annat av temperaturutvecklingen kring kapseln efter deponering och den maximala temperatur som kan tillåtas i buffert och kapsel. Avståndet mellan deponeringshålen enligt MLH har beräknats till 40 m och avståndet mellan kapslarnas till 1,2 m /3/. Definitiva mått fastställs på basis av olika temperaturberäkningar baserade på platsspecifika parametrar.

## 3 Förundersökningar

### 3.1 Allmänt

Med förundersökningar avses metoder för att prediktera en bergmassas egenskaper. Dessa kan bland annat omfatta kartering av hållar, borrhälar, tunnlar och schakt samt geofysiska metoder, och hydrotester.

Diskontinuiteter i bergmassan har ur funktionssynpunkt klassats i följande fyra funktionsklasser (se /4/ för detaljerad definition av funktionsklasser):

1. **D1.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de ej tillåts förekomma inom förvarsvolymen och endast i undantagsfall tillåts att passeras av tillfartstunnel. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 utgör storskaliga mekaniska och/eller hydrauliska ränder för djupförvaret. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 framträder ofta som lineament med mils utbredning. Typfall Äspö: NE-1.
2. **D2.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de ej tillåts passeras av deponeringstunnlar. Diskontinuiteter av funktionsklass D2 tillåts dock vara avgränsande mellan förvarets olika huvuddelar eller deponeringsområden. D2 har liknande egenskaper som D1 men är i allmänhet mer lokala och mindre intensiva till sin karaktär. Typfall Äspö: EW-3.
3. **D3.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts förekomma inom förvarsdelar och passeras av såväl transporttunnlar som deponeringstunnlar. D3 utgörs oftast av mindre sprickzoner men även enstaka sprickor, exempelvis kraftigt vattenförande sprickor med stor utbredning, kan uppvisa egenskaper som motiverar tillhörighet till denna klass. Typfall Äspö: NE-2, NNW-4.
4. **D4.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts korsa deponeringsposition, och således inte påverkar förvarets utnyttjandegrad. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 består vanligen av enskilda sprickor eller förskiffringsplan vars huvudorientering dock kan påverka förvarets tunnelriktningar. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 kan även ha betydelse för närområdets funktion, med avseende på grundvattenströmning och nuklidtransport samt för kapselhålets bergmekaniska stabilitet.

För diskontinuiteter av funktionsklass D1 och D2 krävs, för långsiktig säkerhet, respektavstånd till närmaste kapselposition. Respektavståndet är en funktion av diskontinuitetens geometriska-, bergmekaniska-, kemiska-, kinematiska, seismiska och hydrauliska egenskaper.

Acceptabel predikterbarhet från utförda ytundersökningar för 500 meters djup är generellt begränsad till större strukturer av funktionsklass D1 och D2. Även om en god bild av sprick- zon- och bergartsmatriserna kan erhållas från diverse markundersökningar och borrhål är det vanskligt att med precision lokalisera strukturerna i bergvolymen bortom sonderingarna; det är möjligt att för förvarsdjupet grovt förutsäga vilken typ av struktur som kan förväntas, dess geometri och frekvens men generellt ej var strukturen påträffas.

Förundersökningar för transporttunnlar, deponeringstunnlar och deponeringshål utförs kontinuerligt för att uppdatera tidigare prediktioner och samla information om den lokala geologin så att arbetet successivt kan modifieras och detaljeras. Följande faktorer kan påverkas av den lokala geologin:

- Acceptansen av enskilt kapselhål
- Kapselhålets position och längd
- Förstärkningsåtgärder
- Tätningsåtgärder

Graden av acceptans och kapselhålets position kan i sin tur påverka deponeringstunnlarnas längd, deponeringstunnlarnas antal, transporttunnlarnas längd och, som en följd därav, mängden återfyllnad.

Metodiken för förundersökning av deponeringshål för MLH skiljer sig på ett antal sätt från förundersökning av deponeringstunnlar och deponeringshål enligt referenskonceptet KBS-3. Skillnaden består främst i att predikterbarheten för KBS-3 respektive MLH är olika för ekvivalenta faser av byggskedet.

En förutsättning för jämförelsen är att förvarets långsiktiga funktion och säkerhet uppfyller ställda krav för båda metoderna även om kvalitativa skillnader kan föreligga. Jämförelsen omfattar därför endast processerna fram till deponering. Förvarets layout förutsätts vara relativt given så att tunnelorienteringen för respektive deponeringsmetod är fixerad. Vidare antas att borrhningar utanför den bergmassa som sedermera skall brytas, minimeras till sin omfattning.

## **3.2 Jämförelse av MLH och KBS-3**

Förundersökningarna kan för de olika tunnelementen ha olika syften. Sporadisk kärnbörning kan utföras vid fronten för att uppdatera den geologiska modellen utarbetad från markundersökningar; läget och mäktigheten av predikterade zoner av typ D1 och D2 kan därmed verifieras.

Strukturer av funktionsklass D1 tillåts per definition /4/ ej skära någon del av förvaret. Borrning, med avsikt att med precision fastställa positionen av D1 strukturer och dessas komponenter, är nödvändig då extrapolering av sådana strukturer till förvarsdjupet -500 m kan vara behäftad med osäkerheter. Kännedom om strukturernas läge, form och mäktighet ned till förvarsdjup är nödvändig för beräkningen av respektavstånd. Respektavstånden utgör de gränser inom vilka förvaret i sin helhet tillåts placeras /8/.

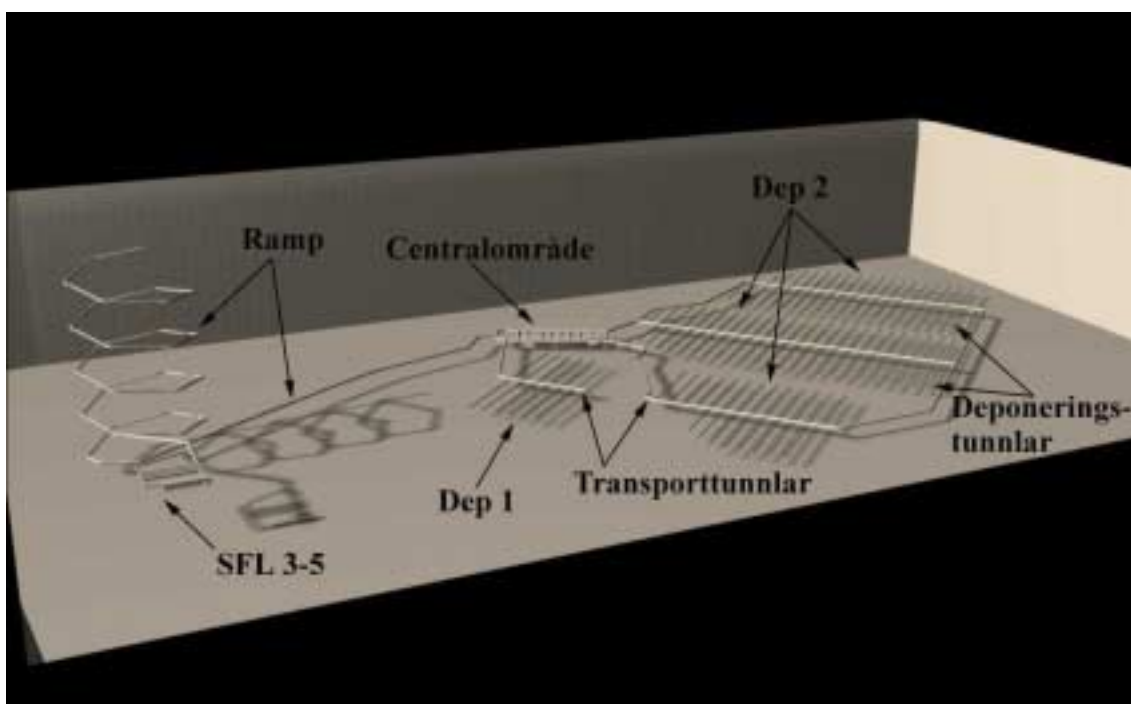
Läget, formen och mäktigheten av strukturer med funktionsklass D2 krävs, analogt med vad som gäller för strukturer av funktionsklass D1, för beräkningar av respektavstånd och därmed beräkningar av erforderliga deponeringsvolymen och lokaliseringen av förvarets olika komponenter. Strukturer med funktionsklass D2, och dessas respektavstånd, avgränsar de block inom vilken deponering kan tillåtas. Dessa strukturer tillåts skära transporttunnlar.

### 3.2.1 Layouter

Principiella skillnader i layout mellan de olika deponeringsmetoderna föreligger vilket får till följd att förvarselement (Figur 3-1) för respektive deponeringsmetod får olika funktioner. Med anledning av detta definieras för tydlighetens skull förvarselementen i föreliggande utredning enligt följande:

- Transporttunnel: Den tunnel i vilken transport av kapsel till deponeringstunnel sker. Transporttunnlarna sammanlänkar olika deponeringsområden inom förvaret och ansluter till centralområdet under jord.
- Deponeringstunnel: Den tunnel i vilken transport av kapsel till deponeringshål sker. Deponeringshålen är placerade i deponeringstunneln.
- Deponeringshål: För KBS-3 avses de vertikala hål som borrar i botten på deponeringstunneln. För MLH avses de långa deponeringshål som borrar horisontellt från transporttunneln.

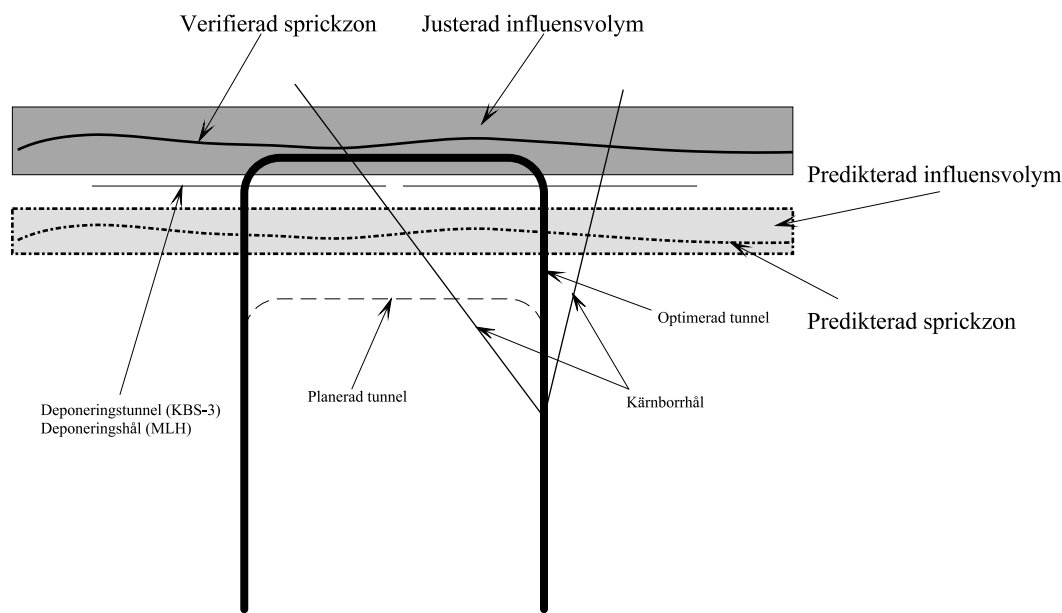
Förvarets utformning är lika för KBS-3 och MLH. Deponeringstunnlar i KBS-3 motsvaras av deponeringshål i MLH.



*Figur 3-1 Schematisk illustration av ett tentativt förvar enligt KBS-3 innehållande samtliga förvarskomponenter. I denna layout är SFL 3-5, förvarsdelen för annat långlivat avfall än använt kärnbränsle, lokaliserad i anslutning till en ramp, Deponeringsområde 1, vilket innehåller ca 10% av kapselpositionerna, är avskilt från deponeringsområde 2. Deponeringsområde 2 är uppdelat i områden vars gränser styrs av den lokala geologin, framför all förekomsten av strukturer av typ D2. För MLH ersätts deponeringstunnlarna i KBS-3 av deponeringshål. På förvarskala är därmed layouterna för de två metoderna identiska.*

### 3.2.2 Transporttunnlar

Under framdriften av transporttunnlar för KBS-3 och MLH undersöks bergmassan bortom tunnlar med kärnbrorhåll för att erhålla information om hur utrymmet inom de block som valts för deponering kan utnyttjas optimalt. Med dessa undersökningar verifieras eller korrigeras de strukturtolkningar som härletts från undersökningar utförda i ett tidigare skede (Figur 3-2).



Figur 3-2 Figuren illustrerar schematiskt i plan hur deponeringsvolymen kan påverkas av undersökningar från transporttunnlar. Ett antal kärnbrorhåll borras bortom transporttunnlarnas planerade lägen för att fastställa gränserna för de block som valts för lokaliseringen av deponeringstunnlar/deponeringshålen.

### 3.2.3 Deponeringstunnlar

Sporadiska eller systematiska förundersökningar utförs, inför byggandet av deponeringstunnlar (KBS-3) och deponeringshål (MLH) för att precisera egenskaperna och geometrierna av D2-strukturer samt med precision identifiera strukturer av typ D3 vilka ej tillåts skära deponeringshål i KBS-3. Detta för att tidigt få möjlighet att optimera deponeringstunnlarnas längd och kapselhålets positioner, och därmed få möjlighet att kompensera för det bortfall som bedöms kunna orsakas av de identifierade strukturerna och dessas respektavstånd. För MLH placeras inga kapslar i deponeringshålen i avsnitt där hålen skär D3-strukturer.

### 3.2.4 Deponeringshål

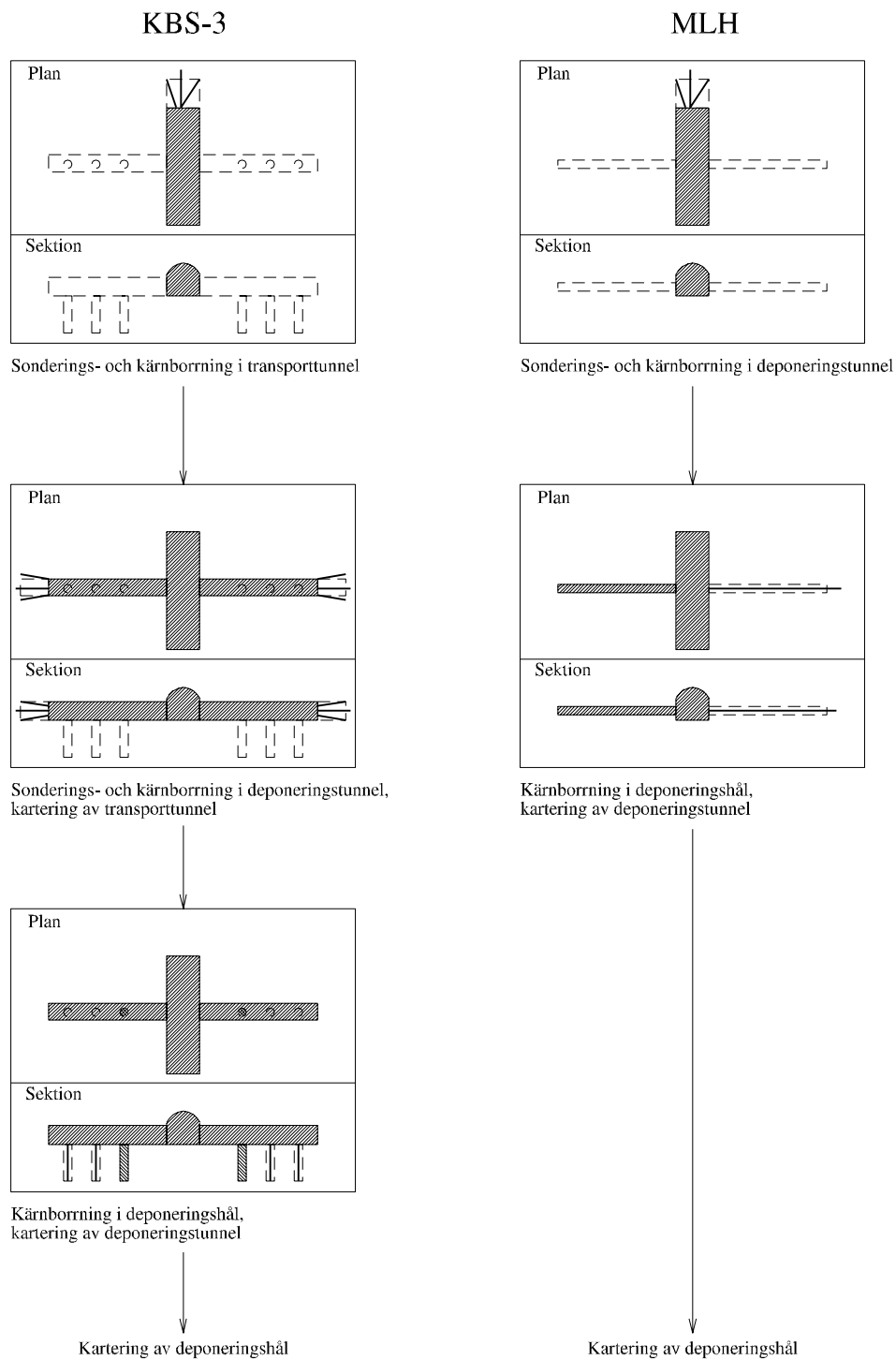
#### **KBS-3**

Kärnbrorring i deponeringshål av typ KBS-3 utförs bland annat för att detektera strukturer av typ D3 vilka är parallellt orienterade med sulan och därmed svåra att

prediktera med undersökningar av deponeringstunneln. Branta strukturer som skär deponeringshålet men som ej skär kärnborrhålet kan troligen med god precision karakteriseras med undersökningar i deponeringstunneln. Strukturernas (D3-D4) skärning med deponeringshålet predikteras med strukturmodellering av geometrierna och verifieras med kärnkartering. Därmed kan kapselpositioner flyttas erforderligt antal meter till fördelaktigare position utan att deponeringshålet behöver borraras och förkastas.

### ***MLH***

Kärnbörning från transporttunnlar av typ MLH utförs bland annat för att i deponeringshålen detektera strukturer av funktionsklass D3-D4 vilka endast med svårighet kan detekteras från transporttunnlarna. Strukturer som är parallella med deponeringshålet men som ej skär kärnborrhålet kan generellt ej detekteras såvida de inte är lokaliserade till transporttunnelns omedelbara närhet; i nuläget finns ej instrument utvecklade som med tillräcklig tillförlitlighet kan detektera strukturer som löper parallellt med stickprovsdomänen (tunnelväggen, borrhålet etc).



Figur 3-3 Flödesdiagram som schematiskt visar de principiella skillnaderna i förundersökningsmetodik mellan MLH och KBS-3.

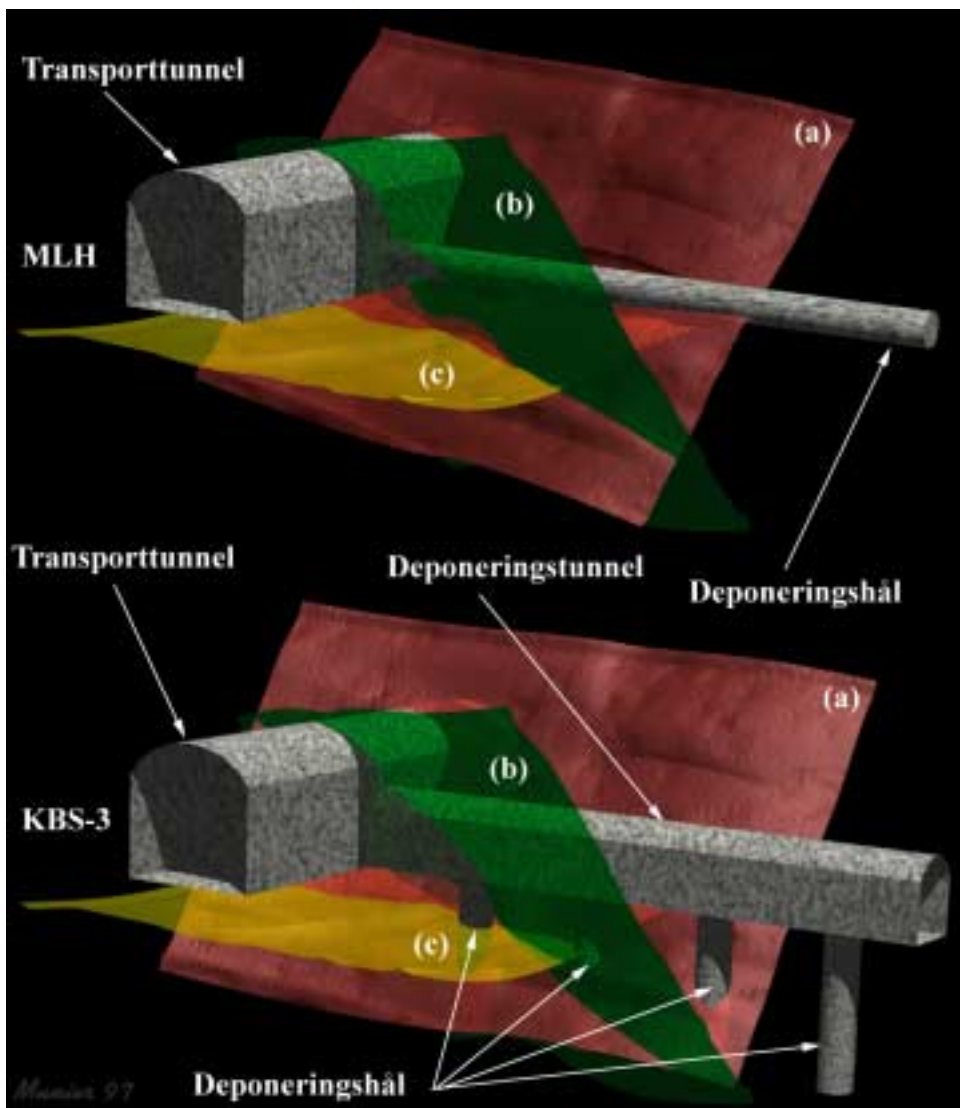
### 3.3 Exempel

För att tydliggöra skillnaderna mellan deponeringsmetoderna har dessa illustrerats med två hypotetiska exempel. Exemplet gör inte anspråk på att vara typiska eller extrema



fall utan dessa har valts för att illustrera några av flera skillnader som kan förväntas uppstå i ett verkligt fall. Skärningen mellan en struktur och ett tunnelelement är en (kontinuerlig) funktion av strukturens position, längd, strykning och stupning. Fyra strukturer med olika riktningar har positionerats och orienterats enligt följande (Figur 3-4):

1. Struktur "a": Subparallell med deponeringshålet för MLH och deponeringstunneln för KBS-3.
2. Struktur "b": I vinkel mot samtliga tunnlar i MLH respektive KBS-3.
3. Struktur "c": Subparallell med sulan i transporttunneln (KBS-3 och MLH).
4. Struktur "d": Denna struktur är för klarhet i figuren ej redovisad i Figur 3-4. Strukturen är relativt brant och stryker parallellt med transporttunneln (KBS-3 och MLH).



Figur 3-4 Figuren illustrerar schematiskt definitionen av förvarskomponenter som används i föreliggande avsnitt.

### 3.3.1 KBS-3

För KBS-3 gäller följande:

- 1 Struktur "a" skär transporttunneln.
  - a) Systematisk kärnbörning i transporttunneln bedöms ge tillfredsställande predikterbarhet av strukturer av typ "a".
  - b) Extrapolering av strukturen till deponeringshålen kan utföras med god predikterbarhet från transporttunneln då avståndet till närmaste kapselhål är litet.
  - c) Successiva extrapoleringar kan med god predikterbarhet utföras från befintliga till angränsande deponeringshål.
  - d) Om vinkeln mot deponeringstunneln är spetsig kan långa skärningsytor i deponeringshålet uppstå. Bortfallet av kapselpositioner kan lokalt bli stort.
- 2 Struktur "b" skär transport- och deponeringstunneln.
  - a) Systematisk kärnbörning i transporttunneln bedöms ge tillfredsställande predikterbarhet av strukturer av typ "b".
  - b) Verifiering av prediktioner kan utföras i deponeringstunneln.
  - c) Skärningen med deponeringshål kan med god precision predikteras.
  - d) Kärnbörning i deponeringshålet kan verifiera strukturen.
  - e) Successiva extrapoleringar kan med god predikterbarhet utföras från befintliga till angränsande deponeringshål.
- 3 Struktur "c" skär ej transporttunneln.
  - a) Strukturen kan detekteras med kärnbörning i deponeringshålet.
  - b) Tolkningen kan med god precision extrapoleras från ett deponeringshål till ett annat.
  - c) Sådana strukturer kan, om vinkeln mot deponeringstunneln är spetsig, orsaka långa skärningsytor.
  - d) Kapselbortfallet kan bli oväntat stort.
  - e) Om strukturen är positionerad under nivån på kapselhålets botten uppstår samma svårigheter i prediktion som för MLH (se nedan). Eventuellt kan sonderingshålet i deponeringshålet eller själva deponeringshålet närmast transporttunneln borrar något djupare än vad som planerats för övriga hål. Förekomsten av en struktur av typ "c" kan kontrolleras och dess effekter på förvarets funktion och säkerhet utvärderas. Extrapolering till följande kapselpositioner, med 3D modellering av karterade strukturer, bedöms kunna ske med tillförlitlig noggrannhet.
- 4 Struktur "d" skär ej transporttunneln.
  - a) Strukturen kan detekteras med kärnbörning i deponeringstunneln.
  - b) Kartering av deponeringstunneln ger möjlighet att extrapolera strukturen till berörda deponeringshål där prediktionen kan verifieras med kärnbörning. Noggrannheten i prediktionen bedöms vara hög på grund av deponeringshålen relativt korta inbördes avstånd (ca 6 m).

### 3.3.2 MLH

För MLH gäller följande:

- 1 Struktur "a" skär transporttunneln.
  - a) Systematisk kärnbörning i transporttunneln bedöms ge tillfredsställande predikterbarhet för strukturer av typ "a".
  - b) Extrapolering av strukturen till eventuell skärning med deponeringshålet är behäftat med stora osäkerheter.
  - c) Kärnbörning i deponeringshålet kan verifiera positionen och riktningen av strukturen.
  - d) Om skärningen mellan deponeringshål och strukturen sker på ett stort avstånd från transporttunneln kan det uppstå osäkerhet om det är struktur "a" eller någon annan struktur som genomborrats.
  - e) Om vinkeln mot deponeringshålet är spetsig kan långa och oväntade skärningsytor långt in i deponeringshålet uppstå. Bortfallet av kapselpositioner kan lokalt bli stort.
- 2 Struktur "b" skär transporttunneln.
  - a) Systematisk kärnbörning i transporttunneln bedöms ge tillfredsställande predikterbarhet av strukturer av typ "b".
  - b) Kärnbörning i deponeringshålet kan verifiera positionen och riktningen av strukturen.
- 3 Struktur "c" skär ej transporttunneln eller deponeringshålet.
  - a) Geofysiska metoder kan i nuläget ej med tillfredsställande noggrannhet detektera strukturer som är orienterade parallellt med stickprovsdomänen (t.ex. sulan, borrhålet).
  - b) Strukturen kan troligen endast detekteras med systematisk kärnbörning i sulan (eller taket om "c" ligger över tunneln). Skulle det senare trots förutsättningarna (se avsnitt 3.1) anses nödvändigt är omfattande borrningar, karteringar av kärnor och geofysik i borrhålen nödvändiga för att med acceptabel noggrannhet fastställa strukturens natur. Prediktioner av eventuell skärning med deponeringshålet är icke desto mindre behäftad med stora osäkerheter.
  - c) Sådana strukturer kan, om vinkeln mot deponeringshålet är spetsig, orsaka långa och oväntade skärningsytor i deponeringshålet. Om den skärande strukturen är kapselhålsdiskriminerande kan detta resultera i ett stort kapselbortfall.
- 4 Struktur "d" skär ej transporttunneln.
  - a) Strukturen kan endast detekteras med kärnbörning i deponeringshålet.
  - b) Kartering av deponeringshålet ger möjlighet att extrapolera strukturen till följande deponeringshål där prediktionen kan verifieras med kärnbörning. Noggrannheten i prediktionen bedöms emellertid vara låg på grund av tunnarnas relativt långa inbördes avstånd (ca 40 m).

### 3.4 Diskussion

Tunnelsystemen för både KBS-3 och MLH kan betraktas som horisontella snitt genom bergmassan då skillnaden i skala mellan strukturerna och tunnelsystemen är stor. Detta innebär att båda metoder kan sägas utgöra tvådimensionella stickprovsdomäner med avseende på strukturer av funktionsklass D1 och D2. Skillnaden mellan de båda deponeringsmetoderna bedöms i detta avseende vara marginell eller obefintlig.

Ur alla praktiska hänseenden kan KBS-3 betraktas som en 3-dimensionell stickprovsdomän för strukturer av funktionsklass D3-D4. Detta för att bergguttaget sker i tre vinkelräta riktningar; transporttunnlar och deponeringstunnlar är vinkelräta i horisontalplanet, eller ansluter varandra med trubbig vinkel, medan deponeringshål är vertikala. Skillnaden i skala mellan tunnelsystemen och strukturer av funktionsklass D3-D4 är relativt liten. Då borrning i berg som ej senare skall tas ut för tunnlar skall undvikas medför det att MLH representerar en mer 2-dimensionell stickprovsdomän med avseende på strukturer av funktionsklass D3-D4 än KBS-3.

Viss information, exempelvis frekvensen, orienteringen och vattenföringen av olika sprickgrupper, kan erhållas från kartering av de vertikala schakt som skär genom förvarsvolymen men resultaten av sådana modelleringar kan, för både KBS-3 och MLH, i allmänhet endast användas stokastiskt och ej deterministiskt för strukturer av funktionsklass D3. Sådana undersökningar kan emellertid bekräfta den eventuella förekomsten av flacka strukturer och även bidra till uppdateringen av tidigare utförda strukturmodeller av funktionsklass D2.

### 3.5 Slutsatser - förundersökningar

Skillnader i möjligheten att med precision lokalisera och karaktärisera strukturer av funktionsklasser D2-D4 bedöms föreligga. Dessa skillnader beror främst på att borrning, i berg som ej senare skall tas ut, bör undvikas och att det i dagsläget inte finns geofysiska metoder som med tillräcklig upplösning kan detektera strukturer som är parallella med provdomänen. I dagsläget betraktas borrhål för sondering som en osäker förutsättning då det ej finns någon godkänd metod framtagen för återfyllnad/tätning. Skulle emellertid borrningar i deponeringshål (MLH) kunna utföras med bibehållna säkerhetsaspekter är det författarnas bedömning att skillnaderna i predikterbarhet mellan de olika deponeringsmetoderna kan, ur alla praktiska hänseenden, anses vara marginell. Detsamma kan anses gälla om geofysiska- eller andra metoder utvecklas till att kunna prediktera strukturer av typ D3 som är parallella med provdomänen.

Baserat på dagens kunskap bedöms, i enlighet med ovanstående, predikterbarheten vara bättre för deponering enligt KBS-3 än för deponering enligt MLH. Skillnaderna, listade nedan, måste emellertid kvantifieras för att utvärdera betydelsen med avseende på långsiktig funktion och säkerhet.

Följande skillnader föreligger:

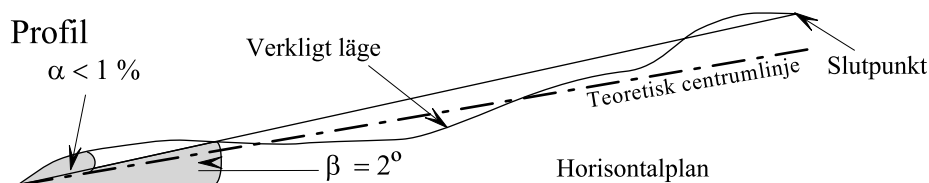
1. Informationstätheten i KBS-3 är högre på grund av större mängd uttaget berg och därmed undersökt bergvolym.
2. Deponeringshål av typ MLH är 100-500 m långa. Extrapolering av strukturer från transporttunneln till deponeringshålet kan vara behäftad med mycket stora osäkerheter.
3. Det inbördes avståndet mellan deponeringshål av typ MLH är ca 40 m. Motsvarande för KBS-3 är ca 6 m. Möjligheterna för strukturell modellering för KBS-3, baserat på karteringar av deponeringshål, är bättre och därmed även predikterbarheten av strukturer.
4. Strukturer av funktionsklass D3 kan skära deponeringshål av typ MLH utan att skäras av vare sig sonderande kärnborrhål eller transporttunnel. Motsvarande kan även ske i KBS-3 men kartering av ett deponeringshål medför möjligheter att strukturellt modellera och därmed extrapolera strukturer till närmaste kapselposition. Deponeringshålet kan därmed förkastas utan att borrar, en möjlighet som MLH väsentligen saknar.
5. Det finns en risk att strukturer som är parallella med deponeringshål (MLH) aldrig detekteras och att dessa strukturer kan påverka förvarets långsiktiga funktion och säkerhet. Motsvarande kan även uppstå för KBS-3, t.ex. under botten på deponeringshål. Men eftersom det inbördes avståndet mellan deponeringshål är litet och att det är ytterst osannolikt att en struktur är exakt plan och horisontell är möjligheterna för prediktion av sådana strukturer större för KBS-3 än för MLH även om prediktionerna är osäkra.

## 4 Metoder för tunnelborrning

### 4.1 Förutsättningar för tunneldrivning

Uppgifter om avstånd mellan kapslar, mått m.m. redovisas i /3/. Följande förutsättningar gäller vid val av maskin och metod för borrning av deponeringshål för MLH:

1. Diametern på deponeringshålen är 1,75 m.
2. Längden av deponeringshålen kan variera inom intervallet 100 - 500 m. Den nedre gränsen anger vad som bedömts vara praktiskt eller ekonomiskt möjligt att utnyttja för deponering. Typiska längder torde ligga kring ca 250 m.
3. Deponeringshålen skall vara raka och parallella inom varje deponeringsvolym. Det inbördes avståndet mellan deponeringshålen är ca 40 m.
4. Deponeringshålen skall ha en svag lutning uppåt så att inläckande vatten till tunneln kan rinna ut. Den maximala lutningen är ansatt till 2 grader.
5. Deponeringshålen skall drivas vinkelrätt från transporttunnlarna. En mindre avvikelse från det ortogonala systemet kan tillåtas för optimering av utrymmet i det bergblock som är tillgängligt för deponering.
6. Deponeringshålen skall vara tillräckligt raka och tunnelväggarna tillräckligt jämna (Figur 4-1) för att deponeringsmaskinen ej skall fastna i tunnarna eller att bentonit eller kapsel ej skadas under deponeringsprocessen.
7. Injektering av större vattenförande partier förutsätts kunnas utföras i samband med borrningen av deponeringshålen.
8. Utrymmesbehovet vid startpunkten för borrningen bör så långt det är möjligt begränsas till det utrymme som finns tillgängligt i transporttunneln. Enligt referenslayouten för KBS-3 är transporttunnelns bredd ca 7 m men för MLH krävs sannolikt ett större tvärsnitt eller nischer för att rymma bormaskin med tillhörande utrustning. Utöver det utrymme som krävs för borrning och deponering enligt MLH-metoden kan det erfordras ett större utrymme för att klara övriga transporter i transporttunneln. Optimering med avseende på detta omfattas ej av föreliggande utredning.



Figur 4-1 Figuren illustrerar schematiskt tillåtna avvikelser.  $\alpha$  = avvikelse från teoretisk centrumlinje i varje enskild punkt,  $\beta$  = vinkel från horisontalplanet.

## 4.2 Möjliga borrhningstekniker

De flesta tunnlar med små dimensioner borraras i nuläget i jord eller mjuka bergarter. Ett antal maskiner har emellertid utvecklats för borrhning i hårda bergarter.

För borrhning av tunnlar med små dimensioner i berg existerar i princip två tekniker kallade TBM (Tunnelborrningsmaskin) och RBM (Raise Boring Machine, maskin för stigortsborrhning) vilka beskrivs i nedanstående avsnitt. Begreppet MTBM (Micro Tunnel Boring Machine) avser TBM liknande teknik för små tunneldiametrar, s.k. mikrotunneldrivning.

Tekniken för borrhning av tunnlar med små diametrar har gått framåt under de senaste åren. Denna s.k. mikrotunneldrivning har hamnat i fokus för forskningen och ett antal forskningscentra har specialiserat sig på detta ämnesområde (tex. Colorado School of Mines, Microtunneling Research Institute).

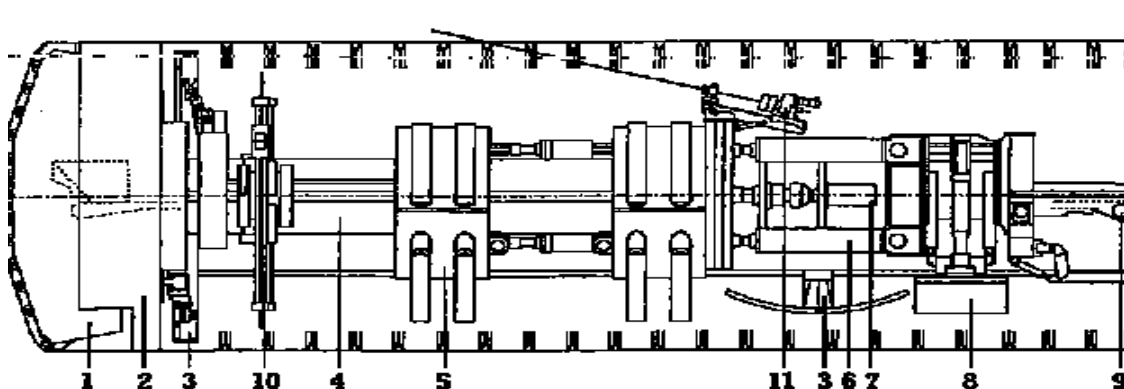
### 4.2.1 Borrhning av deponeringshål med tunnelborrningsmaskiner-TBM

#### *Allmänt*

En TBM består i huvudsak av tre komponenter (Figur 4-2):

- Borrhuvudet, försett med kuttrar vilka krossar berget, och som är sammankopplat med en drivenhet via en axel.
- Drivenheten består av motorer för drivning av borrhuvudet samt en hydraulisk cylinder vilken trycker borrhuvudet mot berget. Spännben (s.k. grippar) tar spjörn mot bergväggarna och skapar därmed en mothållande kraft för rotation och framdrift. Alternativt kan maskinen även ta spjörn mot en infodring som kontinuerligt placeras bakom maskinen.
- Till maskinen finns en s.k. bakrigg kopplad. Denna består vanligen av enheter för utlastning, driftövervakning, underhåll, transmission etc.

Borrhning av tunnlar med liten diameter har hittills främst utförts vid sämre geologiska förhållanden. En frammatning av maskinen med hjälp av en domkraft som tar spjörn bakåt mot en bakomliggande infodring av stålrör eller betongsegment är vanlig.



Figur 4-2 Borrutrustning för injektering är integrerad med främre delen av maskinen.

## **Uttransport av borrhax**

Den vanligaste tekniken för uttransport av borrhax från tunnelfronten, vid borrhning i mjuka bergarter och jord, sker med slurry. Detta leder till nödvändig extra utrustning i form av separeringsanläggning, pumpar, ledningar mm. Slurryuttransport av kax, bestående av hårt berg, är normalt olönsamt. Detta beroende på att det krävs mycket energi för att driva nödvändiga pumpar och att förlängningen av pumpledningarna är behäftad med tekniska svårigheter. Ett högt slitage på ledningar och pumpar gör denna form av utlastningskoncept kostsam i hårt berg. Slurryuttransport har även större känslighet för störningar än torr utschaktning.

Vakuumsugning av massorna i samband med tunnelborrhning anses vara alltför tekniskt komplicerat och inte ekonomiskt intressant (information från maskintillverkaren Wirth).

För hårt berg bedöms transport av kax med transportband vara den lämpligaste metoden. En sådan princip tillämpas av bland annat Borettec och fungerar väl i hårt berg.

Vatten som läcker in till deponeringshålen (MLH) rinner ut till transporttunnlarna eftersom deponeringshålen borrar svagt lutande.

## **Injektering**

Det är möjligt att placera borrh- och injekteringsutrustningen bakom maskinens grippar (Figur 4-2). Det är vidare möjligt att utforma hål för borrhstänger runt hela omkretsen av maskinen. En extra borrhsträcka på ca 10 m bedöms emellertid nödvändig på grund av att utrustningen är placerad relativt långt bakom fronten.

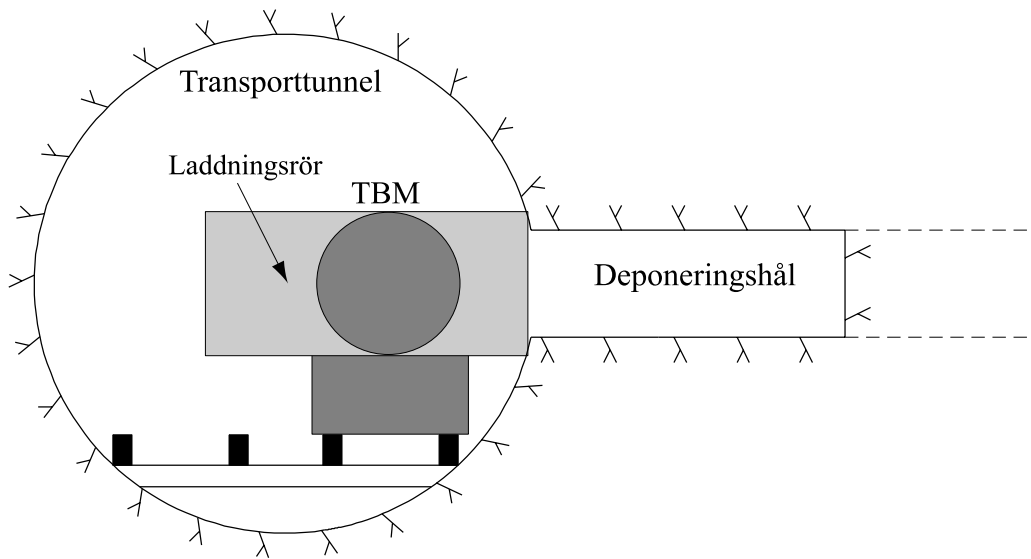
Injektering av större sprickzoner, vilket kan kräva mer avancerad utrustning än den som eventuellt kan integreras med borrhmaskinen, kan utföras med för detta ändamål särskilt framtagen utrustning som temporärt förs in i deponeringshålet. Vid injektering tas utlastningsutrustningen ut och TBM-maskinen står still (se kapitel 6 för diskussion).

## **Omtag till nästa tunnelpåslag.**

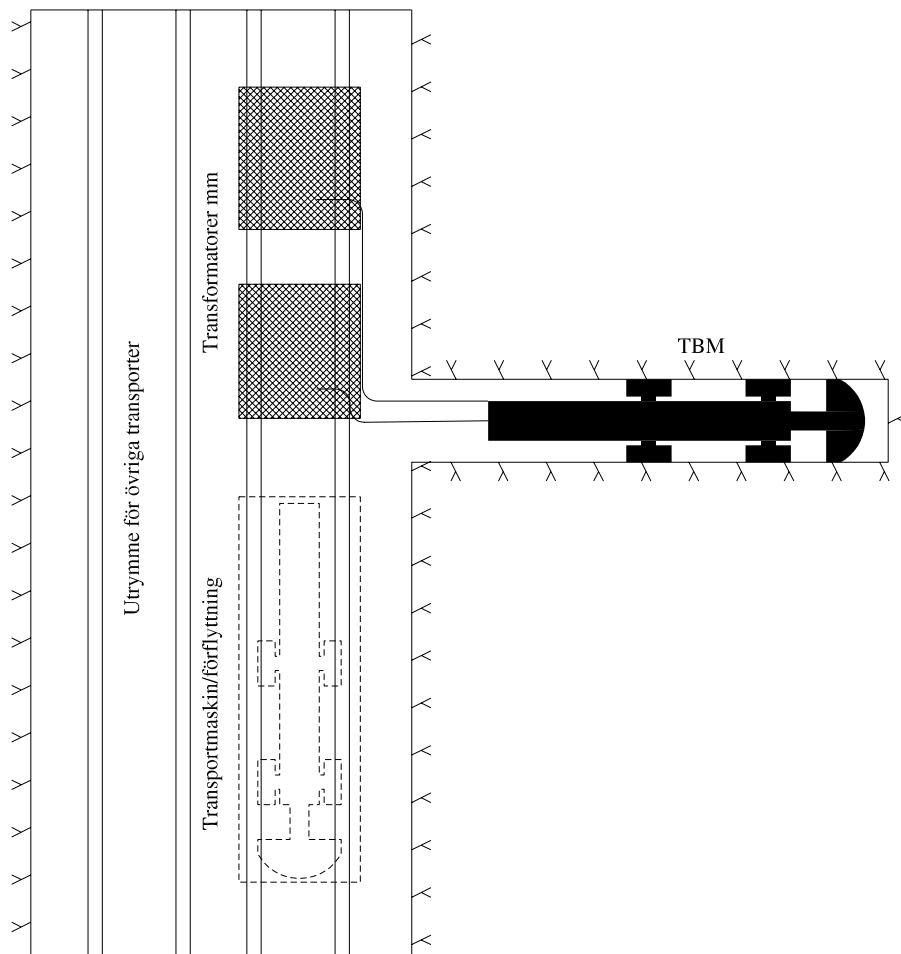
För att kunna få kraft med gripparna i början på varje tunnelpåslag kan det vara nödvändigt att spränga ut de första 6-8 m av tunneln. Alternativt kan borrhning ske från ett laddningsrör. För att lätt kunna flytta maskinen i transporttunneln till nästa påslag kan det vara lämpligt att transportera maskinen på en vagn som går på räls.

Eftersom diametern på maskinen är liten, är det nödvändigt att minimera mängden utrustning inne i deponeringshålet. Transformatorer och annan nödvändig utrustning placeras utanför deponeringshålet, i transporttunneln. Strömförsörjningen utförs med kabel från transporttunneln till tunnelborrhingsmaskinen. Även denna utrustning placeras lämpligen på stålkonstruktioner som går på räls (Figur 4-3, Figur 4-4).





Figur 4-3 Transport av maskinen mellan påslagen på räls, principfigur.



Figur 4-4 Placering av försörjningsutrustning till maskinen.

## Riktningshjälp

Vid borrarling styrs riktningen på borrhålet med hjälp av gripprarna. Med ett standardutförande med två grippror, en på varje sida, erhålls en sidoförskjutning (texturdjup) på 3 – 5 cm vid varje omtag. För att reducera denna sidoförskjutning vilket är nödvändigt är det möjligt att förse maskinen med flera grippror för att erhålla en styvare konstruktion. Genom denna utformning som framgår av Figur 4-4 bör det vara möjligt att erhålla en sidoförskjutning på 1-2 cm (samma nivå som för TBM-BORPAK) vid varje omtag.

## Profilutvidgning

Förstärkning med sprutbetong kan bli nödvändig i avsnitt med sämre berg. För att inte inkräkta på teoretisk tunnelprofil blir det nödvändigt att före sprutbetonering utvidga tunnelprofilen. En möjlighet till att utföra profilutvidgning är att vinkla de kuttrar som sitter i borrhuvudets periferi under det att maskinen dras tillbaka ut ur tunneln (se Figur 4-5). En profilutvidgning med hydrauliska handborrregagat kan utgöra ett alternativ. Eftersom berget, även lokalt inom ett svaghetsparti, kan ha en hög tryckhållfasthet (ca 200 MPa), utgör ”roadheader” i nuläget ej något rimligt alternativ. ”Mobile miner” existerar i dagsläget ej i de för MLH erforderliga dimensionerna.



Figur 4-5 Profilutvidgning med uppvinning av kuttrar (teknisk lösning av Wirth).

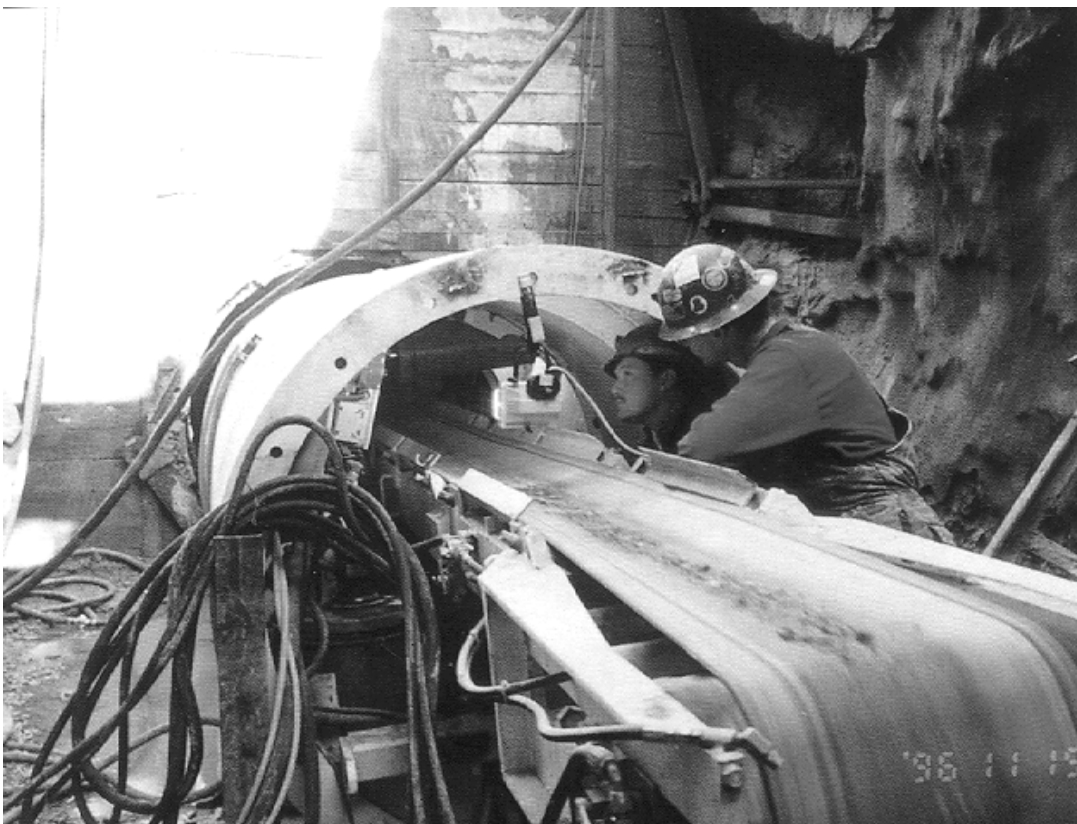
## Tillverkare av TBM

I detta avsnitt presenteras exempel på olika maskiner för borrarling av tunnlar med små diametrar. Maskinerna har främst tagits fram för borrarling i mjukt berg men en modifiering av maskinerna för borrarling i hårt berg anses vara möjlig enligt vidtalade tillverkare (se nedan). Nedan redovisad information harv erhållits vid kontakter med respektive företag.

**Borettec**, USA, har som affärsidé att utveckla TBM efter beställarens specifikationer och bygger ofta om befintliga maskiner för speciella användningsområden. För ett pilotprojekt i delstaten Tennessee /9/ utvecklade Borettec en TBM med diametern 1625 mm för borrarling av en 335 m lång avloppstunnel i hård kalksten (tryckhållfasthet 70-84 MPa). Maskinen, vilken drivs framåt av grippror, är 6,7 m lång och kan tas ut sektionvis ur blinda hål. Den manövreras av en operatör som sitter i maskinens bakre del. Byten av kuttrar kan ske i fronten; en manlucka får plats i borrhuvudet. Det krossade materialet förs från fronten genom maskinen på ett transportband. Med nuvarande utformning på strömförsörjningen kan tunnlar på upp till 750 m längd borrar utan krav på transformator i tunneln. Samma typ av maskin har enligt Borettec också använts för borrarling i hårt, kristallint berg.



Figur 4-6 Figuren visar Boretecs MTBM "MITI Mole". Diametern är 1650mm och längden 6,7 m (från /9/).



Figur 4-7 Figuren visar ett tvärsnitt av Boretecs MITI Mole. Maskinen rymmer en operatör. Kaxet förs bakåt med ett transportband (från /9/).

**Alpine Wesfalia**, Österrike, har tillverkat en maskin (MTBM 16H) med diametern 1,6 m för borrar av berg med upp till 250 MPa tryckhållfasthet. Maskinen fjärrstyrs med videoövervakning från en styrenhet vid tunnelpåslaget och drivs genom tryck mot en bakomliggande infodring. Maskinen är utformad så att den kan dras ut ur en tunnel utan behov av nedmontering. Detta kan ske även om en tunnväggig infodring är installerad bakom maskinen.

**Herrenknecht**, Tyskland, tillverkar TBM-maskiner för drivning i medelhårt till hårt berg och har under de senaste åren tillverkat maskiner med små diametrar (1-2 m). Bland annat finns en maskin framtagen med diametern 1,6 m för borrar i hårt berg (AVN 1600D). Maskinen är sluten och trycks framåt via hydraulstänger vilka tar spjörn mot en infodring. För att få ut maskinen krävs att infodringen demonteras. Denna typ av maskin kan, enligt tillverkaren, modifieras för framdrift med traditionella gripptar. Borrkaxet pumpas ut till påslaget med en av Herrenknecht framtagen teknik (Mixshield System).

**Wirth**, Tyskland har tillverkat flera TBM för drivning av avloppstunnlar i Alperna under 1960-70-talet. Maskinerna har en diameter av drygt 2 m. Wirth har också konstruerat en maskin för drivning i hårt berg med diameter 1,5-1,8 m utan att kunna finna någon köpare.

**Atlas Copco-Robbins** (numera uppköpta av Boretec) har tillverkat en maskin med diameter 1,5 m för borrar av avloppstunnlar i medelhårt berg. Maskinen är utrustad med stiftrullkronor och drivs framåt med hjälp av hydrauliska domkrafter. Domkrafterna tar spjörn mot infodringen i tunneln. Maskinen kan borra upp till ca 450 m långa tunnlar. Borrkaxet fördelas i en kross som finns monterad bakom borrhuvudet. Därefter pumpas kax och vatten ut till tunnelpåslaget för separering av vatten och kax. Maskinen har en längd av 6-8 m.

**Atlas Copco-Robbins** (numera uppköpta av Boretec) har även modifierat en TBM kallad BORPAK (Figur 4-8) för borrar i hårt berg. Denna består av en bärande del med drivenhet för förflyttning och borrar. Drivenheten är fast monterad på ett bandgående fordon på vilket ett fast monterat rör ("laugh-pipe") reses från viloläget mot berget där borrar ska utföras. I röret finns själva bormaskinen.

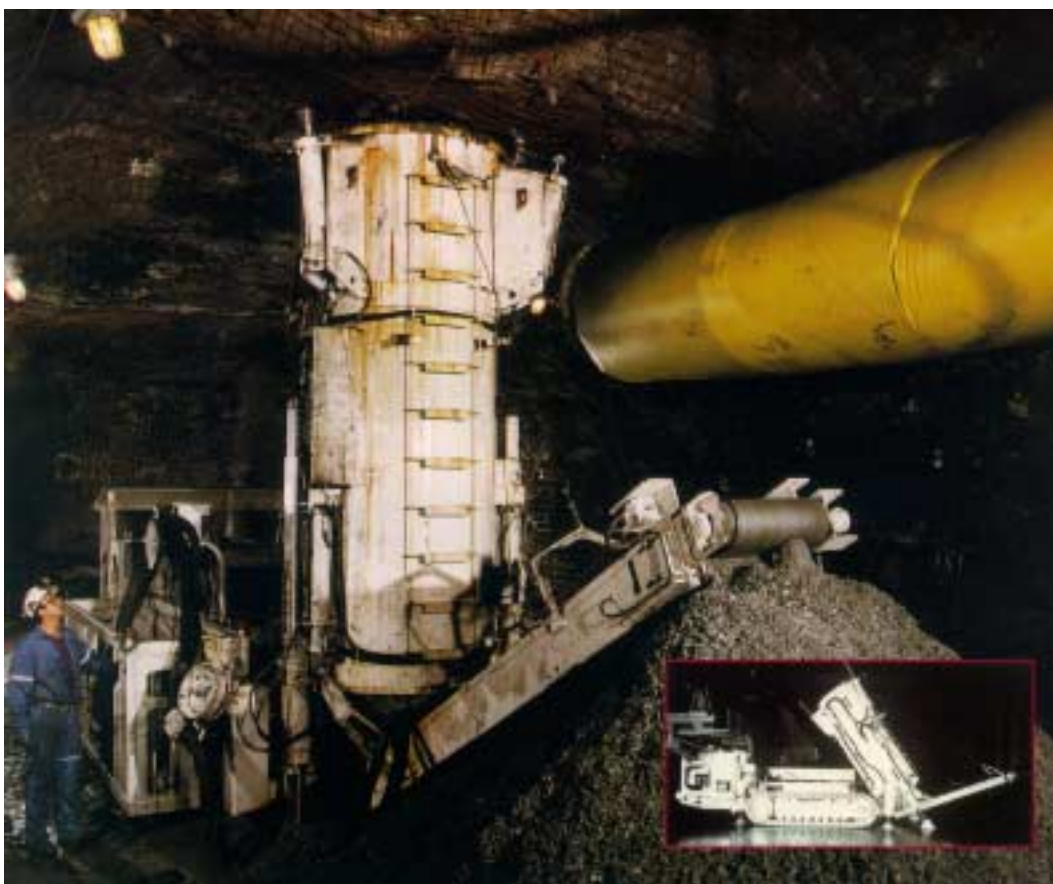
Maskinen tar spjörn mot väggarna med hjälp av sex individuella gummipackers vilka är skonsammare mot bergväggarna än konventionella gripptar. Tryckmanschetten styrs med hydraulolja och kraftöverföringen från hydraulpumparna sker via slangar. Metoden är framtagen för öppning av malmkroppar men lämpar sig även för anläggningsarbeten.

BORPAK har hittills tillverkats för borrar i diametrar av 1-2 m. Den minsta vinkel man hittills har borrar från horisontalplanet är ca 30° uppåt. Enligt Atlas Copco (USA) torde det vara möjligt att även utföra horisontell borrar med en för ändamålet utvecklad BORPAK maskin.

Borrkaxet från borrarningen faller ner genom ett hål i mitten av borrhuvudet. Uttaget av bergmassor är dock ej löst för horisontell borrar. Det är eventuellt möjligt att suga ut massorna med vakuumteknik.

Maskinen måste backas hela vägen ut till transporttunneln vid byten av diskcuttrar. Möjligheten att ersätta dessa med stiftcuttrar är ännu inte studerats. De senare har längre hållbarhet och kutterbytet skulle troligen kunna ske mellan påslagen.

Det bedöms i dagsläget inte möjligt att borra längre tunnlar än ca 200 m med BORPAK.



Figur 4-8 Atlas Copco-Robbins modifierade TBM "BORPAK".

#### 4.2.2 Maskiner för stigortsbörning, RBM

Stigortsbörning innebär att man från ett pilothål rymmer hålet till slutlig diameter i ett eller flera steg. Tekniken har utvecklats för att driva vertikala schakt från en nivå till en annan, men har senare även utvecklats för att driva horisontella hål från ett utrymme till ett annat. Maskinen för drivning placeras i ett utrymme i berget och genom borrarsträngen överförs kraften till borrhuvudet som antingen borrar pilothål (normalt nedåt) eller rymmer hålet (normalt uppåt) till färdig diameter.

Under senare år har också rymning provats från samma håll som pilothålet genom s.k. "blindbörning". Flera lyckade försök med blindbörning finns dokumenterade. Vid Kvänums pumpfabrik utanför Oslo drevs ett ca 50 m djupt schakt med diameter 1,5 m. Kaxuppföringen utfördes med jetpumpning genom borrarsträngen. Vid finska kärnkraftverket Olkiluoto borrades tre borrhål, ca 7,5 m djupa, med diameter 1524 mm. Kaxuppföringen utfördes med luft sugning genom borrarsträngen.

Under ”blindborrning” med RBM är det viktigt att borrarsträngen stöds upp mot bergväggen med så kallade stabilisatorer (”devisers”) vilka placeras kontinuerligt längs borrarsträngen. Stabilisatorerna följer och roterar med borrarsträngen in i hålet. Lagrade stabilisatorer som inte roterar kan också användas.

Då blindborrning utförs horisontellt blir centrering och stabilisering av borrarsträngen viktig. Systemet måste bygga på att borrarsträngen förblir parallell med borriktningen. För att uppnå detta bör stabilisatorerna vara fixerad mot berget och lagrade mot borrarsträngen så att denna kan rotera fritt.

Hantering av borkkax kan ske på två olika sätt:

- Kaxet kan spolat ut över styrmekanismens anslutning mot berget. Detta kan lösas genom att stabilisatorerna utformas som ett hjul med ekrar. Anslutningen mot berget görs med en platta, där spolvatten med kax kan rinna fritt över konstruktionen.
- Kaxhanteringen sker med slurrypumpning genom borrarsträngen. Slurrypumpning kräver dock hantering av stora vattenmängder och separering av kax och slam för återanvändning av vattnet. Eventuellt kan borkkaxet hanteras med vakuumsug vilket med dagens teknik emellertid kräver relativt torrt borkkax.

### 4.3 Borrprestanda

Nedanstående sammanställning av borrdatab och borrprestanda för respektive maskin är approximativa. Sammanställningen är en sambedomning av uppgifter från tillverkare, entreprenörer och författarnas uppskattningar.

**Tabell 4-1 Borrprestanda för olika maskintyper**

Rubrik	Enhet	TBM	TBM-BORPAK	RBM
Längd av maskin	m			
Standard		6-10	5-6	2-3
special		5-7		
Min/max längd på tunnel	m	0/>1000	0/200	0/800
Indrift	m/tim.	3	1-2	1
Effektiv borring	m/vecka	100	150	150
Styrning		Genom maskinen	Genom maskinen	Genom förborring av pilothål
Precision, xyz	%	0,1	0,1	0,1
Texturdjup	cm	3-5 <sup>1)</sup>	1-2	1-2
Krafftörsörjning		hydraulik/el i dept.	hydraulik i dept.	hydraulik/el i huvudet

<sup>1)</sup> Med ett väl konstruerat styrsystem bör det vara möjligt att uppnå samma texturdjup med TBM som för BORPAK och RBM, 1-2 cm.

### 4.4 Jämförelse av bormetoder

För borring av 100-500 m långa tunnlar med diametern 1,5-2 m finns det i dagsläget flera fungerande maskiner och ett stort antal tillverkare. Gemensamt för samtliga

tillverkare är att maskinerna anpassas efter kundens önskemål; d.v.s. marknaden styr maskinutvecklingen. Eftersom ingående komponenter för att kunna driva tunnelbörningsmaskinen på ett optimalt sätt i hårt berg är väl utprovad, krävs endast begränsade utvecklingsinsats för att framställa lämplig maskin.

Baserat på den statusbeskrivning som presenteras i föregående avsnitt kan det sammanfattningsvis noteras att det i dagsläget existerar ett flertal maskinkoncept som kan borra tunnlar av MLH-typ.

Vid utformningen, konstruktionen, av borrarutrustning är det viktigt att beakta följande:

- Två eller fler uppsättningar av gripprar bedöms nödvändigt för tillräcklig kraft och precision.
- Borrmaskinen bör vara kort (segmenterad) och ej kräva nischer i transporttunnlarna.
- Den för flyttningar erforderliga tiden mellan påslagen skall minimeras.
- Acceptabel indrift.
- Borrningen skall ha god precision.
- Borrningen skall vara skonsam mot berget.
- Borrmaskinens samtliga funktioner skall kunna opereras från transporttunneln.
- Förinjektering skall kunna utföras från eller i omedelbar anslutning till borrmaskinen.
- Borrmaskinen skall om möjligt kunna borra upp till 500 m utan byten av borrarutrustning.
- Borrmaskinen skall kunna rymma tunneln selektivt vid utdragning (avser partier med svagare berg som kräver förstärkning).
- Borrmaskinen skall kunna borra med kraftmatning från transporttunneln.
- Maskinen skall ha en effektiv utlastning av kax.

Av de maskiner som studerats uppfyller Boretecs "Miti Mole" flera av ovanstående krav, se Figur 4-7. Miti Mole-konceptet måste dock utvecklas för högre prestanda vad avser bergets hårdhet och tekniken för förflyttning mellan tunnlar och påslag måste förenklas. Tillverkaren Boretec har också tillverkat en liknande maskin som borrar en tunnel med en diameter på ca 2 m i hårt berg i Montreal, Kanada.

Boretecs "Miti Mole" har efter ombyggnad använts för borrning av vertikala deponeringshål i Äspölaboratoriet (diameter 1,75 m och borrhålsdjup 8 – 9 m). Ombyggnaden innebar bland annat att grippersystemet ersattes med domkrafter som trycker på foderrör som successivt monteras efter borrhuvudet under borrningen. För borttransport av borkax används vakuumsugning. Borrningen av deponeringshålen har fungerat bra med avseende på raket, borrarjunkning och jämnheten hos borrhålsväggen.

I dagsläget bedöms ej horisontell stigortsborrning, RBM, som intressant för borrning av blinda deponeringshål. De mest betydelsefulla svårigheterna med metoden är kopplade till hanteringen av borkax, förinjektering och tekniken för stabilisering av borrarsträngen.

Genom pågående FoU arbeten för borrning av bergtunnlar med små diametrar kommer det sannolikt att utvecklas både starkare och mer kostnadseffektiva system, vilkas utveckling gynnar MLH.

**Tabell 4-2 Jämförelse av borrhningsmetoder.**

<b>Borrhningsmetod</b>	<b>Fördel</b>	<b>Nackdel</b>
<b>TBM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En TBM kan styras med stor precision under borrhning.</li> <li>- TBM tekniken är väl beprövad och drivning i hårt berg har utvecklats under ca 20 år.</li> <li>- Hanteringen av kax är för samtliga metoder väl beprövad.</li> <li>- Mycket långa tunnlar kan borras.</li> <li>- Små TBM maskiner finns i drift med rationell kaxhantering och styrning.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etableringstiden för varje borrhål är normalt lång. I detta ingår tider för etablering, avetablering samt flytt mellan borrhål. En utvecklad TBM torde emellertid ha kortare uppställnings- och flyttider.</li> <li>- Maskintypen har låg tillgänglighet för borrhning. Ca 30-40 % av tiden används för service och reparationer.</li> <li>- TBM med små diametrar har hittills endast i liten omfattning använts i hårt berg.</li> </ul>
<b>TBM-BORPAK</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maskinen är lätttrörlig och flexibel.</li> <li>- Maskinen har en kort etableringstid (några timmar).</li> <li>- Maskinen kräver relativt litet utrymme för mobilisering och borrhning.</li> <li>- Väggarna blir jämnare än motsvarande för TBM vid omtag.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maskinen är inte utvecklad för borrhning av horisontella hål. Det fortsatta utvecklingsarbetet måste huvudsakligen bestå av metodik för att lyfta borrhkax och vatten över gummimanschetten samt förfining av styrmekanismen.</li> <li>- I dagsläget bedöms den maximala borrhlängden vara ca 200 m.</li> </ul>
<b>RBM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etablerad och väl beprövad teknik som använts under ca 30 år.</li> <li>- Maskinen har en kort etableringstid.</li> <li>- Maskinen borrar normalt med mer än 90% tillgänglighet.</li> <li>- Teknik finns utvecklad för styrning av pilotkrona och rymning.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tekniken för horisontell blindborrhning är endast prövad i mindre omfattning.</li> <li>- Ny design av stabilisatorer erfordras.</li> <li>- Tekniken för kaxhanteringen är dåligt utvecklad och besvärlig (avser blindborrhning).</li> </ul>



## 5 Arbetarskydd

Vid projektering och planering av berganläggningar kräver Arbetsmiljölagen att ”projektering skall utföras så att den möjliggör en god arbetsmiljö vid de arbeten som kan förutses komma att bedrivas i eller i anslutning till byggnadsverket” /5/. För berganläggningar innebär detta bland annat att tvärsnitt skall väljas så att stabila tunnlar och bergrum erhålls under rådande prognostiserade geologiska förhållanden. Vidare föreskriver Arbetsmiljölagen att det alltid ska finnas två evakueringsvägar från berganläggningen. I tunnlar kan detta lösas genom att man vid tunneldrivningen medtar en skyddskammare i vilken det skall finnas tillgång till räddningsdräkt, tillräcklig mängd andningsluft, mat och vatten. Den bedömda tidsåtgången för räddningsoperationer blir dimensionerande för utrustningen.

I gruvor och berganläggningar kan ovanstående kriterier inte alltid uppfyllas utan plats-specifika regler behöver utarbetas i samarbete med Arbetarskyddsstyrelsen och den lokala räddningstjänsten.

Byggandet av ett djupförvar kan till karaktären jämföras med gruvdrift. För förvarslayout enligt MLH-konceptet tillkommer problematiken kring de långa borrade deponeringshålerna med liten dimension. För att uppfylla ovan beskrivna krav för byggande och arbeten i deponeringshålerna föreslås den strategi som beskrivs nedan.

Bergets egenskaper verifieras genom ett långsgående undersökningshål (kärnborrhål), inom vilket diverse undersökningar bedrivs. Undersökningarna kan bestå av kartering, vattenförlustmätning, videofilmning, pumptestning, geofysiska mätmetoder etc. Vid bergförhållanden som inte uppfyller ställda krav avseende långsiktig funktion och säkerhet och stabilitet borrar inte deponeringshålet.

Med rekommenderad borrhningsteknik är avsikten att borrhningen i möjligaste mån skall utföras utan personal inne i deponeringshålen.

Service och byte av borrhkronor i deponeringshålet föregås av inspektion av berget och eventuella förstärkningsinsatser. Arbetena utförs hela tiden från säkrat tak.

Vid arbeten längst in i deponeringshålen skall personlig räddningsutrustning finnas tillgänglig (syrgasmask etc.).

Efter borrhning och före övriga arbeten i deponeringshålet besiktigas berget och erforderliga förstärkningsarbeten utförs.

Deponering av kapslar görs med fjärrstyrd utrustning utan personal i deponeringshålen. För att åtgärda eventuella maskinproblem etc. under deponeringen kommer speciella metoder att utarbetas där hänsyn tas till den radiologiska miljön.

Arbeten i deponeringshålen erfordrar installation av ventilation, kraft och belysning, vilka avlägsnas före deponeringen av kapslarna.

Vid bedömning av erforderliga åtgärder för att reducera riskerna är det författarnas uppfattning att hänsyn ej behöver tas till så kallade dubbelhändelser då sannolikheten för möjliga olyckor är mycket liten. Exempel på dubbelhändelser är ras i deponerings-

hållet samtidigt som brand inträffar i t.ex. borrhustrustningen under service eller byte av kuttrar.

Vid det fortsatta utvecklingsarbetet är det nödvändigt att föra en kontinuerlig dialog med Arbetarskyddsstyrelsen och Räddningsverket. Vidare krävs samarbete med den lokala räddningstjänsten för att fastställa lämpliga konstruktionsprinciper och arbetsmetoder när projekteringen blir platsspecifik.

Vid en första anblick kan den smala tunneln i sig utgöra en risk. Författarnas bedömning är dock att ett runt deponeringshål med liten diameter i sig är stabilare än den traditionella hästskoformade tunneln. En nackdel är dock att med det lilla tvärsnittet blir det under vissa operationer mycket svårt att ta med en skyddskammare inne i tunneln. Det torde dock vara möjligt att konstruera en skyddskammare anpassad till det givna tvärsnittet om en sådan bedöms erforderlig.

## 6 Bergförstärkning

### 6.1 Allmänt

I detta kapitel diskuteras olika typer av förstärkningsarbeten som kommer att erfordras i de långa deponeringshålen med diametern 1,75 m.

Den viktigaste åtgärden för att skapa stabila tunnlar är att välja en plats för djupförvaret med lämpliga geologiska förhållanden samt att orientera deponeringshålen rätt.

Ett ovillkorligt krav för deponeringshålen är att inga förstärkningselement får inkräkta på det teoretiska tvärsnittet. En annan typisk förutsättning för deponeringshålen är att utfallet av berg, naturligt eller genom tekniska åtgärder, skall minimeras. För att erhålla önskad densitet hos bentoniten i återfyllnaden kring kapseln samt för att undvika ojämna svällningstryck med risk för excentrisk position av kapseln kommer endast marginella avvikelser från det teoretiska tvärsnittet att accepteras på de sträckor där kapslar deponeras.

Förstärkning av berget runt deponeringshålen syftar till att säkerställa form och stabilitet under bygg- och deponeringsskedet. Vid traditionellt bergbyggande åstadkoms stabila tunnlar genom val av gynnsam form på tunneln och med lämpliga förstärkningsåtgärder. Dessa åtgärder kan bestå av förankring med ingjutna bultar, sprutbetong och injektering.

Val av materialkvaliteter för förstärkningselementen styrs av miljöförhållanden på aktuell plats, till exempel saliniteten hos grundvattnet, den tid tunnlar förväntas stå öppna samt eventuella materialkrav med hänsyn till lagrets långsiktiga funktion och säkerhet.

Det cirkulära tunneltvärsnittet utgör en gynnsam förutsättning för att erhålla stabila deponeringshål /7/. Ett fenomen som bör beaktas är risken för så kallat smällberg på grund av höga bergspänningar. Genom smällberg finns det risk för spjälkning av bergskivor i väggarna. Risken för smällberg kommer att vara plats- och djupberoende och behöver utvärderas för aktuella förvarsområden. Det måste noteras att risken för smällberg är högre för deponeringshål enligt KBS-3 än för MLH. /7/.

En jämförelse mellan KBS-3, med både vertikal och horisontell deponering, och MLH visar att MLH-metoden är minst känslig för olika riktningar på deponeringshålen med avseende på bergmekanisk påverkan /7/.

Bergförstärkningsarbeten kommer att behöva utföras i deponeringshålen oavsett vilka geologiska förutsättningar som råder och vilken riktning på tunnlar som valts. I detta kapitel redovisas en möjlig strategi för hur bergförstärkningsarbeten skall utföras samt förslag på hur dessa arbeten tekniskt skall utföras i deponeringshål med diametern ca 1,75 m.

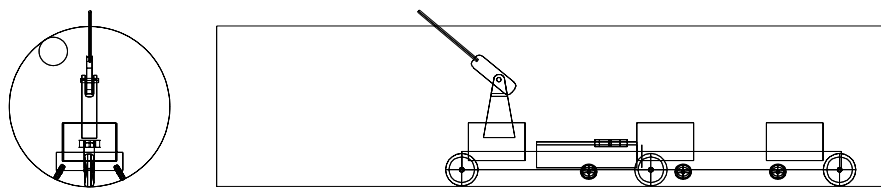
Följande strategi avseende bergförstärkningsåtgärder förutses:

- Förinjektering kan i viss omfattning ske från de sonderingshål som borrar längs tunneln innan borrhålen påbörjas. Borrhålen kommer att placeras inom deponeringshålens sektion.
- Förinjektering under borrhålen utförs i erforderlig omfattning.
- Inga förstärkningsarbeten förutsätts ske under borrhålen av tunnarna utöver vad som erfordras för att säkert bedriva olika arbeten.
- Vid ras eller inbrott av större mängder vatten under tunnelborrningen utförs förstärknings- och tätningensarbeten i erforderlig omfattning.
- Efter det att maskinen har tagits ut från den borrhålen görs erforderliga förstärknings- och efterinjekteringsarbeten.
- Försegling, eller avskärmning av sprickzoner med stark vattenföring eller andra ovälkomna egenskaper sker med betongpluggar.

Undersökningshålen borrar innanför deponeringshålens sektion. Om dessa placeras parallellt med deponeringshålen utanför tunnelsektionen föreligger viss risk att dessa hål utgör hydrauliska konduktorer och presumtiva transportvägar för radionuklider om den efterföljande förseglingen ej blir helt tät.

För utförandet av förstärkningsarbeten i deponeringshålen är det lämpligt att konstruera ett specialanpassat fordon för det cirkulära tvärsnittet. På fordonet monteras utrustning för borrhålen, bulstättning och injektering. En principutformning av fordonet framgår av Figur 6-1. Det kan vara nödvändigt med urfräsning av berget för att skapa utrymmen för olika typer av förstärkningsselement därvid finns två alternativ:

1. Fräsning med en för uppgiften speciellt framtagen maskin.
2. Rymning med TBM (se kapitel 6).
3. Borrning/sprängning



Figur 6-1 Principiell utformning av fordon för bergförstärkningsarbeten i trånga tunnlar.

## 6.2 Injektering

Injekteringen av berget kring deponeringshålen syftar primärt till att reducera inläckaget av vatten till en nivå som medför att inplaceringen av bentonit och deponeringen av kapslarna inte påverkas negativt.

Vid traditionell tunneldrivning skapas täta tunnlar genom förinjektering framför tunnelfronten. Kompletterande tätning av berget kring tunneln utförs om detta erfordras genom efterinjektering. Samma teknik bör användas för tätning av deponeringshål. Önskemålet om förinjektering kommer dock att ställa stora krav på utveckling av utrustning för borrhning och injektering i små utrymmen.

Förinjekteringen kan utföras kontinuerligt eller intermittent baserat på resultatet från undersökningsborrhålet som borrhats längs deponeringshålens sträckning.

Borr- och injekteringsutrustningen placeras bakom borrhuvudet. Borrhning utförs med en hydraulisk hammarbormaskin snett framåt med en vinkel på ca 5-6°. Borrhåslängden är normalt ca 15-20 m framför tunnelfronten. För injekteringsarbetet erfordras utrustning för blandning av injekteringsmedel och inpumpning i berget.

För att uppnå erforderligt tryck vid injekteringen bör pumparna befinna sig nära den plats där injekteringen utförs. Oavsett vilken drivningsmetod som valts måste det vid injekteringsplatsen finnas utrustning för borrhning, vattenförlustmätning samt injektering.

Injektering kan eventuellt utföras i de undersökningsborrhål som kommer att borrar längs med deponeringshålen. Erfarenhet visar dock att denna typ av injektering är svår att utföra på grund av stort tryckfall. Dåligt resultat erhöles vid en liknande typ av injektering i samband med borrhningen av ett vertikalt schakt i Äspölaboratoriet. Metoden kan emellertid övervägas för lokal tätning av starkt vattenförande zoner.

### **6.2.1 TBM och BORPAK**

Tättningsarbeten bör företrädesvis utföras med förinjektering vilket kräver personal framme vid maskinen. Bormaskinen måste därför stå still vid injekteringsarbetet. Borrhnings- och injekteringsutrustningen placeras ca 10 m bakom fronten. Alternativt kan borrhningen av deponeringshålen avbrytas temporärt och vissa delar av maskinen monteras ned, exempelvis transportband och kringutrustning för hantering av kax. Därvid kan erforderligt utrymme för injekteringsutrustning erhållas direkt bakom bormaskinen.

För injektering under borrhning är det nödvändigt att utveckla utrustning som ryms i det trånga tunneltvärsnittet.

### **6.2.2 RBM**

Injektering kan inte ske samtidigt som borrhning. Den roterande axeln och stabilisatorerna förhindrar injekteringsarbetet. Vid injektering måste borrhsträngen och stabilisatorer tas ut ur borrhålet för att ge plats åt erforderlig borr- och injekteringsutrustning. Injektering och förstärkning måste utföras från en för ändamålet speciellt utvecklad utrustning.

En möjlighet som föreligger är att utföra injektering före rymning till slutlig dimension via pilotborrhålet.

## 6.3 Förstärkning

Förstärkning sker huvudsakligen i form av bultning. Bultarna syftar till att låsa block som kan komma att falla ut i tunnelrummet. I svaghetszoner kan det bli nödvändigt att komplettera bultningen med sprutbetong eller nätning. Användningen av dessa förstärkningselement måste föregås av en rymning av tunnarna för att förstärkningen inte skall inkräkta på den teoretiska tunnelsektionen. Erfarenheter från tunneldrivning i hårt berg visar dock att sprutbetong och nätning endast undantagsvis blir aktuellt.

Tunneldiametern hos föreslagna maskintyper kan normalt inte ändras under borrhning. En möjlighet för att öka tunneldiametern är att montera speciella kuttrar i periferin på maskinen (se avsnitt 4.2.1). Metoden är lika för de tre utredda maskintyperna.

Erforderliga bultar är normalt inte längre än tunneldiametern. Behovet av längre bultar är i det närmaste försumbart. Skulle längre bultar behövas skarvas kortare bultar till erforderlig längd.

## 7 Hypotetisk försvarsutformningar för MLH

I föreliggande kapitel redovisas en hypotetisk försvarsutformning för MLH. Denna baseras på ett KBS-3 liknande försvarskoncept.

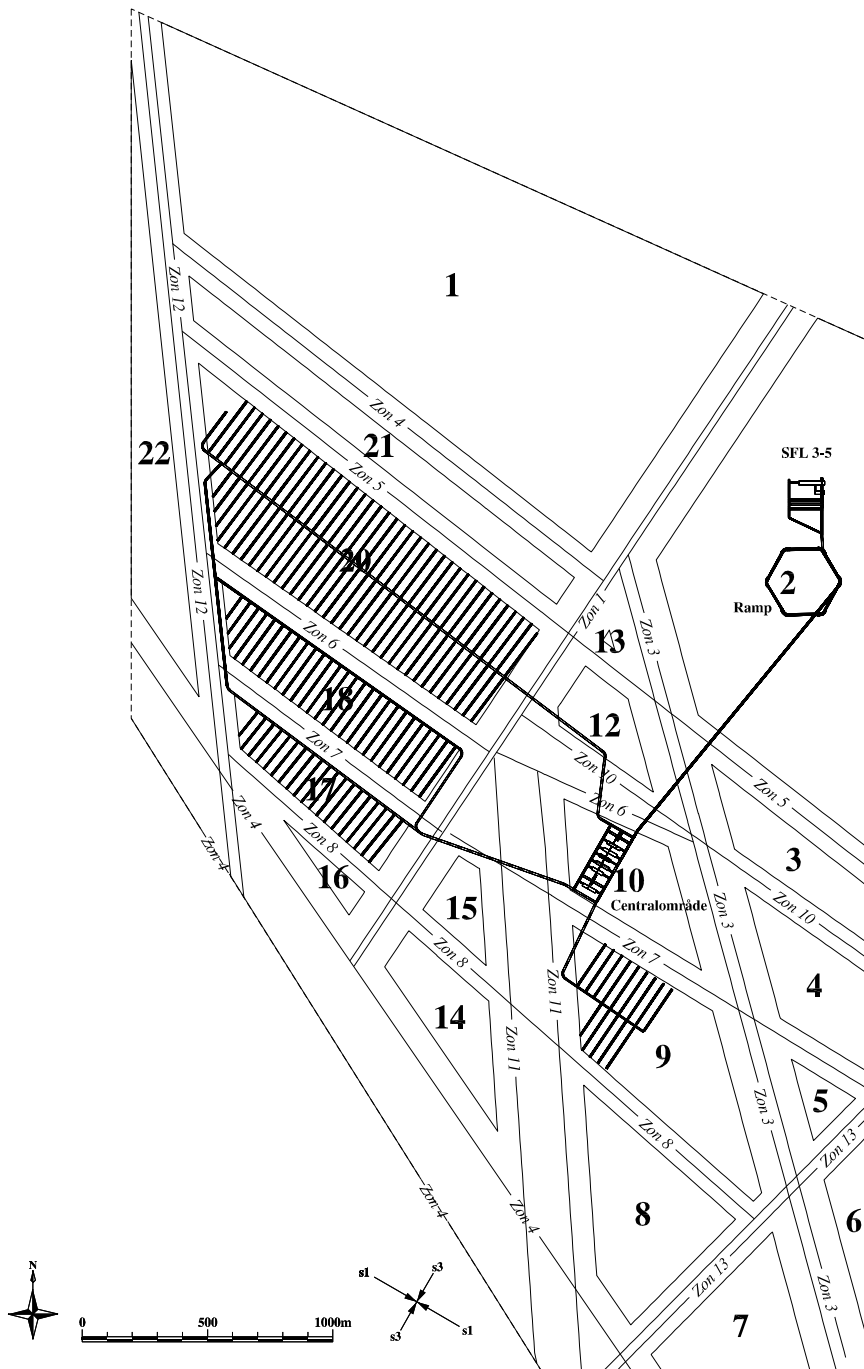
De bergvolymen som valts för förvarets olika komponenter är beroende av lokal geologi, sprickzoners orientering, storlek och vattenföring, samt grundvattenflödet i bergmassan. I föreliggande utredning har en försvarsutformning baserad på den strukturmodell som framtagits för Beberg /8/ använts. Denna försvarsutformning utgör en av förutsättningarna för de kostnadsberäkningar som redovisas i avsnitt 9.5.

I Beberg ryms samtliga deponeringstunnlar i ett plan. Ett alternativ med tunnlar vinkelrätt  $\sigma_1$  på djupet  $z = -600$  m har förslagits för ett hypotetiskt förvar. Djupet valdes främst för att undvika en flack zon, Zon 2, vars undre gräns i delar är behäftad med tolkningsosäkerheter /8/.

**Tabell 7-1 Sammanfattande statistik för deponeringstunnlar orienterade vinkelrätt  $\sigma_1$ . Deponeringsdjupet är -600 m.**

Deponerings- område	Deponering 1	Deponering 2	Deponering 2	Deponering 2	Samtliga
Block ID	9	17	18	20	
Nivå	-600	-600	-600	-600	
Antal tunnlar	14	19	27	74	134
Max längd	200	212	246	258	258
Min längd	140	119	107	123	107
Summalängd	2720	3432	6033	17457	29642
Antal kapslar	407	512	919	2676	4514

Förvaret delades upp i två försvarsområden, deponeringsområde 1 resp. deponeringsområde 2. Kapselpositionerna fördelades så att ca 10% placerades i deponeringsområde 1 och de resterande ca 4100 kapslarna i deponeringsområde 2 (tabell 7-1).



Figur 7-1 Hypotetisk utformning av KBS-3 liknande förvar. Blocken, numrerade 1-22, avgränsas av sprickzoner med olika riktning, storlek och hydrauliska egenskaper, vilka klassificerats som strukturer av funktionsklass D1-D2 /8/. Deponering 1 är lokaliserad till block 9 och deponering 2 till block 17, 18 och 20. Centralområdet är lokaliserat till block 10.



## 8 Deponeringsmetoder

### 8.1 Allmänt

Deponeringsmetoder för MLH har studerats av VBB Anläggning, ÅF-Industriteknik och SH Konsult (Jozsef Pirooska). VBB:s förslag till maskinutrustning och deponeringsmetodik som utarbetades inom ramen för arbetet med PASS finns redovisad i /1/. ÅF-Industriteknik har inom ramen för projekt JADE studerat flera olika deponeringsmetoder och maskinutrustningar vilka redovisas i /6/. Baserat på ett förslag av ÅF industriteknik utvecklade Jozsef Pirooska ett eget förslag vilket presenteras i /2/.

En analys av deponeringsmetoderna erfordras dels för att bedöma genomförbarheten av MLH-metoden, dels för att bedöma tunneldimensioner och andra fysiska krav på transporttunnlar och deponeringshål. I föreliggande kapitel ges en kort beskrivning av några av de studerade metoderna.

Inplacering av bentonitbufferten bygger på användandet av cylindriska bentonitblock vilket medför att kapseln hamnar excentriskt. Beräkningar utförda av Clay Technology visar att kapseln genom svällning av bentoniten slutligen kommer att inta en centrisk position i deponeringshålet. Konceptet med efterfyllning med bentonitpellets som diskuteras för KBS-3 (vertikal deponering) kan härigenom inte användas för deponering enligt MLH-metoden utan vidare. Om ytterligare bentonit erfordras för att säkerställa den långsiktiga funktionen och säkerheten måste olika metoder och deras konsekvenser nog analyseras.

En översiktlig teknisk genomgång visar att flera studerade metoder är behäftade med tekniska svagheter som måste utvärderas vidare. Förslag som tagits fram inom ramen för projekt JADE visar att många olika tekniska lösningar kan övervägas. För den fortsatta maskinutvecklingen bör följande kravspecifikation uppfyllas:

- Robusta system med få och enkla rörelser.
- Hela deponeringsprocessen måste vara fjärrstyrd och verifierbar under alla deponeringsskeden.
- Deponering av ett helt paket, kapsel och bentonit, är att föredra.
- En jämn fördelning av bentonit måste finnas runt kapseln för att inte erhålla ojämna svälltryck och excentrisk kapselposition.
- Maskinutrustningen skall vara skonsam mot bentonit, kapsel och berg.
- Skydd av bentoniten mot droppande vatten bör finnas.
- Någon typ av glidyta, endera utlagd eller som del av deponeringsmetoden är önskvärd för att överbrygga ojämnheter i botten av deponeringshålen vid inskjutning av paketet (bentonit och kapsel).
- All hantering av kapseln i transporttunneln skall utföras med ett omslutande strålskydd.

Transporttunnlarnas bredd har bedöms till ca 8 m för att dessa skall kunna rymma borrhål och deponeringsutrustningen. Tunnlarnas dimension är beroende av vilken metod som väljs och tjockleken på strålskyddet runt kapseln.

Det trånga tvärsnittet på deponeringshålen försvårar deponeringen. Det finns dock möjligheter att öka dimensionen. Utöver ökad kostnad måste dock flera faktorer analyseras i detalj. Exempelvis ställer en ökad håldiameter nya krav på omgivande, kompakterad bentonit. Vidare ger ett tjockare bentonitlager ett större värmemotstånd vilket måste kompenseras genom en ny utformning av bentonitbufferten, inblandning av värmeledande mineral eller genom att fylla kapslarna med mindre använt kärnbränsle.

Baserat på det utförda utvecklingsarbetet och kännedom om föreslagna metoder torde det vara möjligt att utveckla en deponeringsutrustning som motsvarar de höga krav som ställs avseende resultatet av inplaceringen av bentonit och kapsel samt arbetarskydd under deponering. Denna uppfattning har bland annat framförts av en referensgrupp, det så kallade Maskinrådet /2/, som SKB anlitat för att ge råd avseende utvecklingen av deponeringsutrustningar.

## 8.2 Påverkan på bentonitbufferten av vatten vid deponeringen

Vid borrningen av deponeringshålen kommer större zoner att tätas mot inläckande vatten. Deponeringshålen kommer dock inte att bli helt täta utan vatten kommer att läcka in och rinna längs hålens botten ut mot transporttunneln. Mängden inläckande vatten kommer att bli beroende av resultatet av de utförda injekteringsinsatserna samt rådande geologiska förhållanden. En beräkning av mängden inläckande vatten redovisas i tabell 8-1. Beräkningen som har utförts för olika permeabiliteter hos bergmassan, är baserad på ett deponeringsdjup av 500 m och ett avstånd mellan deponeringshålen på 40 m. Med yttre deponeringshål avses hål i kanten på ett deponeringsområde och *inre* deponeringshål avses hål som omgärdas av andra deponeringshål.

**Tabell 8-1 Beräkning av inläckande vatten till deponeringshålen (Flowpath 2D)**

Bergmassans permeabilitet på 500 m djup	Inläckage av vatten, liter per minut och 100 m tunnel	Kommentar
$k = 10^{-9}$ m/s	3,0	Yttre deponeringshål
$k = 10^{-9}$ m/s	1,0	Inre deponeringshål
$k = 10^{-10}$ m/s	0,3	Yttre deponeringshål
$k = 10^{-10}$ m/s	0,1	Inre deponeringshål

Det beräknade flödet avser ett genomsnittligt inläckage. Med hänsyn till tunnarnas geometri erhålls för långa deponeringshål avsevärda flöden vid anslutningen till transporttunneln.

Vid deponering kommer bentonitbufferten att placeras på botten av deponeringshålen. Vid kontakt med vatten kommer bentoniten att sorbera vatten och börja svälla. Vid ett visst flöde, som i dagsläget inte är känt, kommer bentoniten att börja degradera och

följa med vattenflödet ut ur deponeringshålen. Risken för degradering av bentonitbufferten på grund av rinnande vatten bedöms i dagsläget utgöra en av de största tekniska osäkerheterna för MLH-metoden. Det kan därför inte uteslutas att MLH-metoden endast är tillämplig under vissa geologiska förhållanden (tätt berg).

Ytterligare en faktor som behöver studeras är om svällande bentonit kan förhindra eller reducera vattenflödet längs deponeringshålen. Möjligheten att genom tekniska åtgärder eliminera påverkan av rinnande vatten på bentoniten behöver också studeras.

### **8.3 Deponering med metod framtagen av VBB**

Deponeringen är planerad att utföras i två moment; först placeras bentonitbufferten och därefter skjuts kapseln in i bentonitbufferten.

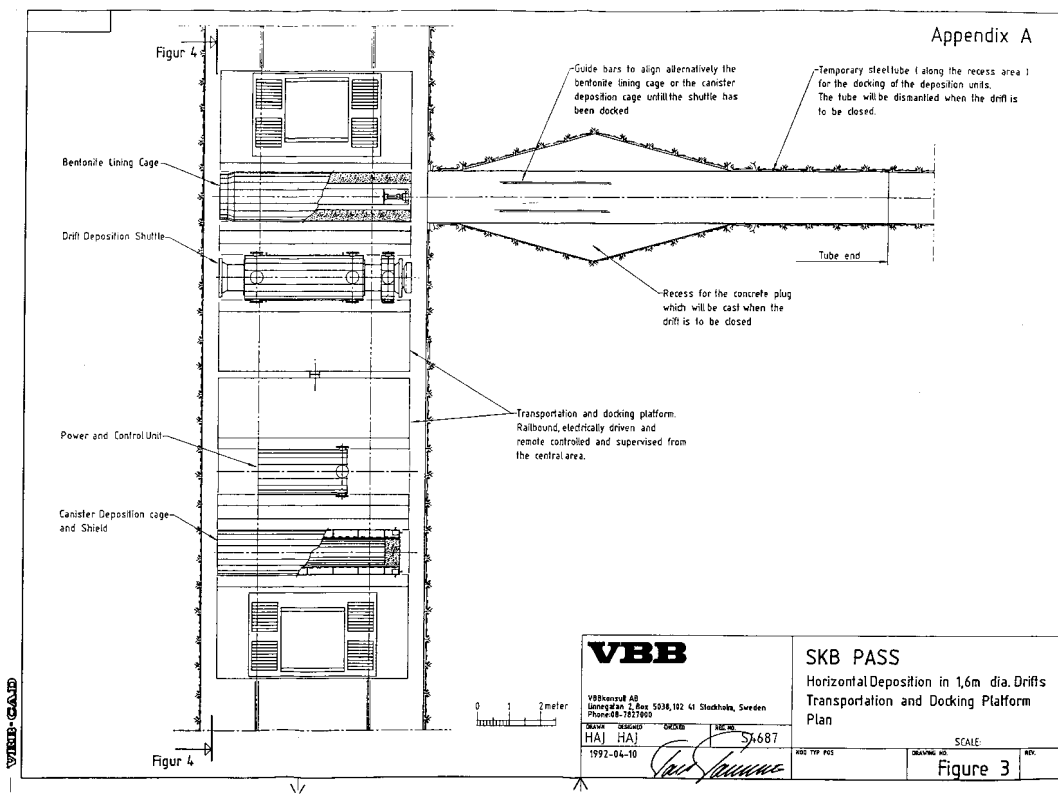
Bentonitbufferten byggs upp i centralområdet under jord. Ett perforerat foderrör, med erforderlig dimension för införsel av kapseln, placeras i centrum av bentonitbufferten och lämnas där efter deponering. Kapseln placerad i ett strålskärmande transportskydd och bentonitbuffert placeras tillsammans med deponeringsskyttel, kraft och styrenhet på en deponeringsplattform som transporteras fram till mynningen på deponeringshålen.

Deponeringen påbörjas med att bentonitbufferten skjuts in i deponeringshålet och dockas till deponeringsskytteln med sin kraft och styrenhet. Skytteln bär hela lasten och förflyttas framåt genom parvis lossgörning och framflyttning av klackar som trycks mot berget. Klackarna liknar de gripprar som används för att pressa en TBM-maskin framåt. I deponeringsläget sänks bentonitbufferten ner på tunnelns sula. Skytteln går sedan tillbaka till transporttunneln, transporterar in kapseln och skjuter in den i foderröret i bentonitbufferten.

Den föreslagna deponeringsmetoden har ett antal identifierade svagheter vilka kort sammanfattas i följande punkter:

- Trots styv konstruktion och raka deponeringshål finns det vid införseln en risk för att bentonitbufferten och kapseln slår i tunneltaket eller tunnelväggen.
- Det föreligger en risk att bentoniten skadas när den placeras på tunnelgolvet.
- Det föreligger svårigheter att placera och föra in kapseln i det foderrör som ligger i centrum av bentoniten.
- Bentoniten exponeras för vattendropp under transporten i deponeringshålen.

Deponeringsmetoden framgår av Figur 8-1 Utrustningen är framtagen för deponeringshål med diametern 1,6 m och kapselvikt upp till ca 25 ton men principen gäller även för deponeringshål med diametern 1,75 m och kapselvikt upp till 30 ton.



Figur 8-1 Transport och dockningsplattform (från /1/). Metod MLH<sub>VBB</sub>.

## 8.4 Deponeringsmetoder framtagna av ÅF-industriteknik

ÅF-Industriteknik har studerat flera olika metoder för deponering i långa horisontella tunnlar /6/. Arbetet koncentrerades inledningsvis till en metod benämnd MLH<sub>ÅF-I</sub>. Vid analyser av MLH<sub>ÅF-I</sub> samt vid diskussioner förda inom Maskinrådet /2/ har det bedömts önskvärt att även studera andra deponeringsmetoder. Dessa metoder har hittills endast studerats översiktligt men det har dock varit möjligt att göra en grov bedömning av metodernas utvecklingspotential. Metoderna benämns MLH 1 - MLH 9. Av dessa metoder har SCC bedömt MLH 4, vilken beskrivs nedan, vara mest intressant för fortsatt utveckling.

En av metoderna som framtagits av ÅF vidareutvecklades vidare av SH Konsult /2/ och redovisas nedan.

### 8.4.1 MLH 4

Metoden innebär att bentonit och kapsel placeras i ett omslutande skyddsror (Figur 8-2). Vid deponering skjuts skyddsroret in i deponeringshålet till position för deponering där paketet bentonit/kapsel trycks ut ur skyddsroret.

För att reducera friktionen och överbrygga eventuella ojämnheter i tunnelbotten kommer det att placeras en glidplåt på botten av deponeringshålen. Vid deponering dras glidplåten successivt ut ur deponeringshålet så att den sista biten av inskjutningen, motsvarande längden av inskjutningsaggregat och skyddsror, görs på botten av deponeringshålet.



#### 8.4.2 Metod utvecklad av SH Konsult

Metoden innebär att bentonit och kapsel monteras till ett paket omslutet av kopparskenor i centralområdet. Vid inskjutningen glider kopparskenorna på bergytan i botten av deponeringshålen och överbryggar eventuella ojämnheter fram till bestämd position. Efter deponering lämnas ”kopparkorgen” kvar i deponeringshålet. Kopparkorgen är gles och bedöms inte påverka bentonitens svällning i deponeringshålet.

Deponeringstunneln är försedd med kraftiga kranräler i tunnelns hela längd, avpassade för eldrivna vagnar. Vagnarna utgör plattformar, dels för (i ett tidigt skede), utrustningen för borrningen av deponeringshålen, dels för själva deponeringsutrustningen, samt i ett avslutande skede, även utrustningen för förslutningen av deponeringshålen.

Efter att kapselpaketet har transporterats med terminalfordonet till en deponeringstunnel, sker en strålskyddad överföring av paketet till den första av de två vagnar som svarar för själva deponeringshanteringen. Vagnen, som är försedd med en kraftig strålskyddsmantel transporterar kapselpaketet till avsett deponeringshål. Finjustering i sida och höjd, samt eventuell vinkelkorrektur, sker med hjälp av hydraulcylindrar, se Figur 8-3 a.

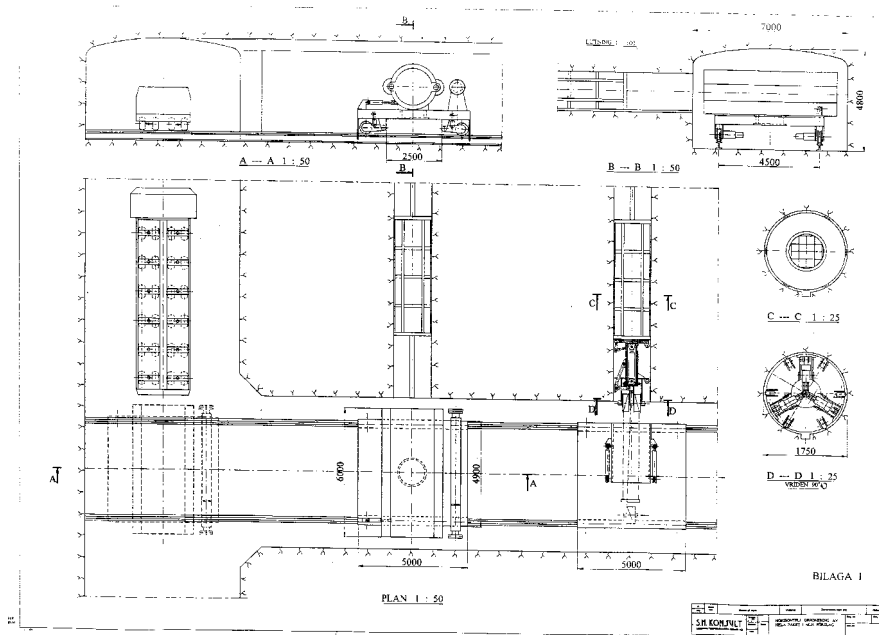
Kapselpaketet inmatas i deponeringshålet via skruvutrustning i strålskyddsmanteln. När paketet införts, reverseras matarskruvarna och vagnen sidoförflyttas ca 2 m varefter en, på vagnen monterad hydraulkolv, matar in paketet ytterligare ca 3 m, varefter kolven återgår till sitt startläge, och vagnen kan avgå för att hämta nästa kapselpaket.

Den fortsatta hanteringen av kapselpaketet sker via vagn nummer 2. Den är utrustad med en kort tvärställd stålmantel, vars inre diameter överensstämmer med motsvarande mått hos deponeringshålet. I denna stålmantel, som upprikts och ansätts till en kort förlängning av deponeringshålet, finns en hydrauldriven stegmatningsanordning, som svarar för att kapselpaketet skjuts in till avsedd position i deponeringshålet.

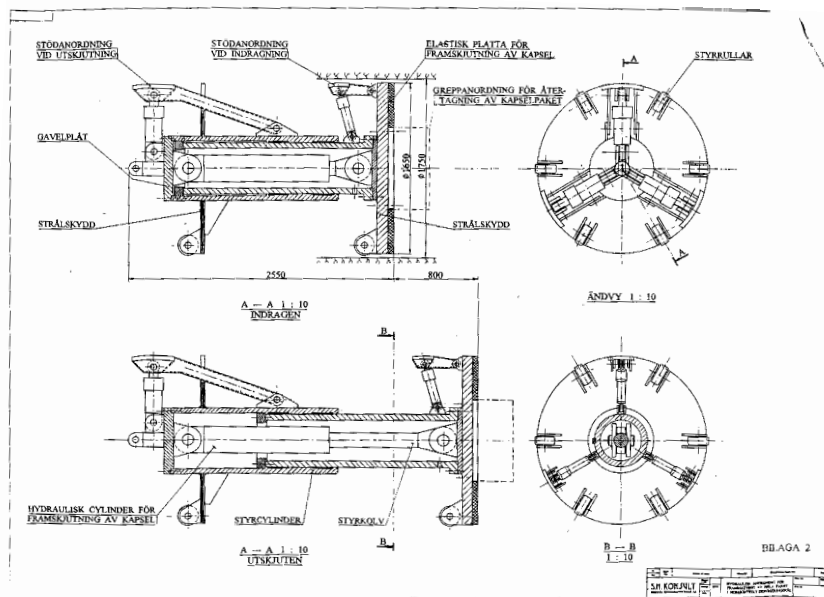
Anordningen styrs av radiella stålhjul mot hålets väggar och erforderlig friktionskraft för påtryckningssteget erhålles av tre radiella klämbäckar, placerade vid fram och bakkant. Efter utförd intransport, returneras anordningen via ett eldrivet linspel på vagnen, till sitt utgångsläge i stålmanteln, varefter manteln återgår till sitt startläge och vagnen flyttas för att lämna plats för ny deponering, se Figur 8-3 b.

Då ”kopparkorgen” lämnas kvar efter deponering måste dess påverkan på den långsiktiga funktionen och säkerheten analyseras.

a)



b)



Figur 8-3 a) Horisontell deponering av hela paket. b) Hydraulisk anordning för planmatning av helt paket i horisontellt deponeringshål. Metoden är utvecklad av SH Konsult och baseras på ett förslag framtaget av ÅF Industriteknik.

## 9 Hotbilder

### 9.1 Inledning

För en slutlig bedömning av MLH metodens lämplighet och potential för deponering av kapslar med använt kärnbränsle är det nödvändigt att analysera hotbilder mot metoden och de möjligheter som föreligger att genom tekniska åtgärder reducera riskerna och utföra åtgärder vid eventuella oönskade händelser.

De dominerande riskerna med metoden är relaterade till den osäkerhet som föreligger avseende verkliga geologiska förhållanden på förvarsdjupet (ca 500 m) och möjligheterna att förhindra och motverka effekten av oönskade händelser.

Hotbilder kan skapas av maskinhaverier, berginstabilitet (ras) samt alltför stora vatteninläckage till deponeringshålet. Dessutom är det trånga utrymmet som skapas av hålsektionen ett hot i sig; erforderliga åtgärder för att laga maskiner, dra ut trasiga maskiner eller behandla utfallna bergblock är arbetsintensiva och måste utföras i de trånga utrymmena.

En beskrivning av olika hotbilder mot MLH metoden sammanfattas under följande rubriker:

- Val av metod
- Borrning av deponeringshål
- Geologiska hotbilder
- Stabilitet och tätning
- Deponering av kapslar

Vid ett fortsatt utvecklingsarbete av MLH metoden är det nödvändigt att ytterligare studera hotbilder och åtgärder för att avhjälpa eventuella problem.

### 9.2 Val av bormetod

Baserat på ställda tekniska krav på deponeringshålen samt förväntade geologiska förhållanden väljs lämplig bormetod, t.ex. en öppen, sköldad TBM för hårt berg. I ett nästa steg konstrueras maskinen baserat på gällande krav och förutsättningar.

Valet av maskintyp och konstruktionen av tunnelborrningsmaskinen bedöms vara behäftad med relativt få osäkerheter. Med hänsyn till gällande höga krav på bergmassan kan det förväntas vara relativt likartade förhållanden utefter de deponeringshål som skall borraras. Möjligheten till utprovning av optimala tekniska lösningar medför också att risken för en felaktig utformning av tunnelborrningsmaskinen bör vara liten.



## 9.3 Borrning av deponeringshål

### 9.3.1 Maskinhaverier

De borrhningsmetoder som beskrivits i denna rapport har prövats i andra projekt. Samtliga maskiner har utsatts för olika typer av haverier men med dagens erfarenhet om de diskuterade maskinutrustningarna och kunskap om borrning av tunnlar är det möjligt att reducera risken, frekvensen samt mildra konsekvensen av olika typer av haverier. Nedan ges en kortfattad redogörelse över vanliga felfunktioner, konsekvenser samt möjliga åtgärder.

#### ***TBM-maskiner***

De flesta större haverierna med TBM-maskiner (t.ex. axelbrott, kuggkransbrott, motor- eller växellådshaverier) orsakar normalt långa förseningar (veckor till månader). Förseningar härrör delvis från demontering/montering av havererade delar, delvis av leverans eller tillverkning av nya delar. Borrning med TBM går normalt bra om förutbestämda och beprövade underhållsscheman följs. Erfarenheter visar att i de fall som rena underhållsskift införs minskar frekvensen av haverier och indriften ökar totalt.

Vid ett större haveri måste maskinen backas ut till huvudtunneln för åtgärder, bland annat för att kunna utföra de tunga lyft som erfordras vid reparationer. Smärre reparationer kan troligtvis utföras inne i tunneln.

Vid TBM fragmenteras berget normalt med disk-kuttrar vilka är relativt billiga men har begränsad livslängd. Alternativt skulle, betydligt dyrare, stiftkuttrar kunna användas, vilka skulle öka livslängden med ca en faktor 10. Därmed minskas också den tid som erfordras för personal att uppehålla sig i deponeringshålet. Extrakostnaden för denna dyrare kuttertyp torde emellertid i detta sammanhanget vara försumbar. Då längden på deponeringshålen kommer att variera mellan 100 och 500 m /2/ är det i dagsläget rimligt att förutsätta stiftkuttrar.

Byte av disk-kuttrar krävs normalt efter varje 100 timmars effektiv driftstid. Detta motsvarar ungefär den effektiva borrhningstiden för ett deponeringshål. Byte av kuttrar skall därför företrädesvis utföras i samband med förflyttning till en ny tunnel. I det fall byte ändå måste ske inne i deponeringshålet på grund av att kuttrar havererar, backas maskinen och personal får krypa genom en manlucka i borrhuvudet fram till front, framför maskinen.

För aktuella tunnelborrningsmaskiner väger kuttrarna ca 50 kg och måste med handkraft föras genom manluckan och i läge för montering. Detta är ett mycket ansträngande arbete då det också är svårt att få fram luft till utrymmet framför borrhuvudet. Det förekommer maskiner på marknaden i vilka kuttrar monteras bakifrån. Detta innebär att bytet av kuttrar förenklas och blir mindre arbetskrävande. Sannolikt kommer en likartad lösning bli aktuell vid borrning av deponeringshål.

### **Horisontell stigortsborrning -RBM**

Rapporterade haverier med RBM är haverier av växellådor och motorer. Vidare finns rapporterat att borrarsträngarna gått av med följd att krona och stänger satt sig på tvären i det redan upprymda schaktet. Vid horisontell drivning borde de största problemen och de som kan orsaka tidsförlängning uppstå kring hantering av borrarsträng och stabilisatorer. Det är stora krafter som kommer att påverka stabilisatorernas infästning till borrarsträngen. Skulle ett sådant lager haverera kommer mycket tid att erfordras för att få ut stabilisator och borrarsträng.

RBM drivs normalt med stiftkuttrar i borrhuvudena. Kuttrarna byts normalt ytterst sällan under borrhningen. Skulle man ändå vara tvungen att byta ut kuttrar på grund av haverier krävs att man backar borrhuvudet något och kryper genom manlucka fram till utrymmet framför borrhuvudet för att göra erforderlig service/byte. En annan möjlighet är att dra ut hela borrarsträngen och borrhuvud ur borrhålet och utföra kutterbytet i transporttunneln. Valet av metod kommer att baseras på en optimering av kostnad, teknik och säkerhet.

### **TBM-BORPAK**

Större haverier hos BORPAK kan ske om en gummimanschett går sönder. I så fall måste maskinen dras ut och repareras utanför tunneln.

BORPAK fungerar i övrigt på samma sätt som en TBM. Maskinen är utrustad med kuttrar som behöver bytas. Detta gör man genom att backa huvudet något och skifta kuttrar bakifrån.

## **9.4 Geologiska hotbilder**

De geologiska hotbilderna mot MLH är kopplade till den osäkerhet i prediktioner som är typisk för metoden. Skillnaderna i metodik för förundersökningar mellan MLH och referensmetoden KBS-3, vilka redovisas i kapitel 3, jämkas troligen med tiden i takt med utvecklingen av metoder för sondering och prediktion. Hotbilderna, som bedömts på basis av dagens kunskapsläge, sammanfattas i korthet nedan:

1. För deponeringshål av typ MLH kan strukturer av funktionsklass D3 /4/ ej helt undvikas. Dessa strukturer är svåra att detektera och extrapolera över större volymer. Därmed är det troligt att strukturer av funktionsklass D3, och kanske även flacka D2, ej upptäcks med förundersökningar och påträffas först vid borrhningen av deponeringshålet.
2. Strukturer kan vara så beskaffade att de ej skär ett sonderande kärnborrhål men skär deponeringshålet. Därmed upptäcks dessa strukturer först vid borrhning av deponeringshålet. Denna risk är större, och kan få större konsekvenser, för MLH än för KBS-3.
3. En struktur som påträffas först vid borrhning kan vara så beskaffad att resten av, eller hela, deponeringshålet måste förkastas. Därmed minskar den inom bergplinten

erforderliga deponeringsvolymen och ytterligare tunnlar måste tillfogas layouten. Denna risk är större, och kan få större konsekvenser, för MLH än för KBS-3.

4. Vattenföringen i geologiska strukturer kan ej med tillfredsställande säkerhet fastställas med endast ett pilothål (kärnborrhål) genom strukturen på grund av kanalbildning längs sprickplanen. Det är troligt att ett antal vattenförande strukturer ej detekteras förrän deponeringshålet borrats. Systematisk sonderingsborrning i fronten kan reducera, men ej eliminera, denna riskfaktor som bedöms lägre för KBS-3. Det bedöms emellertid vara troligt att merparten av de vattenförande strukturerna kan åtgärdas för att säkerställa deponeringshålets långsiktiga funktion och säkerhet; skillnaden mellan KBS-3 och MLH bedöms därför främst vara relaterad till kostnaderna för åtgärder vilka bedöms bli högre för MLH.

Av de ovan listade hotbilderna bedöms ur samtliga praktiska hänseenden svårigheten att detektera vattenförande strukturer vara viktigast.

## **9.5 Stabilitet och tätning före deponering**

### **9.5.1 Instabilitet**

Den övergripande strategin för att reducera risken för tunnelinstabilitet är att utföra erforderliga förundersökningar och att välja lämplig riktning på deponeringshålen. Det senare kan i vissa lägen bli komplicerat och behäftat med svåra överväganden då många andra faktorer påverkar valet av riktning.

Tunnelns cirkulära form är fördelaktig för stabiliteten. Detta framgår bland annat av att förstärkningsinsatsen för de tunnlar som hittills har borrats i Sverige har varit mycket liten. Det förekommer dock bara en referens, den borrhade delen av Äspölaboratoriet, där tunnlar borrats på motsvarande djup som diskuterades för djupförvaret. Tabell 9-1 utgör en sammanfattning över hittills borrhade tunnlar i Sverige. Risken för större tunnelras med stora konsekvenser bedöms som mycket liten. Tabell 9-2 redovisar tunnlar borrhade med små diametrar i internationella projekt.

Risken för icke prognostiserade geologiska förutsättningar bedöms som liten trots de osäkerheter som är behäftade med förundersökningarna. Borrning av varje deponeringshål föregås av ett sonderingshål (kärnborrhål) i vilket diverse geofysiska undersökningar kan utföras. Hålet kommer att placeras inom tunnelsektion varför prognossäkerheten bör vara god då avståndet mellan kärnborrhålet och tunnelns periferi kan variera mellan 0 - 1,75 m. Detta avstånd är kortare än vad som normalt tillämpas vid traditionell tunneldrivning med försondering. Vidare erhålls information från undersökningar i närliggande tunnlar. I detta sammanhang måste det emellertid påpekas att osäkerheterna är större, vilket beskrivs i avsnitt 9.4, avseende risken för större vatteninbrott till deponeringshålen.

**Tabell 9-1 Borrade tunnlar i Sverige.**

Projekt	Djup (m)	Längd (km)	Geologi	Förstärkning
Kymmen	10-50	ca 3	Granit	Obetydliga insatser
Saltsjötunneln	50	ca 7	Granit	Obetydliga insatser
Ormen	30	ca 3	Granit	Obetydliga insatser
Klippen	0-50	ca 6	Granit-fyllit	Omfattande lokala förstärkningsinsatser vid sprickzoner, underordnade insatser mellan sprickzoner.
Äspö	400	ca 0,5	granit/diorit	Obetydliga insatser

**Tabell 9-2 Tunnlar borrade med små diametrar.**

Plats	Längd (m)	Diameter (m)	Geologi	leverantör	Anmärkning
Ulm. Tyskland	320	1,5	Kalksten	Herrenknecht	TBM, dubbelsköld, torr utschaktning, rördrivning
Porto. Portugal	550	2,0	Granit	Herrenknecht	Micromaskin AVN 1600 D
Singapore	2*300	1,9	Grundiert	Herrenknecht	Micromaskin AVN 1500 E
Karlstein Tyskland	270	1,7	Kalksten	Herrenknecht	Micromaskin AVN 1200
Aschaffenburg Tyskland	800	1,2	Sandsten	Herrenknecht	Micromaskin AVN 800
Zürich Schweiz	2*100	0,9	Molass	Herrenknecht	Micromaskin AVN 700
Zürich Schweiz	1 600	2,6	Molass	Herrenknecht	Hydrosköld, rördrivning, 15m/d, 55 ton, 8m lång
Felex Schweiz	70	2.28	Granit	Wirth	Wirth TB 0227 E
Salzburg Österrike	400+1300	0,6 / 0,3	Morän under gvy		Rördrivning, hydraulisk utschaktning
München Tyskland	2*30	0,8	Grus/Lera		Högtrycksspolning g rördrivning
Klostertal Österrike	200	0,7	Grus med stenblock		Rördrivning
Auger testprojekt USA	95	0,6			Soltau RVA 250 8, 5m/dag

Nedan beskrivs identifierade hotbilder, konsekvenser och möjliga åtgärder:

- Vidare indrift kan förhindras genom ras eller vattenmängderna kan bli oöverstigliga så att man av den anledningen får avbryta borrningen. De geologiska förutsättningarna kan bestämmas utifrån de erfarenheter man bygger upp under drivningen av andra deponeringshål samt den omfattande förundersökning som är planerad.
- Om berg över maskinen skulle falla ut måste det utfallna berget lastas ut och berget ytterligare förstärkas innan man kan gå vidare med borrning. Utrymmet ovanför och vid sidan av maskinen är redan från början trångt. Skulle dessutom ett större block rasa in måste blocket först sönderdelas innan man kan gå vidare med att transportera ut bergbitarna samt förstärka det berörda partiet. Utrymmet för dessa åtgärder är starkt begränsat i de små deponeringshålen.
- Skulle raset bestå av mindre block som orsakar fortskridande ras behövs också förstärkning med fiberarmerad sprutbetong, montering av bult och injektering innan man kan gå vidare med borrningen.

### **9.5.2 Vatteninläckage**

Behov av tätning av berget bedöms normalt utifrån vattenförlustmätning i det hål som borrar innan tunneldrivningen börjar samt utifrån erfarenheter från borrning av andra deponeringshål i området.

Metoder för att tätare större vatteninbrott sker genom injektering av berget framför och utanför tunnelsektionen. Man tätar normalt på visst avstånd framför huvudet för att på så sätt nå ut tillräckligt långt i berget för att få mottryck och undvika att injekteringsmedlet tränger ut i det färdiga deponeringshålet.

### **9.5.3 Ojämnheter i sulan**

Innan deponeringshålet utnyttjas för deponering ska eventuella gropar i tunnelbotten som orsakats av kilar i berget som fallit ut fyllas igen. Igenfyllning av kilar i botten görs enklast med någon typ av betong (SKB studerar för närvarande alternativ till betong). Behovet och omfattningen av åtgärder kommer att påverkas av valet av deponeringsteknik.

## **9.6 Stabilitet och tätning under deponering**

Följande händelser som kan försvåra det fortsatta arbetet med deponering har identifierats:

- Ett bergblock faller ner framför deponeringsmaskinen, på maskinen eller mellan maskinen och huvudtunneln.
- Tunneln har deformerats så att maskinen inte kan föras in för deponering av kapslar.

Dessa händelser kräver att man går in i påbörjade deponeringshål och utför arbete för att säkra deponeringsmaskinen. Arbetet, vilket kompliceras av att det kan finnas kapslar i tunneln vilka avger värme och eventuellt även strålning, består av utlastning och loss-

tagning av berg och därefter säkring av bergmassan genom bultning, sprutbetonering eller injektering.

### **9.6.1 Tunnelinstabilitet**

Om berget trots omfattande förstärkning och tätning skulle rasa i den färdiga tunneln kan förstärkning med fiberarmerad sprutbetong, montering av bult och injektering åtgärdas med utrustning som finns tillgänglig i transport/deponeringstunneln.

### **9.6.2 Vatteninläckage**

Skulle den inläckande vattenmängden öka över en given lägsta nivå måste kompletterande efterinjektering utföras. Denna injektering sker inifrån deponeringshålet och på visst avstånd från det läckande partiet. På så sätt når man tillräckligt långt in i berget för att tillräckligt mottryck på det injekterade materialet erhålls.

Utrustning för injektering (baljor, omrörare, pumpar, tryckmanschetter etc.) måste finnas tillgängligt på deponeringsnivån för att snabbt kunna sättas in vid behov.

## 10 Kostnadsberäkningar

Föreliggande kapitel redovisar en entreprenadkalkyl baserad på en hypotetisk tunnelutformning för Beberg enligt /8/ (se även kapitel 7). Kostnadsbedömningen omfattar utförandet av 110 deponeringshål och baseras på följande premisser:

Ingår i kalkylen	Ingår ej i kalkylen
<ul style="list-style-type: none"><li>- Etablering och avveckling av arbetsplatsen och personal för borrentreprenörens platskontor under hela byggtiden.</li><li>- Kostnader för transport, montering och demontering av TBM-maskinen.</li><li>- Två maskiner ingår i kostnadsberäkningen.</li><li>- Kostnad för provhål.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kostnader för utförande av huvudtunneln och centralschakt med installationer.</li><li>- Transport av schaktmassorna från deponeringshålen längre än till centralområdet. Tippavgifter för schaktmassor och arbeten ovan jord ingår ej.</li><li>- Fördyring relaterad till löneökningar under den långa byggtiden.</li><li>- Försondering i form av kärnbörning har ej medtagits i kostnadskalkylen.</li></ul>

En reservmaskin anses nödvändig för att minska risken för stillestånd på grund av maskinhaveri eller ras. Reservmaskinen kan eventuellt inköpas något senare än huvudmaskinen. Båda maskiner avskrivs med 100%. Kostnadsberäkningen har utförts under förutsättning att endast en maskin används för borrning; reservmaskinen tas endast i bruk vid större haverier. Med en byggtid på 20 år bedöms kapaciteten hos en maskin räcka för att inte drivningen ska inverka på deponeringshastigheten (6,6 m/dag).

Oberoende av om SKB låter utföra borrningen på entreprenad eller i egen regi har det antagits att SKB betalar maskinerna direkt, så att räntekostnaderna uteblir. Maskinkostnaderna har beräknats enligt nuvärdesprincipen exklusive reparationskostnader under byggtiden. Enligt uttalande från Wirth är kostnaden ca 15 miljoner DM för en maskin inklusive erforderliga utvecklingskostnader.

Kostnaderna för att utföra borrningen i egen regi bedöms bli lika stora som borrning utförd på entreprenad, eftersom det är nödvändigt med specialutbildad personal för att borra deponeringshålen med TBM- teknik. Personalkostnaderna för organisationen bedöms i princip bli lika stora oberoende av utförande.

Kapaciteten har tagits fram med hjälp av erfarenhetsvärden från liknande objekt. Som utgångsvärde för beräkningen är en framdrift på ca 20 m/dag ren drivningstid utan hänsyn till reparation, underhåll, injektering och omställning mellan påslagen. Detta motsvarar bedömningen från maskinleverantörerna på en framdrift av 1,5-2,0 m/timme.

Borrningen av deponeringshålen antas bedrivas i två skift om 8 timmar, det vill säga 16 h/dag, 200 dagar/år varav reparation antas utgöra ca 4 timmar per dag. Med en framdrift av ca 8 m/dag fordrar ett deponeringshål på 250 m ca 7 veckors arbete. Detta inkluderar demobilisering och mobilisering av maskinen till nästa påslag och två injekteringsomgångar. Mellan 6 och 7 tunnlår, det vill säga ca 1500 m borrhål, kommer med nämnda framdrift att utföras årligen vilket innebär en bergvolym av knappt

4.000 m<sup>3</sup>. Den totala uttagsvolymen beräknas till ca 72.000 m<sup>3</sup>. Total byggtid för borrhningen av deponeringshålen har antagits till 20 år.

Tiden för mobilisering och demobilisering av maskinen mellan tunnarna har bedömts till ca 5 dagar. En injekteringsomgång antas erfordra 5 dagar.

Uttransporten av bergmassorna har i kalkylen förutsatts bli utförd med slurry som pumpas ut. En separeringsanläggning placeras utanför tunneln. Borttransporten av bergmassorna från mynningen av deponeringstunneln utförs med spårbunden teknik till centralområdet. Det har antagits 4 sidotippningsvagnar och 1 lok. Kostnaden för uttransport med transportband bedöms vara av samma storleksordning.

Förbrukningen av injekteringsmedel har bedömts till ca 10-20 kg/bm. Förstärkning i form av sprutbetong och bult ingår, dock i liten utsträckning.

Baserat på den hypotetiska förvarsutformningen (Beberg) som redovisas i kapitel 7 beräknas kostnaden uppgå till ca 410 miljoner SEK, eller ca 14.000 SEK/m. Samtliga kostnader i föreliggande studie är angivna i prisnivå januari 1997 /3/.

## 10.1 Ekonomisk riskvärdering

En översiktlig riskbedömning är utförd för borrhningen av deponeringshålen (**Tabell 10-3**). En uppskattning har gjorts för den andel av borrhålssträckningen som förväntas borrh i sämre bergförhållanden och där det kommer att bli nödvändigt att vidta särskilda åtgärder. Även en bedömning av farorna har gjorts och hur de påverkar kostnad och tid för bygget.

Det har antagits att 5% av tunneln ej blir lämplig för deponering utan helt måste fyllas med bentonit.

Som speciell hotbild har antagits att maskinen kläms fast och ej går att ta ut, vilket innebär att en tredje maskin behövs, samt att kapaciteten blir så låg, exempelvis orsakat av styrproblem, ras eller liknande händelser, att den andra maskinen behövs för 2/3 av tiden för att undvika väntetid för deponeringen. Orsaken till att maskinen fastnar kan vara blockutfall eller deformationer av berget.

### 10.1.1 Exempel på kostnadsökningar vid tunnelbyggen

Kostnadsökningar för tunnelbyggen kan delas in i två olika typer:

1. Projekt där tunneldrivningsmetoden misslyckas.
2. Projekt där diverse problem uppstår; dessa är ofta orsakade av en kombination av flera faktorer.

Dubbling av beräknad kostnad sker främst i projekt där hela metoden misslyckas. I nedanstående avsnitt ges exempel på fördyrade projekt. Identifierade byggrisker redovisas i **Tabell 10-1**.



## **Metoden misslyckas**

Exempel på projekt där metoden misslyckats är Hallandsåsen, där det visade sig att TBM-drivning med en maskin med enbart gripprar som framdrivningsmetoden inte fungerade i den svaga bergmassan inom den så kallade norra randzonen.

Dubblad kostnad uppstod i ett projekt på USA:s västkust, där en öppen sköldmaskin ej fungerade i sand (okontrollerat intras av massor). Den markanta kostnadsökningen orsakades av byggtidsförlängning och stabiliseringsåtgärder av ovanliggande jordlager längs hela tunnelsträckningen.

Projekt på kontinenten (Therese Isaksson KTH) visar, att TBM drivning i svällande berg, där borrhuvudet fastnar, så att det blir nödvändigt att spränga loss och utvidga profilen, kan ge fördubblade kostnader.

## **Problem under byggandet**

Kostnadsökningar i storleksordningen 20% erhöles vid drivning med mixsköld i Schweiz (Therese Isaksson, KTH) under mycket svåra geologiska förhållanden med kohesionslös jord, liten övertäckning och högt vattentryck (3,7 bar). Det var där nödvändigt att upprepade gånger under drivningen förstärka ovanliggande jord med frysning och injektering.

En kostnadsökning av i storleksordningen 40% erhöles på grund av minskad framdrift i ett projekt utfört med öppen TBM och med enbart gripprar som frammatningsanordning (Therese Isaksson, KTH). Orsaken var stora blockutfall på grund av höga spänningar (smällberg) i hård gnejs. Ingen sköld fanns som skydd för blockutfallen. Vid ett annat projekt i Schweiz utfördes ej sonderingsborrningar då berget bedömdes vara så bra att dessa ej ansågs nödvändiga. En ca 30% kostnadsökning blev resultatet då flytjord påträffades. En 6 m lång tunnelsträckning tog 3 månader att färdigställa då sträckan fick grävas ut manuellt.

## **Förebyggande åtgärder**

För att förebygga problem under borringen av deponeringshålen kan följande åtgärder vidtagas:

1. Maskinen utrustas med sköld.
2. Förundersökningar av bergmassan i deponeringsvolymen.
3. Förundersökningar längs tunnelns tänkta sträckning.
4. Väl planerat underhåll av tunnelborrningsmaskinen.
5. Förinjektering.
6. Beredskap med pumpar av hög kapacitet för pumpning av stora vattenmängder.

**Tabell 10-1 Sammanfattning av byggriskerna vid tunneldrivningen**

<b>Fara</b>	<b>Orsak</b>	<b>Förebyggande åtgärder</b>	<b>Kostnadsrisker</b>	<b>Sannolikhet</b>
Metoden misslyckas	Fel teknik/ej prövad teknik	Försökstunnlar	mycket stora	låg
Stort vattenläckage	Ej detekterad vattenförande spricka	Försondering Injektering	medel	medel
Tunneln obrukbar	Ras/deformering av berget	Försiktig drivning	medel	låg
Skador på tunnelväggen	Gripper	Utformning av gripprar	medel	medel
Fronten ej stabil	Svaghetszon	Injektering	medel	låg
Framdriftsproblem	Fel val av frontbestyckning	Noggrannhet vid val av kuttrar	medel	låg
Styrningsproblem	Hårda och mjuka partier samtidigt, sprickzoner		medel	medel
Maskinen klämmer fast	Blockutfall/deformering av berget		stora	låg

## 10.1.2 Sammanställning av kostnadsberäkningarna

Tabell 10-2 Förutsättningar för kostnadsberäkningarna.

---

<b>TUNNELDATA</b>	
Diameter	1,75 m
Area	2,40 m <sup>2</sup>
Omkrets	5,5 m
Total tunnellängd ca	26.000 - 30.000 m
<b>PERSONAL</b>	
vid maskinen	1
lokförare + div.	1
plåtslagare/elektriker	1
<b>ARBETSTID</b>	
2 skift	5 dagar / vecka
<b>HUVUDMASKINER</b>	
TBM D=1,75m (16 st. 305mm kuttrar)	2 st.
borrustning	1 st.
sidotippade vagnar	4 st.
lok	1 st.
<b>ANSTÄLLDA</b>	
Byggledare	1
Tekniker	1
Utsättare	1
Ekonom	0,5
Maskiningenjör	1
Elektroingenjör	1
Sekreterare	0,5
<b>totalt</b>	<b>6</b>
<b>FÖRSTÄRKNING<sup>1</sup></b>	
Sprutbetonghastighet	4 m <sup>3</sup> /h
Sprutbetongtjocklek	3-5 cm
Sprutbetongfaktor	2,5
Längd, Bult:	1,5 m
Injektering	2 skärmar / 250 m
Injekteringsskärm	20 m
Antal hål ca	8 st.
<b>TID FÖR INJEKTERING</b>	
dra ut utrustningen	1 dag
dra in borrhings och injekteringsutrustningen	1 dag
borrning av bult och injekteringshål	1 dag
injektering	1 dag
återinstallering av utrustning	1 dag
stillestånd	5 dagar
<b>FRAMDRIFT<sup>2</sup></b>	
med hänsyn till stillestånd	7, 20 m/d
utan hänsyn till stillestånd	13 m/d

---

<sup>1</sup> Det har antagits att 2 x 5 m av deponeringshålen är exponerade för sprickzoner vilka måste förstärkas med sprutbetong och bult. Tiden för detta arbete har bedömts till 1 v/250 m.

<sup>2</sup> Vid beräkningen av framdriften har hänsyn tagits till stilleståndstid för två injekteringsomgångar per tunnel.

**Tabell 10-3 Förutsättningar för beräkning av ökad tidsåtgång och ökade kostnader.**

Antal deponeringshål	110 st.
Sträcka som drivs i dåligt berg	5%
Antalet deponeringshål som erfordrar ingjutning	6 st.
Extra tidsåtgång för varje ingjutning	1 mån

**Tabell 10-4 Beräkning av ökad tidsåtgång och ökade kostnader, prisnivå januari 1997.**

Tid med minskad framdrift	160,8	mån
<b>Kostnader</b>		
Extra maskin	14 490 000	SEK
Arb. lön	59 431 680	SEK
<b>Summa</b>	<b>73 921 680</b>	<b>SEK</b>

**Tabell 10-5 Stilleståndskostnader per månad, prisnivå januari 1997.**

Objekt	Kostnad	
Revision av maskinen	579 600	SEK/mån
Allm. maskinkostnad	31 728	SEK/mån
Maskinkostnader	199 632	SEK/mån
Platskontor	460 880	SEK/mån
Arb. lön	369 600	SEK/mån
<b>Summa</b>	<b>1 641 440</b>	<b>SEK/mån</b>

**Tabell 10-6 Kostnad för igengjutning av deponeringshål. Deponeringshålen (6 st) antas vara 250 m långa, prisnivå januari 1997.**

Objekt	Mängd	a' pris	Kostnad	
Betong/grusblandning (m <sup>3</sup> )	600	1000	600 000	SEK/hål
Lön (timmar)	720	350	252 000	SEK/hål
Betongpump + utrustning (st.)	1	10 000	10 000	SEK/hål
Stillestånd	1	1641440	1 641 440	SEK/hål
<b>Summa</b>			<b>2 503 440</b>	<b>SEK/hål</b>

**Tabell 10-7 Sammanställning över kostnader. Förutsättningen är köp av två maskiner och en byggtid av 20 år, prisnivå januari 1997.**

<b>Objekt</b>		<b>Kostnad</b>
TOT etablering arbetsplats		6 375 200 SEK
TOT avveckling arbetsplats		3 730 900 SEK
TOT platskontor (personal)		110 611 200 SEK
TOT maskinkostnader huvudbyggtid		7 614 686 SEK
TOT huvudmaskiner under TBM drivning		47 911 571 SEK
TOT TBM maskin (100% avskr)		36 440 000 SEK
TOT lön TBM		70 035 000 SEK
TOT slitage TBM		18 256 775 SEK
TOT injektering		537 600 SEK
TOT temporär förstärkning i TBM tunnel		999 024 SEK
TOT påslagssprängning		8 100 000 SEK
Igengjutning av deponeringstunnlar		15 000 000 SEK
<b>DELSUMMA</b>		<b>326 000 000 SEK</b>
Slutpåslag	12%	39 120 000 SEK
Planeringskostnader - konsult	2%	6 520 000 SEK
<b>SUMMA</b>		<b>372 000 000 SEK</b>
Oförutsett	10%	37 200 000 SEK
Bedömda risker		74 000 000 SEK
<b>SLUTSUMMA - medel</b>		<b>410 000 000 SEK</b>
<b>SLUTSUMMA - inkl. bedömda risker</b>		<b>483 200 000 SEK</b>
<b>PRIS - medel</b>		<b>13 667 SEK/m</b>
<b>PRIS - inkl. speciella risker</b>		<b>16 107 SEK/m</b>

## 10.2 Sammanfattning av riskvärderingen

Vid en bedömning av risker för ett bygge antas ofta vad som sannolikt kan inträffa. Detta kan betecknas som en normal risknivå. Det är dock mycket viktigt att även beakta den maximala risken, även om sannolikheten för denna är mycket liten; exempelvis att metoden misslyckas helt, TBM ej går framåt, tunneln är helt vattenfylld, pumpkapaciteten är otillräcklig.

- Förutsättningarna i detta projekt, där tunnlar drivs parallellt med föregående utförda tunnlar, kärnboringar utförs längs hela tunnelsträckningen och där tunnellängden endast är ca 250 m (100-500 m) gör att sannolikheten för en dubblerad kostnad för projektet är mycket liten.
- Tekniken är ej väl beprövad. Hänsyn bör tas till speciella risker.
- Ett eventuellt byte av metod kan orsaka stora kostnader och förseningar.

Den framtagna kostnaden är ett medelvärde, d.v.s. belopp för förväntad kostnad. Om inte metoden misslyckas helt, bör den maximala kostnaden inte överstiga det beräknade beloppet på ca 480 miljoner SEK eller 16.000 SEK/m, prisnivå januari 1997.

## 11 Referenser

- /1/ Project on alternative system study (PASS). Final report SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /2/ Sandstedt, H, Munier, R, Pers, K, Birgersson, L, Ageskog, L, 2001. *Project JADE, Comparison of repository systems, Summary of results*. Report TR-01-17. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /3/ Ageskog, L., 2001. *Projekt JADE, Jämförande kostnadsanalys mellan olika deponeringsmetoder*. VBB. Rapport R-01-31. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /4/ Almén, K, Stanfors, R, and Svemar, C., 1996. *Nomenklatur och klassificering av geologiska strukturer vid platsundersökningar för SKB:s djupförvar*. Progress Report PR-D-96-029. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /5/ Arbetskyddsstyrelsen., 1995. *Arbetskyddsstyrelsens författningssamling AFS 1995:4*.
- /6/ Kalbantner, P., 2001. *Projekt JADE, Metod- och maskinbeskrivning av utrustning för deponering av kapslar i medellånga deponeringshål*. Rapport R-01-33. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /7/ Munier, R., Follin, S, Rhén, I, Gustavsson, G, Pusch, R, 2001. *Projekt JADE, Geovetenskapliga studier*. Rapport R-01-32. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /8/ 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.
- /9/ Wallis, S., 1997. *"Knoxville smallbore"*. World Tunneling and subsurface excavation, Vol: Mars; pp 53-57.