



SKB

PASS

**Projekt AlternativStudier för
Slutförvar (PASS)
Slutrapport**

Oktober 1992

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

BOX 5864 S-102 48 STOCKHOLM

TEL 08-665 28 00 TELEX 13108 SKB S TELEFAX 08-661 57 19

Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS) Slutrapport

Oktober 1992

FÖRORD

I FoU-program 86 och i FoU-program 89 ingick bl a studier av olika alternativa utföranden av djupförvar för använt kärnbränsle. En jämförelse mellan systemen WP-Cave och KBS-3 har tidigare redovisats och även rapporterats i FoU-program 89.

Studierna av andra alternativa utföranden har under de senaste två åren drivits som ett samlat projekt – PASS – Projekt AlternativStudier för Slutförvar. Detta projekt har nu slutförts och resultaten presenteras i föreliggande rapport.

Under flera år har SKB samarbetat med den grupp inom de finska kraftföretagen som svarar för hantering av avfall från de finska kärnkraftverken. Bl a har studier av olika alternativa utföranden av djupförvar och av inkapsling av använt kärnbränsle genomförts i samverkan med TVO. Detta har sedan 1991 skett inom ramen för en särskild överenskommelse om samfinansiering av vissa delprojekt. En representant från TVO har varit adjungerad till den projektgrupp vid SKB som svarat för genomförandet av PASS.

SAMMANFATTNING

SKB har förutom KBS-3-systemet utvecklat och analyserat fördelar och nackdelar med tre alternativa systemutformningar:

- Djupa borrhål (VDH); deponering mellan 2–4 km djup.
- Långa tunnlar (VLH); deponering av relativt stora kapslar i horisontella tunnlar. Tunnlarna kan göras km-långa.
- Medellånga tunnlar (MLH); deponering i horisontella tunnlar av kapslar av samma typ som i KBS-3.

Dimensionerna på kapseln är olika för förvarssystemen KBS-3/MLH, VDH och VLH. Olika utformningar och material har utvecklats och analyserats för samtliga dimensioner.

I föreliggande studie har de fyra förvarssystemen (KBS-3, VDH, VLH och MLH) jämförts och rangordnats inbördes. För varje kapseldimension har även kapselalternativen rangordnats.

Studien har genomförts separat för tre områden:

- Teknik för kapseltillverkning och inkapsling (kapseljämförelse) resp. bergarbeten och deponering (jämförelse av förvarssystem).
- Långsiktig funktion och säkerhet.
- Kostnader.

I första omgången jämfördes kapselalternativen. Resultatet blev att den sk kompositkapseln erhöll högsta rankingen för KBS-3/MLH och VLH. För VDH förordades en betongfylld titankapsel. Dessa kapselalternativ förutsattes därefter vid jämförelsen av förvarssystemen.

Jämförelsen av förvarssystemen resulterade i följande rangordning:

1. KBS-3 och MLH
2. VLH
3. VDH

VDH placerades sist i alla tre deljämförelserna och följaktligen sist i den slutliga rangordningen.

VLH placerades på tredje plats i fråga om ”Teknik” men på andra och samma plats som KBS-3 i fråga om ”Kostnader”. Jämförelsen av ”Långsiktig funktion och säkerhet” gav ingen utslagsgivande skillnad mellan KBS-3, MLH eller VLH utan samtliga tre system bedömdes likvärdiga och ansågs uppfylla mycket högt ställda säkerhetskrav. I den slutliga rangordningen placerades därför VLH på tredje plats.

Utfallet av jämförelsen mellan KBS-3 och MLH är inte entydigt. För ”Teknik” bedömdes KBS-3 som mer robust och mer flexibel i deponeringsprocessen. En starkt bidragande orsak är att deponeringen av varje kapsel är en avslutad operation; den betraktas som en ”parallell” process. I MLH är kapseldeponeringarna i stället ”seriekopplade”. I fråga om ”Kostnader” finns i baskalkylen emellertid en signifikant skillnad till förmån för MLH. Den ekonomiska optimeringspotentialen bedömdes därtill vara lika för båda systemen. I jämförelsen mellan ”Teknik” och ”Kostnader” bedömdes nackdelarna MLH har i tekniken för deponering vara avgörande. Slutsatsen blev att KBS-3 rangordnades före MLH.

INNEHÅLL

1	INTRODUKTION	1
2	ANALYSERADE ALTERNATIV	3
2.1	ALLMÄNT	3
2.2	KBS-3	3
2.3	MEDELLÅNGA TUNNLAR (MLH)	3
2.4	LÅNGA TUNNLAR (VLH)	4
2.5	DJUPA BORRHÅL (VDH)	4
3	MÅL	7
4	RANGORDNINGSMETODIK	9
4.1	ALLMÄNT	9
4.2	HIERARKISK STRUKTUR VID JÄMFÖRELSEN	9
4.2.1	Problemstrukturering	9
4.2.2	Mål	9
4.2.3	Hierarkiska nivåer för jämförelsen	10
4.3	RANGORDNINGSSTEG	10
4.4	FÖRUTSÄTTNINGAR VID JÄMFÖRELSEN	10
5	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AV KAPSELALTERNATIV	13
5.1	JÄMFÖRDA KAPSELALTERNATIV	13
5.1.1	Allmänt	13
5.1.2	KBS-3 och MLH	13
5.1.3	VLH	13
5.1.4	VDH	14
5.2	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET”	14
5.2.1	Allmänt	14
5.2.2	Korrosion	15
5.2.3	Mekanisk integritet	16
5.2.4	Barriärfunktion mot radionuklidtransport vid defekt kapsel	16
5.2.5	Rangordning – ”Långsiktig funktion och säkerhet”	17
5.3	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”TEKNIK”	18
5.3.1	Allmänt	18
5.3.2	KBS-3 och MLH	19
5.3.3	VLH	19
5.3.4	VDH	20
5.3.5	Rangordning – ”Teknik”	20

5.4	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”KOSTNADER”	20
5.4.1	Allmänt	20
5.4.2	Kostnader	21
5.5	RANGORDNING AV KAPSLAR	23
5.5.1	KBS-3 och MLH	23
5.5.2	VLH	24
5.5.3	VDH	24
6	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEM	25
6.1	DEFINITION AV JÄMFÖRDA SYSTEM	25
6.2	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”TEKNIK”	25
6.2.1	Allmänt	25
6.2.2	Hierarkisk struktur i Etapp 2	26
6.2.3	Riktlinjer till expertgruppen	26
6.2.4	Resultat av ”Expert Judgement”	27
6.2.5	Diskussion	27
6.2.6	Rangordning – ”Teknik”	28
6.3	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET”	28
6.3.1	Allmänt	28
6.3.2	Analysgång	28
6.3.3	Jämförelse av individuella barriärer	29
6.3.4	Jämförelse av förvarssystem	36
6.3.5	Rangordning – ”Långsiktig funktion och säkerhet”	38
6.4	JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”KOSTNADER”	38
6.4.1	Allmänt	38
6.4.2	Förutsättningar i kalkylerna	38
6.4.3	Kalkylresultat	42
6.4.4	Diskussion	42
6.4.5	Rangordning – ”Kostnader”	45
7	SLUTSATSER	47
7.1	RANGORDNING AV KAPSELALTERNATIV	47
7.2	RANGORDNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEM	47
7.3	RESULTATET AV PASS	49
	REFERENSLISTA	51
	BILAGA 1	
	KBS-3-SYSTEMET	
	BILAGA 2	
	SYSTEMET MEDELLÅNGA TUNNLAR, MLH	
	BILAGA 3	
	SYSTEMET LÅNGA TUNNLAR, VLH	

BILAGA 4

SYSTEMET DJUPA BORRHÅL, VDH

BILAGA 5

PARVISA JÄMFÖRELSE MED ANALYTISK
HIERARKISK PROCESS, AHP

BILAGA 6

RIKTLINJER TILL EXPERTGRUPPEN FÖR "EXPERT
JUDGEMENT" AV "TEKNIK"

BILAGA 7

RESULTAT AV "EXPERT JUDGEMENT" AV
DJUPFÖRVARSSYSTEM MED AVSEENDE PÅ "TEKNIK"

1 INTRODUKTION

I mitten på 70-talet påbörjades i Sverige utvecklingen av system för inkapsling och slutlig förvaring av det långlivade kärnkraftsavfallet. Arbetet resulterade under perioden 1977 till 1983 i en serie rapporter som successivt koncentrerades på inkapsling av det använda bränslet i kopparkapslar samt deponering av dessa på ca 500 m djup i svensk berggrund. Det resulterande konceptet, KBS-3, granskades i detalj av svensk och utländsk expertis på uppdrag av svenska myndigheter. År 1984 fann regeringen att systemet ”i sin helhet i allt väsentligt befunnits kunna godtas med hänsyn till säkerhet och strålskydd”. Därmed var ett av kraven i kärntekniklagen uppfyllt för att ge laddningstillstånd till reaktorerna Oskarshamn 3 och Forsmark 3. Sedan dess har KBS-3-systemet utgjort referenskonceptet i det svenska programmet. Systemet beskrivs detaljerat i /1-1/.

Efter 1984 har SKB utvecklat och utvärderat några av de andra intressanta alternativen med lyckade resultat. Det har varit möjligt att visa att också dessa alternativ har potential för att uppfylla högt ställda säkerhetskrav. Den långsiktiga säkerhetspotentialen har således ej visat sig vara en diskriminerande faktor.

Under 1986 till 1989 utvärderades och jämfördes WP-Cave-systemet med KBS-3-systemet /1-2/. Detta system var då det som hade nått längst i utvecklingen efter KBS-3. Resultatet blev att KBS-3-utformningens fördelar befanns överväga.

Tre andra systemutformningar har därefter utvecklats och analyserats i följande tidsmässiga ordning:

- Förvaring av det använda bränslet på stort djup, från 2 till 4 km under markytan. Systemet har arbetsnamnet Djupa borrhål (Very Deep Holes, VDH) /1-3/;
- Deponering av relativt stora kapslar i långa horisontella tunnlar. Systemet har arbetsnamnet Långa tunnlar (Very Long Holes, VLH) /1-4/;
- Horisontell deponering i parallella tunnlar av samma kapslar som i KBS-3. Förvarssystemet har arbetsnamnet Medellånga tunnlar (Medium Long Holes, MLH). Utformningen beskrivs i bilaga 2.

För respektive förvarssystem finns alternativa kapselutformningar.

I syfte att dels komplettera förståelsen av betydelsefulla funktioner i systemen, dels jämföra systemen med referenskonceptet – KBS-3 – initierades Projekt Alternativ-Studier för Slutförvar (PASS). Projektet inriktning har enbart varit att analysera och utvärdera tekniska/säkerhetsmässiga/ekonomiska frågor. Andra bedömningar av allmän art har ej beaktats.

I föreliggande rapport redovisas i kapitel 4 hur jämförelsen har gått till. De resultat som har erhållits vid jämförelsen av kapselalternativ respektive jämförelsen av förvarssystem redovisas i kapitel 5 och kapitel 6.

Analysen av både kapselalternativ och systemalternativ har identifierat ett stort antal olikheter, som diskuterats inom projektet. I denna slutrapport redovisas endast rubriker och ibland några kommentarer. För detaljer hänvisas till underlagsrapporterna.

2 ANALYSERADE ALTERNATIV

2.1 ALLMÄNT

Fyra förvarssystem har studerats. För vart och ett av dessa har två eller fler kapselutformningar beaktats. Nedan ges en kortfattad presentation av de olika förvarsutformningarna och deras kapselalternativ. Principen för förvarsutformningarna illustreras i Figur 2-1. Några av kapselalternativen visas i Figur 2-2.

Respektive system och därtill hörande kapselalternativ beskrivs i bilagorna 1 (KBS-3), 2 (MLH), 3 (VLH) och 4 (VDH). Beskrivningarna tjänar framför allt tre syften:

- att ge en allmän information om layouter, kapselutformningar, mått, vikter, volymer etc., bl.a. som underlag för deljämförelsen av ”Långsiktig funktion och säkerhet”;
- att beskriva teknik och utrustningar som av projektet ansetts utgöra möjliga lösningar för respektive system och kapselalternativ, och som utgjort bedömningsunderlaget för deljämförelsen av ”Teknik”;
- att ange kostnadspåverkande storheter, framför allt mått för deljämförelsen av ”Kostnader”.

Beskrivningarna gör inte anspråk på att redovisa optimerade lösningar. I flera fall har t.ex. mått valts för att kostnadskalkylerna skulle kunna baseras på likartade förutsättningar. Beskrivningar av metoder har ibland preciserats för att ingen osäkerhet skall råda om förutsättningarna i jämförelserna. Förändringar skulle dock kunna göras utan att för den skull värderingar och bedömningar av systemen och kapselalternativen i deljämförelserna skulle ändras. Uppgifterna i bilagorna skall läsas och bedömas mot denna bakgrund.

2.2 KBS-3

Kapslarna placeras en och en i vertikalt borrarade hål i botten på en deponeringstunnel. Kapslarna omges av tätpackad bentonit.

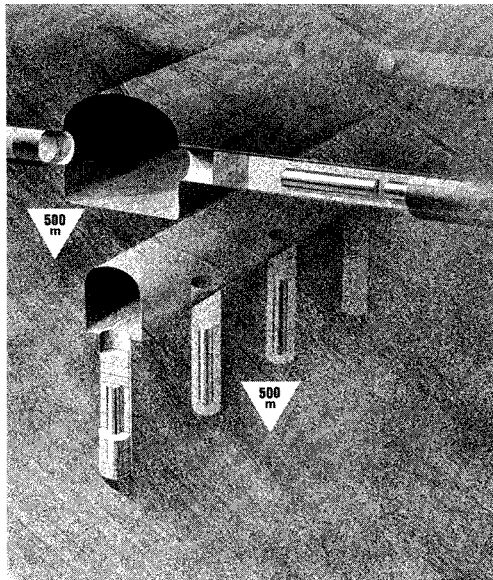
Kapselalternativ

- Koppar/stålkapsel (kompositkapsel; av TVO benämnd ”Advanced Cold Process, ACP”).
- Koppar/blykapsel (fylld med bly).
- Kopparkapsel (Het Isostatisk Pressning, HIP).
- Stål/blykapsel (”Gripsholm”, fylld med bly).
- Stålkapsel.

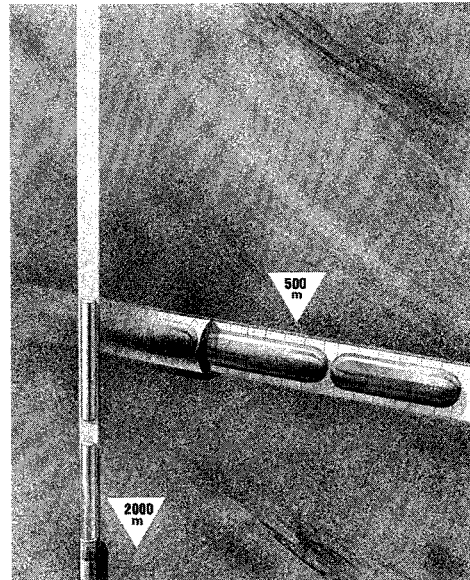
2.3 MEDELLÅNGA TUNNLAR (MLH)

Kapslarna placeras i centrum av horisontella, borrarade tunnlar och omges av tätpackad bentonit.

Kapselalternativen är desamma som för KBS-3-systemet.



KBS-3 och Medellånga tunnlar



Djupa hål och Långa tunnlar

Figur 2-1. Alternativa utformningar av slutförvar.

2.4 LÅNGA TUNNLAR (VLH)

Kapslarna placeras i centrum av långa, fullborrade tunnlar och omges av tätpackad bentonit.

Kapselalternativ

- Koppar/stålkapsel (kompositutformning med halvsfäriska eller plana gavlar).
- Stålkapsel (med halvsfäriska eller plana gavlar).
- Kopparkapsel (med halvsfäriska gavlar, redovisas ej i bilaga 3).

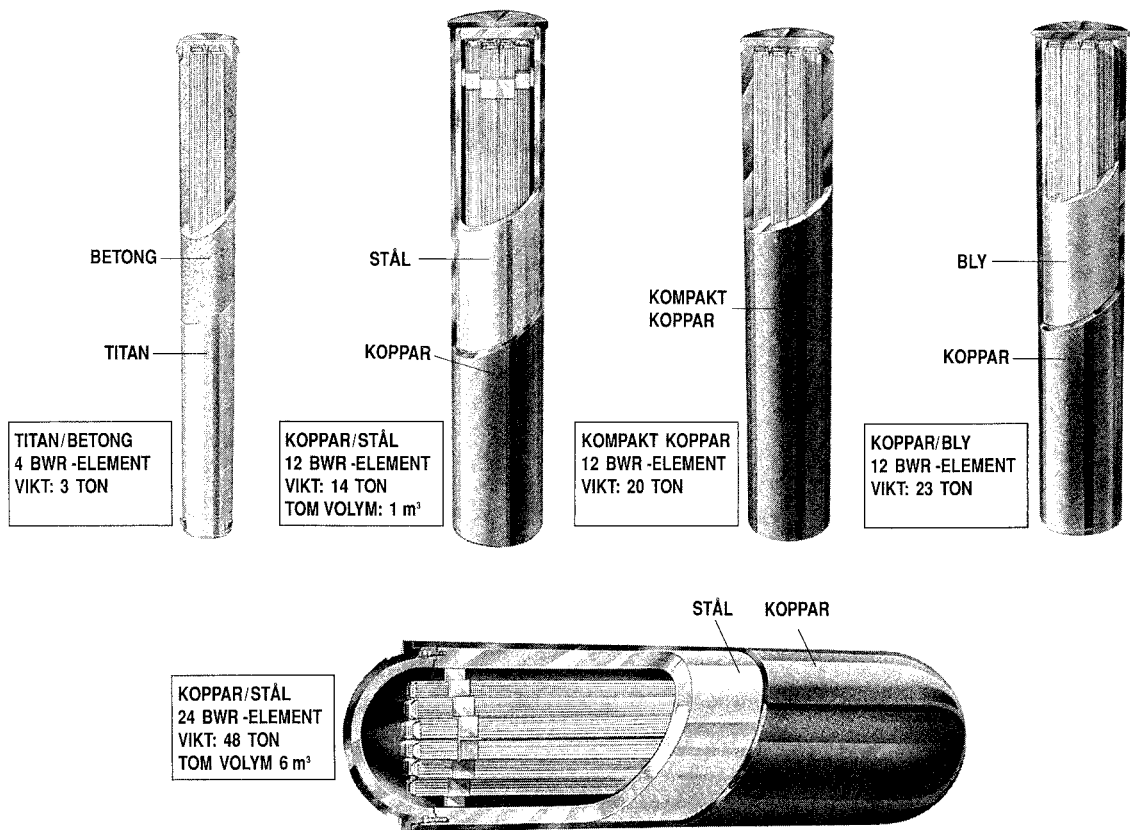
Alla alternativen är självbärande.

2.5 DJUPA BORRHÅL (VDH)

Kapslarna staplas på varandra i djupa hål (2-4 km) omgivna av en bentonitbuffert.

Kapselalternativ

- Titan/betongkapsel, (fylld med betong).
- Kopparkapsel, (HIP).
- Titankapsel, (självbärande, redovisas ej i bilaga 4).



Figur 2-2. Studerade kapselkonstruktioner för de olika alternativa utformningarna av djupförvaret.

3 MÅL

Målen för jämförelserna redovisas nedan och kommenteras med avseende på vad som uppnåtts i projektet.

- 1) **Rangordning av studerade förvarssystem enligt logisk metod som tar hänsyn till identifierade, betydelsefulla olikheter i respektive systems förutsättningar.**
Detta mål har varit det centrala i arbetet. Uppläggnings, värderingar och resultat presenteras i denna rapport.
- 2) **Säkerhetsanalytisk karakterisering av de alternativa djupförvarssystemen.**
Syftet var framför allt att kunna redovisa de studerade systemens säkerhetspotential, om respektive system skulle rangordnas högst och därmed kunna komma ifråga som referenssystem. VLH har analyserats i /3-1/.
I och med att projektet i december 1991 /3-2/ konstaterade att VDH-systemet ej skulle kunna komma ifråga som det högst rangordnade systemet påbörjades aldrig någon speciell säkerhetsanalys för VDH-systemet.

4 RANGORDNINGSMETODIK

4.1 ALLMÄNT

Ett problem vid jämförelse mellan alternativa utformningar är det stora antal skillnader som finns. Dessa har dessutom varierande betydelse. Det är inte möjligt att samtidigt överblicka betydelsen av alla och värdera hur alternativen skall rangordnas inbördes. En systematik är följaktligen nödvändig att använda. I PASS har arbetet organiserats efter en hierarkisk problemstrukturering, som beskrivs nedan.

4.2 HIERARKISK STRUKTUR VID JÄMFÖRELSEN

4.2.1 Problemstrukturering

Principen för den hierarkiska strukturen framgår av Figur 4-1. Överst finns det mål som skall uppnås och därunder en nivå med de element som ingår i målet och som påverkar valet. Varje element kan delas upp på en eller flera lägre nivåer.

I basen på strukturen finns de alternativ man väljer mellan för att på bästa sätt nå det uppställda målet.

I PASS finns två hierarkiska strukturer: en för rangordning av kapselalternativen och en för rangordning av djupförvarssystemen.

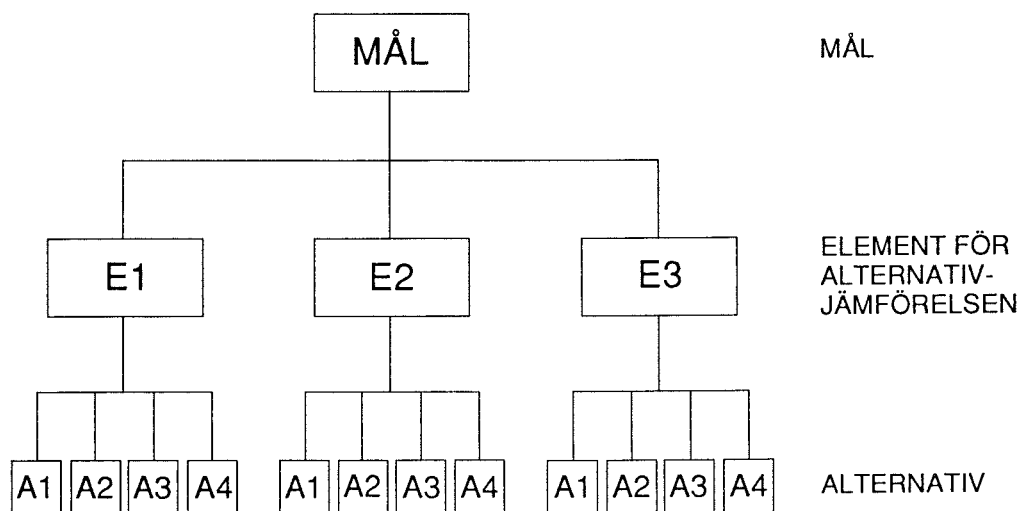
4.2.2 Mål

Huvudmålen i PASS är ”Kapsel för djupförvaring av det använda kärnbränslet” (kapseljämförelsen) respektive ”System för djupförvaring av det använda kärnbränslet” (jämförelsen av djupförvarssystem).

Också delmål har definierats, vilka utgör mål för deljämförelser och delrangordningar av såväl kapselalternativ som djupförvarssystem. Följande tre delmål särskiljs:

- ”Teknik”. Omfattningen berör metoder och processer för att åstadkomma produkten (kapsel och djupförvaring) med den kvalitet som erfordras för att uppnå den erforderliga, långsiktiga funktionen.
- ”Långsiktig funktion och säkerhet”. Omfattningen berör fastställda krav och kriterier samt den känslighet olika barriärers funktioner har mot existerande osäkerheter och mot varierande händelser i den geologiska miljön i förvaret efter förslutning.
- ”Kostnader”. Omfattar alla frågor och faktorer som i princip skiljer systemen åt genom att billigare eller dyrare metoder eller utrustningar kan väljas.

Det finns många metoder för att underlätta val mellan alternativ vid komplexa jämförelser liknande den i PASS. De ovan beskrivna uppdelningen på ”Teknik”, ”Långsiktig funktion och säkerhet” samt ”Kostnader” bygger framför allt på de erfarenheter som presenteras i /4-1/.



Figur 4-1. Principen för hierarkisk structurering.

4.2.3 Hierarkiska nivåer för jämförelsen

Deljämförelsen under "Teknik" och "Långsiktig funktion och säkerhet" har strukturerats med olika antal hierarkiska nivåer. Strukturen som gäller för deljämförelsen av "Långsiktig funktion och säkerhet" med avseende på kapslar framgår av Figur 5-1 och med avseende på förvarssystem av Figur 6-3. Strukturen i jämförelsen av "Teknik" med avseende på kapslar respektive förvarssystem framgår av Figur 5-2 respektive 6-1.

Deljämförelserna av "Kostnader" har genomförts med hjälp av konventionella kostnadskalkyler för respektive alternativ.

4.3 RANGORDNINGSTEG

I en första fas rangordnades kapselalternativen för respektive förvarssystem, varefter de högst rangordnade kapselalternativen kombinerades med respektive förvarsalternativ. I en andra fas jämfördes och rangordnades sedan dessa kombinationer. På så sätt kom jämförelsen av förvarssystemen att omfatta endast fyra alternativ.

Såsom framgår nedan resulterade kapseljämförelsen i samma, principiellt lika utformning för KBS-3, MLH och VLH, medan för VDH det ekonomiskt fördelaktigaste alternativet prioriterades. Härigenom uppstod inga olikheter i förutsättningarna beträffande kapselval mellan förvarssystemen på ca 500 m djup. Skillnaden i kapselval mellan dessa system och VDH beaktas diskussionsmässigt. (Denna visar sig ej ha någon påverkan på utfallet av jämförelsen mellan förvarssystemen.)

4.4 FÖRUTSÄTTNINGAR VID JÄMFÖRELSEN

Utgångsläget var att beskrivningarna av KBS-3, VLH och VDH i de aktuella referenserna /4-2, 4-3, 4-4/ gjorts för olika syften. I /4-2/ är avsikten att redovisa ett underlag för kostnadsberäkningar, så att dessa ej underskattas. I /4-3/ och /4-4/ är syftet att utreda systemens tekniska förutsättningar och möjligheter. Ett exempel är att VLH i /4-3/ utformats med tillfart via en brant ramp och ej via schakt som i KBS-3 /4-2/. Ett annat exempel är att i /4-3/ förordas användandet av fuktmättad bentonit i VLH, medan PLAN 92 /4-2/ för KBS-3 förutsätter icke fuktmättad bentonit (påverkar framför allt "Teknik" och "Kostnader").

Där det har varit möjligt har man i PASS utgått från likartade förutsättningar, så att "onödiga" skillnader eliminerats, även om detta i några fall inneburit att referensutformningen fått parametrar som inte är optimala för det systemet. För de ovan nämnda exemplen blev lösningen att välja rampnerfart respektive fuktmättad bentonit i alla tre systemen på 500 m djup.

En annan olikhet i förutsättningarna är att VLH i första hand redovisas som ett långsträckt förvar /4-3/. Det påpekas emellertid också att VLH kan utformas så att deponeringstunnlarna görs kortare, placeras parallellt och anpassas till bergblock på samma sätt som t.ex. KBS-3. Den bergblocksanpassade layouten värderas i diskussionen av resultaten från jämförelsen.

5 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AV KAPSELALTERNATIV

5.1 JÄMFÖRDA KAPSELALTERNATIV

5.1.1 Allmänt

I kapitel 2 ”ANALYSERADE ALTERNATIV” nämns ett flertal olika kapselalternativ som beaktats i PASS. I några fall har det vid närmare granskning visat sig att alternativet inte har de förutsättningar som från början antogs. Dessa alternativ har då avskrivits och ej tagits med i den slutliga jämförelsen, såsom framgår nedan.

Skillnaden mellan plana eller halvsfäriska gavlar har inte analyserats i detalj (gäller VLH). Alternativ som ursprungligen presenterades med båda utförandena har betraktats som ett alternativ i studien. Detta är endast en optimeringsfråga utan betydelse för jämförelsen i PASS.

5.1.2 KBS-3 och MLH

För förvarssystemen KBS-3 och MLH har såväl stålkapslar som kopparkapslar av olika utformning analyserats. De presenteras i bilaga 1 (B1).

Stålalternativet representeras av två kapseltyper

- en självbärande stålkapsel (Figur B1-6), och
- en tunnväggigare stålkapsel (Figur B1-5), som blyfyllts för att få önskad mekanisk stabilitet och dessutom ytterligare en barriärfunktion.

Kopparalternativet representeras av tre kapselutformningar

- en koppar/stålkapsel, bestående av ett yttre kopparhölje över en inre stålkapsel, som ger konstruktionen mekanisk stabilitet (Figureerna B1-2a/b),
- en kopparkapsel, som blyfyllts för att få önskad mekanisk stabilitet (Figureerna B1-3a/b),
- en solid kopparkapsel som tillverkas genom het isostatisk pressning (HIP) av kopparpulver (Figureerna B1-4a/b).

5.1.3 VLH

Detta förvarssystem, med deponering i fullortsborrade tunnlar, förutsätter kapslar med stor diameter. Endast självbärande konstruktioner har studerats. En koppar/stålkapsel med halvsfäriska respektive plana gavlar visas i figureerna B3-2a/b respektive B3-3 (bilaga 3). En alternativ utformning är en stålkapsel utan kopparhölje enligt samma figurer.

Blyfyllda kapslar och HIP-kapslar har inte övervägts, därför att de bedömts bli alltför tunga för en rationell hantering.

En självbärande kopparkapsel visade sig ej kunna motstå krypdeformation även om väggarna görs oekonomiskt tjocka, varför denna kapseltyp ej tagits med i den slutliga jämförelsen.

5.1.4 VDH

I detta förvarssystem baseras säkerheten i första hand på bergets barriärfunktion. Kapseln livslängd har här en mer underordnad roll jämfört med förvar på ca 500 m djup. Två kapselmaterier har analyserats:

Titankapsel med betongfyllning, se Figur B4-2, med antingen hela bränsleelement eller konsoliderat bränsle.

Solid kopparkapsel framställd med het isostatisk pressning (HIP) av kopparpulver.

Ny information från AECL, Kanada, /5-1/ har givit vid handen att titan har en sämre hållfasthet än den som antogs i /5-2/. Detta betyder att en kapsel utan inre stöd måste göras av så tjockt gods att kapselalternativet blir ekonomiskt ointressant.

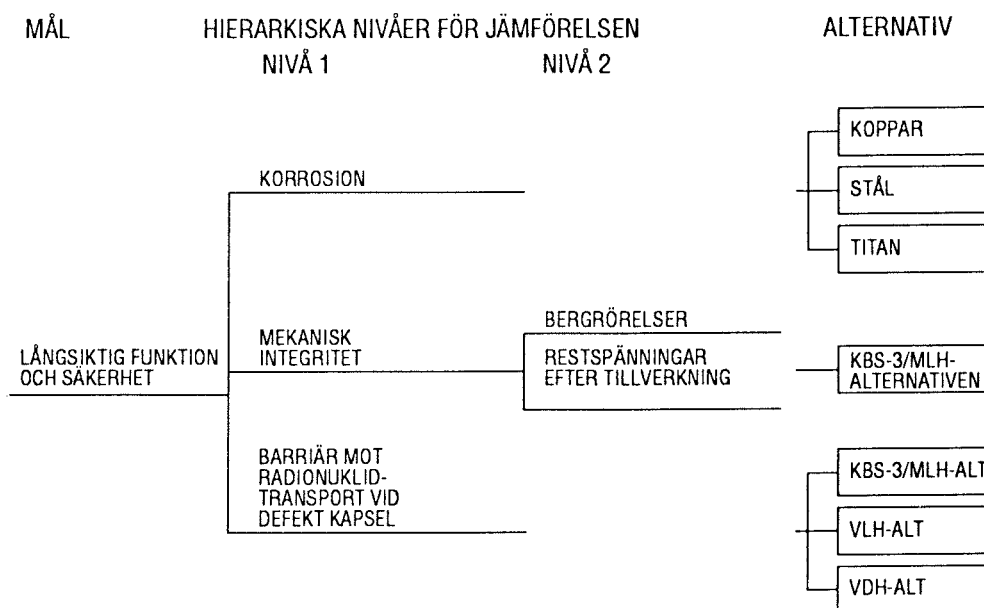
En blyfylld titankapsel ger inga tekniska, säkerhetsmässiga eller kostnadsmässiga fördelar jämfört med en betongfylld titankapsel.

Självbärande titankapsel och blyfylld titankapsel har därför ej tagits med i den slutliga jämförelsen.

5.2 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET”

5.2.1 Allmänt

Frageställningarna har ordnats efter den hierarkiska princip som beskrivs i kapitel 4 ”RANGORDNINGSMETODIK”. Strukturen illustreras i Figur 5-1.



Figur 5-1. Hierarkisk struktur för deljämförelse av kapselalternativ med avseende på "Långsiktig funktion och säkerhet".

5.2.2 Korrosion

Korrosionsutvärderingen är väsentligen oberoende av förvarsutformning. För systemen KBS-3, MLH och VLH är den kemiska miljön i förvaret i stort sett identisk eftersom förvarsdjupet är detsamma, ca 500 m. För stora förvarsdjup, som i VDH, är kunskaperna om grundvattenkemin mycket begränsad. Den information som finns tillgänglig tyder på att saltkoncentrationen på dessa djup kan vara mycket hög, upp till 20 % /5-3/. Dessutom är förvarstemperaturen högre än i de andra alternativen, 120°C till 150°C (beroende på om hela bränsleelement eller konsoliderat bränsle används /5-2/), jämfört med ca 100°C.

Koppar

KBS-3, MLH och VLH

En sammanfattning av kunskapsläget för kopparkorrosion har gjorts i /5-4/. Utredningen bekräftar slutsatserna från KBS-3-rapporten, dvs att inga korrosionsprocesser kunnat identifieras som skulle kunna leda till kapselgenombrott. En kapsel med 50 mm tjockt kopparhölje kommer att ur korrosionssynpunkt ha en livslängd på flera miljoner år.

VDH

Kopparkapseln för VDH-alternativet har inte kunnat utredas fullständigt eftersom grundvattenkemin på flera kilometers djup är i stort sett okänd. Flera faktorer, som höga kloridhalter och höga temperaturer, talar för att korrosionslivslängden kan vara nedsatt jämfört med livslängden i ett förvar på ca 500 m djup.

Stål

Stål är inte som koppar termodynamiskt stabilt i vatten. En stålkapsel kommer därför att ha en betydligt kortare livslängd än en kopparkapsel. Detta betyder inte med nödvändighet att en stålkapsel skulle vara säkerhetsmässigt oacceptabel. En analys av gropfrätning på stål har visat att den föreslagna stålkapseln skulle ha en förväntad livslängd på flera tusen år /5-5/.

En del osäkerheter kvarstår emellertid för stålalternativet. Det gäller främst vätgasutvecklingen i samband med korrosionen under reducerande förhållanden och tryckuppbyggnaden kring kapseln orsakad av bildningen av korrosionsprodukter. Den senare frågan kan lösas genom att kapseln ges ett tunnare stålhölje, som då måste stödjas mekaniskt. Ett förslag är att mekanisk stabilitet åstadkommes genom blyfyllning. Blyets korrosionsbeständighet är ofullständigt utredd, men en blyfylld stålkapsel bedöms kunna isolera bränslet längre än en ren stålkapsel.

Titan

Titan är ett av huvudalternativen i det kanadensiska programmet. Data och slutsatser från den kanadensiska undersökningar är i viss utsträckning tillämpliga på VDH-alternativet. Det kanadensiska förvaret förutsätts ha höga kloridhalter och höga temperaturer. Under dessa förhållanden är spaltkorrosion på titan möjlig. Data och analyser utförda av AECL förutsäger kapsellivslängder på 1 200 till 7 000 år /5-6/. Baserat på dessa analyser bedöms en titankapsel i ett VDH-förvar ha en livslängd på i storleksordningen 1 000 år.

Slutsatser – korrosion

Koppar ger den avgjort längsta kapsellivslängden. Mot bakgrund av de långa tidsperioderna fram till kapselgenombrott har ingen inbördes rangordning gjorts mellan de olika kopparalternativen för KBS-3, MLH och VLH.

Trots osäkerheterna i förvarsmiljö för VDH bedöms HIP- kapseln ur korrosionsynpunkt vara att föredra framför titankapseln.

5.2.3 Mekanisk integritet

Under de senaste två åren har frågor rörande kapselns mekaniska integritet studerats mer ingående av en grupp om fem svenska experter från industri och högskolor /5-7/. De problemställningar som utretts har i första hand rört effekterna på en kapsel efter en bergförskjutning, restspänningar i kopparkapslar efter förslutning och krypdeformation och kryprelaxation av spänningstillstånd i kopparhöljet.

Begrörelser

Modellberäkningar visade att bergörelser på upp till 100 mm inte kommer att utgöra något hot mot någon av kapslarnas integritet. Koppar/stålkapseln deformeras minst, med en maximal töjning i kopparhöljet på ca. 1 %. Motsvarande värde för HIP-kapseln var ca. 4%. Den blyfyllda kapseln analyserades inte, men bedöms var mer känslig för deformation än de två övriga alternativen.

Restspänningar efter tillverkning

Restspänningar efter förslutning av kapslarna har beräknats för både svetsade koppar/stålkapslar och för HIP-kapslar. Vid svetsad förslutning kommer den maximala spänningen att ligga i intervallet 70 MPa till 100 MPa, beroende på gapet mellan det yttre kopparhöljet och den inre stålcyllindern. För HIP-kapslar är motsvarande maximala värde ca 90 MPa, men med en restspänning på ca 50 MPa längs hela kapselytan. Spänningarna är koncentrerade till svetsområdet för koppar/stålkapseln. I båda dessa fall kommer en betydande del av spänningarna att snabbt relaxera genom krypdeformation. Restspänningarna för blyfyllda kapslar bedömdes ligga på jämförbara nivåer.

Spänningsnivåerna för samtliga studerade kapselalternativ är så låga att det inte föreligger någon risk för krypbrott oavsett vilken kopparkvalitet som används.

Slutsatser – mekanisk integritet

De fem experternas sammanfattande bedömning var att koppar/stålkapseln ur mekanisk synpunkt var det mest fördelaktiga alternativet bland kopparkapslarna.

5.2.4 Barriärfunktion mot radionuklidtransport vid defekt kapsel

KBS-3 och MLH

I ett normalt fungerande slutförvar med kopparkapslar eller blyfyllda stålkapslar kommer inga radionuklider att transporteras ut förrän efter en mycket lång tidsperiod. Skillnaderna i barriärfunktion mellan dessa kapslar blir därför bara intressant om någon kapsel är defekt. Den rena stålkapseln har en mer begränsad livslängd och har därför en klart sämre barriärfunktion än de övriga.

För scenariot att någon kapsel är defekt ger den blyfyllda kopparkapseln ett jämförelsevis bättre skydd mot utläckage av radionuklider. Blyfyllningen som sådan är nämligen en effektiv barriär. Om kopparhöljet skulle vara defekt erbjuder blyet ett i princip lika gott korrosionsskydd. I det fall att grundvatten ändå skulle nå fram till någon del av bränslet, förhindrar blyet lakning av hela inventariet på en gång, vilket potentiellt minskar utläckaget av spalt- och korngränsinventariet.

För samma scenario har HIP-kapseln i princip samma egenskaper som den blyfyllda kopparkapseln, men har ej två olika material som korrosionsskydd.

Kompositkapseln är lika långlivad som den blyfyllda kopparkapseln och HIP-kapseln, men har inte samma potential att förhindra utläckage av radionuklider vid en eventuell skada. Om den yttre kopparkapseln av någon anledning genombryts kommer vatten att nå fram till den inre stålkapseln, vilken kommer att korrodera. Korrosionsprodukternas svällning kan potentiellt förvärra defekten på kopparhöljet. Om koppar/stålkapseln fylls med vatten kommer alla bränslestavar i kapseln att direkt vara i kontakt med vatten. I sådant fall kommer dock zirkaloykapslingen att förhindra att hela bränsleinventariet lakas samtidigt. Detta scenario innehåller även potentiellt ett problem med långsam gasbildning genom reaktion mellan vatten och stål. Detta problem kräver ytterligare studier.

Mycket litet arbete har lagts ned på att utvärdera en defekt, blyfylld stålkapsels förmåga att förhindra utläckage av radionuklider. Bly är som tidigare nämnts mycket motståndskraftigt mot korrosion under reducerade förhållanden, vilka garanteras av stålhöljet. Livslängden med avseende på korrosion kan därför i det närmaste jämföras med kopparalternativen. Däremot har stålet i sig ringa barriärfunktion. I en defekt kapsel kommer bara en liten del av bränslet att vara i kontakt med grundvattnet. Stålet kan ge problem med gasbildning. Däremot förväntas inte korrosionsprodukterna ge några problem med hänsyn till den tunna väggtjockleken.

Den rena stålkapseln har en begränsad livslängd (1 000-10 000 år), vilket medför att samtliga kapslar så småningom kommer att läcka samtidigt. Detta gör att säkerhetsmarginalerna för denna kapsel blir avsevärt lägre än hos de övriga.

VLH

För koppar/stålkapseln respektive stålkapseln blir förhållandena likvärdiga med de för motsvarande alternativ i KBS-3/MLH.

VDH

Förhållandena under deponeringen är sådana att det ej bedöms möjligt att garantera att kapslarna är intakta efter deponeringen. Någon skillnad härvidlag finns ej mellan kapselalternativen, vilket gör att både betongfylld titankapsel och HIP-kapseln betraktas som likvärdiga i fråga om barriärfunktionen mot radionuklidtransport.

5.2.5 Rangordning – ”Långsiktig funktion och säkerhet”

KBS-3 och MLH

Samtliga kopparkapslar och blyfylld stålkapsel tillgodoser mycket höga säkerhetskrav vad gäller korrosion och skydd mot radionuklidtransport vid defekt kapsel. Den skillnad som finns mellan kopparalternativen är funktionen vid defekter. Eftersom sannolikheten för en genomgående defekt, som gör att vatten tränger innanför kopparhöljet, är mycket liten bedöms alternativen likvärdiga i nämnda avseenden. Ur mekanisk synpunkt bedöms koppar/stålkapseln av koppar/stål vara det mest fördelaktiga alternativet av kopparkapslarna.

Sammantaget bedöms skillnaderna mellan de olika kopparkapslarna ej vara signifikanta utan alla alternativen betraktas som likvärdiga i fråga om ”Långsiktig funktion och säkerhet”. Självbärande stålkapsel rangordnas efter dessa.

Den blyfyllda stålkapseln är alltför dåligt studerad för att kunna rangordnas.

Rangordningen sammanfattas i tabell 5-1.

Tabell 5-1. Bedömd rangordning av studerade kapselalternativ för KBS-3 och MLH beträffande deljämförelsen "Långsiktig funktion och säkerhet". Placering 1 är förmånligast.

KAPSELALTERNATIV	RANGORDNING
Koppar/stål	1
Koppar/bly	1
HIP	1
Stål	4
Stål/bly	*

* kan ej rangordnas på grund av ofullständigt faktaunderlag.

VLH

Utifrån samma bedömningsgrund som för KBS-3/MLH-alternativen förordas koppar/stålnalternativet före stålnalternativet.

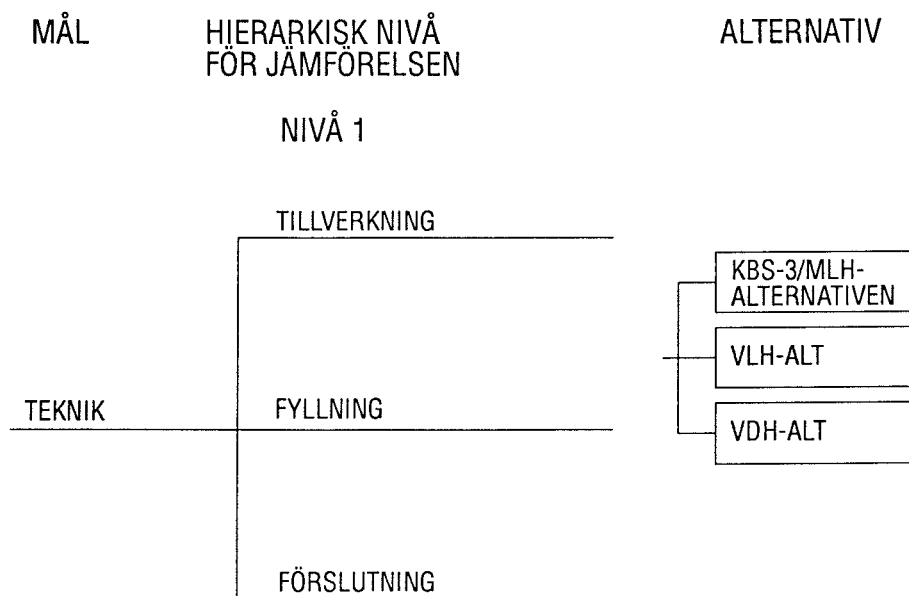
VDH

Alternativen bedöms likvärdiga med hänsyn till osäkerheten beträffande skador under deponeringen.

5.3 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE "TEKNIK"

5.3.1 Allmänt

Den struktur som deljämförelsen följt framgår av Figur 5-2.



Figur 5-2. Hierarkisk struktur för deljämförelse av kapselalternativ med avseende på "Teknik".

Teknik och kostnader för tillverkning av kopparhölje till KBS-3-, MLH- och VLH-kapslar har utretts ingående /5-8/. Övriga bedömningar är grundade på de bästa uppskattningar som kunnat göras utifrån tillgängligt underlag.

5.3.2 KBS-3 och MLH

Eftersom stål är det mest använda av alla konstruktionsmaterial är metoder för tillverkning och förslutning av stålkapslar väl kända och utprovade. Ur tillverknings-teknisk synpunkt är en ren stålkapsel det klart fördelaktigaste alternativet.

Bland kopparalternativen är tillverkning av kapslarna i stort sett identisk. I samtliga fall utgörs det yttre kopparhöljet av en ca 50 mm tjock kapsel, som skall ges mekanisk stabilitet med hjälp av en inre struktur av stål, bly eller isostatpressat kopparpulver. Metoden för tillverkning av kopparhöljet är ännu inte fastställd, men den kommer att grundas bland annat på överväganden som avser svetsbarhet och detekterbarhet av defekter med icke förstörande provning och utgör alltså inte grund för rangordning mellan kapselalternativen i någon väsentlig grad.

Inkapslingen i en koppar/stålkapsel sker utan att kapseln och bränslet utsätts för förhöjda temperaturer, mer än vid förslutningen då en lokal upphettning av kapselns övre del sker. Tillverkning av koppar/stålkapseln kräver att kopparhöljets inre ytor bearbetas till önskade dimensioner med relativt snäva toleranser. Detta är inte nödvändigt för de andra alternativen.

Teknik för blyfyllning har tidigare studerats i modellskala /5-9/. Denna undersökning har kompletterats med en datorsimulering av blygjutning i full skala /5-10/. Datorsimuleringen visar att blygjutning med kontroll av stelningsförloppet är möjlig genom en kombination av kylning och värmning i sektioner längs kopparkapseln. Utredningen visar också att styrningen av processen kan komma att bli komplicerad. Den kommer dessutom att kräva utvecklingsinsatser i fullstor skala. Svetsningen av en blyfylld kapsel, med risk för återsmältning av bly, kan också visa sig vara mer svårkontrollerad än svetsning av en koppar/stålkapsel.

Het isostatisk pressning av kopparpulver innebär en hantering med höga tryck och temperaturer i hot-cell- miljö. Processen leder också till en kapsel ur vilken det är mycket svårt, om ens möjligt, att återta bränslet. Som visats tidigare är renhetskraven på kopparpulver höga om isostatpressningen skall ge koppar med mekaniska egenskaper motsvarande kopparen i det yttre höljet /5-11/. Antagligen kommer det att krävas en hantering av kopparpulvret i en icke oxiderande atmosfär /5-12/. Det kan därför inte uteslutas att en inkapslingsstation för het isostatpressning av kapslar måste innehålla en atomiseringsutrustning på plats.

För blyfylld stålkapsel finns samma principiella svårigheter som för den blyfyllda kopparkapseln. Blyfyllningsprocessen kan emellertid visa sig lättare att styra om ytterhöljet är av stål, eftersom stål har lägre värmeledningsförmåga än koppar. Kapselns lock behöver inte svetsas vilket underlättar tillverkningen avsevärt.

5.3.3 VLH

Situationen för VLH är mycket lika systemen KBS-3 och MLH. En ren stålkapsel är tillverknings-tekniskt det enklaste alternativet. Endast en typ av kopparkapsel, koppar/stålkapseln, har beaktats.

5.3.4 VDH

Ur teknisk synpunkt är alternativet med betongfylld titankapsel och hela bränsleelement det enklaste alternativet. Om konsoliderat bränsle skall användas måste inkapslingsstationen kompletteras med utrustning för demontering av bränsleelement.

För het isostatpressad kopparkapsel gäller samma överväganden som diskuterades under avsnitt 5.3.2, **KBS-3 och MLH**.

5.3.5 Rangordning – ”Teknik”

KBS-3 och MLH

Ur tillverkningsteknisk synpunkt är en ren stålkapsel det fördelaktigaste alternativet för KBS-3 och MLH (och även VLH).

Bland de alternativa kopparkapslarna sätts koppar/stålkapseln främst. Även om ytterligare utvecklingsarbete kvarstår vad gäller förslutning och icke förstörande provning, är tekniken i stort sett känd och etablerad. Blygjutning innebär att ytterligare en process krävs i inkapslingsstationen och att det använda bränslet utsätts för förhöjd temperatur. Alternativet het isostatisk pressning placeras lägst med hänsyn till kraven på höga tryck, hög temperatur, krav på kopparpulver av hög renhet och svårigheterna med att reparera defekta kapslar eller återta bränsle.

Rangordningen sammanfattas i tabell 5-2.

Tabell 5-2. Bedömd rangordning av studerade kapselalternativ för KBS-3 och MLH beträffande deljämförelsen ”Teknik”. Placering 1 är förmånligast.

KAPSELALTERNATIV	RANGORDNING
Koppar/stål	2
Koppar/bly	4
HIP	5
Stål	1
Stål/bly	2

VLH

Av samma skäl som anges för KBS-3- och MLH-alternativen placeras den rena stålkapseln före koppar/stålkapseln.

VDH

För VDH är en betongfylld titankapsel för hela bränsleelement det teknisk enklaste alternativet. Konsolidering av bränsle innebär ytterligare ett processteg vid inkapslingen och för het isostatisk pressning gäller samma svårigheter som angivits ovan.

5.4 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”KOSTNADER”

5.4.1 Allmänt

Kostnadsjämförelsen har gjorts för enbart de poster som finns under ”Inkapslingsstationen” i /5-13/, vilka omfattar investerings-, drifts- och rivningskostnader. Vikt- och

dimensionsskillnader mellan kapselalternativen (för samma förvarssystem) leder inte till några betydelsefulla kostnadsskillnader hos andra anläggningsdelar (industriområde och djupförvar).

I kalkylarbetet har man utgått ifrån kalkylen i /5-13/ (KBS-3-systemet med blyfylld kopparkapsel). De poster som förändras har lagts till eller dragits ifrån. Kostnaderna för tillverkning av kapslar är i kalkylen mer osäkra än övriga kostnader genom att de till stor del endast skattats i relation till kostnaden i /5-13/.

Kostnaderna har fördelats i tiden för att nuvärdet skall kunna beräknas. Drifttiden har satts till 20 år oberoende av förvarssystem eller kapselalternativ.

5.4.2 Kostnader

KBS-3 och MLH

De kalkylerade kostnaderna framgår av tabell 5-3.

Tabell 5-3. Sammanställning av beräknade kostnader för inkapslingsstationen för KBS-3/MLH-kapslar; totala summan och nuvärdet per januari 1992 för en diskonteringsränta på 2,5%

KAPSELAL- TERNATIV	TOTAL KOSTNAD MKr	JÄMF.- FAKTOR	NUVÄRDE 2,5% MKr	JÄMF.- FAKTOR
Koppar/ stål	6 800	1,31	3 050	1,24
Koppar/bly	6 800	1,31	3 100	1,27
HIP	6 100	1,17	2 800	1,14
Stål	5 400	1,04	2 500	1,02
Stål/bly	5 200	1,00	2 450	1,00

Av tabell 5-3 framgår att de båda stålalternativen har ungefär samma kostnad och är billigast. Kopparalternativen koppar/stål och koppar/bly, som också är likvärdiga ur kostnadssynpunkt, är dyrast. HIP-alternativet intar en mellanställning.

Det kan vara överraskande att stål/bly-kapseln inte är dyrare än den rena stål-kapseln, men förklaringen är att stål-höljet i stål/blykapsel är en kommersiell rörprodukt som kan fås till låg kostnad. Bly betingar i sig en måttlig kostnad per ton.

Kopparalternativen är som väntat dyrast. HIP utgör det billigaste av dem, vilket förklaras av att endast en tunnväggig kopparbehållare behövs (kopparpulver fyller ut tomvolymen före pressningen).

Denna ordning mellan alternativen beaktar de osäkerheter som kostnaderna för de tomma kapslarna är förknippade med.

Rangordningen framgår av tabell 5-4.

Tabell 5-4. Rangordning av studerade kapselalternativ för KBS-3 och MLH beträffande deljämförelsen "Kostnader". Placering 1 är förmånligast.

KAPSELALTERNATIV	RANGORDNING
Koppar/stål	4
Koppar/bly	4
HIP	3
Stål	1
Stål/bly	1

VLH

De kalkylerade kostnaderna framgår av tabell 5-5.

Tabell 5-5. Sammanställning av beräknade kostnader för inkapslingsstationen för VLH-kapslar; totala summan och nuvärdet per januari 1992 för en diskonteringsränta på 2,5%

KAPSEL- ALTERNATIV	TOTAL KOSTNAD MKr	JÄMF.- FAKTOR	NUVÄRDE 2,5% MKr	JÄMF.- FAKTOR
Koppar/ stål	8 800	1,17	3 850	1,15
Stål	7 500	1,00	3 350	1,00

Skillnaden mellan koppar/stål-utformningen och den rena stål kapseln är ca 15%, vilket är mindre än skillnaden mellan motsvarande kapselalternativ för KBS-3/MLH.

VDH

De kalkylerade kostnaderna framgår av tabell 5-6.

Tabell 5-6. Sammanställning av beräknade kostnader för inkapslingsstationen för VDH-kapslar; totala summan och nuvärdet per januari 1992 för en diskonteringsränta på 2,5%

KAPSEL- ALTERNATIV	TOTAL KOSTNAD MKr	JÄMF.- FAKTOR	NUVÄRDE 2,5% MKr	JÄMF.- FAKTOR
Betongfylld titan, ej konsol. elem.	7 000	1,00	3 150	1,00
Betongfylld titan, konsol. element	7 100	1,01	3 350	1,06
HIP, ej konsol. elem.	6 900	0,97	3 300	1,05

De totala kostnaden är ungefär lika stor för alla alternativen medan nuvärdet är lägst för den betongfyllda titankapseln med ej konsoliderade bränsleelement.

Notabelt är att kostnaderna (nuvärdet) är något förmånligare för inkapsling av ej konsoliderade element jämfört med inkapsling av konsoliderade element, trots att antalet kapslar blir dubbelt så stort.

5.5 RANGORDNING AV KAPSLAR

5.5.1 KBS-3 och MLH

Resultaten av deljämförelserna med avseende på "Långsiktig funktion och säkerhet", "Teknik" och "Kostnader" sammanfattas i tabell 5-7.

Tabell 5-7. Sammanställning av resultaten från de tre deljämförelserna av kapselalternativ för KBS-3 och MLH. Placering 1 är förmånligast.

KAPSELALTERNATIV	LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET	TEKNIK	KOSTNADER
Koppar/stål	1	2	4
Koppar/bly	1	4	4
HIP	1	5	3
Stål	4	1	1
Stål/bly	*	2	1

* kan ej rangordnas på grund av ofullständigt faktaunderlag.

En sammanvägning av de tre deljämförelsernas resultat har lett till att kopparkapslar satts före en ren stål kapsel med hänsyn till skillnaden i korrosionsbeständighet. En ren

stålkapsels betydligt kortare livslängd och de säkerhetsmässiga konsekvenserna av detta har gjort att detta alternativ inte bedöms som lämpligt.

Blyfylld stålkapsel är ännu ofullständigt utredd vad avser blyets korrosionsbeständighet och kapselns mekaniska hållfasthet. Detta gör att detta kapselalternativ inte kan rangordnas med avseende på "Långsiktig funktion och säkerhet".

Bland kopparalternativen har koppar/stålkapseln satts före den blyfyllda kapseln dels av tillverkningstekniska skäl, dels vad gäller bedömningen av kapselns mekaniska integritet. Tillverkningstekniska skäl gör att den het isostatpressade kapseln bedöms som besvärlig.

Slutsatsen är att koppar/stålkapseln rangordnats högst, följd av koppar/blykapseln. HIP-kapseln och stålkapseln placeras efter dessa.

5.5.2 VLH

koppar/stålkapsel - koppar/stål - förordas av korrosionsskäl. (Samma bedömning som för KBS-3 och MLH.)

5.5.3 VDH

Betongfylld titankapsel förordas. För kopparalternativet görs samma bedömning som för HIP-kapsel för KBS-3/MLH.

6 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEM

6.1 DEFINITION AV JÄMFÖRDA SYSTEM

För varje studerat system har en referensutförning valts som utgångspunkt för den inbördes jämförelsen mellan systemen. Dessa referensutförningar beskrivs i bilagorna 1-4 med de syften som anges i kapitel 2. Ytterligare detaljer tas upp där de har betydelse för analysen. Framför allt gäller detta kostnadsjämförelsen.

Kombinationen av förvarssystem och kapselalternativ i respektive referensutförning är en följd av utfallet vid rangordningen av kapslar i kapitel 5. Kombinationerna är:

- KBS-3 med koppar/stålkapsel enligt Figur B1-2a i bilaga 1.
- MLH med koppar/stålkapsel enligt Figur B1-2a i bilaga 1.
- VLH med koppar/stålkapsel enligt Figur B3-2a i bilaga 3.
- VDH med betongfylld titankapsel enligt Figur B4-2 i bilaga 4.

Genom att koppar/stålkapselalternativen ingår i alla de tre systemen på 500 m djup undviks olikheter som annars skulle uppkomma enbart till följd av kapslarnas egenskaper och funktioner. Möjligheten att ersätta koppar/stålkapseln i KBS-3 och MLH med blyfylld kopparkapsel tas upp till särskild diskussion i de sammanhang där denna flexibilitet har betydelse.

Betongfylld titankapsel för VDH betyder att det billigaste alternativet ingår i jämförelsen.

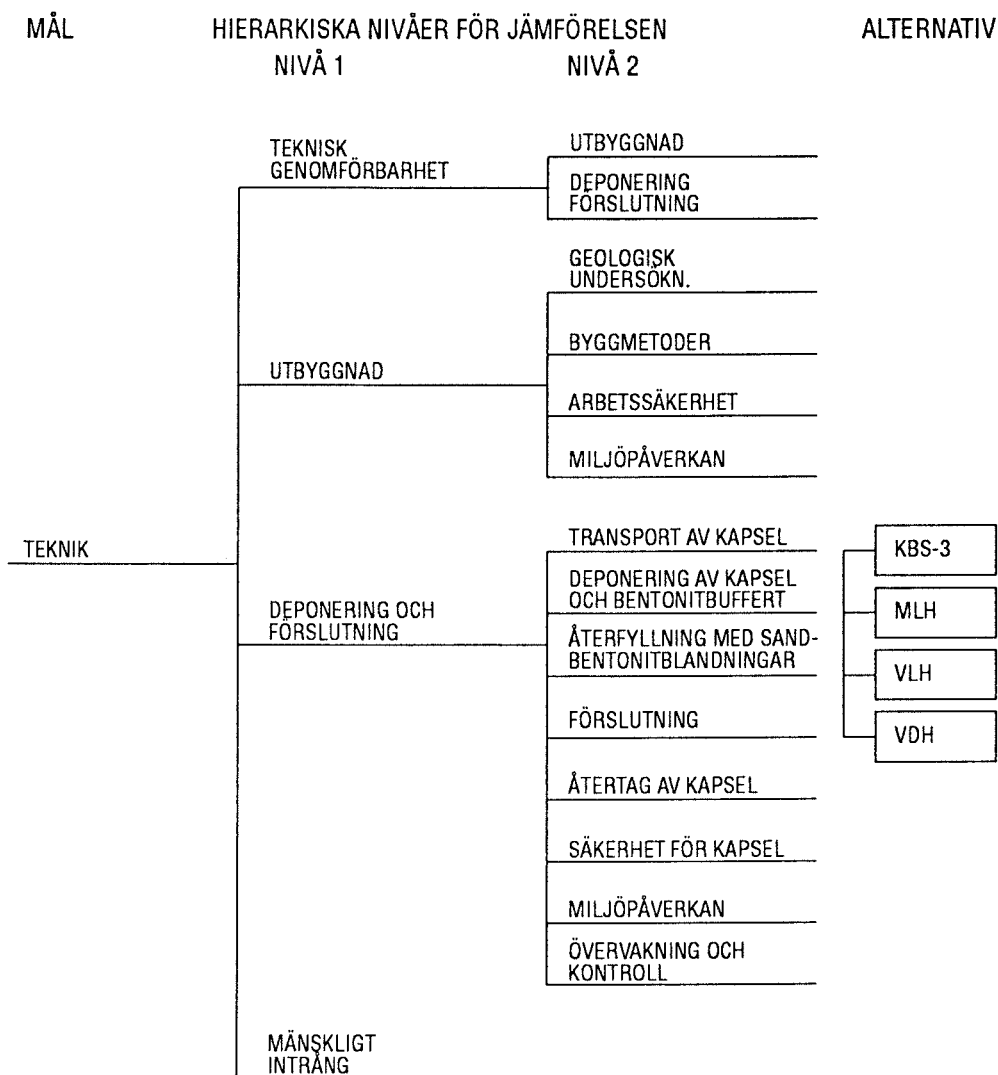
6.2 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”TEKNIK”

6.2.1 Allmänt

Analysen har utförts i två etapper:

Etapp 1: Arbetet avsåg uppdelning av frågeställningarna i nivåer enligt det hierarkiska mönster som presenteras i kapitel 4, samt genomförande av en jämförelse med notering av för- och nackdelar. Detta utfördes av en ensam utredare, varför diskussionen av resultatet delvis kom att präglas av hur pass objektiva de redovisade bedömningarna verkligen kunde antas vara. Den upplagda strukturen av frågeställningarna togs som underlag för rangordningsarbetet i Etapp 2.

Etapp 2: I denna etapp gjordes en jämförelse med hjälp av ”Expert Judgement”. Expertgruppen som utsågs bestod av sex personer (fyra med anknytning till SKB och två med anknytning till TVO). I en första fas granskade experterna individuellt frågeställningarna och den hierarkiska struktureringen. Detta resulterade i en omarbetad version. Var och en genomförde sedan en s.k. parvis jämförelse av element och alternativ. Metoden redovisas kortfattat i bilaga 5. Hela Etapp 2 inklusive utvärderingen presenteras i /6-1/.



Figur 6-1. Hierarkiska strukturen för "Teknik".

6.2.2 Hierarkisk struktur i Etapp 2

Den hierarkiska struktureringen av frågeställningarna framgår av Figur 6-1, och bilaga 6. Elementen på nivå 1 utgörs av följande, delvis tidslogiska steg:

- Teknisk genomförbarhet.
- Utbyggnad.
- Deponering och förslutning.
- Mänskligt intrång (efter förslutning).

Dessa i sin tur delas upp på en undre nivå, nivå 2. Av bilaga 6 framgår att uppdelningen gjordes på ytterligare en nivå, nivå 3.

6.2.3 Riktlinjer till expertgruppen

Förklaringar till varje element och deras uppdelning i undernivåer gavs till experterna som underlag för den parvisa jämförelsen. En komplett uppdelning på alla nivåer samt några av de förklarande kommentarerna framgår av bilaga 6.

6.2.4 Resultat av "Expert Judgement"

Det utvärderade och sammanställda resultatet från experterna sammanfattas i tabell 6-1. Resultatet redovisas mer detaljerat i bilaga 7 och /6-1/.

Tabell 6-1. Resultat från "Expert Judgement" för "Teknik".

SYSTEM	VIKT FÖR ATT UPP- NÅ MÅLET "TEKNIK" MEDELVÄRDE FÖR GRUPPEN	RANGORDNING
KBS-3	0,39	1
MLH	0,27	2
VLH	0,19	3
VDH	0,15	4
Summa	1,00	

Vikterna i tabell 6-1 utgör aritmetiska medelvärden av de sex experternas respektive resultat. Den parvisa jämförelsen bygger på bedömningar av skillnader med poängsättningar mellan 1 och 9, samt en sammanvägning av poängtal till delvikter gentemot målet, se principbeskrivningen i bilaga 5. Delvikterna erhålls i en kvotskala.

Såsom framgår av bilaga 7 har alla 6 experterna samma rangordning som i tabell 6-1 men med någon variation i delvikterna för respektive förvarssystem gentemot målet "Teknik".

6.2.5 Diskussion

Resultatet är entydigt med hänsyn till vilket alternativ som rangordnas högst. Kan detta emellertid bero på att experterna undermedvetet favoriserat det mest "etablerade" systemet? Vid en efterföljande gruppdiskussion med experterna togs denna fråga upp. Härvid framkom att det finns välgrundade motiv för vars och ens bedömning som förklarar varför KBS-3 förordades.

Den främsta förtjänsten med KBS-3 ansåg gruppen var att deponeringen av varje kapsel utgör en avslutad process, medan de övriga systemen medför ett visst beroende mellan den kapsel som deponerats och den som är under deponering. Gruppen ansåg att detta också medför en större flexibilitet för KBS-3 än för de övriga tre systemen.

Anledningarna till att VDH placerades sist är främst de bedömda svårigheterna under deponeringen. Man är osäker på om de kan lösas så att kvalitetskraven uppfylls.

Gruppens åsikter om skillnaderna mellan MLH och VLH går ej att identifiera på basis av det material som föreligger.

6.2.6 Rangordning – ”Teknik”

I enlighet med utfallet såsom det presenteras i tabell 6-1 ges rangordningen för ”Teknik” i tabell 6-2.

Tabell 6-2. Bedömd rangordning av studerade system beträffande deljämförelsen ”Teknik”. Placering 1 är förmånligast.

SYSTEM	RANGORDNING
KBS-3	1
MLH	2
VLH	3

6.3 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE ”LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET”

6.3.1 Allmänt

Utvecklingen av de olika förvarssystemen har resulterat i utformningar som alla bedöms ha potential för att uppfylla högt ställda krav på långsiktig funktion och säkerhet. Jämförelsen och rangordningen i detta kapitel utgår från denna bedömning.

Analysen bygger på kvalitativa jämförelser med målet att redovisa skillnader mellan i de olika förvarssystemen. Dessa bedömningar ligger till grund för den slutliga rangordningen.

I jämförelse med de två etapper som genomförts avseende ”Teknik”, se avsnitt 6.2.1, motsvarar analysen här Etapp 1. Skillnaden är dock den att det slutliga resultatet här baseras på enbart några få, överblickbara värderingar, vilket gör motiven för rangordningen tydligare.

Underlagsmaterialet för jämförelse och rangordning av förvarssystemen avseende långsiktig funktion och säkerhet redovisas i /6-2 / och /6-3/.

6.3.2 Analysgång

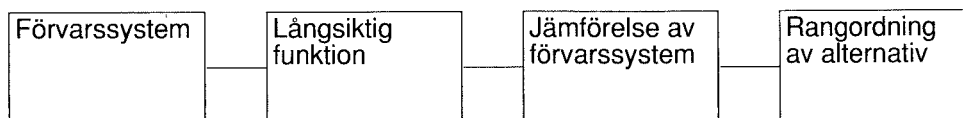
Analysen har utförts i steg enligt schemat i Figur 6-2.

Som ett första steg definierades respektive förvarssystems karakteristiska egenskaper av betydelse för analysen.

Därefter klargjordes systemens och respektive barriärs långsiktiga funktion. Beskrivningarna grundades på det referensscenario som användes i SKB 91-analysen /6-4/. Dessutom analyserades effekterna av glaciationsscenariet och av scenariet ”människt intrång” (efter förslutning).

Jämförelsen av förvarssystemen baserades på de individuella barriärernas funktion i respektive förvarssystem samt det integrerade systemets funktion. Jämförelsen av de individuella barriärerna följer den traditionella uppdelningen i säkerhetsanalyser: närzon (kapsel, bentonitbuffert, berg i närområdet), fjärrzon (berg i fjärrområdet), samt biosfär.

Jämförelsen av det integrerade systemets funktion baserades på skillnader avseende



Figur 6-2. Analysgång vid jämförelse och rangordning avseende "Långsiktig funktion och säkerhet".

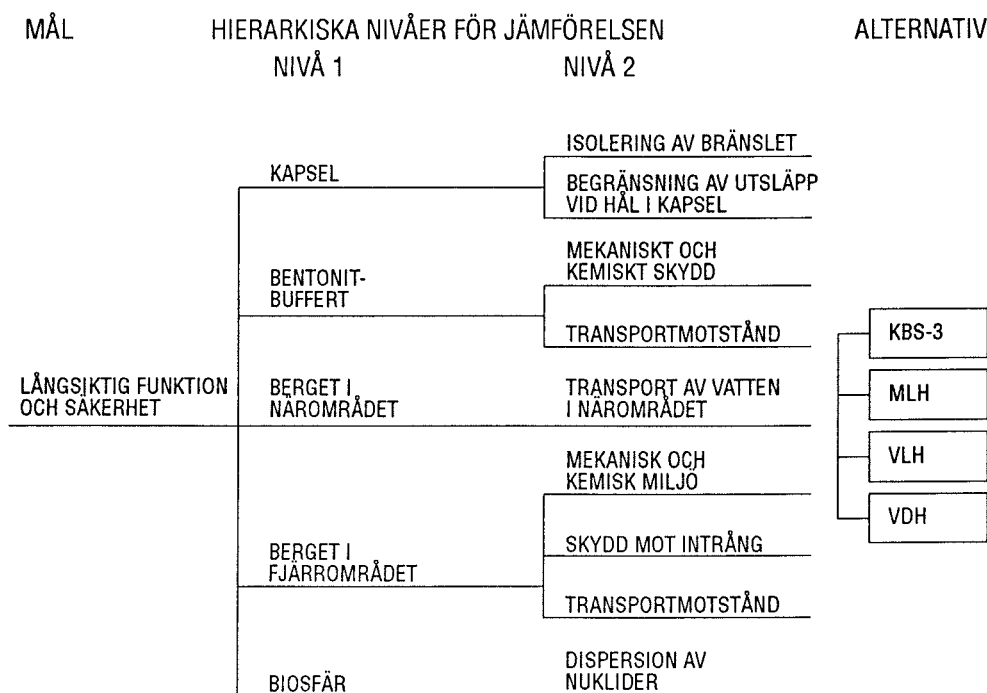
- bedömda doser,
- möjlighet till validering,
- barriärernas robusthet (flerbarriärprincipen),
- känslighet för missöden och extrema händelser.

I den slutgiltiga rangordningen av systemen analyserades om det finns några skillnader i enskilda barriärers eller hela förvarssystemets funktion av betydelse för den långsiktiga säkerheten.

6.3.3 Jämförelse av individuella barriärer

Jämförelsen har följt den struktur som redovisas i Figur 6-3.

Generellt sett är det många karakteristiska egenskaper och tekniska faktorer som påverkar de egenskaper som är betydelsefulla för värderingen av ett systems långsiktiga funktion och säkerhet. Det har därför varit viktigt att systematiskt gå igenom dem och se vilka skillnader som är av betydelse för jämförelsen. Resultatet blev att endast några få bedömdes kunna vara betydelsefulla. Dessa sammanställs i tabell 6-3, och diskuteras nedan. De allra flesta skillnaderna anses ej påverka rangordningen mellan förvarssystemen. Hela genomgången redovisas i /6-3/.



Figur 6-3. Analysschemat för "Långsiktig funktion och säkerhet".

Tabell 6-3. Identifierade mest betydelsefulla skillnader rörande nuklidtransport från defekta kapslar efter förslutning av förvaret. Jämförelsen görs med KBS-3 som norm. o betyder ingen skillnad, "+" betyder fördel och "-" nackdel. Jämförelsen avser referensutformningarna samt kapselalternativ enligt avsnitt 6.1.

AKTIVITET	MLH	VLH	VDH	KOMMENTAR
Trpt i kapsel	-	-	(-)	Ligger horisontellt VLH mer bränsle/kapsel VDH har potentiellt tidigare utsläpp
Trpt i bentonit	-	-	-	Kortare trpt-väg, ingen bentonit/sand som i KBS-3
Trpt i störd zon	+	+	(+)	Dep.tunnel i KBS-3 nackdel
Trpt i fjärrzon	o	-	+	VLH i kontakt med fler regionala sprickzoner. Längre väg i VDH, samt potentiell barriär i salt grundvatten
Biosfär	o	+	+	Större potentiell utspädning för VLH och VDH

Kapsel

Begreppet kapseln omfattar såväl kapselhöljet som eventuell inre fyllning.

Kapselns huvudfunktion är att isolera bränslet från omgivningen under lång tid. Längden av denna tid är en väsentlig parameter i bedömningen av den långsiktiga säkerheten.

Potentiella skillnader i kapsellivslängd

Livslängden bestäms av kapselns och den omgivande bentonitbuffertens egenskaper.

Slutsatsen är att det ej föreligger någon signifikant skillnad i kapsellivslängd mellan KBS-3 och MLH (koppar/stålkapsel) å ena sidan och VLH (koppar/stålkapsel) å andra sidan. Detta baseras på att kapslarna är identiska när det gäller materialval och att den omgivande kemiska miljön är likvärdig – endast kapselstorleken skiljer dem märkbart åt.

Däremot bedöms VDH-kapselns livslängd vara kortare än de övriga systemens, se kapitel 5.

Potentiell skillnad i nuklidutsläpp från kapsel

Den kortare livslängden för VDH-kapseln, i kombination med större risk för skador på kapsel under deponering, leder till ett potentiellt tidigare utsläpp från VDH-systemet och ett i konsekvens härmed större utsläpp av framför allt icke-sorberande nuklider.

Dessutom har konstaterats att en horisontell placering av kapseln (MLH och VLH) är förknippad med risk för större utsläpp än en vertikal placering (stående kapsel KBS-3 och VDH) /6-3/. Anledningen är att ett presumtivt hål i en liggande kapsel (troligast i svetsen) kan hamna i kapselns undre del, varvid en större mängd kontaminerat vatten i kapseln kan tryckas ut av gas. I en vertikalt stående kapsel ligger svetsen i kapselns

översta del och ett eventuellt hål där förknippas ej med samma gasproblematik. Här finns även möjligheten att gasen kan begränsa transporten av radionuklider.

Utvärderingen visar att en presumtiv kapselskada gör mer bränsle åtkomligt i VLH än i KBS-3 och MLH.

Bentonitbuffert

Bentonitbuffert avser här endast den buffert som finns runt omkring själva kapseln. Dess funktion är att

- minimera vattenflödet runt kapseln (motverkar intransport av korrosiva specier löst i grundvattnet och uttransport av radionuklider i lösning från defekt kapsel),
- ge mekaniskt skydd för kapseln mot eventuella rörelser i berget,
- genom sorption minska och fördröja radionuklidtransport.

Bentonitmaterialen har egenskaper som ger bestämda konsekvenser. De av teknisk betydelse är

- bestämd kemisk miljö ifråga om pH etc,
- självläkande effekt vid ev. rörelser i bufferten,
- svällning och inträngning i sprickor i deponeringshålets bergväggar.

Potentiella skillnader i buffertens mekaniska och kemiska skydd

De tekniska förutsättningarna att få bentonitbuffert på plats har ingått i bedömningen under "Teknik" i avsnitt 6.2. Skillnader i långtidsegenskaper hos bentonitbufferten mellan KBS-3 och VLH har i /6-2/ analyserats för ett flertal olika förutsättningar som skulle kunna leda till försämrade egenskaper i bentoniten. Omvandlingen till hydratiserad glimmer och cementering i bufferten kan medföra att den hydrauliska konduktiviteten ökar och att den svällande förmågan minskar. Egenskaperna kan emellertid förändras markant utan att detta får någon allvarlig konsekvens för den långsiktiga säkerheten. Robustheten i buffertfunktionen påverkas däremot. Transportmekanismen genom bentoniten är dock fortfarande diffusion. Det är först om kraftiga rörelser sker i berget, som de ovan nämnda försämrade buffertegenskaperna kan försämma säkerheten. I detta fall förmår leran ej svälla in i öppnade bergsprickor och täta, den är ej heller självläkande.

Eftersom samma materialkvalitet förutsätts användas för alla systemen blir i KBS-3, MLH och VLH den geokemiska miljön likvärdig avseende risken för tillförande av föroreningar under homogeniseringsfasen eller för bentonitomvandling i långtidsperspektivet. Ingen skillnad anses heller föreligga till följd av vertikal eller horisontell placering av kapseln; bentoniten bär en stående kapsel, som visats i Stripaexperiment /6-5/ och bör följaktligen också bära en liggande kapsel.

För VDH finns en större risk för oönskade förändringar. I deponeringszonen är temperaturen hög och grundvattnet har hög salthalt. Dessutom finns osäkerhet i fråga om bentonitbuffertens kvalitet efter deponering. Ojämn täthet kan riskeras samtidigt som den planerade tätheten är lägre än för systemen på 500 m djup. Med nödvändighet blir buffertens tjocklek även signifikant mindre i VDH än i övriga system. Även motståndet mot intransport av korrodanter blir mindre.

Potentiella skillnader i radionuklidutsläpp från bentonitbufferten

Buffertens barriärfunktion mot uttransport av nuklider bestäms i långtidsperspektivet av dess fysikaliska och kemiska egenskaper samt dess geometri. I jämförelsen värderas möjliga transportvägar genom bentoniten samt transportmotståndet i bufferten /6-3/.

Skillnader mellan systemen baseras på att bentonitbufferten har den kvalitet och de egenskaper som ställs upp i kravspecifikationen för bufferten.

KBS-3 har litet plus genom att i deponeringsorten ovanför deponeringshålet ha tillgång till stora mängder sorberande material. Det kan dock konstateras att de principiella skillnader som finns mellan KBS-3, MLH och VLH ej leder till någon signifikant skillnad i fråga om den diffusiva transporten av radionuklider genom bentonitbufferten.

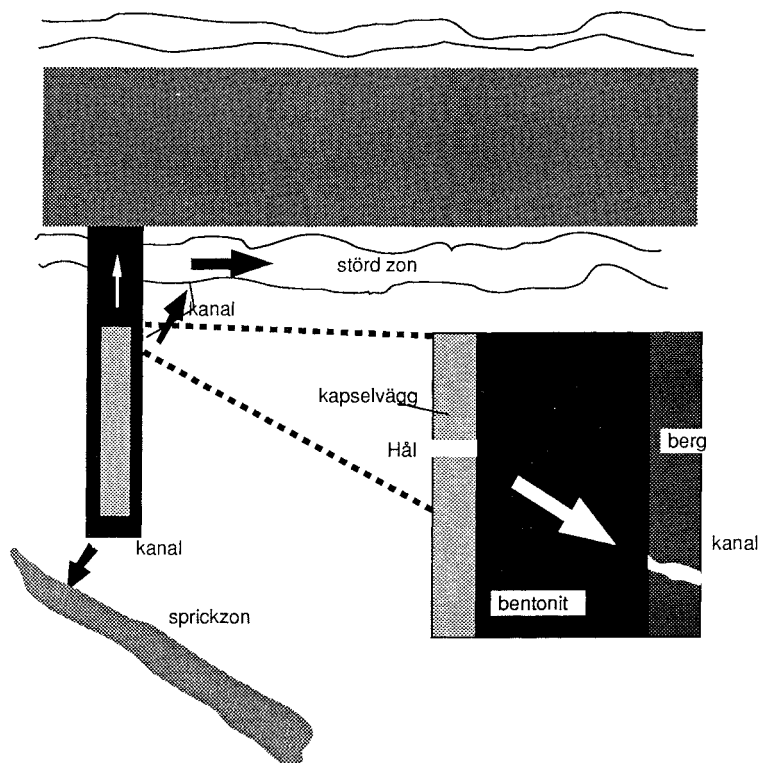
För VDH finns däremot identifierade nackdelar i det att bentonitbarriären har sämre transportmotstånd även under ideala förhållanden på grund av deponeringsförhållandena.

Berget i närområdet

Härmed avses i jämförelsen den bergmassa i närheten av förvarets tunnlar, deponeringshål och bergrum som vid tillredningen påverkats och därmed utgör en "störd zon".

Den störda zonen innebär ändrad hydraulisk konduktivitet och därmed eventuellt ökad potential för borttransport av radionuklider och intransport till bufferten av korrosiva specier /6-6/.

Berget i zonen kan efter deponeringen påverkas av bränslets värmeavgivning med effekter på geokemin, grundvattenflödet och bergets mekaniska stabilitet.



Figur 6-4. KBS-3. Transportvägar för radionuklider i närområdet.

Potentiella skillnader i radionuklidtransport från närområdet

Ett flertal olika transportvägar är möjliga i alla systemen under förutsättning att en eller flera kapslar förlorat sin isolerande förmåga. Den störda zonen runt deponeringshålet (-tunneln) är en sannolik transportväg för radionuklider fram till en korsande sprickzon. Två processer har analyserats:

- Transport fram till och i den störda zonen
- Transport till en subhorisontell sprickzon.

Tänkbara transportvägar för de olika förvarssystemen presenteras i figurerna 6-4 (KBS-3), 6-5 (MLH), 6-6 (VLH) och 6-7 (VDH) /6-3/:

KBS-3 (se Figur 6-4)

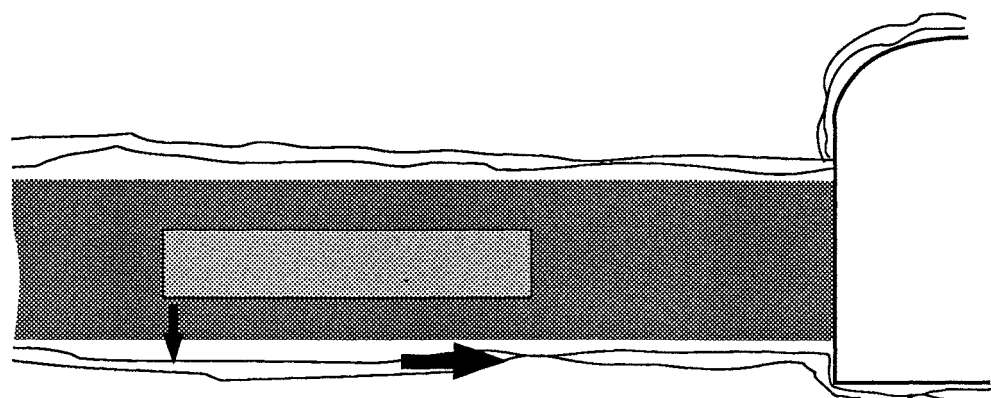
- Diffusion genom bentoniten till den störda zonen runt hålet och i denna, eller i en korsande spricka i berget, till den störda zonen runt deponeringstunneln.
- Diffusion uppåt i bentoniten i deponeringshålet till den störda zonen runt deponeringstunneln.
- Diffusion uppåt i bentoniten i deponeringshålet till den återfyllda deponeringstunneln och diffusion vidare till den störda zonen eller direkt till en korsande sprickzon.
- Diffusion genom bentoniten och berget till en sprickzon i närheten av deponeringshålet.

MLH (se Figur 6-5)

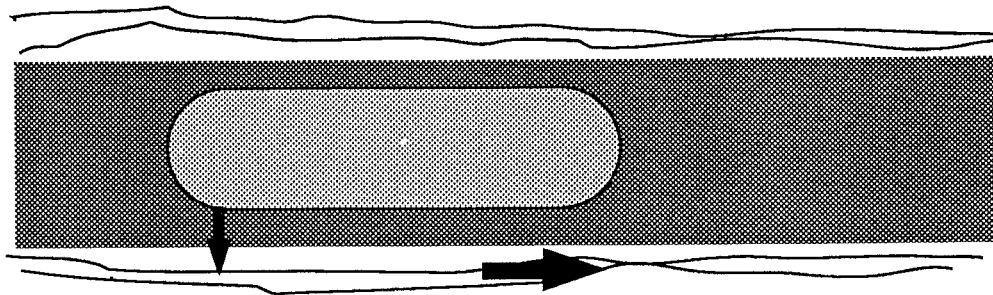
- Diffusion genom bentoniten till den störda zonen runt deponeringstunneln och vidare till den störda zonen runt sido- eller centraltunneln.
- Diffusion genom bentonitbarriären till den störda zonen eller direkt till en sprickzon som korsar deponeringstunneln.
- Diffusion genom bentoniten och berget till en sprickzon som ej korsar deponeringstunneln.

VLH (se Figur 6-6)

- Diffusion genom bentonitbarriären till den störda zonen eller direkt till en sprickzon som korsar deponeringstunneln.
- Diffusion genom bentoniten och berget till en sprickzon som ej korsar deponeringstunneln.



Figur 6-5. MLH. Transportvägar för radionuklider i närområdet.



Figur 6-6. VLH. Transportvägar för radionuklider i närområdet.

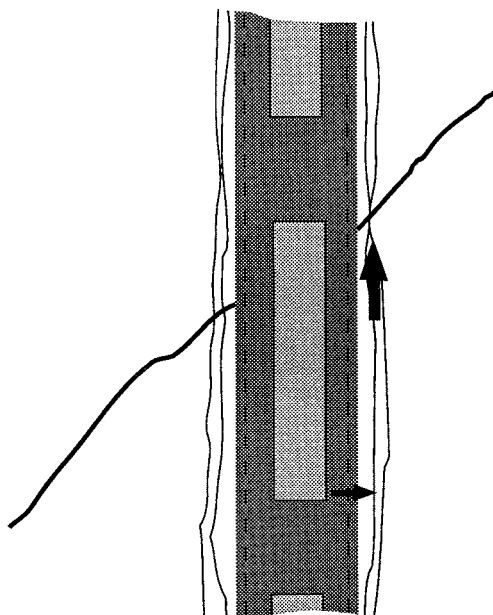
VDH (se Figur 6-7)

- Diffusion genom bentoniten till den störda zonen runt hålet och i denna, eller i denna till en spricka som korsar deponeringshålet.
- Advektion i bentonitslurryn i deponeringshålet till en korsande sprickzon.

Den störda zonen runt deponeringshål och deponeringstunnlar kan vara en betydelsefull kanal för radionuklidtransporten från bentonitbufferten till vattenkanaler i sprickzoner i berget. KBS-3-systemet /6-4/ erbjuder en större variation på möjliga transportvägar fram till den störda zonen kring tunneln än övriga system men transportvägen bedöms bli längre.

Nuklider som kommit fram till den störda zonen runt den sprängda deponeringstunneln i KBS-3 kan, på grund av den större utsträckningen, lättare nå fram till en subhorisontell zon med kort transporttid till biosfären, än i MLH och VLH.

Vattenrörelser under värmepulsen får ingen betydelse för systemen på 500 m nivå eftersom kapslarnas livslängd täcker den varmare delen av denna period. För VDH kan en effekt uppstå i det fall kapslarna skadas tidigt, vilket inte kan uteslutas. En saltgradient i grundvattnet mot djupet har emellertid potential för att förhindra spridningen uppåt, se nästa avsnitt "Fjärrzonen".



Figur 6-7. VDH. Transportvägar för radionuklider i närområdet.

Fjärrzonen

Fjärrområdet omfattar den ostörda bergmassa som radionuklider skall passera för att nå biosfären.

Bergets hydrologiska regim spelar stor roll för transporttiden för radionuklider i det fall kapseln går sönder. Ju längre transporttider ju längre tid för nuklidsönderfall.

Andra bergegenskaper med positiv effekt är

- lämplig och stabil kemisk miljö,
- stabil mekanisk miljö,
- skydd mot händelser på markytan,
- skydd mot mänskligt intrång.

Potentiella skillnader i utsläpp från fjärrområdet

Ett VLH-förvar korsas, på grund av den större utsträckningen, av ett större antal sprickzoner än ett KBS-3 eller MLH-förvar. Radionuklider från ett VLH-förvar kommer därför, om ett större antal kapslar är defekta, att återfinnas på många platser i biosfären. Dosen på varje plats blir dock lägre än vid motsvarande situation för ett KBS-3 eller MLH-förvar.

Ett VDH-förvar kan antas genomkorsas av ett mindre antal sprickzoner på grund av att avståndet mellan sprickzoner förväntas öka med tilltagande djup. Avståndet från trasiga kapslar till en sprickzon måste ändå antas vara kort genom svårigheterna att karakterisera berggrunden på det djup det är frågan om.

Den potentiella fördelen med ett förvar på större djup (VDH-systemet), i jämförelse med de andra förvarssystemen (KBS-3, MLH och VLH) på mindre djup, är beroende av följande faktorer

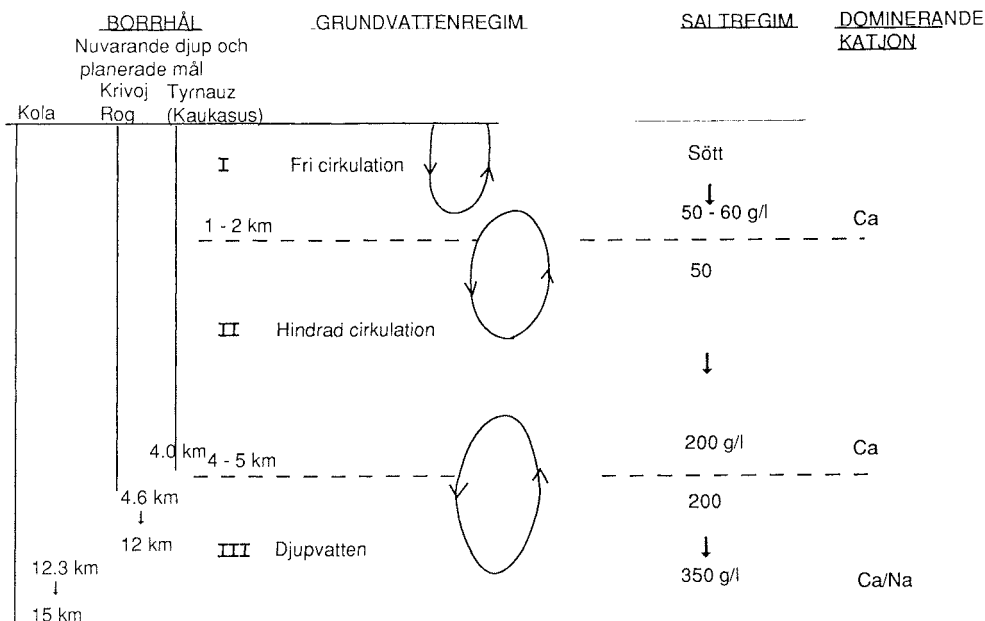
- längre transportväg till biosfären och därmed ökad möjlighet till fördröjning och avklingning av nukliderna i berget,
- indikationerna på lägre hydraulisk konduktivitet och mindre sprickor på större djup och därtill hörande lägre vattenflöden,
- den ökande salthalten med djupet och den därtill hörande positiva effekten av saltgradienten.

Undersökningar pågår och har pågått för att verifiera bergförhållanden på stora djup /6-7/. Saltanalyser i grundvattnet visar en ökande halt mot djupet i kristallin berggrund i såväl Gravberghålet som i hål i Ryssland och Ukraina, se Figur 6-8. En ökande salthalt betyder en ökande täthet hos vattnet, som motverkar täthetsänkningar genom uppvärmning. Är saltgradienten känd går det att anpassa den termiska belastningen i borrhålet så att saltgradienten alltid överväger. Effekten av saltgradienten kan emellertid vara besvärlig att bekräfta med hänsyn till svårigheten med att fastställa saltförhållandena på stort djup och hur stabila förhållanden kommer att vara under den termiska pulsen. Den matematiska behandlingen har demonstrerats i /6-8 och 6-9/.

Biosfären

Biosfären avser i denna jämförelse enbart mottagare i form av jord, sediment och vatten. Den behandlar alltså biosfären i en mycket enkel form.

Biosfären späder ut utsläppta nuklider i ytligt grundvatten, sjöar och floder, samt anrikar nuklider i jord och sediment.



Figur 6-8. Sammanfattning av berggrundsförhållandena i borrhålen på Kola-halvön (Ryssland), i Krivoj Rog (Ukraina) och i Tyrnauz (Ryssland).

Potentiell skillnad i radionuklidtransport i biosfären

Radionuklider som når biosfären kommer via vattenvägar i berggrunden. Ju fler vattenvägar som finns desto sannolikare är det att nukliderna sprids till fler recipienter. Den högsta individdosen minskar härigenom, även om kollektivdosen blir densamma. Denna effekt blir större ju mer utspritt förvaret är och kan betraktas som en fördel för VLH och VDH framför KBS-3 och MLH i det fall att ett större antal kapslar är defekta.

6.3.4 Jämförelse av förvarssystem

Allmänt

Ett kvantitativt mått på förvarssystemets funktion och säkerhet är den dos människan kan tänkas bli exponerad för i olika antagna scenarier. Ambitionen i PASS har endast varit att kvalitativt beskriva de skillnader mellan studerade system som identifierats. Viss osäkerhet accepteras därför i resultatet, speciellt när funktionen är snarlik och en kvalitativ analys ej kan skilja två alternativ åt. Det viktiga har varit att få klarhet i om stora och betydelsefulla skillnader eventuellt kan finnas.

En jämförelse mellan hela förvarssystem har gjorts för följande kriterier:

- Radiologiska dosgränser.
- Förutsättningar för validering.
- Flerbarriärprincipen.
- Missöden och extrema händelser.

Radiologiska dosgränser

KBS-3 utgör referenssystemet, eftersom detta system analyserats noggrant i flera säkerhetsanalyser, senast i SKB 91 /6-4/. I normalfallet tar det mycket lång tid innan vatten kan penetrera kapslarna och komma åt att lösa upp bränslet. Med syftet att

belysa berggrundens betydelse (vilket var SKB 91's huvuduppgift) antogs i ett beräkningsexempel att 5 deponerade kapslar var defekta med hål genom kopparhöljet. Blyfyllningen hindrade vatteninträngning i 1000 år. Man fann att under dessa betingelser blir doserna obetydliga.

En liknande modell har även använts vid beräkningar för ett VLH-system med koppar/stålkapsel /6-10/. Under antagande att 2 VLH-kapslar (1 kapsel på 1000) har ett initialt hål i kopparhöljet (2,5 mm i diameter), erhålles obetydliga doser.

Skulle motsvarande beräkningar genomföras för MLH med koppar/stålkapsel, under antagande att 5 kapslar är trasiga från början (hål i kopparhöljet), kan resultatet förväntas bli ungefär det som erhöles för KBS-3-systemet, eftersom förutsättningarna (kapselstorlek, förvarsgeometri etc.) i båda fallen är mycket lika.

Förutom KBS-3 bedöms därför även VLH och MLH kunna uppfylla mycket höga krav i fråga om långsiktig säkerhet.

VDH-systemet har ej modellerats och räknats igenom. En mycket stor säkerhetspotential är den i flera borrhningar indikerade höga och ökande salthalten mot djupet. Den är å andra sidan inte fastställd som allmängiltig på 2-4 km djup i svensk berggrund. Osäkerheten för detta system är sålunda större än för de övriga och medför att ytterligare studier skulle behövas för att en tillräckligt noggrann värdering av säkerheten ska kunna göras.

Förutsättningar för validering

Validering av tekniska barriärer synes kunna göras med större säkerhet än validering av naturliga barriärer (berggrunden).

Systemen KBS-3, MLH och VLH är i detta avseende mycket lika, medan VDH avviker. Berget har i detta system en viktig funktion, samtidigt som vissa egenskaper hos barriären idag bedöms svåra att fastställa med hög noggrannhet.

Flerbarriärprincipen

De olika barriärerna har olika funktion och effekt för olika nuklider /6-4/.

Kapselns livslängd är mycket betydelsefull för isoleringen av relativt kortlivade nuklider med stor transportbenägenhet. Fördelningen av eventuella kapselbrott i tiden har betydelse för spridningen av långlivade nuklider med stor rörlighet i berggrunden.

Bentonitbuffertens transportmotstånd har betydelse för kortlivade nuklider om kapseln har initiala skador (eller går sönder tidigt), men är endast av begränsad betydelse för långlivade nuklider.

Den störda zonen kan ha betydelse för spridningen av nukliderna från närområdet till fjärrzonen. Den kan erbjuda transportmotstånd, men också genvägar.

Fjärrområdet fördröjer transporten till biosfären. Är fördröjningen påtaglig klingar nukliderna av. Sorberande nuklider fördröjs i än större grad.

För KBS-3 är de olika barriärernas funktion analyserad och bedömda att uppfylla kraven enligt "flerbarriärprincipen". Vid jämförelse av de tre övriga systemen med KBS-3 finner man att barriärfunktionerna för MLH och VLH är mycket likartade med de i KBS-3.

För VDH är kapseln och bentonitbufferten av underordnad betydelse för hela systemets funktion. Den väsentliga barriären är berggrunden med salt grundvatten.

Gemensamt för alla systemen är bränslets låga löslighet i grundvatten. Speciellt svårösliga är de långlivade ämnen som dominerar radiotoxiciteten efter några hundra år.

Missöden och extrema händelser

I studien beaktas endast "kraftiga berg rörelser" och "mänskligt intrång".

Orsaken till en eventuell berg rörelse antas ha samband med en framtida nedisning. Berg rörelser torde framförallt uppträda längs större sprickzoner. Dessa kommer att undvikas som plats för deponerade kapslar. VDH är mer känslig mot mindre rörelser, men effekten blir begränsad genom det stora avståndet mellan deponeringshålen.

Risken för ofrivilligt mänskligt intrång är likvärdigt för de tre systemen på 500 m djup, men avsevärt mindre för VDH. Även risken för avsiktligt intrång bedöms vara mindre för VDH än för övriga tre system.

6.3.5 Rangordning – "Långsiktig funktion och säkerhet"

Den här redovisade analysen av olika skillnader mellan de olika förvarssystemens långsiktiga funktion och säkerhet efter det att djupförvaret förslutits visar sammanfattningsvis följande:

De tre systemen med ca 500 m deponeringsdjup uppvisar ej sådana skillnader som motiverar en åtskillnad i rangordning mellan systemen. De bedöms därför som likvärdiga med avseende på långsiktig funktion och säkerhet.

Djuphålssystemet VDH bedöms idag som mer osäkert genom att den långsiktiga funktionen och säkerheten är starkt beroende av en enda barriär (berggrunden) samt svårigheten att bedöma och validera denna barriärs funktion. Förstärkta tekniska barriärer medför emellertid ökande kostnader, vilket kommenteras i avsnitt 6.4.

6.4 JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AVSEENDE "KOSTNADER"

6.4.1 Allmänt

Jämförelsen av systemen har gjorts efter den mall och med de principer som används i den årliga beräkningen av kostnaderna för alla delar av kärnkraftens avfallshandling. Den senaste beräkningen redovisas i PLAN 92 /6-11/ och bygger på KBS-3 med blyfyllda kapslar. Utgående från kostnaderna i denna har skillnaderna mellan KBS-3 och de övriga tre systemen skattats och kostnadsberäknats. Justeringar har även gjorts i KBS-3-kalkylen med hänsyn till att koppar/stålkapseln ersätter koppar/blykapseln.

Mängder och kostnader redovisas i /6-12/.

6.4.2 Förutsättningar i kalkylerna

För att få så representativa skillnader som möjligt mellan de jämförda systemen har de data som påverkar mängderna berg och återfyllnadsmaterial valts så lika som möjligt. Dock finns exempel på diskrepanser. Dessa samt effekten av dem kommenteras och diskuteras nedan.

Förutom de data som ges i bilagorna 1-4 bygger kostnadsjämförelsen på följande specifika förutsättningar:

Antal kapslar

Det antal kapslar som används för varje system i kostnadsjämförelsen har beräknats på basis av antalet BWR-element. PWR-elementen har omräknats till BWR-ekvivalenter, som adderats till antalet BWR-element. Resultatet framgår av tabell 6-4.

Kapselval

I enlighet med avsnitt 6.1 förutsätts koppar/stålkapsel i KBS-3, MLH och VLH, samt betongfylld titankapsel i VDH. Till följd av att inkapslingskostnaderna är ungefär lika stora för VDH-kapslar med intakta respektive konsoliderade bränsleelement, medan kostnaden för djupförvaret ändras väsentligt, redovisas kostnaderna för båda alternativen.

Kommentar: De valda alternativen är de som prioriterats i kapselrankingen.
Vid konsolidering antas att dubbelt så många stavar får plats i varje kapsel.

Tabell 6-4. Antal kapslar i kostnadsjämförelsen.

Från /6-11/ (drift av alla verk till år 2010):

Antal BWR-element	33 394
Antal PWR-element	3 858
Ekvivalent antal BWR:	
kg U burnup	
1 PWR = $\frac{470}{178} * \frac{41}{38} = 2,85$ BWR	10 995
TOTALT ANTAL BWR-EKVIVALENTER	44 389

SYSTEM	ANTAL BWR PER KAPSEL	ANTAL KAPSLAR	ÖVRIGT BRÄNSLE KAPSLAR	TOTALT KAPSLAR
KBS-3	12	3 699	46	3 745
MLH	12	3 699	46	3 745
VLH	24	1 850	23	1 873
VDH ej konsol.	4	11 097	138	11 235
VDH konsol.	8	5 548	69	5 617

Dimensioner i deponeringspositionen

De använda måtten framgår av tabell 6-5.

Kommentar: koppar/stålkapseln i KBS-3 och MLH är 0,88 m i diameter enligt Figur B1-2a i bilaga 1. Med en bentonittjocklek på 0,35 m i båda fallen avrundas deponeringshålets respektive deponeringsortens diameter till 1,6 m (1,5 m i /6-11/). VLH har en bentonittjocklek på 0,4 m. Den tjockleken är dock i minsta laget för att ge utrymme för deponeringsutrustningen, se bilaga 3.

Beträffande kapslarnas längd avser uppgifterna i tabell 6-5 inkapsling av element utan bränsleboxar. VDHs längd har tagits från /6-13/ medan Figur B4-2 i bilaga 4 visar längden med boxar.

VLH-kapseln avser utformningen med plana gavlar, eftersom övriga systems kapslar har plana gavlar. Detta val påverkar ej deponeringsorternas längd då kapselavståndet är oberoende av gavlarnas form. Kostnader tas med för utfyllning av mellanrummen med bentonitblock.

Tabell 6-5. Sammanställning av använda mått i närområdet.

SYSTEM	KAPSEL- DIAMETER	KAPSEL- LÄNGD	BENTONIT- TJOCKLEK	HÅL- DIAMETER
	m	m	m	m
KBS-3	0,88	4,58	0,35	1,6
MLH	0,88	4,58	0,35	1,6
VLH	1,6	4,99	0,4	2,4
VDH	0,5	4,4	0,15	0,8

Termiska förutsättningar

100°C är högsta tillåtna temperatur i bentoniten.

Kommentar: VLH-layouten /6-14/ utformades för denna temperaturgräns. I /6-11/ sätts försiktigtvis gränsen vid 80°C. Vid jämförelsen har berg- och bentonitmängderna för såväl KBS-3 som MLH beräknats för en gräns på 100°C.

VDH klarar ej denna temperaturgräns till följd av den högre naturliga temperaturen i berggrunden på djupet. Maximal temperatur blir 120°C eller 150°C beroende på om fyra hela element eller åtta konsoliderade deponeras i varje kapsel.

Bentonitens termiska konduktivitet är 1,5 W/m, °K.

Kommentar: Detta värde förutsätter fuktmättade bentonitblock, vilket VLH-layouten bygger på. Samma förutsättningar har därför också använts vid mängdberäkningarna av MLH. KBS-3 missgynnas av antagandet genom att deponeringshålen av andra skäl ej placeras så nära varandra som den höga termiska konduktiviteten i fuktmättad bentonit skulle tillåta, se diskussionen nedan.

Deponeringsgeometri

De deponeringsgeometrier som mängdberäkningarna bygger på redovisas i tabell 6-6.

Tabell 6-6. Geometrier och total längd av deponeringstunnlar (-hål).

KOLUMN	1	2	3	4	5	6
KBS-3	25	6,0	10	250 ^{4a} 7,6 ^{4b}	25 100 ^{5a} 28 500 ^{5b}	310 000 60 000
MLH	25	5,0	10	250	22 000	340 000 ^{6a}
VLH	100	5,9	22	4 500	13 500	60 000
VDH _{ej konsol.}	500	5,4	25	2 000	76 000	160 000 ^{6b}
VDH _{konsol.}	500	5,4	25	2 000	38 000	80 000 ^{6b}

LEGEND

Kolumn 1: Avstånd mellan deponeringstunnlar (KBS-3, MLH och VLH) respektive deponeringshål (VDH). (m)

Kolumn 2: Centrumavstånd mellan kapslar. (m)

Kolumn 3: Tillägg för icke utnyttjade kapselpositioner. I VLH tillägg inkluderat med 450 m/deponeringstunnel (3 st) för större diskontinuiteter. (%)

Kolumn 4: Nominell längd per deponeringstunnel (KBS-3^{4a}, MLH och VLH) respektive nominellt djup i deponeringshål (KBS-3^{4b} och VDH). (m)

Kolumn 5: Total längd av deponeringstunnlar (KBS-3^{5a}, MLH och VLH) respektive djup i deponeringshål (KBS-3^{5b} och VDH). (m)

Kolumn 6: Total mängd uttaget berg i deponeringstunnlar och deponeringshål (^{6a} inkluderar tunnlar i dep.-området, ^{6b} inkluderar övre delen av hålen). (m³)

Centralområde

Ramp från markytan samt ett vertikalschakt för persontransporter jämte vertikalschakt för ventilation.

Kommentar: VLH-studien föreslog ramp istället för schakt /6-14/. För jämförelsens skull valdes ramp i alla systemen som ligger på ca 500 m djup. Samma storlek på rampen och samma inredning har förutsatts. Centralområdena har utformats härefter. Storleken på bergrummen bestäms av erforderlig plats för tillredningsverksamheten samt service mm. under driftperioden.

Driftperioden

20 år i alla alternativen.

Kommentar: Driftperioden påverkar bl.a. det diskonterade nuvärdet, och har valts lika i alla alternativen. Härigenom blir bränslets avklingningstid lika, vilket förutsatts vid beräkningen av antalet kapslar, se tabell 6-4.

6.4.3 Kalkylresultat

Kalkylen har enligt mallen i /6-11/ beräknat kostnaderna för

- gemensamma anläggningar (industriområde, hamn, järnväg, bostäder etc.),
- behandlingsstationen,
- djupförvaret för använt kärnbränsle.

Djupförvarsdelarna för annat långlivat avfall än bränsle samt drift-och rivningsavfall, antas vara desamma för alla studerade system. En möjlig skillnad finns i förutsättningarna för hanteringen av boxarna, vilket dock endast marginellt påverkar kostnaderna.

För varje anläggning har kostnaderna delats upp på

- investering,
- drift,
- återfyllning (bentonit/sand),
- rivning och förslutning.

Resultatet framgår av tabell 6-7, som redovisar dels den totala kostnaden, dels det totala, diskonterade nuvärdet. Det senare har beräknats per januari 1992 för en diskonteringsränta på 2,5%.

6.4.4 Diskussion

De relativa skillnaden mellan KBS-3, MLH och VLH som redovisas i tabell 6-7 skulle möjligen kunna ändras till följd av: 1) osäkerhet i kalkylerna som motiverar olika osäkerhetspåslag, 2) diskrepanser i förutsättningarna som missgynnar respektive gynnar olika system och 3) potentiella utvecklingsmöjligheter för respektive system.

Osäkerhet i kalkylerna

Skillnaden mellan KBS-3 och MLH är signifikant och påverkas ej av olika osäkerheter. Bestämmande är mängden berg som skall tillredas och volymen sand/bentonit som skall återfyllas. Dessa är mindre för MLH.

Resultatet för VLH påverkas av om kapselkostnaderna för VLH-kapseln är överskattade. Kostnadsdifferensen är satt till ca 350% (viktökningen är också ca 350%). I /6-15/ presenteras en kostnadsskillnad för kopparhöljet på ca 235% under förutsättning att VLH-kapseln görs med plana gavlar och 400% om den görs med halvsfäriska gavlar. Tillverkningskostnaden för stål-kapseln studerades ej. Eftersom totalkostnaden för kapslar i kalkylen är 4 700 Mkr för VLH och 2 500 Mkr för KBS-3 är den totala skillnaden mellan VLH och KBS-3 (100 Mkr) väsentligt mindre än osäkerheten i kalkylen.

Diskrepanser i förutsättningarna

Kapselvalet i kalkylen påverkar ej ordningen mellan systemen. I och för sig är en blyfylld kapsel dyrare än koppar/stålkapseln, men kan koppar/stålkapseln accepteras i ett system bör den rimligen också kunna accepteras i de andra på samma djup.

Oboxade BWR-element förutsätts i kapslarna. Detta missgynnar VLH, som för samma kostnad skulle deponera boxade element och undgå kostnaden för delar av det separata förvaret för hårdkomponenter, vilket beräknas kosta ca 200 Mkr.

Tabell 6-7. Sammanställning av beräknade kostnader - totala summan och nuvärdet per januari 1992 för en diskonteringsränta på 2,5%.

SYSTEM	KOSTNAD MKr	TOTAL SUMMA MKr	JÄMF. FAKTOR	NUVÄRDE 2,5% MKr	JÄMF. FAKTOR
KBS-3					
- Gem. anl.	5 400				
- Inkapsl.	6 800				
- Djupförv.	5 400	17 600	1,07	8 000	1,05
MLH					
- Gem. anl.	5 300				
- Inkapsl.	6 800				
- Djupförv.	4 300	16 400	1,00	7 600	1,00
VLH					
- Gem. anl.	5 300				
- Inkapsl.	8 800				
- Djupförv.	3 600	17 700	1,08	8 100	1,06
VDH ej konsol.					
- Gem. anl.	5 300				
- Inkapsl.	7 000				
- Djupförv.	32 100	44 400	2,71	19 600	2,58
VDH konsol.					
- Gem. anl.	5 300				
- Inkapsl.	7 100				
- Djupförv.	16 000	28 400	1,73	12 900	1,70

Slutsatser:

1. Summan av kostnaderna respektive summan av deras diskonterade nuvärden ger samma relativa skillnad mellan systemen.
2. VDH är betydligt dyrare än övriga studerade system.
3. MLH är billigare än KBS-3. Skillnaden är signifikant genom att hela skillnaden är hänförlig till djupförvaret. Differensen i gemensamma anläggningar beror på hanteringen av olika mängder bentonit och sand.
4. VLH är dyrare än KBS-3 respektive MLH. Detta beror främst på den väsentligt dyrare kapseln för VLH (2,5 Mkr/kapsel mot 0,7 Mkr/kapsel för KBS-3).

Skillnaden i bentonittjocklek mellan KBS-3/MLH och VLH (0,35 m respektive 0,4 m) betyder mycket litet. Bentonittjockleken 0,35 m betyder i storleksordningen 50 Mkr lägre kostnad än tjockleken 0,4 m.

Bentonitens termiska konduktivitet

Vid sänkt termisk konduktivitet i bentoniten påverkas VLH mest och KBS-3 minst. För VLH gäller att om termiska konduktiviteten minskas från 1,5 W/m, °K till 0,75 W/m, °K, så ökar högsta temperaturen på kapselytan med ca 20% /6-14/. Detta kan grovt omsättas till att belastningen i kapseln måste minska med 20%, varvid fler kapslar erfordras, eller alternativt att kapseln måste göras så mycket större att klytan ökar med 20%. Fler kapslar och motsvarande längre deponeringstunnlar medför en kostnadsökning på ca. 1 100 Mkr (varav ca 950 Mkr för ökat antal kapslar). En ökning av kapselstorleken blir rimligen dyrare. (Kapselns diameter ökar med 20% och därmed materialmängderna med minst lika mycket. Dessutom ökar tunnelarean och bentonitmängden runt varje kapsel.)

För MLH bör förändringen bli procentuellt lika stor som för VLH (har dock ej beräknats). Kostnadsökningen blir i så fall omkring 600 Mkr (varav 500 Mkr för fler kapslar).

I KBS-3 kan avståndet mellan deponeringshålen bibehållas även vid ovan nämnda lägre termiska konduktivitet i bentoniten. Detta sker genom att hålen placerats med hänsyn till ett minimiavstånd, som bl a hindrar direkt hydraulisk kontakt mellan hålen.

Potentiella utvecklingsmöjligheter

Ur kostnadssynpunkt bedöms både KBS-3 och MLH ha stora optimeringsmöjligheter. VLH kan troligen inte uppnå någon nämnvärd kostnadsbesparing.

MLH har i layouten utformats med sidotunnlar, se Figur B2-1, bilaga 2, som behövs för att kronan skall kunna fästas på borrhållningen vid upprymningen av deponeringstunneln. Dessa sidotunnlar har emellertid nu också förutsatts vara så vida att deponeringstunneln skall kunna ske från dem (7 m tunnelbredd). I annat fall skulle mindre än halva tunnelbredden vara tillfyllest. Förutom detta ligger en betydande rationalisering i möjligheten att blindhålsborra deponeringstunnlarna. Härvid försvinner behovet helt av sidotunnlarna. Maskinleverantörer har visat intresse för problemet och menar att det är lösbart. Kostnadsbesparingen ligger i storleksordningen 500 å 600 Mkr om sidotunnlarna helt tas bort och 250 å 300 Mkr om tunnelarean halveras.

KBS-3 har framför allt två besparingsmöjligheter. Den mindre beloppsmässigt sett består i att deponeringstunnlarnas höjd kan sänkas från 4,0 m, som förutsatts i kalkylen, till ca 3,7 m för koppar/stålkapslarna. Deponeringsutrustning och borrhållning för hålen, som kan utföra arbetet vid den lägre takhöjden finns på ritbordet /6-13/. Kostnadsbesparingen är i storleksordningen 100 Mkr. Den andra är att fördjupa alla eller vissa av deponeringshålen och göra plats för två kapslar i dessa. Bedömningen är att detta är möjligt, men förutsättningarna har inte analyserats i detalj. I gynnsamma fall skulle halva volymen deponeringstunnlar sparas, vilket representerar en kostnad på 700 å 800 Mkr.

VLH utgör redan i den förutsatta utformningen en enkel layout. En diskussionspunkt är dock undersökningstunneln ca 100 m under förvarsnivån, som här bedömts behövas för undersökning och slutlig lokalisering av deponeringstunnlarna. Kostnaden för undersökningstunneln är ca 200 Mkr.

6.4.5 Rangordning – ”Kostnader”

Vid en sammanvägd bedömningen av baskalkylen samt ovan förda diskussion konstateras följande, se även tabell 6-8:

1. VDH är det dyraste alternativet.
2. MLH är det billigaste alternativet.
3. KBS-3 och VLH har ungefär samma kostnader. I baskalkylen, tabell 6-7, är skillnaden liten. Kapselkostnaden för VLH är betydelsefull i sammanhanget. Till bilden hör också att kostnaderna under jord är lägre för VLH eftersom det systemet kräver mindre bergbrytning och mindre återfyllnadsmassor. En sänkning av den termiska konduktiviteten i bentoniten skulle dock betyda stora kostnadsökningar för VLH. KBS-3 har en betydande rationaliseringspotential om två kapslar kan placeras i varje hål. Övriga diskuterade skillnader och utvecklingspotentialer ger inget ytterligare underlag för att skilja systemen åt. Ur kostnadssynpunkt bedöms därför KBS-3 och VLH likvärdiga i denna studie.
4. I jämförelsen mellan MLH och VLH är emellertid skillnaden i baskalkylen större. Dessutom kan konstateras att materialmängderna i kapslarna (koppar och stål) är större i VLH än i MLH. Därtill kommer att mer bentonit erfordras runt VLH-kapslarna än runt MLH (förutsatt att kapslarna ligger nära varandra), medan utborrade bergkvantiteter är ungefär desamma. Allt detta förutsätter att 12 BWR kan fyllas i varje MLH-kapsel och 24 BWR i varje VLH-kapsel. Slutsatsen är att det finns skäl för att i en rangordning bedöma VLH som ett dyrare alternativ än MLH.

Tabell 6-8. Bedömd rangordning av studerade system beträffande deljämförelsen ”Kostnader”. Placering 1 är förmånligast.

SYSTEM	RANGORDNING
KBS-3	2
MLH	1
VLH	2
VDH	4

7 SLUTSATSER

7.1 RANGORDNING AV KAPSELALTERNATIV

Deljämförelserna såväl som den sammanvägda prioriteringen redovisas i kapitel 5 ”JÄMFÖRELSE OCH RANGORDNING AV KAPSELALTERNATIV”.

Prioriteringarna är:

KBS-3 och MLH	1. Koppar/stålkapsel. 2. Blyfylld kopparkapsel.
VLH	1. Koppar/stålkapsel (ingen ställning har tagits till halvsfäriska eller plana gavlar).
VDH	1. Betongfylld titankapsel.

7.2 RANGORDNING AV DJUPFÖRVARSSYSTEM

Resultatet från deljämförelserna av de fyra djupförvarssystemen i kapitel 6 för ”Teknik”, ”Långsiktig funktion och säkerhet” och ”Kostnader” sammanställs i tabell 7-1. En sammanvägning, under förutsättning att ”Teknik”, ”Långsiktig funktion och säkerhet” och ”Kostnader” ges samma vikt, leder till tre grupperingar:

- KBS-3 och MLH,
- VLH,
- VDH.

Tabell 7-1. Sammanställning av resultaten från de tre deljämförelserna av förvarssystem. Placering 1 är förmånligast.

DJUPFÖRVARSSYSTEM	TEKNIK	LÅNGSIKTIG FUNKTION OCH SÄKERHET	KOSTNADER
KBS-3 (koppar/stålkapsel)	1	1	2
MLH koppar/stålkapsel)	2	1	1
VLH (koppar/stålkapsel)	3	1	2
VDH (betongfylld Ti-kapsel)	4	4	4

VDH

Djupa hål, VDH, har fått lägst rangordning i samtliga tre deljämförelser. För såväl ”Teknik” som ”Kostnader” var utslaget entydigt och klart. I fråga om ”Långsiktig funktion och säkerhet” är omdömet mer diskutabelt. Den lägre placeringen beror främst på att systemets långsiktiga isoleringsförmåga är knutet till i huvudsak en barriär, geosfären, som därtill idag är begränsat känd på de aktuella djupen i Sverige.

En förstärkning av de tekniska barriärerna borde vara möjlig men till priset av ökade kostnader. Något utrymme på kostnadssidan finns emellertid inte. VDH är redan i den analyserade utformningen dyrast av de fyra systemen.

De högre kostnaderna för VDH och övriga nackdelar systemet visats ha i jämförelse med de tre andra systemen är signifikanta. Studien har ej indikerat någon osäkerhet i analysen som skulle kunna förändra situationen så, att VDH-systemet placeras främst.

VLH

Den främsta nackdelen med systemet Långa tunnlar, VLH, är de stora kapslarna. Dessa i kombination med små utrymmen vid sidan om kapslarna i tunneln gör tekniken för deponering osäkrare. Det är svårare att uppnå eftersträvd kvalitet i det slutliga utförandet.

Tre förutsättningar som valts i inledningen av analysen och som skiljer sig från MLH är

- över 4 km långa deponeringstunnlar,
- stora, tunga kapslar,
- deponeringstekniken med flera fjärrstyrda maskiner med komplicerade rörelsefunktioner.

De långa deponeringstunnlarna är dock inte systemspecifika. Denna utformning aktualiserades av förslaget att förlägga djupförvaret under havsbotten där den hydrauliska gradienten är mycket liten. Med långa tunnlar kommer man långt ut från land. I /7-1/ skisserades också principiellt en mer kompakt layout. Denna princip kontrollerades också med inplacering i exakt samma block i Finnsjön som KBS-3-förvaret placerades i /7-2/. Resultatet blev att också ett VLH-förvar ryms inom blocket. Den skillnaden mellan VLH och MLH kan alltså utjämnas.

Den större kapseln är, däremot, specifik för systemet.

Deponeringstekniken skiljer sig åt mellan VLH och MLH. Dimensionerna i MLH-tunneln är så mycket mindre än i VLH-tunneln (1,6 m i diameter mot 2,4 m) att VLH-tekniken /7-3/ ej bedöms kunna tillämpas i MLH. För MLH valdes en mekaniskt mindre komplicerad, men långsammare utrustning än den för VLH /7-4/. De båda metoderna uppvisar både för- och nackdelar vid en inbördes jämförelse. En allmän bedömning är att den deponeringsteknik som föreslagits för VLH är att förordas. Med en mer kompakt layout minskar således skillnaderna mellan dessa alternativ.

I fråga om kostnadsjämförelsen är utfallet distinktare, även om skillnaden i absoluta tal kan synas liten relativt sett. För VLH är det kapselkostnaden som är avgörande. Med de värden som redovisas i denna studie är den större VLH-kapseln oekonomisk jämfört med kapseln i KBS-3-storlek.

Därtill kommer att KBS-3 och MLH har fler valmöjligheter när det gäller kapselutformning. Endast för dessa system torde metallfyllning vara ett realistiskt alternativ.

KBS-3 och MLH

Valet mellan dessa två system måste baseras på en värdering av "Teknik" mot "Kostnader". "Långsiktig funktion och säkerhet" har både genom kvalitativa och kvantitativa analyser demonstrerats vara likvärdig för de två systemen, se avsnitt 6.3.

För "Teknik" är det framför allt deponeringsförfarandet som ger utslag i rangordningen i avsnitt 6.2 /7-5/. I MLH bygger placeringen av bentonitbufferten på fjärrmanövrerad teknik med små utrymmen mellan utrustning och bergvägg. Kapselplaceringen sker horisontellt i mitten på bentonitbufferten genom att kapseln skjuts in i det förberedda hålet. Deponeringen behöver ske i en sekvens utan avbrott i varje tunnel, med hänsyn till att bentoniten börjar svälla när den kommer i kontakt med vatten. I KBS-3 kan bentonitblocken placeras med enklare teknik (t.o.m. manuellt). Kapseln placeras i hålet genom att firas ner, vilket underlättar justeringar i vertikalled. Deponeringen av varje kapsel är en avslutad operation, vilket ger flexibilitet i fråga om avbrott och planerade uppehåll.

Den sammanvägda bedömningen är att de tekniska fördelarna med KBS-3 har ett större värde än den ekonomiska vinstpotentialen för MLH. Därför rangordnas KBS-3 före MLH.

7.3 RESULTATET AV PASS

Slutsatserna av studien är:

1. Kapslar med plats för 12 BWR-element, eller ekvivalent termisk belastning, (KBS-3) förordas framför kapslar med den dubbla lasten (VLH).
2. Kopparklädd stålkapsel (kompositkapsel) förordas. Den tidigare referenskapseln - blyfylld kopparkapsel - placeras därefter och före övriga studerade alternativ.
3. KBS-3-systemet förordas.

REFERENSLISTA

Kapitel 1

- 1-1. Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter, PLAN 92
Juni 1992
SKB, Stockholm
- 1-2. WP-Cave – assessment of feasibility, safety and development potential
September 1989
SKB Technical Report TR 89-20
- 1-3. **Juhlin C, Sandstedt H**
December 1989
Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economical potential
SKB Technical Report TR 89-39
- 1-4. **Sandstedt H, Wichmann C, Pusch R, Börgesson L, Lönnerberg B**
August 1991
Storage of nuclear waste in long boreholes
SKB Technical Report TR 91-35

Kapitel 3

- 3-1 Samma som referens 1-4
- 3-2 **Christer Swemar et al**
PASS
Projekt Alternativ Studier för Slutförvar.
Lägesrapport per december 1991.
SKB Arbetsrapport AR 91-33

Kapitel 4

- 4-1. **Holloway C**
1979
A decision making under uncertainty – Models and choices.
Prentice-Hall Inc, New Jersey
- 4-2. Samma som referens 1-1
- 4-3. Samma som referens 1-4
- 4-4. Samma som referens 1-3

Kapitel 5

- 5-1. **Hosaluk L J, Teper B**
September 1985
Status of alternative container designs for fuel waste disposal
Proceedings of the nineteenth information meeting of the nuclear fuel waste management program, volume I, Atomic Energy of Canada Ltd.

- 5-2. Samma som referens 1-3
- 5-3. **Juhlin C et al.**,
Swedish State Power Board, Report No. U688/89-TE30 (1991).
- 5-4. **Werme L, Sellin P, Kjellbert N**,
Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects.
SKB Technical Report, in print.
- 5-5. **Marsh G P, Taylor K J, Harker A H**,
July 1991
The kinetics of pitting corrosion of carbon steel applied to evaluating containers
for nuclear waste disposal. Final report 1991.
SKB Technical Report TR 91-62.
- 5-6. **Lawrence L H, Shoesmith D W, Ikeda B M, King F**,
Mat. Res. Soc. Symp. Proc., in press.
- 5-7. **Nilsson F**,
Mechanical integrity of canisters.
SKB Technical Report, in print
- 5-8. **Rajainmäki H, Nieminen M, Laakso L**,
June 1991
Production methods and costs of oxygen free copper canisters for nuclear waste
disposal.
SKB Technical Report TR 91-38.
- 5-9. **Ritzling B, Malmgren T, Zausnica A, Steen H**,
Försök med blygjutning i kopparkapsel med simulerat använt bränsle.
SKB Arbetsrapport AR 83-48.
- 5-10. **Renström P**,
Solidifying of lead in copper canister – finite element analysis.
SKB Arbetsrapport AR 92-xx.
- 5-11. **Lönnerberg B, Larker H, Ageskog L**,
May 1983
Encapsulation and handling of spent nuclear fuel for final disposal.
SKB Technical Report TR 83-20 .
- 5-12. **Ekbom L B, Bogegård S**,
February 1989
Copper produced from powder by HIP to encapsulate nuclear fuel elements.
SKB Technical Report TR 89-10.
- 5-13. Samma som referens 1-1

Kapitel 6

- 6-1. PASS – Comparison of technology of KBS-3, MLH, VLH and VDH concepts
by using an expert group
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)

- 6-2. Pusch R, Börgesson L**
Performance Assessment of Bentonite Clay Barrier in three Repository Concepts: VDH, KBS-3 and VLH
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-3. Wiborgh M, Skagius K, Widén H, Birgersson L**
Analysis of performance and long term safety of repository concepts within the PASS study
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-4.** SKB 91. Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety
May 1992
SKB Technical Report TR 92-20
- 6-5. Börgesson L, Pusch R**
November 1989
Interim report on the settlement test in Stripa
SKB Technical Report TR 89-29
- 6-6. Winberg A**
June 1991
The role of the disturbed rock zone in radioactive waste repository safety and performance assessment. A topical discussion and international overview.
SKB Technical Report TR 91-25
- 6-7.** Characterization of crystalline rocks in deep boreholes. The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes
Scientific Industrial Company on superdeep drilling and comprehensive Investigation of the Earth's Interior, NEDRA
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-8. Claesson J**
February 1992
Buoyancy flow in fractured rock with a salt gradient in the ground water – An initial study
SKB Technical Report TR 92-05
- 6-9. Claesson J**
Buoyancy flow in fractured rock with a salt gradient in the ground water – A second study
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-10. Romero L, Moreno L, Neretnieks I**
Release calculation in a repository of the Very Long Tunnel type, VLH
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-11.** Samma som referens 1-1
- 6-12. Ageskog L, Högbom T**
Project on Alternative Systems Study – PASS. Cost Comparison of Repository Systems
SKB Technical Report TR 92-xx (in print)
- 6-13.** Samma som referens 1-3
- 6-14.** Samma som referens 1-4

6-15. Rajainmäki H, Nieminen M, Laakso L

June 1991

Production methods and costs of oxygen free copper canisters for nuclear waste disposal.

SKB Technical Report TR 91-38

6-16. Ageskog L, Vallander P

March 1992

PASS. Memorandum concerning alternative repository layout

SKB Arbetsrapport AR 92-36

Kapitel 7

7-1. Samma som referens 1-4

7-2. Ageskog L, Vallander P

PASS-Projekt AlternativStudier för Slutförvar.

Memorandum concerning alternative repository layout.

SKB Arbetsrapport AR 92-36

7-3. Henttonen V, Suikki M

June 1992

Equipment for deployment of canisters with spent nuclear fuel and bentonite buffer in horizontal holes.

SKB Technical Report TR 92-16

7-4. Jansson L

April 1992

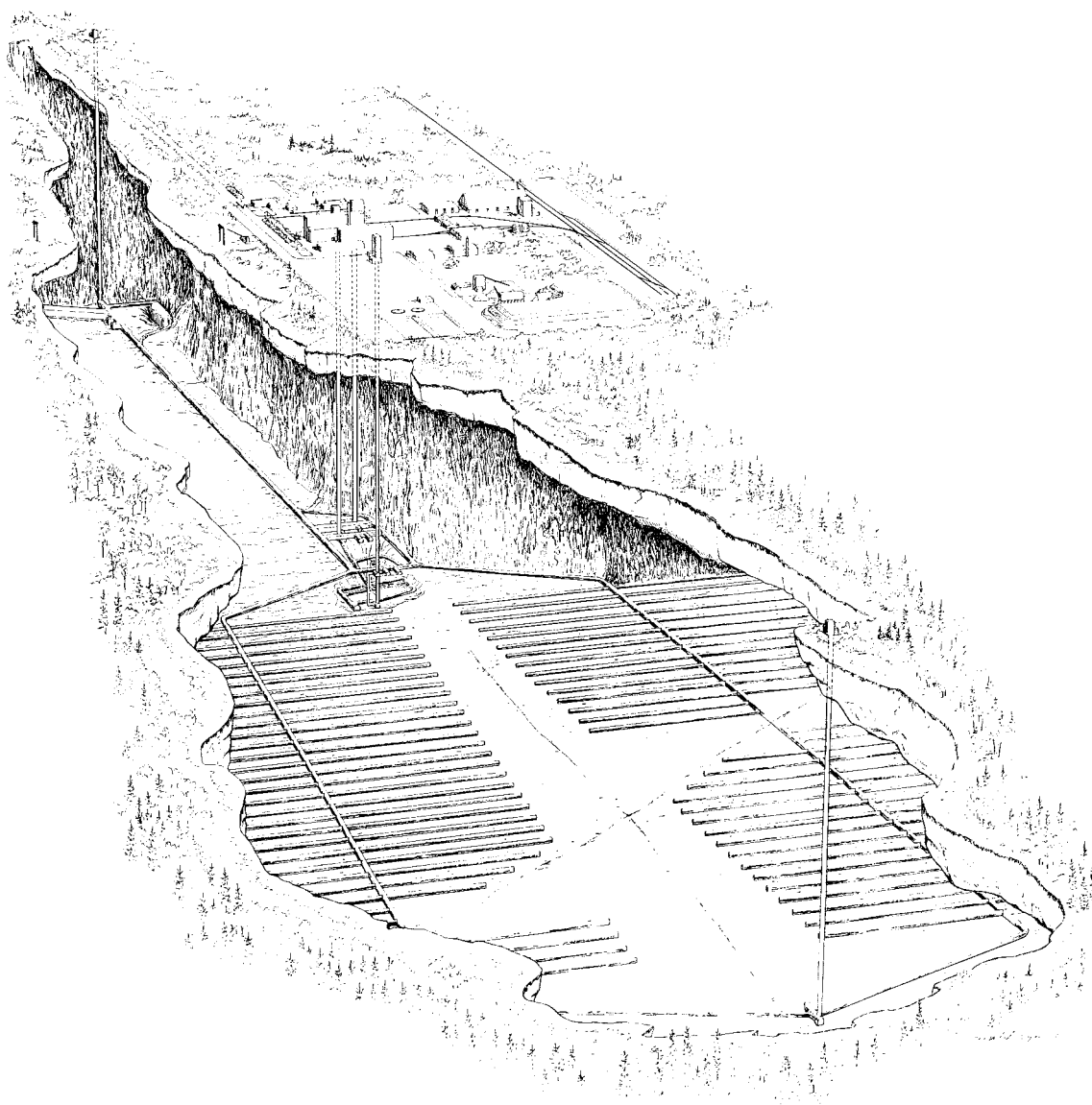
PASS-Method for horizontal emplacement of KBS-3 type canisters in 1.6 m diameter drifts.

SKB Arbetsrapport AR 92-39

7-5. Samma som referens 6-1

KBS-3-SYSTEMET

Bilagan har utarbetats med de syften som framgår av huvudtexten i rapporten.



Figur B1-1. Översikt över anläggningarna.

1 KAPSELALTERNATIV

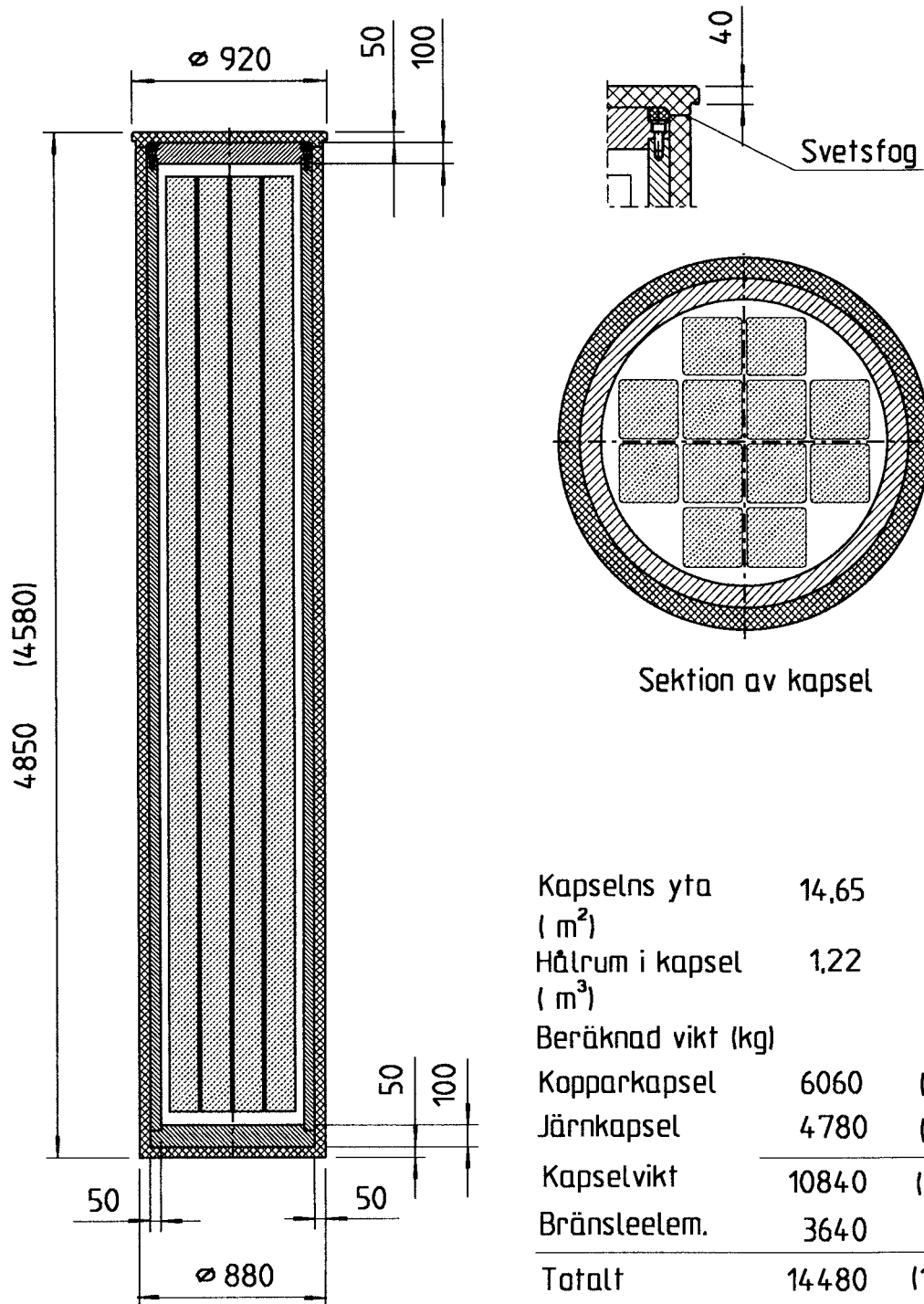
De kapselalternativ som analyserats är:

- A. Stålkapsel med kopparhölje (kompositkapsel), se Figur B1-2a och b. TVOs kapsel "ACP" (Advanced Cold Process) bygger på samma princip men har i grundutformningen något mindre diameter: 822 mm alternativt 802 mm. Den inre, fria volymen kan fyllas ut med partikulärt material i kallt tillstånd.
- B. Kopparkapsel fylld med bly, se Figur B1-3a och b. Blyfyllningen sker genom att smält bly fylls i en varm kapsel innehållande bränsleelement. Hela kapseln får sedan svalna på ett noga kontrollerat sätt. Denna utformning utgör referensutformningen i de årliga kostnadsberäkningarna; den senaste PLAN 92 /B1-1/.
- C. Kopparkapsel framställd med HIP (Het Isostatisk Pressning), se Figur B1-4a och b. Detta alternativ utgjorde ett av de två alternativen som framhölls i KBS-3-rapporten år 1983 /B1-2/.
- D. Stålkapsel fylld med bly, se Figur B1-5 (endast ritad för BWR-element). I PASS har detta alternativ benämnts "Gripsholm".
- E. Stålkapsel, se Figur B1-6. Den inre, fria volymen fylls ut med partikulärt material i kallt tillstånd.

2 GEMENSAMMA ANLÄGGNINGAR

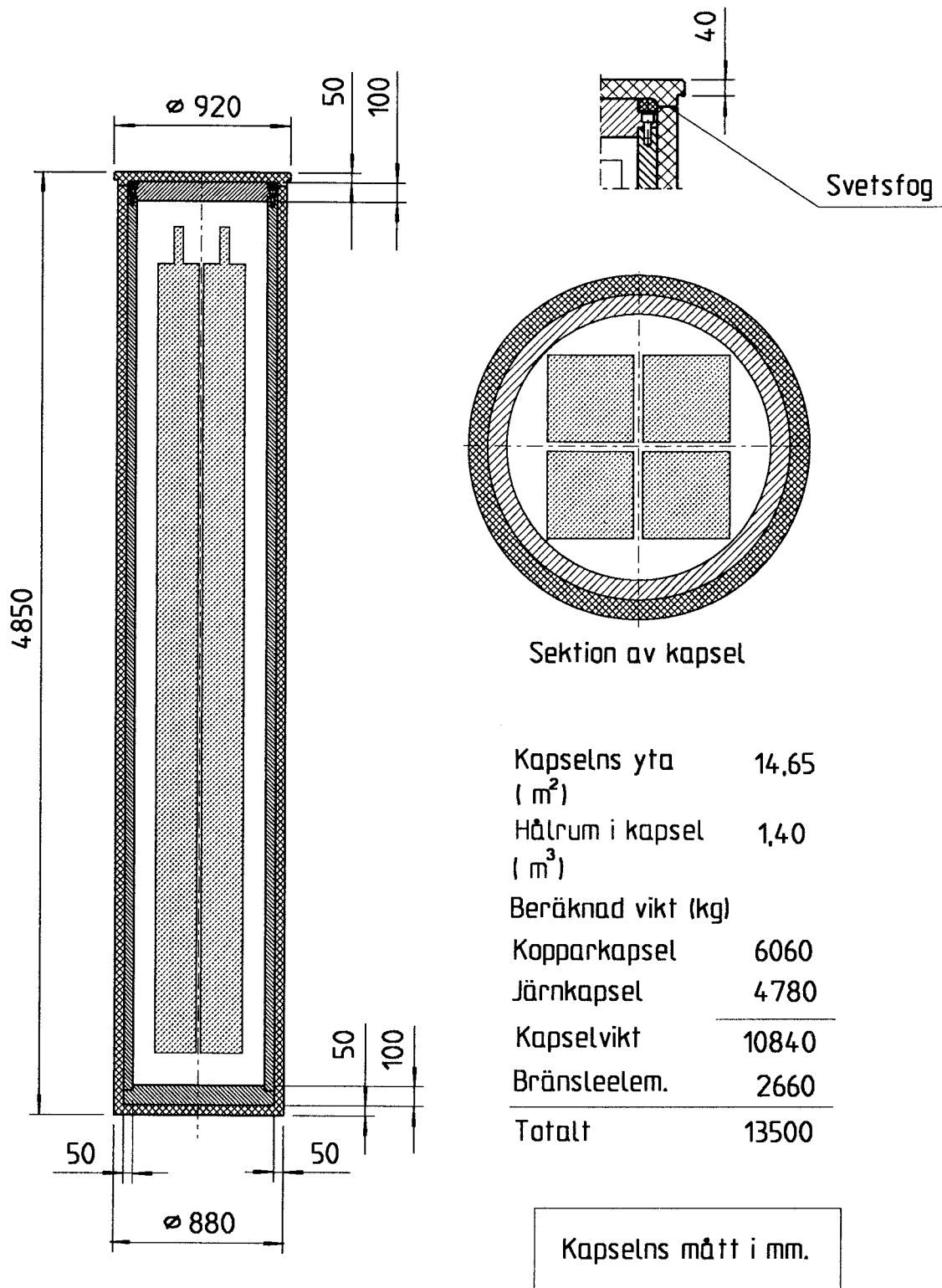
Förutsättningen för kostnadsberäkningen är att inkapslingsstationen och djupförvaret för slutdeponeringen lokaliseras till samma geografiska plats. Denna förutsättes ligga så, att såväl sjö- som järnvägstransport erfordras för det använda bränslet. Denna uppläggning är hämtad från /B1-1/ vilken skiljer sig från det förslag med inkapslingsstation vid CLAB som återfinns i FUD-program 92. Vid samlokaliseringen kan ett antal försörjnings- och servicesystem antas vara gemensamma. Det gäller framför allt transportsystemet och stationsområdet. Ur teknik- och funktionssynpunkt uppstår med detta antagande ej några frågor, som kan skilja de olika förvarssystemen (KBS-3, MLH, VLH och VDH) åt, förrän bränslet efter transport hanteras och kapslas in. Beskrivningen nedan är baserad på en samlokalisering någonstans i Sveriges inland.

Det förutsattes att bränslet hämtas i CLAB och transporteras med fartyg till närmast belägna, befintliga hamn, som efter viss upprustning avseende farled och kajområde kan anses lämplig för denna typ av transporter. Därifrån transporteras bränslet på järnväg till industriområdet på platsen.

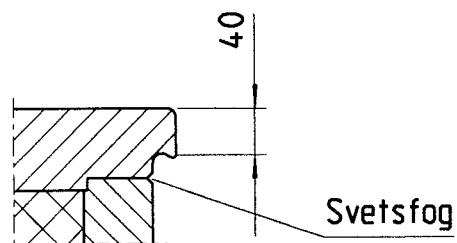
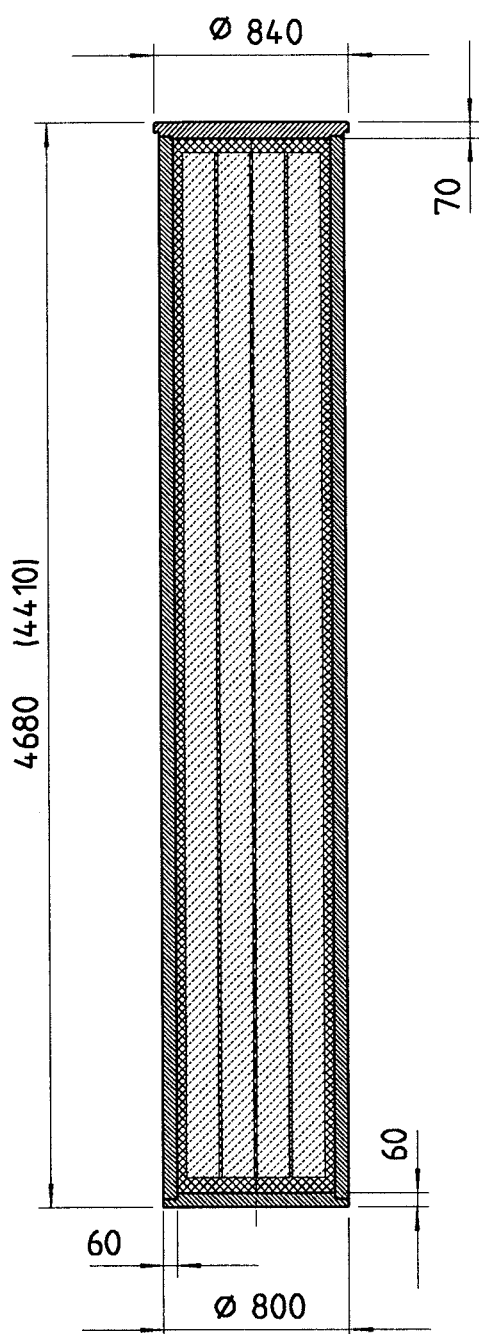


Mått och vikter inom parenteser avser kapsel med oboxade BWR-element. Mått i mm.

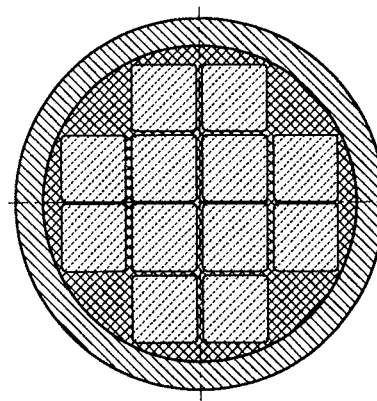
Figur B1-2a. Koppar/stålkapsel med BWR-element.



Figur B1-2b. Koppar/stålkapsel med PWR-element.



Detalj av lockets kant

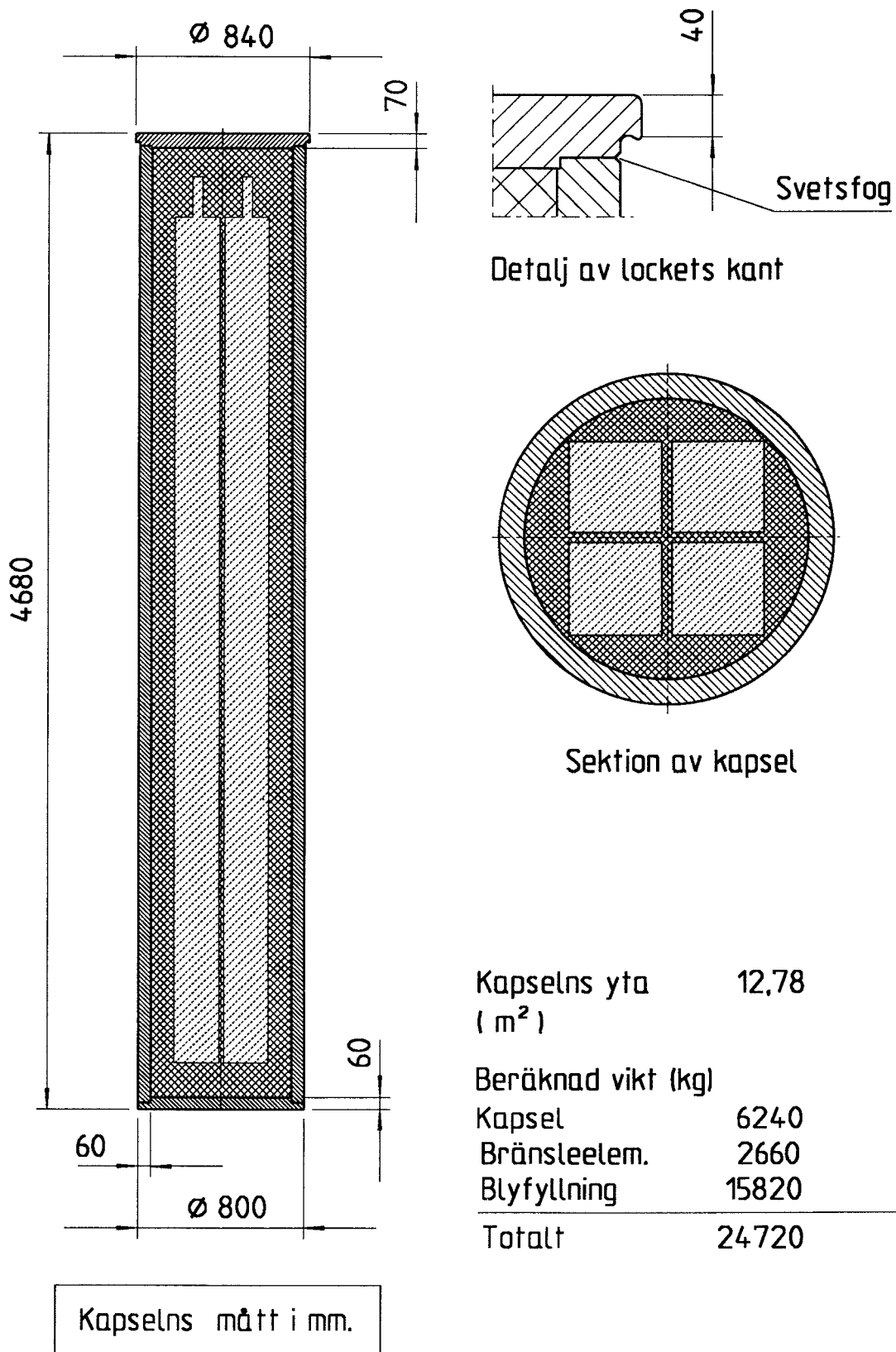


Sektion av kapsel

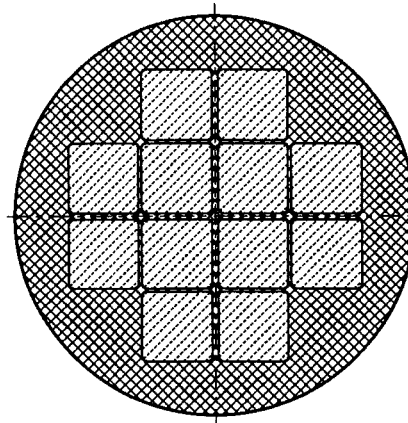
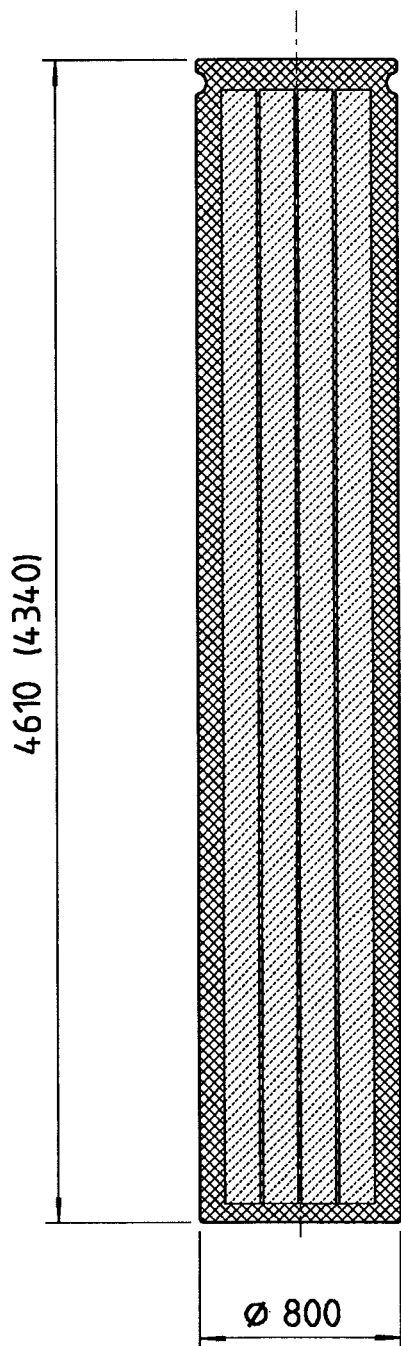
Kapselns yta (m ²)	12,78	(12,10)
Beräknad vikt (kg)		
Kapsel	6240	(5900)
Bränsteelem.	3640	(3240)
Blyfyllning	13790	(13230)
Totalt	23670	(22370)

Mått och vikter inom parenteser avser kapsel med oboxade BWR-element. Mått i mm.

Figur B1-3a. Koppar/blykapsel med BWR-element.



Figur B1-3b. Koppar/blykapsel med PWR-element.

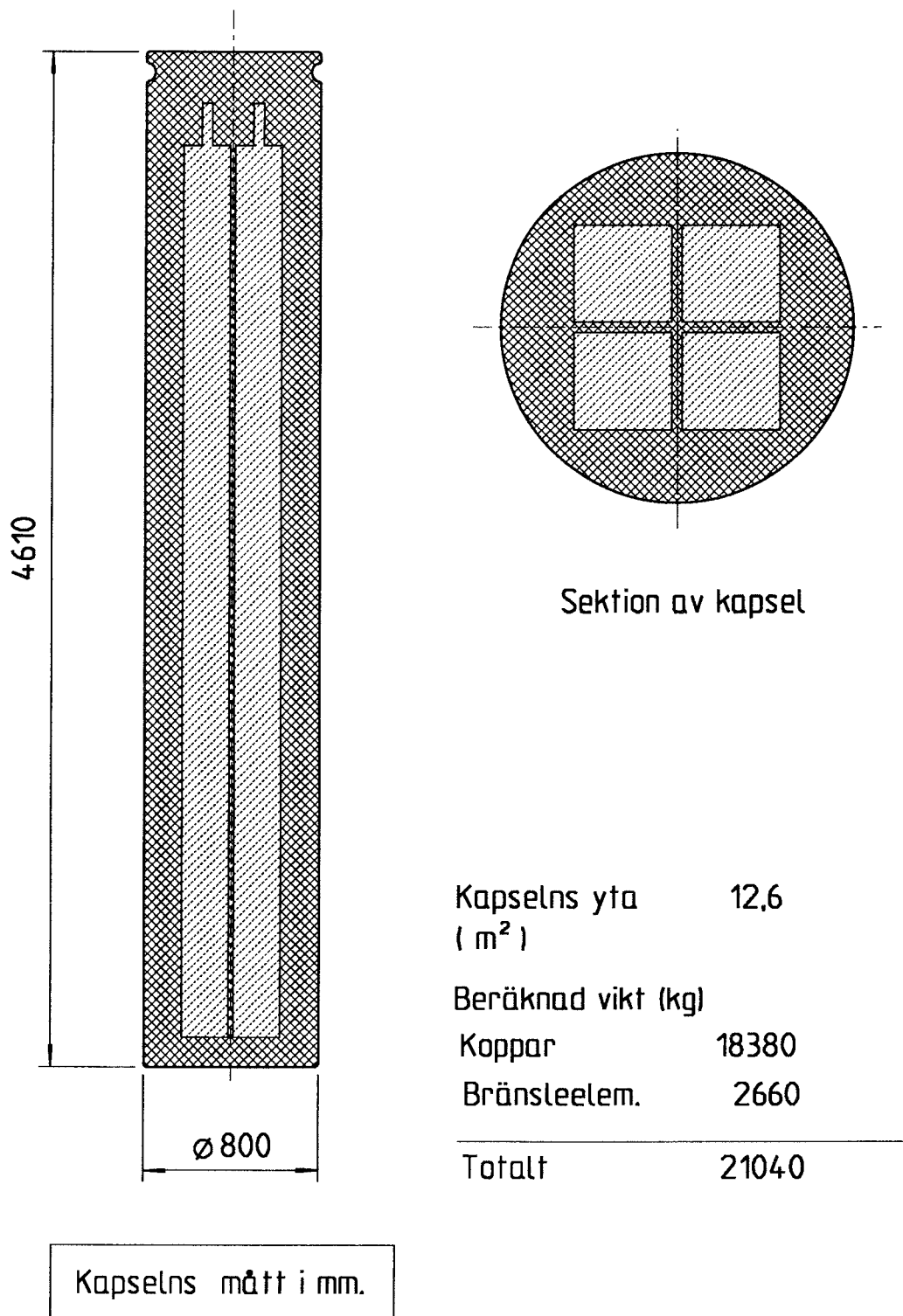


Sektion av kapsel

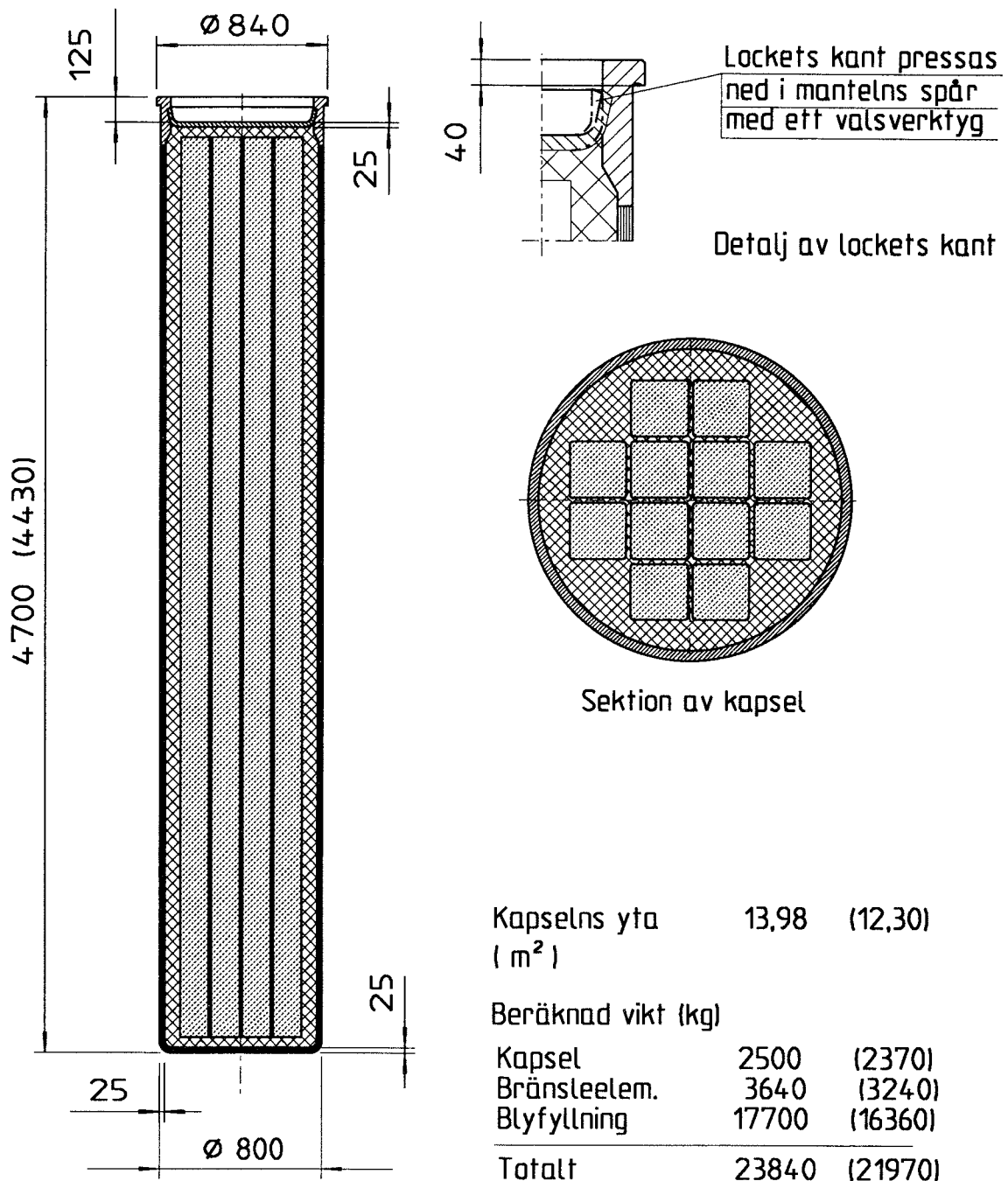
Kapselns yta (m ²)	12,6	(11,9)
Beräknad vikt (kg)		
Koppar	16780	(16000)
Bränsteelem.	3640	(3240)
<hr/> Totalt	<hr/> 20420	<hr/> (19240)

Mått och vikter inom parenteser avser kapsel med oboxade BWR-element. Mått i mm.

Figur B1-4a. Kopparkapsel – HIP – med BWR-element.

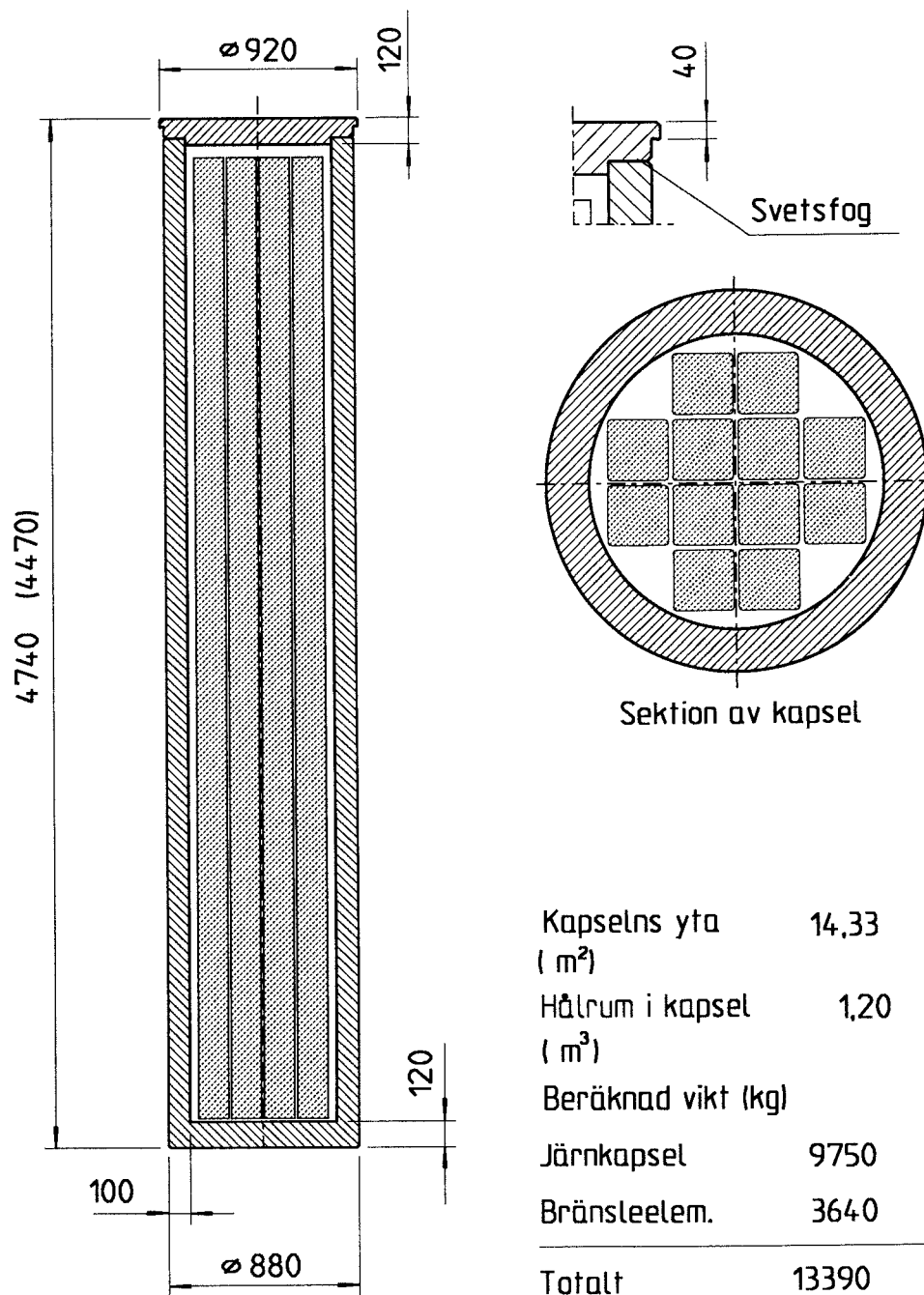


Figur B1-4b. Kopparkapsel – HIP – med PWR-element.



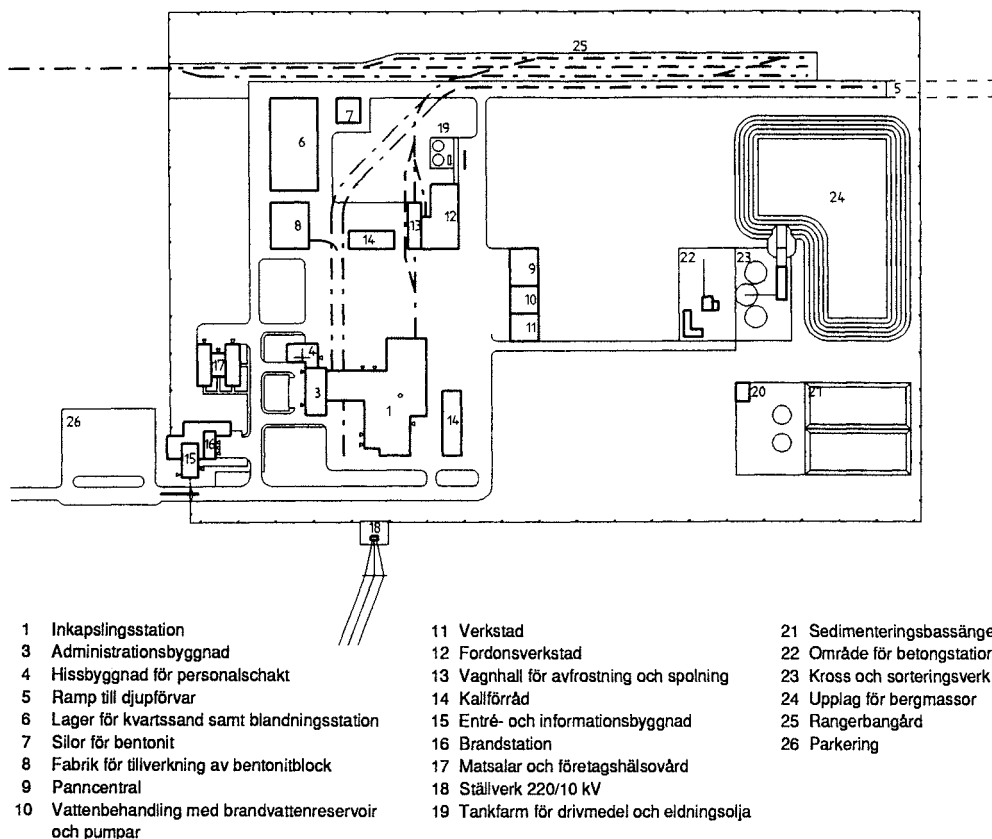
Mått och vikter inom paranteser avser kapsel med oboxade BWR-element. Mått i mm.

Figur B1-5. Stål/blykapsel med BWR-element (Gripsholm).



Mått och vikter inom parenteser avser kapsel med oboxade BWR-element. Mått i mm.

Figur B1-6. Stålkapsel med BWR-element.



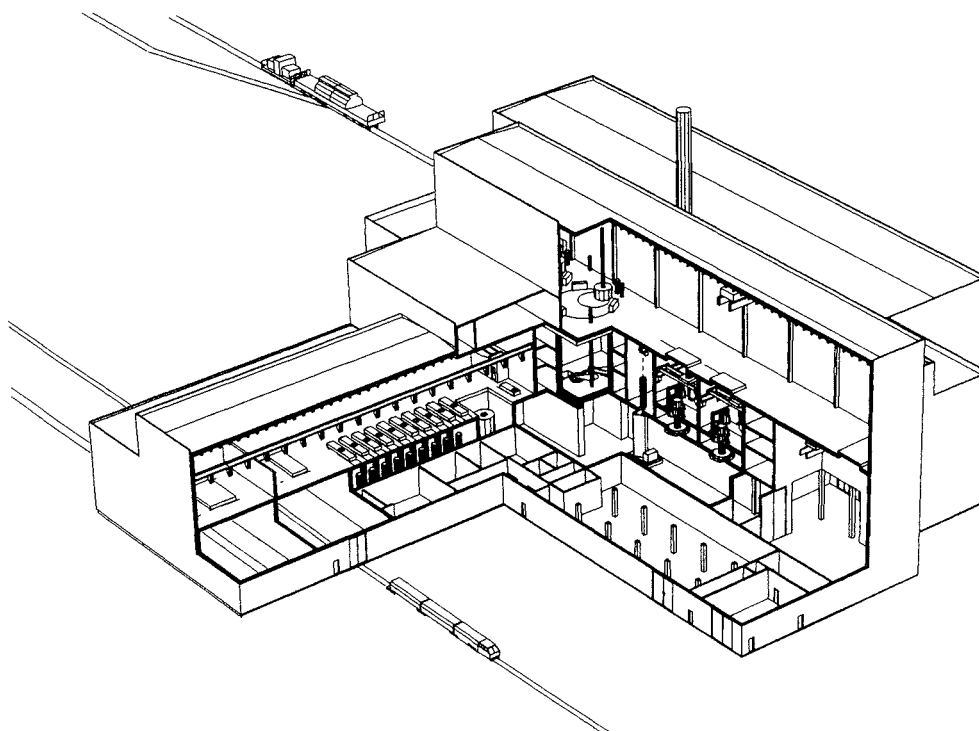
Figur B1-7. Disposition av gemensamma anläggningar.

Stationsområdets disposition framgår av Figur B1-7. Vid sidan av inkapslingsstationen, som utgör den dominerande byggnaden, kommer där att finnas

- entrébyggnad,
- brandstation,
- verkstäder,
- godsmottagningsstation,
- fordonsservice,
- betongstation med kross,
- lagerbyggnader för återfyllnadsmaterial och hantering av bentonit,
- anläggning för pressning av bentonitblock,
- upplag för bergmassor från bergarbetena under jord,
- personallokaler,
- matservice,
- kontor,
- anläggningar för vattenförsörjning och avloppsrening, elförsörjning etc.

Flera av dessa anläggningar påverkar jämförelsen av "Kostnader", då de fyra olika systemen som studeras hanterar olika mängder material. Störst avvikelse från beskrivningen ovan uppvisar dock VDH, se bilaga 4.

3 INKAPSLINGSSTATION



Figur B1-8. Inkapslingsstation för koppar/stålkapslar.

En skiss av inkapslingsstationen, visas i Figur B1-8. Byggnaden inkluderar de funktioner som krävs för mottagning, hantering och inkapsling av det använda bränslet i kapslar av typ A ovan, dvs kompositkapslar. De tillägg som behövs för ingjutning med bly beskrivs nedan. Blyfylld stålkapsel och stålkapsel enligt typ D lägger inga krav på ytterligare funktioner utöver de som behövs för motsvarande kopparalternativ. HIP-kapselns speciella system beskrivs i /B1-3/

Inkapslingsstationen är för alla kapselalternativen dimensionerad för en inkapslingstakt av en kapsel/dag.

Inkapslingsstationen enligt skissen i Figur B1-8 innehåller också en mottagningsstation för hårdkomponenter och interna delar som i en speciell del av anläggningen gjuts in i betongkokiller. Kapselutformningarna i figurerna B1-2a, B1-3a och B1-4a visar måtten för såväl boxade som oboxade BWR-element. I PASS har emellertid det oboxade alternativet förutsatts därför att kostnaderna i /B1-1/ beräknats för detta alternativ. (Valet missgynnar VLH något ur kostnadssynpunkt, se diskussion i avsnitt 6.4.4 i huvudtexten). En stor del av hårdkomponenterna utgörs just av bränsleboxarna som transporteras tillsammans med bränslet. Dessutom innehåller inkapslingsstationen mottagningsdel för driftavfall från CLAB och långlivat avfall från Studsvik. De enheter som finns för annat avfall än just använt kärnbränsle har ingen relevans för jämförelsen av de fyra förvarssystemen, men beskrivs här eftersom kostnaderna för enheterna har tagits med i kostnadsavsnittet, se avsnitt 6.4, som baseras på totalkostnaden i /B1-1/.

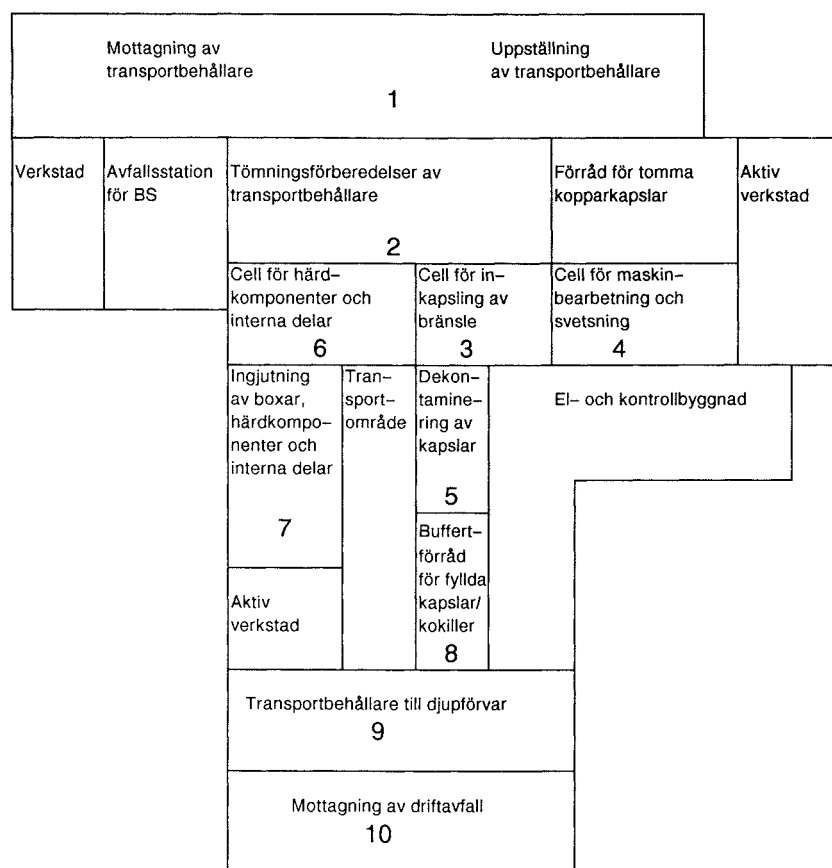
Inkapslingsstationen indelas i följande funktionella delar:

- Intransport- och mottagningsdel.
- Inkapslings- och uttransportdel för bränsle.
- Inkapslingsdel för hårdkomponenter (betongingjutning).
- Servicedel, liggande vid sidan om inkapslingsdelen och innehållande förråd.
- Hjälpssystem med bl a kyl- och ventilationssystem samt el- och kontrollutrustning.
- Sidobyggnad med personal- och kontorsutrymmen.

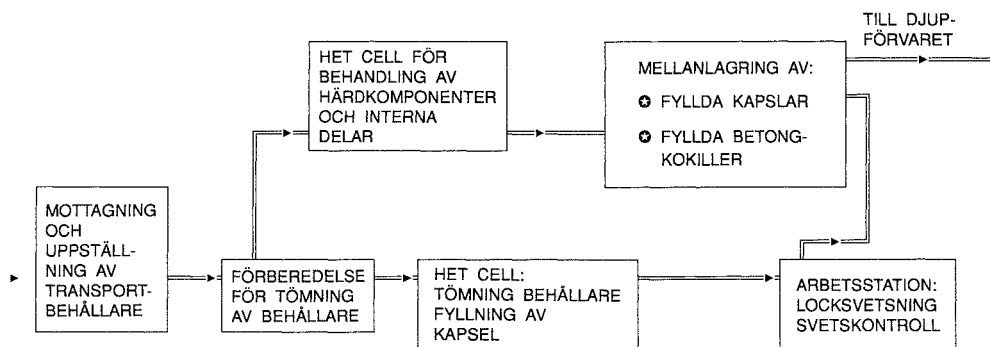
Funktionernas placering i anläggningen framgår av Figur B1-9. Inkapslingen av bränslet sker i område 1-5. Mellanlagring av fyllda kapslar görs i område 8 och inlastningen i transportbehållare för vidare transport ner under jord görs i område 9. (Ingjutning av hårdkomponenter och reaktordelar görs i områdena 6 och 7. Mellanlagring av kokiller sker i område 8 och lastning in i transportbehållare för nertransport under jord sker i område 9. Driftavfall från CLAB mottas i område 10 där det också lastas om till strålskyddade behållare för transport ner under jord.)

Hanteringen av använt bränsle framgår av flödesschemat i Figur B1-10. Följande stationer särskiljs:

- Mottagning av transportbehållare.
Järnvägsvagn med transportbehållare körs in i inkapslingsstationens ankomsthall där den granskas. Därifrån transporteras den in i inkapslingsstationen och förvaras till dess det blir aktuellt att tömma behållaren på bränsle (eller hårdkomponenter).



Figur B1-9. Principiell disponering av inkapslingsstation.



Figur B1-10. Flödesschema för hantering av använt bränsle i inkapslingsstation.

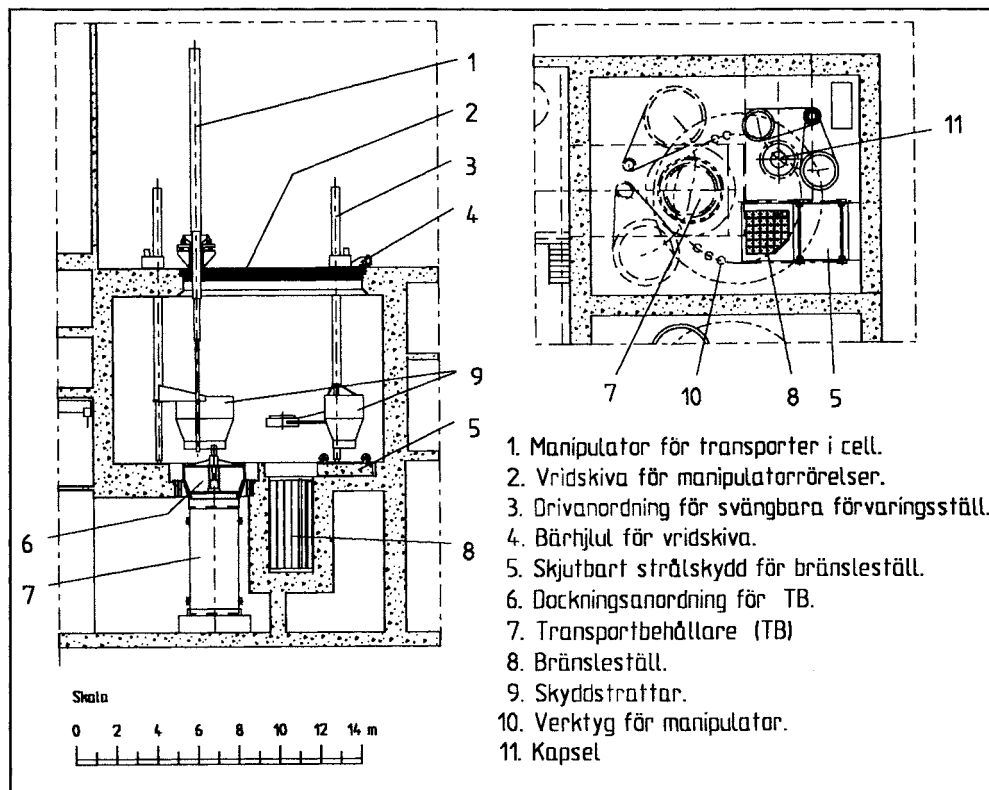
- Förberedelser för tömning av transportbehållare.
I en separat arbetsposition demonteras ytterlocket och behållaren ansluts till heta cellen för urlastning av bränsle (eller för urlastning av hårdkomponenter).
- Heta cellen.
Utformning av heta cellen för använt bränsle framgår av Figur B1-11. Behållarens innehåll av bränsleelement flyttas över till ett bränsleställ i heta cellen eller direkt till kapseln. BWR-elementen lyfts därvid ur sina boxar, som blir kvar i transportbehållaren. Efter avslutad urlastning tas behållaren bort och flyttas till cellen för hårdkomponenter för urlastning av BWR-boxarna. Stålkapseln har monterats i kopparhöljet och hela enheten omslutits av ett strålskydd. Kapseln fylls därefter med det partikulära materialet, stålkapselns lock läggs på, och kapseln flyttas över till svetsstationen.
- Maskinbearbetning och svetsning.
Svetsningen av kapsellocket sker med elektronstrålesvetsning i en helautomatisk process. Efter svetsning kontrolleras förslutningen med hjälp av ultraljudsteknik. Vid godkänd svets förs kapseln över till uttransportkontrollen. Om svetsen ej kan godkännas så skärs den upp och ny lockpåsvetsning görs. Det gamla locket kasseras efter en rengöring.
- Hårdkomponenter och reaktorns interna delar.
Transportbehållaren med kvarlämnade boxar eller den speciella transportbehållaren med interna delar från CLAB dockas till en speciell het cell. Där lyfts transportbehållarens innehåll över till en betongkokill, som när den är fylld förses med lock och fylls med betong genom injektering.

Kopparkapsel fylld med smält bly

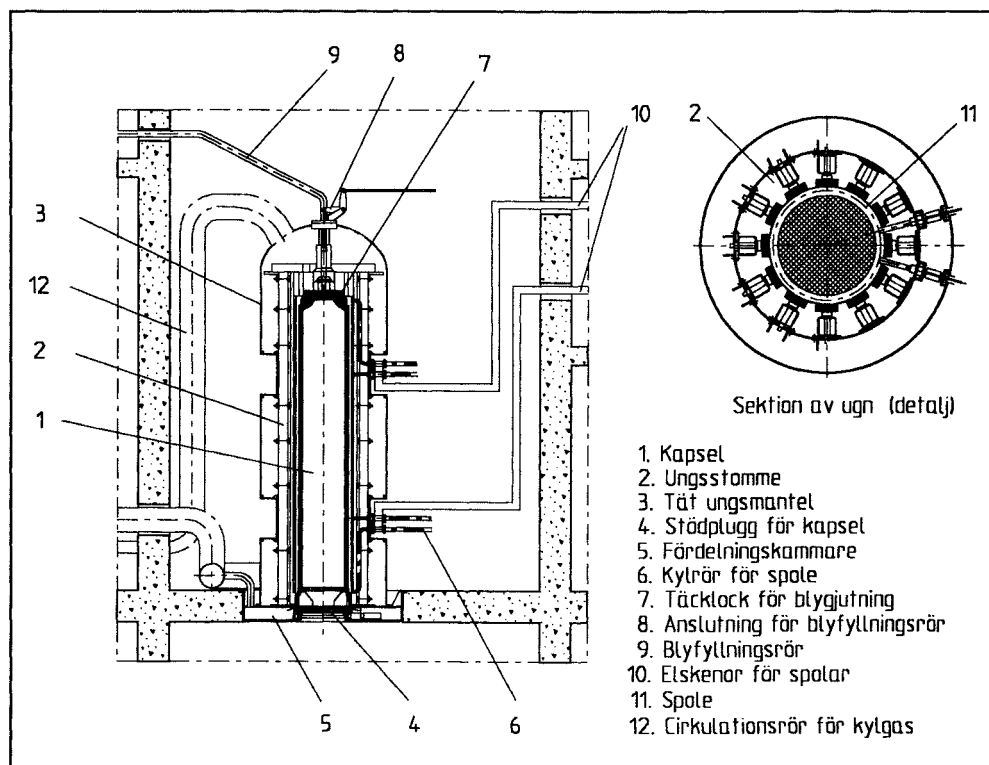
Denna inkapslingsprocess kräver en extra station där uppvärmning och avsvälning utgör de centrala momenten. Stationen ser likadan ut för alternativet blyfylld stålkapsel.

- Induktionsugn.
Utformningen av en induktionsugn framgår av Figur B1-12. Från heta cellen flyttas kapseln till en ugnposition och kapseln förs upp i ugnen som tillsluts.
Ugnen värmer kapsel med bränsle till ca 380°C på ca 6 timmar. Därefter fylls smält bly på, som långsamt får stelna. Stelningen kontrolleras så att den sker från botten och uppåt, för att inga håligheter eller kaviteter skall uppstå. Avsvälningen från blyets stelningstemperatur, 327°C till ca 60°C kan ske på 12 timmar. Hela operationen i induktionsugnen är anpassad att ta 24 timmar per kapsel.

Från induktionsugnen transporteras kapseln till svetscellen, som i jämförelse med cellen för koppar/stålkapseln också innehåller enheter för bearbetning av den övre blyytan innan kapsellocket läggs på.



Figur B1-11. Heta cellen.



Figur B1-12. Kapsel placerad inne i induktionsugn för blyfyllning.

4 DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE

4.1 UTFORMNING

Djupförvaret för det inkapslade bränslet förutsättes vara beläget på 500 m djup under markytan. Det nås från dagen med ramp (kapslar och material) och hisschakt (personal). I /B1-1/ bygger layouten på kommunikation och transport i enbart schakt. I föreliggande studie utformas förvarssystemen så likartat som möjligt i de delar som ej är systemspecifika. Beträffande kommunikationssystem väljs ramp som föreslagits i analysen av VLH-systemet.

Anläggningen på 500 m nivå består av ett system av parallella deponeringstunnlar med tillhörande transporttunnlar, serviceutrymme och ventilationssystem, se den principiella utformningen i Figur B1-1. I praktiken kommer layouten att bestämmas av de lokala förhållandena i den valda bergvolymen. Utbredningen bestäms framför allt av värmeutvecklingen i det deponerade bränslet. Kostnaderna har beräknats för den layout som Figur B1-13 visar.

Avfallskapslarna deponeras i vertikala hål borrade i deponeringstunnlarnas botten. Utformning och mått framgår av Figur B1-14 (koppar/stålkapsel enligt Figur B1-2a).

Förvaret består av en central del, innehållande serviceutrymmen, samt en deponeringsdel. Centrala delen står i förbindelse med markytan via en ramp och ett schakt:

Rampen utgör den huvudsakliga kommunikationsvägen mellan markytan och djupförvaret. Rampen rymmer såväl spår för tåg som vägbana för truckar och andra fordon. Uppfordring av berg samt nertransport av kapslar och återfyllnadsmaterial m m sker i rampen.

Serviceschaktet förses med hiss för personbefordran samt med ledningar för försörjning av förvaret med luft, vatten, el m m. I den motsatta änden av tunnelsystemet finns ytterligare ett schakt. Detta tjänstgör normalt som frånluftsschakt, men i en nödsituation skall det även kunna användas för personevakivering.

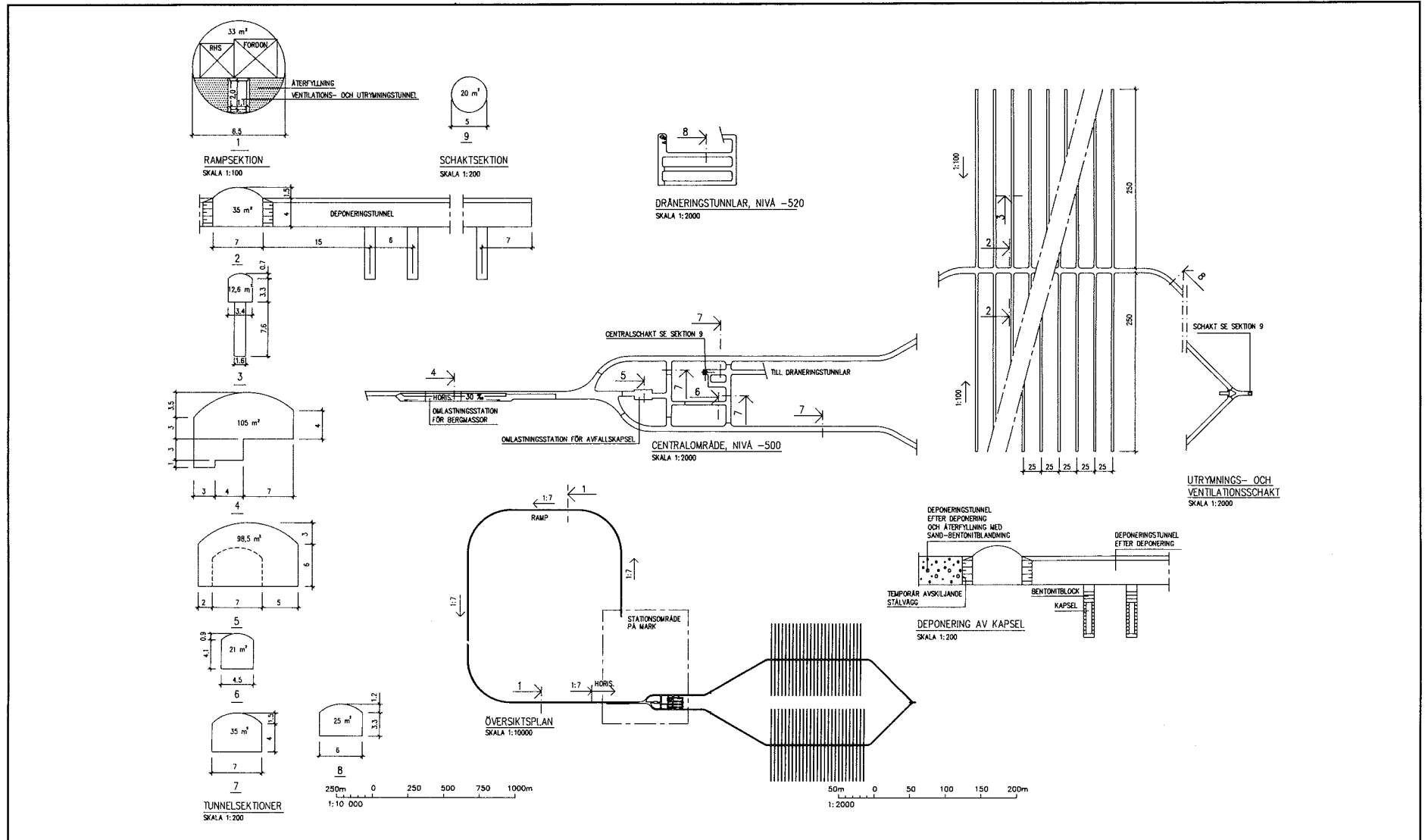
Förvaret är under deponeringsperioden uppdelat i två delar för att medge en enkel fysisk separering av deponeringsarbete från övrig verksamhet såsom utsprängnings- och förseglingsarbete. Utsprängning av deponeringstunnlarna planeras att ske i takt med deponeringen.

4.2 TILLREDNINGSTEKNIK

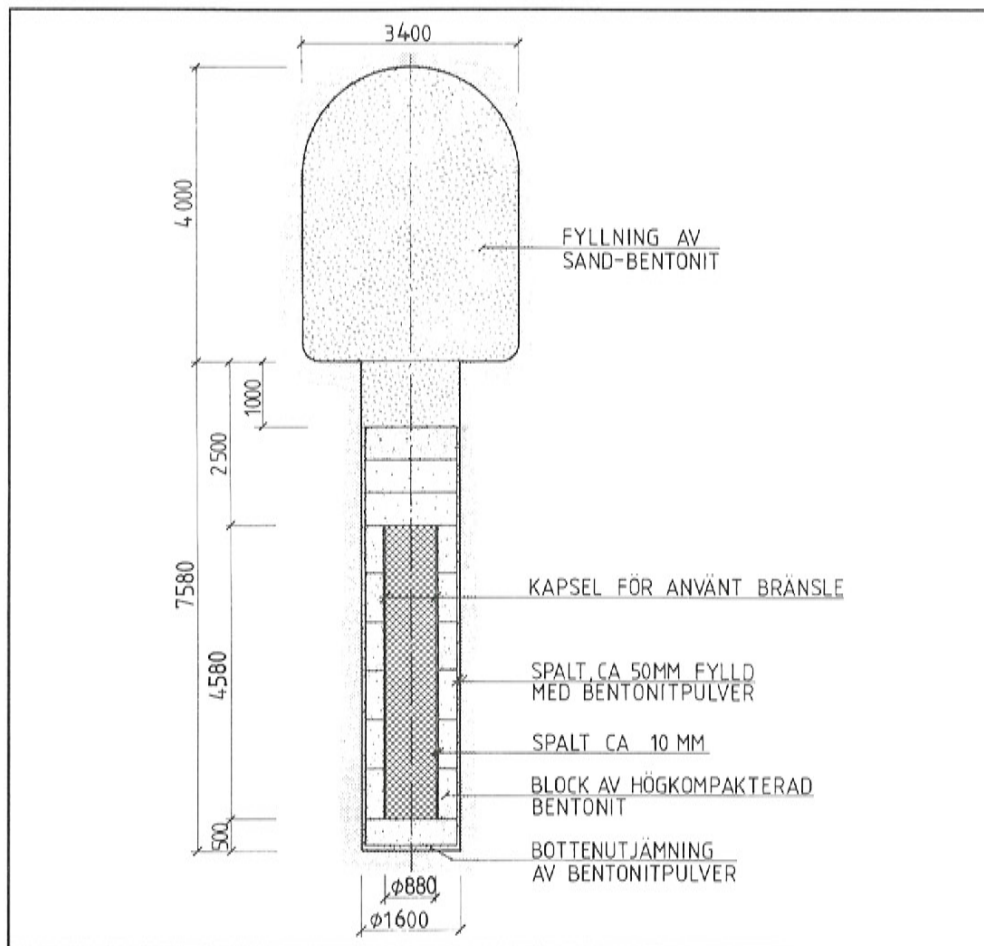
Tillfartsrampen antas drivas med TBM-teknik (Tunnel Boring Machine). En förebild i Sverige är Klippen-tunneln (vattenkraftsprojekt), som de första 100 m drevs i lutning 1:10 nedåt, för att sedan plana ut till horisontell borrhning. I fallet med djupförvaret för använt kärnbränsle förutsätts en lutning på 1:7. Utlastning av bergmassorna sker med den typ av tåg samt mellanlagringsfickor, som används i Klippen. Det s k RHS-tåget (Rapid Haulage System) illustreras i Figur B1-15.

När rampen kommit ner till förvarsdjup och fram till centralområdet under jord drivs schaktet med konventionell stigortsborrhning (borrning av pilothål från dagen och upprymning med krona underifrån).

Centralområdet förutsättes sprängas ut med konventionell borrhning-sprängningsteknik.



Figur B1-13. Bas för kostnadsberäkningarna – KBS-3.

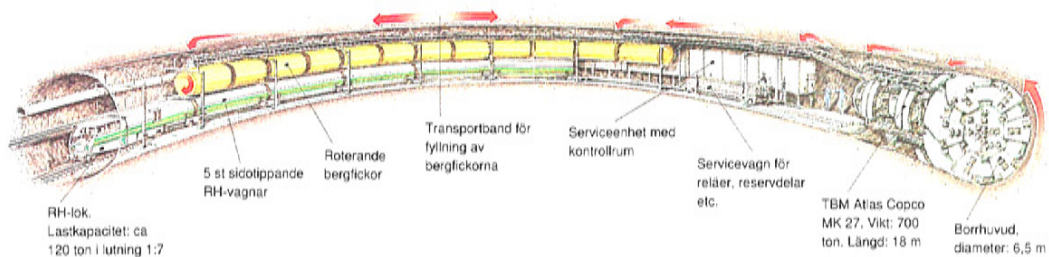


Figur B1-14. Deponeringshål med koppar/stålkapsel och bentonitbuffert – KBS-3.

Centralorter och deponeringsorter drivs med samma teknik.

Ventilationsschakten i änden på förvarsdelen stigortsborras.

Deponeringshålen har diametern 1,6 m (0,35 m tjock bentonitbuffert). Djupet är 7,6 m och det inbördes avstånd 6,0 m. Borrningen inleds med att ett mindre pilothål (ca \varnothing 150 mm) borras med kärnborr i centrum. Utifrån detta hål och dess borkärna bedöms om platsen med hänsyn till bergets struktur och permeabilitet är lämplig som deponeringsplats. Om bedömningen utfaller positivt borras hålet med fullortsborr-



Figur B1-15. Rapid Haulage System samt TBM-enheten i Klippen. (Hämtad ur broschyr från Kraftbyggarna.)

ning, varvid pilothålet fungerar som styrhål. Tamrock har i /B1-4/ anvisat en utrustning som skulle vara lämplig för detta ändamål.

Blir deponeringsplatsen ej godkänd pluggas pilothålet. Sådana platser som efter kartering av orten anses mindre lämpliga utnyttjas heller inte. Figur B1-16 illustrerar den flexibilitet som finns.

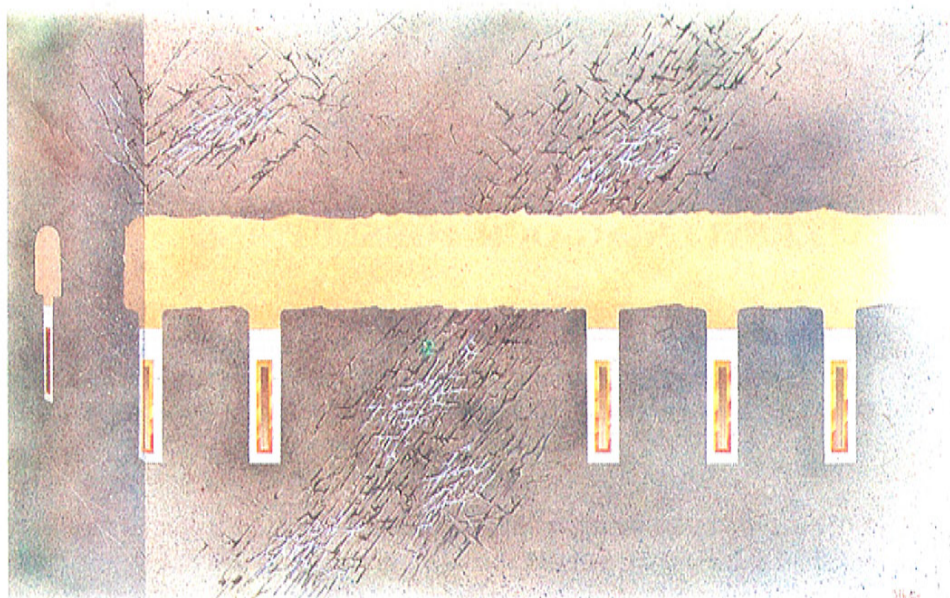
4.3 DEPONERINGSTEKNIK

Kapseln transporteras ner i rampen från inkapslingsstationen i ett strålskärmande transportskydd, och fram till deponeringstunnelns mynning. Där flyttas kapseln över till en deponeringsmaskin, för hantering av kapslar och bentonit inne i deponeringstunneln. Deponeringssekvensen illustreras i Figur B1-17.

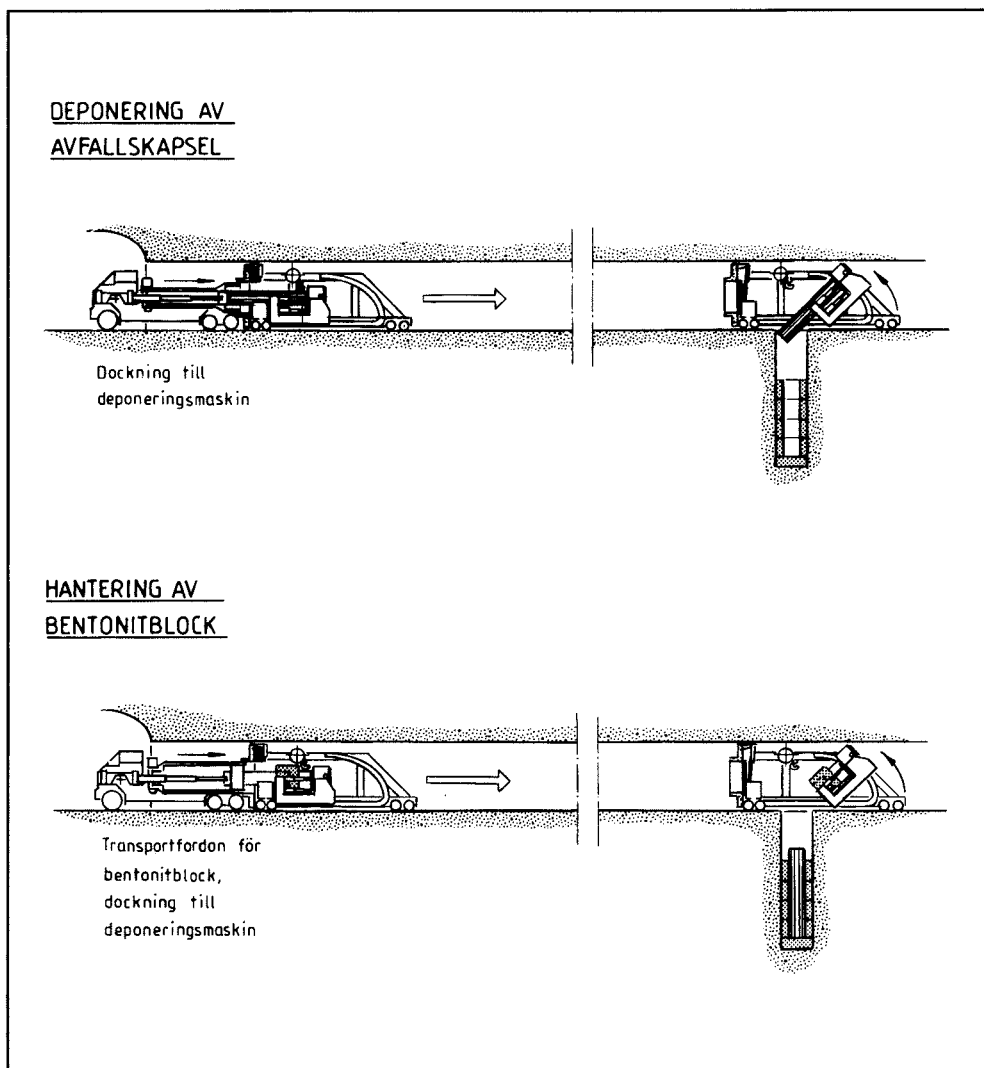
Sekvensen inleds med att botten i hålet täcks med bentonit, varefter alla ringformade bentonitblock placeras i hålet och riktas upp ev. med hjälp av en attrapp.

Den eldrivna, rälsbundna deponeringsmaskinen med kapsel körs in. Efter en grov positionering av fordonet vid deponeringshålet sätts hydrauliska stödben ner, och en finjustering av läget görs. Kapseln reses i vertikalt läge, sänks ner och frigörs. Ett strålskydd på deponeringsmaskinen skärmar av arbetsplatsen mot transporttunneln.

Ytterligare ett antal bentonitblock placeras ovanpå kapseln. Slutligen fylls hålet upp med en bentonit-sandblandning och tunneln är fri för tillträde. Hålet täcks med en platta och stämp mellan platta och tak monteras där så erfordras. Stämpens syfte är att förhindra bentoniten att svälla ut i tunneln under tiden fram till dess deponeringstunneln återfylls.



Figur B1-16. Anpassning till växlande bergförhållanden.

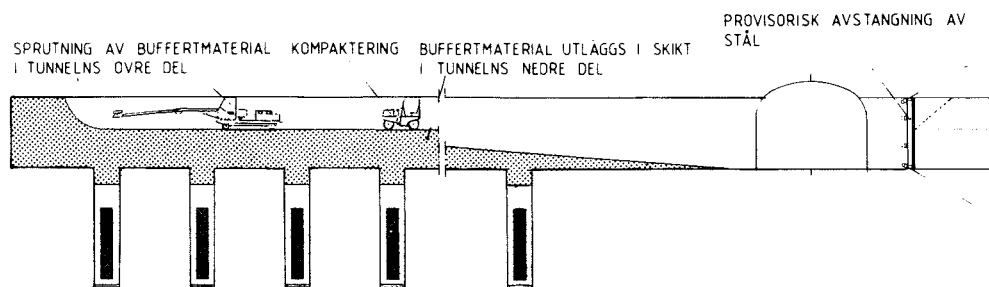


Figur B1-17. Principen för deponering av kapsel och placering av bentonitbufferten.

4.4 ÅTERFYLLNING OCH FÖRSLUTNING

När ett antal deponeringstunnlar är klara kan arbetet med förslutning av dessa påbörjas. Härvid tas provisorisk vattendränning, eventuella stämp m m, bort och tunnlar fylls med bentonit-sandblandning. Tunnelmyningarna avtätas med en provisorisk stödvägg, som tas bort i samband med återfyllningen av centraltunneln, se Figur B1-18.

Efter avslutad deponering av alla kapslarna försluts hela djupförvaret med bentonit-sandblandningar. Rampen och schakten förses härvid på vissa avsnitt med pluggar av kompakterad bentonit alternativt betong. Syftet är att tätas av och förhindra vatten-transporter i kanaler som kan uppstå axiellt med de rum som borrar eller sprängs ut i berget.



Figur B1-18. Återfyllning av deponeringstunnel.

5 DJUPFÖRVAR FÖR LÅNGLIVAT LÅG- OCH MEDELAKTIVT AVFALL

Tre olika enheter ingår i den totala djupförvarsanläggningen, men dessa har ej på något sätt berörts i jämförelsen och beskrivs därför ej här. Den enda del som skulle kunna identifierats som en skillnad i vissa fall är delen för kokillerna med ingjutna BWR-boxar, som alltså skulle utgå om boxarna kapslas in tillsammans med bränslet. Denna skillnad har endast bäring på kostnadsanalysen, men är så liten att den försummas i studien.

REFERENSER

B1-1 Kärnkraftens slutsteg, PLAN 92

Juni 1992

Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter.

Del 1-2

SKB, Stockholm

B1-2 Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle – KBS-3. Del I-IV.

SKBF/KBS maj 1983

B1-3 Lönnerberg B, Larker M, Ageskog L

May 1983

Encapsulation and handling of spent nuclear fuel for final disposal.

SKB/KBS Technical Report TR 83-20, Stockholm

B1-4 Autio J

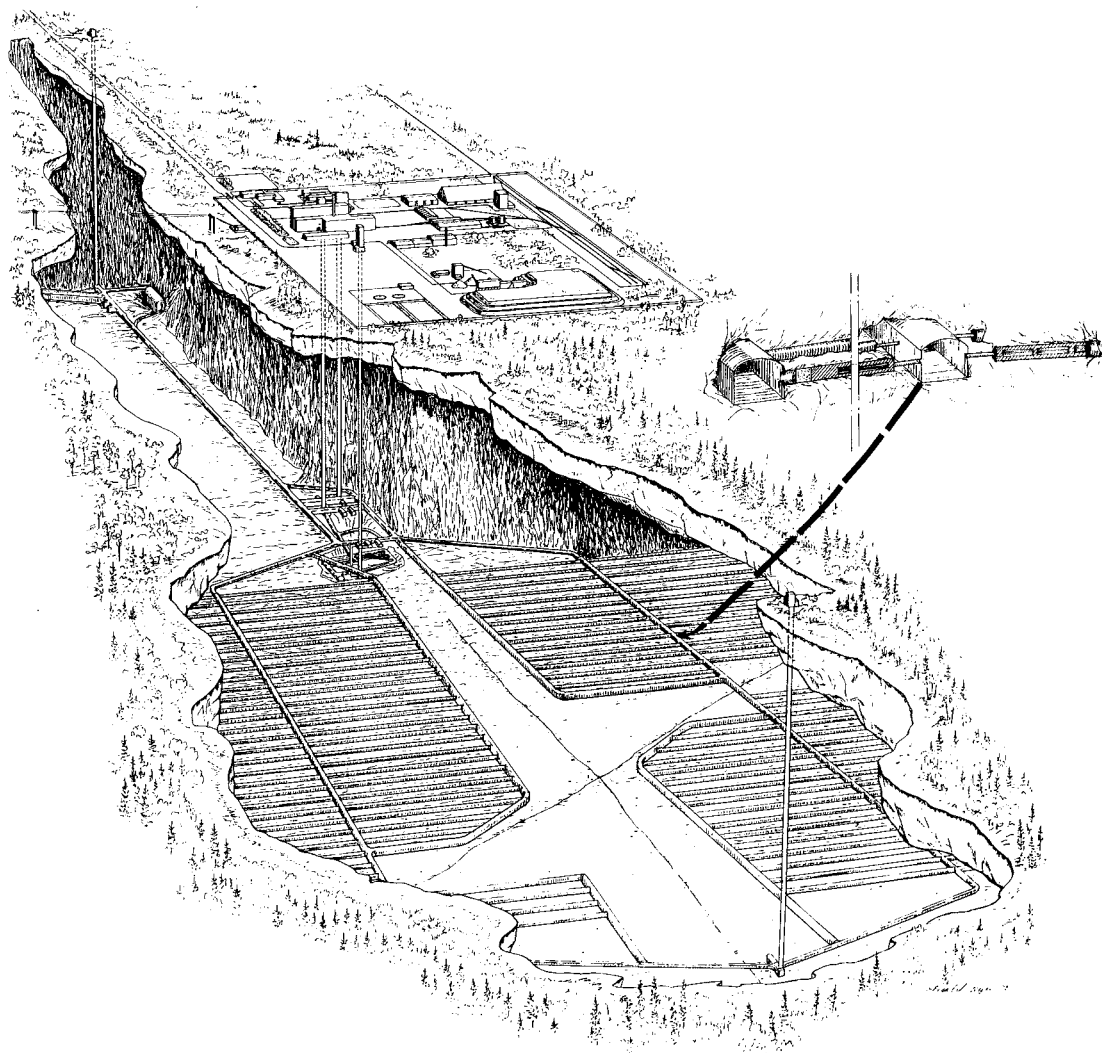
June 1992

Description of Tamrock equipment for boring vertical deposition holes

SKB Arbetsrapport AR 92-40, Stockholm

SYSTEMET MEDELLÅNGA TUNNLAR, MLH

Bilagan har utarbetats med de syften som framgår av huvudtexten i rapporten.



Figur B2-1. Principskiss av MLH-systemet.

1 KAPSELALTERNATIV

Kapselalternativen är desamma som för KBS-3, se bilaga 1.

2 GEMENSAMMA ANLÄGGNINGAR

Dessa är likaså desamma som för KBS-3, se bilaga 1, med undantagen att:

Sandmagasinet behövs ej.

Bergupplaget blir mindre.

3 INKAPSLINGSSTATION

Denna är identisk med den som beskrivs för KBS-3, se bilaga 1.

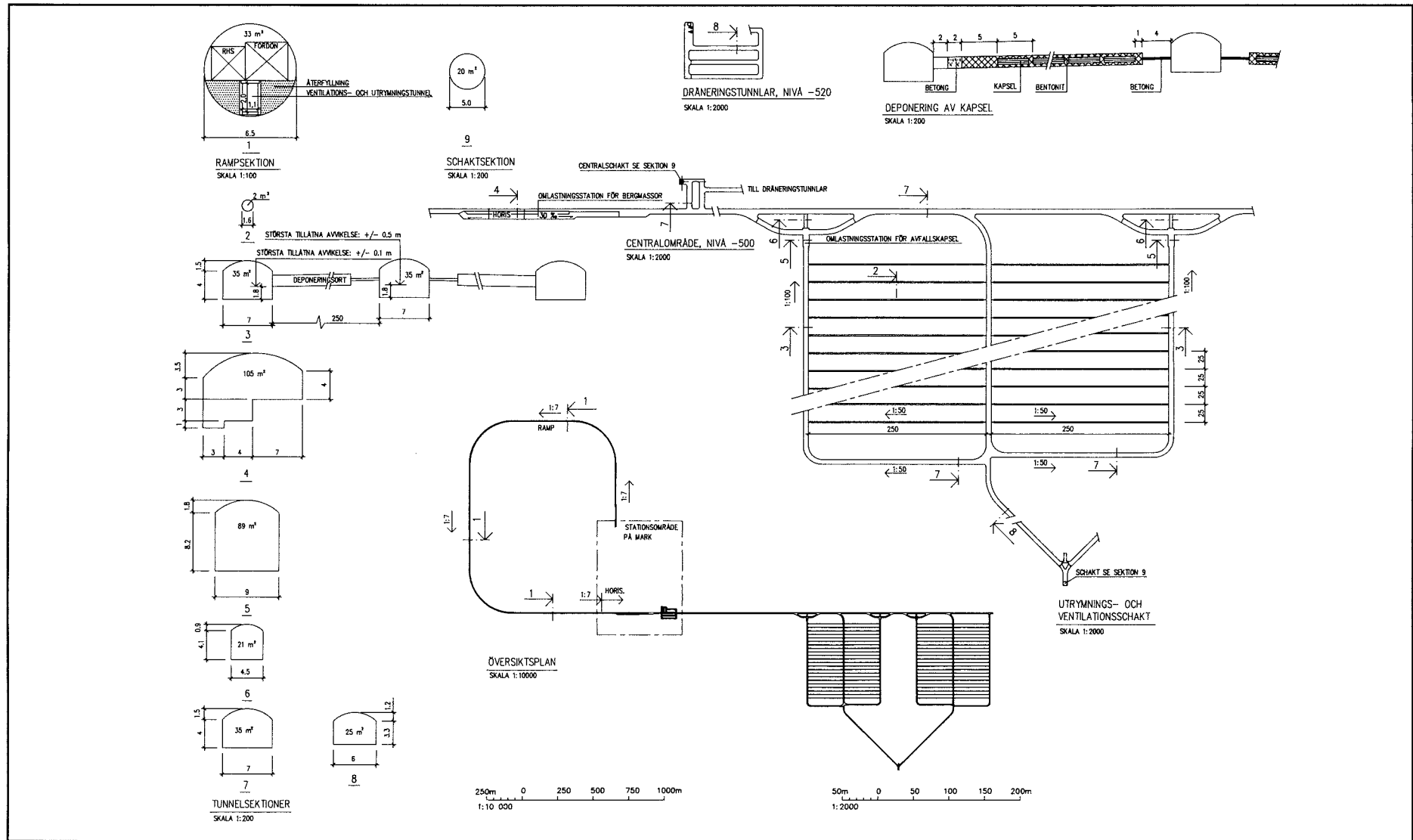
4 DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE

4.1 UTFORMNING

Djupförvaret förutsättes vara beläget på 500 m djup under markytan. Det nås från markytan med ramp (kapslar och material) och hisschakt (personal).

Anläggningen består av ett antal parallella deponeringstunnlar, som står i förbindelse med en centraltunnel och en sidotunnel. Därtill ingår transporttunnlar, serviceutrymmen och ventilationssystem, se layoutskissen i Figur B2-1. Liksom för KBS-3-systemet kommer deponeringsområdet att anpassas efter lokala förhållanden i fråga om bergblockens utseende och egenskaper. Utbredningen bestäms framförallt av värmeutvecklingen i det använda bränslet.

Kostnaderna har beräknats för den layout som visas i Figur B2-2.



Figur B2-2. Bas för kostnadsberäkningarna - MLH.

Kapslarna deponeras horisontellt i rad i de borrade deponeringsorterna.

Förvaret består av en central del med serviceutrymme samt en deponeringsdel. Centrala delen står i förbindelse med markytan via en ramp och ett schakt. Rampens och schaktets inredningar och funktioner är desamma som beskrivs under KBS-3, se bilaga 1 och Figur B2-2.

I änden på förvardsdelen finns också ett frånluftschakt, som vid nödsituationer dessutom tjänar som utrymningsschakt.

Förvaret är under deponeringsperioden uppdelad på två delar för att skilja deponeringsarbetet från pågående borring av deponeringstunnlar.

4.2 TILLREDNINGSTEKNIK

Rampen ner respektive centralområdet, transport-, central- och sidotunnlar borrar respektive borrar/sprängs såsom beskrivs i bilaga 1.

Deponeringstunnlarna har en diameter på 1,6 m (koppar/stålkapsel enligt Figur B1-2a i bilaga 1, samt 0,35 m tjock bentonitbuffert). De borrar med en speciell teknik som bygger på den metod som används vid stigortsborring. I en första fas borrar ett pilothål (ø 200–300 mm). Därefter sätts upprymningskronan på och dras mot borrar-maskinen. Orter på upp till 4,0 m i diameter har borrats på detta sätt. Längden till följd av borrarvikelser och kronslitage antas vara begränsad till 250 m.

Bedömningen av om deponeringstunneln har en lämplig sträckning kan göras i flera steg. Ett första steg är att kärnborra längs tunneln innanför tunnelkonturen. I nästa steg borrar pilothålet i vilket kompletterande information kan fås. I ett sista steg rymms tunneln upp, varvid tillträde fås för besiktning av bergväggar m m.

Bergförstärkningar förväntas bli sparsamt förekommande i de borrade orterna.

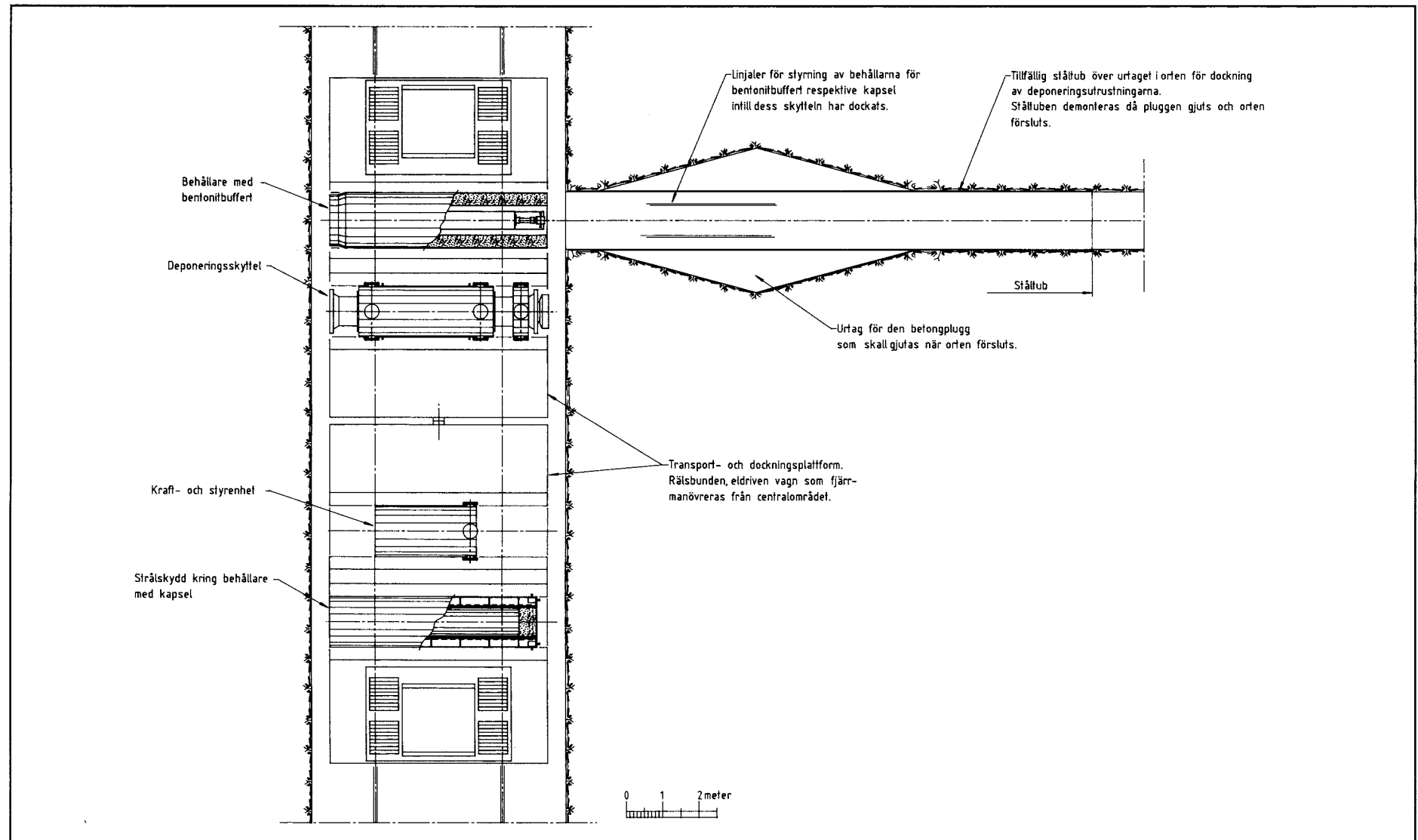
4.3 DEPONERINGSTEKNIK

Kapseln transporteras ner i rampen i ett strålskärmande transportskydd och vidare fram till deponeringsområdet. Här lyfts paketet över från transportfordonet till en deponeringsplattform, se Figur B2-3. Tidigare har även behållaren med bentonitbufferten placerats på sin plats på deponeringsplattformen. På denna plattform finns dessutom deponeringsskytteln och kraft- och styrenheten.

Deponeringen antas ske i två steg, varvid hela bentonitbufferten placeras i ett moment, och kapseln skjuts in i det centrala hålet i bufferten i ett andra. Utrustningen som förutsätts i studien beskrivs i /B2-1/.

Bentonitbufferten byggs upp i behållaren i serviceområdet under jord. Bentoniten består av pressade block. Ett perforerat foderrör med tolerans för införsel av kapseln lämnas i mitten. Behållaren med den på så sätt förpreparerade bentonitbufferten skjuts från deponeringsplattformen in i deponeringstunneln. Deponeringsplattformen flyttar sig så att deponeringsskytteln kommer i läge för behållaren, varefter dessa dockas och båda skjuts in i tunneln. Efter ny förflyttning av deponeringsplattformen dockas kraftenheten till skytteln. Ekipaget förflyttar sig till fronten. Skytteln bär hela lasten och förflyttar sig genom parvis lösgöring och framflyttning av fötter som trycks mot berget. Denna teknik används för TBM-maskiner.

Vid fronten sänks behållaren ner på sulan (golvet) och behållaren dras tillbaka och lämnar kvar bentonitbufferten. Ekipaget förflyttar sig sedan bakåt till deponeringsplattformen.



Figur B2-3. Transport- och dockningsplattform.

Därefter dockas behållaren med kapsel till skytteln och transporteras in till bentonitbufferten, där kapseln skjuts in i det kvarlämnade foderröret. Sist placeras en bentonitplugg i den yttre delen av foderröret.

I det fall ett avsnitt av tunneln har kasserats för deponering fylls även det centrala hålet i bufferten med bentonitblock.

4.4 FÖRSLUTNING

När en deponeringstunnel fyllts pluggas mynningen med en betongpropp. En tillräckligt stor bentonitplugg lämnas mot betongen för att denna ej skall kunna påverka bentoniten runt närmaste kapsel.

Tillfälliga proppar kan behövas för placering inne i deponeringstunnlarna om längre avbrott skall göras i deponeringen. Utformningen av dessa har endast översiktligt studerats. Det förutsätts här att de kan göras av en monterbar/demonterbar konstruktion.

Efter avslutad deponering återfylls hela djupförvaret med bentonit-sandblandning. Potentiella transportvägar för grundvatten skärs av med hjälp av pluggar på samma sätt som i KBS-3-systemet, se bilaga 1.

REFERENSER

B2-1 Jansson L

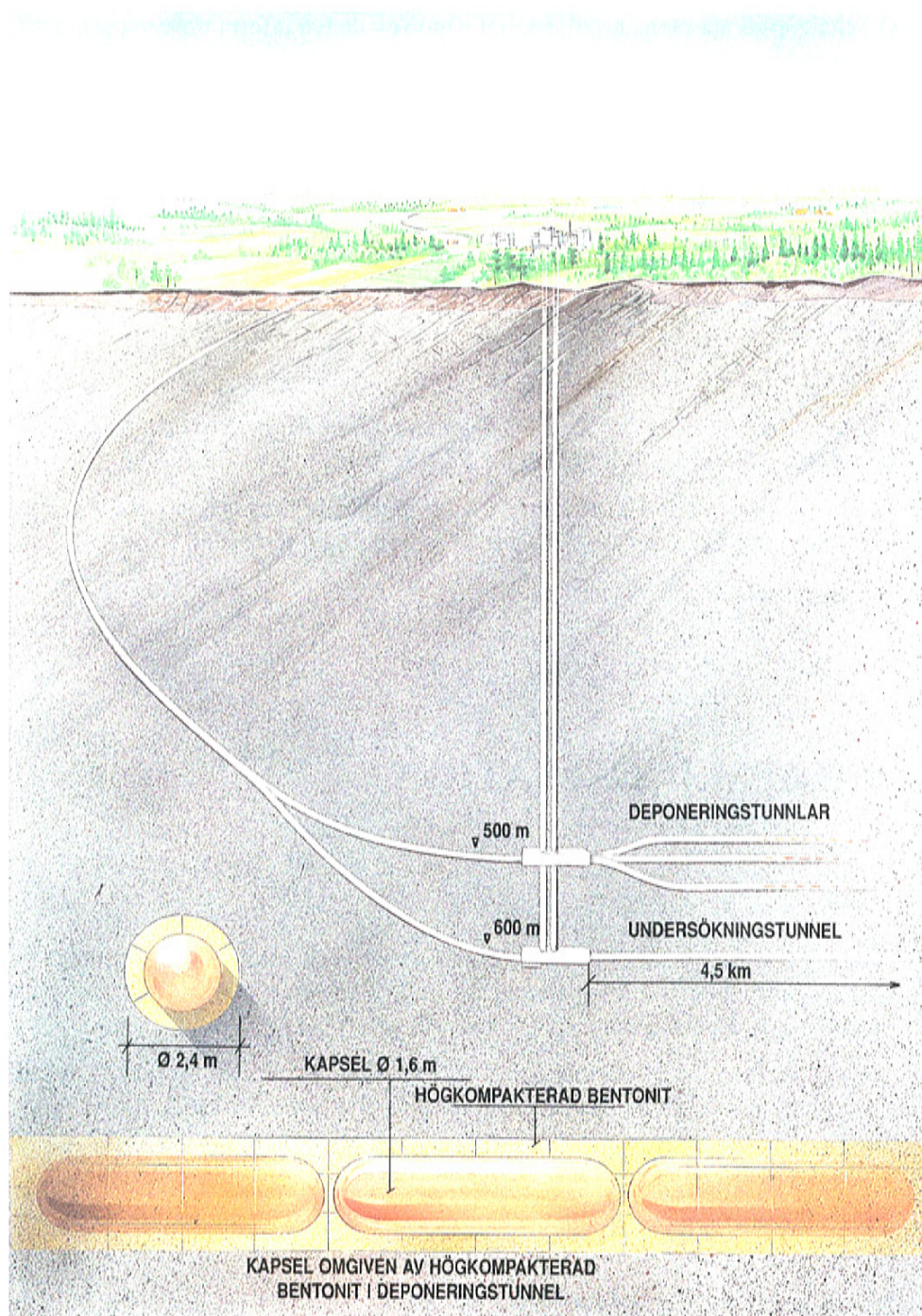
April 1992

PASS – Method for horizontal emplacement of KBS-3 type canisters in 1.6 m diameter drifts

SKB Arbetsrapport AR 92-39

SYSTEMET LÅNGA TUNNLAR, VLH

Bilagan har utarbetats med de syften som framgår av huvudtexten i rapporten.



Figur B3-1. Principskiss av VLH-systemet.

1 KAPSELALTERNATIV

De kapselalternativ som analyserats är:

- A. Koppar/stålkapsel med halvsfäriska gavlar, se Figur B3-2a och b.
- B. Koppar/stålkapsel med plana gavlar, se Figur B3-3.
- C. Stålkapsel utan kopparhölje enligt någon av de två utformningarna som ingår i A respektive B.

2 GEMENSAMMA ANLÄGGNINGAR

Dessa är desamma som de för KBS-3-systemet med några få undantag. Jämfört med beskrivningen i bilaga 1 förändras för VLH följande:

Sandmagasinet behövs ej, då återfyllningsvolymen är liten och är hänförlig till centrala delar mm. som återfylls först när all deponering avslutats.

Bergupplaget i dagen blir mindre.

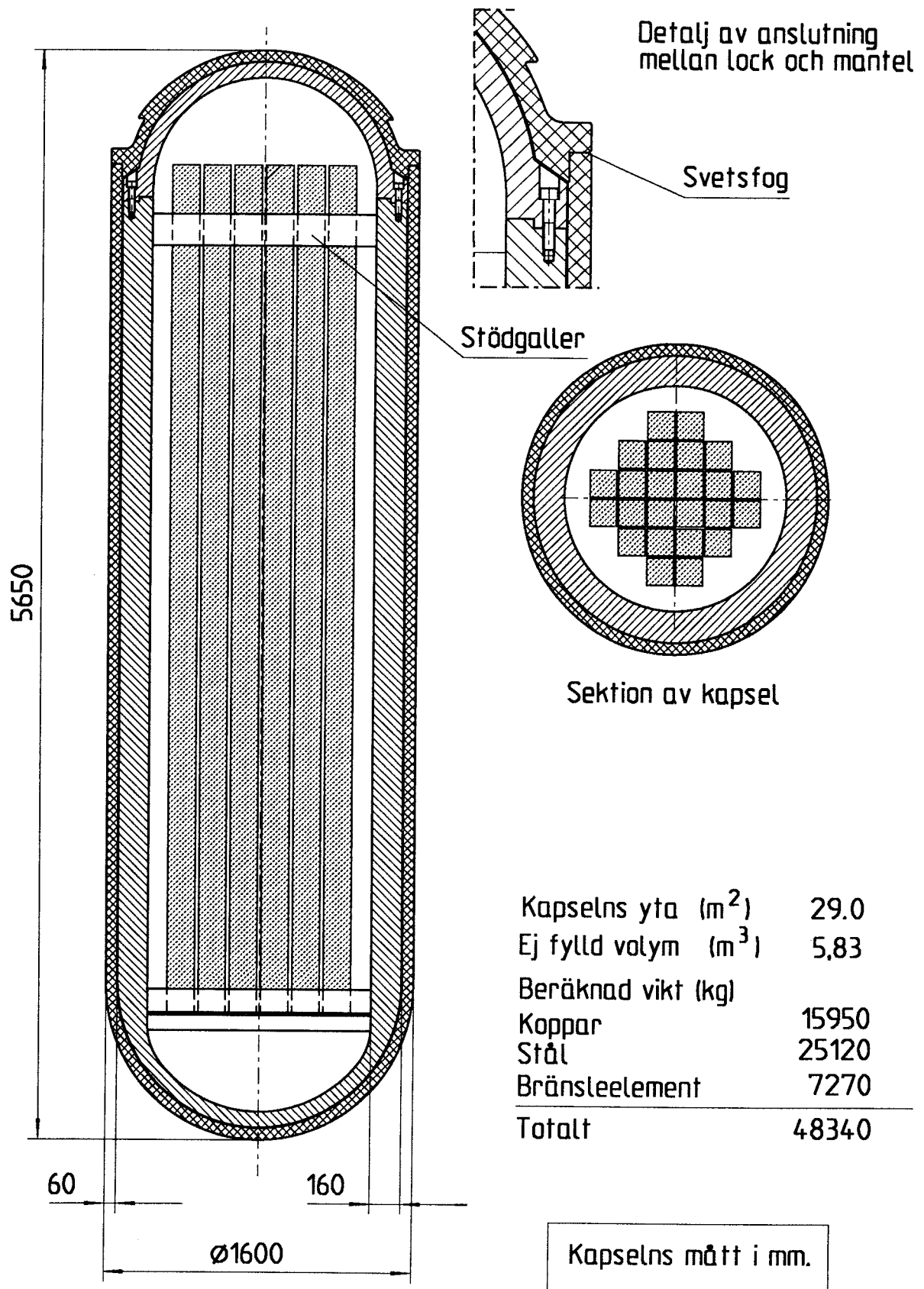
3 INKAPSLINGSSTATION

Alla erforderliga funktioner hos inkapslingsstationen som behövs för inkapsling av kompositkapseln i KBS-3-systemet, se beskrivningen i bilaga 1, behövs även för inkapsling av VLH-kapseln.

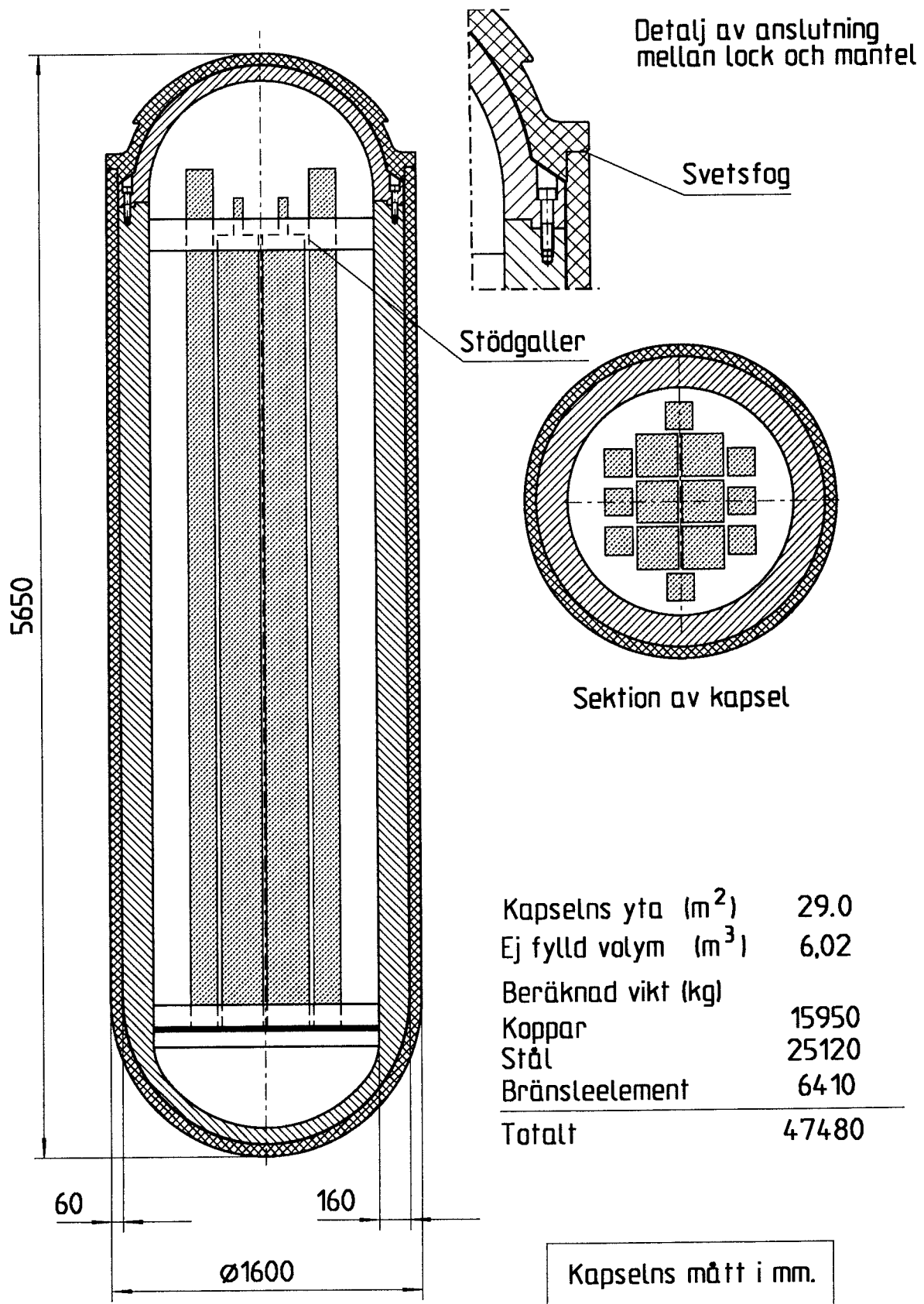
Vissa skillnader finns emellertid till följd av den större och tyngre VLH-kapseln. Dockningsöppningar till heta cellen måste göras större, liksom strålskyddet runt kapseln. Svetscellen måste ha dimensioner så att den klarar den stora diametern. Lyftutrustningar skall klara den större vikten, etc.

Tekniskt och säkerhetsmässigt bedöms dessa skillnader inte ha någon betydelse. Den kostnadsmässiga betydelsen är också liten, men har beaktats i kalkylerna.

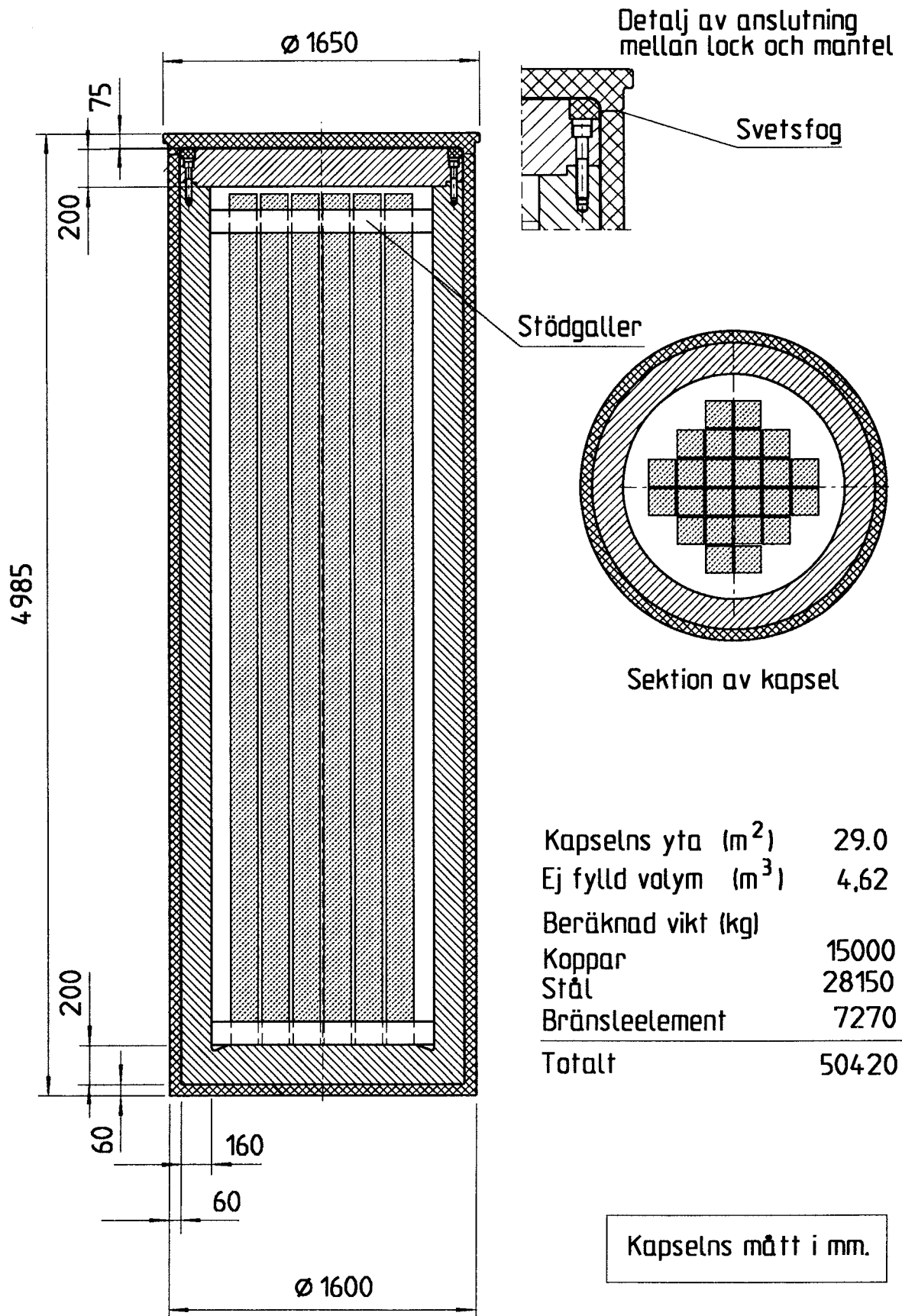
Inkapslingsstationens kapacitet är lika stor som den i KBS-3 räknat i ton använt bränsle. Eftersom varje kapsel innehåller dubbla mängden bränsle jämfört med KBS-3-kapseln så innebär detta att i genomsnitt en kapsel färdigställs varannan dag.



Figur B3-2a. Koppar/stålkapsel med halvsfäriska gavlar, BWR-element.



Figur B3-2b. Koppar/stålkapsel med halvsfäriska gavlar, PWR-element.



Figur B3-3. Koppar/stålkapsel med plana gavlar, BWR-element.

4 DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE

4.1 UTFORMNING

Djupförvaret skiljer sig betydligt från KBS-3-förvaret i deponeringsdelen. Det ligger emellertid på samma antagna djup, 500 m under markytan, och nås med en ramp i lutning 1:7, samt vertikalschakt för personaltransporter, ventilation mm. En ritning över förutsatt detaljutformning framgår av Figur B3-4.

Under förvarsnivån, finns på ca. 600 m djup en undersökningstunnel som utgör sonderingstunneln för slutlig placering av deponeringstunnlarna.

Förvaret består av en central del och en deponeringsdel. Det centrala området är anpassat efter det behov av utrymme deponeringsutrustningen behöver, samt den hantering av bergmassor som blir aktuell. Centralområdet nås från markytan med en ramp och ett serviceschakt. Dessas inredning och funktioner är desamma som beskrivs i bilaga 1. Skillnaden i rampen är att kapsel med transportskydd är större.

Deponeringsområdet består av tre parallella, horisontella tunnlar med ett inbördes avstånd som begränsar växelverkan mellan tunnlar, framför allt temperaturpåverkan. Kapslarna placeras i centrum av dessa tunnlar såsom schematiskt framgår av Figur B3-1.

Deponering behöver ske i två av tunnlar parallellt i början när avståndet till fronten är långt. Dessa tunnlar hålls separerade från den tredje som är under drivning i inledningsskedet.

4.2 TILLREDNINGSTEKNIK

Ramp, schakt och centralområde tillreds på samma sätt som beskrivs i bilaga 1.

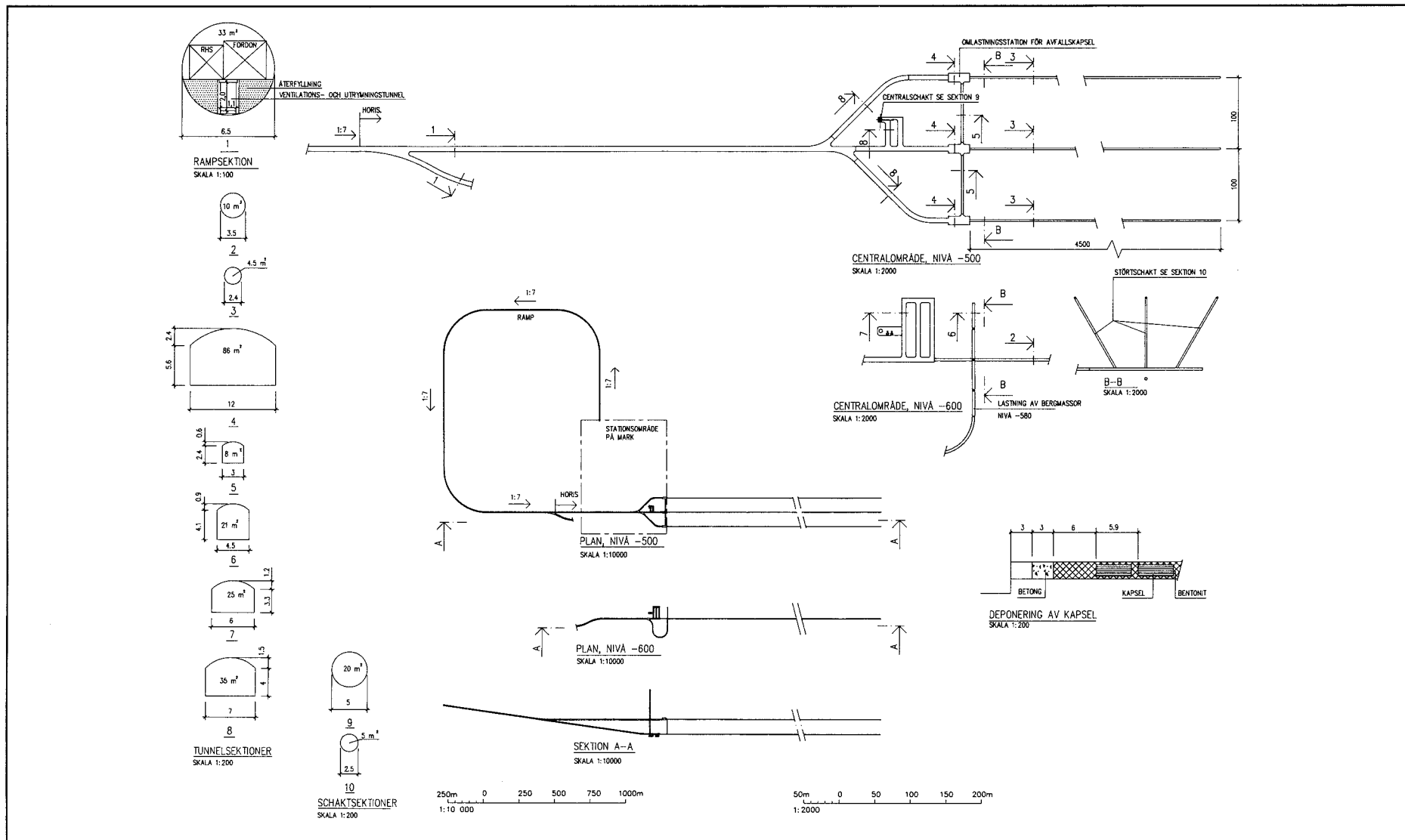
Undersökningstunneln på 600 m djup liksom de tre deponeringstunnlarna borraras med TBM-teknik. En rad referenser finns för borrhning i hårt berg med olika diametrar. Frågan utreds i /B3-1/.

Det bedöms att tunnlar kommer att korsa större sprickzoner där deponering av kapslarna är olämplig, se Figur B3-5.

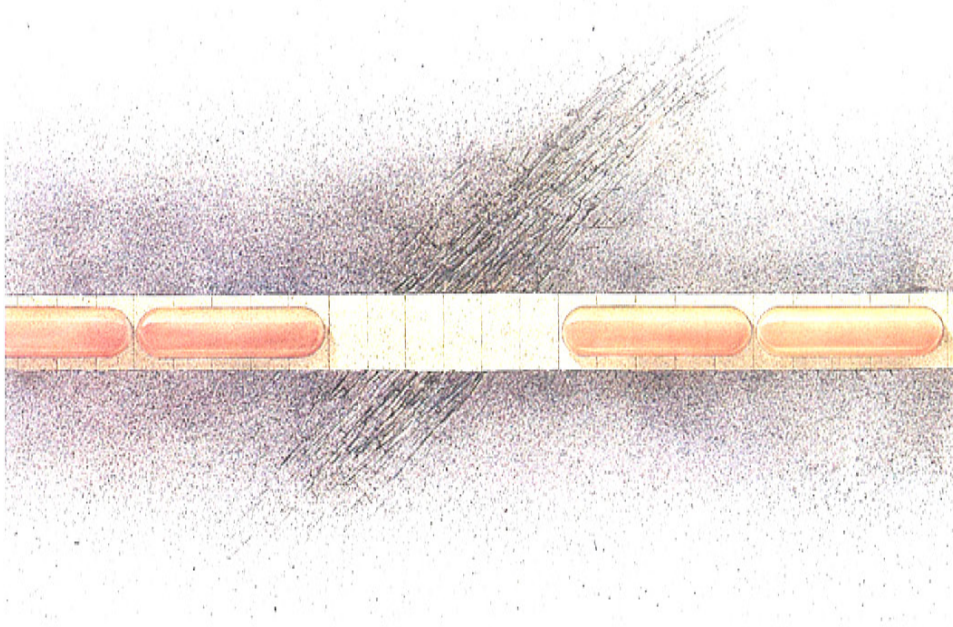
4.3 DEPONERINGSTEKNIK

Kapslarna i strålskärmande transportbehållare fraktas ner till förvaret i rampen med hjälp av t ex RHS-tåg, se Figur B1-15 i bilaga 1. Transporten körs ända fram till serviceområdet vid deponeringstunnelns mynning, där deponeringsenheterna finns. Där lyfts eller skjuts kapseln ut ur transportbehållaren och läggs i deponeringsfordonet. Kapslarna omges nu ej längre av någon strålskärm. En schematisk skiss av serviceområdet visas i Figur B3-6.

Deponeringen går så till att bentonitbotten läggs ut, kapseln placeras på denna bädd, varefter övriga block läggs på plats. Det förfarande och den utrustning som förutsätts i studien beskrivs i /B3-2/.



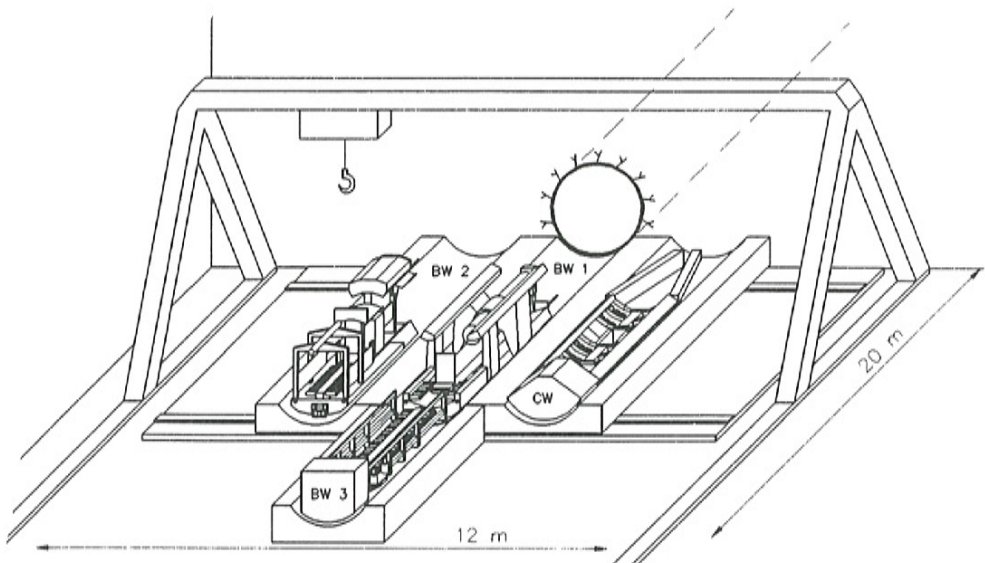
Figur B3-4. Bas för kostnadsberäkningarna – VLH.



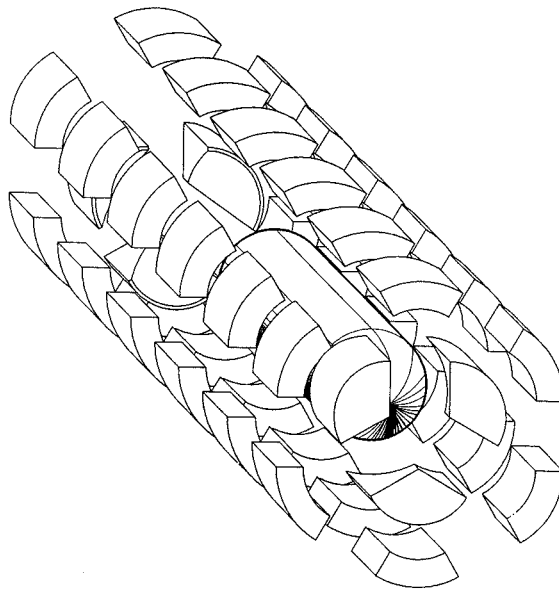
Figur B3-5. Anpassning till växlande bergförhållanden.

Figur B3-7 visar det antal block som skall placeras runt varje kapsel. Blocken väger upp till ca 900 kg per styck, vilket bedömts vara en möjlig storlek att tillverka utan att besvärande brottanvisningar uppkommer i blocken.

Figur B3-8 visar deponeringssekvensen. I Steg 1 kör ett spårfrött "fordon" med bentonitmanipulator I och en släpvagn som lastats med blocken för a-d i Figur B3-8 fram till fronten och lägger av blocken i den visade ordningen. Manipulatorn och hanteraren av blocken från släpvagnen är helt fjärrstyrda och vissa rörelser kan eventuellt göras automatiska. Fordonet backar därefter ut ur tunneln. I Steg 2 kör "fordonet" med kapseln in till den utlagda bentonitbädden. "Fordonets" utscende framgår av ritningen i Figur B3-9. Gafflarna fram fälls ut när ekipaget kommer till fronten och dessa grenslar den utlagda bottenbädden. Kapseln förflyttas framåt med hjälp av upprepade upp-fram-ner-rörelser tills den bara ligger på gafflarna, varefter



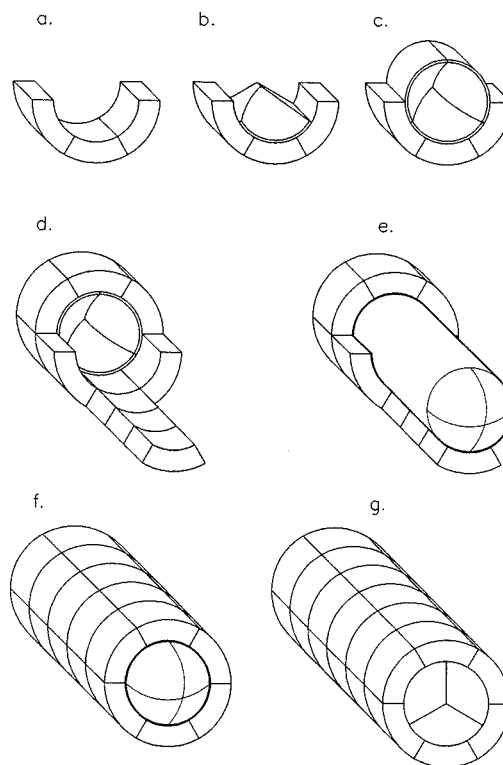
Figur B3-6. Serviceområde vid mynningen till en deponeringsort CW = Canister Wagon (kapselvagn) och BW = Bentonite Wagon (bentonitvagn).



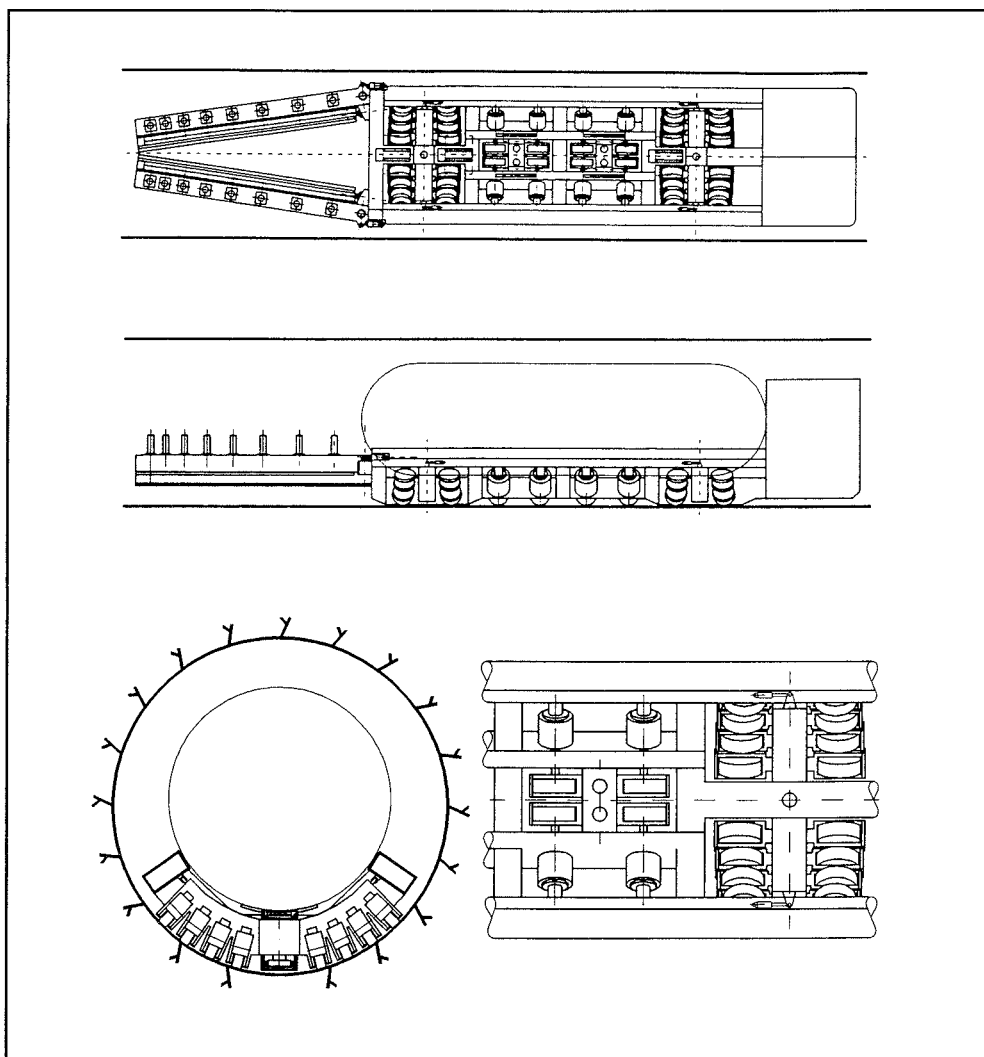
Figur B3-7. Bentonitblock per kapselposition.

dessa sänks ner och kapseln placeras på bentonitbädden. "Kapselfordonet" backar sedan ut till serviceområdet. Slutligen, i Steg 3, kör ett "fordon" med bentonitmanipulator II och släpvagn med blocken för f och g (se Figur B3-8) fram till den deponerade kapseln och lägger block efter block på plats.

Kapslar med plana gavlar ger en något enklare lösning på blockhanteringen genom att de konkava blocken då kan undvikas.



Figur B3-8. Deponeringssteg.



Figur B3-9. Spårfritt fordon för deponering av kapsel. Övre bilden visar fordon med gafflar. Dessa är utrustade med en höj- och sänkbar transportör för förflyttning av kapseln från transportposition till deponeringsposition. Undre bilden visar detalj av boggisystemet.

I händelse av längre stopp eller planerat uppehåll måste pluggning, permanent eller temporärt, ske mot den senast deponerade kapseln. Sådana konstruktioner har ej studerats. Det förutsätts här att en monterbar/demonterbar konstruktion kan utvecklas.

4.4 FÖRSLUTNING

När en tunnel fyllts pluggas mynningen med en kombinerad betong-och bentonit-plugg. Utformningen är densamma som är planerad för vertikala schakt.

När samtliga kapslar är på plats återfylls alla utsprängda utrymmen under jord inklusive undersökningstunneln på 600 m djup med bentonit-sandblandningar. Rampen och schaktet förses på vissa avsnitt med mer kvalificerade pluggar, se bilaga 1.

REFERENSER

B3-1 Sandstedt H, Wichmann C, Pusch R, Börgesson L, Lönnerberg B

August 1991

Storage of nuclear waste in long boreholes
SKB Technical Report TR 91-35, Stockholm

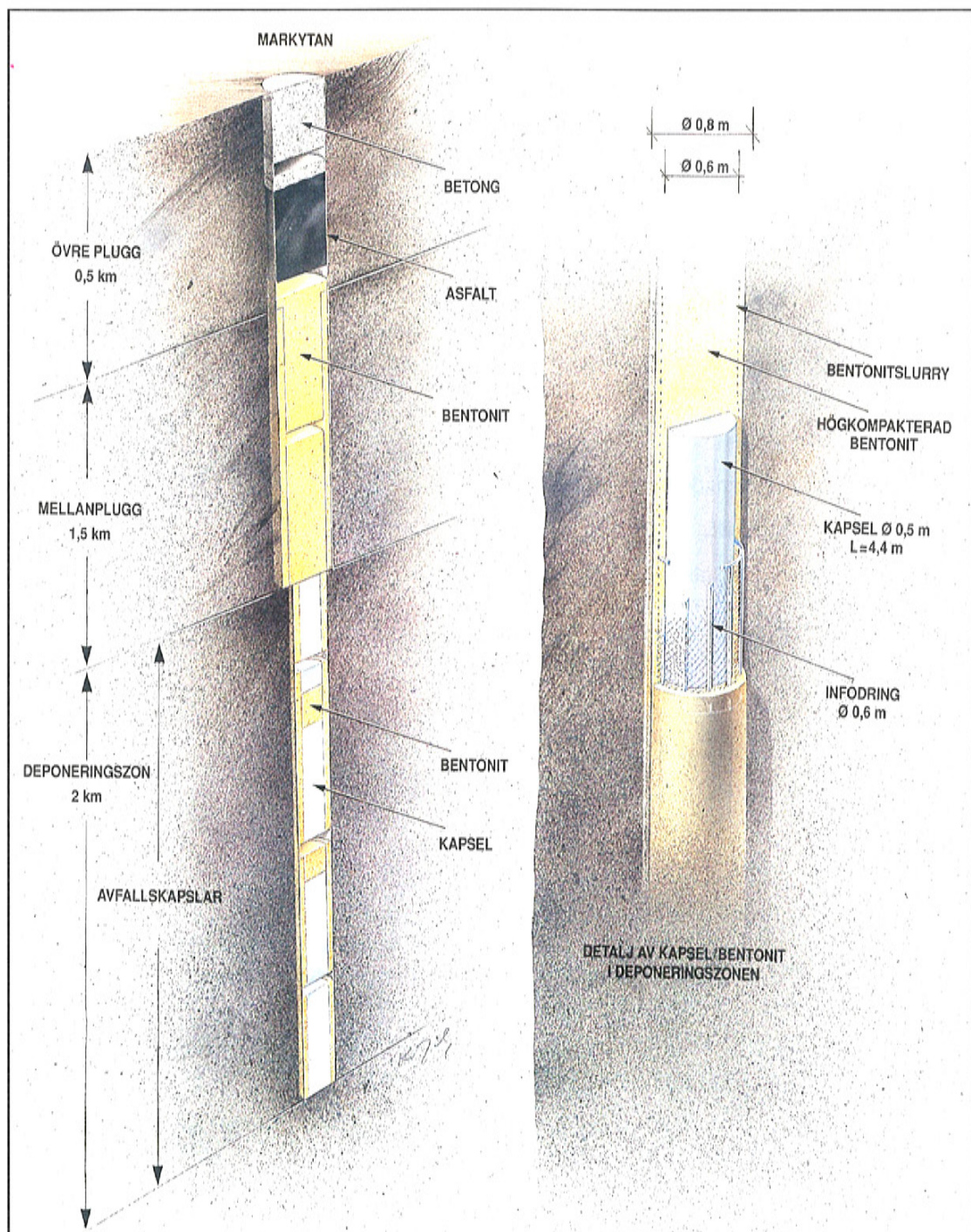
B3-2 Henttonen V, Suikki M

June 1992

Equipment for deployment of canister with spent nuclear fuel and bentonite buffer in
horizontal holes.
SKB Technical Report TR 92-16.

SYSTEMET DJUPA BORRHÅL, VDH

Bilagan har utarbetats med de syften som framgår av huvudtexten i rapporten.



Figur B4-1. Principskiss av VDH-systemet.

1 KAPSELALTERNATIV

De kapselalternativ som analyserats är:

- A. Titankapsel med betongfyllning, se Figur B4-2 (hela BWR-element och konsoliderade element);
- B. Kopparkapsel framställd med Het Isostatisk Pressning (HIP).

2 GEMENSAMMA ANLÄGGNINGAR

Samlokalisering av inkapslingsstation och djupförvar innebär för VDH-systemets vidkommande att transporter erfordras i samma omfattning som för övriga studerade system. Industriområdet innehåller ej

- bergupplag,
- markbyggnader över schakt,
- rampnerfart,
- ventilationsutrustning för underjordsdelen.

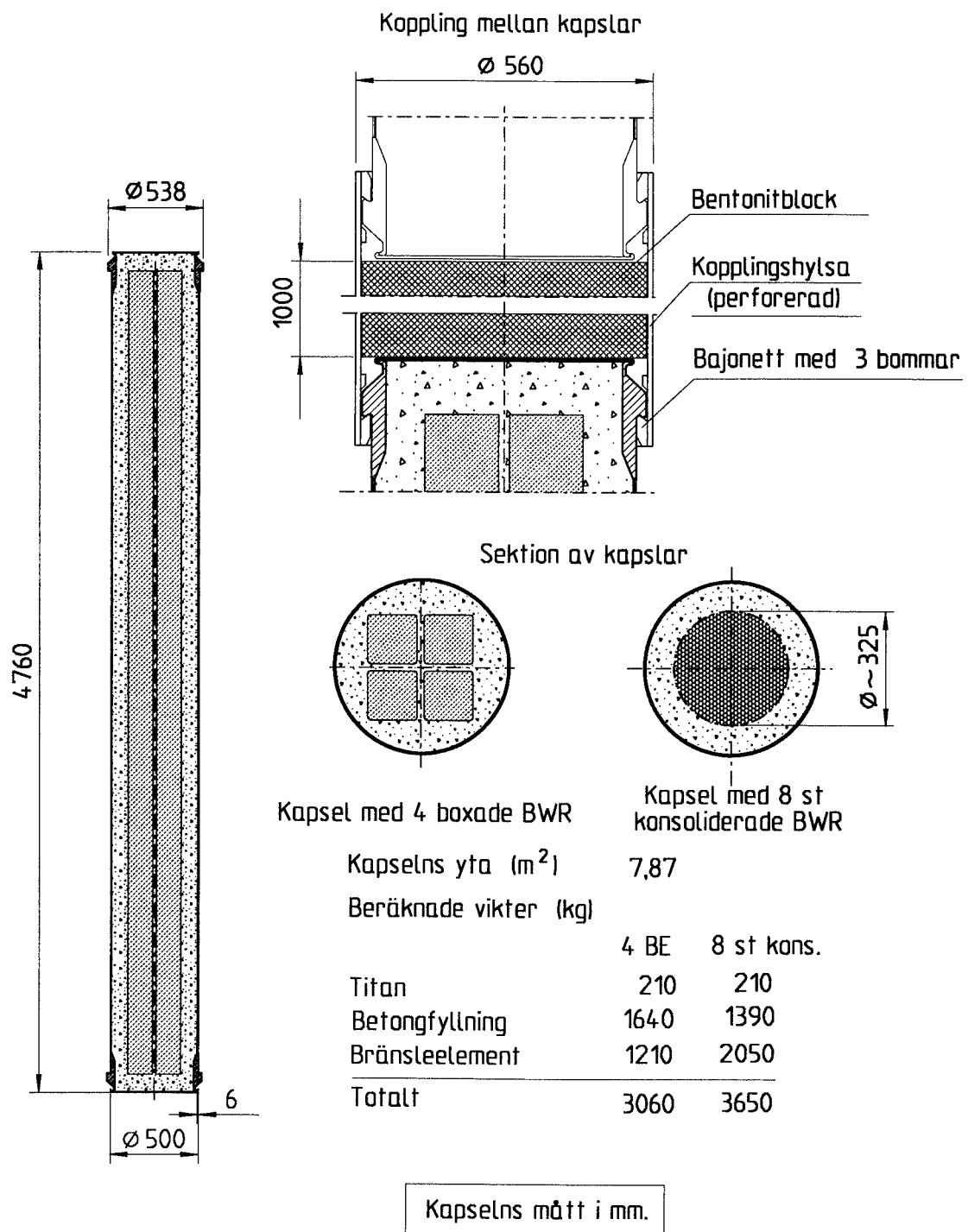
3 INKAPSLINGSSTATION

Analysen har i första hand koncentrerats på den betongfyllda titankapseln. Perspektivritningen i Figur B1-8, bilaga 1, ger en god uppfattning om byggnadens utseende. Skillnaderna för VDH-kapseln finns i detaljer, som berör den speciella utformningen av kapseln.

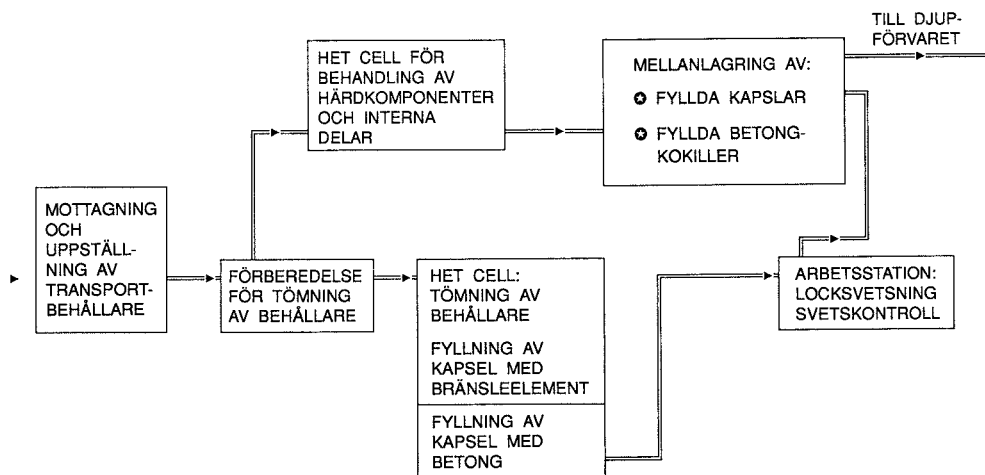
Kapaciteten är dimensionerad för en takt av tre kapslar per dag med ej konsoliderade element och 1,5 kapslar med konsoliderade element.

Det förutsätts att boxarna avskiljs från elementen innan de förs in i kapseln. Observera att Figur B4-2 redovisar längdmåttet för ”med boxarna”.

Hantering av det använda bränslet framgår av flödesschemana i Figur B4-3 (ej konsoliderade element) och Figur B4-4 (konsoliderade element). Dessa har i jämförelse med schemat för KBS-3-kapseln, se Figur B1-10 i bilaga 1, helt annorlunda hantering i ”heta cellen” och ”svetscellen”. Dessa delar har ej studerats lika detaljerat



Figur B4-2. Titankapsel med betongfyllning.



Figur B4-3. Flödesschema för inkapsling av ej konsoliderade bränsleelement.

som anläggningsdelarna för KBS-3-kapslar. Inkapslingen av ej konsoliderade element förutsättes dock ej skilja funktionsmässigt från inkapslingen i KBS-3.

Ej konsoliderade element

Efter det att bränsleelementen sänkts ner i titanhöljet flyttas kapseln över till en särskild cell, där betongfyllningen genomförs.

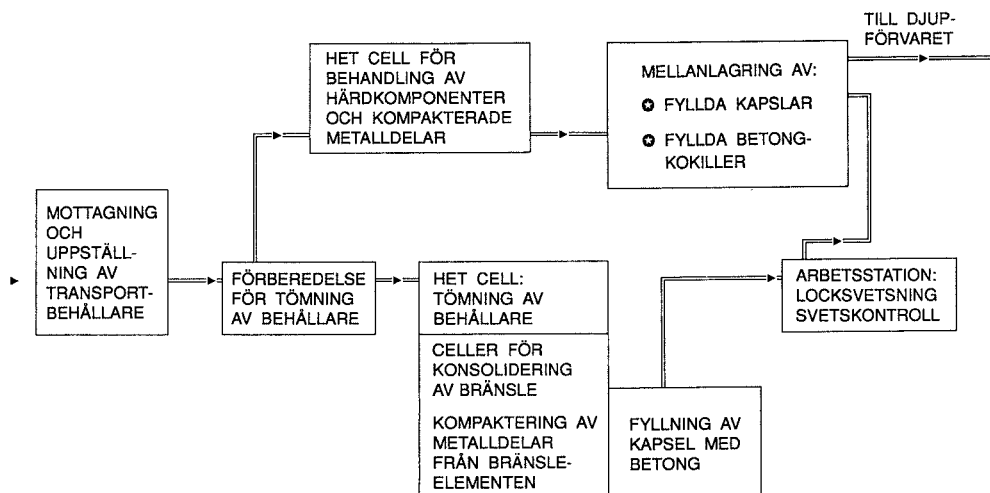
När betongen brunnit flyttas kapseln vidare till "svetscellen", där överytan av cementen först jämnas till innan locket läggs på och svetsas fast.

Konsoliderade element

I detta alternativ innehåller cellen för urlastning av transportbehållarna enheter för isärtagning av bränsleelementen och konsolidering av stavarna så att de ryms i en speciell behållare, som efter förslutning sänks ner i kapseln.

Därefter fylls kapseln med cement och svetsas igen på samma sätt som i processen för kapseln med ej konsoliderade element.

Övriga metalldelar kompakteras i en särskild cell och kapslas in i separata kapslar av samma typ som används för själva bränslet.



Figur B4-4. Flödesschema för inkapsling av konsoliderade element.

4 DJUPFÖRVAR FÖR ANVÄNT BRÄNSLE

4.1 UTFORMNING

VDH-systemet beskrivs detaljerat i /B4-2/. En principiell indelningen av ett borrhål i deponerings- och pluggningszoner visas i Figur B4-1. De delar av borrhålet som går igenom starkt vattenförande zoner avses ej utnyttjas för deponering. Dessa avsnitt fylls med enbart bentonit.

Djupförvaret utgörs av ett flertal djupa borrhål, med ett inbördes avstånd på 500 m. På varje borrhålsplats erfordras en arbetsplats med rum för borrhåll, bodar, verkstad och slamhantering. Figur B4-5 visar en principskiss av ett deponeringsområde med 19 borrhål (konsoliderade element) respektive 38 borrhål (ej konsoliderade element). Området täcker en yta på ca 3 km² resp 7 km² om borrhålen placeras som figuren visar.

Till varje borrhålsplats dras vägar och ledningar för el, VA etc.

4.2 TILLREDNINGSTEKNIK

Borringen bygger på oljeborringsteknik och de tillkommande erfarenheterna som bland annat erhållits från det djupa borrhålet i Gravberg.

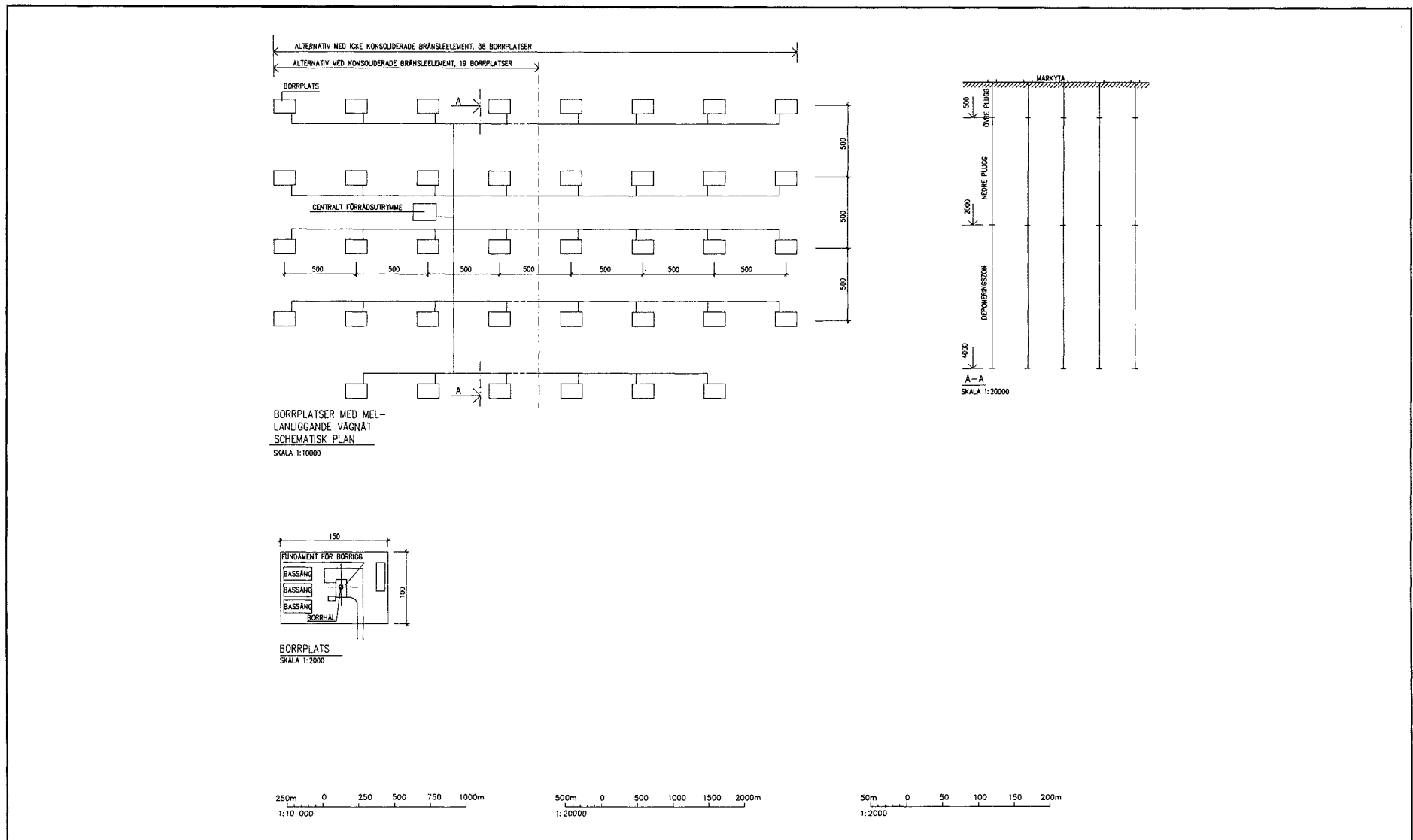
Borrhålet förutsättes bli 0,8 m i diameter i deponeringssektionen, vilket är den största diameter som idag bedöms möjlig att borra till 4 km djup.

Borringen genomförs med en bentonitsuspension som borrhållsvätska på djupet. Foderrören som erfordras konstrueras av en bronskvalitet i stället för den inom oljeindustrin använda stålqualiteten. Härigenom undviks reducerande korrosion med vätegasbildning. Foderrören görs tillräckligt perforerade för att bentoniten skall kunna fylla ut hela "tomrummet" i borrhålet runt kapseln.

4.3 DEPONERINGSTEKNIK

Ett möjligt sätt att deponera kapslarna beskrivs i /B4-2/. Utformningen av metoden är endast skisserad och bygger på användandet av samma rigg som borringen utförs med. Principen är att kapseln fästs på borrhållens plats på borrhållstången och skjuts ner i foderröret till deponeringspositionen.

Innan deponeringen startar i ett borrhål ersätts bentonitsuspensionen som använts under borringen, med en tjockare bentonitslurry, så tjock som kan tillåtas med hänsyn till att kapseln skall kunna pressas ner genom slurryn utan att skadas. Två eller flera kapslar med mellanliggande högkompakterade bentonitblock kopplas samman till en sträng som skjuts ner på en gång. Bentonittillsatsen avvägs så, att den genomsnittliga bentonitdensiteten blir tillräckligt stor och även räcker till för att bentoniten vid svällning skall hålla varje kapsel på plats. Kontroll av kapselns position i hålet blir viktig och bedöms kunna göras med hjälp av utvecklade metoder och instrument från oljeborringindustrin. Man räknar med att en lämplig deponeringstakt ligger på ca 200 m borrhål per månad och hål.



Figur B4-5. Basen för kostnadsberäkningarna – VDH.

4.4 FÖRSLUTNING

De översta 2 000 m av hålet pluggas för att hindra vattentransport i axiell led längs med eller inne i borrhålet. På något eller några ställen görs urfräsningar som bryter ev. förekommande störd zon runt hålet.

Två olika pluggningsdelar kan särskiljas. Den undre delen, från 2 000 till 500 m djup, fylls med kompakterade bentonitblock inne i det perforerade foderröret. Blocken trycks ner i en så tjock bentonitslurry som möjligt. Den övre delen, från 500 m djup till markytan, fylls igen med asfalt. Denna täcks av en plugg av betong.

REFERENSER

B4-1 Systemanalyse Mischkonzept

Dezember 1989

Hauptband

Kernforschungszentrum Karlsruhe

B4-2 Juhlin C, Sandstedt H

December 1989

Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economical potential

SKB Technical Report TR 89-39

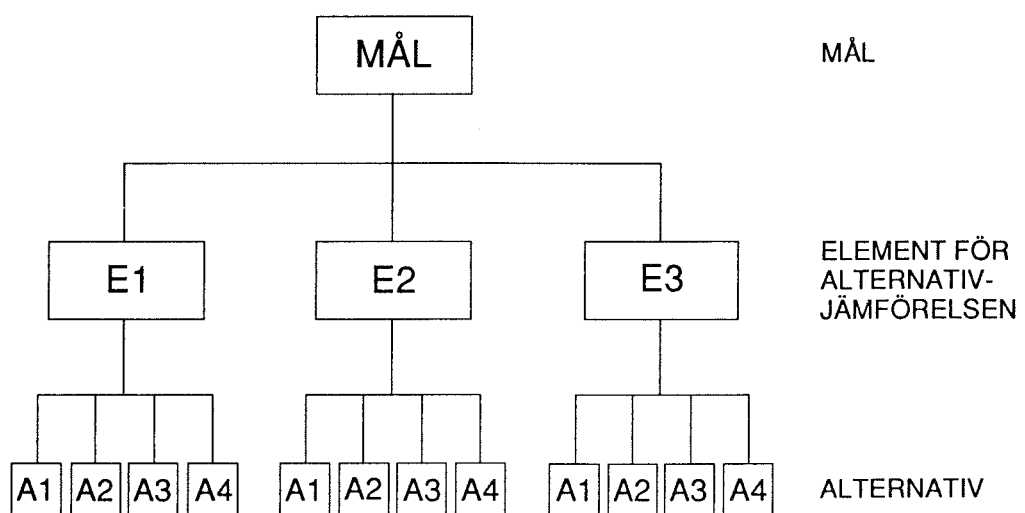
PARVISA JÄMFÖRELSER MED ANALYTISK HIERARKISK PROCESS (AHP)

1 METODENS PRINCIPER

AHP omfattar definitionsmässigt en **problemstrukturering**, en **parvis jämförelse** och en **matematisk utvärdering** /B5-1/.

1.1 Problemstrukturering

Principen för strukturering är att problemen organiseras i hierarkiska nivåer på samma sätt som beskrivs i kapitel 4 i huvudtexten, se Figur B5-1.



Figur B5-1. Principen för hierarkisk strukturering.

1.2 Parvis jämförelse

Principen är att man för varje nivå gör en jämförelse av elementen (alternativen) med avseende på hur väsentliga de är för ett element på nästa högre nivå. Detta underlättar jämförelsen, eftersom den varje gång inriktar sig på endast en begränsad del av hela problemet.

Man får alltså en serie av parvisa jämförelser som sedan kan kombineras.

Vid jämförelsen använder man en niogradig skala som kan uttryckas verbalt eller numeriskt.

Skalan återges nedan i ursprunglig form.

Numerisk skala	Verbal skala
1,0	Båda elementen är lika betydelsefulla
3,0	Ett element är något mer betydelsefullt än det andra
5,0	Ett element är mer betydelsefullt än det andra
7,0	Ett element är mycket mer betydelsefullt än det andra
9,0	Ett element är avsevärt mycket mer betydelsefullt än det andra
2,0; 4,0; 6,0; 8,0	Värden mellan två näraliggande bedömningar

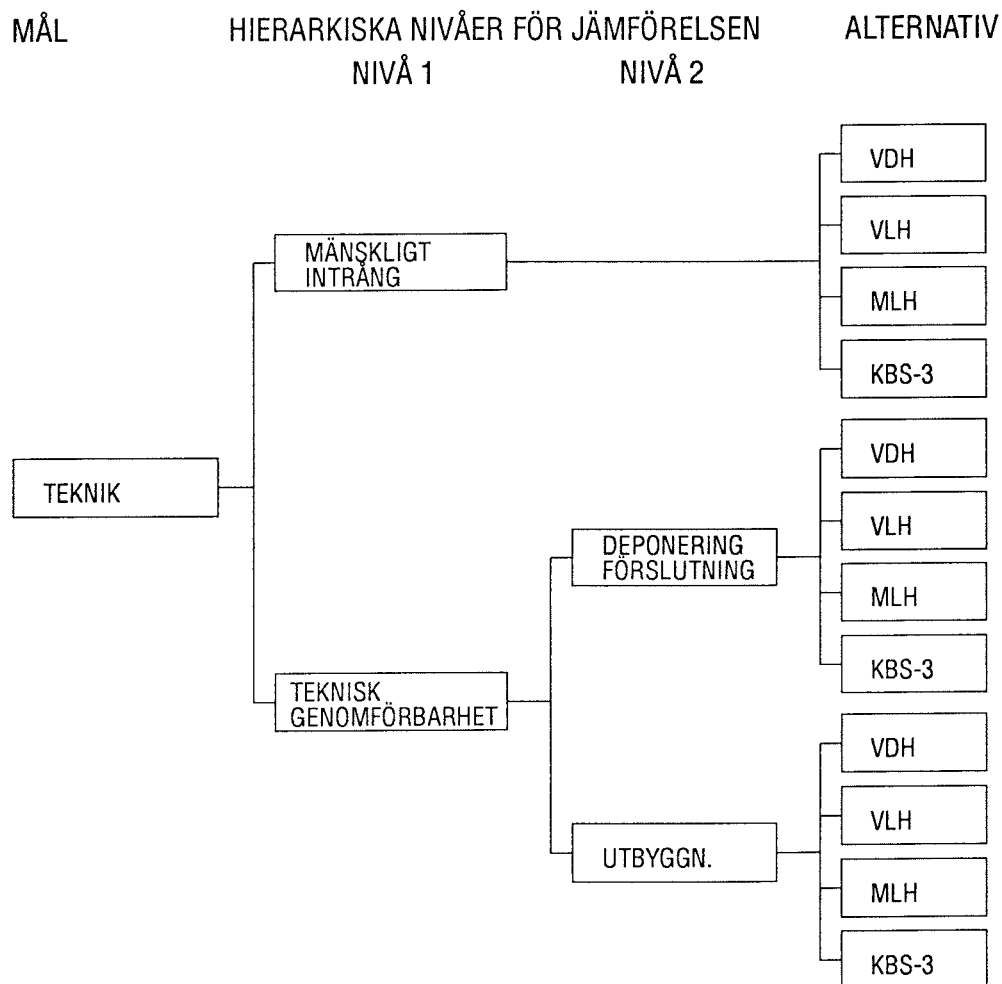
1.3 Exempel

För att visa metoden presenteras ett exempel som är en del av huvudstrukturen i den jämförelsen expertgruppen givit.

2 PROBLEMSTRUKTURERING

Den hierarkiska modellen i exemplet innehåller följande element, se även Figur B5-2:

Element på nivå 1	Element på nivå 2	Alternativ
TEKNISK GENOM- FÖRBARHET	UTBYGGNAD	KBS-3, MLH, VLH, VDH
	DEPONERING/ FÖRSLUTNING	KBS-3, MLH, VLH, VDH
MÄNSKLIGT INTRÅNG		KBS-3, MLH, VLH, VDH



Figur B5-2. Den hierarkiska strukturen i exemplet.

3 PARVIS JÄMFÖRELSE

Jämförelsen görs här uppifrån och ned.

A. Först jämförs TEKNISK GENOMFÖRBARHET med MÄNSKLIGT INTRÅNG med avseende på nästa högre nivå dvs målet.

Experten anser att TEKNISK GENOMFÖRBARHET är 3 gånger (något mer) viktigare än MÄNSKLIGT INTRÅNG.

I matrisform erhålles:

	TEKNISK GENOMFÖR- BARHET	MÄNSKLIGT IN- TRÅNG
TEKNISK GENOM- FÖRBARHET	1	3
MÄNSKLIGT INTRÅNG		1

B. Därefter jämförs på nästa nivå DEPONERING/FÖRSLUTNING med UTBYGGNAD med avseende på TEKNISK GENOMFÖRBARHET (inte MÅLET!)

Experten anser att båda är lika viktiga:

	UTBYGGNAD	DEPONERING/ FÖRSLUTNING
UTBYGGNAD	1	1
DEPONERING/ FÖRSLUTNING		1

Sedan jämförs de olika alternativen med hänsyn till kriteriet på närmast övre hierarkiska nivå. Vi får alltså tre sådana jämförelser, med avseende på MÄNSKLIGT INTRÅNG, DEPONERING/FÖRSLUTNING, och UTBYGGNAD.

Experten antas göra följande bedömning med avseende på UTBYGGNAD:

	KBS-3	MLH	VLH	VDH
KBS-3	1	1	1/3	3
MLH		1	1/3	3
VLH			1	5
VDH				1

I tabellen betyder 1/3 att alternativet i kolumnen är 3 gånger mer att föredra än värdet på raden till vänster, dvs experten föredrar VLH före både KBS-3 och MLH. Dessutom anser experten att VLH är 5 gånger att föredra före VDH. I de tomma rutorna skrivs de reciproka värdena in vid utvärderingen.

4 BERÄKNINGSGÅNG VID UTVÄRDERING

Utvärderingen görs med början uppifrån.

Först jämförs TEKNISK GENOMFÖRBARHET och MÄNSKLIGT INTRÅNG med avseende på MÅL. Expertens värderingar ställs upp i matrisform. Därefter normaliseras värdena genom att varje kolumn summeras.

	TEKNISK GENOMFÖR- BARHET	MÄNSKLIGT INTRÅNG
TEKNISK GENOMFÖR- BARHET	1	3
MÄNSKLIGT INTRÅNG	1/3	1
Kolumnsumma	4/3	4

Därefter divideras varje element med motsvarande kolumnsumma och i den nya matrisen numreras raderna.

Slutligen erhålls relativa vikterna (med avseende på MÅL) genom medelvärdesbildning genom att radsummorna divideras med antalet element i raden, i detta fall 2.

	TEKNISK GENOMFÖR- BARHET	MÄNSKLIGT INTRÅNG	Radsumma	Vikt
TEKNISK GENOMFÖR- BARHET	0,75	0,75	1,5	0,75
MÄNSKLIGT INTRÅNG	0,25	0,25	0,5	0,25

Därefter görs motsvarande på nästa lägre nivå:

UTBYGGNAD jämförs med DEPONERING/FÖRSLUTNING med avseende på nivån över, i detta fall TEKNISK GENOMFÖRBARHET.

	UTBYGGNAD	DEPONERING/ FÖRSLUTNING
UTBYGGNAD	1	1
DEPONERING/ FÖRSLUTNING	1	1
Kolumnsumma	2	2

	UTBYGGNAD	DEPONERING/ FÖRSLUTNING	Radsumma	Vikt
UTBYGGNAD	0,5	0,5	1	0,5
DEPONERING/ FÖRSLUTNING	0,5	0,5	1	0,5

Slutligen jämförs på den lägsta nivån de olika alternativen med avseende på UTBYGGNAD. (Beräkningarna nedan är utförda med fler än tre decimaler.)

	KBS-3	MLH	VLH	VDH
KBS-3	1	1	1/3	3
MLH	1	1	1/3	3
VLH	3	3	1	5
VDH	1/3	1/3	1/5	1
Kolumn- summa	5 1/3	5 1/3	1 13/15	12

	KBS-3	MLH	VLH	VDH	Radsumma	Vikt
KBS-3	0,188	0,188	0,179	0,25	0,804	0,201
MLH	0,188	0,188	0,179	0,25	0,804	0,201
VLH	0,563	0,563	0,536	0,417	2,077	0,518
VDH	0,062	0,062	0,107	0,083	0,315	0,078

Man får sedan de olika alternativens delvikter relativt MÅL för denna gren genom att multiplicera:

(relativ vikt för TEKNISK GENOMFÖRBARHET) x (relativ vikt för UTBYGGNAD) x (relativ vikt för alternativet)

$$\text{KBS-3} \quad 0,75 \times 0,5 \times 0,201 = 0,075$$

$$\text{MLH} \quad 0,75 \times 0,5 \times 0,201 = 0,075$$

$$\text{VLH} \quad 0,75 \times 0,5 \times 0,519 = 0,194$$

$$\text{VDH} \quad 0,75 \times 0,5 \times 0,079 = 0,030$$

För att man sedan skall få alternativens totala vikter upprepas dessa beräkningar för varje gren i den hierarkiska strukturen och alternativens samtliga delvikter läggs ihop.

Exempelvis för KBS-3:

0,075 UTBYGGNAD-TEKNISK GENOMFÖRBARHET-MÅL

0,193 DEPONERING/FÖRSLUTNING-
TEKNISK GENOMFÖRBARHET-MÅL

0,063 MÄNSKLIGT INTRÅNG-MÅL

0,331 TOTAL VIKT

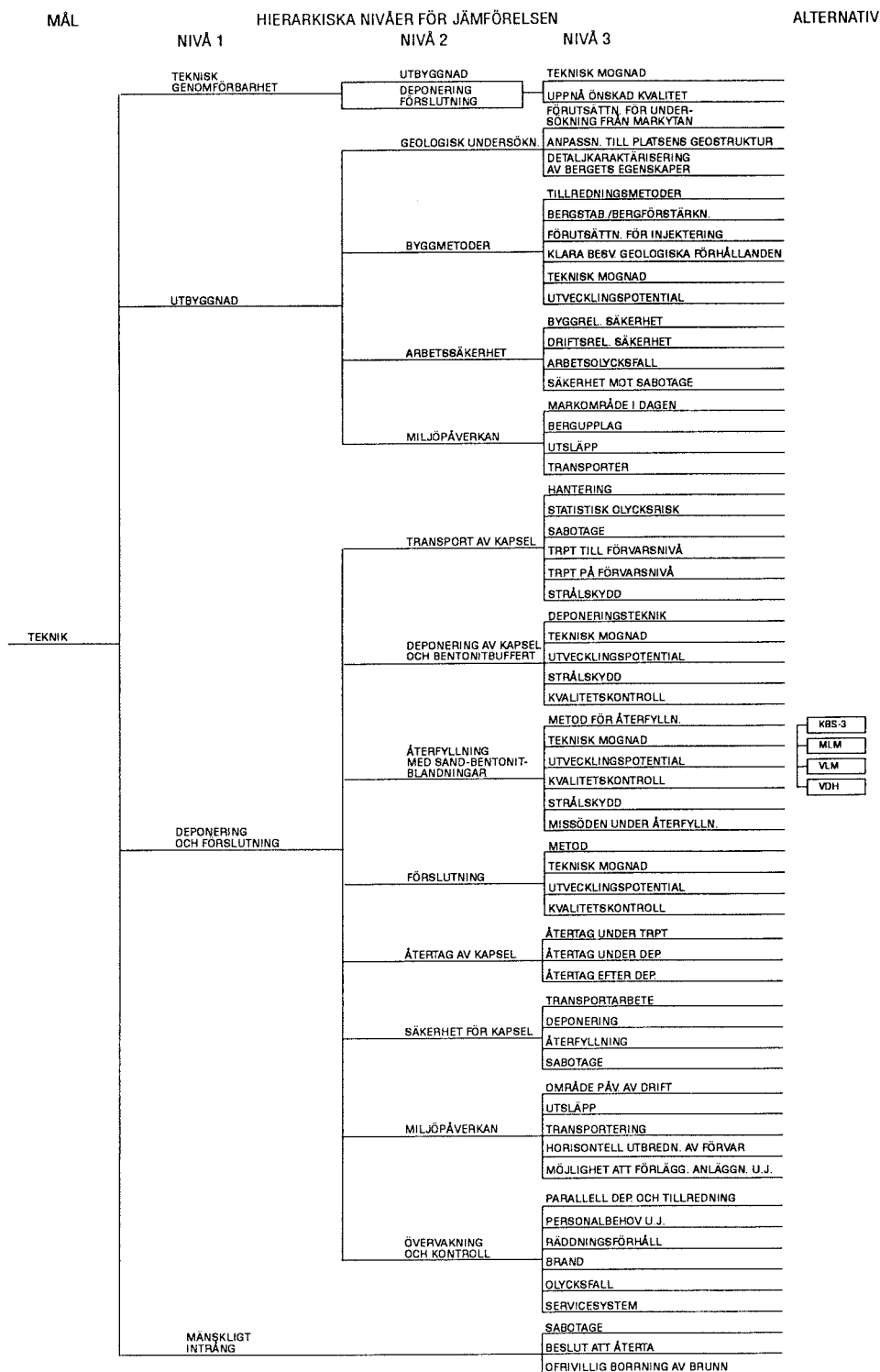
REFERENS

B5-1 Saaty T L

1988

Multicriteria Decision Making – The Analytic Hierarchy Process
(rev. ed.) RWS Publications. Pittsburgh, USA

RIKTLINJER TILL EXPERTGRUPPEN FÖR ”EXPERT JUDGEMENT” AV ”TEKNIK”



Figur B6-1. Komplet hierarkisk struktur för deljämförelsen ”Teknik”.

TEKNISK GENOMFÖRBARHET

Utgångspunkten är att alla de fyra studerade systemen tidigare bedömts vara tekniskt genomförbara i fråga om tillredningsarbetena, deponering av kapslarna, inplacering av bentonitbufferten runt kapslarna samt återfyllning och förslutning av förvaret. De olika systemen har emellertid en varierande skala av ”känd teknik”, ”delvis känd” och ”obeprövat i sammanhanget”.

”Teknisk genomförbarhet” har delats upp i (nivå 2):

- Utbyggnad.
- Deponering och förslutning.

Lägsta nivån har varit (nivå 3):

- Teknisk mognad.
- Möjlighet att uppnå önskad kvalitet i förvaret.

UTBYGGNAD

”Utbyggnad” har delats upp i (nivå 2):

- Geologisk undersökning.
- Byggmetod.
- Säkerhet.
- Miljöpåverkan.

Geologisk undersökning

”Geologisk undersökning” syftar på den noggrannhet med vilken viktiga geologiska data kan fastställas genom undersökningar ovan och under jord. Med rubriken menas även möjligheten till anpassning till den geologiska modell som kan ställas upp på basis av undersökningarna.

Nivå 3 har utgjorts av

- förutsättningar för undersökningar från markytan,
- anpassningsförmåga efter platsens geostrukturer,
- detaljerad karakterisering av bergets egenskaper.

Byggmetoder

Olika system bygger på olika byggmetoder i berget.

Nivå 3 har utgjorts av

- tillredningsmetoder,
- bergstabilitet/bergförstärkning,
- förutsättningar för injektering,
- möjlighet att klara av besvärliga geologiska förhållanden,
- teknisk mognad,
- potential till utveckling.

Arbets säkerhet

”Arbets säkerhet” syftar på flera olika typer av säkerhetsfrågor under byggnation, huvudsakligen dock med avseende på arbetarnas hälsa.

Nivå 3 har utgjorts av

- bergrelaterade säkerhetsfrågor (ras),
- driftsrelaterad säkerhet (brand),
- arbetsolycksfall,
- säkerhet mot yttre händelser (sabotage).

Miljöpåverkan

Nivå 3 har utgjorts av

- markområde i dagen som berörs,
- bergupplag,
- utsläpp (damm, rök, avgaser, buller),
- transporter.

DEPONERING OCH FÖRSLUTNING

”Deponering och förslutning” har delats upp i (nivå 2)

- transportarbete,
- deponering av kapsel och bentonitbuffert,
- återfyllning med sand-bentonitblandningar,
- förslutning,
- återtagbarhet av kapsel,
- säkerhet avseende kapsel,
- miljöpåverkan,
- övervakning och kontroll.

Transport av kapsel

Nivå 3 har utgjorts av

- hantering,
- statistisk olycksrisk,
- sabotage,
- transport ner till förvarsnivån,
- transport på förvarsnivån,
- strålskydd.

Deponering av kapsel och bentonitbuffert

Nivå 3 har utgjorts av

- deponeringsteknik,
- teknisk mognad,
- potential till utveckling,
- strålskydd,
- kvalitetskontroll.

Återfyllning med sand-bentonitblandningar

Nivå 3 har utgjorts av

- metod för återfyllning,
- teknisk mognad,
- potential till utveckling,
- kvalitetskontroll,
- strålskydd,
- missöden under återfyllning.

Förslutning

Nivå 3 har utgjorts av

- metod för förslutning,
- teknisk mognad,
- potential till utveckling,
- kvalitetskontroll,

Återtagbarhet av kapsel

Nivå 3 har utgjorts av

- återtagbarhet under transport,
- återtagbarhet under deponering,
- återtagbarhet efter deponering.

Säkerhet avseende kapsel

Nivå 3 har utgjorts av

- transportarbete,
- deponering,
- återfyllning,
- sabotage.

Miljöpåverkan

Nivå 3 har utgjorts av

- område som påverkas under drift,
- utsläpp (damm, rök, avgaser, buller),
- transporter, och
- horisontell utbredning av förvaret,
- möjlighet att förlägga anläggningsdelar under jord.

Övervakning och kontroll

Nivå 3 har utgjorts av

- parallell deponering och tillredning,
- personalbehov under jord,
- räddningsförhållanden (personal under jord),
- brand,
- olycksfall,
- servicesystem (ventilation, vatten, el).

MÄNSKLIGT INTRÅNG (EFTER FÖRSLUTNING)

Mänskligt intrång har ingen uppdelning på nivå 2, men på nivå 3 enligt följande

- sabotage i syfte att skada förvaret eller komma åt det radioaktiva materialet,
- politiskt beslut att återta avfallet,
- ofrivillig borrhning av brunn in i förvaret.

RESULTAT AV "EXPERT JUDGEMENT" AV DJUPFÖRVARSSYSTEM MED AVSEENDE PÅ "TEKNIK"

1 HIERARKISKA STRUKTUREN VID DELJÄMFÖRELSEN

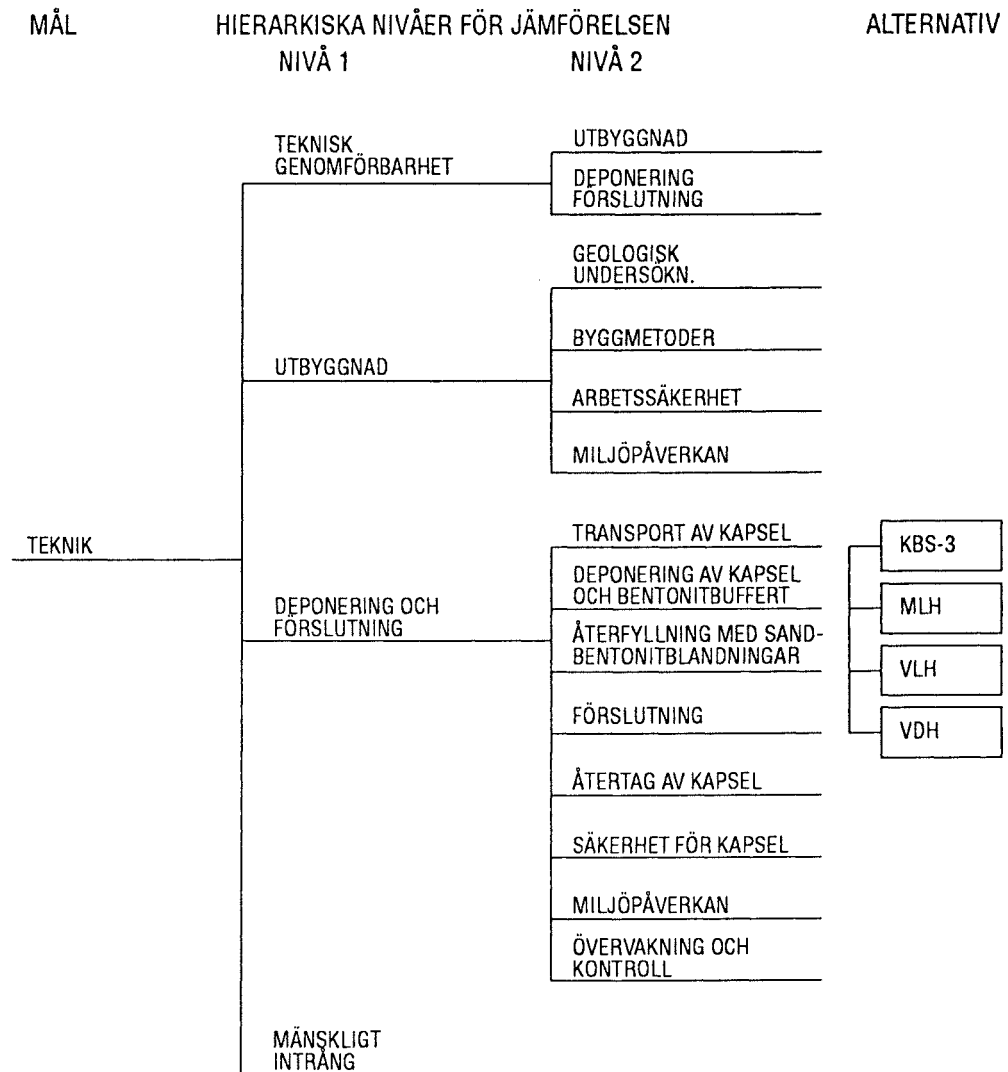
I bilaga 6 redovisas de tre elementnivåer som använts vid expertrankingen av "Teknik". I denna bilaga presenteras resultaten endast från nivå 1 och nivå 2, förutom det sammanvägda slutresultatet med avseende på MÅLET. Den hierarkiska strukturen till och med nivå 2 visas i Figur B7-1.

2 RESULTAT AV EXPERTRANKINGEN

Slutresultatet redovisas i Figur B7-2. De 6 experterna har markerats med romerska siffror från I till VI. Medelvärdena av delvikterna för respektive förvarssystem utgör aritmetiska medelvärde av experternas respektive värden. Variationskoefficienten (CoV) är standardavvikelsen dividerad med medelvärdet.

Såsom framgår av Figur B7-2 sätts KBS-3 först, följt av MLH och VLH. VDH placeras sist. Denna ordning återfinns också hos alla experterna, även om delvikterna gentemot MÅLET varierar något.

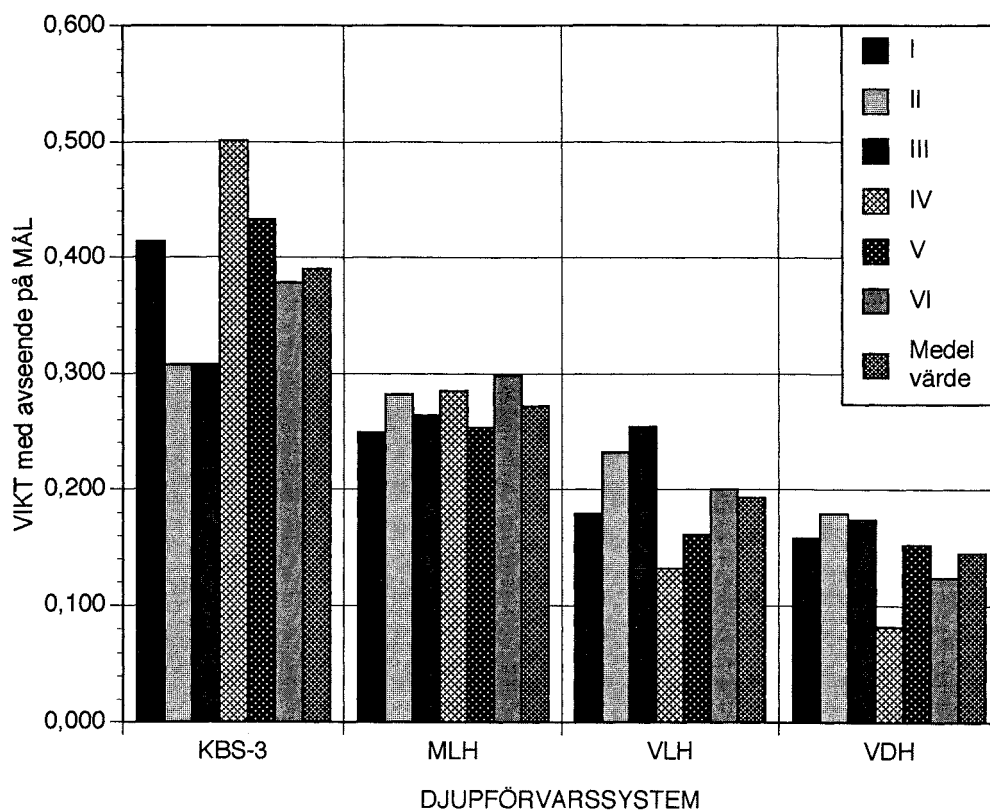
Den matematiska hanteringen av alla värdena i den parvisa jämförelsen resulterar i att de delvikter som slutligen fås för de fyra referensutformningarna är kvotrelaterade.



Figur B7-1. Hierarkiska strukturen för deljämförelsen "Teknik".

Detta medför att resultatet i Figur B7-2 indikerar att gruppen anser att KBS-3 är klart fördelaktigare än de andra systemen i fråga om "Teknik".

Betraktar man dessutom utvärderingsresultatet på nivå 1, se Figur B7-3, respektive på nivå 2, se Figur B7-4, finner man att också på dessa nivåer är rangordningen densamma som i slutresultatet.



Figur B7-2. Sammanfattning av experternas resultat. De 6 experterna markeras med romerska siffror I till VI.

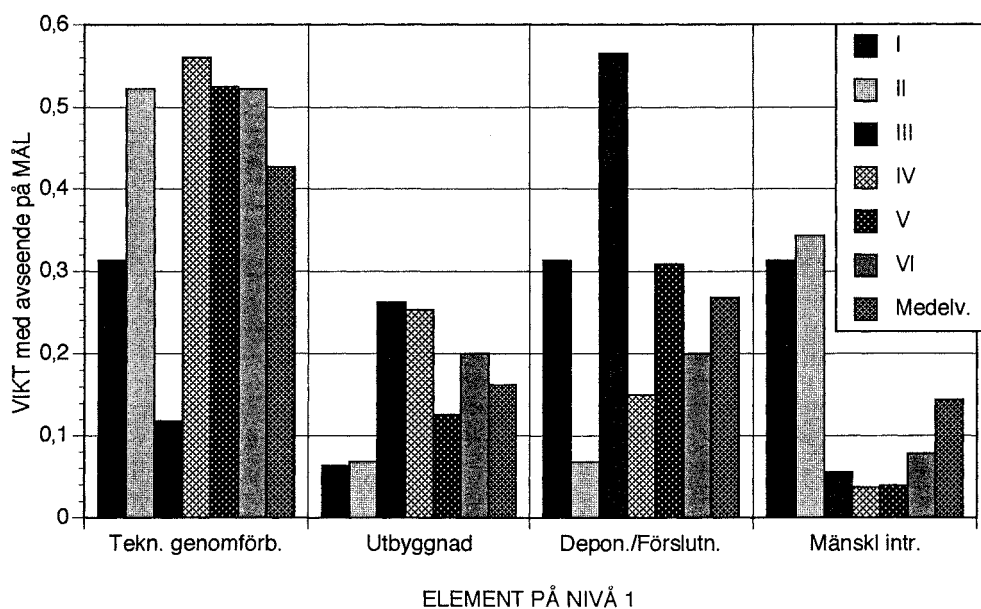
3 KÄNSLIGHETSANALYS

En analys av de olika elementens betydelse på nivå 1 gjordes genom sammanräkning utan: 1) "Mänskligt intrång" respektive 2) "Mänskligt intrång" och "Teknisk genomförbarhet". För 2) återstår då "Utbyggnad" och "Deponering/ förslutning". Resultatet redovisas i Figur B7-5. Såsom framgår bibehålls samma rangordning i båda fallen.

4 KOMMENTAR

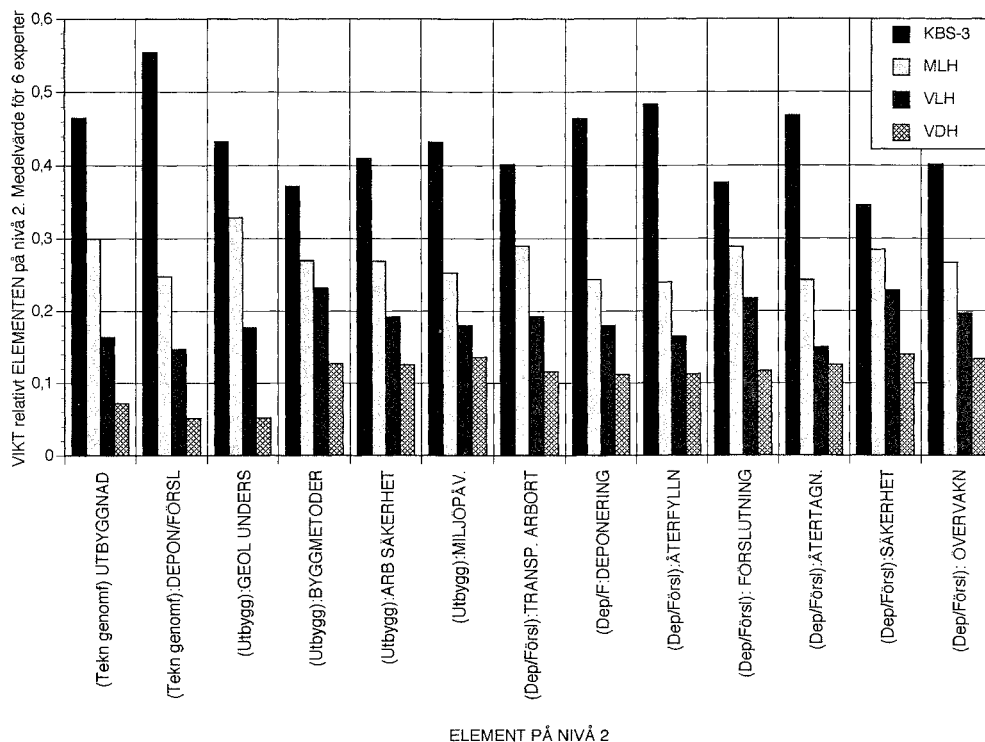
Experternas arbete genomfördes utan krav på att de skulle ange argumenten för sina ställningstaganden. Därför kan endast översiktliga slutsatser dras av materialet.

Vid en efterföljande diskussion i expertgruppen analyserades utfallet. Härvid ställde sig gruppen enig om omdömet att KBS-3 representerar den fördelaktigaste tekniken, speciellt i fråga om deponering av kapslar och bentonitbuffert.

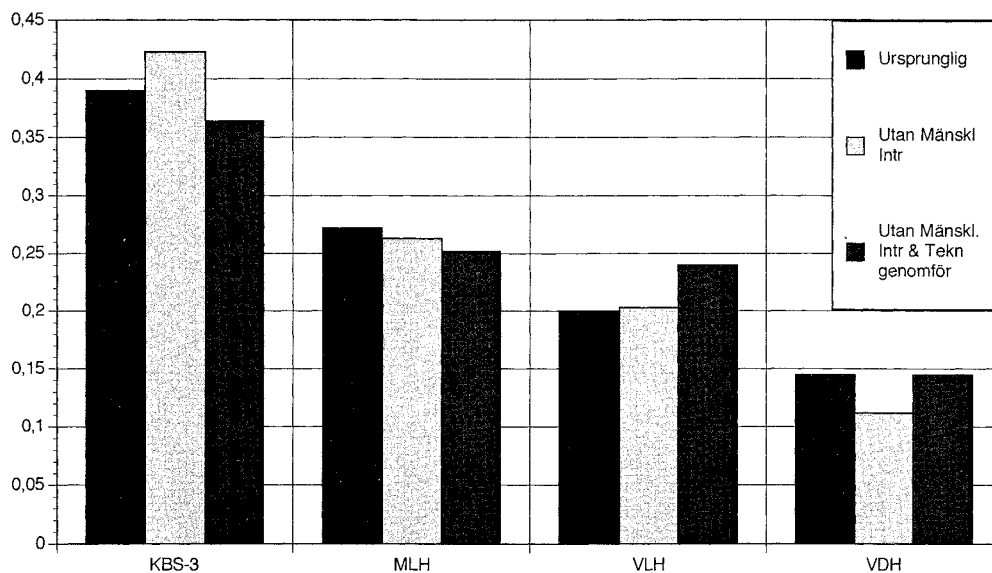


	I	II	III	IV	V	VI	Medelv	CoV (%)
Tehn.	0,313	0,522	0,118	0,56	0,525	0,522	0,427	41
Utbyggnad	0,063	0,068	0,262	0,253	0,126	0,2	0,162	55
Depon./Förslutn.	0,313	0,068	0,565	0,15	0,309	0,2	0,268	65
Mänsk intr.	0,313	0,343	0,055	0,037	0,039	0,078	0,144	100

Figur B7-3. Sammanfattning av experternas resultat på "Nivå 1". De 6 experterna markeras med romerska siffror från I till VI.



Figur 7-4. Sammanfattning av experternas resultat på "Nivå 2". De 6 experterna markeras med romerska siffror från I till VI.



Figur B7-5. Medelvärde för experterna av totala resultatet ("Teknik") vid utvärdering med alla elementen (Ursprunglig) respektive med "Teknisk genomförbarhet", "Utbyggnad" och "Deponering/Förslutning" (Utan Mänsk Intr) respektive med "Utbyggnad" och "Deponering/Förslutning" (Utan Mänsk Intr & Tekn genomför).

