

## **Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts**

**Hans Fagerström, VBB  
Björn Lundahl, Stabilator**

**Stockholm oktober 1977**

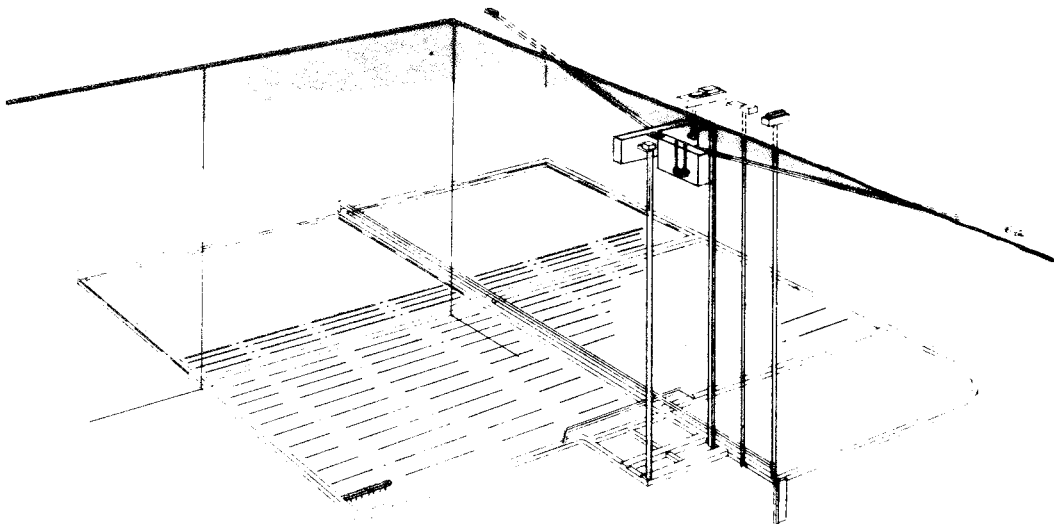
HANTERING AV BUFFERTMATERIAL AV BENTONIT  
OCH KVARTS

Hans Fagerström, VBB  
Björn Lundahl, STABILATOR  
STOCKHOLM OKTOBER 1977

Denna rapport utgör redovisning av ett  
arbete som utförts på uppdrag av KBS. Slut-  
satser och värderingar i rapporten är för-  
fattarens och behöver inte nödvändigtvis  
sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en för-  
teckning över av KBS hittills publicerade  
tekniska rapporter i denna serie.

HANTERING AV BUFFERTMATERIAL  
KVARTS - BENTONIT  
Stockholm oktober 1977



1977-10-31  
58115  
KBS Slutförvar

T E C H N I C A L   R E P O R T   K B S 3 7

HANDLING OF BUFFER MATERIAL   QUARTZ - BENTONITE

- I     Field and laboratory tests
  
- II    Specifications for handling of buffer material,  
      reprocessed HLW
  
- III   Specifications for handling of buffer material,  
      nonreprocessed HLW

Summary

Storage  
system

The final storage of the radioactive waste from nuclear power plants will take place in a tunnel system located 500 m below the ground surface in tectonically undisturbed rock.

The waste is placed in canisters which will be embedded in a buffer material in order to prevent damages and minimize the flow of groundwater entering in contact with the canisters. Tunnels and vertical shafts to the ground surface will also be filled with similar material in order to limit groundwater movements.

Object  
of report

The intention of the field and laboratory investigations described in this report has been to investigate in which way a buffer material consisting of quartz and bentonite can be handled by means of known technics. In the tests, different mixtures have been studied with respect to function and handling. The test results have formed the basis for specifications, which step by step describe the practical handling of the buffer material when depositing the canisters and closing the tunnels.

## Deposition schemes

Alternative deposition schemes have been studied for reprocessed as well as nonreprocessed high level radioactive waste (HLW). In the alternative with reprocessed material, canisters with vitrified waste are stored in vertical deposition holes in the bottom of the tunnels, while in the alternative with nonreprocessed waste the canisters are placed horizontally in the center of the tunnels.

The filling of buffer material around the canisters and in the tunnels will for the reprocessed waste alternative be divided in two stages. In the first stage, which will go on for about 30 years, canisters and buffer fill are placed in the deposition holes. The second stage, which comprises the filling of tunnels and shafts, will then take place during a three year period. In this stage the amount of filling per day will be about 1200 m<sup>3</sup>.

In the nonreprocessed waste alternative, deposition and filling of the tunnels will be of more continuous character.

## Advantages of quartz/bentonite materials

Field and laboratory tests have shown that a wellgraded mix of quartz and bentonite is the most suitable buffer material. The main advantages and disadvantages of the two components in the mixes can be summarized as:

	quartz material	bentonite
long time stability	+	+
bearing capacity	+	-
plasticity	-	+
permeability	-	+
swelling properties	-	+
heat conductivity	+	-
ion exchange capacity	-	+

## Suitable mixture

According to the testings performed, the proportions of the materials can be adjusted to give the buffer fill desired properties in different zones. With mixes as

stated below, the materials will fullfill technical requirements as well as those of handling:

10-20 % granulated Na-bentonite (0.07-0.8 mm)

10 % filler (0.02-1 mm)

60-70 % quartz sand (0.063-2 mm)

10 % quartzite gravel (4-8 mm)

The grain size distribution curves for the buffer material as well as for the different components are shown in Fig. 10.

#### Properties of buffer fill

The properties of the buffer fill as determined in tests are summarized as follows:

- strength and deformation properties are similar to a clayey moraine (boulder clay). The strength of the material is built up of a cohesion part and a friction part. An increase of the bentonite content tends to increase the cohesion and decrease the friction,
- permeability of the mixes is in the order of  $10^{-10}$  m/s when swelling is restricted. Increasing content of bentonite gives lower permeability. The permeability is decreasing with time as the bentonite swells when exposed to water,
- heat conductivity has been determined to values between 0.5 and 2 W/m<sup>0</sup>K when the water content of the mixes varies between 5 and 30 per cent. Higher water and quartz content as well as temperature increases the heat conductivity,
- compaction properties of the mixes are similar to a clayey moraine. Maximum dry densities are in the range 1.90-2.00 t/m<sup>3</sup> when determined in mod. AASHO tests. Corresponding optimum water contents are in the range 8-12 per cent,
- as regard swelling properties, the free swelling of mixes compacted at water contents in the range

10-15 per cent has been measured to between 15 and 35 per cent. With restricted swelling, pressures in the order of 30-200 kPa (0.3-2 kp/cm<sup>2</sup>) have been measured.

It is an advantage that the swelling properties of the buffer fill can be adjusted to conform with the requirements in different zones. A high bentonite content is favourable in the upper portion of the tunnels in order to guaranty that possible voids and pockets will be filled up through swelling, thus minimizing any horizontal water movements. The variations in bentonite content will give somewhat different swelling properties to adjacent zones, but this is not deemed to cause inconveniences, considering the good bearing capacity of the mixes.

#### Varying requirements

The quality requirements on the sand/gravel material differs somewhat in different parts of the tunneling system. Pure quartz-material is required in:

- deposition holes
- bottom part of deposition tunnels in the reprocessed HLW alternative
- bottom and upper part of the deposition tunnels in the nonreprocessed HLW alternative
- lower 100 m of the shafts.

Natural sand and gravel containing feldspar and mica can be accepted in:

- transport tunnels and caverns
- upper part of the shafts
- upper part of the deposition tunnels in the alternative with reprocessed HLW.

#### Handling of buffer fill

The buffer material can be mixed and handled utilizing technics well known from fabrication of concrete as well as from earth fill works and road works. The technic for filling and compaction the material in deposition holes is shown in Fig. 11.

In the lower part of the tunnels, conventional earth fill equipment can be used. In the upper part, the buffer material will be filled and compacted with a technic similar to that used in shotcreting (the ROBOT-method), Fig. 13-14.

Specifications for  
buffer fill

The specific requirements on the buffer fill in various parts of the deposition system are listed below:

Reprocessed HLW alternative

Deposition holes:		below canister	around canister	above canister
bentonite content	%	10	15	15
water content	%	10 $\pm$ 2	15-20	15 $\pm$ 2
degree of compaction	%	90	80	80
layer thickness	m	0.2	0.1-0.2	0.2
Tunnels:		bottom part	upper part	shafts
bentonite content	%	10	10-20 <sup>1)</sup>	0-10 <sup>2)</sup>
water content	%	10 $\pm$ 2	10-15	8-10
degree of compaction	%	90	70-80	90
layer thickness	m	0.2	-	0.2-0.3

- 
- 1) The higher value of the bentonite content might be used in order to secure that pockets and voids along the roof are filled up due to swelling of the material.
  - 2) The higher bentonite content is used in the lower 100 m. Above this level, natural sand/gravel materials or moraine can be used. Bentonite might be added to secure that the permeability is not higher than  $10^{-8}$  m/s.



Nonreprocessed HLW alternative

Lower part of deposition tunnels, with zones according to Fig. 15 (page 52):

		zone I	zone II	zone III
bentonite content	%	15	10-15 <sup>3)</sup>	15
water content	%	10 $\pm$ 2	8 $\pm$ 2	8 $\pm$ 2
degree of compaction	%	90	90	90
layer thickness	m	0.2	0.2	0.15-0.2

---

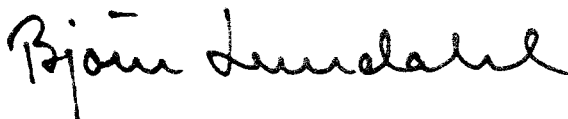
3) The lower bentonite content is used in the part below the canister in order to secure a high bearing capacity.

In the upper part of the deposition tunnels, a mix of pure quartz material and bentonite shall be used. In other respects, the requirements for tunnels and shafts listed above in the description of the reprocessed HLW alternative are valid also for the nonreprocessed one.

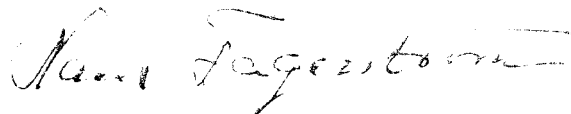
Stockholm 1977-10-31

Stabilator AB

VBB VATTENBYGGNADSBYRÅN



Björn Lundahl



Hans Fagerström

1977-10-31  
58115  
KBS Slutförvar

T E K N I S K   R A P P O R T   K B S 37

HANtering AV BUFFERTMATERIAL   K V A R T S - B E N T O N I T

- I     Fält- och laboratorieförsök
  
- II    Material- och arbetsbeskrivning  
      Upparbetat kärnbränsleavfall
  
- III   Material- och arbetsbeskrivning  
      Direktdeponerat kärnbränsleavfall

Inledning

Vid den slutliga förvaringen av utbränt kärnbränsle i ett tunnelsystem förlagt till 500 m djup i ostört berg kommer kapslarna med avfall att omges av ett skyddande buffertmaterial med stor långtidsstabilitet. Liknande material används även för igenfyllning av tunnarna och schakten.

Syftet med de i denna rapport redovisade fält- och laboratorieförsöken har varit att undersöka hur man med känd teknik kan hantera ett buffertmaterial bestående av en kvarts-bentonit-blandning. Vid försöken har lämpliga blandningsförhållanden provats med hänsyn till

funktion och hanterbarhet. Försöksresultaten har legat till grund för de följande material- och arbetsbeskrivningarna, vilka steg för steg beskriver det praktiska handhavandet av buffertmaterialet vid deponeringen av kapslarna och förslutningen av tunnelsystemet.

Del I

FÄLT- OCH LABORATORIEFÖRSÖK

<u>Innehåll</u>	Sid
1. Syfte	10
2. Provblandning och provsprutning	11
2.1 Allmänt	11
2.2 Utrustning	12
2.3 Etapp 1	13
2.4 Etapp 2	15
3. Laboratorieundersökningar	16
4. Halvskaleförsök	19
4.1 Anordningar på arbetsplatsen	19
4.2 Packning av bottenbädd	19
4.3 Packning av underbädd	21
4.4 Packning av sidobädd	22
4.5 Sprutning av överfyllning	25
5. Bestämning av värmeledningstal	25
6. Slutsats	28
7. Foton	29-32

## 1. Syfte

Försöken i fält genomfördes vid Stabilators förråd i Upplands Väsby under tiden juli-september 1977. Materialet undersöktes samtidigt med avseende på packnings-, permeabilitets- och svällningsegenskaper vid VBBs geotekniska laboratorium i Stockholm.

Undersökningarna syftade till att:

- o klarlägga om en blandning av kvarts-sand och bentonit kan hanteras med sprutteknik
- o finna den lämpligaste sammansättningen med hänsyn till såväl tekniska slutkrav som sprutteknik
- o bestämma lämplig metodik att med tillgänglig maskinutrustning lägga ut och packa sådant buffertmaterial
- o utarbeta teknik för fyllning och packning kring kapsel med direktdeponerat avfall samt undersöka om vibrering av en kapselattrapp ökar packningsgraden i kringfyllningen
- o prova arbetsmetodiken genom halvskaleförsök i ståltub och därvid bestämma packningsgrad på olika nivåer, testa spruttekniken vid långtidskörning och uppskatta produktionskapaciteten.

## 2. Provblandning och provsprutning

### 2.1 Allmänt

Det undersökta buffertmaterialet bestod av en blandning av kvartssand, kvartsmjöl, kvartsitgrus och bentonit. Materialets siktkurva framgår av figur 1. Kvartsitgruset hade till funktion att förbättra blandningens stabilitet och motverka igensättning av slangar och munstycken vid sprutning.

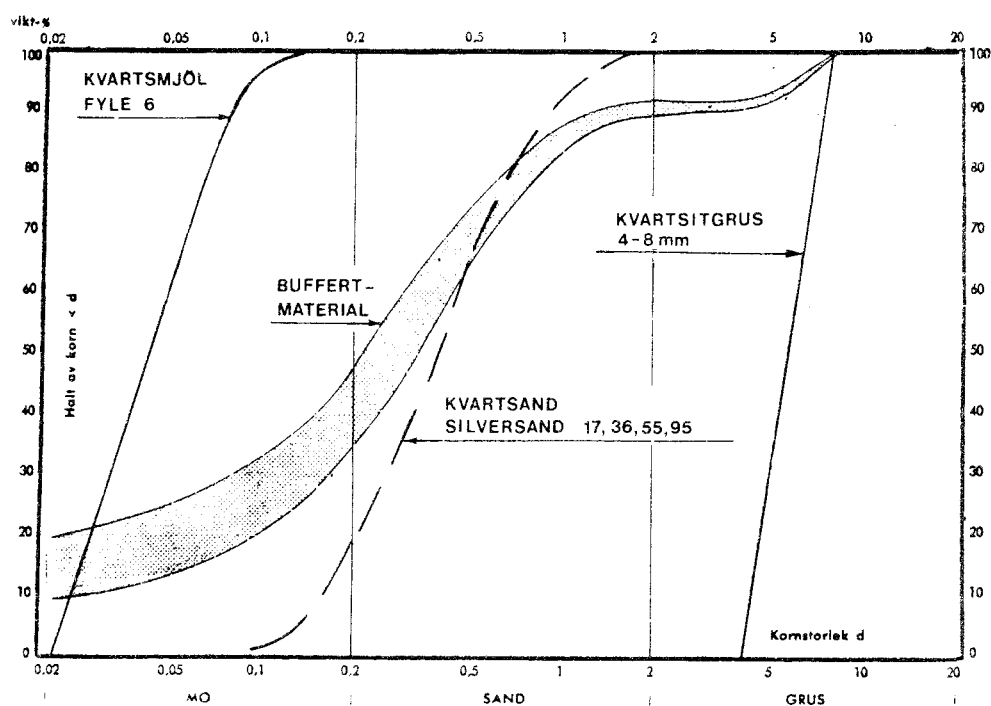


Fig. 1. Kornfördelning för buffertmaterial och för i blandningen ingående delmaterial (utom bentonit).

Grain-size distribution for buffer fill and the different components.

En första etapp omfattade funktionsprov med blandare och sprututrustning samt därefter provsprutning av blandningar med varierande vattenkvot och bentonithalt.

I en andra etapp provsprutades olika blandningar, varvid förutom vattenkvot och bentonithalt även kvartsithalten varierades. Syftet med denna etapp var att finna optimala blandningsförhållanden för materialet.

## 2.2 Utrustning

För försöken användes följande utrustning:

- o betongblandare
- o Stathmosvåg
- o betongsprutor Meyco Piccola och Meyco GM57
- o handhållna sprutmunstycken
- o sprututrustning ROBOT 75

Buffertmaterialet vägdes upp på våg och blandades i en konventionell 350 l Kaiser frifallsblandare för betong.

Materialet tillsattes i följande ordning:

kvartssand,  
kvartsmjöl,  
ca 3-5 % vatten,  
kvartsitgrus,  
bentonit,  
resterande vattenmängd.

Varje sats blandades under ca 3 min, varefter den tömdes direkt i betongsprutan genom omkastning av blandarens rotationsriktning.

Betongsprutorna som användes var bägge av rotortyp och skiljde sig endast beträffande kapacitet och luftbehov. Principen för en rotorspruta är att materialet kontinuerligt matas ned av en vinge till kamrarna i ett snabbt roterande revolvermagasin, varifrån tryckluft skjuter

ut det i materialslangen. Materialet transporteras i en luftström fram till munstycket och sprutas sedan ut med hög hastighet (ca 100 m/sek). Ca 2 m från munstycket är en vattenring monterad. I denna kan vatten tillsättas under tryck och materialet vätas till önskad fuktighet.

Rotorsprutorna ger en kontinuerlig men något pulserande materialström. Sprutorna kan vara eldrivna, varvid krävs 10-15 m<sup>3</sup> kompressorer för materialtransporten fram till munstycket. Alternativt är de helt tryckluftsdrivna, varvid krävs 14-22 m<sup>3</sup> kompressorer.

Arbetet vid sprutning underlättas med det s k ROBOT-systemet. Sprutmunstycket är i detta monterat på en förlängningsbar bom som sitter på en rörlig bärvagn. Munstyckets rörelser manövreras med hydraulik och munstycket har även vissa inbyggda halvautomatiska rörelsescheman. Hydraulpumparna drivs av en elektrisk motor. Alla rörelser är fjärrkontrollerade, så att operatören kan befinna sig på avstånd från den plats där sprutmaterialet appliceras.

### 2.3 Etapp\_1

I etapp 1 provsprutades sju blandningar varvid sammansättningen avsågs varieras inom följande gränser:

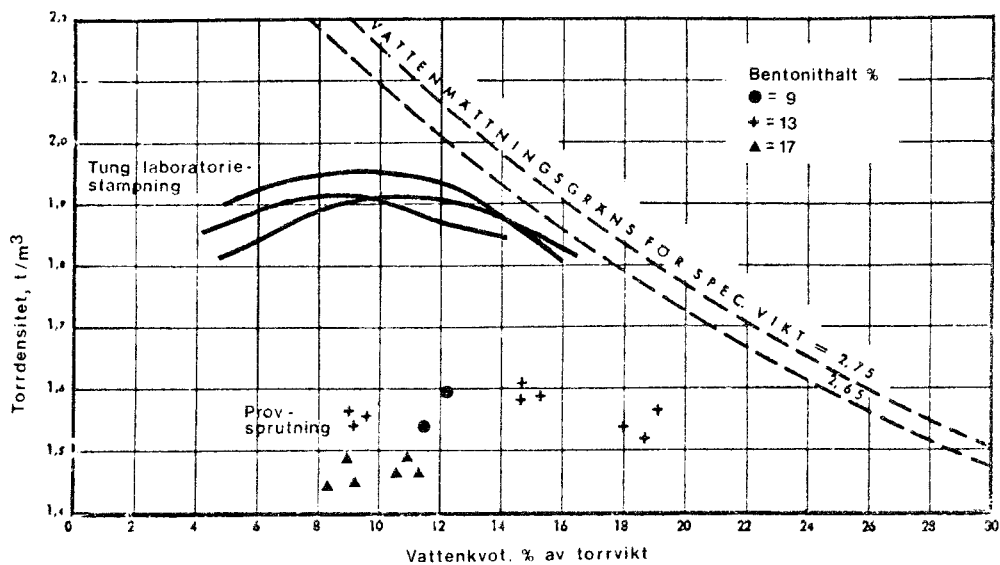
- o kvartsitgrus                    10 %
- o bentonit                        9 - 17 %
- o vattenkvot                      8 - 20 %

Buffertmaterialet sprutades i kvadratiska lådor med 10 cm djup, lutande kanter 1:1 och ca 50 cm sida. På de sprutade försöksblandningarna bestämdes vattenkvot, densitet och packningsgrad med följande resultat:



- o vattenkvot 8-19 %
- o torrdensitet 1.4-1.6 t/m<sup>3</sup>
- o packningsgrad 73-82 %

Densitetsbestämningen gjordes dels genom provtagning med vattenvolymeter, dels genom utstansning med eggförsedda kolvprovtagningscylinrar. De senare värdena låg i allmänhet något lägre än värdena med vattenvolymetern. Skillnaden var något märkbar vid låg vattenkvot men obetydlig vid hög, där den föll helt inom felgränserna. Resultatet av densitetsbestämningarna med vattenvolymeter visas på figur 2.



Laboratorieprovning	Optimal vattenkvot	Max torrdensitet
Tung laboratoriestampning	8 - 12 %	1,90-1,96 t/m <sup>3</sup>

Fig 2. Densitetsbestämningar med vattenvolymeter vid provsprutning i etapp 1.  
Density determinations from pretestings in stage 1.

## 2.4 Etapp\_2

I etapp 2 var syftet som ovan nämnts att finna lämpligaste blandning på materialet. Sammansättningen avsågs därför varieras vad gäller halt av kvartsitgrus, bentonit och vatten inom gränserna:

- o kvartsitgrus            0-10 %
- o bentonit                10-20 %
- o vatten                    10-30 %

Total sprutades åtta blandningar.

Buffertmaterialet sprutades i denna etapp i 20 cm djupa kvadratiska lådor med ca 50 cm sida och med lutande kanter 1:1.

Provsprutningen gav följande resultat:

- o vattenkvot                9-27 %
- o torrdensitet            1,47-1,75 t/m<sup>3</sup>

Densitetsbestämningarna utfördes här enbart med vatten-volymeter. Resultatet framgår av figur 3.

Provsprutningarna visade att materialet vid vattenkvoter över 12-15 % får sådan konsistens att det endast med svårigheter kan behandlas i blandaren och sprutas. När högre vattenkvoter eftersträvas, blandas materialet i stället vid låg fukthalt, ca 5 %, varefter resterande vatten tillsätts genom en vattenring bakom sprutmunstycket.

I samband med provsprutningarna bestämdes också följande värden:

- o max torrdensitet        1,90-2,00 t/m<sup>3</sup>  
vid tung stampning
- o motsvarande optimal 8 -12 %  
vattenkvot
- o packningsgrad            80 -90 %

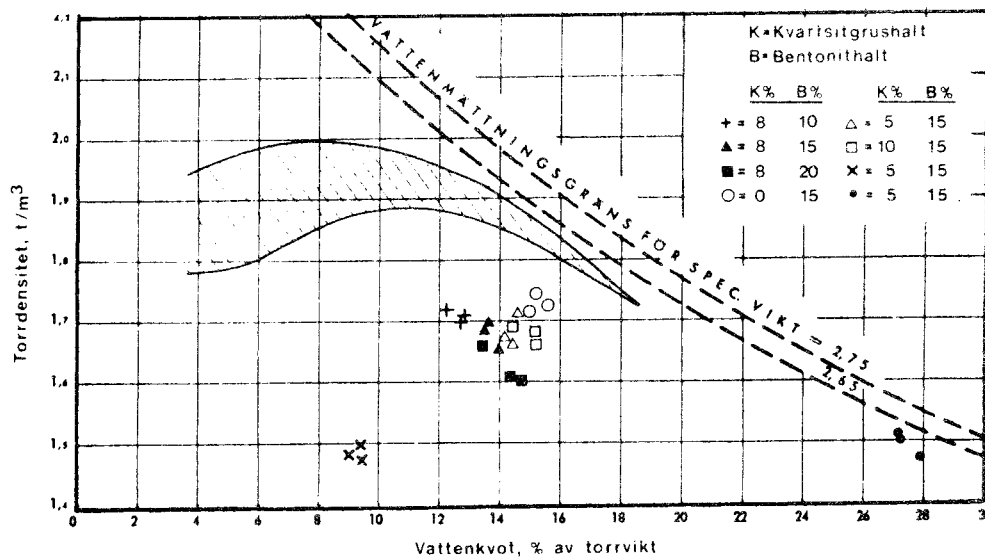


Fig 3. Densitetsbestämningar med vattenvolymeter vid provsprutning i etapp 2.

Density determinations from pretestings in stage 2.

Bästa packning vid tung laboriestedampning uppnåddes alltså vid ca 10 % vattenkvot. Vid sprutning var packningsresultatet ungefär likvärdigt i intervallet mellan 12 och 16 % vattenkvot. Vid högre eller lägre vattenmängd minskade densiteten.

Packningsgraden i den sprutade fyllningar var 80-90 % i förhållande till tung laboriestedampning, vilken innebär mycket hård packning.

### 3. Laboriestedundersökningar

På utvalda prover från provsprutningarna i etapp 1 och 2 bestämdes dessutom följande laboriestedvärden:

- o permeabilitet  $<< 10^{-8}$  m/s
- o fri svällning 140 - 160 %
- o svällning vid normallast 4 kPa (0,04 kg/cm<sup>2</sup>) 15 - 35 %
- o svälltryck vid förhindrad svällning (330 - 610) " 200 kPa
- o bärighet genom CBR-försök 30 - 36

Permeabiliteten hos det packade buffertmaterialet undersöktes i nippelpermeameter, i ödometer med fallande tryckhöjd och i ingjutningspermeameter. Den visade sig vara betydligt lägre än  $10^{-8}$  m/s. Såsom framgår av Ahlsell & Ågrens provningar är permeabiliteten starkt tidsberoende genom att jorden blir tätare när bentoniten sväller.

Svälltrycket bestämdes på 2 cm höga prover som efter inpackning konsoliderades för en så hög last som 1800 kPa (18 kp/cm<sup>2</sup>, standardlast för svälltrycksprovningar). Efter konsolideringen vattenmättades proverna samtidigt som erforderlig last för att förhindra svällning påfördes. Försök utfördes även utan att provet först konsoliderades under hög last.

De fria svällförsöken gjordes med torkat material som fick svälla fritt i vatten. Vid de övriga försöken användes fuktigt material direkt från arbetsplatsen.

Den granulerade bentoniten visade en fri svällning av ca 500 % under det att motsvarande värde för bentonitpellets uppgick till 230 %. Fri svällning anges härvid som förhållande mellan provets volym efter och före svällning.

Den fria svällningen för buffertmaterialet av bentonitkvarts uppmättes till:

bentonitmängd kg	bentonithalt %	fri svällning %
10	9	140
15	13	150
20	17	160

Under svällförsök i ödometer (inte fri svällning) på störda prover ur den sprutade buffertmassan svällde blandningarna vid vattentillförsel under lågt normaltryck,

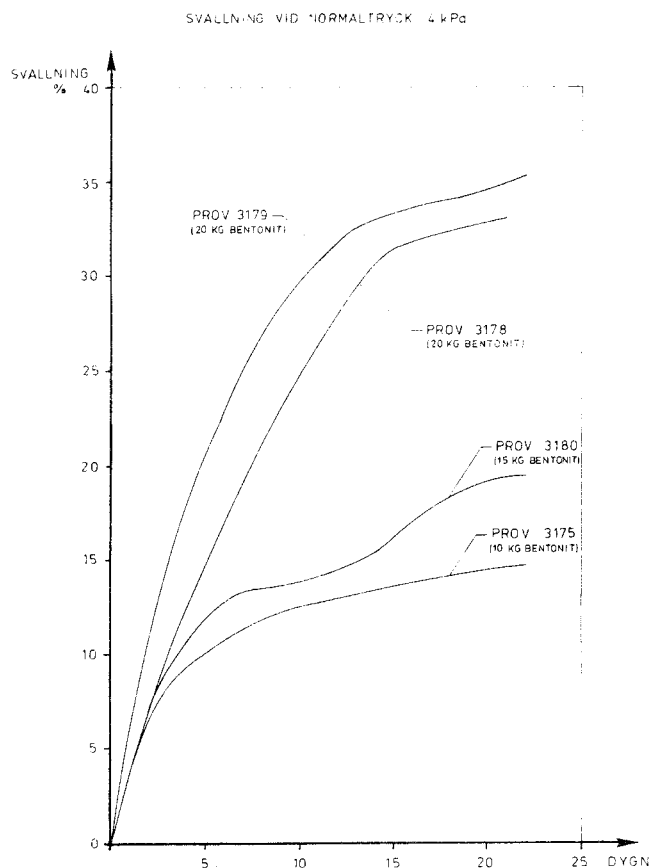


Fig 4. Svällning som funktion av tiden vid försök i ödometer.

Swelling properties measured in oedometer.  
Increase of initial volume with time.

men svällningen gick långsamt på grund av materialets låga permeabilitet. Svällningen anges i detta fall som förhållandet mellan volymökning och provets ursprungliga volym. På figur 4 visas svällningen som funktion av tiden. Efter 20 dygn uppgick den till:

bentonitmängd kg	bentonithalt %	vattenkvot %	svällning %
10	9	12	14
15	13	15	19
20	17	9	33
20	17	11	35

Svälltrycket vid förhindrad svällning på hårt konsoliderade prover uppmättes till:

bentonitmängd kg	bentonithalt %	svälltryck kPa
10	9	330
20	17	610

Okonsoliderat prov som packades in med 15 % bentonit vid 15 % vattenhalt visade lägre svälltryck, vilket uppgick till 200 kPa. Detta värde synes mest realistiskt att räkna med under verkliga förhållanden.

#### 4. Halvskaleförsök

##### 4.1 Anordningar på arbetsplatsen

Halvskaleförsöket utfördes i ett stålrör med 3,8 m diameter och ca 4 m längd. Arbetena omfattade utbredning och packning av botten-, under- och sidobädd, samt sprutning av överfyllning, figur 5. Möjligheterna att förbättra packningen under och intill kapseln genom vibrering av en kapselattrapp undersöktes även.

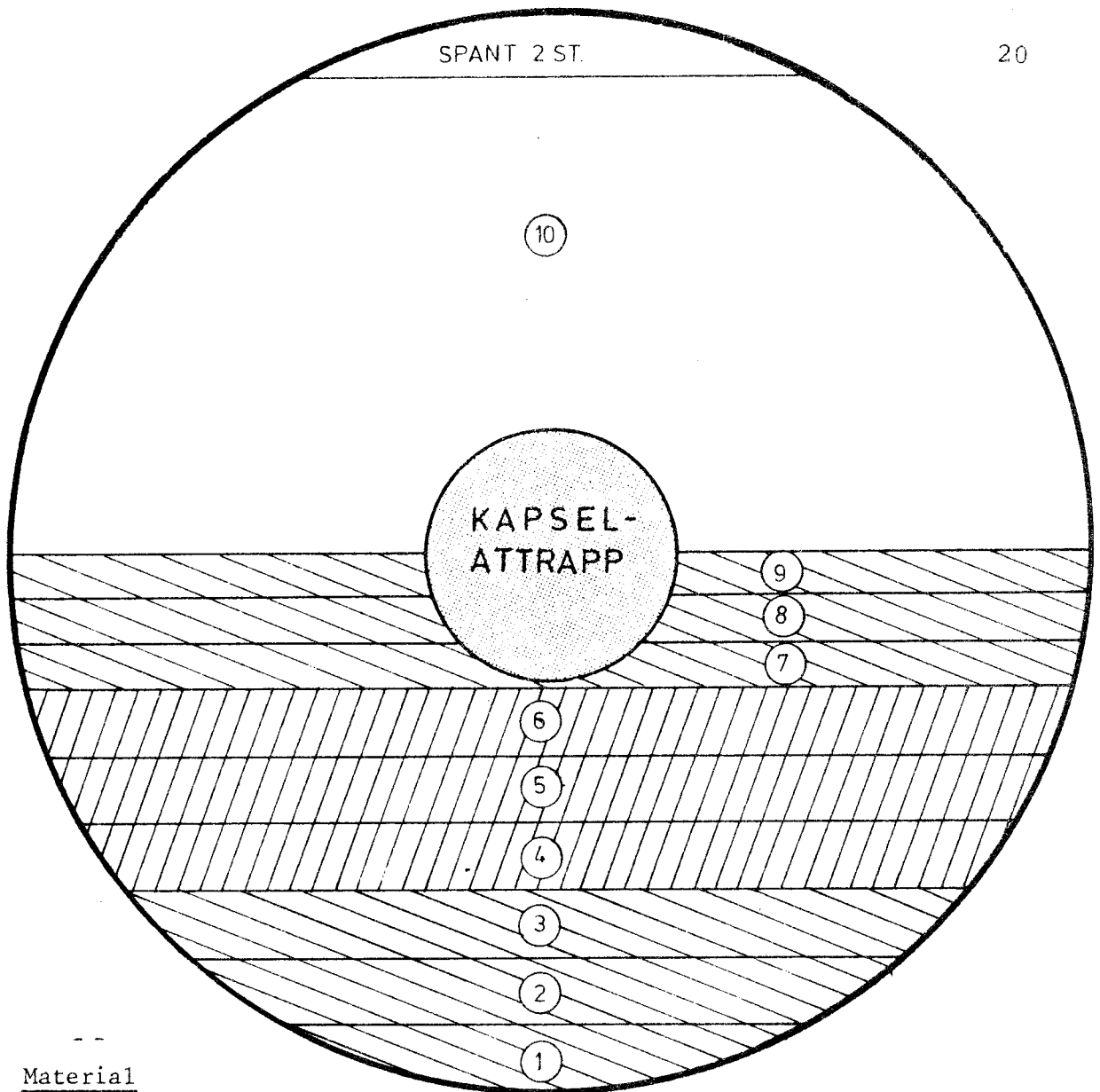
Packningen i rörets nedre halva gjordes med vibratorplatta Dynapac CM70, vikt 450 kg. På en mindre yta i fyllningen provades dessutom vibratorstamp Dynapac CO16, vikt 80 kg.

Som kapselattrapp användes ett 1100 kg stålrör med påsvetsade, något snedställda gavlar. Den hade diametern 0,9 m och längden 1,5 m. För vibrering var röret försett med två elektriska motorvibratorer, Dynapac ER73.

Överfyllningen sprutades med samma utrustning som vid provsprutning i lådor.

##### 4.2 Packning av bottenbädd

Materialiet i bottenbädden hade 20 % bentonithalt. För att undersöka hanterbarhet och packningsegenskaper vid



### Material

Bottenbädd	Lager 1-3	Bentonithalt 20 %	Vattenkvot 12	och 17 %
Underbädd	" 4-6	" 10 %	" 8	" 12 %
Sidobädd	" 7-9	" 20 %	" 12	%
Överfyllning	" 10	" 20 %	" 8-18	%

### Inpackning

Lager 1-6: Lagertjocklek 0,3 m, 4 överfarer med Dynapac CM70. Vibratorstamp Dynapac CO16 provad på liten yta i lager 3 vid vattenkvot 10 %.

Lager 7-9: Lagertjocklek 0,2 m, 4 respektive 8 överfarer med Dynapac CM70.

Lager 10: Sprutning.

### Provtagning

Lager 3:	16 prover	Lager 9:	4 prover
" 6:	16 prover	" 10:	10+10 prover

Fig 5. Arbetsmoment vid inpackning i stålrör under halvskaleförsök  
Stages of field compaction tests in 3,8 m diameter steel pipe.

varierande fuktkvot packades materialet i den inre delen av röret vid 12 % vattenkvot och i den yttre delen vid 17 % vattenkvot.

Bottenbädden byggdes upp i tre lager med 30 cm tjocklek (opackat mått). Varje lager packades genom fyra överfar-ter med vibratorplatta. Efter packningen hade lager-tjockleken reducerats till ca 20 cm. På en mindre yta i inre delen av röret gjordes packningen med vibrator-stamp.

Vid utförandet kunde konstateras att materialet utan svårighet kunde packas vid båda vattenkvoterna.

Efter avslutad packning mättes fyllningens densitet och vattenkvot i det översta lagret. Bestämningen ut-fördes med vattenvolymeter i åtta punkter på djupen 0-10 och 10-20 cm under överytan.

Densiteten i fyllningen uppgick till 1,5-1,75 t/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar 80-90 % packningsgrad. De lägre den-siteterna erhöles i det packade lagrets undre del, figur 6.

Vid provtagningen kunde konstateras att viss skikt-ning uppstått mellan de packade lagren. För att för-hindra sådan skiktbildning bör den packade ytan krattas eller harvas innan nytt lager läggs ut, så att god an-slutning erhålls mellan lagren. Alternativt kan arbets-redskap av typ fårfovtsvält som "trampar igenom" ytan användas.

#### 4.3 Packning av underbädd

Materialet i underbädden hade bentonithalten 10 % och packades vid vattenkvoterna 8 och 12 %.



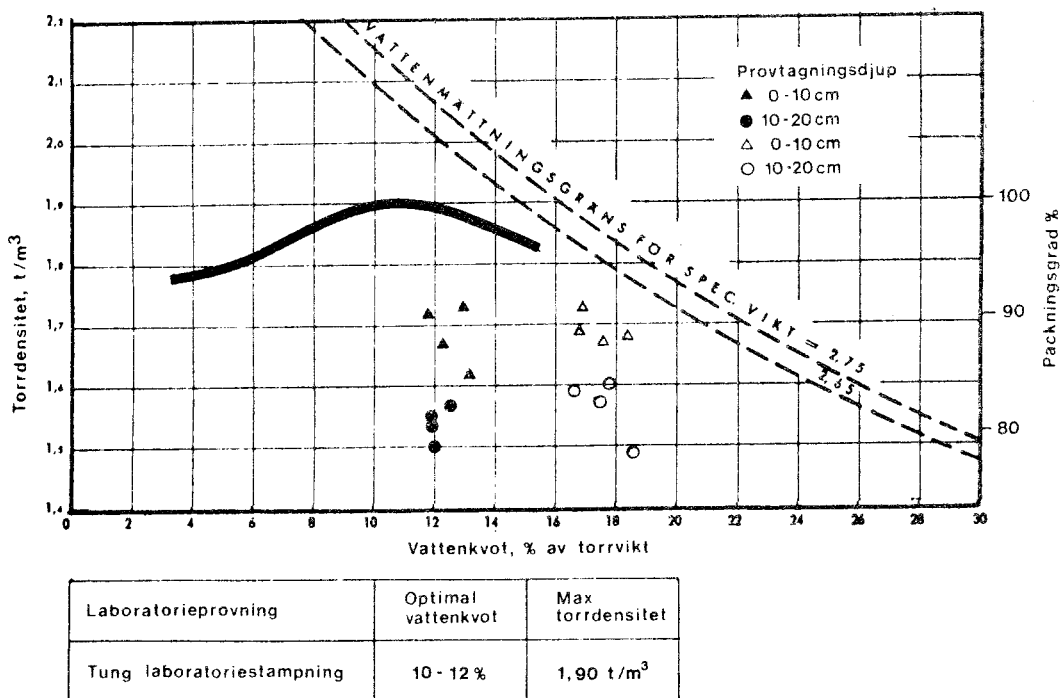


Fig 6. Bestämningar av densitet i bottenbädd, bentonithalt 20 %.

Field density determinations in bottom part, content of bentonite 20 per cent.

Utläggning, packning och provtagning utfördes på samma sätt som i bottenbädden.

Densiteten i underbädden varierade mellan 1,5 och 1,7 t/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar en packningsgrad av 77-88 %. De lägre densiteterna erhöles i lagrets undre del, figur 7.

#### 4.4 Packning av sidobädd

Materialet i sidobädden hade 20 % bentonithalt och 12 % vattenkvot. Kapselattrappen lades på ett 5 cm tjockt opackat lager för att få god anliggning mot underlaget. Under och kring kapselns nederdel packades materialet för hand. Resterande del av sidobädden lades ut i 20 cm tjocka lager och packades med vibratorplatta. För att undersöka inverkan på packningsgraden vid olika antal överfarter packades materialet på sidorna om kapseln med fyra respektive åtta överfarter.

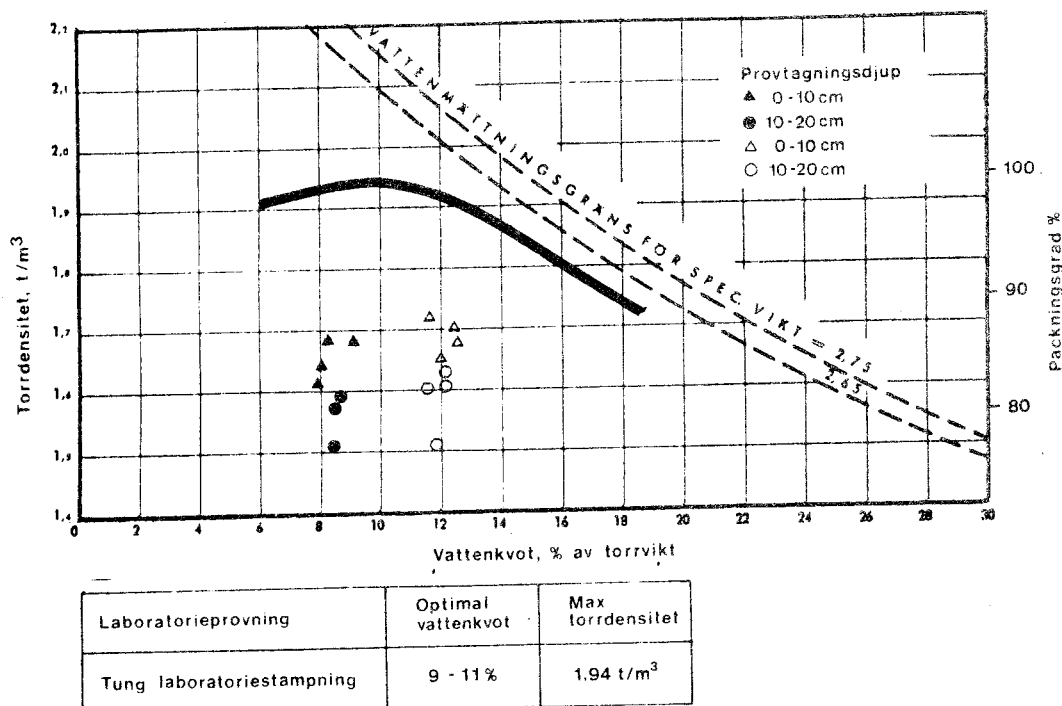


Fig 7. Bestämningar av densitet i underbädd, bentonithalt 10 %.

Field density determinations in the layers below the canister, content of bentonite 10 per cent.

Densiteten i det översta lagret bestämdes i fyra punkter på djupen 0-10 cm och 5-15 cm under överytan, figur 8.

Vid packning genom fyra överfarter varierade densiteten mellan 1,58 och 1,65 t/m<sup>3</sup> och vid åtta överfarter mellan 1,60 och 1,72 t/m<sup>3</sup>. Motsvarande packningsgrad var 83-87 % respektive 85-91 %.

Efter avslutad packning lyftes kapseln för kontroll av kontakten mellan jord och kapsel. Anläggningen var god, men packningsgraden under och kring nederdelen av kapseln bedömdes okulärt och enligt mätning med penetrometer vara låg.

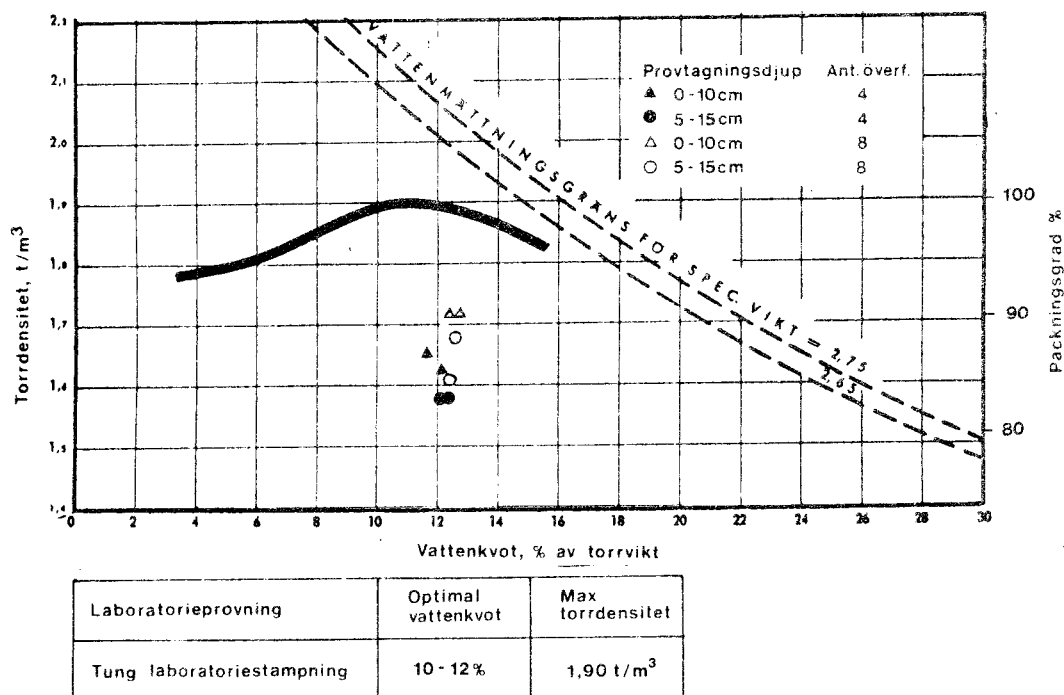


Fig 8. Bestämningar av densitet i sidobädd, bentonithalt 20 %.

Field density determinations in the layers beside the canister, content of bentonite 20 per cent.

Efter denna provning sänktes kapseln åter på plats och vibrerades 80 sekunder, varefter den lyftes på nytt. Kontroll med penetrometer visade att packningsgraden ökat något under kapseln.

Kapseln sänktes åter och vibrerades i ytterligare 5 min. Förnyad mätning med penetrometer visade en klar förbättring av packningsgraden, främst rakt under kapseln.

För att undersöka om god anliggning mellan jorden och kapselns undre del kunde uppnås vid packning enbart för hand vibrerades kapseln, som ovan nämnts, inte förrän sidobädden packats till full höjd. Det är troligt att högre packningsgrad uppnås i materialet kring kapseln, om denna vibreras i samband med utläggning av varje lager och inte sedan hela sidobädden packats färdigt.

#### 4.5 Sprutning av överfyllning

Materialiet hade en bentonithalt av 20 %. Vattenkvoter-  
na varierades mellan 8 och 18 % under sprutningens  
gång.

Det sprutade materialet fyllde väl ut mot rörväggar och  
tak samt kapsel, även bakom insatta spant, vilka skulle  
illustrera ojämnheter i ett tunneltak. Vid sprutning  
direkt mot plåtväggen erhöles dock visst återslag av  
material, vilket innebar att packningen närmast väggar-  
na blev lägre än i fyllningen i övrigt.

Under fyllningens gång utfördes densitetsbestämning i  
tio punkter.

Efter avslutad fyllning skars två kvadratiska hål upp  
i rörets tak för kontroll av anläggningen mellan rör-  
tak och sprutat material. Därvid kunde konstateras att  
inga hålrum eller dylikt förekom, utan anläggningen var  
god även bakom spanten. Packningsgraden närmast taket  
var dock låg.

Densiteten i materialet närmast rörtaket bestämdes i  
tio punkter från ytan till ca 50 cm djup.

Densiteterna i den sprutade överfyllningen varierade  
mellan 1,1 och 1,8 t/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar 60-95 %  
packningsgrad, se figur 9. De lägsta densiteterna er-  
hölls närmast rörtaket.

#### 5. Bestämning av värmeledningstal

För att säkerställa långtidshållfastheten hos kapslar-  
na med utbränt kärnbränsle eftersträvas, att buffert-  
materialiet har sådan värmeledning att temperaturen vid  
kapslarna inte överstiger 100°C.

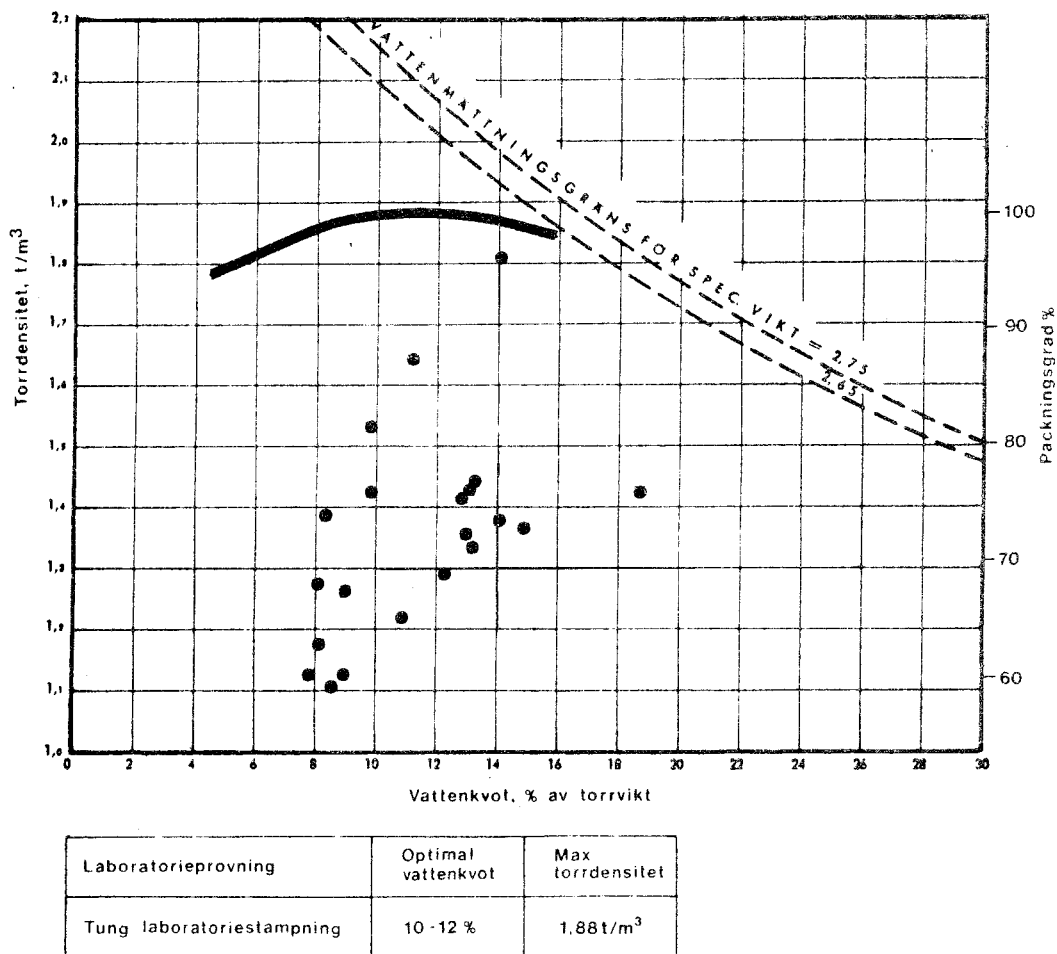


Fig 9. Bestämningar av densitet i sprutad överfyllning, bentonithalt 20 %.

Field density determinations above the canister. The buffer material applied by shotcrete equipment.

De faktorer som påverkar värmeledningsförmågan hos ett jordmaterial är främst:

- o mineralogisk sammansättning
- o kornfördelning
- o densitet
- o vattenmättnadsgrad

Värmeledningsförmågan hos material med varierande kvarts-, bentonit- och vatteninnehåll bestämdes vid Statens Provningsanstalt. Huvuddelen av de undersökta

proverna sprutades direkt i formar, som kunde sättas in i mätapparaturen. Densitet och vattenkvot på proverna bestämdes på VBB.

Mätningarna utfördes vid en medeltemperatur i proverna av dels  $+10^{\circ}\text{C}$  (7 prover), dels  $+48,5^{\circ}\text{C}$  (1 prov). Resultaten redovisas i Statens Provningsanstalts intyg nr 77245, 9B och i nedanstående tabell, avseende mätningar vid  $+10^{\circ}\text{C}$  medeltemperatur.

Prov nr	Bentonithalt %	Vattenkvot %	$\lambda$ W/m $^{\circ}\text{C}$
41	10	6	0,72
42	10	12	0,97
43	10	25	1,14
44	15	7	0,52
45	15	13	1,29
46	15	29	1,61
47	15	11	1,09

Värmeledningsförmågan uppgick alltså till mellan 0,5 och 1,6 W/m  $^{\circ}\text{C}$  vid dessa försök, vilket ligger i linje med tidigare rapporterade försök och teoretiska beräkningsmodeller. Mätningarna visar att vatteninnehållet har stor betydelse, medan variation i bentonithalt (10 eller 15 %) synes ha mindre inverkan.

Försöket vid  $+48,5^{\circ}\text{C}$  gav ett värmeledningstal  $\lambda$  av 2,9 W/m  $^{\circ}\text{C}$ , således avsevärt högre än motsvarande prov vid  $+10^{\circ}\text{C}$  ( $\lambda = 0,97$  W/m  $^{\circ}\text{C}$ ). Försöken utfördes emellertid inte på identiskt samma prov utan med provlådor sprutade vid olika tillfällen. Det höga  $\lambda$ -värdet torde delvis kunna förklaras med att värmetransporten får stor inverkan genom diffusion av vattenånga vid den aktuella vattenmättnadsgraden. Möjligheter att man vid sprutning av

provkroppen fått en ansamling av kvartsmaterial inom den mätta 34 mm tjocka sektionen kan inte uteslutas. En sådan koncentration av kvartsmaterial skulle få till följd en bättre värmeledningsförmåga än hos motsvarande homogent material.

## 6. Slutsats

Utförda fält- och laboratorieprovningar har visat att den föreslagna arbetsmetodiken för fyllning av tunnlar-  
na genom packning och sprutning med buffertmaterial av kvartssand-bentonit är väl utförbart ur arbetsteknisk synpunkt.

Materialet har befunnits svårt att hantera i blandare och spruta vid vattenkvoter över ca 15 %. Därför bör i sådant fall vatten över 5 % tillsättas genom en vattenring framme vid sprutmunstycket.

För att uppnå tillfredsställande packning i en fyllning under kapsel med direktdeponerat avfall bör lagertjockleken där antingen minskas från provade 30 cm till 15-20 cm eller tyngre packningsredskap (vibrationsvält) användas.

Ytan på de packade skikten bör brytas sönder genom att krattas eller harvas eller genom att man utnyttjar fårfotsvält som ger en yta med intrycksmärken.

Vibrering av kapselattrappen har befunnits fördelaktig för att åstadkomma god packning närmast under och kring denna.

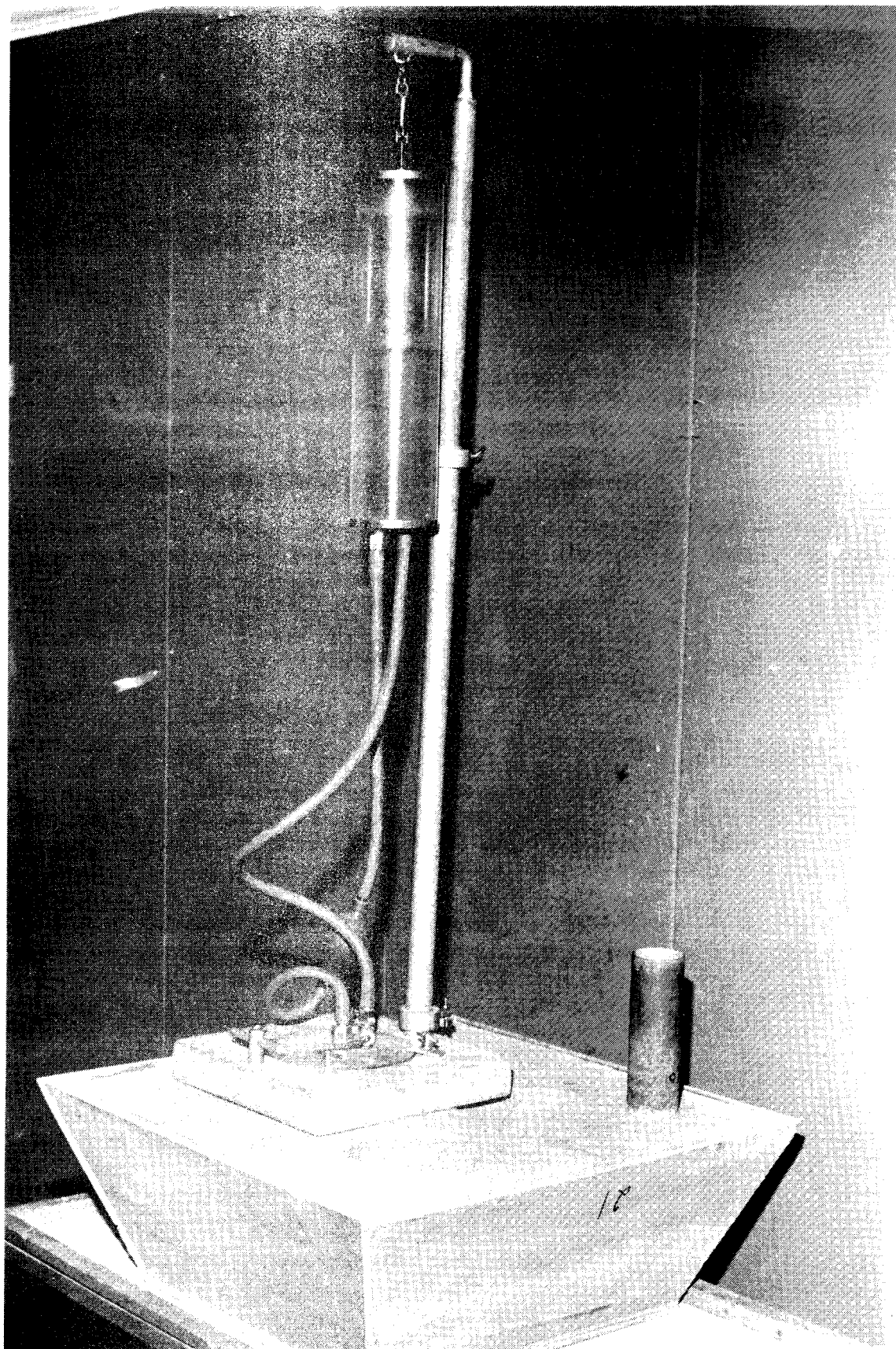


Foto 1 Densitetsbestämning på sprutat prov med vattenvolymeter och med eggförsedd kolvprovtagningscylinder.

Density determination in shotcreted sample by use of water densometer and by cylinder method.



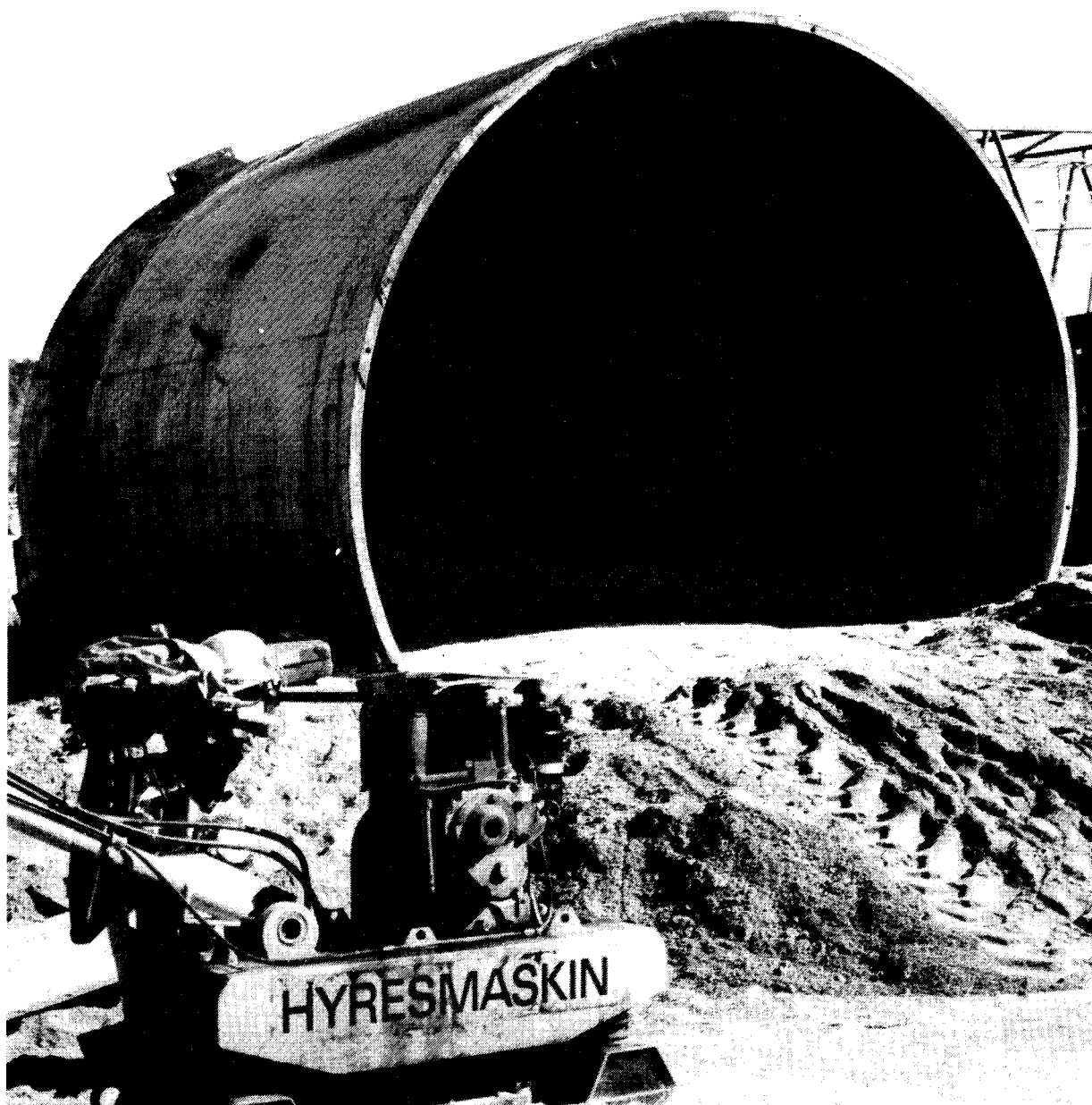


Foto 2 Bottenbädd och vibratorplatta vid halvskaleförsök.

Bottom layers and vibratory plate used in field test.

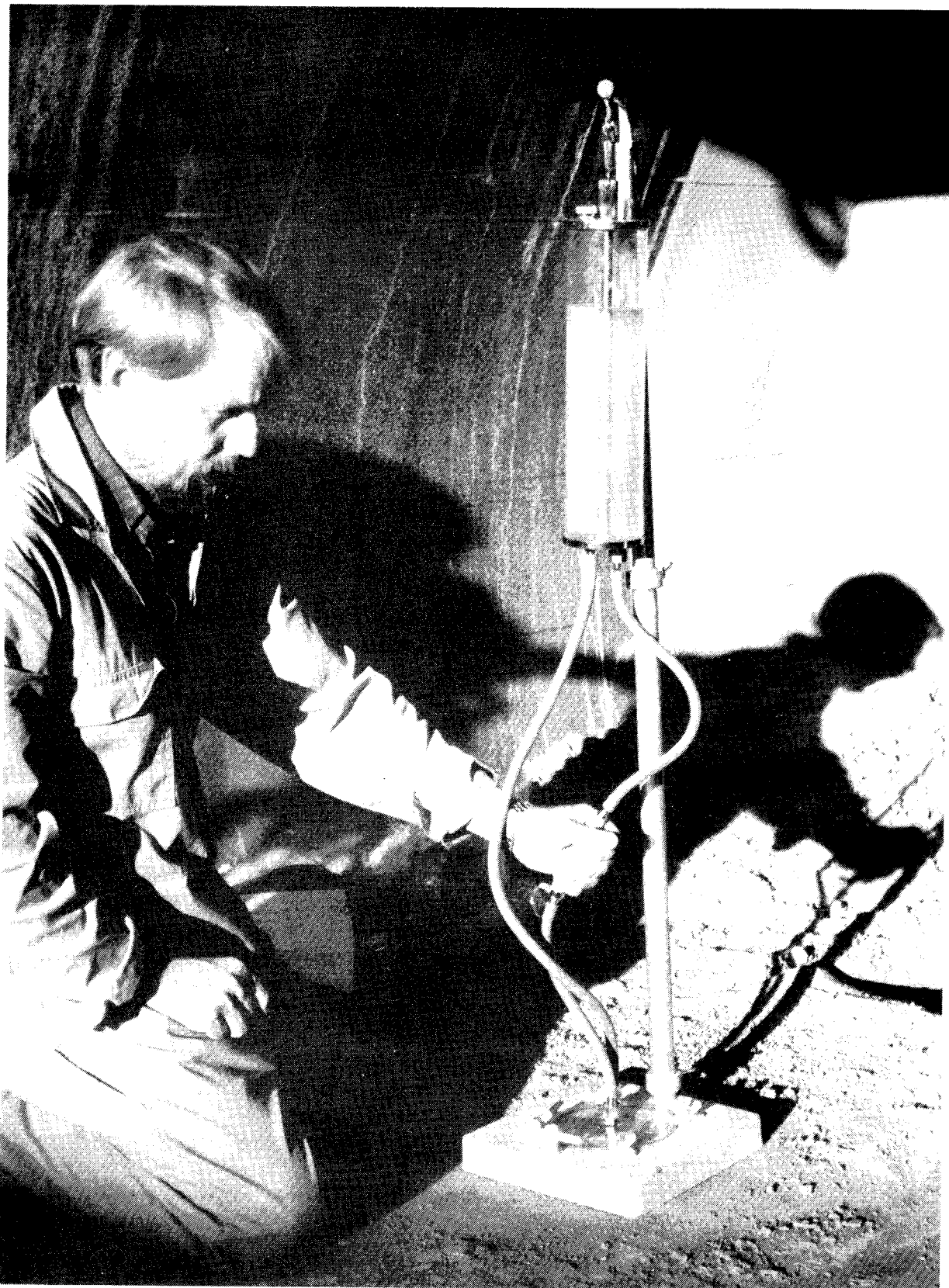


Foto 3 Densitetsbestämning med vattenvolymeter i bottenbädd.

Field density determination by use of water densometer.



Foto 4 Sprutning av överfyllning vid halvskaleför-  
sök.  
Field experiment with shotcrete equipment

## DEL II

## MATERIAL- OCH ARBETSBEKRIVNING

## UPPARBETAT KÄRNBRÄNSLEAVFALL

<u>Innehåll</u>	Sid
1. Allmänt	34
2. Buffertmaterial	36
2.1 Tekniska krav	36
2.2 Bentonit	37
2.3 Kvartsmjöl	38
2.4 Kwartssand	38
2.5 Kvartsitgrus	38
2.6 Provningsresultat	38
3. Fyllning i deponeringshål	39
3.1 Fyllning under kapseln	40
3.2 Fyllning kring kapseln	42
3.3 Överfyllning	42
4. Fyllning i tunnlar och bergrum	42
4.1 Hantering och lagring av buffertmaterial	44
4.2 Utläggning och packning av material i tunnlarnas och bergrummens bottendel	45
4.3 Utfyllning av tunnlarnas och bergrummens övre del	46
5. Fyllning i schakt	47
6. Kontroll	48

## 1. Allmänt

Den slutliga förvaringen av upparbetat kärnbränsleavfall kommer att ske i ett tunnelsystem på ca 500 m djup under markytan lokaliserat till tektoniskt ostörda bergpartier. Eventuella vattenförande sprickor eller sprickzoner tätas genom injektering med bentonit (eller i mindre utsträckning cement) för att begränsa vatteninläckning under den tid arbeten pågår i tunnarna. Kapslarna med avfallet placeras i vertikala hål i tunnarnas botten.

Kringfyllning av kapslarna med buffertmaterial utförs dels som skydd mot mekanisk påverkan, dels för att begränsa grundvattenrörelser i närmaste omgivningen. Även tunnlar och schakt upp till markytan fylls med buffertmaterial för att begränsa grundvattenrörelser.

Arbetet med utfyllning och packning kan vid deponering av upparbetat avfall uppdelas i två faser som är tidsmässigt avskilda, nämligen arbete med:

- deponeringshål för kapslarna
- schakt, bergrum och tunnlar.

Deponeringen - i första fasen - beräknas ske under en tidsperiod av ca 30 år. Därvid fylls ett lager om ca 9000 kapslar, dvs ca 300 kapslar deponeras per år. Varje deponeringshål har en volym av 4 m<sup>3</sup>, varför inga större mängder buffertmaterial kommer att behöva hanteras per dag. På grund av kvarvarande strålning från bränsleavfallet måste huvudparten av arbetet med kringfyllning och packning ske genom fjärrstyrning. Detsamma gäller kontrollen av uppnått resultat.

Den andra fasen - utfyllning och packning av buffertmaterial i tunnlar, bergrum och förbindelseschakt - kommer framför allt att bli ett kapacitetsproblem.

Totalt skall på 3 år fyllas ca 625 000 m<sup>3</sup> volym, vilket uttryckt i löst material blir ca 1 milj m<sup>3</sup>.

Massorna fördelas enligt följande:

- förvaringstunnlar	39 000 m	à	12 m <sup>2</sup>
- transporttunnlar	7 000 m	à	18 m <sup>2</sup>
- serviceutrymmen	23 000		m <sup>3</sup>
- krosstation	5 000		m <sup>3</sup>
- vertikala förbindelseschakt	52 000		m <sup>3</sup>

I medeltal skall ca 1 200 m<sup>3</sup> lös volym buffertmaterial hanteras per arbetsdag.

Undersökningar har visat att det lämpligaste buffertmaterialet är en kvarts-bentonitblandning med en välgraderad (moränliknande) kornkurva.

För blandning av buffertmaterialet kan användas teknik och metoder som är väl kända från betongfabrikation och gjuteriteknik. Materialet dammar kraftigt i torrt tillstånd, vilket ställer speciella krav på lagring och hantering.

Metoder för utfyllning och packning av detta material i deponeringshål, i schakt och i tunnlarnas nedre del är också väl kända, från jorddammar och andra jordfyllningsarbeten samt från beläggningsarbeten. För fyllning av tunnlarnas övre del, där konventionella packningsredskap inte går att använda, utläggs och packas materialet genom sprutning. Förfarandet bygger på välbekant svensk teknik för betongsprutning av tunnlar och bergrum (ROBOT-metoden).

## 2. Buffertmaterial

### 2.1 Tekniska krav

Buffertmaterialet skall uppfylla följande krav:

- tillräcklig hållfasthet för att hålla kapslarna i läge och skydda dem mot lossnande bergblock
- plasticitet, så att materialet inte spricker upp i händelse av rörelser i bergmassan
- låg permeabilitet, så att vattenrörelser intill kapslarna och i tunnelsystem blir obetydliga
- god värmeledningsförmåga för att förhindra höga temperaturer i kapslarna och i fyllningen runt dessa
- långtidsstabilitet mot vittring, cementering och andra förändringar vid temperaturer upp till 100°C.

Försök och undersökningar har visat att en välgraderad blandning av kvarts och bentonit uppfyller kraven ur såväl stabilitets- som värmelednings- och permeabilitetssynpunkt. Båda materialen finns tillgängliga i erforderliga kvantiteter och kan blandas till en homogen massa och hanteras med nu känd teknik.

Kvartsmaterialet ger blandningarna bärighet och god värmeledningsförmåga. Ökande halt bentonit gör materialet mera plastiskt och minskar vattengenomsläppligheten. Bentonitinnehållet måste dock begränsas med hänsyn till hanterbarhet, hållfasthet och värmeledningsförmåga.

Bentoniten har svällande egenskaper, vilka kan utnyttjas genom att buffertmaterialets sammansättning varieras i de olika zonerna. I den övre delen av tunnlarna säkerställer exempelvis en förhöjd bentonithalt att hålrum och fickor fylls, så att horisontella vattenrörelser förhindras. Variationen i bentonithalt ger de olika zonerna skilda svällningsegenskaper, vilket emellertid tack vare blandningarnas goda bärighet inte bedöms vålla några svårigheter.

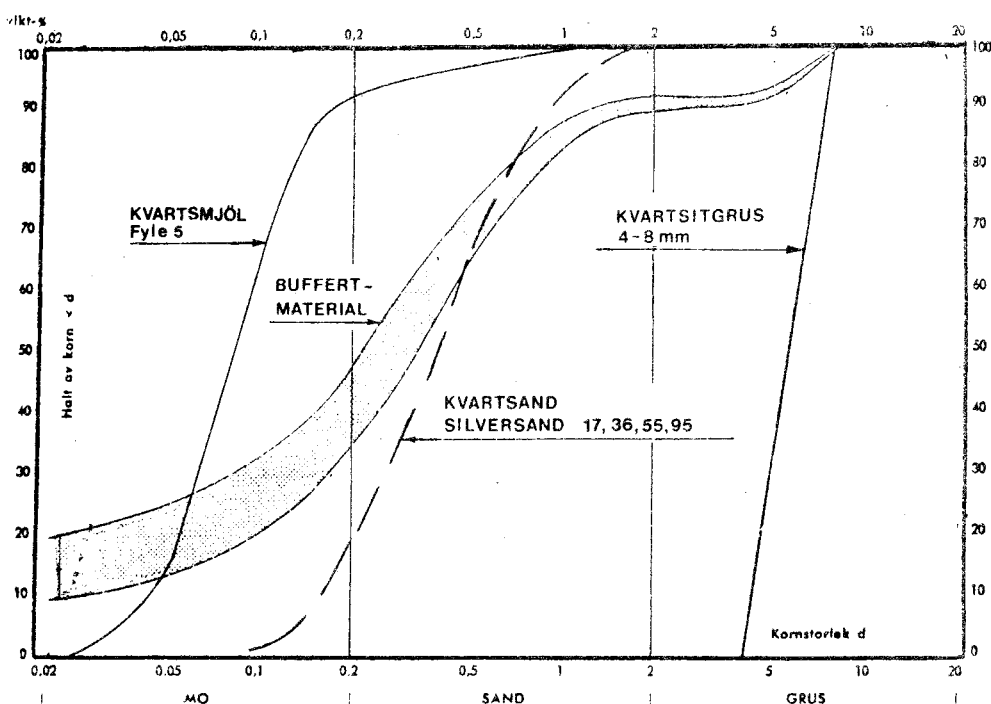


Fig. 10 Kornfördelning för buffertmaterial och för de i blandningen ingående delmaterialen (utom bentonit)

Grain-size distribution for buffer fill and the different components.

En lämplig blandning har följande sammansättning:

- 10-20 % granulerad Na-bentonit (t ex Volclay),
- 10 % kvartsmjöl (Fyle 5)
- 60-70 % kvartssand (Silversand 17, 36, 55 och 95)
- 10 % kvartsitgrus (4-8 mm)

Totalmaterialiets kornfördelning framgår av figur 10.

Vattentillsatsen skall utgöra minst 4 % för att inte materialet skall damma och högst 15-20 % för att det skall bibehålla huvuddelen av svällförmågan, inte bli för plastiskt och fortfarande vara hanterbart.

## 2.2 Bentonit

Volclay-bentonit är en amerikans kvalitet av vulkanisk lera, huvudsakligen bestående av montmorillonit. Den används praktiskt i form av granulat med kornstorlek ca 0,07-0,8 mm. Kvaliteten "Saline Seal 100" har behandlats så att den har goda svällningsegenskaper även för vatten med hög halt salter eller andra föroreningar.



### 2.3 Kvartsmjöl

Kvartsmjöl av kvalitet Fyle 5 är ett vitt naturligt material med kornstorlek 0,02-1 mm. Kiselsyrehalten uppgår till 99 % och sintringspunkten ligger över 1400°C.

### 2.4 Kvartssand

De använda typerna av Silversand (17, 36, 55 och 95) består av mycket ren kvarts med kornstorlek 0,063-2 mm. Färgen är beige och kornformen kantig-kantrund. Kiselsyrehalten överstiger 98 % och halten av slamämnen är låg. Sintringspunkten ligger över 1400°C.

### 2.5 Kvartsitgrus

Kvartsitgruset består av tvättad, krossad kvartsit i kornstorlek 4-8 mm.

### 2.6 Provningsresultat

Utförda fält- och laboratorieförsök har givit följande resultat:

- ur hållfasthets- och deformationssynpunkt är egenskaperna jämförbara med en moränleras. Hållfastheten hos materialet byggs upp av en kohesionsandel och en friktionsandel. En ökning av bentonitinnehållet ökar kohesionen och minskar friktionen
- permeabiliteten hos blandningarna är av storleksordningen  $10^{-10}$  m/s under förhållanden med förhindrad volymsutvidgning. Ökande bentonithalt ger minskande permeabilitet. Denna är tidsberoende och avtar efter hand som bentoniten tar upp vatten och genom svällning fyller ut porerna i materialet
- värmeledningsförmågan har befunnits uppgå till mellan 0,5 och 2 W/m°C, när vattenkvoten hos blandningarna varierat mellan 5 och 30 %. Ökande vatten- och kvartsinnehåll liksom ökande temperatur förbättrar värmeledningsförmågan

- packningsegenskaperna hos materialen motsvarar ungefär en lerig morän. Maximal densitet vid tung laboratoriestampning uppgår till 1,9-2,0 t/m<sup>3</sup> vid vattenkvot 8-12 %
- svällförmågan hos blandningar inpackade vid 10-15 % vattenkvot uppgår till mellan 15 och 35 % när materialet kan svälla fritt. Vid förhindrad volymsutvidgning har svälltrycket befunnits uppgå till mellan 30 och 200 kPa (0,3-2,0 kp/cm<sup>2</sup>).

### 3. Fyllning i deponeringshål

Den årliga förbrukningen av buffertmaterial är i denna fas av arbetet högst 2 000 m<sup>3</sup> i lös volym, varav ca 225 m<sup>3</sup> granulerad bentonit.

Materialet lagras i silos ovan jord och transporteras i ett slutet system ned till tunnelnivån, där ett mellanlager för ca 1 månads förbrukning anordnas vid krosstationen.

Efter blandning i tvångsblandare fylls och packas buffertmaterial kring kapseln i deponeringshålet i tre etapper, se figur 11. Utläggning och packning utförs med hjälp av ett redskap som består av en rörlig materialbehållare med två hydrauliskt manövrerade belastningsplattor (en hel platta i ena änden och en ringformad i den andra).

Materialbehållaren rymmer ca 3,5 m<sup>3</sup> och är försedd med bottentömningsanordning. Den är spårbunden och går på samma spår, som används vid uttransport av kapslar.

Centrering vid utläggning och packning sker med hjälp av fotoceller eller fasta stopp. För att få jämn spridning matas materialet fram av en vertikal skruv i behållaren och sprids sedan över en roterande skiva ned i hålet. Matningen är inställd så att endast en bestämd volym, motsvarande ett hoppackat skikt av 10-15 cm tjocklek, läggs ut.

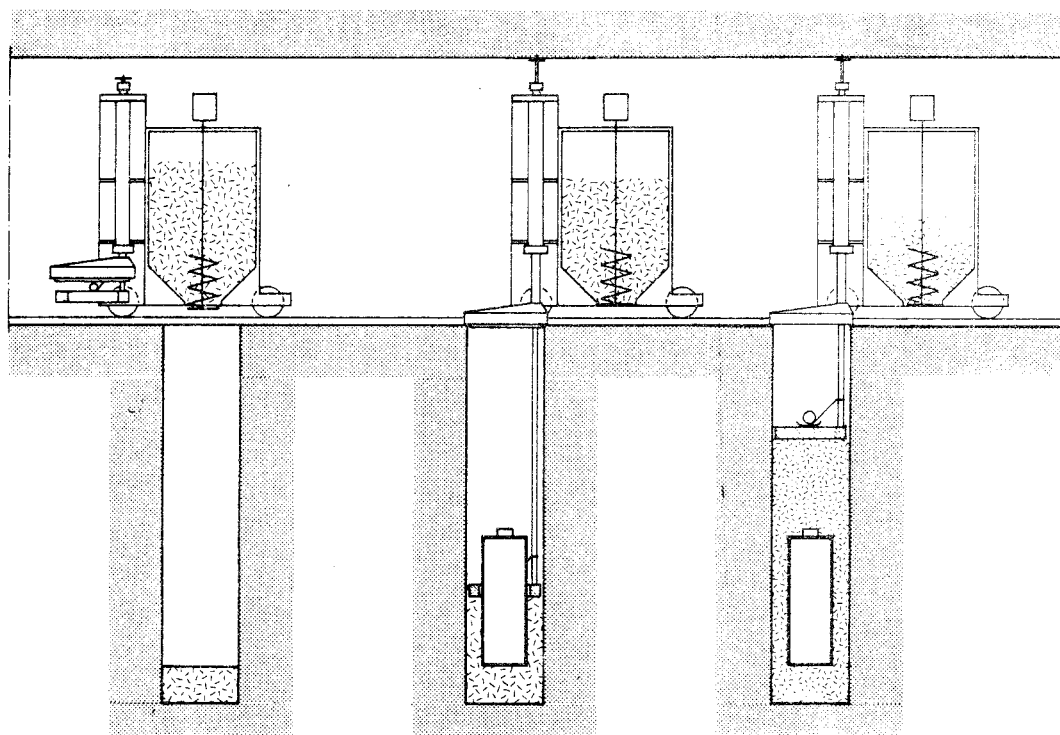


Fig. 11 Fyllning och packning av buffertmaterial kring kapsel med upparbetat avfall.  
Placing and compaction of buffer fill around canister with reprocessed vitrified HLW.

Materialbehållaren kan fjärrmanövreras under TV-kontroll. Fjärrmanövrering är ett krav vid de moment när fyllning sker kring och över kapseln.

Packningen utförs med hela och ringformade vibratorförsedda belastningsplattor. Dessa påförs ett statiskt tryck med hjälp av hydrauliska domkrafter, vilka arbetar med tunneltaket som mothåll. Sedan deponeringshålet fyllts, förseglas det med ett lock för att förhindra uttorkning av buffertmaterialet, figur 12.

### 3.1 Fyllning under kapseln

Materialet i bottendelen av deponeringshålet (till 0,3-0,5 m höjd) skall förutom att uppfylla kraven på låg permeabilitet och god värmeledningsförmåga även kunna bära kapseln utan nämnvärda deformationer.

För arbetet gäller:

- bentonithalt 10 ‰
- vattenkvot  $10 \pm 2$  ‰
- packningsgrad 90 ‰ (av tung laboratoriestampning)
- lagertjocklek 0,2 m
- tillförsel av material rörlig materialbehållare med bottentömning
- packning hydrauliskt styrd vibratorplatta

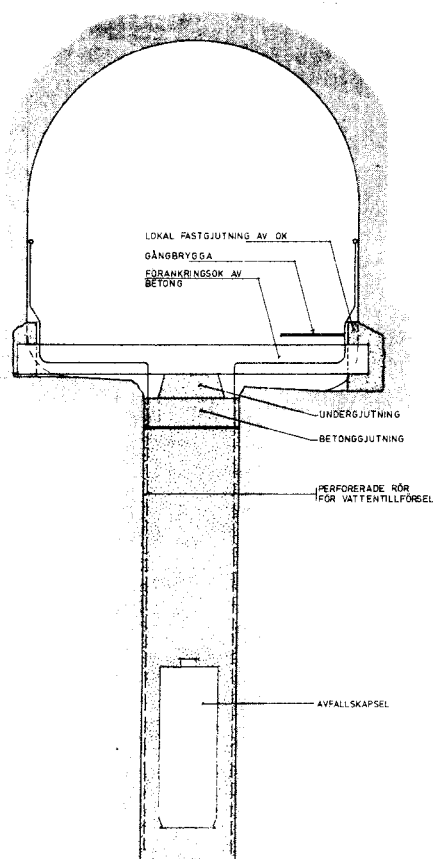


Fig. 12 Försegling av borrhål med upparbetat kärnbränsleavfall.

Sealing of holes with reprocessed vitrified HLW.

### 3.2 Fyllning kring kapseln

Materialet i denna zon skall ha låg permeabilitet och god värmeledningsförmåga samt ge sidostöd åt kapseln.

För arbetet gäller:

- bentonithalt 15 %
- vattenkvot 15 - 20 %
- packningsgrad 80 %
- lagertjocklek 0,1 - 0,2 m
- tillförsel av material rörlig materialbehållare med bottentömning
- packning hydrauliskt styrd ring, försiktig vibrering

### 3.3 Överfyllning

Materialet i denna zon läggs ut och packas på i huvudsak samma sätt som fyllningen under kapseln. Dock tillåts endast lätt vibrering av hänsyn till kapseln.

För arbetet gäller:

- bentonithalt 15 %
- vattenkvot  $15 \pm 2$  %
- packningsgrad 80 %
- lagertjocklek 0,2 m
- tillförsel av material rörlig materialbehållare med bottentömning
- packning hydrauliskt styrd vibratorplatta

## 4. Fyllning i tunnlar och bergrum

Botten i tunnlar rengörs och tunnlar fylls sedan med material av samma typ som kring kapslarna. De krav som främst skall tillgodoses är låg permeabilitet för att begränsa horisontella vattenrörelser samt kemisk och mekanisk stabilitet. Materialet läggs ut i två etapper enligt figur 13.

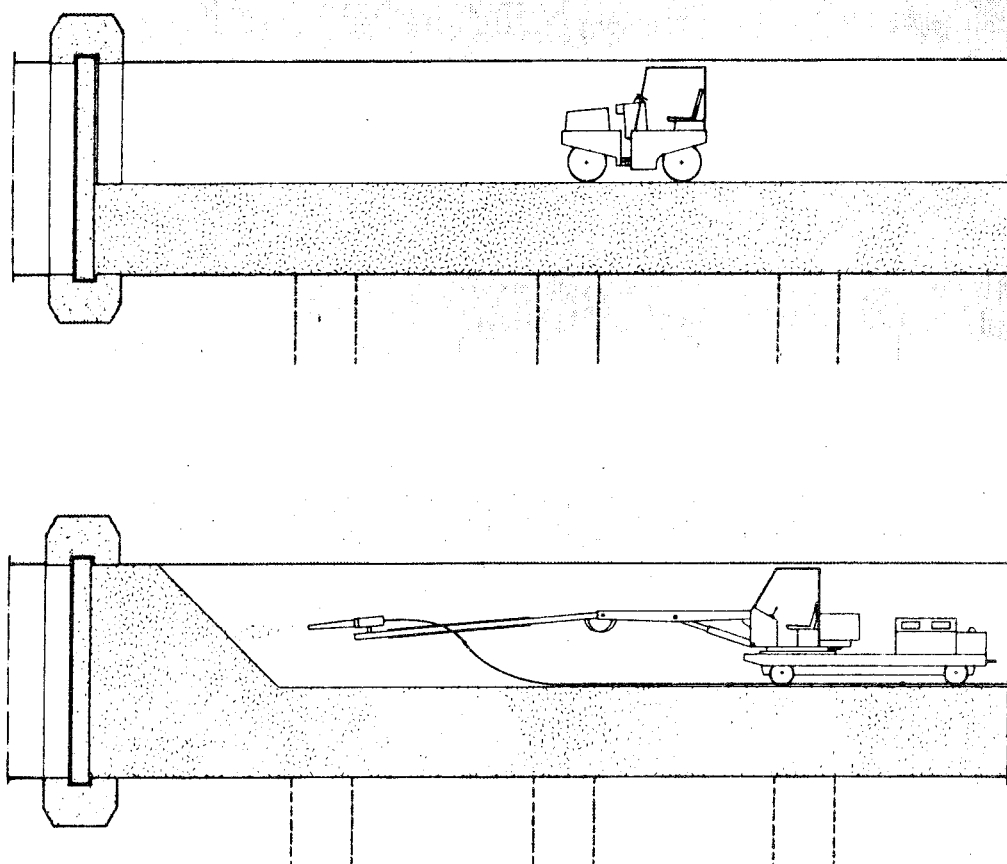


Fig. 13 Fyllning och packning av buffertmaterial i tunnlar.

Placing and compaction of bufferfill in tunnels.

I transporttunnlar och bergrum samt i deponeringstunnlar-  
nas överdel är kravet på materialets kvalitet något lägre  
än i den undre delen av deponeringstunnlarna. De rena  
kvartsmaterialen kan här ersättas av naturligt sand- och  
grusmaterial med inslag av fältspat och glimmer. I över-  
delen av tunnlar och bergrum kan bentonithalten ökas för  
att säkerställa att eventuella ojämnheter och hålrum i  
tunnelväggar och tak fylls ut och tätas i samband med  
materialets vattenupptagning och svällning.

Arbetet med utläggning och packning av buffertmateria-  
let ställer inga speciella krav på strålningsskydd.

För att fylla utrymmena på ca 3 år krävs att arbetet sker i 4-5 tunnlar parallellt.

#### 4.1 Hantering och lagring av buffertmaterial

Hantering och lagring av buffertmaterial ställer i denna fas stora krav på utrymmen, då omsättningen är ca 1 200 m<sup>3</sup>/dag. Ovan jord ordnas lager med kvartsmaterial för minst fem veckors produktion och lager med bentonit för 10-15 veckors produktion. Nere i berget anordnas lagerutrymmen för en veckas produktion. Överslagsmässigt fordras då följande lagerutrymmen:

	Ovan jord	Under jord
- bentonit	15 000 ton	1 250 ton
- kvartssand (färdigblandad)	35 000 "	6 500 "
- kvartsitgrus	3 000 "	600 "

Materialet förvaras i slutna utrymmen för att inte bli fuktigt och inte damma. Transporten till lagringsutrymmet nere i berget sker med hjälp av samma hisspel som använts för upptransport av bergmassor. Hisskorgarna bör med hänsyn till dammningen vara slutna. En annan möjlighet att föra ner materialet är störtning i rör. På grund av den stora fallhöjden är denna metod troligen ej lämplig.

Anläggningen för blandning av buffertmaterialet dimensioneras för att hantera 150 m<sup>3</sup>/tim. Uppbyggnaden är i princip densamma som i en modern betongstation med hög grad av automatisering. Speciella åtgärder, som t ex inbyggnad och kraftig ventilation, krävs för att begränsa dammningen.

Efter blandning tippas buffertmaterialet via en materialficka ned på ett transportband. Materialet vinklas från huvudtunneln ut i lagringstunnlarna med hjälp av mobila omlastningsstationer (vagnar). Dessa tippar materialet på nya transportband vilka för fram det till utläggningsstället. För att säkerställa en jämn materialtillång slutar transportbanden vid buffertfickor, varifrån arbetsmaskinerna hämtar sin last.

#### 4.2 Utläggning och packning av material i tunnlar- narnas och bergrummens botten- del

Med ca 1,5 m fritt utrymme under tak kan utläggning och packning utföras med modifierade maskiner av liknande typer som t ex används vid jorrdamms- och andra jordpackningsarbeten.

För utläggningen används lågbyggda skoplastare eller asfaltutläggare som breder ut materialet i ca 20 cm tjocka lager. Varje lager packas med vibrationsvält. Längs tunnelväggarna görs kompletterande packning med vibratorplatta eller jordstamp. För att undvika skiktbildning mellan lagren avslutas packningen med överfart av en fårfotsvält, vilken ger en yta med intrycksmärken. Arbetet med bottendelen sker parallellt i två tunnlar.

För arbetet gäller:

- bentonithalt	10 %
- vattenkvot	10 $\pm$ 2 %
- packningsgrad	90 %
- lagertjocklek	0,2 m
- utläggning	skoplastare eller utläggningsmaskin liknande asfaltutläggare
- packning	vibrationsvält med fårfotsvals och slätvals, vibratorplatta



#### 4.3 Utfyllning av tunnlarnas och berg- rummens övre del-----

Så snart bottendelen av en tunnel färdigställd, kan utfyllning av överdelen påbörjas. För denna utfyllning, där konventionella utläggnings- och packningsmaskiner inte kan användas, utnyttjas samma teknik och utrustning som vid bergförstärkning med sprutbetong.

Det färdigblandade materialet transporteras på transportband till rörliga materialfickor. Det har då en vattenkvot av 4-5 %, så att det inte dammar men inte heller klibbar. Från fickan töms materialet i en betongspruta av rotortyp och transporteras därifrån med en luftström till sprutmunstycket som är monterad på en ROBOT, figur 14. Strax före munstycket tillsätts resterande vatten genom en vattenring.

ROBOT-utrustningen består av en rörlig bärvagn på vilken sitter en förlängningsbar bom med sprutmunstycket i yttersta änden. Sprutmunstycket manövreras med hydraulik och kan fjärrkontrolleras av operatören. Materialet sprutas ut med stor hastighet och får på det sättet erforderlig packning. Vid fyllning av tunnlarnas överdel används dubbla sprutor som matar två munstycken monterade på samma ROBOT-enhet. Utfyllningen i överdelen av tunnlar drivs parallellt i fyra tunnlar.

För arbetet gäller:

- |  |   |
|--|---|
| - bentonithalt                           | 10-20 %   |
| - vattenkvot                             | 10 - 15 %   |
| - packningsgrad                          | 70 - 80 %   |
| - slänthlutning upp till 1 m under tak   | max 1:1   |
| - slänthlutning inom 1 m från tunnel-tak | vertikalt (ej överhäng)                                       |
| - sprutning                              | ROBOT-spruta med dubbla munstycken och hydraulisk manövrering |

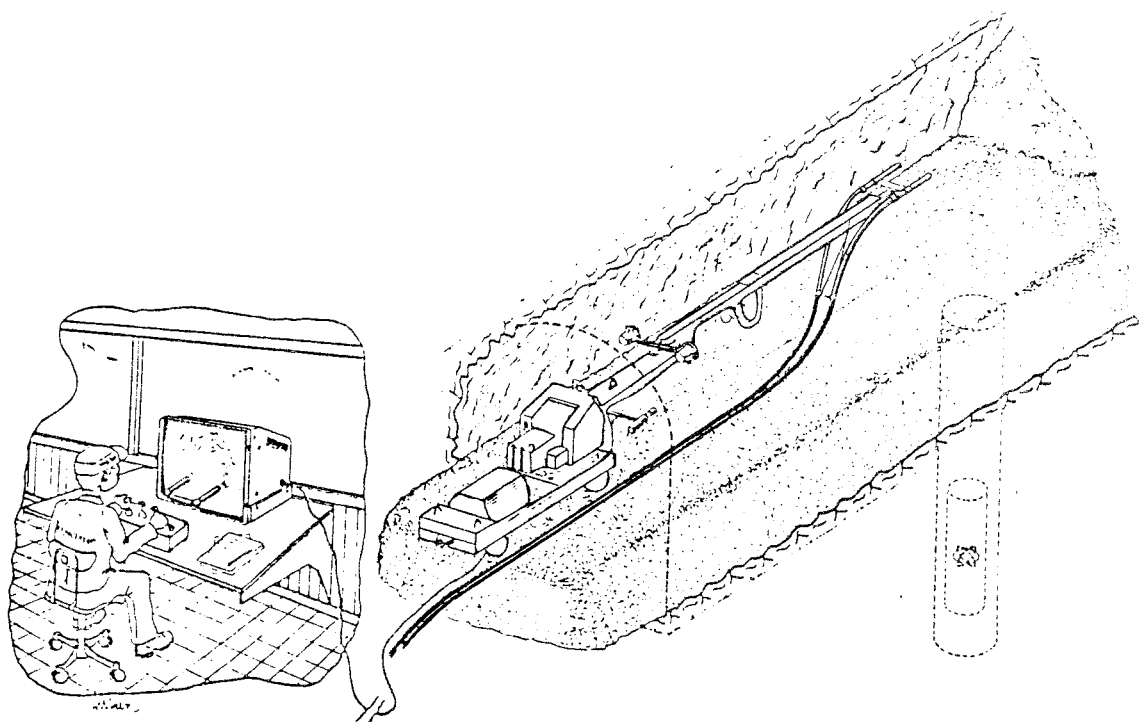


Fig. 14 ROBOT-utrustning för sprutning av buffertmaterial i övre delen av tunnlrar.

ROBOT-equipment for placing bufferfill in the top part of tunnels.

##### 5. Fyllning i schakt

För att förhindra vertikala vattenrörelser mellan tunn- larna och markytan fylls schakten med material av låg permeabilitet och god långtidsstabilitet mot mekanisk och kemisk påverkan.

I nedre delen av schakten upp till 100 m över tunnel- systemet används en blandning av rent kvartsmaterial och bentonit. Över denna nivå används antingen en bland- ning av naturligt sand- och grusmaterial och bentonit eller en finkornig morän med permeabiliteten högst  $10^{-8}$  m/s. De översta 10 m av schakten gjuts igen med betong.

Materialet blandas med tvångsblandare i en blandarstation uppe vid markytan och transporteras ned med hiss eller genom rör direkt till utläggningsstället. Särskilda åtgärder kan behöva vidtas, så att materialet inte separerar eller får för hög fallhastighet. På samma sätt som i tunnlar och bergrum läggs jorden ut i lager som packas med vibrationsvält och vibratorplatta.

För arbetet gäller:

- bentonithalt i nedre delen 10 %
- bentonithalt i övre delen vid blandning med sand och grus 5 - 10 %
- bentonithalt i övre delen vid användning av fin-kornig morän 0 %
- vattenkvot 8 - 10 %
- packningsgrad 90 %
- lagertjocklek 0,2 - 0,3 m
- packning vibrationsvält, vibratorplatta

## 6. Kontroll

För att säkerställa att uppställda kvalitetskrav uppfylls skall de material som ingår i återfyllningen kontrolleras kontinuerligt.

Egenskaperna hos kvartsmaterialen och bentoniten provas före leverans till förvaringsområdet. När kvartsmaterialen och bentoniten transporterats ned till tunnarna, blandas de i föreskrivna proportioner och vatten tillsätts. Prov tas för kontroll av homogenitet och kornfördelning.

I deponeringshålen packas materialet med hydrauliskt styrda plattor och ringar. För kontroll av packningen

utförs belastningsförsök på vart tredje lager efter hand som uppfyllningen framskrider. För dessa försök används samma utrustning som för packningen och de mätta deformationerna korreleras till förprovningar vid vilka sambandet deformation/packningsgrad bestämts.

Det är särskilt angeläget att bottenlagret som skall bära kapseln har föreskriven packningsgrad. För att kontrollera bärigheten och säkerställa en horisontell överyta provbelastar man därför detta lager med så hög last som 200 kPa (2 kp/cm<sup>2</sup>).

I tunnlar och schakt kan fyllningsarbetet följas utan risk för skadlig strålning. Det är här i första hand hanteringen och utförandet som kontrolleras, så att materialet läggs ut i föreskrivna lagertjocklekar och packas med rätt antal överfarer. I tunnlar bestäms dessutom densitet och packningsgrad efter var 50 m<sup>3</sup> fyllning i bottendelen och efter var 100 m<sup>3</sup> sprutad fyllning i överdelen. I schakten provas densitet och packningsgrad på varannan meter fyllning i vertikalled.

## Del III

## MATERIAL- OCH ARBETSBEKRIVNING

## DIREKTDEPONERAT KÄRNBRÄNSLEAVFALL

<u>Innehåll</u>	Sid
1. Allmänt	51
2. Buffertmaterial	52
3. Fyllning kring kapseln	52
3.1 Bottenbädd	53
3.2 Underbädd	53
3.3 Sidobädd	54
3.4 Överfyllning	54
4. Fyllning av tunnlar i övrigt och berggrum	55
5. Fyllning i schakt	55
6. Kontroll	55

## 1. Allmänt

Tunnlarna för slutlig förvaring av direktdeponerat kärnbränsleavfall har oval tvärsnittsarea med bredden ca 3,5 m och höjden 4,9 m. Tunnlarna lokaliseras till bergpartier av god beskaffenhet på ca 500 m djup under markytan. Eventuella vattenförande sprickor eller sprickzoner tätas genom injektering med bentonit (eller i mindre omfattning med cement) så att tunnlar kan hållas torra under fyllningsarbetena.

Kapslarna, vilka vid direktdeponering placeras 1 m över tunnelbotten, består av 25 tons kopparcylindrar med 0,8 m diameter och 4,5 m längd. På grund av viss kvarvarande strålning från bränsleavfallet transporteras och hanteras kapslarna med strålskyddade fordon utan mänsklig direktberöring. De kringfylls i tunneln med buffertmaterial, bestående av en utprovad blandning av bentonit och kvartssand.

Kringfyllningen utförs dels som skydd mot mekanisk påverkan, dels för att begränsa grundvattenrörelser i anslutning till kapslarna. Tunnelsystemet och schakten upp till markytan fylls även med tätt material av liknande typ för att begränsa grundvattenrörelser i vertikalled.

Metoder för packning i lager av en underbädd med buffertmaterial till god fasthet och låg permeabilitet är väl kända och beprövade från jorddammar och andra jordfyllningsarbeten. Överfyllning av kapslarna och resterande utfyllning av tunnlar sker genom ROBOT-sprutning av en sand-bentonitblandning. Förfarandet bygger på välbekant svensk teknik för betongsprutning av tunnlar och bergrum.

## 2. Buffertmaterial

(Se Material och Arbetsbeskrivning, upparbetat kärnbränsleavfall).

## 3. Fyllning kring kapseln

I tunneln placeras buffertjorden i fyra zoner (3.1-3.4) med olika bentonithalt och vattenkvot, figur 15. Tekniken för hanteringen av materialet finns redovisat i del II avsnitt 4.

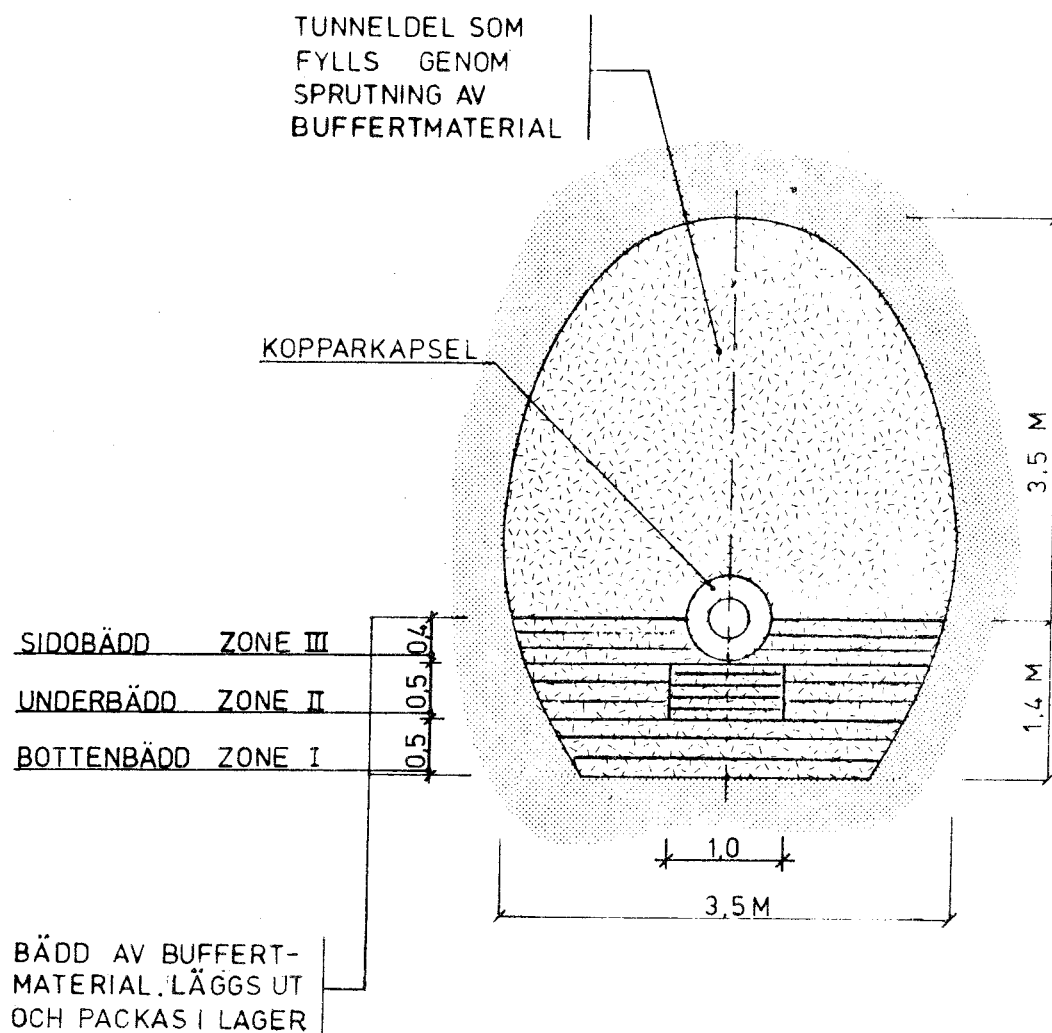


Fig. 15 Fyllning av buffertmaterial kring kapsel vid direktdeponering i tunnel

Placing of fill around canister in tunnel

### 3.1 Bottenbädd

Bottenbädden räknas från tunnelbotten till 0,5 m under kapslarnas nivå. Bädden skall ha låg permeabilitet, varför hög bentonithalt är önskvärd. Samtidigt skall bärförmågan vara god med hänsyn till fordonstrafik under fyllningstiden, varför vattenkvoten hålls låg.

För arbetet gäller:

- bentonithalt 15 %
- vattenkvot  $10 \pm 2$  %
- packningsgrad 90 % (av tung laboratoriestampning)
- lagertjocklek 0,2 m
- utbredning skoplastare eller utläggningsmaskin liknande asfaltutläggare, bladtraktor
- packning vibrationsvält med fårfotsvals och slätvals, vibratorplatta

### 3.2 Underbädd

Underbädden räknas från 0,5 m under kapslarnas underkant upp till underkanten. I delarna inom 0,5 m avstånd från kapslarna används material med lägre bentonithalt för att ge hög bärförmåga. I zonerna närmare tunnelväggarna ökas bentonithalten för att säkerställa en låg permeabilitet.

Inom 0,5 m från kapslarna gäller:

- bentonithalt 10 %
- vattenkvot  $8 \pm 2$  %
- packningsgrad 90 %
- lagertjocklek 0,2 m
- utbredning som för bottenbädden
- packning som för bottenbädden

För resterande fyllning, närmare tunnelväggarna, gäller samma villkor som för bottenbädden.



### 3.3 Sidobädd

Sidobädden räknas från kapslarnas underkant till deras centrumnivå.

Buffertjorden packas här kring kapselattrapper, vilka tjänar som form för en ursparing. I denna placeras kapslarna, sedan jordfyllningen avslutats och en attrapp i taget avlägsnats. För att förbättra packningen närmast attrapperna är dessa försedda med vibratorer. Bentonithalten skall för att ge god kohesion och täthet vara relativt hög, men vattenkvoten måste ligga under den optimala för att inte diket skall formförändras när attrapperna tas bort.

För sidobädden gäller:

- bentonithalt            15 %
- vattenkvot            8 ± 2 %
- packningsgrad        90 %
- lagertjocklek        0,15 - 0,2 m
- utbredning            skoplastare
- packning              vibratorplatta, under packning  
av varje lager i sidobädden  
vibreras kapselattrappen 5 min

### 3.4 Överfyllning

Allt eftersom kapslarna med radioaktivt avfall placeras i jorddiket, vidtar överfyllningen vilken utförs med kvarts-bentonit-material ända upp till tunneltaket. Arbetet sker med strålningsskyddad och avståndsmanövrerad ROBOT-utrustning som matas av en rotorspruta.

För fyllningen gäller:

- bentonithalt            10 - 20 %
- vattenkvot            10 - 15 %
- packningsgrad        70 - 80 %
- slänthlutning in-  
till 1 m under  
tunneltak                maximalt 1:1

- släntlutning inom 1 m från tunnel-tak                    vertikalt (ej överhäng)
- sprutning                    ROBOT-sprutas med dubbla munstycken och hydraulisk manövrering

4. Fyllning av tunnlar i övrigt och bergum                    (Se Material och arbetsbeskrivning för fyllning med buffertmaterial, upparbetat avfall).
5. Fyllning i schakt

#### 6. Kontroll

Materialen ingående i återfyllningen kontrolleras kontinuerligt för att säkerställa att de uppställda kvalitetskraven uppfylls.

Egenskaperna hos kvartsmaterialen och bentoniten provas före leverans till förvaringsområdet. När kvartsmaterialen och bentoniten transporterats ned till tunnelsystemet, blandas de i föreskrivna proportioner och vatten tillsätts. Prov tas för kontroll av homogenitet och kornfördelning.

I tunnlar och schakt kan fyllnings- och packningsarbetet följas upp utan risk för strålning, utom i den sprutade zonen närmast över kapslarna.

Det är i första hand hanteringen och utförandet som kontrolleras. Kontinuerligt följs därvid att materialet läggs ut i föreskrivna lagertjocklekar och packas med rätt antal överfarter.

I tunnarna bestäms dessutom densitet och packningsgrad med vattenvolymeter efter ca 50 m<sup>3</sup> fyllning i botten-

delen. På det sprutade materialet bestäms densitet och packningsgrad efter var 100 m<sup>3</sup> sprutad fyllning i de tunnelavsnitt som ej utnyttjas för deponering av kapslar. I schakten provas densitet och packningsgrad på varannan meter fyllning i vertikalled.

## FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN  
Nils Kjellbert  
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial  
Sven Knutsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans  
Arvid Jacobsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans  
Arvid Jacobsson  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1  
Roland Blomqvist  
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase 1, State of the art and detailed study plan  
Ulf Lindblom  
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS  
Del 1 Litteraturgenomgång  
Del 2 Beräkningar  
Kim Ekberg  
Nils Kjellbert  
Göran Olsson  
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium  
Hans Häggblom  
AB Atomenergi 77-03-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model  
Bertil Grundfelt  
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall  
Sture Henriksson  
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg  
Sven G Bergström  
Göran Fagerlund  
Lars Rombén  
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering  
Ragnar Gelin  
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall  
Rapport 2  
Roland Blomquist  
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring  
Åke Hultgren  
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements  
Arne Bjerhammar  
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden  
Nils-Axel Mörner  
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar  
Robert Lagerbäck  
Herbert Henkel  
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne  
Kennert Röshoff  
Erik Lagerlund  
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972  
Ota Kulhánek  
Rutger Wahlström  
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain  
situation in tunnels or bore holes with radioactive con-  
sistors embedded in a bentonite/quartz buffer mass  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass  
A model study  
Roland Pusch  
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och akti-  
nider från en cylinder av franskt glas  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi  
Ingemar Larsson KTH  
Tom Lundgren SGI  
Ulf Wiklander SGU  
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan  
Kjell Pettersson  
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing  
properties of natural zeolites  
Arvid Jacobsson  
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt  
Sven Knutsson  
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg  
Ove Stephansson  
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository  
Ivars Neretnieks  
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda  
för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27  
samt kompletterande yttranden.  
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 32 Long term mineralogical properties of bentonite/quartz  
buffer substance  
Preliminär rapport november 1977  
Slutrapport februari 1978  
Roland Pusch  
Arvid Jacobsson  
Högskolan i Luleå
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer masses  
Roland Pusch  
Högskolan Luleå 1977-10-19
- 34 Tillverkning av bly-titan kapsel  
Folke Sandelin AB  
VBB  
ASEA-Kabel  
Institutet för metallforskning  
Stockholm november 1977
- 35 Project for the handling and storage of vitrified high-level  
waste  
Saint Gobain Techniques Nouvelles October, 1977
- 36 Sammansättning av grundvatten på större djup i granitisk  
berggrund  
Jan Rennerfelt  
Orrje & Co, Stockholm 1977-11-07
- 37 Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts  
Hans Fagerström, VBB  
Björn Lundahl, Stabilator  
Stockholm oktober 1977
- 38 Utformning av bergrumsanläggningar  
Vattenfall  
VBB  
GAK  
Stockholm
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering  
ASEA-ATOM  
VBB  
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna  
radioaktiva ämnen  
Ronny Bergman  
Ulla Bergström  
Sverker Evans  
AB Atomenergi
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.  
Lagar, normer och bedömningsgrunder  
Christina Gyllander  
Siegfried F Johnson  
Stig Rolandson  
AB Atomenergi och ASEA-ATOM

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall  
Ann Margret Ericsson  
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar  
Bertil Grundfelt  
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas  
Tibor Lakatos  
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3  
Roland Blomquist  
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för använt bränsle  
Taivo Tahrandi  
VBB
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser  
Preliminär rapport oktober 1977  
Slutrapport februari 1978  
Lars Y Nilsson  
John Stokes  
Roger Thunvik  
Inst för kulturteknik KTH
- 48 The mechanical properties of Stripa granite  
Graham Swan  
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva  
Hans Carlsson  
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Läckningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik  
Göran Blomqvist  
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock  
F Ringdal  
H Gjöstdal  
E S Husebye  
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water  
H Häggblom  
AB Atomenergi 1977-09-14



- 53 Mätning av diffusionshastighet för silver i lera-sand-blandning  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15
- 54 Groundwater movements around a repository
- 54:01 Geological and geotechnical conditions  
Håkan Stille  
Anthony Burgess  
Ulf E Lindblom  
Hagconsult AB september 1977
- 54:02 Thermal analyses  
Part 1 Conduction heat transfer  
Part 2 Advective heat transfer  
Joe L Ratigan  
Hagconsult AB september 1977
- 54:03 Regional groundwater flow analyses  
Part 1 Initial conditions  
Part 2 Long term residual conditions  
Anthony Burgess  
Hagconsult AB oktober 1977
- 54:04 Rock mechanics analyses  
Joe L Ratigan  
Hagconsult AB september 1977
- 54:05 Repository domain groundwater flow analyses  
Part 1 Permeability perturbations  
Part 2 Inflow to repository  
Part 3 Thermally induced flow  
Joe L Ratigan  
Anthony S Burgess  
Edward L Skiba  
Robin Charlwood
- 54:06 Final report  
Ulf Lindblom et al  
Hagconsult AB oktober 1977
- 55 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg  
Del 1 Bestämning av fördelningskoefficienter  
Del 2 Litteraturgenomgång  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Jan Rydberg  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-10
- 56 Radiolys av utfyllnadsmaterial  
Bert Allard  
Heino Kipatsi  
Jan Rydberg  
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15