



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R25: 1975

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR V&G- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

Tunneltätning mot små läckage

Sten G.A. Bergman

Kjell Lindman

Lars Lundström

Pehr Söderman

Sten Ullerud

Byggforskningen

Tunneltätning mot små läckage

CENTERLOF & HOLMBERG AB

Sten G. A. Bergman, Kjell Lindman,
Lars Lundström, Pehr Söderman
& Sten Ullerud

Inom större urbaniserade områden användes ofta tunnlar för olika ändamål, t.ex. tunnelbanor, ledningstunnlar och skyddsrum. Eftersom markytan i sådana områden till största delen avvattnas genom avlopp, kan tunnlar få en dränerande effekt och sänka grundvattenytan med skador på hus och anläggningar som följd.

De laboratorieförsök med injektionsmedels inträngning i sand och smala spalter, som redovisades i Bygghorsknings rapport R45:1970, har kompletterats med nya injektionsmedel och försök vid lägre temperaturer. Begränsade fältförsök har genomförts i en ca 6 m² bergtunnel i avsikt att undersöka, vilken täthetsgrad som kan uppnås med användning av s.k. kemiska injektionsmedel med låg viskositet och god inträngningsförmåga.

Inträngning i sand

Försöken utfördes vid Stabilators laboratorium på i princip samma sätt som vid tidigare undersökning. Rundkornig torr sand med fraktionerna B 0: 0–0,10 mm; B 1: 0,10–0,15 mm samt B 2: 0,15–0,25 mm användes. I glasrör med innerdiameter 10 mm packades med vibrering 200 mm långa sandpelare. Det med färgämne tillsatta injektionsmedlet påfördes de vertikala sandpelarnas överyta under tryck 0,01 eller 0,02 MPa. varvid injektionsfrontens läge vid olika tider registrerades genom färgfotografering och med rutnät som bakgrund. Försök utfördes dels vid rumstemperatur +20 °C, dels i särskilt kylt utrymme vid +5 °C. (TAB. 1 och FIG. 1)

De erhållna inträngningskurvorna visade samma nära paraboliska form, som konstaterats i tidigare undersökning. Genomgående erhöles långsamma TAB. 1. Använda injektionsmedel - vissa egenskaper.

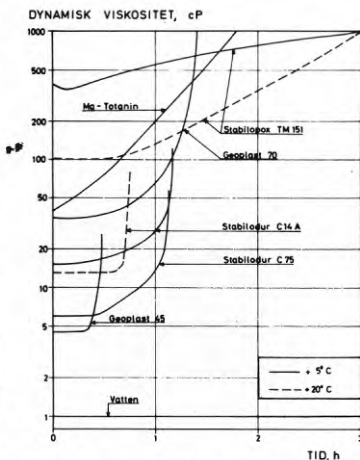


FIG. 1. Dynamisk viskositet enl. Brookfield för använda injektionsmedel.

re inträngning vid +5 °C än vid +20 °C. Högre tryck gav snabbare inträngning i proportion till kvadrat- eller tredjederoten ur tryckförhållandet.

Inträngning i smala spalter

Dessa försök utfördes vid Hagconsults laboratorium. Den provningsanordning med 500 × 650 mm planparallella glasplattor, vilken användes vid den tidigare undersökningen, placerades i ett kylutrymme med temperatur +5 °C. Inträngningsförloppet färgfilmades med rutnät som bakgrund. Injektionsstrycket var – med enstaka undantag – 0,05 MPa.

Sandpelarförsökens resultat har omräknats till "fiktiva" spaltjocklekar och sammanställt med spaltförsöken på sätt som framgår av FIG. 2. Spridningsbanden är som synes breda, vilket är naturligt med hänsyn till svårigheterna att erhålla väldefinierade försöksbetingelser. Medelvärden för samtliga under-

Bygghorsknings Sammanfattningar

R25:1975

Nyckelord:

tunneltätning, kem-injektion, laboratorieförsök, fältförsök

Rapport R25:1975 hänför sig till forskningsanslag C449:2–3 från Statens råd för byggnadsforskning till Sten G.A. Bergman, Stockholm.

UDK 624.191.956

SfB (19)

ISBN 91-540-2438-2

Sammanfattning av:

Bergman, S G A, Lindman, K, Lundström, L, Söderman, P & Ullerud, S. 1975. *Tunneltätning mot små läckage*. (Statens råd för byggnadsforskning). Stockholm. Rapport R25:1975. 82s., ill. 19 kr + moms.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst,
Box 1403, 111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60

Grupp: konstruktion

Namn/Karaktäristik	Gelningsstid för 50 g/h		Konsistens hos det härdade injektionsmedlet vid +5 °C
	+5 °C	+20 °C	
Stabilopox TM 151/Epoxihart med härdare	38	9	Halvhård
Stabilodur C 75/Polymeriserande alkalisilikat med härdare	1,2	0,8	Hård
Mg-Totanin/Lignosulfittul med härdare	3–4	–	Gummimjuk
Geoplast 70/Karbamidbaserat me-a-formaldehydlim + härdare	1,5	–	Hård
Geoplast 45/Monomer acryl med härdare	0,5	–	Klibbig, mjuk

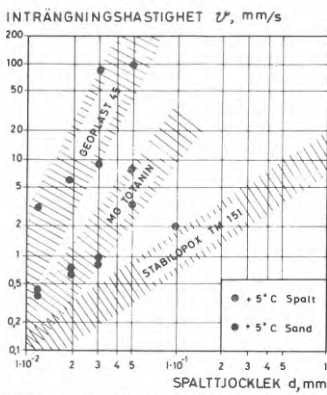


FIG. 2. Inträngningshastighet som funktion av spaltjocklek d för Geoplast 45, Mg-Totamin och Stabilopox TM 151 vid tryck 0,05 MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltjocklek.

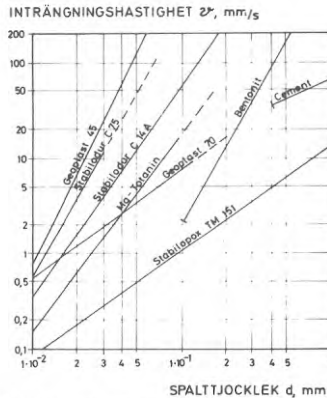


FIG. 3. Inträngningshastighet som funktion av spaltjocklek - sammanställning av resultat från nu undersökta injektionsmedel samt cement och Bentonit (Bergman et al, 1970). Tryck 0,05 MPa.

sökta injektionsmedel, dvs. även cement och bentonit, är sammanförda på FIG. 3. I stort kan inträngningshastigheten relateras till den dynamiska viskositeten, se FIG. 1, men för vissa preparat, t.ex. Geoplast 70 och Stabilopox TM 151, synes också andra egenskaper som ytaktivitet spela roll vid små spaltjocklekar.

Fältförsök

På en 10 + 10 m lång försökssträcka i en avloppstunnel i Salem (Himmerfjärdsprojektet) genomfördes två injektionsförsök med Stabilodur C 75 (försökssträcka A) och Geoplast 45 (försökssträcka B). Tunneln hade ca 6 m² tvärsnittsarea och var försedd med platsgjutet betongolv. Genom provborringar och tryckmätningar konstaterades att bergmassan runt tunneln stod under ca 35 m grundvattenstryck. Bergarten var slirnejs med pegmatitgångar.

Injekteringen begränsades till tak och väggar enligt FIG. 4. Det inläckande vattnet uppfångades och mättes i två

Utgivare: Statens råd för byggnadsforskning

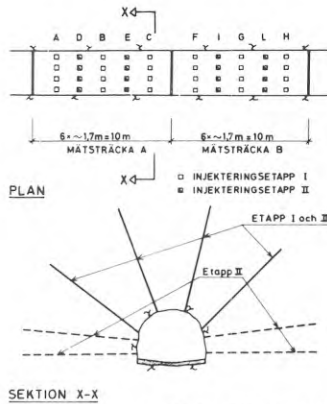


FIG. 4. Huvudprincipen för borrhålens placering vid den systematiska injekteringen i etapp I och II. Alla borrhål hade längden 5 m. Relativt stora lokala avvikelser i borrhålsplacering fick förekomma.

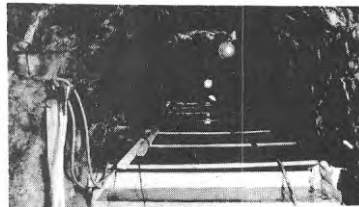


FIG. 5. Vy av försökstunneln med mätanordningar för läckagemätning. Pumpar och spetselektroder var placerade mellan damm A och damm B.

mätdammar, som anordnades på golvet, en på vardera försökssträcka. Speciella tätningsanordningar mot bergväggarna garanterade att allt läckvatten uppfångades, se FIG. 5.

Försöken inleddes med mätperiod I i den oinjicerade tunneln, se FIG. 6, varvid konstaterades att mätsträcka A läckte 4.2 l/h och mätsträcka B 18.4 l/h. Båda mätvärdena ligger under de täthetsvärden, som i praktiken kunnat uppnås med cementinjektering.

Injekteringen utfördes på båda mätsträckorna så, att först gjordes s.k. kar-

terad injektering med relativt korta hål (1-3 m) på områden, där "stort" läckage observerats. Därefter vidtog systematisk injektering i 5 m borrhål enligt FIG. 4.

Efter injekteringsetapp I med ca 3.4 m mellan borrhålsraderna, se FIG. 4, vidtog 2:a mätperioden, sedan mätdammarna åter monterats. Man konstaterade reduktion av inläckaget enligt FIG. 6 till 1,04 l/h för mätsträcka A och 2.1 l/h för mätsträcka B.

En ny injekteringsetapp II vidtog med hålradar placerade mellan raderna från etapp I, se FIG. 4. Den följande mätperioden måste tyvärr avbrytas redan efter några veckor, varvid även mätförhållandena blev otillfredsställande på grund av bl.a. sträng kyla inne i tunneln. Resultaten framgår av FIG. 6.

Slutsatser

Försöken har visat att det finns kemiska injektionsmedel, med vilka man kan uppnå en täthet som mätt i inläckt volym per tids- och ytenhet vid visst påliggande grundvattenstryck är minst 10-30 gånger bättre än vad som kan presteras med normal cementinjektering.

Olika injektionsmedels inträngningsegenskaper kan praktiskt bestämmas genom sandpelarprov, vilka på grund av sin enkelhet är lämpliga som standardprov.

Vattenförlustmätningar synes vara en bra indikator på möjligheten att injektera en bergmassa även vid sprickvidder ner till ca 10⁻² mm.

Ytterligare försök rekommenderas med grövre sandfraktioner för att eventuellt kunna ersätta spaltförsök, som är alltför komplicerade som standardprovmetod.

Ytterligare fältförsök bör utföras som programmering och uppföljning av aktuella tätningsprojekt i pågående tunnelbyggande.

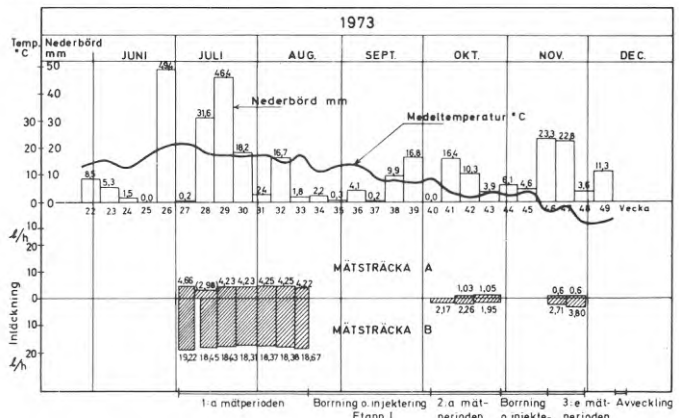


FIG. 6. Resultat av läckagemätningar på mätsträckorna A och B samt lokal nederbörd och utetemperatur.

Grouting of tunnels to prevent small-scale infiltration

Sten G. A. Bergman, Kjell Lindman, Lars Lundström, Pehr Söderman & Sten Ullerud

In large urbanised areas tunnels are often made use of for different purposes; examples are underground railways, sewage tunnels and air raid shelters. Since most of the ground surface in such areas is covered and drained to sewers, such tunnels can exert a considerable drainage effect and lower the subsoil water table, with consequent damage to houses and installations.

The laboratory tests on the penetration of grouts into sand and narrow gaps, which are described in National Swedish Building Research Report R45:1970, have been supplemented using new grouts and performing tests at lower temperatures. Limited field tests were performed in a rock tunnel of approx. 6 m² cross section in order to find what degree of impermeability can be achieved using chemical grouts of low viscosity and high penetration capacity.

Penetration into sand

The tests were carried out at the laboratories of Stabilator AB in the same general way as in previous investigations. The sand used was dry and round grained, with the fractions B0: 0–0.10 mm, B1: 0.10–0.15 mm, and B2: 0.15–0.25 mm. By using vibratory methods, sand columns 200 mm long were packed into glass tubes of 10 mm internal diameter. The grout, to which a colouring substance had been added, was applied to the top surface of the vertical sand column at a pressure of 0.01 or 0.02 MPa, the position of the grout front at different times being recorded by means of coloured photography, using a grid as background. Tests were performed at a room temperature of +20 °C and also at +5 °C in a specially refrigerated room. (TAB. 1 and FIG. 1.)

The penetration-time curves obtained showed the same almost parabolic shapes as those found in previous investiga-

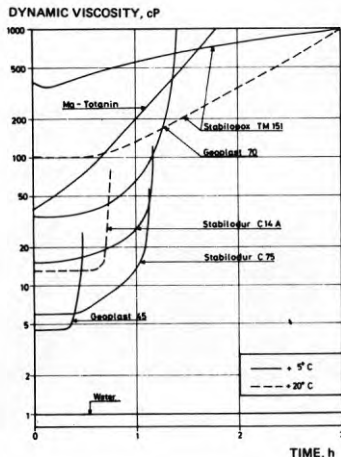


FIG. 1. Dynamic viscosities according to Brookfield for the grouting compounds used in the tests.

tions. Penetration at +5 °C was consistently slower than at +20 °C. Penetration at a higher pressure was faster and in proportion to the square or cube root of the pressure ratio.

Penetration into narrow gaps

These tests were performed at the laboratory of Hagconsult AB. The test equipment consisting of 500×600 plane parallel glass plates which had been used in the previous investigation was placed into a refrigerated room at a temperature of +5 °C. The penetration process was filmed in colour against a grid background. With individual exceptions, the grouting pressure was 0.05 MPa.

The results of the sand column tests have been converted into fictive gap widths, and collated with the gap tests as shown in FIG. 2. As will be seen, the band of scatter is wide, which is natural in view of the difficulties in achieving

TAB. 1. Some properties of the grouts used.

Name/Characteristic	Gelling time for 50 g/h		Consistency of the cured grout at +5 °C
	+5 °C	+20 °C	
Stabilopox TM 151/Epoxy resin with setting agent	38	9	Semi-hard
Stabilodur C 75/Polymerising alkaline silicate with setting agent	1.2	0.8	Hard
Mg-Totanin/Lignosulphite liquor with setting agent	3–4	–	Spongy soft
Geoplast 70/Carbamide based me-a-formaldehyde glue + setting agent	1.5	–	Hard
Geoplast 45/Acryl monomer with setting agent	0.5	–	Sticky, soft

Swedish Building Research Summaries

R25:1975

Key words:

tunnel sealing, chemical grouting, laboratory tests, field tests

Report R25:1975 refers to research grant C 449:2–3 from the Swedish Council for Building Research to Sten G.A. Bergman, Stockholm.

UDC 624.191.956
SfB (19)
ISBN 91-540-2438-2

Summary of:

Bergman, S G A, Lindman, K, Lundström, L, Söderman, P & Ullerud, S. 1975, *Tunneltätning mot små läckage*. Grouting of tunnels to prevent small-scale infiltration. (Statens råd för byggnadsforskning). Stockholm. Report R25:1975, 82 p., ill. Kr. 19 + moms.

The report is in Swedish with summaries in Swedish and English.

Distribution:

Svensk Byggtjänst,
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

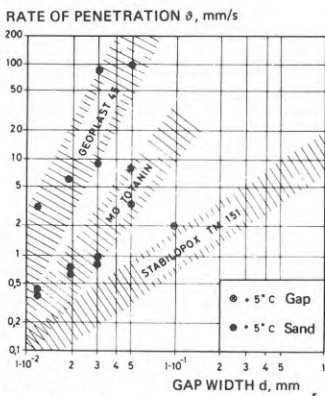


FIG. 2. Rate of penetration as a function of the gap width for Geoplast 45, Mg-Totamin and Stabilopox TM 151 at a pressure of 0.05 MPa. The results of sand column tests have been converted into gap width.

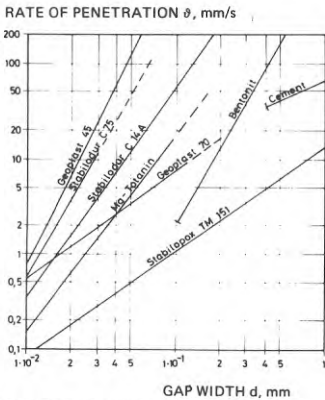


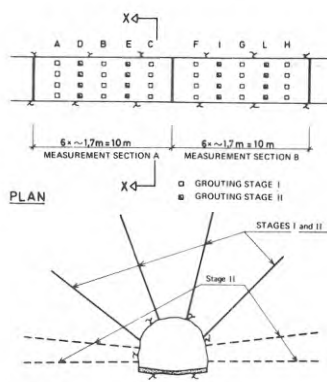
FIG. 3. Rate of penetration as a function of the gap width. Results for all the grouting compounds tested, as well as for cement and bentonite according to earlier tests, Bergman et al (1970). Pressure 0.05 MPa.

well defined test conditions. The mean values for all the grouts investigated, i.e. cement and bentonite also, have been summarised in FIG. 3. Broadly speaking, the rate of penetration can be related to the dynamic viscosity, see FIG. 1, but in the case of certain preparations, e.g. Geoplast 70 and Stabilopox TM 151, it would seem that other properties such as surface activity also exert an influence in conjunction with small gap widths.

Field tests

Over a 10 + 10 m long test section in a sewerage tunnel at Salem (Himmerfjärd project), two grouting tests were carried out using Stabilodur C 75 (test section A) and Geoplast 45 (test section B). The tunnel had a cross sectional area of about 6 m² and had an in-situ cast concrete sill. It was found by test drilling and pressure measurements that the rock mass around the tunnel was subjected to approx. 35 m ground water pressure. The rock was streaked gneiss with intrusions of pegmatite.

Grouting was confined to the roof and walls as shown in FIG. 4. The infiltrat-



SEKSION X-X

FIG. 4. General arrangement of drill holes used in systematic grouting during Stages I and II. All drill holes had a length of 5 m. Relatively large local variations were allowed in hole positions.

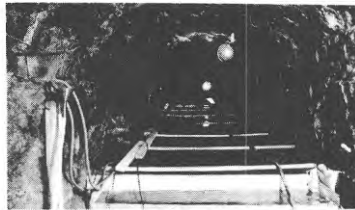


FIG. 5. View of test tunnel showing dams arranged for measuring infiltration. The pumps and their control electrodes were placed near the bridge between dam A and dam B.

ing water was collected and measured in two dams placed on the sill, one in each test section. Special seals were placed against the rock walls to ensure that all infiltrating water was collected. See FIG. 5.

The tests were begun by measuring period 1 in the ungrouted tunnel, see FIG. 6, the findings being that section A had an infiltration of 4.2 dm³/h and section B one of 18.4 dm³/h. Both these values are below the permeability limit which could have been achieved in practice using cement grouting.

Grouting was applied over both test

sections in such a way that grouting with relatively short holes (1–3 m) was employed over the areas where "large" infiltration had been noted. Systematic grouting with 5 m holes, as shown in FIG. 4, was then carried out.

After grouting stage 1, with the rows of drill holes spaced about 3.4 m apart, see FIG. 4, the second measurement period was begun after the dams had again been placed in position. It was found that infiltration had been reduced, as shown in FIG. 6, to 1.04 dm³/h over section A and to 2.1 dm³/h over B.

A new grouting stage 2 was then carried out with the rows of holes placed between those of stage 1. See FIG. 4. The subsequent measurement period had, unfortunately, to be discontinued after only a few weeks, by which time the measuring conditions had also become unsatisfactory due, inter alia, to very low temperatures in the tunnel. The results are shown in FIG. 6.

Conclusions

The tests have shown that there are chemical grouts which make it possible to reduce the infiltration, measured in terms of the volume of water infiltrating per unit of time and surface area at a certain imposed ground water pressure, to 3–10 per cent of what can be brought about by normal cement grouting.

The penetration properties of different grouts can be determined in practice by means of sand column tests which are suitable as standard tests owing to their simplicity.

Measurements of water loss would appear to be a satisfactory indicator of the possibility of grouting a rock mass, even in the case of crack widths down to about 10⁻² mm.

Further tests are recommended using coarser sand fractions in order that gap tests, which are far too complicated for use as standard tests, may possibly be superseded.

Further field tests should be carried out as planning and following up of intended sealing projects in tunnelling in progress.

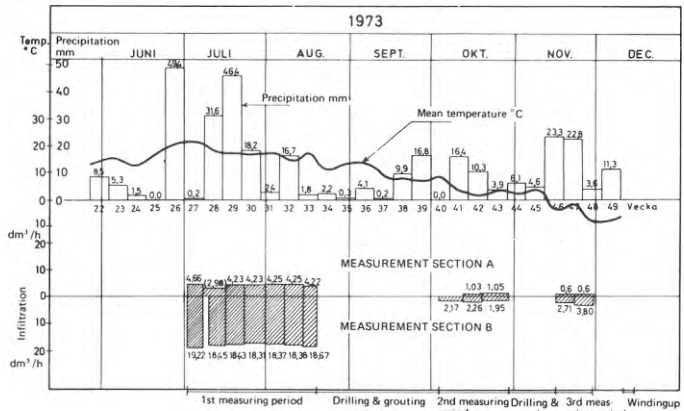


FIG. 6. The results of infiltration measurements over test sections A and B related to local precipitation and outdoor temperature.

Rapport R25:1975

TUNNELTÄTNING MOT SMÅ LÄCKAGE
Försöksverksamhet

av Sten G.A. Bergman, Kjell Lindman,
Lars Lundström, Pehr Söderman &
Sten Ullerud

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag C 449:2-3 från Statens råd för
byggnadsforskning till Sten G.A. Bergman.

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
ISBN 91--540--2438--2

LiberTryck Stockholm 1975

FÖRORD

I BFR:s rapport R45:1970 redovisades resultaten från försök, som utförts för att undersöka olika injekteringsmedels framträngningsegenskaper i sand och i smala spalter 0,05 - 0,4 mm. Försöken visade att cement sannolikt inte kan användas för injektering av finare bergsprickor än 0,5 å 0,6 mm. Med epoxi- och polyesterpreparat finns däremot möjlighet att injektera mycket fina sprickor.

Försöken avsågs endast utgöra en första etapp i en större undersökning om möjligheterna att tätta bergtunnlar mot små vattenläckage. Huvudvikten lades därför i första hand vid att få fram principiella provningsmetoder och att jämföra egenskaperna hos vissa aktuella injekteringsmedel. Av kostnadsskäl kunde vissa parametrar inte varieras; bl. a. utfördes således alla försöken i rumstemperatur medan aktuella bergtemperaturer i Sverige ligger vid +5^o - +10^oC.

Statens råd för byggnadsforskning beviljade 1970.09.30 kronor 100.000:- till undersökningens andra etapp (forskningsanslag C 449:2), som avsåg att omfatta dels en komplettering av den första etappens försök med flera injekteringsmedel och försök vid lägre temperatur, dels praktiska injekteringsprov med några lämpliga injekteringsmedel i begränsade bergpartier med små vattenläckage.

Anslaget C 449:2 erhöles på samma villkor som för första etappen, nämligen att de båda företagen Hagconsult AB och Stabilator AB tillsammans skulle bidra med 100.000:- kronor.

De kompletterande laboratorieproven hade avslutats på försommaren 1972. Rekognosceringar av lämplig försöksplats för de praktiska proven utfördes under 1971 och 1972, varvid önskemålet var en tunnel med relativt liten sektion, med konstant vattenövertryck och litet läckage. Tunneln borde dessutom få disponeras ostört minst 6 månader.

Inte förrän i november 1972 hade lämpligt objekt erhållits, nämligen ett parti av Himmerfjärdstunnlarna i närheten av Salem. På grund av oförutsedda AMS-arbeten fördröjdes de praktiska provens igångsättning till juni 1973.

I oktober 1973 stod det klart att bl. a. förseningarna medfört icke förutsedda kostnadsökningar. Vidare fanns skäl att utvidga de praktiska proven med kompletterande injekteringar. Ett tilläggsanslag C 449:3 på kr 43.000:- söktes och erhöles från BFR, varvid Hagconsult AB och Stabilator AB lovade att ge motsvarande bidrag.

I december 1973 måste provtunneln utrymmas.

Preliminära redogörelser för successivt erhållna resultat har lämnats inför BFR:s programgrupp för geohydrologisk forskning 1972.11.28 och 1973.12.18.

En undersökning av detta slag engagerar många personer. Författarna vill framföra sitt tack till företagscheferna dir. Claes

Alberts, Stabilator AB, och dir. Carl-Olof Morfeldt, Hagconsult AB, för såväl givande diskussioner som den generösa öppenhet som präglat deras inställning till projektet. För skickligt arbete och god hjälp tackar vi även civ.ing. Staffan Bäckström, ing. Ture Nilsson, ing. P.H. Nilsson, Stabilator AB, samt ing. N. Lindblom, Hagconsult AB.

Slutligen tackar vi dir. Anders Cronström, Sydvästra stockholmsregionens va-verksaktiebolag (SYVAB) samt entreprenören Skånska Cementgjuteriet AB, för att vi kostnadsfritt fått disponera försökssträckan i Salem. Som denna rapport visar har dock tunnelns kvalitet något förbättrats på detta avsnitt.

INNEHÅLL

FIGURFÖRTECKNING	7
TABELLFÖRTECKNING	10
BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	11
1 LABORATORIEFÖRSÖK	12
1.1 Använda injekteringsmedel	12
1.2 Inträngning i sandpelare	16
1.2.1 Försöksanordningar	16
1.2.2 Försöksresultat	18
1.2.3 Kommentarer	27
1.3 Inträngning i smala spalter	28
1.3.1 Försöksanordningar	28
1.3.2 Försöksresultat	30
1.3.3 Kommentarer	37
1.4 Diskussion	37
1.4.1 Anknytning sandpelar - spaltförsök	37
1.4.2 Inträngningshastighet - spalttjocklek	38
1.4.3 Temperatur	43
2 INJEKTERINGSFÖRSÖK I TUNNEL	44
2.1 Beskrivning av tunneln	44
2.2 Försökens uppläggning	46
2.2.1 Försöksprogram	46
2.2.2 Försöksanordningar	51
2.3 Förberedande mätningar	51
2.4 Injekteringsetapp I - mätsträcka B	58
2.4.1 Injekteringens utförande	58
2.4.2 Mätresultat	62
2.4.3 Kommentarer	62
2.5 Injekteringsetapp I - mätsträcka A	62
2.5.1 Injekteringens utförande	63
2.5.2 Mätresultat	67
2.5.3 Kommentarer	67
2.6 Injekteringsetapp II - mätsträcka A	67
2.6.1 Injekteringens utförande	67
2.6.2 Mätresultat	68
2.6.3 Kommentarer	68
2.7 Injekteringsetapp II - mätsträcka B	70
2.7.1 Injekteringens utförande	70
2.7.2 Mätresultat	70
2.7.3 Kommentarer	72

2.8	Borrhålsgranskning	72
2.9	Diskussion	73
2.9.1	Vattenförlust - injekterad volym	73
2.9.2	Möjlig täthetsgräns	75
2.9.3	Skyddsåtgärder	77
3	SLUTSATSER	78
3.1	Möjlig täthet	78
3.2	Inträngningsegenskaper	78
3.3	Vattenförlustmätningar	78
3.4	Om fältförsök	78
4	AKTUELLA FORSKNINGSUPPGIFTER	80
5	NOMENKLATUR	81
6	REFERENSER	82

FIGURFÖRTECKNING

- FIG. 1. Dynamisk viskositet enl. Brookfield för använda injekteringsmedel.
- FIG. 2. Sidovy underifrån av försöksanordning med sandpelare, vilka monterats vertikalt på en med mm-rut-papper beklädd tavla.
- FIG. 3. Sidovy av "kylrummet", där sandpelarförsök vid $+5^{\circ}\text{C}$ utfördes. Tavlan med sandpelarna fotograferades genom fönstret i frontväggen.
- FIG. 4. Inträngning av Stabilopox TM 151 vid 0,01 MPa och varierande temperaturer i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2. Försöken vid $+25^{\circ}\text{C}$ utfördes tidigare, Bergman et al (1970).
- FIG. 5. Inträngning av Stabilopox TM 151 vid $+5^{\circ}\text{C}$ och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
- FIG. 6. Inträngning av Stabilodur C 75 vid 0,01 MPa och temperaturer $+5^{\circ}\text{C}$ resp. $+20^{\circ}\text{C}$ i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
- FIG. 7. Inträngning av Stabilodur C 75 vid $+5^{\circ}\text{C}$ och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
- FIG. 8. Inträngning av Mg-Totanin vid $+5^{\circ}\text{C}$ och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
- FIG. 9. Inträngning av Geoplast 70 vid $+5^{\circ}\text{C}$ och tryck 0,01 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2, se TAB 2. Parabelkurvor har anpassats (t sek., T min.).
- FIG. 10. Inträngning av H_2O och Geoplast 45 vid $+5^{\circ}\text{C}$ och 0,01 MPa tryck i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
- FIG. 11. Anordning för undersökning av injekteringsmedels inträngning i smala spalter. Apparaturen iordningställd för injekteringsförsök. I bakgrunden kylkompressorn.
- FIG. 12. Inträngning av Stabilopox TM 151 i spalt $d = 0,1$ mm och $d = 0,05$ mm vid 0,05 MPa och $+5^{\circ}\text{C}$. Tryckhöjning till 0,1 MPa efter halva injekteringstiden vid $d = 0,05$ mm.
- FIG. 13. Inträngning av Stabilodur C 14 A i spalt $d = 0,1$ mm och $d = 0,05$ mm vid 0,05 MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.
- FIG. 14. Inträngning av Mg-Totanin i spalt $d = 0,1$ mm och $d = 0,05$ mm vid 0,05 MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.
- FIG. 15. Inträngning av Geoplast 70 i spalt $d = 0,05$ mm och 0,02 mm vid 0,05 MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.

- FIG. 16. Inträngning av Geoplast 45 i spalt $d = 0,05$ mm och $d = 0,05$ mm och $d = 0,02$ mm vid $0,05$ MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.
- FIG. 17. Inträngningshastighet v som funktion av spalttjocklek d för Bentonit, Stabilopox TM 151 och Stabilodur C 14 A vid tryck $0,05$ MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltbredd, se avsnitt 1.4.
- FIG. 18. Inträngningshastighet v som funktion av spalttjocklek d för Geoplast 45, Geoplast 70 och cement vid tryck $0,05$ MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltbredd, se avsnitt 1.4.1.
- FIG. 19. Inträngningshastighet v som funktion av spalttjocklek d för Mg-Totanin, Stabilopox TM 151, Stabilodur C 75 och cement vid tryck $0,05$ MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spalttjocklek, se avsnitt 1.4.
- FIG. 20. Inträngningshastighet som funktion av spalttjocklekssammansättning av resultat från nu undersökta injekteringsmedel samt cement och Bentonit (Bergman et al (1970)). Tryck $0,05$ MPa.
- FIG. 21. Vägparti av försökstunneln, som visar den sliriga bandade gnejsen genomsatt av pegmatitgångar och bruten av skölar och glidytor.
- FIG. 22. Beteckningar använda vid sprick- och läckagekartering, FIG. 23, 24, 32 och 33.
- FIG. 23. Sprick- och läckagekartering av mätsträcka A. Beteckningarnas betydelse framgår av FIG. 22.
- FIG. 24. Sprick- och läckagekartering före försöken av mätsträcka B. Beteckningarnas betydelse framgår av FIG. 22.
- FIG. 25. Placering av ridåhål R 1 - R 4 för att åtskilja provsträckorna A och B. Borrhålen T 1 - T 4 avsåg att bestämma påliggande grundvattentryck.
- FIG. 26. Skiss över mät- och sedimentationsbassänger i försökstunneln.
- FIG. 27. Vy av försökstunneln med mätdammar arrangerade för läckagemätning. Pumpar och spetselktroder var placerade mellan damm A och damm B.
- FIG. 28. Schematisk framställning av mätapparat för automatisk registrering av läckagevatten, som runnit ned i mätdammarna, se även FIG. 29 och 30.
- FIG. 29. Anordning för automatisk mätning av läckage i mätdamm. Spetselktroderna (i förgrunden till höger) startar och stänger den elektriska dränkbara pumpen (i förgrundens mitt) på två vattennivåer.

- FIG. 30. Anordning för mätning av utpumpat läckagevatten. Detta pumpas upp i trattarna, varifrån det med självtryck rinner igenom ringkolvmätarna, se FIG. 28.
- FIG. 31. Huvudprincipen för borrhålens placering vid den systematiska injekteringen i etapp I och II. Alla borrhål hade längden 5 m. Relativt stora lokala avvikelser i borrhålsplacering fick förekomma.
- FIG. 32. Mätsträcka B - läge av karterade injekteringshål i etapp I (1 - 31) samt systematiska hål i etapp I (□) och II (■). R 1 - R 4 = ridåhål. Beteckningar, se FIG. 22.
- FIG. 33. Mätsträcka A - läge av karterade injekteringshål i etapp I (K 1 - K 18) samt systematiska hål i etapp I (□) och II (■). Beteckningar, se FIG. 22.
- FIG. 34. Resultat av läckagemätningar på mätsträckorna A och B samt lokal nederbörd och utetemperatur.
- FIG. 35. Per borrhål i berg inpressat injekteringsmedel som funktion av uppmätt vattenförlust.

TABELLFÖRTECKNING

- TAB. 1. Egenskaper hos använda injekteringsmedel.
- TAB. 2. Sammanställning av inträngningsförsök i 10 mm torra sandpelare med variation av sandfraktioner, injekteringsmedel, tryck och temperatur.
- TAB. 3. Ungefärliga förhållandet mellan inträngningshastigheterna i sandfraktionerna B 2, B 1 och B 0.
- TAB. 4. Sammanställning av inträngningsförsök i tunna spalter vid +5°C.
- TAB. 5. Mätsträcka B - injekteringsetapp I. Vattenförluster och i berg inpressat injekteringsmedel Geoplast 45.
- TAB. 6. Mätsträcka A - injekteringsetapp I. Vattenförluster och i berg inpressat injekteringsmedel Stabilodur C 75.
- TAB. 7. Mätsträcka A - injekteringsetapp II. Vattenförluster och i berg inpressat injekteringsmedel Stabilodur C 75.
- TAB. 8. Mätsträcka B - injekteringsetapp II. Vattenförluster och i berg inpressat injekteringsmedel Geoplast 45.

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

d	spalttjocklek, sprickvidd, mm
d_f	fiktiv spalttjocklek omräknad från sandpelarförsök, se Bergman et al 1970
t	tid, s
v	injekteringsfrontens inträngningshastighet, mm/s
x	injekteringsfrontens inträngning, mm
D_m	medelvärde av övre och undre kornstorleksgräns för "rensiktad" sandfraktion
I	injekterad volym l per m borrhål
T	tid, min.
V	vattenförlust i borrhål, l/min. m. atö
τ	"täthetsvärde" för bergyta, l/min. m ² . MPa
B 0	Baskarpssand, fraktion 0 - 0,10 mm
B 1	Baskarpssand, fraktion 0,10 - 0,15 mm
B 2	Baskarpssand, fraktion 0,15 - 0,25 mm
cP	centipois = 0,001 Ns/m ² , mätstorhet för dynamisk viskositet

1 LABORATORIEFÖRSÖK

I Bygghorskningsrapport R45;1970, Bergman, Lindman och Söderman (1970), redovisades en serie laboratorieförsök som vid rumstemperatur utförts för att undersöka olika injekteringsmedels inträngningsegenskaper i sand och smala spalter. De försöksanordningar, som därvid utprovades, har med vissa modifikationer använts även för de försök som här kommer att beskrivas.

1.1 Använda injekteringsmedel

I de tidigare försöken, Bergman et al (1970), provades Limhamns snabbcement, bentonit samt ett epoxi- och ett polyester-material. En av de viktigaste slutsatserna blev att vanlig cement resp. bentonit inte kunde beräknas täta sprickor med mindre bredd än 0,6 mm resp. 0,1 mm. Med speciellt finmalen cement med kornstorlek $\leq 0,04$ mm tillsatt med bentonit och plastpreparat har man i laboratorium injekterat spalter på 0,15 mm tjocklek, Wittke (1969). Med hänsyn till undersökningens syfte att påvisa injekteringsmedel som kan täta mot även små vattenläckage blir därmed cement och bentonit ointressanta.

Vid de försök, som här skall redovisas, har endast sådana injekteringsmedel använts, som populärt brukar grupperas under beteckningen "keminjektering". Fem olika preparat (recept) har använts, nämligen:

Stabilopox TM 151, vilket är samma epoxibaserade preparat från Stabilator AB, som i tidigare undersökning benämndes Epoxi IB-Pox 3 TM. Komponent A är epoxiharts med vissa viskositetssänkande tillsatser, och komponent B är en aromatisk amin, som tjänstgör som härdare. Vid försöken har använts viktsförhållandet Komp A : Komp. B = 1 : 1. FIG. 1 visar injekteringsmedlets dynamiska viskositet som funktion av tiden yid dels +20°C, dels +5°C. Vid den lägre temperaturen startar medlet med en betydligt högre viskositet, men härdningen fortskrider å andra sidan långsammare, se TAB. 1.

Stabilodur C 75 är ett av Stabilator AB marknadsfört medel med fyra komponenter, nämligen A: ett polymeriserande alkaliskilikat, B: härdare; C: accelerator och D: H₂O. Det vid försöken använda blandningsförhållandet var i volym räknat A:B:C:D = 40:8:3:49. FIG. 1 visar att detta injekteringsmedel har mycket låg viskositet vid +5°C under en tid av ca 30 minuter, varefter en härdning inträder och fullbordas efter ca 1 timme. Den härdade slutprodukten blir en hård massa med god hållfasthet, se TAB. 1.

Stabilodur C 75 framtoogs genom produktutveckling under försökens gång. Då försöken påbörjades användes ett likartat injekteringsmedel Stabilodur C 14 A, vilket dock hade avsevärt högre viskositet, se FIG. 1. Spaltförsök utfördes således endast med Stabilodur C 14 A, och resultaten med detta injekteringsmedel, vars övriga egenskaper är nära lika Stabilodur C 75, återges på vissa ställen i rapporten.

Mg-Totanin är en helt vattenlöslig cellulosa produkt - ligno-sulfitlut - som vid härdning bildar en gummiliknande gel. Fyra komponenter användes, nämligen A: Mg²⁺ Totanin B; H₂O samt C; och D: härdare. Med olika blandningsförhållanden kan härdningstider mellan 3 och 11 h uppnås. Det av Hagconsult AB vid försöken tillämpade blandningsförhållandet var i volym räknat A : B : C : D = 1, 14 ; 1 : 0, 128 ; 0, 128. Som FIG. 1 visar har injekteringsmedlet en ganska låg viskositet i början men viskositeten ökar snabbt med tiden. Medlets krympning är obetydlig, se TAB. 1. Den gummiliknande konsistensen hos den härdade massan innebär att den är lätt formbar och har låg hållfasthet för lokalt tryck.

Geoplast 70 - marknadsfört av Hagconsult AB - är ett på karbamid baserat me-a-formaldehydim, komponent A, i vattenlösning, dvs. B = H₂O. Som härdare C används citronsyra. Det vid försöken använda blandningsförhållandet var A : B : C = 2 l : 1 l ; 20 g. Som FIG. 1 visar håller sig viskositeten tämligen konstant låg under bortåt 1 h, varefter gelningen fortskrider snabbt. Den resulterande krympningen är liten, se TAB. 1. Som slutprodukt erhålles en tämligen hård, ogenomskinlig massa. Geoplast 70 uppvisar labil härdning i alkalisk miljö.

Geoplast 45 - marknadsfört av Hagconsult AB - är en vattenlösning av monomer acryl, komponent A. Komponent B = H₂O. För att erhålla gelning används tre olika härdare; C, D och E. Vid försöken använt blandningsförhållande var A : B : C : D : E = 250 g ; 720 g ; 6 ml ; 0, 02 g ; 4 ml. Som FIG. 1 visar erhålles härvid en injekteringsvätska med mycket låg viskositet som håller sig nära konstant ca 20 minuter varefter gelning snabbt sätter in. Slutprodukten blir en mjuk, klabbig massa, som visar försumbar syneres och är olöslig i vatten och petroleumlösningssmedel, TAB. 1.

I TAB. 1 används uttrycken mikrogelbildning och syneres.

Vid blandning av ett injekteringsmedels komponenter kan i kontaktytorna momentant bildas små gelpartiklar, vilka kallas mikrogel. Storlek och mängd av dessa kan varieras genom komponentsammansättning och blandningssätt. Bildad mikrogel kan visserligen slås sönder i samband med blandningen men endast i försumbar grad återupplösas. Eftersom mikrogel ogynnsamt påverkar viskositeten, vill man undvika eller försena dess framträdande.

Vid härdning av vissa organiska och oorganiska vattenhaltiga geler förekommer att gelen krymper under avskiljning av moderlut. Denna krympning kallas syneres och har ej samband med uttorkning. För att få motsvarighet med förhållandena i bergsprickor mätes syneresen i slutna system med hårda väggar (glas).

Samtliga bestämningar av dynamisk viskositet, FIG. 1, utfördes på Stabilator AB:s laboratorium.

Vid sandpelarförsöken utfördes även en serie försök med vatten som injekteringsmedel i avsikt att få ett slags referensvärde.

TAB. 1. Egenskaper hos använda injekteringsmedel.

Injekteringsmedel	Gelningstid för 50 g, h		Mikrogelebildning		Syneres (volym- minskning) i slutet system	Konsistens hos det härdade injekteringsmedlet +5°C	
	+20°C	+5°C	+20°C	+5°C		Efter 24 h	Efter 7 dygn
Stabilopox TM 151	9	38	Ingen	Ingen	Försumbar	Halvhård ¹⁾	Halvhård ¹⁾
Stabilodur C 75	0,8	1,2	-	Strax före gelning	Försumbar	Hård	Hård
Mg-Totantin	-	3-4	-	Ingen	Försumbar	Gummi- mjuk	Gummi- mjuk
Geoplast 70	-	1,5	-	Ingen	Försumbar	Hård	Hård
Geoplast 45	-	0,5	-	Ingen	Försumbar	Klibbig, mjuk	Klibbig, mjuk

1) Vid +20°C.

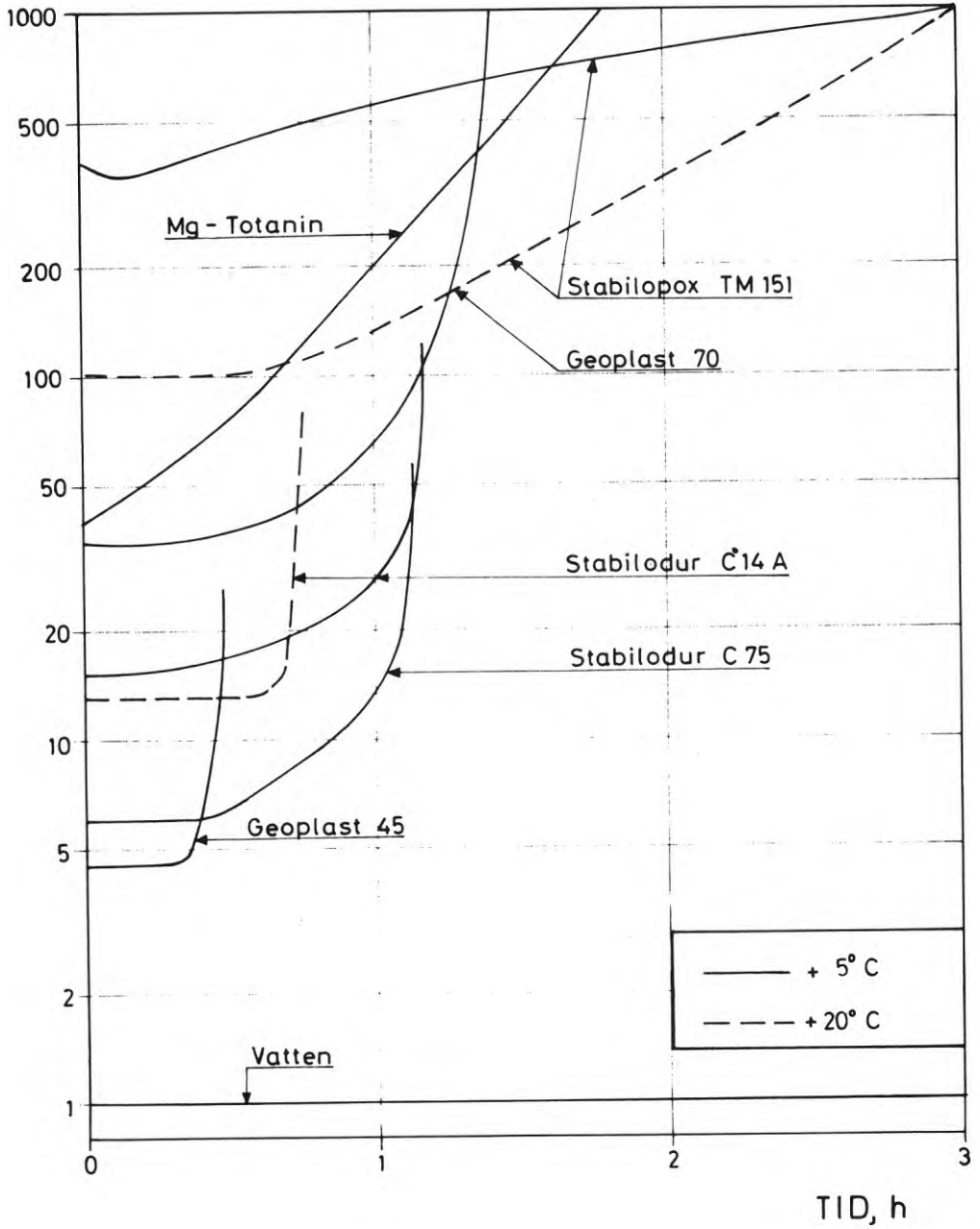


FIG. 1. Dynamisk viskositet enl. Brookfield för använda injekteringsmedel.

Dynamic viscosity according to Brookfield for injection compounds used in tests.

1.2 Inträngning i sandpelare

Vid de tidigare utförda försöken med inträngning i sandpelare, Bergman et al (1970), användes tre olika sandsorter med olika korntyp: natursand med runda korn, natursand med kantiga korn och krossprodukt. Likaså provades inträngningen i såväl torr som fuktig sand.

För de "kemiska" injekteringsmedlen tycktes korntypen vara av relativt underordnad betydelse för inträngningsförmågan. I fuktig sand gav samma medel - med vissa undantag - bättre inträngning än i torr sand.

Vid de här redovisade försöken skulle man prova medel med betydligt lägre viskositet än tidigare. Det var därför ingen fördel att få en snabb inträngning. Det var vidare försökstekniskt lättare att hålla väldefinierade försöksbetingelser med torr än med fuktig sand. Vi valde därför att genomföra de nya försöken enbart i torr sand.

På samma sätt gjordes en begränsning i fråga om korntyp till enbart natursand med runda korn, nämligen Baskarpssand nr 7. På samma sätt som vid de tidigare försöken användes två rensiktade fraktioner:

- B 1 - kornstorlek 0,1 - 0,15 mm
- B 2 - kornstorlek 0,15 - 0,25 mm.

Dessutom användes fraktionsområdet:

- B 0 - 0 - 0,1 mm.

Data i form av bl.a. siktkurva och fördelningsdiagram återfinns i Ahlsell & Ågren AB: En bok om sand (1966) och i Bergman et al (1970).

Liksom tidigare utfördes försöken med inträngning i sandpelare vid Stabilator AB:s laboratorium.

1.2.1 Försöksanordningar

Försöken genomfördes med i princip samma utrustning som vid tidigare försök, Bergman et al (1970).

De sandpelare, som användes, utgjordes således av med sand fyllda glasrör, där sanden vibrerats under 30 s efter påfyllning för att säkerställa en god och från försök till försök likvärdig packning. Glasrörens innerdiameter var 10 mm och sandpelarens längd 200 mm i samtliga försök.

Försöksanordningen med sandpelarna (glasrören) monterade vertikalt och parallellt på en med mm-rutpapper beklädd tavla framgår av FIG. 2. Överst på varje glasrör fanns en tilldelning för injekteringsmaterialet. Dessutom hade på tavlan monterats ett tidtagarur, en termometer samt aktuella protokoll-data.

Injekteringsmedlet fanns i 500 ml E-kolvar, som via slangar stod under avsett tryck (0,01 resp. 0,02 MPa) från en trycktab

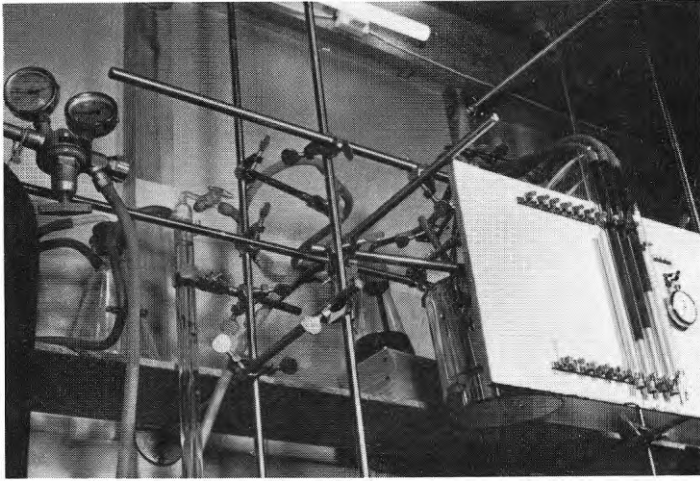


FIG. 2. Sidovy underifrån av försöksanordning med sandpelare, vilka monterats vertikalt på en med mm-rutpapper beklädd tavla.

Side view from below of test apparatus with sand columns, which are mounted vertically on a board covered with graph-paper.

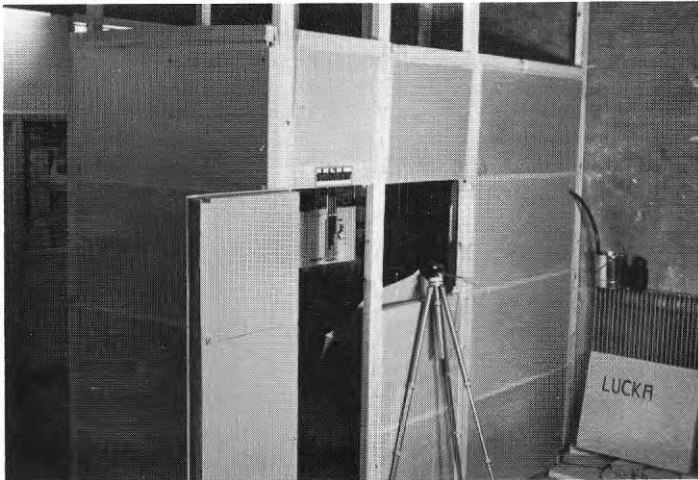


FIG. 3. Sidovy av "kylrummet", där sandpelarförsök vid $+5^{\circ}\text{C}$ utfördes. Tavlan med sandpelarna fotograferades genom fönstret i frontväggen.

Side view of the refrigerated room, where sand column test where made at temperature of $+5^{\circ}\text{C}$. The board with the sand columns was photographed through the window in the front wall.

med reduceringsventil. Kolvarna förbands via slangar och glasrör med respektive sandpelare, se FIG. 2.

De flesta försöken utfördes vid en temperatur av $+5^{\circ}\text{C}$. För att åstadkomma denna förhållandevis låga temperatur i laboratoriet byggdes ett särskilt, väl värmeisolerat utrymme enligt FIG. 3, vilket kylades med en kylkompressor. På framsidan hade "kylrummet" en borttagbar värmeisolerad lucka framför ett fönster, genom vilket sandpelartavlan kunde fotograferas under pågående försök, se FIG. 3.

Vid försöken provades ett injekteringsmedel i taget på de tre sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2. Försöksgången var följande:

De vibrerade sandpelarna B 0, B 1 och B 2 monterades med protokolldata, varefter rummet kylades till konstant temperatur $+5^{\circ}\text{C}$. Injekteringsmedel av rätt temperatur och viskositet tillsattes E-kolven, som kopplades till trycktub och sandpelare. Injekteringsmedlet transporterades sedan under avsett tryck till sandpelarna på sådant sätt, att överytan på alla pelarna nåddes praktiskt taget samtidigt.

Injekteringsmedlen var färgade. Protokollföringen skedde med färgfotografering från en på stativ monterad kamera, se FIG. 3. Intervallet mellan bildtagningarna bestämdes av den hastighet, med vilken inträngningen skedde, och så att en kontinuerlig tidskurva skulle erhållas.

1.2.2 Försöksresultat

Samtliga de i denna försöksetapp genomförda sandpelarförsöken har sammanställts i TAB. 2 på ett sådant sätt, att man kan få en uppfattning om vilka faktorer som varierats.

Som framgår av TAB. 2 har huvuddelen av försöken utförts vid tryck 0,01 MPa (= 1 m vp) och $+5^{\circ}\text{C}$. Vissa försök har genomförts vid 0,02 MPa för att kontrollera tidigare slutsatser beträffande tryckberoendet, Bergman et al (1970). Likaså utfördes vissa försök vid $+20^{\circ}\text{C}$, där man för Stabilopox TM 151 avsåg att få anknytning till tidigare försöksserier.

FIG. 4 visar inträngningen hos injekteringsmedlets front som funktion av tiden för epoxihartsen Stabilopox TM 151 vid tryck 0,01 MPa och varierande temperaturer. Resultaten från 1970 års försök vid $+25^{\circ}\text{C}$ har också medtagits för jämförelse. För den grövre sandfraktionen B 2 erhålles praktiskt taget identitet mellan de båda kurvorna för $+20^{\circ}\text{C}$ och $+25^{\circ}\text{C}$. För den finare fraktionen B 1 föreligger god anslutning under inträngningsförloppets första del.

Inträngningshastigheten är för samtliga sandfraktioner ungefär hälften så stor vid $+5^{\circ}\text{C}$ som vid $+20^{\circ}\text{C}$. Eftersom samtidigt preparatets gelningstid ökar med ca 4 ggr, se TAB. 1, hindrar detta dock inte att man kan tänkas uppnå samma inträngningsdjup vid den lägre temperaturen.

För att vinna i tydlighet har de olika inträngningskurvorna i FIG. 4 fasförskjutits i tiden. Detta är ett genomgående fram-

TAB. 2. Sammanställning av inträngningsförsök i 10 mm torra sandpelare med variation av sandfraktioner, injekteringsmedel, tryck och temperatur.

Sandfraktion → Injekterings- medel ↓	B 0 0, 0 - 0, 10 mm			B 1 0, 10 - 0, 15 mm			B 2 0, 15 - 0, 25 mm		
	Tryck MPa			Tryck MPa			Tryck MPa		
	0, 01	0, 02	0, 02	0, 01	0, 02	0, 02	0, 01	0, 01	0, 02
	+5°C	+20°C	+5°C	+5°C	+20°C	+5°C	+5°C	+20°C	+5°C
Stabilopox TM 151	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stabilodur C 14 A	X		X	X	X	X	X	X	X
Stabilodur C 75 1)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mg-Totantin	X		X	X	X	X	X	X	X
Geoplast 70	X		X	X		X	X		
Geoplast 45	X		X	X		X	X		
Vatten	X		X	X		X	X		

1) Försök utfördes även vid +20°C och 0, 02 MPa i samtliga sandfraktioner.

INTRÄNGNING, m m

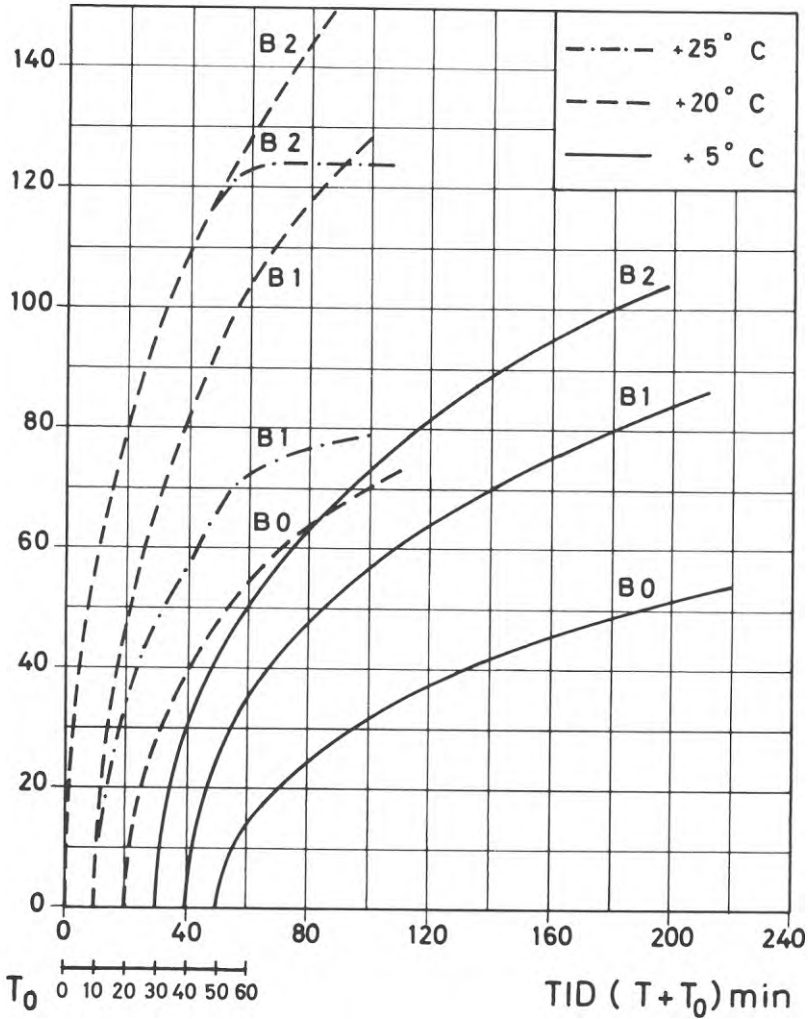


FIG. 4. Inträngning av Stabilopox TM 151 vid 0,01 MPa och varierande temperaturer i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2. Försöken vid +25°C utfördes tidigare, Bergman et al (1970).

Penetration of Stabilopox TM 151 into 10 mm diameter sand columns (dry) at pressure 0,01 MPa and varying temperatures. Sand grades B 0, B 1 and B 2. Tests at +25°C have been reported by Bergman et al (1970).

INTRÄNGNING, mm

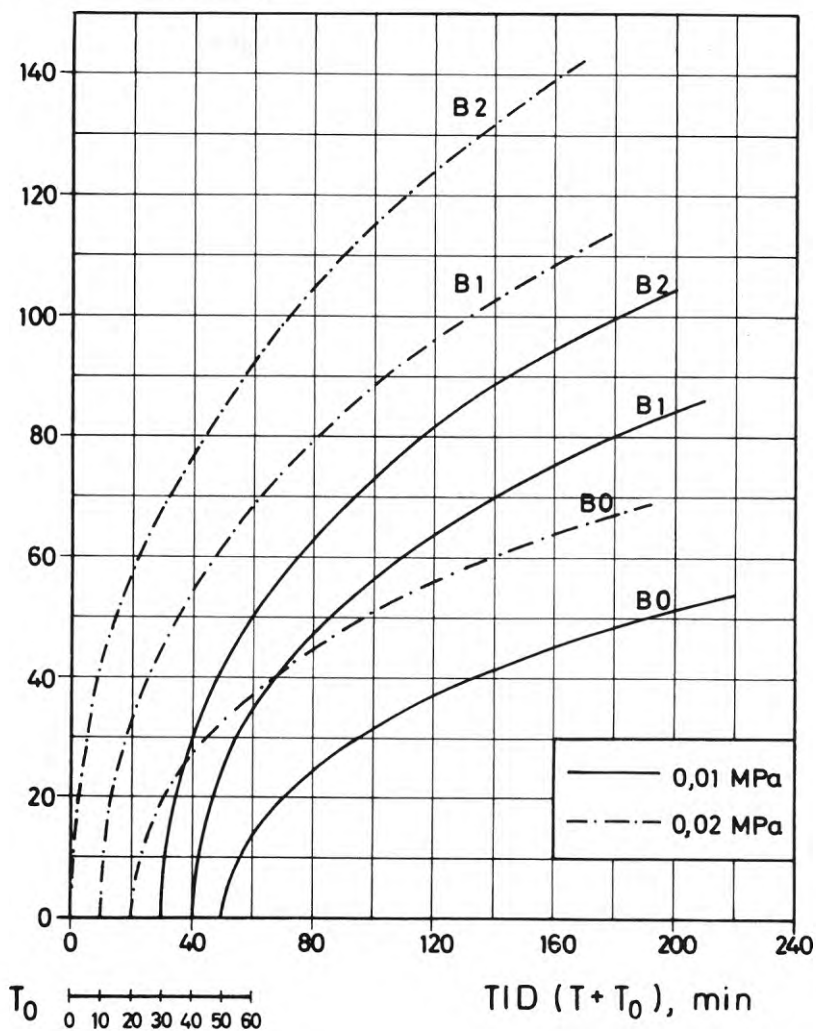


FIG. 5. Inträngning av Stabilopox TM 151 vid +5°C och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.

Penetration of Stabilopox TM 151 at +5°C and pressures 0,01 MPa and 0,02 MPa respectively into 10 mm diameter dry sand columns. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2.

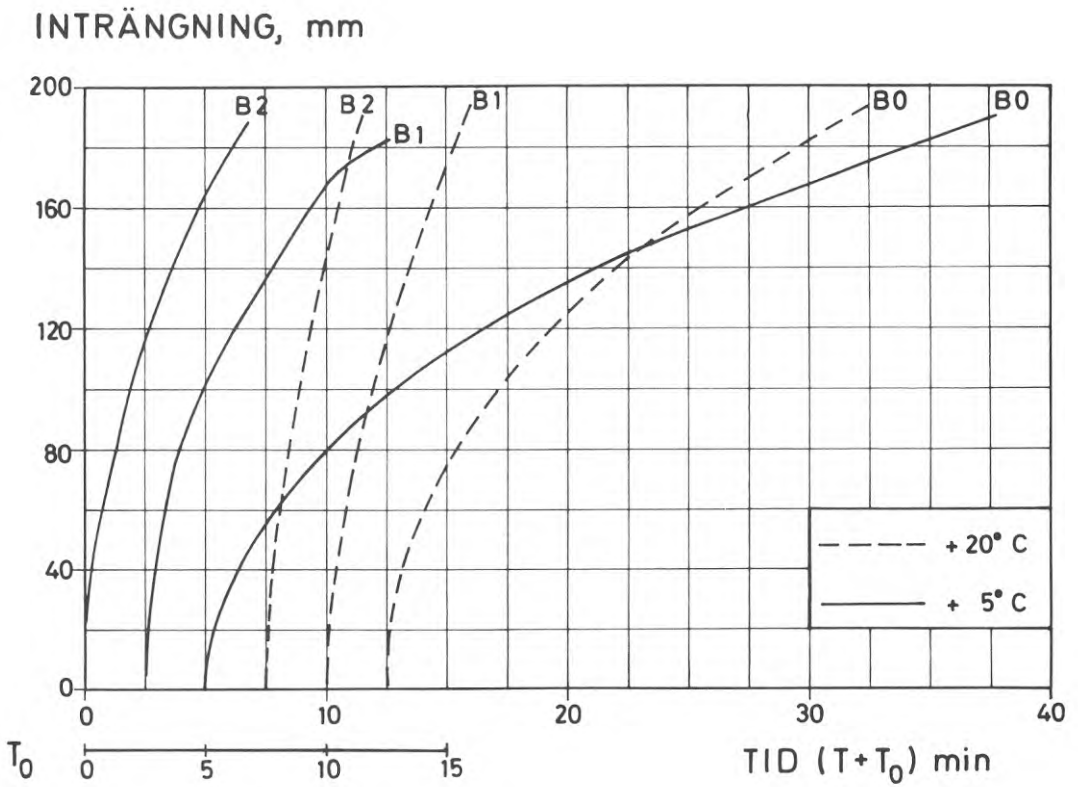


FIG. 6. Inträngning av Stabilodur C 75 vid 0,01 MPa och temperaturer +5°C resp. +20°C i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.

Penetration into 10 mm diameter dry sand columns of Stabilodur C 75 at pressure 0,01 MPa and temperatures +5°C and +20°C respectively. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2.

INTRÄNGNING mm

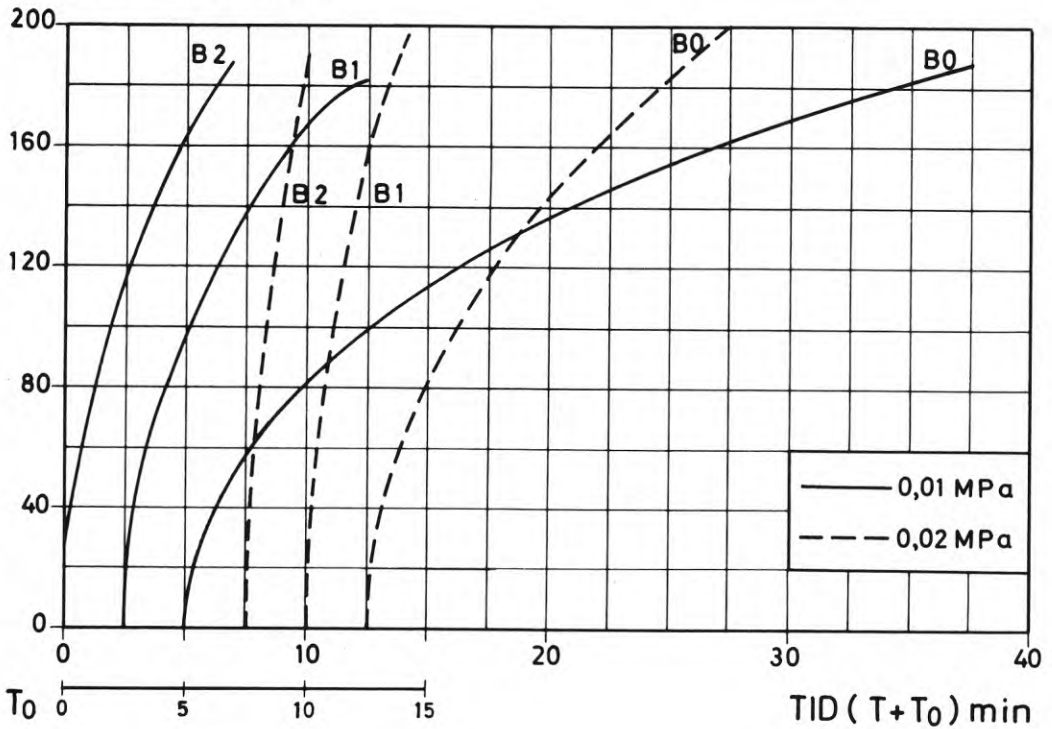


FIG. 7. Inträngning av Stabilodur C 75 vid +5°C och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
Penetration of Stabilodur C 75 at +5°C and pressures 0,01 MPa and 0,02 MPa respectively into 10 mm diameter dry sand columns. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2.

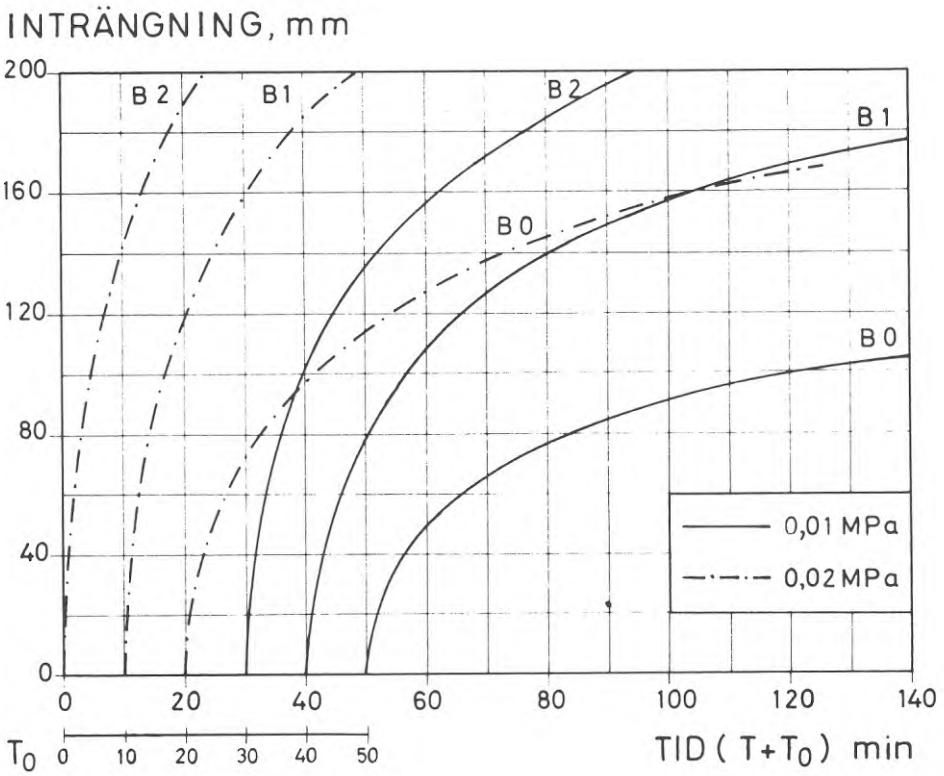


FIG. 8. Inträngning av Mg-Totanin vid +5°C och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2. Se TAB. 2.
Penetration of Mg-Totanin at +5°C and pressures 0,01 MPa and 0,02 MPa respectively into 10 mm diameter dry sand columns. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2.

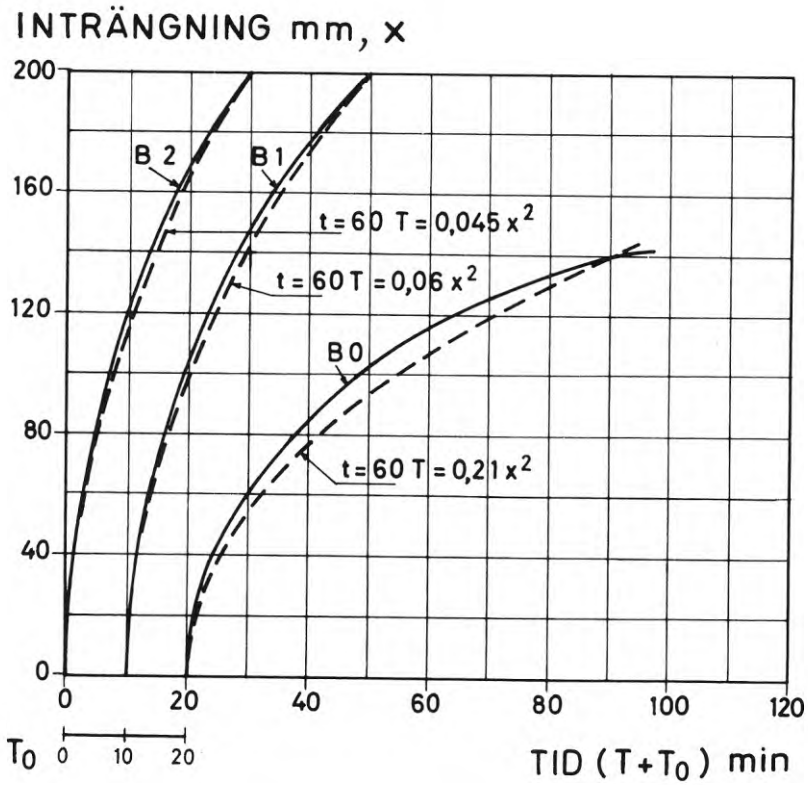


FIG. 9. Inträngning av Geoplast 70 vid $+5^{\circ}\text{C}$ och tryck 0,01 MPa i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2, se TAB. 2. Parabelkurvor har anpassats (t sek., T min.).

Penetration of Geoplast 70 at $+5^{\circ}\text{C}$ and pressure 0,01 MPa into 10 mm diameter dry sand columns. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2. The parabola curves are fitted to the experimental results (t seconds, T minutes).

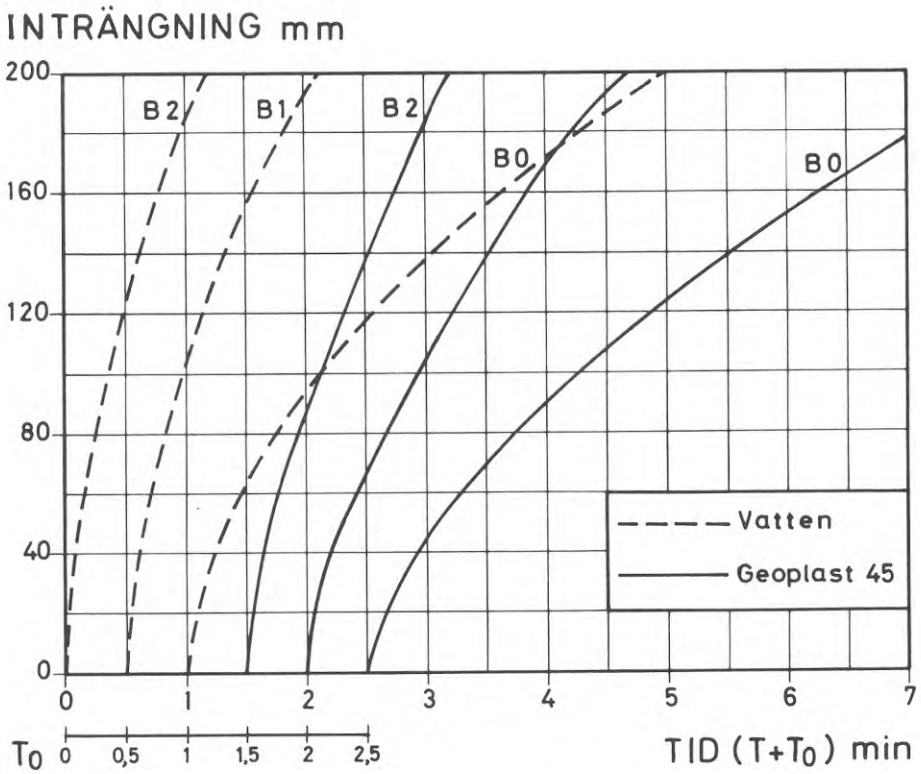


FIG. 10. Inträngning av H₂O och Geoplast 45 vid +5°C och 0,01 MPa tryck i sandfraktionerna B 0, B 1 och B 2.
Penetration of H₂O and Geoplast 45 at +5°C and pressure 0,01 MPa into 10 mm diameter dry sand columns. Sand grades B 0, B 1 and B 2, see TAB. 2.

ställningssätt för sandpelarförsöken.

FIG. 5 visar inträngning av Stabilopox TM 151 vid +5°C och två olika tryck; 0,01 MPa och 0,02 MPa. Inverkan av trycket är påtaglig och likartad under hela inträngningsförloppet. Vid tidigare försök vid rumstemperatur +25°C, Bergman et al (1970), visades inträngningarna stå i relation till varandra ungefär som tredje roten ur tryckförhållandet ($\sqrt[3]{2} = 1,26$). För försöken i FIG. 5 gäller genomsnittsvärden för B 0; 1,3, B 1; 1,32 och B 2; 1,36. För den grövre sandfraktionen B 2 ligger relationen alltså närmare kvadratroten ur tryckförhållandet.

FIG. 6 visar inträngningar, som erhållits med alkalisilikatet Stabilodur C 75 vid temperaturerna +5°C och +20°C. Även här går inträngningen långsammare vid den lägre temperaturen. Skillnaden är för samtliga sandsorter 25 - 30 %.

I FIG. 7 visas resultaten från inträngningsförsök vid 0,01 MPa och 0,02 MPa samt temperatur +5°C med Stabilodur C 75. För samtliga sandfraktioner förhåller sig inträngningarna vid samma tider ungefär som kvadratroten ur tryckförhållandet.

FIG. 8 visar inträngning av cellulosapreparatet Mg-Totanin vid +5°C och trycken 0,01 resp. 0,02 MPa. Inträngningshastigheten är avsevärt lägre än för Stabilodur C 75, se FIG. 7, men eftersom gelningstiden är längre, se TAB. 2, så erhålles relativt stor slutlig inträngning. Inträngningen vid de två trycken förhåller sig vid lika tider ungefär som kvadratroten ur tryckförhållandet för alla sandfraktionerna.

De inträngningskurvor, som erhöles för det karbamidbaserade injekteringsmedlet Geoplast 70 vid +5°C och 0,01 MPa tryck återges i FIG. 9. Man finner att kurvorna är mycket lika de som erhöles för Mg-Totanin men inträngningshastigheten är 20 - 25 % större.

FIG. 10 visar inträngning av dels akrylpreparatet Geoplast 45, dels vatten (H₂O) vid +5°C och tryck 0,01 MPa. Inträngningsförloppen är mycket snabba och nästan affina för respektive sandsorter. Geoplast 45 har en inträngningshastighet som med endast 20 - 30 % underskrider vattnets.

1.2.3 Kommentarer

Tryck

Inträngningens beroende av trycket har undersökts för tre injekteringsmedel: Stabilopox TM 151, Stabilodur C 75 samt Mg-Totanin, se TAB. 2.

För Stabilodur C 75 och Mg-Totanin finner man att inträngningen vid samtliga sandfraktioner vid de undersökta två trycknivåerna 0,01 resp. 0,02 MPa förhåller sig ungefär som kvadratroten ur tryckförhållandet.

För Stabilopox TM 151 är resultaten inte så entydiga. En evaluering som förutsätter ett tredjerotsförhållande bör emellertid inte överskatta inträngningsförmågan vid extrapolation till något högre tryck än de vid försöken använda.

Kornstorlek

För samtliga de undersökta injekteringsmedlen gäller att inträngningen går snabbast och hinner längst i den grövsta sandfraktionen B 2 under i övrigt lika förhållanden i fråga om tryck och temperatur. Den långsammaste och minsta inträngningen erhålles i sandfraktion B 0, som innehåller de finaste partiklarna 0 - 0,1 mm.

Om man jämför inträngningskurvorna för de olika injekteringsmedlen i de tre sandfraktionerna med varandra, så är det påfallande att de uppvisar stora likheter i form och inbördes relationer. Ett närmare studium visar också att relationen mellan inträngningshastigheterna i sandfraktionerna B 2, B 1 och B 0 varierar ganska litet för olika preparat, se TAB. 3.

TAB. 3. Ungefärliga förhållandet mellan inträngningshastigheterna i sandfraktionerna B 2, B 1 och B 0.

Injekteringsmedel	Förhållande mellan inträngningshastigheterna i B 2 ; B 1 ; B 0
Stabilopox TM 151	2 : 1,7 : 1
Stabilodur C 75	2 : 1,7 : 1
Mg-Totanin	2 : 1,6 : 1
Geoplast 70	2 : 1,7 : 1
Geoplast 45	2 : 1,6 : 1

1.3 Inträngning i smala spalter

Vid tidigare redovisade undersökningar, Bergman et al (1970), framtog en apparatur, med vilken man kunde studera olika injekteringsmedels förmåga att tränga fram i smala spalter under injektionstryck upp till 0,1 MPa. De då utförda försöken omfattade dock endast en temperatur, +25°C.

De försök, som här redovisas, har samtliga utförts vid temperatur +5°C vid Hagconsult AB:s laboratorium.

1.3.1 Försöksanordningar

Försöken genomfördes med i princip samma anordningar, som utprovades vid tidigare försök och i detalj beskrivits i Byggforskningens Rapport R45:1970.

De tunna spalterna formas mellan två horisontella planparallella 6 mm tjocka plattor av slipat maskinglas genom distansklotsar \varnothing 10 mm diameter placerade ute i fältet och distans-

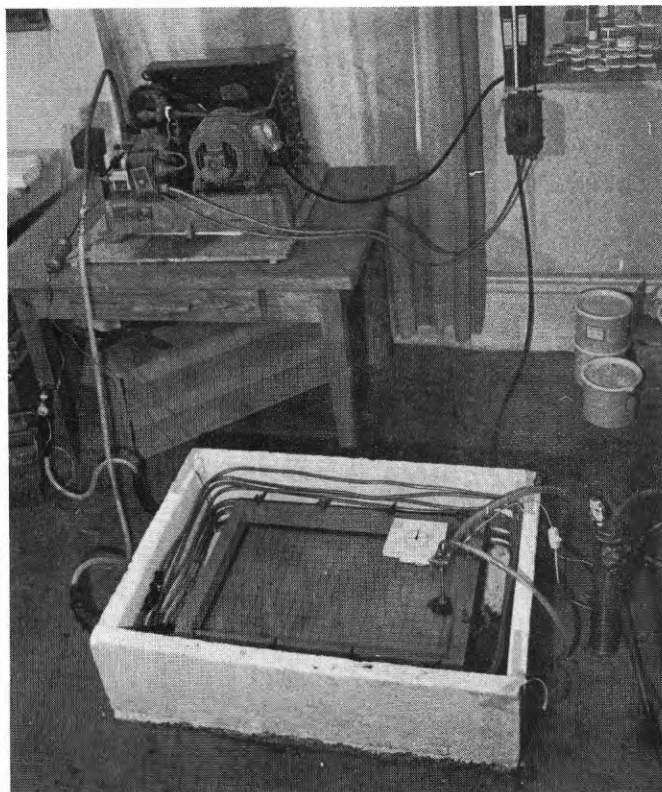


FIG. 11. Anordning för undersökning av injektionsmedels inträngning i smala spalter. Apparaturen iordningställd för injektionsförsök. I bakgrunden kylkompressorn.

Apparatus for testing penetration of injection compounds into narrow slits formed between parallel glass plates. Injection through pipe at right-hand short edge. Penetration front is recorded by colour film. The whole apparatus is placed in refrigeration box to give testing temperature $+5^{\circ}\text{C}$.

bleck längs kanterna. Hela spaltutrymmet har ytan 500 x 650 mm. Injektering sker, som framgår av FIG. 11, genom ett vertikalt rör mitt på ena kortsidan, medan luft kan passera ut vid motsatta kortsidan.

FIG. 11 visar försöksanordningen iordningställd för försök. De två 6 mm glasplattorna, som bildade spalten, stöddes på över- respektive undersidan av vardera en 15 mm glasplatta, vilka behövdes för att upptaga det invändiga trycket från spalten. De skruvtvingar, som användes i tidigare försök för att pressa ihop glasplattorna längs kanterna, hade ersatts med två stabila planhyvlade järnramar. Ramarna pressade ihop glasplattorna medelst vingmutterförsedda, svängbara bultar längs de tätade långsidorna och den tätade kortsidan vid injekteringsröret.

För att kyla ner försöksapparaturen användes en isoleringsbox av 5 cm cellplast (Frigolit). Kylslingor av kopparrör, som anslutits till en kylkompressor, se FIG. 11, monterades längs boxens sidor. Kylmediet var freon.

Omedelbart före ett försök avtogs kylboxens lock, se FIG. 11. Inträngningsförloppet med de färgade injekteringsmedlen filmades ovanifrån med färgfilm mot det under glasskivorna placerade rutnätet. Ett elektriskt synkronur var placerat nära injekteringshålet och igångsattes samtidigt som ventilen till injekteringsledningen öppnades.

Injekteringsmedlet med temperatur $+14 - +18^{\circ}\text{C}$ förvarades i en 1 liters tryckbehållare och trycktes fram med luft från kompressor. Tryckreglering skedde med regleringsventil och manometer, vilket gav en uppskattad maximal felmarginal på $\pm 10\%$.

De använda injekteringsmedlen tillreddes enligt samma recept, som använts vid sandpelarförsöken.

När injekteringsmedlet nått nästan fram till motsatta kortsidan eller då inträngningen avstannat, avbröts försöket. Normaltrycket vid försöken var 0,05 MPa, och endast i ett försök höjdes trycket till 0,1 MPa, då fronten stannat (Stabilopox TM 151). Vid högre tryck än 0,1 MPa böjdes glasplattorna ut så att distansklotsarna släppte, dvs. spaltjockleken förändrades.

1.3.2 Försöksresultat

Försöksmetodikerna är långt ifrån problemfri, och vissa försök har av olika orsaker misslyckats och fått upprepas. TAB. 4 är en sammanställning över samtliga lyckade försök med angivande av injekteringsstryck och använda spaltjocklekar d.

FIG. 12 visar den ur filmerna utvärderade inträngningshastigheten v som funktion av tiden för Stabilopox TM 151. Vid den minsta spaltjockleken $d = 0,05$ mm stannade injekteringsfronten efter ca 200 s vid 90 mm. Efter tryckhöjning från 0,05 MPa till 0,1 MPa fortsatte fronten dock ytterligare ett stycke med något högre hastighet.

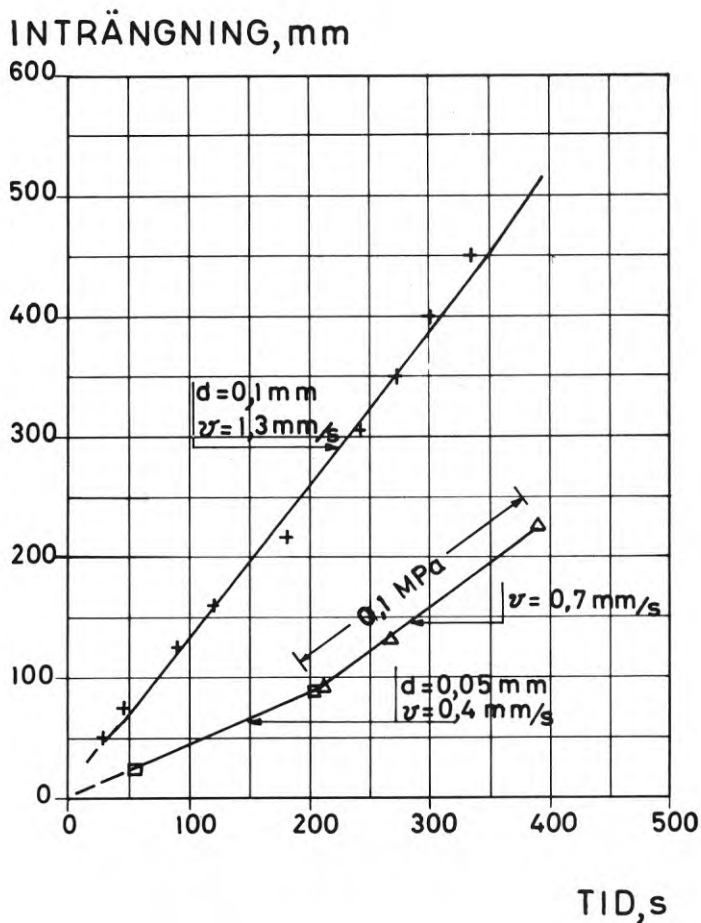


FIG. 12. Inträngning av Stabilopox TM 151 i spalt $d = 0,1$ mm och $d = 0,05$ mm vid $0,05$ MPa och $+5^{\circ}\text{C}$. Tryckhöjning till $0,1$ MPa efter halva injekteringstiden vid $d = 0,05$ mm.

Penetration of Stabilopox TM 151 into gaps $d = 0,1$ mm and $d = 0,05$ mm wide at $0,05$ MPa and $+5^{\circ}\text{C}$. In the case of $d = 0,05$ mm the pressure was increased to $0,1$ MPa after 200 seconds.

TAB. 4. Sammanställning av inträngningsförsök i tunna spalter vid +5°C.

Injekteringsmedel	Injektions-tryck, MPa	Spalttjocklek, d mm		
		0,02	0,05	0,1
Stabilopox TM 151	0,05		X ¹⁾	X
Stabilodur C 14 A	0,05		X	X
Mg-Totantin	0,05		X	X
Geoplast 70	0,05	X	X	
Geoplast 45	0,05	X	X	

1) Även tryck 0,1 MPa sedan fronten stannat.

De nu erhållna inträngningshastigheterna stämmer tämligen väl med de som erhöles för samma preparat vid +25°C i tidigare försök, Bergman et al (1970). För $d = 0,1$ mm erhålles nu $v = 1,3$ mm/s mot tidigare $v = 1,3$ resp. $0,76$ mm/s. För $d = 0,05$ mm är motsvarande mätvärden nu $v = 0,4$ mm/s mot då $v = 0,76$ mm/s.

FIG. 13 visar inträngningsförloppen för Stabilodur C 14 A. De mycket snabba inträngningarna uppvisar ett något oregelbundet förlopp med något större inträngningshastighet under förloppens senare del.

Kurvorna för Mg-Totantin uppvisar ännu tydligare denna tendens, se FIG. 14. Här förekommer den anomalin att man fått mycket lägre inträngningshastighet i den tjockare spalten $d = 0,1$ mm än i den tunnare $d = 0,05$ mm. Förklaringen här till anses vara att Mg-Totantinlösningen i fallet $d = 0,1$ mm stått färdigberedd lång tid, då härdarna tillsattes, vilket kan ha gett helt annan viskositet. Sakläget upptäcktes ej förrän försöksapparaturen monterats ned.

Geoplast 70, FIG. 15, ger en inträngningshastighet av samma storlek som Mg-Totantin. För den smalaste spalten erhöles det tidigare påpekade fenomenet med ökad hastighet under förloppets senare del.

För Geoplast 45 erhöles den snabbaste inträngningen, se FIG. 16. I den tunnaste spalten $d = 0,02$ mm blev egendomligt nog inträngningen till att börja med snabbare än i $d = 0,05$ mm. Det bör emellertid observeras att svårigheterna att hålla väldefinierade försöksbetingelser ökar avsevärt vid dessa små spalttjocklekar.

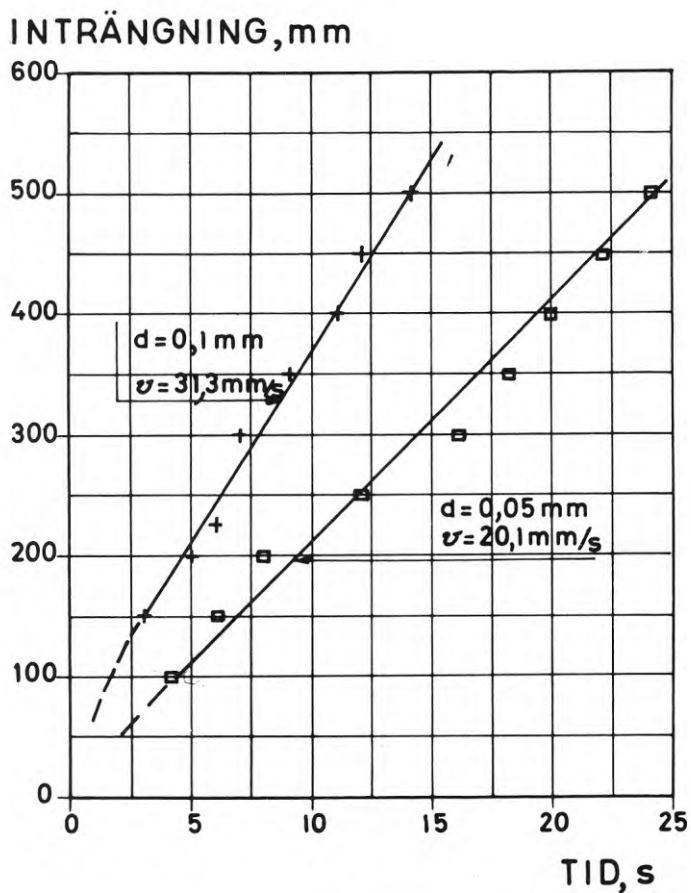


FIG. 13. Inträngning av Stabilodur C 14 A i spalt $d = 0,1$ mm och $d = 0,05$ mm vid $0,05$ MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.
Penetration of Stabilodur C 14 A into gaps $d = 0,1$ mm and $d = 0,05$ mm wide at pressure $0,05$ MPa and $+5^{\circ}\text{C}$.

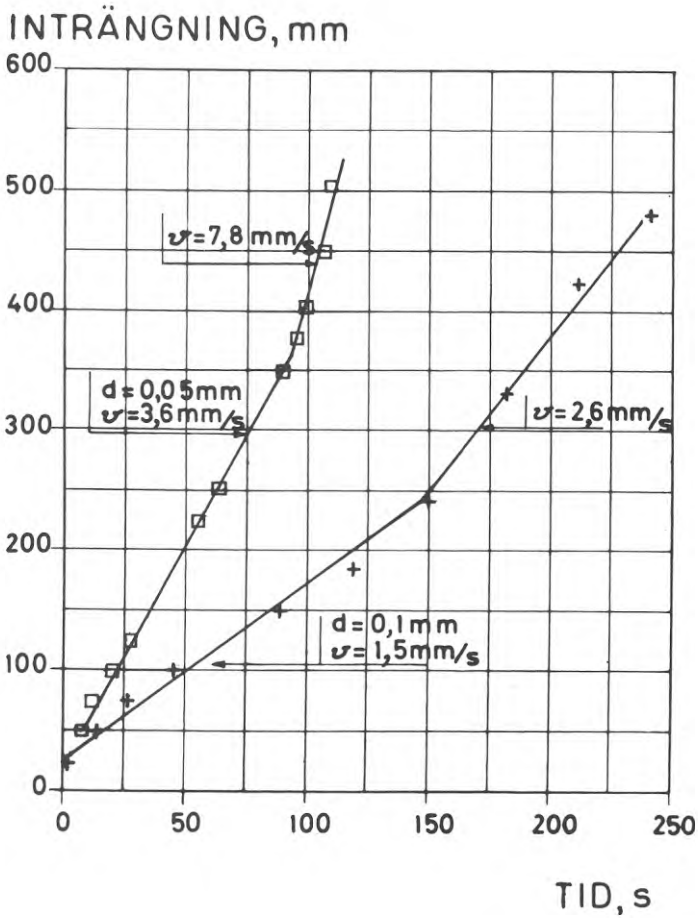


FIG. 14. Inträngning av Mg-Totantin i spalt $d = 0,1 \text{ mm}$ och $d = 0,05 \text{ mm}$ vid $0,05 \text{ MPa}$ och $+5^\circ\text{C}$.
Penetration of Mg-Totantin into gaps $d = 0,1 \text{ mm}$ and $d = 0,05 \text{ mm}$ wide at pressure $0,05 \text{ MPa}$ and $+5^\circ\text{C}$.

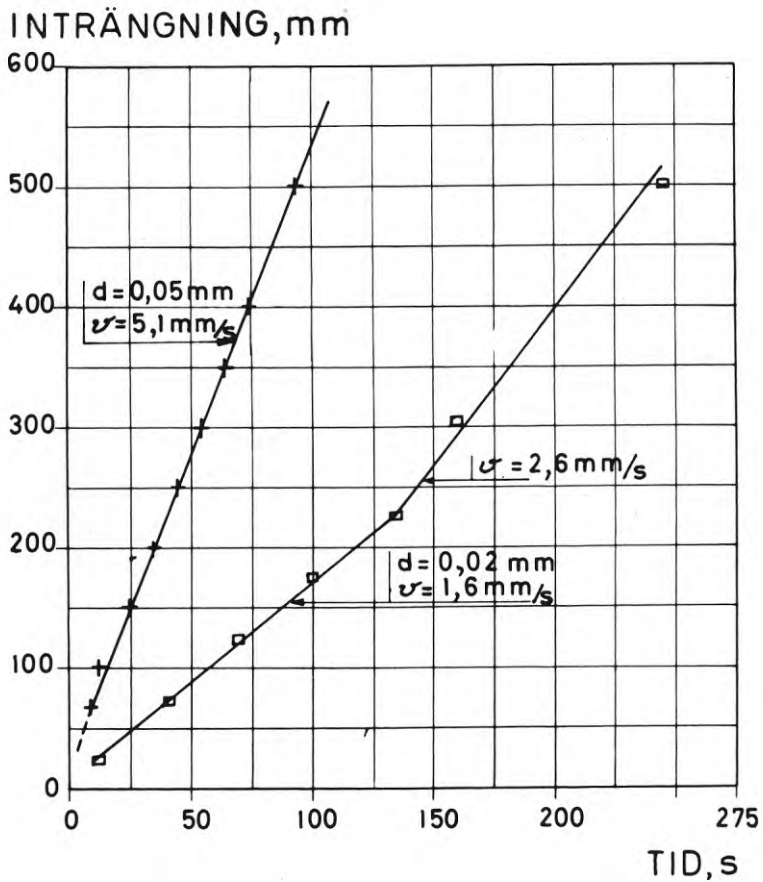


FIG. 15. Inträngning av Geoplast 70 i spalt $d = 0,05 \text{ mm}$ och $0,02 \text{ mm}$ vid $0,05 \text{ MPa}$ och $+5^{\circ}\text{C}$.

Penetration of Geoplast 70 into gaps $d = 0,05 \text{ mm}$ and $d = 0,02 \text{ mm}$ wide at pressure $0,05 \text{ MPa}$ and $+5^{\circ}\text{C}$.

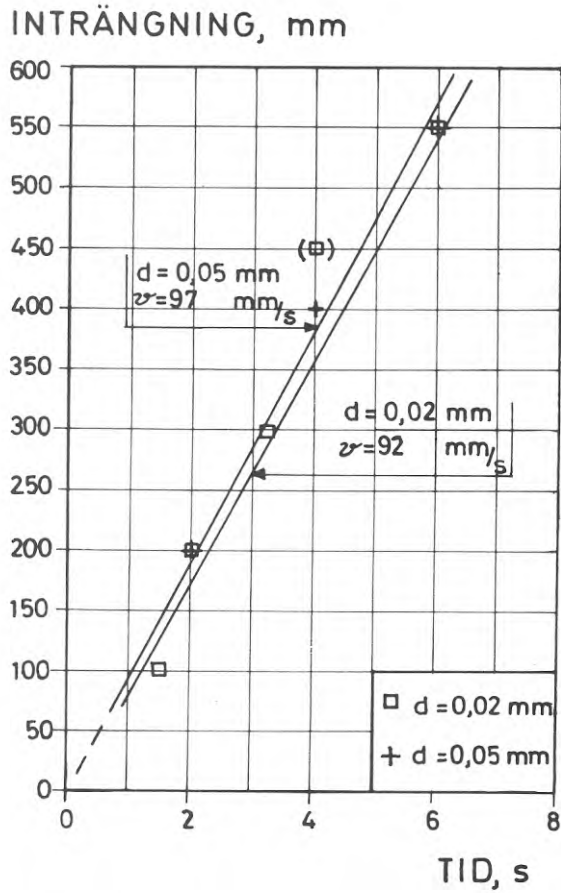


FIG. 16. Inträngning av Geoplast 45 i spalt $d = 0,05$ mm och $d = 0,02$ mm vid $0,05$ MPa och $+5^{\circ}\text{C}$.

Penetration of Geoplast 45 into gaps $d = 0,05$ mm and $d = 0,02$ mm wide at pressure $0,05$ MPa and $+5^{\circ}\text{C}$.

1.3.3 Kommentarer

Spalttjocklek

De spalttjocklekar d , som angivits på FIG. 12 - 16, utgår från distansklotsarnas tjocklek. Mått noggrannheten hos dessa uppskattas till $\pm 0,005$ mm. Klotsarna fästes på plats med en mycket tunn hinna av kiselfett, vars tjocklek också kan uppskattas till ca $0,005$ mm. Med dessa osäkerheter kan alltså den verkliga spalttjockleken ligga mellan $(d + 0,005)$ mm och $(d + 0,015)$ mm.

Det är alltså redan från denna synpunkt förklarligt, att t. ex. försöken med den minsta spalttjockleken $d = 0,02$ mm kan ge överraskande resultat. Den verkliga tjockleken kan - i varje fall lokalt - ha varit $0,035$ mm.

Varierande inträngningshastighet

Vid de tidigare spaltförsöken, Bergman et al (1970), som företogs vid $+25^{\circ}\text{C}$, var det en genomgående tendens att inträngningshastigheten var störst i början och sedan antog ett nära konstant värde. I dessa försök har motsatt fenomen uppträtt i flera fall, se FIG. 13, 14 och 15. Det är möjligt, att fenomenet beror på någon form av "köldchock" när det något varmare injekteringsmedlet ($+14 - 18^{\circ}\text{C}$) kommer i kontakt med de kalla ($+5^{\circ}\text{C}$) glasplattorna.

1.4 Diskussion

1.4.1 Anknytning sandpelar - spaltförsök

I Byggeforskningens rapport R45:1970 redovisades en modell för att anknyta de inträngningshastigheter, som erhållits i sandpelarförsök, till resultaten från spaltförsöken. Detta skedde genom att uppskatta en "fiktiv spalttjocklek" d_f för de olika sandfraktionerna.

För sandfraktionerna B 1 och B 2 med ett snävt fraktionsintervall, jfr avsnitt 1.2, beräknades följande fiktiva spalttjocklekar d_f :

$$\text{B 1} \quad \text{—} \quad d_f = 0,019 \text{ mm}$$

$$\text{B 2} \quad \text{—} \quad d_f = 0,03 \text{ mm.}$$

Den vid dessa försök därutöver använda sandtypen B 0 med fraktioner från 0 till 1 mm har enligt siktkurva en medelstorlek på kornen av ca $0,08$ mm, Bergman et al (1970). Huvuddelen av sandmängden har nämligen kornstorlek mellan $0,06$ och $0,1$ mm. Om vi använder denna medelstorlek som utgångsvärde D_m får vi för

$$\text{B 0} \quad \text{—} \quad d_f = 0,15 \cdot 0,08 = 0,012 \text{ mm.}$$

Sandpelarförsöken utfördes vid trycken 0,01 resp. 0,02 MPa medan spaltförsöken utförts vid 0,05 MPa tryck. Vid omräkningen av sandpelarförsöken till spaltrepresentation har för Stabilopox TM 151, Stabilodur C 14 A, Geoplast 70 och Geoplast 45 antagits att inträngningshastigheten beror av trycket som tredje roten ur tryckförhållandet, vilket möjligen innebär en viss underskattning av inträngningen, jfr 1.2.3. För Mg-Totanin och Stabilodur C 75 har försöken givit anledning räkna med kvadratrotsförhållande.

Inträngningshastigheten i sandpelarförsöken har beräknats som medelhastigheten under den tid, som för respektive injekteringsmedel använts för spaltförsöken.

1.4.2 Inträngningshastighet - spalttjocklek

I FIG. 17 - 19 har resultaten från spaltförsöken och de från sandpelarförsöken omräknade resultaten framställt på sådant sätt att inträngningshastigheten v redovisas som funktion av spalttjockleken d i dubbel logaritmiska diagram. Figurerna har kompletterats med vissa resultat från den tidigare undersökningen, Bergman et al (1970), i vad avser Stabilopox TM 151, cement och bentonit.

Liksom i den tidigare undersökningen finner man även här att spridningen för varje enskilt injekteringsmedel är stor. De på FIG. 17 - 19 inskisserade spridningsbanden spänner över faktorer på 3 till 5, varvid spridningen tenderar att öka för de snabbaste injekteringsmedlen. Med hänsyn till svårigheterna att få väldefinierade och reproducerbara förutsättningar med de förhållandevis enkla försöksanordningar, som använts, får spridningen anses rimlig och acceptabel.

En viss del av den redovisade spridningen kan bero på osäkerheter i det använda omräkningsförfarandet från sandpelar - till spaltförsök. Framför allt gäller detta Geoplast 70 och Geoplast 45, där försöksunderlag för tryckberoendet inte framtagits utan tredjerotsförhållandet använts för att vara på säkra sidan.

Med dessa reservationer förefaller den i FIG. 17 - 19 använda redovisningsformen dels tämligen väl beskriva och sammanfatta de erhållna resultaten, dels också ge underlag för en jämförelse mellan de olika injekteringsmedlen i vad gäller inträngningsegenskaper under injekteringsförloppets tidigaste skede, då viskositeten är lägst. I FIG. 20 har resultaten från FIG. 17 - 19 schematiskt sammanställts som medelvärden från spridningsbanden för samtliga injekteringsmedel.

Rent översiktligt visar FIG. 20 att samtliga de undersökta "kemiska injekteringsmedlen" täcker det spalttjockleksområde från 0,01 till 0,1 - 0,4 mm, som bentonit och cement inte har möjlighet att tränga in i. För samtliga kem-medel är den undre gränsen 0,01 mm endast försöksteknisk. Försöken ger anledning förmoda att ännu tunnare spalter kan injekteras med samtliga medel.

Om man jämför FIG. 20 med FIG. 1, som visar de olika injekteringsmedlens dynamiska viskositet, så finner man att begynnelseviskositeten i stort speglar de olika injekteringsmedlens

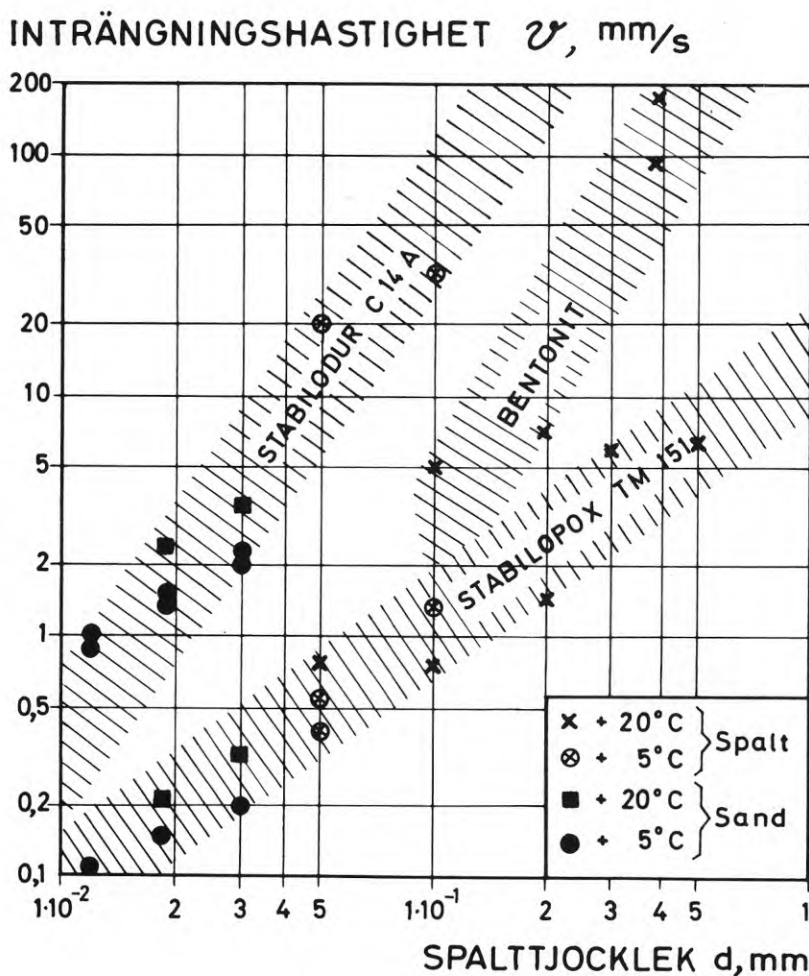


FIG. 17. Inträngningshastighet v som funktion av spalttjocklek d för Bentonit, Stabilopox TM 151 och Stabilodur C 14 A vid tryck 0,05 MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltbredd, se avsnitt 1.4.

Penetration velocity v as a function of gap width d for Bentonit, Stabilopox TM 151 and Stabilodur C 14 A at pressure 0,05 MPa. Results from the sand column tests have been converted into gap width according to principles outlined in Section 1.4.

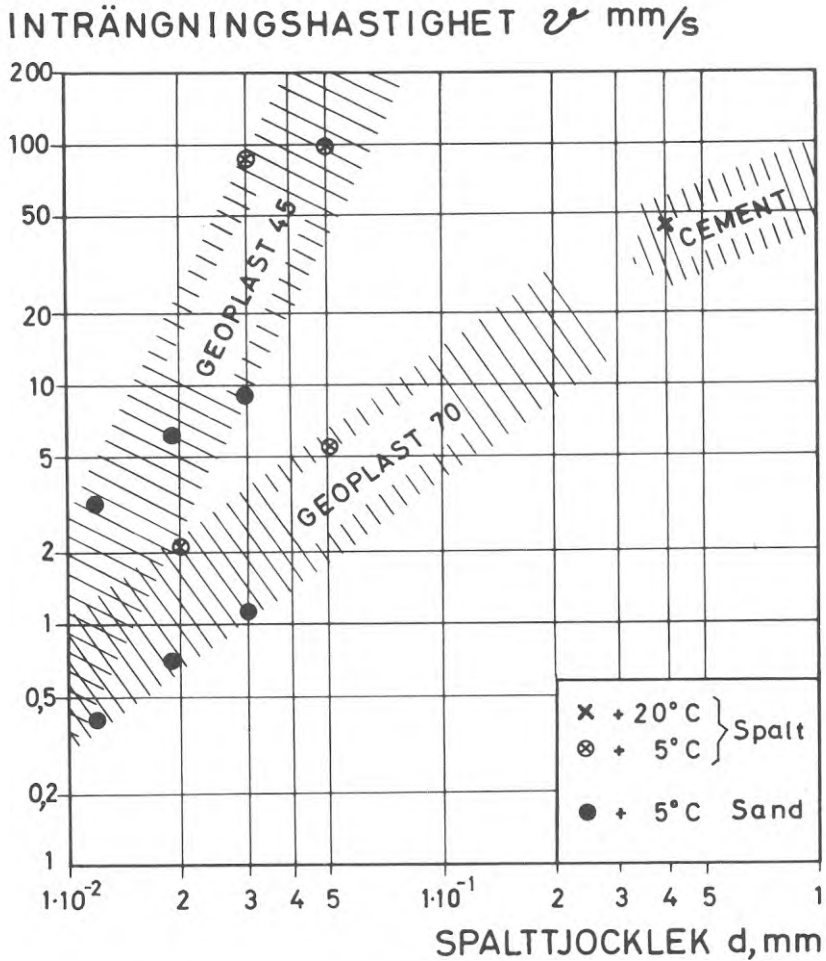


FIG. 18. Inträngningshastighet v som funktion av spalttjocklek d för Geoplast 45, Geoplast 70 och cement vid tryck 0,05 MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltbredd, se avsnitt 1.4.1.

Penetration velocity v as a function of gap width d for Geoplast 45, Geoplast 70 and cement at pressure 0,05 MPa. Results from the sand column tests have been converted into gap width according to principles outlined in Section 1.4.1.

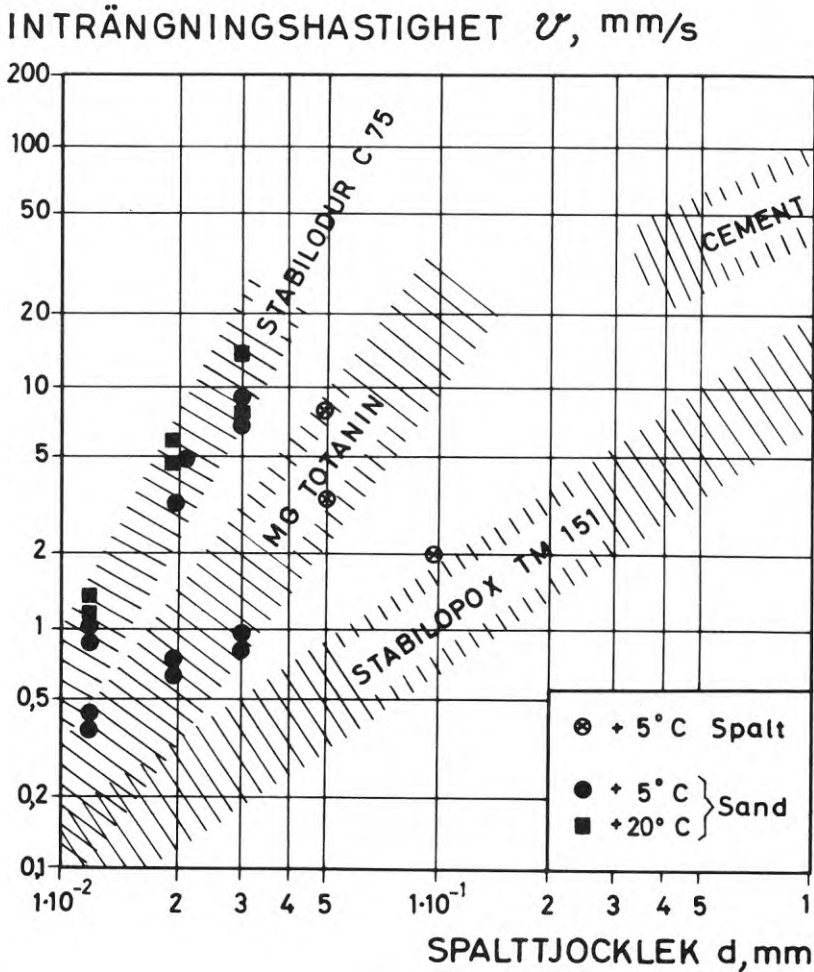


FIG. 19. Inträngningshastighet v som funktion av spaltjocklek d för Mg-Totantin, Stabilopox TM 151, Stabilodur C 75 och cement vid tryck 0,05 MPa. Resultat från sandpelarförsöken har omräknats till spaltjocklek, se avsnitt 1.4.

Penetration velocity v as a function of gap width d for Mg-Totantin, Stabilopox TM 151, Stabilodur C 75 and cement at pressure 0,05 MPa. Results from the sand column tests have been converted into gap width according to the principles outlined in Section 1.4.

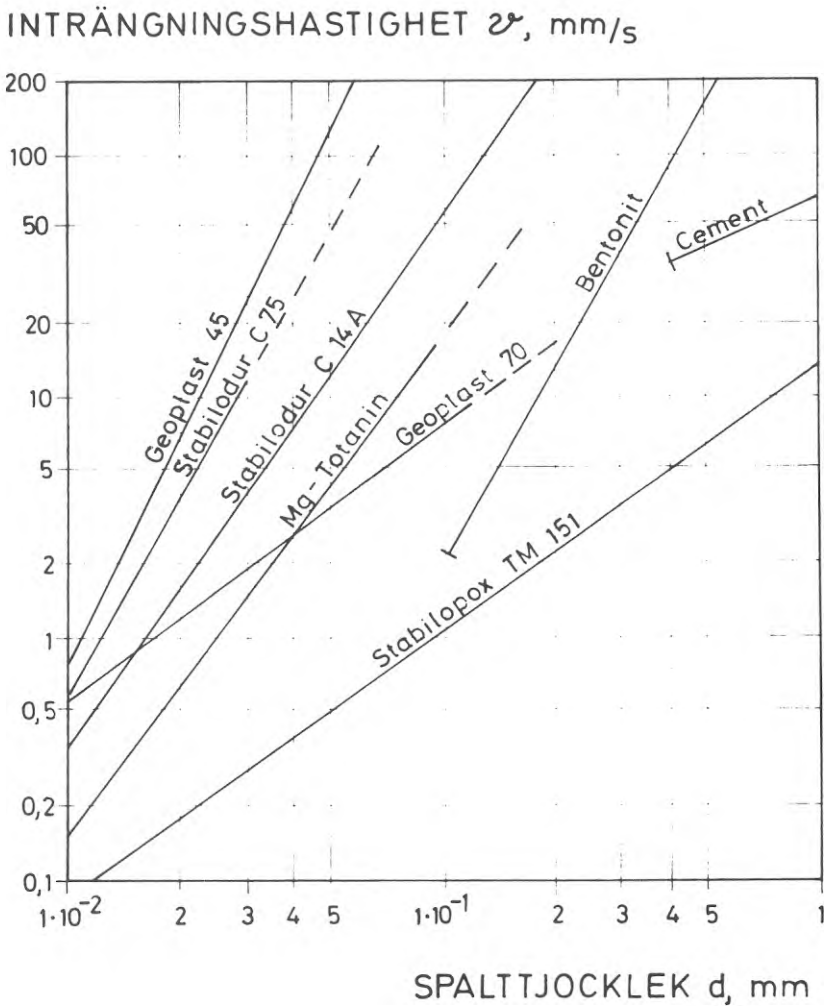


FIG. 20. Inträngningshastighet som funktion av spalttjocklek - sammanställning av resultat från nu undersökta injektionsmedel samt cement och Bentonit (Bergman et al (1970). Tryck 0,05 MPa.

Penetration velocity as a function of the gap width. Results for all injection compounds tested plus for cement and Bentonite according to earlier tests. Bergman et al (1970). Pressure 0,05 MPa.

inbördes inträngningsförmåga. Viskositeten är emellertid inte ensamt avgörande faktor, vilket framgår av bl.a. Geoplast 70 och Stabilopox TM 151. Dessa uppvisar särskilt vid mycket tunna spalter en inträngningsförmåga, som avtager mycket saktare med spaltjockleken än som är fallet för medel med långt lägre viskositet. Det är troligt att Stabilopox TM 151 och Geoplast 70 har hög ytaktivitet, vilket kan ge en förmåga att nästan utan påliggande tryck "våta sig fram" genom mycket tunna spalter trots att viskositeten inte är extremt låg. För Stabilopox noterades detta fenomen redan vid den tidigare undersökningen 1970.

1.4.3 Temperatur

För två av injekteringsmedlen, Stabilopox TM 151 och Stabilodur C 14 A, kan jämförelse göras mellan egenskaperna vid +20°C och +5°C, FIG. 1, 4 och 6. Den lägre temperaturen ger i båda fallen högre viskositet, vilket återspeglar sig i något långsammare inträngningshastighet. Eftersom samtidigt gelningstiden ökar, behöver den slutliga inträngningen dock inte avsevärt understiga den som erhålls vid högre temperatur.

Jämfört med andra spridningsorsaker ger temperaturdifferensen så måttliga utslag att hänsyn härtill inte tagits vid sammanställningarna i FIG. 17 - 20.

Vid vissa av spaltförsöken, där injekteringsmedlet hade något högre temperatur än spaltväggarna, observerades först en lägre och sedan en högre inträngningshastighet. Om detta fenomen beror på någon form av "köldchock", så bör man kanske undersöka om det finns gränsvärden på temperaturdifferensen, där injekteringsmöjligheterna avsevärt försvåras eller stoppas.

2 INJEKTERINGSFÖRSÖK I TUNNEL

Ett delmål i den nu redovisade undersökningen var att genomföra ett injekteringsförsök i tunnel i "halvstor" skala med några av de i laboratorium provade "kemiska" medlen. Begränsningen till halvstor skala och endast några preparat föranleddes av den ekonomiska ramen, som trots detta kom att överskridas.

På lämplig försökstunnel ställdes följande krav:

- a) Tvärsnittsarea högst 8 m^2 .
- b) Bergmassan skall vara genomsatt av medelfina och fina sprickor, som till huvuddel ligger under gränsen för cementinjekteringsens möjligheter att täta, dvs. sprickvidd $< 0,5 \text{ mm}$.
- c) Tunneln skall stå under betryggande grundvattentryck, vars storlek inte nämnvärt påverkas av inläckaget i tunneln.
- d) Tunneln skall helt ostört kunna disponeras för en tid av minst 6 månader.

Som omnämmts i förordet behövde mycket långvariga rekognosceringar genomföras, innan vi fick tag på en försökssträcka, som uppfyllde dessa krav.

2.1 Beskrivning av tunneln

Den för försöken disponerade tunnelsträckan var en del av avloppssystemet i Himmerfjärdsprojektet i Salem. Tunneln, som var försedd med en bottenbeklådning av betong, s.k. "vagga", och var delbesiktigad, fick disponeras under begärda sex månader under förutsättning att den efter försöken återställdes i skick som före försöken (så när som på injekteringsresultatet).

Två angränsande försökssträckor, A och B, om vardera 10 m längd utvaldes genom okulärbesiktning. Inläckningen på resp. sträcka bedömdes vara av sådan storleksordning och det synliga spricksystemet vara av sådan karaktär, att motåtgärder med konventionell cementinjektering kunde bedömas som verkningslösa.

Försökssträckan låg ca 35 - 40 m under grundvattenytan och hade en lutning på $1 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ mot söder.

Tunnelns teoretiska area var $6,07 \text{ m}^2$ (ca $3 \times 2 \text{ m}$), men den verkliga arean var givetvis något större.

Bergarten på försökssträckan består av en tät, bandad rödgrå slirgnejs genomsatt av relativt smala pegmatitgångar. FIG. 21 visar ett karaktäristiskt parti, där man ser såväl den bandade slirgnejsen och pegmatitgångarna som ett exempel på de smala skölar, som förekom på vissa partier, se FIG. 23 och 24.

Hagconsult AB utförde en noggrann sprick- och läckagekartering av försökssträckorna A och B. Använda beteckningar redovisas på FIG. 22 och karteringsresultatet på FIG. 23 och 24.



FIG. 21. Vägparti av försökstunneln, som visar den sliriga bandade gnejsen genomsatt av pegmatitgångar och bruten av skölar och glidytor.

View of test tunnel wall showing the folded layered gneiss interspersed by pegmatite veins and broken by shear zones and faults.

Man ser att sprickbilden är tämligen likartad på de två delsträckorna. Det mest vattenförande partiet låg på provsträcka B:s tak och östra vägg i anslutning till korsande lerskölur, FIG. 24. På provsträcka A uppträdde inläckning huvudsakligen i den centralt belägna sprickzonen, FIG. 23.

I de mest framträdande sprickzonerna mättes sprickornas vidd. Samtliga ofyllda sprickor var mycket tunna med bredd 0,05-0,5 mm, vilket bestyrkte den ursprungliga bedömningen att cementinjektering skulle varit verkningslös, jfr Bergman et al (1970).

2.2 Försökens uppläggning

2.2.1 Försöksprogram

Diskussionerna om försökens uppläggning koncentrerades först till frågan om det var meningsfullt att injektera hela tunnelns omkrets, dvs. även botten. Den enda praktiska möjligheten att mäta injekteringsens effekt befanns vara att mäta den totala inläckningen på resp. provsträcka under visst tidsintervall. Om botten då också skulle omfattas av provningen, måste betongvaggan bilas bort och mycket omfattande, tekniskt svåra och dyrbara åtgärder vidtagas för vattenuppsamling och mätning.

Eftersom det ringa läckaget gjorde troligt att tunneln i sin helhet stod under nära konstant grundvattentryck, dvs. inte hade förorsakat någon dränering som översteg grundvattentillflödet, borde man uppnå undersökningens syfte lika väl genom att endast prova väggar och tak. Härigenom kunde också den färdigjutna betongvaggan utnyttjas för mätdammar.

Försöken skulle inledas med att skaffa utgångsvärden beträffande inläckaget i den icke åtgärdade tunneln. Före och under försöken skulle den lokala nederbörden registreras.

Innan injekteringsarna påbörjades, skulle i fyra 10 m långa borrhål T 1 - T 4, se FIG. 25, grundvattentrycket kontrolleras. En skärm eller ridå av fyra 5 m långa borrhål R 1 - R 4, se FIG. 25, skulle borrar i begränsningslinjen mellan sträcka A och sträcka B. Ridån skulle hindra injekteringsmedlen från att tränga in på angränsande försökssträcka, samtidigt som de kunde indikera att injekteringen nått gränsen mellan provsträckorna.

Hagconsult AB och Stabilator AB skulle injektera var sin försökssträcka med något av de i laboratorium provade injekteringsmedlen. Vardera företaget skulle tillhandahålla en arbetsledare och en arbetare samt vid behov erforderlig expertis.

Resultatet av injekteringen skulle värderas genom att det totala inläckaget på respektive provsträcka mättes och jämfördes med utgångsvärdena.

Om så ansågs motiverat, kunde ytterligare en injekteringsomgång genomföras och dess resultat utvärderas.

Man skulle i samband med proven också undersöka om injekteringsens effekt lät sig studeras och bedömas genom vattenförlostmätningar i och borrhålskikarundersökning av upptagna prov-

GEOLOGI

SKÖL	LERFYLLD	L	V	SPRICKA	MED	FUKT	
"	BIOTIT; Klorit	K	VV	"	"	VATTENDROPP	FÖRE INJEK- TERING
"	KALCIT	C	VVV	"	"	RINNANDE VATTEN	
"	FÄLTSPAT	F					
"	KVARTS	Q					
	UTPRÄGLAD SKIVIGHET I GNEJSEN						
—	5 mm SPRICKVIDD ANGIVEN						

PLAN

	50°	SPRICKA	MED	STUPNINGSANGIVELSE
	.	VERTIKAL	SPRICKA	

SEKTION

	N 310°	SPRICKA	MED	STRYKNINGS- OCH
	50° SE	STUPNINGSANGIVELSE		

INJEKTERING

	KARTERAD	INJEKTERING
	SYSTEMATISK	INJEKTERING etapp I
	— " —	— " — etapp II

FIG. 22. Beteckningar använda vid sprick- och läckagekartering, FIG. 23, 24, 32 och 33.

Notations used in maps of fissures and leakage points, FIGS. 23, 24, 32 and 33.

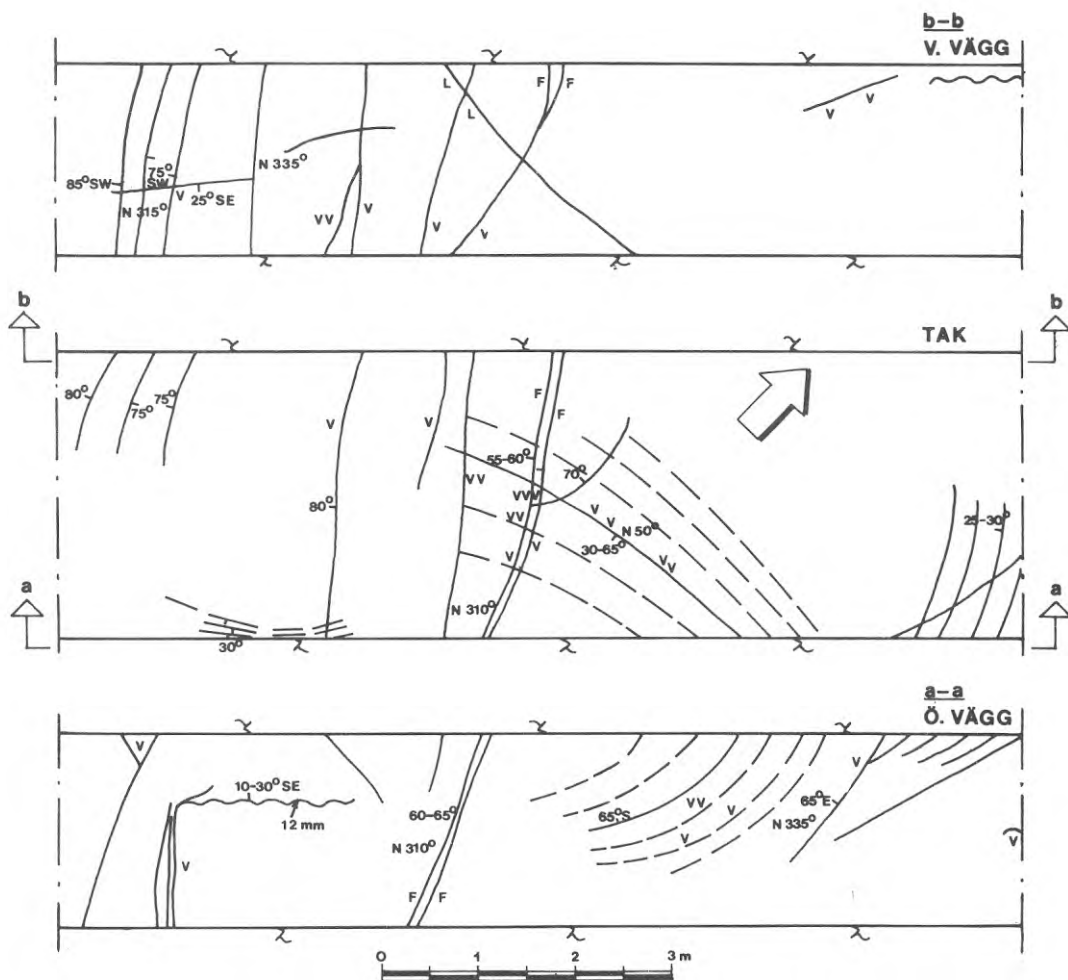


FIG. 23. Sprick- och läckagekartering av mätsträcka A. Beteckningarnas betydelse framgår av FIG. 22.

Map of fissures and leakage points of the test section A before the tests were started. Notations are defined in FIG. 22.

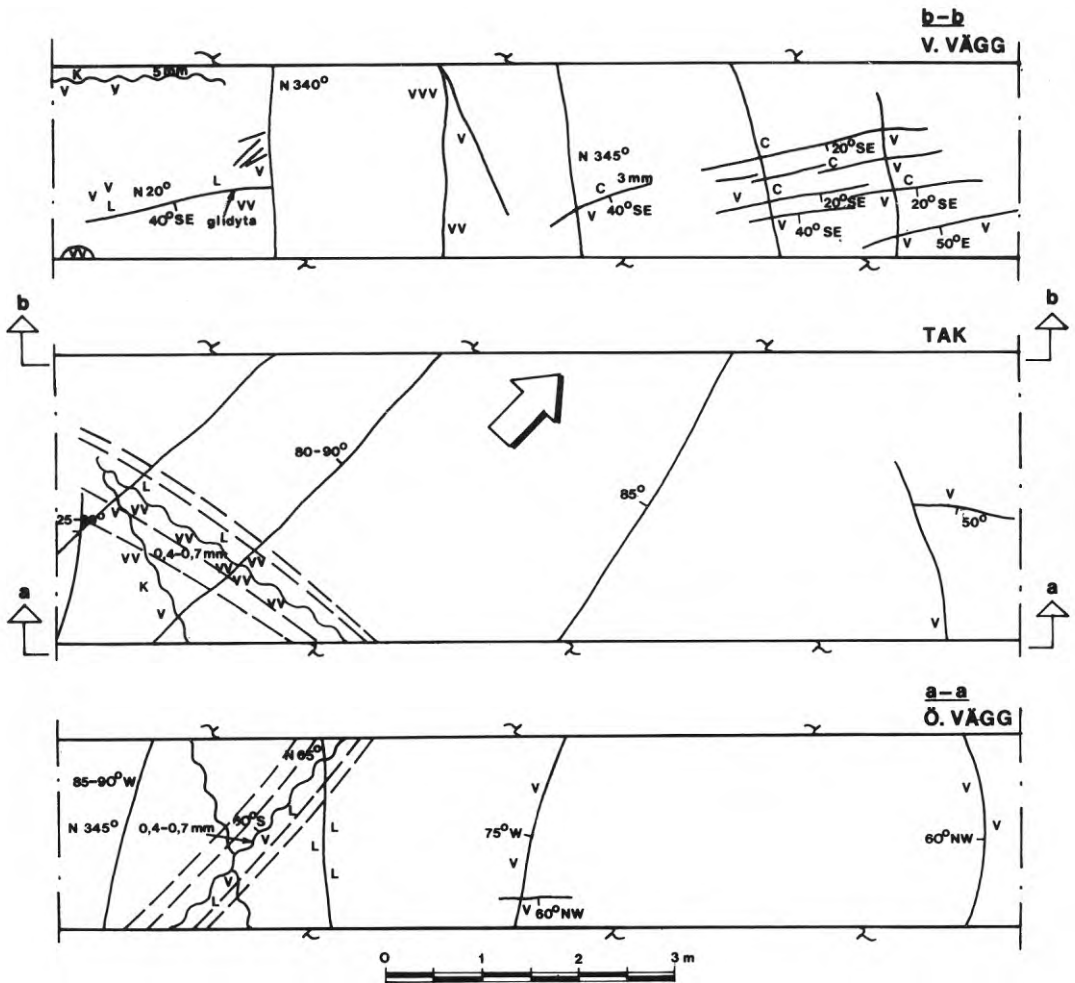


FIG. 24. Sprick- och läckagekartering före försöken av mätsträcka B. Beteckningarnas betydelse framgår av FIG. 22.

Map of fissures and leakage points of the test section B before the tests were started. Notations are defined in FIG. 22.

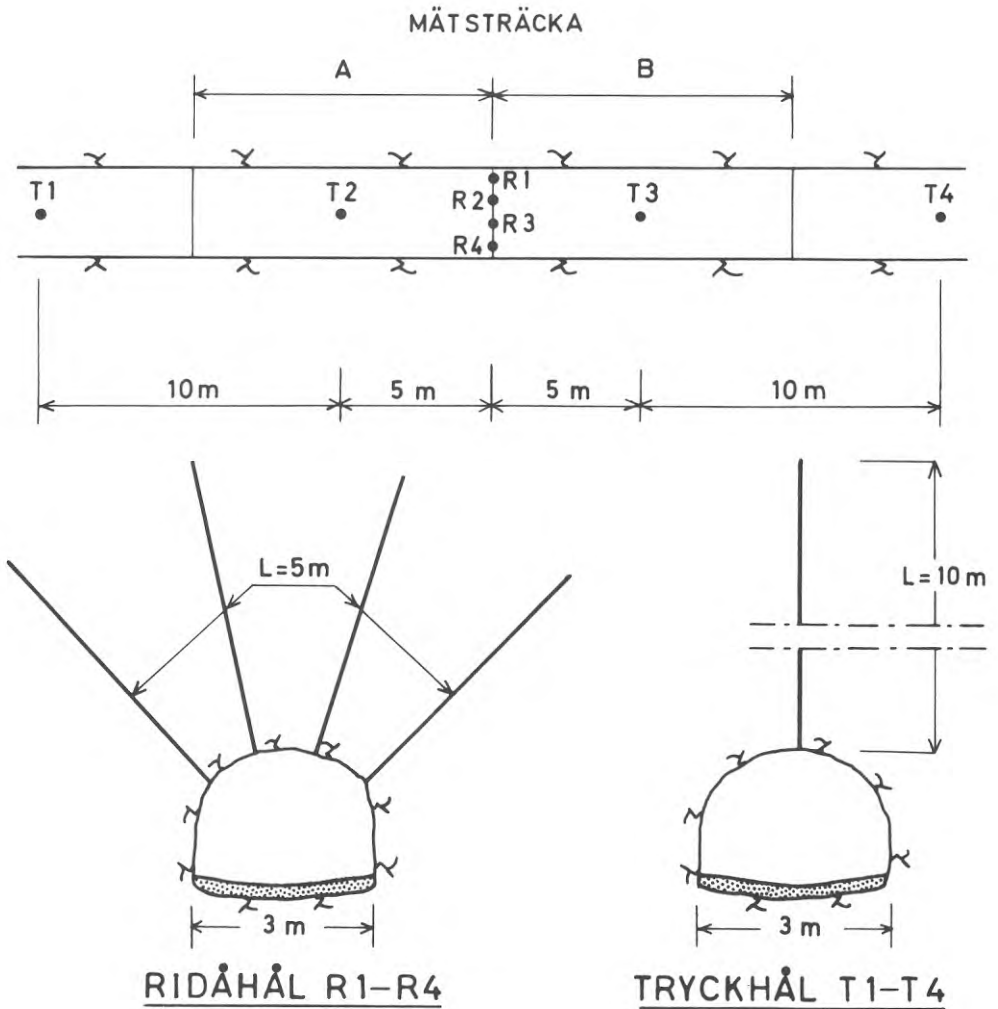


FIG. 25. Placering av ridåhål R 1 - R 4 för att åtskilja provsträckorna A och B. Borrhålen T 1 - T 4 avsåg att bestämma påliggande grundvattentryck.

The drill holes R 1 - R 4 form a curtain that separates the test stretches A and B. Drill holes T 1 - T 4 were used to measure the actual ground water pressure.

borrhål i injekterad bergmassa.

2.2.2 Försöksanordningar

På försökssträckorna A och B anordnades mätdammar på sätt som framgår av FIG. 26. Över betongväggen lades 12 mm Plyfa-plattor med stöd på mitten. Längs väggarna lades på plattorna en grussträng och ovanpå denna gjöts en till bergväggen anslutande betongkant, vars översida behandlades med epoxi, så att den fick fullgod tätning mot bergväggen.

I längdled begränsades de två dammarna av 2" x 6" avstängare. Dammarnas tätning utgjordes av butylduk, som längs sidorna var så anordnad att allt från väggarna kommande vatten rann fritt ned i dammen, se detalj i FIG. 26.

FIG. 27 ger en totalvy av de två mätdammarna A och B med en gångbar spång längs ena sidan.

Det inläckande vattnet på de två mätsträckorna mättes automatiskt enligt den metod, som schematiskt visas i FIG. 28. I vardera dammen monterades två spetselektroder med spetsarna på två nivåer på 10 mm avstånd, se även FIG. 29. En liten dränkbar pump var så kopplad, att den sattes igång och pumpade bort vatten från dammen via en slang, då vattnet nådde den övre elektroden. Pumpen arbetade sedan tills vattennivån släppt den undre elektrodspetsen, då strömmen bröts. Den elektriska delen av nivåmätaren var transistoriserad och av typ Deber 2021 B.

Det bortpumpade vattnet avlevererades i en öppen tratt, varifrån det med självtryck på ca 1 m fick passera en ringkolvvattenmätare, se FIG. 28, 29 och 30.

Med denna anordning tilläts alltså vattenytan att fluktuera inom 10 mm och någon tömning av dammarna skedde inte under en mätperiod, då vattenmätarna avlästes med ca en veckas mellanrum.

Mätutrustningen tillhandahölls av Hagconsult AB.

För att i enlighet med dispositionsvillkoren tillvarataga borrhax, cementslam och eventuellt överflödigt injekteringsmedel byggdes två sedimentationsbassänger ca 100 m nedanför mätdammarna på sätt som visas i FIG. 26.

Läckvatten, som ansamlades i avloppstunneln "uppströms" mätdammarna, kunde med det använda utförandet passera obehindrat under dammarna.

2.3 Förberedande mätningar

Mätdammar och mätutrustning var klara för den första mätperioden 1973.07.03. Under en tid av ca 7 veckor skedde avläsningar med ca en veckas mellanrum.

För att kontrollera om kompensation behövde göras för avdunstning från bergväggarna och från mätdammarnas yta mättes dessutom relativ luftfuktighet och temperatur inne i tun-

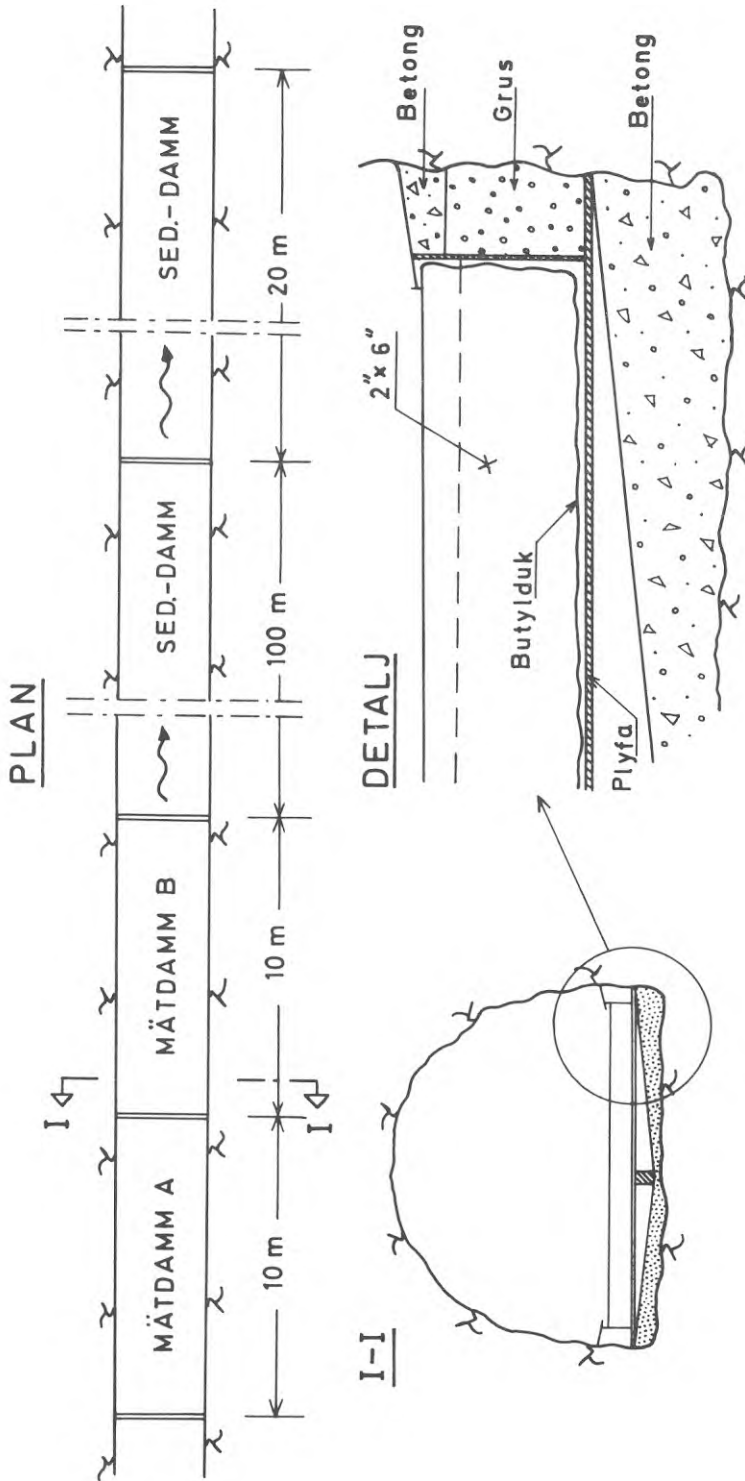


FIG. 26. Skiss över mät- och sedimentationsbassänger i försöksstunneln.
 Leakage dams A and B and sedimentation dams.
 Plan and sections.



FIG. 27. Vy av försökstunneln med mätdammar arrangerade för läckagemätning. Pumpar och spets elektroder var placerade mellan damm A och damm B.

View of test tunnel with water dams arranged for measuring leakage. The pumps and their regulating point electrodes were placed near the bridge between dam A and dam B.

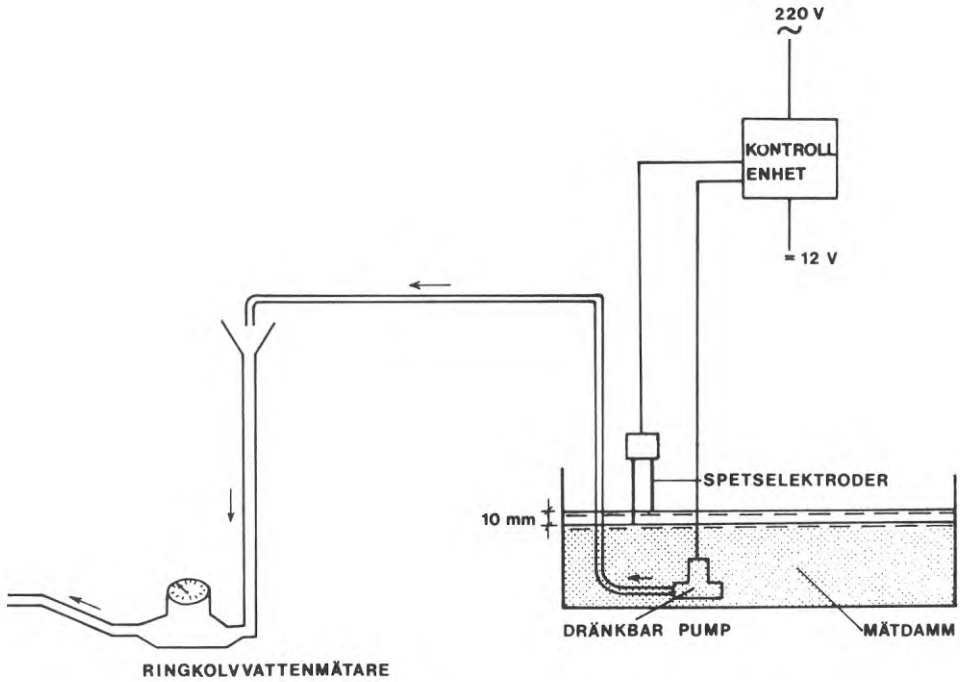


FIG. 28. Schematisk framställning av mätapparatur för automatisk registrering av läckagevatten, som runnit ned i mätdammarna, se även FIG. 29 och 30.

Schematic representation of measuring apparatus for automatic recording of leakage water which has flowed into the water dams, see also FIGS. 29 and 30.

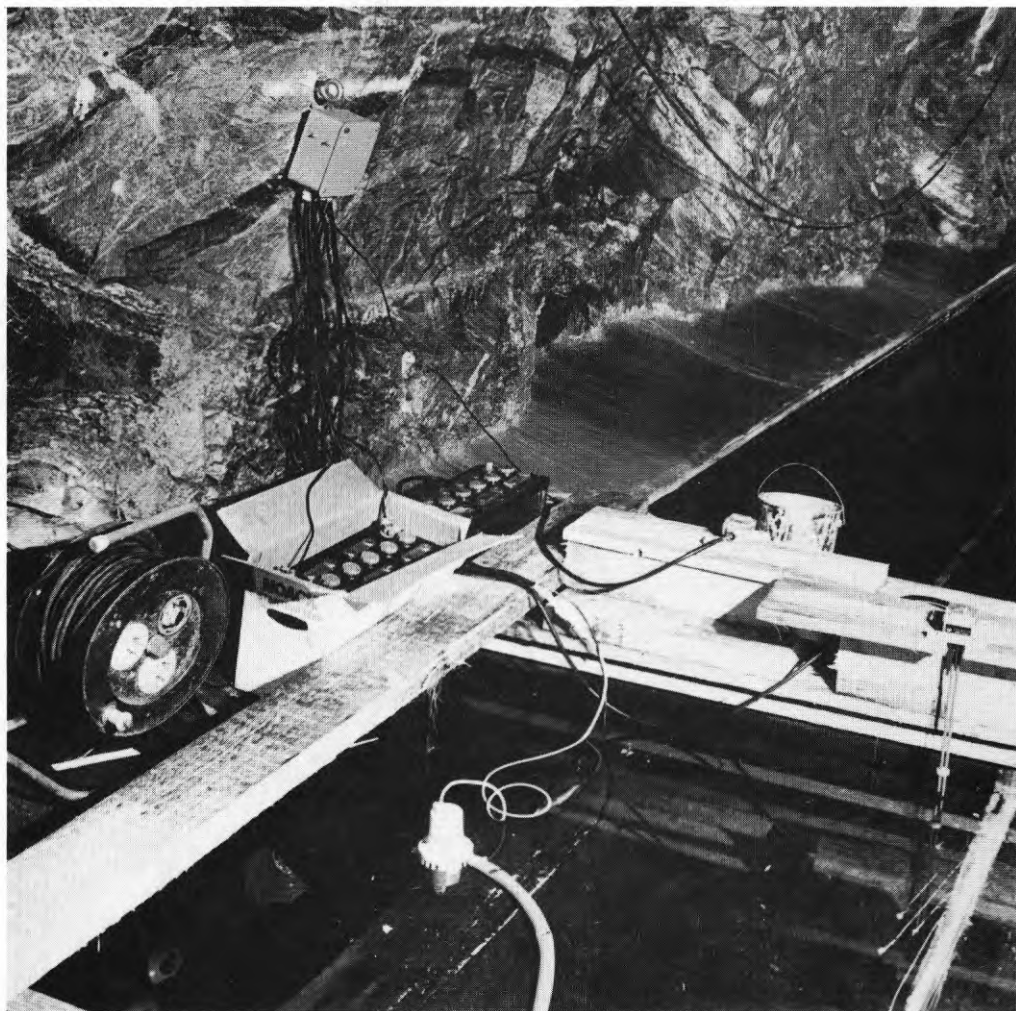


FIG. 29. Anordning för automatisk mätning av läckage i mätdamm. Spets-
elektroden (i förgrunden till höger) startar och stänger den elekt-
riska dränkbara pumpen (i förgrundens mitt) på två vattennivåer.
Arrangement for automatic measurement of leakage into water dam.
The point electrodes (foreground right) starts and stops the electric
submerged pump (foreground center) at two water levels with 10 m
distance.

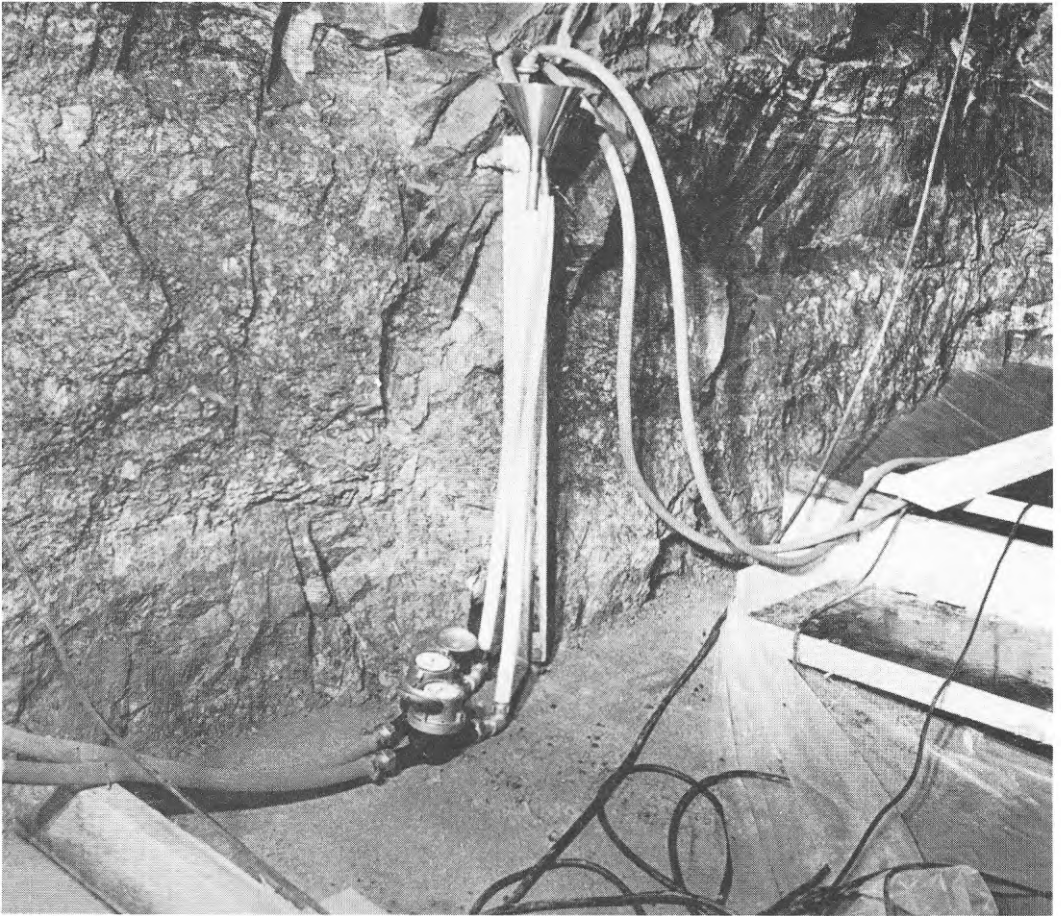


FIG. 30. Anordning för mätning av utpumpat läckagevatten. Detta pumpas upp i trattarna, varifrån det med självtryck rinner igenom ringkolvmätarna, se FIG. 28.

Arrangement for measuring the leakage water coming from pumps. The water is fed into the funnels and flows then under gravity pressure through the recording water flow gages, see FIG. 28.

neln. Man fann att den relativa fuktigheten inne i tunneln varierade mellan 86 och 91 %, och att temperaturskillnaden mellan vattnet i dammarna och tunnelluften med högre temperatur var konstant ca 2°C. Avdunstningen från mätdammarna kunde därför försummas såväl absolut som i jämförelse med andra möjliga felkällor.

Resultaten från de förberedande mätningarna visas i diagramform i FIG. 34. Under de två första avläsningsperioderna erfordrades viss intrimning av mätanordningarna. Som synes var inläckningen på de två mätsträckorna under de sista 5 veckorna nära konstant med medelvärde 4,2 l/h för mätsträcka A och medelvärde 18,4 l/h för mätsträcka B.

Det är värt att notera, att denna skillnad i inläckning på en dryg faktor 4 inte kunde kvantitativt förutsägas vid okulärbesiktning av tränade iakttagare - sannolikt beroende på att det i båda fallen gäller ett litet läckage fördelat på stor och oregelbunden yta. Man kunde däremot bedöma att mätsträcka B läckte något mer än mätsträcka A.

Under hela denna och kommande försöksperioder noterades den lokala nederbörden och utetemperaturen. Dessa återges också på FIG. 34.

Inläckningen på försökssträckorna A och B visade ingen märkbar inverkan av nederbördsvariationerna. I och med att praktiskt taget konstant inläckning konstaterats under så lång tid som 7 veckor ansåg vi, att tunnelsträckan väl uppfyllde kravet på ett försöksobjekt med väldefinierad utgångsstatus.

Sedan de förberedande mätningarna slutförts bestämdes genom lottning att Stabilator AB skulle injektera mätsträcka A med den mindre inläckningen och Hagconsult AB mätsträcka B.

Sedan mätningarna slutförts och mätdammarna demonterats uppborrades de 5 m långa ridåhålen R 1 - R 4 och de 10 m långa tryckmätningshålen T 1 - T 4, se FIG. 25. Borrningen av dessa samt nödvändiga etableringsarbeten pågick tiden 20 - 29 augusti.

Endast i ett av tryckmätningshålen erhöles sådan kontakt med grundvattenmagasinet, att fullt vattentryck utbildades. Vattentrycket kunde dock uppmätas även i ett av ridåhålen och senare också i ett injekteringshål på vardera mätsträckan.

I samtliga dessa hål uppmättes ett vattentryck på 0,35 MPa. Samtliga tryckmätare var placerade på samma nivå men avstånden till vattenförande zoner i borrhålen visade variation på upp till 4 m, vilket talar för att vattentryck motsvarande 35 m avstånd till grundvattenytan från tunneltak räknat var fullt utbildat och så jämnt fördelat över mätsträckorna som spricksystemets struktur medgav. En annan indikation på att så var fallet är att i ett enda av dessa hål påträffades ca 1 m från bergytan en vattenförande zon, som gav en vattenmängd av 342 l/h, dvs. 15 gånger mer än den totala uppmätta "naturliga" inläckningen på båda mätsträckorna tillsammans.

Vid försöksprogrammets uppläggning slopades injektering av

golvpartiet under antagande att fullt utbildat vattentryck rådde i berget ett stycke innanför tunnelytan. Mätningarna visade att denna försöksförutsättning var väl uppfylld.

2.4 Injekteringsetapp I - mätsträcka B

Enligt överenskommelse utförde Hagconsult AB först sina borrhings- och injekteringsarbeten på mätsträcka B. Arbetena pågick från den 30 augusti till den 14 september.

2.4.1 Injekteringens utförande

Innan injekteringsförsöken påbörjades diskuterade företagen lämplig injekteringsmetodik och kom överens om att förfara på i princip samma sätt. Vid det praktiska genomförandet kom dock vissa särskiljande modifikationer att införas beroende på något olika utrustning och olika värderingar.

I den följande redovisningen beskrives förfaringssättet mera detaljerat för den först redovisade mätsträckan B, varefter hänvisning göres här till i vad gäller mätsträcka A.

Eftersom sprick- och läckagekarteringen, se FIG. 24, visat att stor del av läckaget hänförde sig till relativt distinkta sprickzoner, utfördes i enlighet med principöverenskommelsen den första injekteringsetappen som dels en karterad injektering av dessa sprickzoners ytpartier i avsikt att försluta dessa, dels en djupare systematisk injektering.

Hålen för den karterade ytinjekteringen borrades med vanlig standardborrserie 12 med $\emptyset \cong 40$ mm till håldjup varierande mellan 1 och 3 m. Injekteringshålerna var 31 till antalet och deras placering och riktning i väggar och tak framgår av FIG. 32 under beteckningarna 1 - 31.

För den systematiska injekteringsborrningen användes fyrskärskrona och skarvstål. Borrhålen, $\emptyset 42$ mm, placerades i princip som FIG. 31 visar (etapp I), dvs. 5 m djupa hål i tre rader med centrumavstånd ca 3,3 m och fyra hål i varje rad. Lokala avvikelser i borrhålsplaceringen fick förekomma. De systematiska hålen i etapp I har betecknats F 1 - F 4, G 1 - G 4 och H 1 - H 4, se FIG. 31 och 32.

De karterade och de systematiska injekteringshålerna borrades i ett sammanhang innan injekteringsarbetena påbörjades.

I varje hål gjordes en vattenförlustmätning innan hålet injekterades. Man använde ett tryckkärl på vilket dels inpressningstrycket 0,6 MPa kunde kontrolleras, dels den under 2 - 5 min. inpressade vattenmängden kunde avläsas.

De flesta borrhålen visade sig vara helt täta. TAB. 5 anger de hål, där vattenförluster uppmättes, och förlusternas storlek i l/min., meter och 0,1 MPa (atö).

Som injekteringsmedel valde Hagconsult AB att använda det akrylbaserade Geoplast 45, vilket vid laborieförsöken visat sig ha mycket god inträngningsförmåga i smala spalter, se TAB. 1 och FIG. 20.

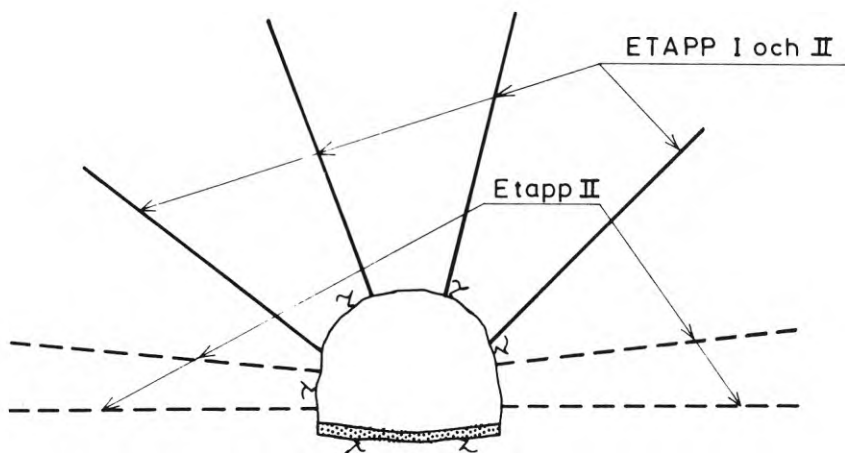
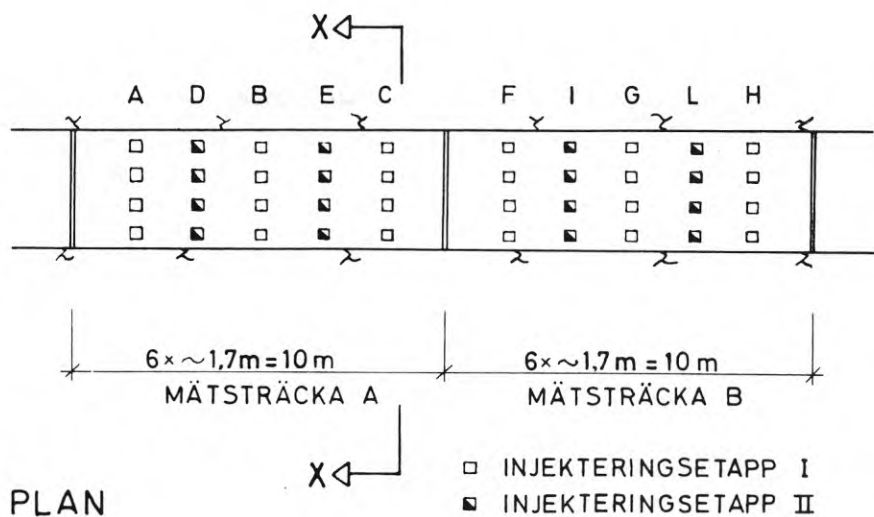


FIG. 31. Huvudprincipen för borrhålens placering vid den systematiska injekteringen i etapp I och II. Alla borrhål hade längden 5 m. Relativt stora lokala avvikelser i borrhålsplacering fick förekomma.

Schema for drill holes used at systematic injection Stage I and II. All drill holes had a length of 5 metres. Relatively large local variations in position of holes was allowed.

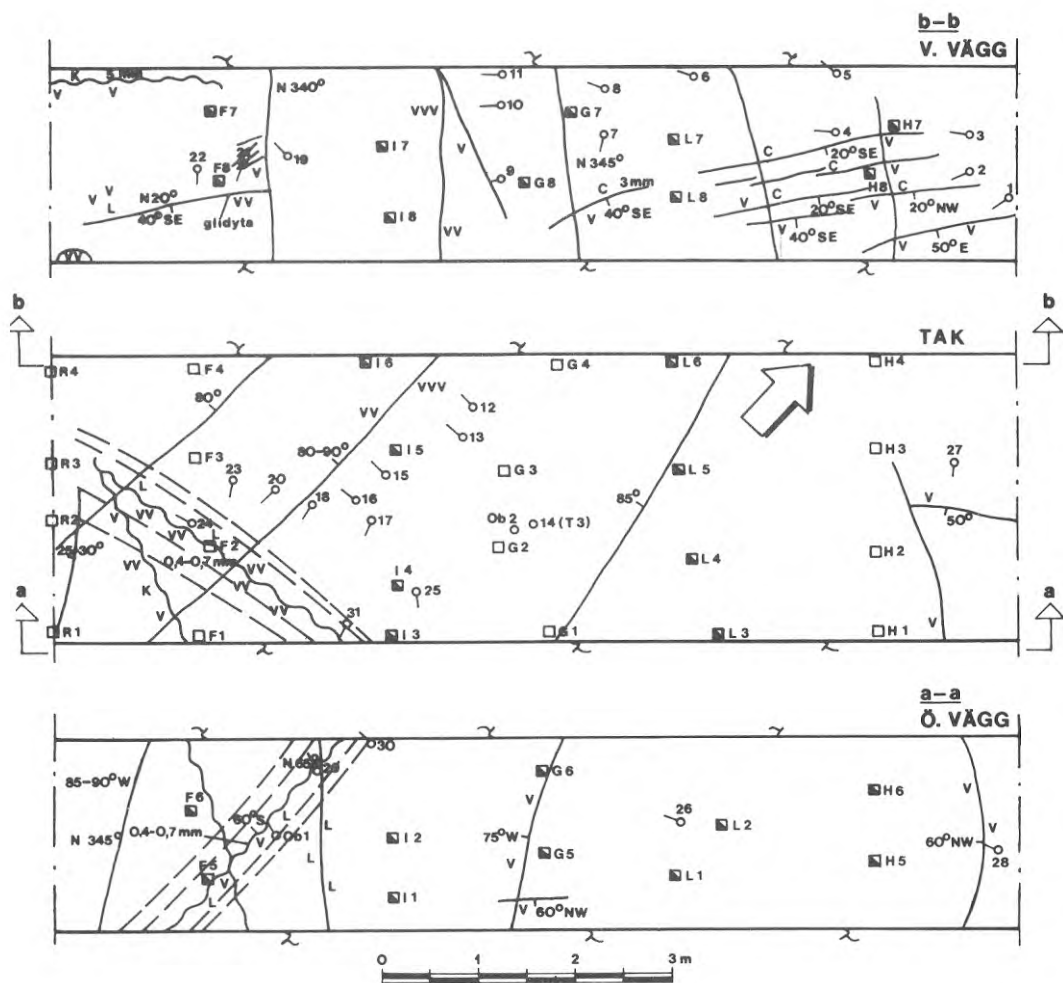


FIG. 32. Mätsträcka B - läge av karterade injekteringshål i etapp I (1 - 31) samt systematiska hål i etapp I (\square) och II (\blacksquare). R 1 - R 4 = ridåhål. Beteckningar, se FIG. 22.

Test section B - position of injection holes for sealing surface leakage areas in Stage I (1 - 31) and systematic holes in Stage I (\square) and Stage II (\blacksquare). R 1 - R 4 = curtain holes. Notations, see FIG. 22.

TAB. 5. Mätsträcka B - injekteringsetapp I.
Vattenförluster och i berg inpressat
injekteringsmedel Geoplast 45.

Borr- hål nr ¹⁾	Längd m	Vattenförlust l/min. m. atö	I berg injek- terad volym (exkl. hål- fyllnad) l	Anm.
2	1,00	0,022	0,4	Härdsn. -tid 22 min.
5	1,30	0,004	0,2	- " -
14	7,50	0,024	17,0	- " - Mättn. av g. v. -tryck
19	1,00	0,002	0,1	Härdsn. -tid 18 min.
20	3,00	0,032	6,0	- " -
24	3,00	0,12	5,6	- " -
26	0,60	0,003	0,1	- " -
29	2,00	0,53	53	Härdsn. -tid 33 min. G. v. -tryck mättes.
F 1	5,00	0,037	16,0	Härdsn. -tid 22 min.
G 2	5,00	0,012	1,5	- " -
H 4	5,00	0,001	0,2	- " -
Totalt			100	

1) Täta hål har ej medtagits i tabellen.

Recepten för injekteringsmedlet bestämdes på platsen genom provblandningar, då blandningsvattnets joninnehåll och jonfördelning avsevärt kan påverka geltiderna. Som framgår av TAB. 5 användes i de flesta fall härdningstid på ca 20 min. I ett borrhål, nr 29, med stor vattenförlust användes längre härdningstid för att medge större inträngning.

Vid injekteringen användes samma enkla tryckkärlsutrustning som vid vattenförlustmätningen. Injekteringstrycket var 0,6 MPa och satsstorlekar på 10 - 25 l användes.

För att göra det lättare att spåra injekteringsmedlet färgades detta rött med ett inaktivt ämne - en Ciba-produkt: Mikrosolrot. Man kunde härigenom konstatera att man i några fall fick förbindelse med och utläckning genom ytsprickor. Vid injektering av hål F 1 erhöles förbindelse med ridåhålet R 1, varför detta tätades.

Av den totala i berg inpressade mängden 100 liter åtgick ca 80 % i den vattenförande skölzonen i tunnelns sydvästra ände, se FIG. 32.

Sedan injekteringen avslutats pluggades samtliga hål.

2.4.2 Mätresultat

Den 3 oktober 1973 hade mätdammarna ånyo uppmonterats och under tiden fram till 29 oktober utfördes nya läckagemätningar. Resultatet framgår av diagrammet i FIG. 34.

Som synes var även nu inläckningen nära konstant i tiden, men den hade minskat från tidigare medelvärde 18,4 l/h till endast 2,1 l/h.

2.4.3 Kommentarer

Det är påfallande och kan för urbergarter antagligen anses som normalt, att vid de små vattenläckage som här fanns i utgångsläget visade sig huvuddelen av de borrhålen täta.

I praktisk injekteringsverksamhet användes ofta en vattenförlust på 0,10 l/min. meter och atö som absolut undre gränsvärde för att cementinjektering skall vara meningsfull. Här fanns av 43 st hål endast två grunda hål, nr 24 och 29, tillhörande den karterade injekteringen, som överskred detta värde. Båda hålen låg vid den sydvästra skölzonen och har troligen haft genomläckning till bergytan.

Läckaget före injektering på mätsträcka B:s 10 m var 18,4 l/h, vilket motsvarar 3 l/min. och 100 m tunnellängd. Efter injekteringen kvarstod ca 0,3 l/min. och 100 m.

2.5 Injekteringsstap I - mätsträcka A

Stabilator AB:s borrhålls- och injekteringsarbeten på mätsträcka A pågick under tiden 17 - 27 september 1973.

2.5.1 Injekterings utförande

Stabilator AB använde samma principiella förfaringssätt som använts vid mätsträcka B, dvs. dels en karterad injektering, dels en systematisk injektering. Borrningarna utfördes med samma borrarutrustningar som på mätsträcka B.

Stabilator föredrog dock att på mätsträcka A först borra upp och injektera de karterade hålen och därefter borra och injektera de djupare systematiska hålen, se FIG. 31.

Den karterade injekteringen omfattade 18 hål med djup varierande mellan 1,55 och 3 m. Hålen, K 1 - K 18, koncentrerades, som framgår av FIG. 33, till de mest vattenförande sprickzonerna i tak och östra väggen.

Vattenförlustmätningarna utfördes med samma apparatur och på samma sätt som för mätsträcka B, dvs. vid trycket 0,6 MPa. De erhållna vattenförlusterna i otäta hål framgår av TAB. 6. I praktiskt taget samtliga hål var förlusterna så små, att cementinjektering kunde anses verkningslös. Det kan anses tveksamt, om något av de karterade hålen nådde direktkontakt med sprickzonens mest vattenförande slag.

Som injekteringsmedel valde Stabilator AB att använda det polymeriserande alkalisilikatet Stabilodur C 75, som vid laboratorieförsöken givit goda resultat, se TAB. 1 och FIG. 20.

Recepten bestämdes genom provblandningar på platsen så att geltiderna skulle bli omkring 50 min.

Vid injekteringen användes konventionell injekteringsutrustning. Injekteringsstrycket var för huvuddelen av de karterade hålen samt för R 3 och T 2 1 MPa. Hålen K 1 och K 18 injekterades i samband med systeminjekteringen vid tryck 1,5 MPa.

Den väsentliga i berg inpressade injekteringsmängden låg i hål K 2, se TAB. 6. Någon utläckning av injekteringsmedel genom bergytan observerades ej.

De systematiskt placerade borrhålen A 1 - A 4, B 1 - B 4 och C 1 - C 4 borrades enligt principritningen i FIG. 31 och återfinns också i FIG. 33. De uppmätta vattenförlusterna vid tryck 0,5 MPa är förtecknade i TAB. 6. I inget av hålen skulle cementinjektering ge tätningseffekt.

Injekteringen av de systematiska hålen skedde vid trycket 1,5 MPa. Injekteringsmedlet färgades blått.

Som framgår av TAB. 6 var de injekterade mängderna ganska små. I några hål, K 14 - K 16, erhöles injektering i berg trots att vattenförlustmätningen visat täthet. Det är troligt att det högre injekteringsstrycket vidgat någon tidigare sluten spricka.

Injekteringsmängdernas fördelning på borrhålen antyder att de sökt sig mot den stora sprickzonen, se FIG. 33. Vid injektering av K 2 samt C 3 erhöles förbindelse med ridåhålen R 2 och R 3, som därför tätades. Svag förbindelse erhöles därefter

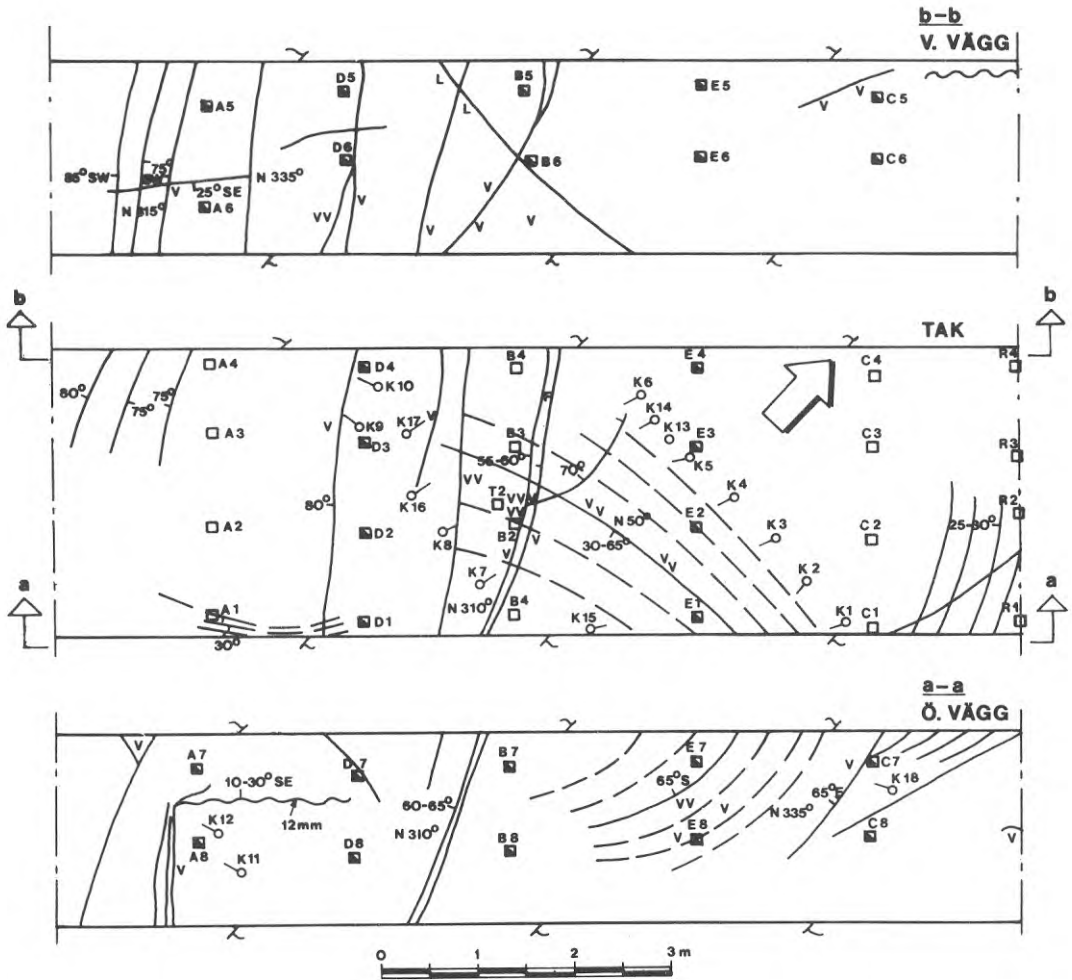


FIG. 33. Mätsträcka A - läge av karterade injekteringshål i etapp I (K 1 - K 18) samt systematiska hål i etapp I (□) och II (■). Beteckningar, se FIG. 22.

Test section A - position of injection holes for sealing surface leakage areas in Stage I (K 1 - K 18) and systematic holes in Stage I (□) and Stage II (■). Notations, see FIG. 22.

TAB. 6. Mätsträcka A - injekteringsetapp I.
Vattenförluster och i berg inpressat
injekteringsmedel Stabilodur C 75.

Borr- hål nr ¹⁾	Längd m	Vattenförlust l/min. m. atö	I berg injek- terad volym (exkl. hål- fyllnad) l	Anm.
K 1	3,15	0,007	10	I samb. systeminjekt.
K 2	2,20	0,095	35	Svag förb. med R3 o. K3 Härdsn.-tid 40 o. 60 min.
K 4	2,70	(0,093)	0	Ytsprickor
K 7	3,00	0,004	0	
K 8	2,70	0,011	0	Svag förbind. m. ytan
K 9	2,40	0,004	2	Härdsn.-tid 65 min.
K 17	2,80	0,004	2	
K 18	4,70	0,009	5	I samb. systeminjekt.
A 2	5,0	0,004	15	I A4 injekterades ca 5 l. Härdsn.-tid 50 min.
A 3	5,0	0,007		
B 1	5,0	0,002	0	
B 2	5,0	0,006	0	
B 3	5,0	0,006	10	Härdsn.-tid 55 min.
B 4	5,0	0,002	0	
C 1	5,0	0,004	20	Härdsn.-tid 50 min. Svag förb. med R2 o. R3
C 2	5,0	0,006		
C 3	5,0	0,006		
C 4	5,0	0,024	25	
R 3	5,0	0,041	0	
T 2	10,0	0,001	3	Härdsn.-tid 75 min.

¹⁾ Täta hål har ej medtagits i tabellen. I hål K 14 - K 16 kunde trots vattenförlust = 0 inpressas \approx 5 l Stabilodur.

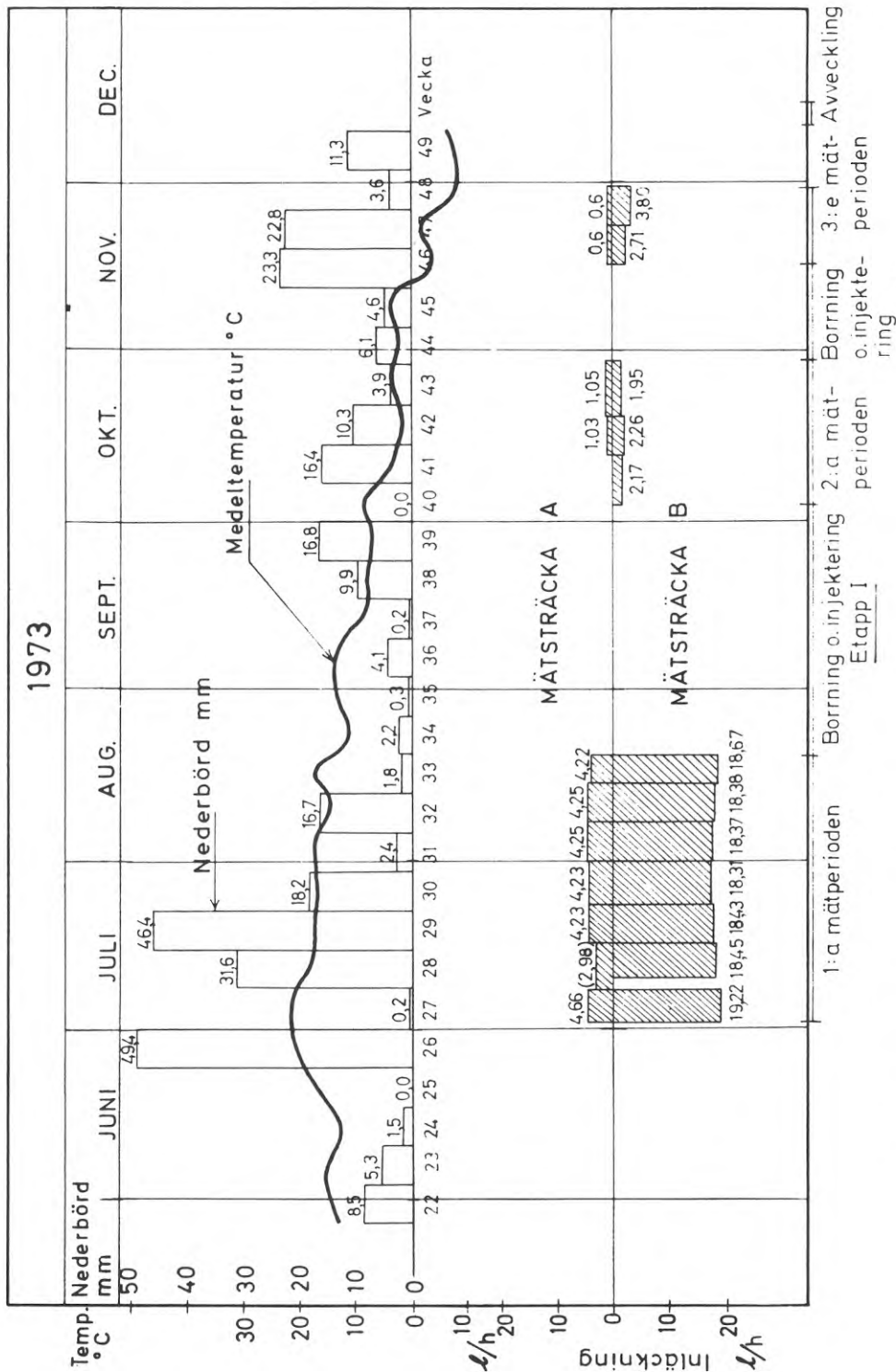


FIG. 34. Resultat av läckagemätningar på mätsträckorna A och B samt lokal nederbörd och utetemperatur.
 Results from leakage measurements at test sections A and B together with local precipitation and outdoor temperature.

med bergytan ca 1,5 m in på mätsträcka B.

Som framgår av TAB. 6 var geltiderna ganska stabila kring 50 min.

Den totala mängden i berg inpressat injekteringsmedel Stabilodur C 75 var enligt TAB. 6 ca 130 liter.

Sedan injekteringen avslutats pluggades samtliga hål på en längd av ca 50 cm.

2.5.2 Mätresultat

Efter injektering av mätsträcka A inleddes en mätperiod 3-29 oktober för att kontrollera resultatet. I diagrammet, FIG. 34, återges den vid mätdammarna observerade inläckningen. På grund av apparatfel kom avläsningarna för mätsträcka A endast att omfatta två delperioder.

Inläckningen visade sig även här vara konstant i tiden. Den hade minskat från tidigare mycket låga utgångsvärde 4,2 l/h till endast 1,05 l/h.

2.5.3 Kommentarer

Även på denna mätsträcka A visade sig huvuddelen av de borrarde hålen vara täta eller nästan täta.

En viss ökning av vatteninläckningen ansåg injekteringspersonalen sig kunna konstatera under injekteringen och något dygn efter denna. Därefter avtog inläckningen märkbart.

Läckaget före injektering på mätsträcka A var 0,7 l/min. och 100 m tunnellängd. Efter injekteringen kvarstod endast 0,165 l/min. och 100 m.

2.6 Injekteringsetapp II - mätsträcka A

De uppnådda injekteringsresultaten från den första etappen var mycket tillfredsställande i och för sig. De lämnade dock inte underlag för bedömning av till vilken täthetsgräns som det med de använda medlen var praktiskt möjligt att komma. Avstånden mellan de systematiskt borrarde djupa 5 m hålen var relativt stort, 3,4 m, och inga hål hade placerats i väggarnas nedre partier, se FIG. 31.

Både Hagconsults och Stabilators experter ansåg att inläckningen skulle kunna nedbringas ytterligare med tätare hålsättning, och Statens råd för byggnadsforskning meddelade att extra medel för fortsatta försök kunde påräknas. Eftersom tunneln möjligen endast skulle få disponeras ytterligare en och en halv månad, kom injekteringsetapp II att bedrivas under stark tidspress.

2.6.1 Injekteringens utförande

Injekteringsetapp II påbörjades av Stabilator AB på mätsträcka A och pågick här tiden 30 oktober - 8 november.

Alla injekteringshål i denna etapp var 5 m långa systematiska hål placerade enligt FIG. 31 och FIG. 33. Dels kompletterades de tidigare raderna A, B och C med vägghål A 5 - A 8, B 5 - B 8 och C 5 - C 8, dels borrades två helt nya rader tak- och vägghål D 1 - D 8 och E 1 - E 8.

Vattenförlustmätningen i borrhålen utfördes denna gång med injekteringsutrustningen och vid 3 MPa tryck. Den sjunkande vattennivån i omrörartratten mättes. Huvuddelen av hålen var helt täta. För de andra redovisas vattenförlusterna, som var mycket små, i TAB. 7. I hål E 2 konstaterades förbindelse med bergytan, dock ej vid den läckande ytsprickzonen, se FIG. 33.

Arbetsstrycket vid injekteringen var denna gång också 3 MPa, och injekteringsmedlet Stabilodur C 75 hade färgats. Geltiderna var, som framgår av TAB. 7, ganska stabila utom i ett fall där blandning skedde kontinuerligt utan rengöring av utrustningen.

För att spara tid användes serieinjektering med tre hål i taget. Som framgår av TAB. 7 lyckades man pressa in totalt ca 135 l injekteringsmedel, dvs. ungefär lika mycket som i etapp I.

2.6.2 Mätresultat

Uppmätning av inläckningen på mätsträcka A efter injekterings-etapp II skedde under tiden 16 oktober - 11 december med de mätdammarna och mätanordningar, som beskrivits i 2.2.2.

Endast två tillförlitliga mätperioder kunde dock utnyttjas. Under slutet av november och december inträffade en period med stark kyla och samtidigt öppnades tunnelsystemet på sådant sätt, att minusgradig luft passerade mätdammarna. Nedisning skedde både i dammarna och på bergväggarna.

Mätresultatet för tiden 16 - 30 november ger en konstant inläckning på 0,6 l/h, som redovisas i FIG. 34. Eftersom man efter etapp I hade 1,05 l/h innebar detta en sänkning av inläckningen med ytterligare ca 40 %.

Räknat från det låga utgångsvärdet 4,2 l/h hade man med Stabilodur C 75 efter etapp II sänkt inläckningen med drygt 85 %.

2.6.3 Kommentarer

Även efter injekterings-etapp II erhöles en ökad vatteninläckning för en tid av ca 2 dygn. Genom att uppsamla en del förekommande dropp i mätkärl uppskattades inläckningen efter 1 dygn till ca 1,6 l/h och efter fyra dygn till 0,7 l/h. Vattendropp kvarstod härvid framför allt i den vattenförande sprickzonen, se FIG. 33.

TAB. 7. Mätsträcka A - injekteringsetapp II.
Vattenförluster och i berg inpressat
injekteringsmedel Stabilodur C 75.

Borrhåll nr 1)	Längd m	Vattenförlust l/min. m. atö	I berg injekterad volym (exkl. hållfyllnad) l	Anm.
C 6	5,0	0,001	} 15	Härdsn. -tid 50 min.
E 5	5,0	0,001		
E 6	5,0	0,0014		
E 2	5,0	-	} 55	Förbind. m. ytan
E 3	5,0	0,001		Härdsn. -tid 50 o. 25 min.
E 4	5,0	0,0009		
B 5	5,0	0,0009	} 5	Härdsn. -tid 50 min.
B 6	5,0	0,0006		
D 7	5,0	0,0006		
E 2	5,0	-	} 25	Förbind. m. ytan
E 3	5,0	0,001		Härdsn. -tid 50 min.
B 6	5,0	0,0006		
D 2	5,0	0,0009	} 35	Härdsn. -tid 40 min.
D 3	5,0	-		Förbind. m. D4
D 4	5,0	0,008		Förbind. m. D3
Totalt			135	

1) Täta håll har ej medtagits i tabellen.

2.7 Injekteringsetapp II - mätsträcka B

2.7.1 Injekterings utförande

Borrningen på mätsträcka B för etapp II utfördes samtidigt som för mätsträcka A för tids vinnande.

Även på sträcka B var alla injekteringshål i etapp II 5 m långa och i princip systematiskt placerade enligt FIG. 31 och 32. De tidigare raderna F, G och H kompletterades med vägghålen F 5 - F 8, G 5 - G 8 och H 5 - H 8. Två nya fullständiga rader I 1 - I 8 och L 1 - L 8 placerades mellan de gamla raderna, se FIG. 32.

Vattenförlustmätning och injektering utfördes med samma apparatur och samma tryck 0,6 MPa, som vid etapp I, under tiden 7 - 9 november.

Vattenförluster uppmättes endast i 12 st hål och redovisas i TAB. 8. I alla hålen utom hål H 5 var förlusterna mycket små.

Vid injekteringen med färgad Geoplast 45 arbetade man denna gång med något kortare härdningstider, 10 - 17 min, se TAB. 8. Hålen injekterades ett i taget och den injekterade volymen var som framgår av TAB. 8 mycket obetydlig i de flesta hålen.

Borrhålet H 5 längst ut på östra väggen utgjorde undantaget, se FIG. 32. Hålet, som ju uppvisat mycket stor vattenförlust, var beläget ca 7 m från den vattenförande sprickzonens utträde i tunneltaket. Sprickzonens riktning är sådan, att kontakt mellan hål H 5:s botten och zonen inte är utesluten. Vare sig vid vattenförlustmätningen eller vid injekteringen erhöles dock förbindelse med sprickzonens ytparti. Trots att ca 200 l injekterades in i berget från hål H 5, så minskade inte heller inläckningen. I stället ökade den och bedömdes ett dygn efter injekteringen uppgå till ca 7 l/h. Samma inläckning bedömdes kvarstå efter 5 dygn.

Med hänsyn härtill beslöts att en kompletterande injektering skulle utföras vid läckageområdet, där sex hål borrades och vattenförlust mättes vid 1,5 MPa tryck. Inte i något hål erhöles mätbar vattenförlust, dock observerades en betydande minskning av inläckningen när sista hålet borrades. Hålen fylldes därför inte med injekteringsmedel utan pluggades med Sikacement.

2.7.2 Mätresultat

FIG. 34 visar de uppmätta läckmängderna på mätsträcka B under den mätperiod, som följde på injekteringsetapp II.

Som synes hade läckaget ökat något i förhållande till etapp I och det finns en tendens till ökande inläckning. De på grund av isbildning förkastade avläsningsvärdena från den tredje delperioden 1 - 11 december syntes i princip bestyrka en sådan utveckling.

TAB. 8. Mätsträcka B - injekteringsetapp II.
Vattenförluster och i berg inpressat
injekteringsmedel Geoplast 45.

Borr- hål nr 1)	Längd m	Vattenförlust l/min. m. atö	I berg injek- terad volym (exkl. hål- fyllnad) l	Anm.
F 6	5,0	0,0007	0,1	Härdsn.-tid 12 min.
G 7	5,0	0,0017	0,2	- " - 11 "
H 5	5,0	0,3400	200	- " - 10-17 " Injekt. 110 min.
H 7	5,0	0,0051	0,6	Härdsn.-tid 10 min.
L 2	5,0	0	0,1	- " - 13 "
L 3	5,0	0,0014	0,2	- " - 13 "
L 4	5,0	0,0007	0,2	- " - 11 "
L 5	5,0	0,0028	0,4	- " - 11 "
L 6	5,0	0,0017	0,3	- " - 11 "
L 7	5,0	0,0007	0,1	- " - 12 "
I 3	5,0	0,0017	0,2	- " - 10 "
I 5	5,0	0,0017	0,2	- " - 10 "
I 8	5,0	0,0017	0,3	- " - 10 "
Totalt			203	

1) Täta hål har ej medtagits i tabellen.
Injekteringstid för samtliga hål utom H 5 var 5 min.

2.7.3 Kommentarer

Den sannolika förklaringen till den ökade inläckningen på mätsträcka B efter etapp II synes vara, att den stora mängden injekteringsmedel från borrhål H 5 kommit att ändra strömningsbalansen runt tunneln. Om man studerar sprickzonen i mätsträcka B:s södra hörn, där huvuddelen av läckaget skett, finner man att zonen tycks upphöra i tunneltak före gränsen till sträcka A. Det förefaller således som om tunneln råkat passera i utkanten på en vattenförande sprickzon, vilken längre in i berget kan ha fått kontakt med hålet H 5:s influensområde. Injekteringen i H 5 kan då ha ökat strömningsmotståndet i den vattenförande huvudzonen så starkt, att det från början efter etapp I erhållna större strömningsmotståndet in mot tunneln övervunnits av en ökande vattenmängd.

Det bör observeras, att det var tidsbristen som gjorde det omöjligt att rationellt angripa den nya situationen. Tunneln måste vara utrymd den 14 december, och innan dess skulle en ny mätperiod inrymmas.

Det inträffade kan tagas som ett gott exempel på de vanskligheter, som ofta föreligger vid injekteringsarbeten, och som gör att den systematiska metoden måste kunna kompletteras med lokala variationer och kompletteringar baserade på erfarenhet och kunnande.

2.8 Borrhålsgranskning

Enligt försöksprogrammet skulle man studera möjligheterna att genom granskning av borrhål i injekterad bergmassa få en uppfattning om injekteringens verkan.

En sådan studie genomfördes på mätsträcka B under injekteringsetapp I. Injekteringsmedlet Geoplast 45 var här rödfärgat i avsikt att underlätta indikering.

Två granskningshål, Ob 1 och Ob 2 borrades sedan injektering utförts.

Ob 1 borrades i östra väggen så att det övertvårade den vattenförande skölen i tunnelsträckans södra del, se FIG. 32. Vid granskning med borrhålsskikare befanns hålet helt tätt, men injekteringsmedlet gick ej att urskilja.

Ob 2 borrades rätt upp i taket bredvid borrhål 14 (T 3), som tidigare granskats, se FIG. 32. Vid granskningen av hål 14 före injektering fanns på 4,75 m djup en tydlig 0,6 - 0,8 mm bred vattenförande spricka, som även måste ha tvärats av Ob 2. Vid kikargranskningen kunde man dock ej indikera denna spricka och således ej heller med direkt observation fastslå, om den fyllts med injekteringsmedel, vilket dock var sannolikt.

Kikargranskning efter injektering gav således ett magert resultat, möjligen beroende på att den använda färgen - rött - kontrasterar för litet mot vissa rödaktiga mineral, framför allt fältspater.

Möjligheten att använda fluorescerande färgmedel diskuterades. Man måste dock ha garanti för att gelningsprocessen inte påverkas ofördelaktigt, vilket fordrar ingående undersökningar.

På grund av tidsbristen kunde några ytterligare försök med karkgranskning inte göras efter etapp II.

Några hål undersöktes med gott resultat före injektering för att bestämma läget av vattenförande sprickor.

2.9 Diskussion

2.9.1 Vattenförlust - injekterad volym

Vid injekteringsarbeten företages rutinmässigt vattenförlustmätningar i borrhålen före injektering. Avsikten är att "kartlägga" bergmassans täthetsegenskaper och ge en uppfattning om var injektering behövs och kan ge resultat, Snow (1966).

En i praktiken ofta använd bedömningsgrund är att cementinjektering inte kan anses verksam om den uppmätta vattenförlusten är mindre än 0,1 l/min. m. atö. För cement- bentonit-suspensioner har gränsvärdet 0,05 l/min. m. atö angivits.

Praktiskt taget alla de injekteringshål, som borrats på mätsträckorna A och B har haft vattenförluster som understigit 0,1 l/min. m. atö, se TAB. 5, 6, 7 och 8. De tre undantagen finns alla på mätsträcka B, nämligen hål 24, 29 och H 5.

Vi har redan i redovisningen av primärresultaten konstaterat, att de använda injekteringsmedlen Geoplast 45 och Stabilodur C 75 givit mätbara injekteringsvolymen i berg vid vattenförluster ned till mindre än 0,001 l/min. m. atö, dvs. ca 100 gånger lägre gräns än för cement.

Eftersom man vid dessa fältförsök i vissa delar fört noggranna protokoll över individuella borrhåls egenskaper och prestanda, kan det vara av intresse att undersöka i vad mån vattenförlusten kan användas som indikator på den mängd injekteringsmedel som går att pressa in i bergmassan från ett borrhål. I FIG. 35 har de i bergmassan per borrhål inpressade injekteringsmedelsmängderna framställts som funktion av uppmätt vattenförlust i dubbellogaritmiskt diagram. Värdena för Stabilodur C 75 omfattar ett antal injekteringar vid 1,5 MPa tryck, se TAB. 6, vilka omräknats till 1,0 MPa tryck enligt tidigare vid sandförsöken funnen kvadratrotrelation. Härvid har de effektiva trycken, dvs. injekteringstryck - grundvattentryck, använts. I princip innebär detta att injekterad volym antagits vara direkt proportionell mot inträngningshastigheten.

Således har volymerna från 1,5 MPa injekteringarna reducerats med en faktor

$$f = \sqrt{\frac{1,0 - 0,35}{1,5 - 0,35}} = 0,75$$

Som framgår av FIG. 35 är sambandet vattenförlust - injekterad volym påtagligt för båda injekteringsmedlen. Spridningsbanden är av lätt insedda skäl ganska breda, jfr dock

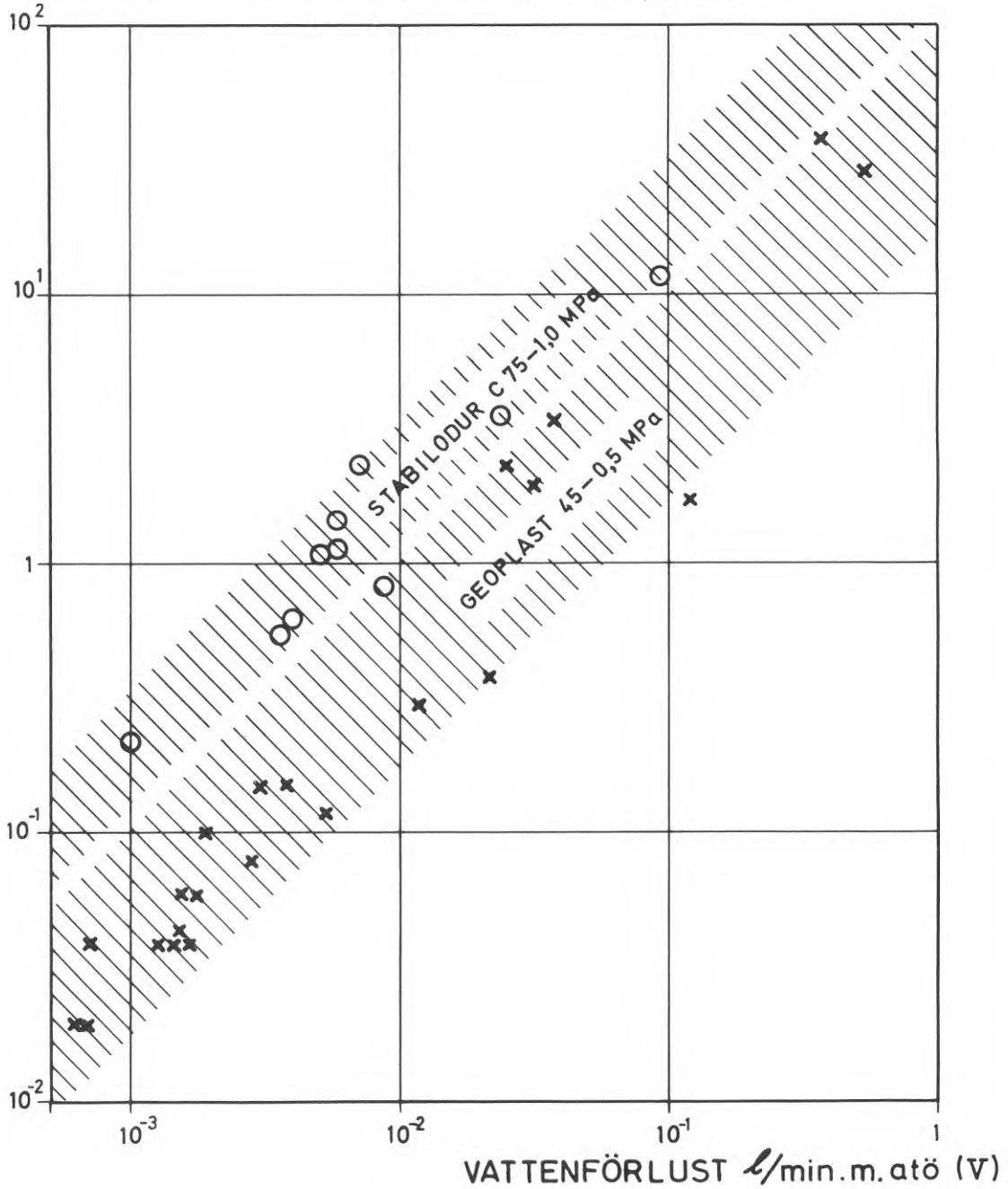
I BERG INJEKTERAT PER BORRHÅL, l/m (I)


FIG. 35 Per borrhål i berg inpressat injekteringsmedel som funktion av uppmätt vattenförlust.

Into the rock mass injected compound per drill hole as a function of the measured water loss in the same hole.

motsvarande spridningsband från de mera väldefinierade laborieförsöken, FIG. 17 - 19.

Sambanden är för båda injekteringsmedlen linjära av typen

$$I = c \cdot V \quad (1)$$

där I = injekterad volym l per m borrhål
 V = vattenförlust, l/min. m. atö
 c = konstant.

Det är rimligt att förvänta sig en linjär relation för injekteringsmedel med stor inträngningsförmåga, och resultatet styrker således uppfattningen att i dessa fall vattenförlusten är en i princip god indikator på såväl injekteringsbehovet som injekteringsmöjligheten.

Det föreligger vissa skillnader mellan resultaten för Geoplast 45 och Stabilodur C 75. För Stabilodur användes ett ca 7,5 gånger större effektivtryck (injekteringstryck - grundvattenstryck 0,35 MPa) än för Geoplast. Injekteringstiderna var dessutom i genomsnitt 2 - 4 gånger längre. Dessa faktorer förklarar varför de injekterade volymerna I är större för Stabilodur C 75 än för Geoplast 45, trots att den senare hade något bättre inträngningssegenskaper, se FIG. 20.

Vid studium av TAB. 6, varifrån värdena för Stabilodur C 75 är hämtade, finner man att det finns vissa hål med redovisad vattenförlust, där man inte fått in något injekteringsmedel. Närliggande hål med vattenförlust av samma storlek kan däremot ha mottagit injekteringsmedel. Detta förhållande förekommer inte vid Geoplasten, där effektivtrycket bara varit 0,15 MPa. Möjligen ligger förklaringen här till i det fenomen, som Alberts (1973) har berört, nämligen att höga injekteringstryck kan medföra rörelser i bergmassan så att vissa sprickor öppnas medan andra sluter sig. Detta fenomen skulle kunna föreligga också mellan närliggande injekteringshål, så att injekteringen i ett hål tenderar att sluta spricksystem även längre ut än injekteringsmedlet tränger.

Om denna förklaring är riktig, skulle även detta tendera att ge högre individuella mätvärden i FIG. 35 för Stabilodur C 75.

2.9.2 Möjlig täthetsgräns

Vid praktisk tätningsinjektering av tunnlar använder man ofta som måttetal den inläckning i l/min., som erhålles på 100 m tunnellängd.

Vid trafiktunnlar i Stockholm har man ofta tillämpat 6 - 12 l/min. och 100 m som acceptabelt inläckage. Vid avloppstunnlar som Käppala och Himmerfjärden har man som riktvärden använt 6 l/min. och 100 m. I Göteborg har man efter cementinjektering nått värden på 4 l/min. och 100 m tunnel.

Det torde i realiteten förhålla sig så, att dessa riktvärden inte har bedömts efter några hydrologiska eller byggnadsgeologiska behov hos omgivningen utan snarast är att fatta som en empiriskt belagd gräns för hur långt man kan nå med

cementinjektering. Härför talar bl.a. det förhållandet, att man vid större tunnelsektioner anser sig böra tolerera större inläckning.

Anledningarna till att vilja täta tunnlar mot inläckage kan vara olika, vilket kan medföra olika starka ekonomiska motiv att driva tätningen långt.

I tunnlar under tätbebyggelse på lerbassänger eller lösa jordar kan behovet att undvika grundvattensänkning och sättningar vara det primära, Morfeldt (1967), Morfeldt, Nordin och Roosaar (1967), Morfeldt (1969), Morfeldt och Hultsjö (1973), Broms (1973). I dessa fall erfordras så litet inläckage i tunneln att det inte överstiger grundvattentillflödet. Inläckagets storlek kommer att bero inte endast på sprickkaraktäristika utan också på grundvattentrycket. Kriteriet för att man nått erforderlig täthet kan i sådana fall inte entydigt skrivas som viss tillåten inläckningsmängd utan borde utgöras av mätning av grundvattentrycket utanför (ovanför) tunnelns tätade omgivning eller läckzon.

I avloppstunnlar under naturmark krävs viss täthet för att inte reningsverkens kapacitet skall i alltför stor utsträckning ägnas åt att rena redan acceptabelt grundvatteninflöde. Här är därför viss tillåten inläckningsmängd per 100 m tunnel ett rationellt kriterium.

Tunnlar kan också behöva tätas mot utläckning av t. ex. gas och oljor, Morfeldt (1973). I dessa fall kan injektering endast utgöra en dellösning och dessa aspekter diskuteras därför ej här.

I försökstunneln förelåg redan före injekteringarnas början fullt utbildat grundvattentryck i berget utanför tunneln. De uppmätta utgångsläckagen var låga:

Mätsträcka A — 0,7 l/min. och 100 m

Mätsträcka B — 3 l/min. och 100 m.

Läckagen låg alltså redan i utgångsläget under den gräns, där det praktiskt anses verkningslöst att försöka med cementinjektering.

Genom injekteringar sänktes inläckagen till:

Mätsträcka A (Stabilodur) — 0,1 l/min. och 100 m

Mätsträcka B (Geoplast 45)—0,3 l/min. och 100 m

Med de mätetal, som används i praktiken, kan man således säga att försöken visat att det är möjligt att med kemisk injektering sänka inläckaget med en faktor på 12 - 40 i förhållande till vad som anses vara undre gräns för cementinjektering.

Som tidigare antytts är de praktiska mätetalen inte särskilt logiska. Ett bättre mätetal på en tunnels täthet borde vara den på viss längd (t. ex. 100 m) och tid (min.) genomsnittligt inläckande mängden (l) per ytenhet (m²) tunnelvägg (tak, golv och väggar inkluderade) och MPa grundvattentryck, dvs.

$$\tau \text{ l/min.} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MPa}$$

Detta "täthetsvärde" τ är då uppbyggt i princip som vattenförlustvärdena i borrhål, se t. ex. TAB. 5.

För försökstunneln är den vid försöken ianspråkta tunnelytan (väggar + tak), se FIG. 26, ca $11 \text{ m}^2/\text{m}$. Den praktiska läckagegränsen på ca 4 l/min. och 100 m tunnel skulle då motsvara vid aktuellt grundvattentryck $0,35 \text{ MPa}$

$$\tau \approx 8,5 \cdot 10^3 \text{ l/min.} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MPa}$$

Motsvarande försöksvärden blir;

Före injektering:

$$\text{Mätsträcka A} \text{ — } \tau = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ l/min.} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Mätsträcka B} \text{ — } \tau = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ — " —}$$

Efter injektering:

$$\text{Mätsträcka A} \text{ — } \tau = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ l/min.} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Mätsträcka B} \text{ — } \tau = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ — " —}$$

Med "täthetsvärden" τ definierade på detta sätt har försöksinjekteringarna medfört en sänkning av inläckaget med en faktor 11 - 34 jämfört med uppnåelig gräns med cementinjektering.

Det finns emellertid inte anledning förmoda att de uppnådda täthetsvärdena representerar någon absolut undre gräns för den täthet, som kan uppnås med de använda injekteringsmedlen. Tätheten kan med tätare hålplacering och längre injekteringstider sannolikt ytterligare ökas väsentligt, om så skulle behövas.

Om de från närliggande injekteringshål utgående injekteringsfronterna inte når kontakt och bildar sammanhängande injekteringskärrmar, så får man räkna med att mellanliggande gränspartier kan utspädas och kanske inte gå till fullständig gelning. Efterhand kan då sådana partier urlakas på sådant ofullständigt gelat injekteringsmedel.

2.9.3 Skyddsåtgärder

I vissa av de kemiska injekteringsmedlen ingår komponenter, som kan vara frätande, ge upphov till allergier eller i undantagsfall vara giftiga. Några av härdarna till Stabilodur C 75 och Geoplast 45 tillhör denna grupp, som kräver särskild instruktion och vissa skyddsåtgärder som skyddsglasögon och handskar. Det härdade injekteringsmedlet är däremot i båda fallen ofarligt.

Vid försöken iaktogs givetvis erforderliga skyddsföreskrifter, vilket icke vållade några arbetstekniska eller försökstekniska svårigheter.

3 SLUTSATSER

3.1 Möjlig täthet

Försöken har visat att det finns kemiska injekteringsmedel med vilka man kan uppnå en täthet som mätt i inläckt volym per tids- och ytenhet vid visst påliggande grundvattentryck är minst 10 - 30 gånger bättre än vad som kan presteras med normal cementinjektering.

I fältförsöken har två injekteringsmedel, Stabilodur C 75 och Geoplast 45 (se TAB. 1), visats ge dessa resultat. Det finns grundad anledning antaga, att ännu bättre resultat kan uppnås med dessa medel.

Laboratorieförsöken har visat att det även finns andra injekteringsmedel med förutsättningar att ge likvärdiga eller bättre tätningsresultat.

3.2 Inträngningsegenskaper

Försöken har visat att man med sandpelar- och spaltförsök kan kartlägga olika injekteringsmedels inträngningsegenskaper såväl i relativa som absoluta termer. Spridningen i erhållna individuella värden är dock t. v. mycket stor.

De laboratoriemässigt bestämda inträngningsegenskaperna återspeglas väl i resultaten från fältförsök med täthetsinjektering av tunnlrar.

Sandpelarförsöken är lämpliga som standardprovmetod på grund av sin enkelhet och goda reproducerbarhet. Spaltförsöken har gjort det möjligt att erhålla en modellfaktor för sandpelarförsöken, men de är däremot inte lämpliga som standardprov. Det vore värdefullt att undersöka om inte spaltförsöken skulle kunna ersättas med sandpelarförsök på grova sandfraktioner.

3.3 Vattenförlustmätningar

Försöken med tunnelinjektering har gett möjlighet att studera sambandet mellan de rutinmässigt bestämda vattenförlusterna i injekteringshålen och de senare i bergmassan från samma hål injekterade volymerna injekteringsmedel. Man finner inom hela det undersökta intervallet $5 \cdot 10^{-3}$ - 1 l/min. m. atö en linjär proportionalitet, ehuru med stor spridning.

Vattenförlusterna synes således vara en utmärkt indikator på möjligheten att injektera en bergmassa även vid mycket små sprickvidder, dvs. ner till $d \approx 10^{-2}$ mm.

3.4 Om fältförsök

Erfarenheterna från det genomförda fältförsöket - i relativt liten skala - med injektering av tunnel visar att denna typ av försök är både tidsödande och dyrbara. Dessutom är det utomordentligt svårt att få tag i lämpliga försöksobjekt som får disponeras erforderlig tid.

De här redovisade försöken är ju mycket begränsade - de om-

fattar bl. a. bara två injekteringsmedel - och får snarast betraktas som pilotförsök för att fastlägga de kemiska injekteringsmedlens möjligheter på ett någorlunda invändningsfritt sätt. Mycket mera försöksverksamhet behövs innan man undersökt dessa medels möjligheter, begränsningar och lämpliga användningsområden.

Vi anser, att sådana fältförsök i fortsättningen bör utföras i samband med pågående tunnelbyggande. När en byggherre finner, att hans tätningsproblem inte kan lösas annat än med kemiska injekteringsmedel, bör anslag omedelbart kunna utgå för att på ett kompetent sätt kunna dokumentera, mäta och utvärdera förutsättningar, arbetsmetoder och resultat.

4 AKTUELLA FORSKNINGSUPPGIFTER

Under avsnitt 3 har behov av viss forskning berörts. En fullständigare redovisning av aktuella forskningsuppgifter på detta område borde omfatta följande:

- a) Inventering av alla förekommande kemiska injekteringsmedel för berg med egenskaps- och kostnadsredovisning. Inträngningsegenskaperna bör testas med i varje fall sandpelarförsök B 0, B 1 och B 2.
- b) Sandpelarförsök med grövre sandfraktioner bör utföras för att undersöka om sådana prov kan ge entydig korrelation till spaltförsök och ersätta dessa.
- c) En serie försök i olika bergtyper bör utföras för att undersöka sambanden mellan vattenförlust, injekteringstryck, injekteringstid och injekterad volym för olika injekteringsmedel, som egenskapsbestämts. Härigenom skulle bättre underlag för erforderliga hålavstånd kunna erhållas.
- d) I samband med keminjektering i tunnlar under utbyggnad bör kompetent planläggning, mätning och uppföljning kunna bekostas av forskningsanslag "på avrop". Sannolikt kan man endast på detta sätt bygga upp en tillförlitlig och väl-dokumenterad erfarenhet från praktiken, dvs. från fältförsök i full skala.

5 NOMENKLATUR

I föreliggande rapport har injektering med olika slag av här-dande lösningar sammanfattats under den i dag vanligen använda benämningen "kemisk injektering" eller "keminjektering". Detta är en fråga från många synpunkter otillfredsställande och inadekvat benämning.

Vi finner det lämpligt, att i detta sammanhang, innan "kem-injekteringen" blivit en mera allmän metod, diskutera en lämpligare nomenklatur.

I engelskt språkbruk har ordet "resin grouting" (egentligen = hartsinjektering) kommit att bilda en samlande benämning för injektering med hårdande lösningar. Denna benämning förefaller att vara lika inadekvat som "keminjektering".

Vi framlägger följande förslag till diskussion:

Karaktäristik		Exempel
Under injektering	Efter injektering	
Partikelinjektering	Hårdnande	Cement
	Icke hårdnande	Bentonit
Lösninginjektering	Hårdnande	Stabilodur C 75 Geoplast 45
	Icke hårdnande	Asfalt

Givetvis kan kombinationer av de olika grupperna förekomma, t. ex. hårdnande partikel-lösninginjektering då cement-bentonitblandning tillsatts med plastpreparat, Wittke (1969).

6. REFERENSER

- Ahlsell & Ågren AB, 1966, En bok om sand, Stockholm.
- Alberts, C., 1973, Förinjektering av berg med cement och kemiska medel (BeFo) Bergmekanikdag 1973, Stockholm, s. 285-301.
- Bergman, S.G.A., Lindman, K. och Söderman, P., 1970, Tunneltätning. Injekteringsmedels inträngning i sand och smala spalter (Statens råd för byggnadsforskning) Rapport 45, Stockholm.
- Broms, B., 1973, Grundvattensänkning - ett geotekniskt problem, Väg- och vattenbyggaren, 6, 1973, s. 594-597, Stockholm.
- Morfeltdt, C.O., 1967, Problem med vatten vid tunneldrivning i berg (IVA Bergmekanikkommitté) Diskussionsmöte 3. 3. 1967, s. 21, Stockholm.
- Morfeltdt, C.O., 1969, Significance of groundwater at rock constructions of different types (Intern. Soc. for Rock Mechanics) Symposium Large Permanent Underground Openings, Oslo 1969, s. 305-317.
- Morfeltdt, C.O., 1973, Bergrums förstärkning och tätning vid lagring av kalla och varma media (BeFo) Bergmekanikdag 1973, Stockholm, s. 257-268.
- Morfeltdt, C.O., Nordin, P.O., Roosaar, H., 1967, Byggnadsgeologi - Bebyggelseplanering med hänsyn till den geologiska jämvikten. Byggmästaren, 6, 1967. (Även Hagconsult Publ. 13:67), Stockholm.
- Morfeltdt, C.O., Hultsjö, S., 1973, Liten droppe stjälper ofta stor stad. Väg- och vattenbyggaren, 6, s. 601-604, Stockholm.
- Snow, D.T., 1966, Three-hole pressure test for anisotropic foundation permeability. Felsmechanik und Ingenieurgeologie 4, Nr. 6, pp. 298-316.
- Wittke, W., 1969, Neues Verpressen von klüftigen Fels mit Pasten auf der Basis von Zement. VDI Zeitschrift 111, Nr. 22, pp. 1568-1575.

R25: 1975

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag C 449: 2—3 från
Statens råd för byggnadsforskning till Sten G.A. Bergman.**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Grupp: konstruktion**

Pris: 19 kronor + moms