

Rapport

R45:1970

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

**Tunneltätning.
Injekteringsmedel-
inträngning i sand
och smala spalter**

Sten G. A. Bergman

Byggforskningen

Tunneltätning. Injekteringsmedels inträngning i sand och smala spalter

Sten G. A. Bergman

Metoden att göra otäta bergpartier mindre genomsläppliga för vatten genom att pressa in tätande material i sprickor och slag – injektering – har sedan länge tillämpats. Oftast har man cement som injekteringsmedel. Cementinjektering är en ganska rutinmässig operation vid olika slags grund- och anläggningsarbeten.

Erfarenheterna visar emellertid att man endast i undantagsfall kan uppnå en fullgod tätning genom cementinjektering. Även om man ofta talar om att "täta berg" genom cementinjektering är det ett faktum, att det tekniskt möjliga målet med denna metod är begränsat till att minska vattenströmningen till värden som i många fall anses godtagbara.

Under senare år har bergtunnlar blivit allt vanligare i urbaniserade områden – för tunnelbanor men framför allt ledningstunnlar för avlopp, kablar e.d. Vid tätbebyggelse, där praktiskt taget allt regnvatten avleds via avloppssystem, kan tunnlar genom utdränering av berggrunden ge upphov till stora grundvattensänkningar som kan leda till omfattande skador på ovanliggande bebyggelse. Till bilden hör också att vatteninläckning i tunnlar kan tolereras ur användarens synvinkel och kan i vissa fall vara obetydlig; trots detta får man på längre sikt en icke önskvärd grundvattensänkning.

Cementinjektering ger här ingen till-

fredsställande lösning utan krav måste ställas på att utveckla injekteringsmetoder med större möjlighet att täta fina bergsprickor. IVAs Bergmekanikkommitté har lagt fram ett forskningsprogram som syftar till att utveckla sådana metoder. Statens råd för byggnadsforskning har tillsammans med Hagconsult AB och Stabilator AB bidragit ekonomiskt för att genomföra en första etapp av detta program.

I denna redovisade etapp avsåg man att undersöka vissa injekteringsmedels strömnings- och tätningsgenskaper i fina bergsprickor och sand. Undersökningen omfattade fem olika injekteringsmedel, vilkas blandningsförhållanden och egenskaper redovisas i TABELL 1. Två olika försöksserier genomfördes:

Injekteringsmedels inträngning i sand
Injekteringsmedels inträngning i smala spalter (0,05–0,4 mm breda).

Inträngning i sand

Försöken utfördes vid Stabilators laboratorium. Sandpelare 200 mm långa bildades av sand som vibrerats i glasrör till viss packningsgrad. Såväl rundkornig och kantig sand som krossprodukt användes. För huvudparten av försöken användes siktade fraktioner med kornstorlek 0,10–0,15 mm och 0,15–0,25 mm. Förhållandena med torr respektive fuktig sand jämfördes.

Byggeforskningen Sammanfattningar

R45:1970

Denna rapport avser anslag C 449 från Statens råd för byggnadsforskning till Sten G. A. Bergman.

Tunnlar i urbaniserade områden utförs i ökad utsträckning, t.ex. tunnelbanor och ledningstunnlar. Eftersom markytan i sådana områden till största delen avvattnas genom avlopp, kan tunnlar dränerande effekt sänka grundvattenytan med skador på hus och anläggningar som följd.

Endast effektiv tätning av aktuella tunnlar kan lösa detta problem. Härvid räcker inte den vanliga cementinjekteringen, vilken enligt erfarenhet inte tätar de finaste sprickorna. Försök har utförts för att undersöka olika injekteringsmedels framträngningsgenskaper i sand och i smala spalter, 0,05–0,4 mm breda. Injekteringstrycken har varit låga, 0,05–0,5 bar, och försöken har utförts vid rumstemperatur.

Försöken behöver dock kompletteras, framför allt vid lägre temperaturer. Vissa preliminära slutsatser förefaller emellertid kunna dras:

Med injekteringsmedel innehållande cement kan endast sprickor grövre än 0,5 à 0,6 mm tätas.

Med bentonit kan inträngning erhållas i sprickor ned till 0,1 mm, men ej i sprickor fyllda med finmaterial.

Med epoxi- eller polyesterpreparat erhålls inträngning i mycket fina sprickor och i finmaterial.

TABELL 1. Använda injekteringsmaterial – egenskaper vid +20 till +25° C.

Material	Blandningsförhållande efter vikt	Dynamisk viskositet (centipois) cP	Gelningstid för 50 g h
Limhamns snabbcement : H ₂ O	2 : 1	≈1 000	–
Limhamns snabbcement : Bentonit HC–M : H ₂ O	4 : 1 : 20	≈700	–
Bentonit HC–M : H ₂ O	1 : 20	≈3 000	–
Epoxi IB-Pox 3 TM, Komponent A : komponent B	1 : 1	150–230	7
Polyester Engwall – Hartz : härdare : styrén : promotor	100 : 4 : 10 : 0,3	200–250	0,5

UDK 624.191.8
624.138.24
699.82

Sammanfattning av:

Bergman, S, G, A, 1970, Tunneltätning. Injekteringsmedels inträngning i sand och smala spalter. (Statens institut för byggnadsforskning.) Stockholm. Rapport R45:1970. 68 s., ill. 13 kr.

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

Abonnemangsgrupp: (k) konstruktion.

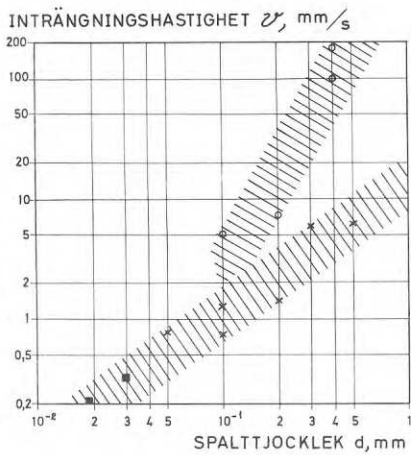


FIG. 1. Diagrammet visar de från spaltförsöken erhållna inträngningshastigheterna som funktion av spaltbredden. Omräknade medelvärden från sandpelarförsöken med epoxipreparaten visar sig väl ansluta till spaltförsöken.

Det med färgämne tillsatta injekteringsmedlet påfördes de vertikala sandpelarnas överyta under tryck varierande från 0,05 till 0,2 bar. Injekteringsfrontens läge vid olika tider registrerades genom färgfotografering och med rutnät som bakgrund.

Injekteringsmedel innehållande cement gav ingen som helst inträngning. Bentonit gav ca 10 mm inträngning under någon minut – därefter ingen inträngning. Epoxi- och polyesterpreparaten gav 50–160 mm inträngning under 1 à 2 timmar respektive 20

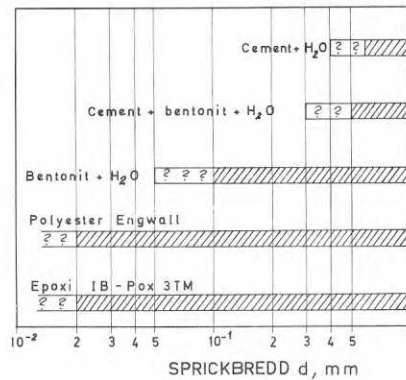


FIG. 2. Försöksmaterialet omfattar endast försök vid rumstemperatur. Trycket har dessutom endast i mindre omfattning varierats. Med reservation för dessa begränsningar kan försöksresultaten tolkas enligt diagrammet beträffande tillämpning för öppna sprickor.

min, beroende på sandtyp, pelardiameter, tryck m.m.

Inträngning i smala spalter

Försöken utfördes vid Hagconsults laboratorium. Den provningsanordning som gav tillfredsställande resultat bestod av planparallella glasplattor 500×650 mm, vilka hölls på önskat spaltavstånd med distansorgan av mässing, d 10 mm. Glasplattorna var av slipat spegelglas, 15 mm tjockt.

Vid försöken med plastpreparaten kompletterades provningsanordningen med två 6 mm tjocka glasplattor som

spalt. Dessa kasserades efter varje försök.

Glasplattorna hölls ihop längs kanten med skruvvingar. Distansbleck tätade längs långsidorna och ena kortsidan.

Injekteringsmedlet fördes in i en punkt i närheten av den tätade kortsidan. Injekteringsfrontens successiva läge som funktion av tiden bestämdes genom färgfilmning och med rutnät som bakgrund. Trycket var normalt 0,5 bar.

Injekteringsmedel innehållande cement gav ingen inträngning i spalter smalare än 0,3 – 0,4 mm. Däremot kunde bentonit och framför allt epoxipreparaten tränga in i spalter, 0,1 respektive 0,05 mm breda.

Ytterligare försök

För bergssprickor som är fyllda med finmaterial kan endast plastpreparaten ge möjlighet till inträngning och tätning. För framträngningsmöjligheterna i fina sprickor smalare än ca 0,3 mm eller i sand är injekteringsmedlets finkornighet och ytaktiva egenskaper av stor betydelse. Däremot synes den dynamiska viskositeten vara av mindre betydelse, jfr TAB. 1 och FIG. 1.

Försöken kommer att kompletteras med försök med ökad variation av tryck och temperatur samt eventuellt försök med andra injekteringsmedel. Förberedande fältförsök i små tunnlar och med kombinationer av de undersökta injekteringsmedlen kommer sedan att företas.

Tunnel sealing. Penetration of injection compound into sand and narrow cracks

Sten G. A. Bergman

For years, construction engineers have been reducing the perviousness of rock to water by pressing a sealant into cracks and fissures — a method known as injection. Cement is normally used as the injection material. Cement injection has become quite routine on many types of excavating and civil engineering projects.

However, experience shows that only in exceptional cases can a satisfactory seal be provided by means of cement injection. Although rock that has undergone cement injection is frequently referred to as "impervious", the fact nonetheless remains that from a technical point of view the results provided by this method are limited to reducing the rate of water flow to what is often considered acceptable.

During recent years more and more tunnels are being driven through rock beneath urban areas — for underground transportation systems and, in particular, for tunnels carrying drainage pipes, cables and the like. In built-up areas where virtually all rainwater is drained off via the sewerage system, these tunnels can drain water from bedrock, thus lowering the groundwater level considerably. This, in turn, can lead to serious damage in buildings founded on clay or sand deposits in depressions in the bedrock.

It should also be noted that while the tunnel user can tolerate a certain amount of water leakage, and leakage is frequently so slight as to seem insignificant, the groundwater will nonetheless drop to undesirable levels in the long run.

In such situations, cement injection fails to provide a satisfactory solution. Instead, demands must be made for the development of injection methods that are better able to seal off fine cracks in the rock. The Committee on Rock Mechanics at the Royal Swedish Academy of Engineering Sciences has drawn up a research program intended to develop such methods. The National Swedish Institute for Building Research, together with Hagconsult AB and Stabilator AB, has helped to subsidize the first stage of this program.

The program stage being reported here involved an investigation into the flow and sealing characteristics of certain injection materials in fine rock cracks and sand. Five different materials were tested. The mixes used and the characteristics observed appear in TABLE 1. Two series of experiments were conducted:

Penetration of injection material into sand

Penetration of injection material into narrow openings (0.05–0.4 mm wide).

TABLE 1. Injection materials used — characteristics at +20 to +25°C.

Mixture ingredients	Mixture ratio by weight	Dynamic viscosity (centipoise) cP	Setting time for 50 g hours
Limhamn's quick-setting cement Water	2 : 1	≈1 000	—
Limhamn's quick-setting cement Bentonite HC-M Water	4 : 1 : 20	≈700	—
Bentonite HC-M Water	1 : 20	≈3 000	—
Epoxy IB-Pox 3 TM Ingredient B	1 : 1	150–230	7
Polyester Engwall resin Hardening agent Styrene Accelerator	100 : 4 : 10 : 0.3	200–250	0.5

National Swedish Building Research Summaries

R45:1970

This report refers to Grant C 449 from the National Building Research Council to Sten G. A. Bergman.

More and more tunnels are being driven beneath urban areas — for, among other purposes, underground transportation systems and service lines (water, gas, electricity, telecommunications etc.). Since, in these areas, the surface is dewatered largely through man-made drainage systems, the drainage effect of the tunnels can lower the groundwater level, thus damaging buildings and other works.

The only way to solve this problem is to provide an effective seal in the tunnels in question. Ordinary cement injection will not suffice — experience shows that it does not seal the finest cracks. Experiments have been conducted to investigate the penetration characteristics of a number of different injection materials in sand and in narrow openings measuring 0.05 to 0.4 mm wide. The injection pressure was kept low, between 0.05 and 0.5 bar, and the experiments were conducted at room temperature.

Further experiments are needed, particularly at lower temperatures. However, it seems evident that certain preliminary conclusions can be drawn:

Injection materials containing cement cannot seal cracks narrower than 0.5 to 0.6 mm.

Injection materials containing bentonite can penetrate cracks as narrow as 0.1 mm, but not cracks filled with fine material.

Epoxy or polyester compounds can penetrate very fine cracks as well as cracks filled with fine material.

UDC 624.191.8
624.138.24
699.82

Summary of:

Bergman, S. G. A., 1970, *Tunneltätning. Injekteringsmedels inträngning i sand och tunna spalter. [Tunnel sealing. Penetration of injection compound into sand and narrow cracks] (Statens institut för byggnadsforskning.) Stockholm. Rapport R45:1970. 68 p., ill. 13 Sw. kr.*

Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, S-111 84 Stockholm, Sweden.

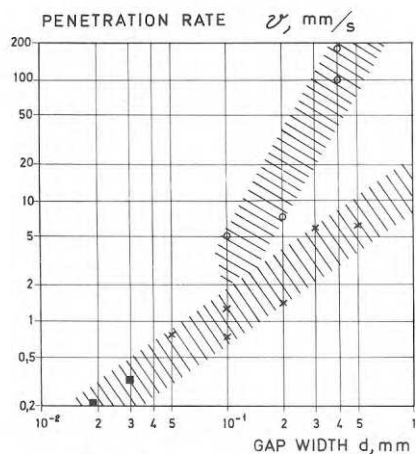


FIG. 1. This diagram shows penetration rates as a function of opening (gap) widths as obtained from the experiments. Average experimental values obtained in sand columns using epoxy compounds (converted to equivalent opening values) show close agreement.

Penetration into sand

These experiments were carried out at the Stabilator AB laboratory. Sand columns 200 mm long were formed using sand vibrated in glass tubes to a certain degree of compaction. Spherical-grain sand, angular-grain sand and crushed sand were used. The major portion of the experiments were carried out using graded sand having grain sizes of 0.10–0.15 mm and 0.15–0.25 mm. The results obtained using dry and moist sand were compared.

The dyed injection material was applied to the top surface of the vertical sand columns under pressures that varied from 0.05 to 0.2 bar. The position of the injection front at different times was recorded by means of colour photographs taken against a background grid.

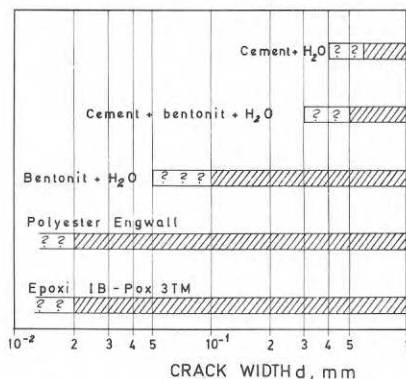


FIG. 2. All experiments were conducted at room temperature. Moreover, the pressure was varied to a very limited degree. Keeping in mind these two restrictions, an interpretation of the test results indicates that they can be applied to open cracks as shown in the diagram.

Injection materials containing cement did not penetrate at all. Injection materials containing bentonite penetrated to a distance of about 10 mm in the course of several minutes – after which there was no further significant penetration. Epoxy compounds penetrated to a distance of 50–160 mm during 1 or 2 hours, depending on the type of sand, the diameter of the column, the pressure, etc. Polyester compounds penetrated the same distance in 20 minutes.

Penetration into narrow openings

These experiments were carried out at the Hagconsult AB laboratory. After trying out different test apparatus, it was found that satisfactory results could be obtained using plane-parallel glass plates measuring 500 by 650 mm. The desired opening was obtained using brass spacers

10 mm in diameter. Polished plate glass 15 mm thick was used.

For experiments made involving a plastic compound, the apparatus was supplemented with two 6 mm thick glass plates used to provide the opening. These were thrown away after each experiment.

The glass plates were held together at their edges by means of screw clamps. Long blocks were used to seal the long sides and one short side.

The injection material was introduced at a point close to the sealed short side. The movement of the injection front as a function of time was recorded using colour films taken against a background grid. Normally, the pressure was 0.5 bar.

An injection material containing cement did not penetrate at all in openings narrower than 0.3–0.4 mm. On the other hand, mixes containing bentonite and, particularly, epoxy compounds, were able to penetrate into openings 0.1 and 0.05 mm wide respectively.

Additional experiments

Only plastic compounds are able to penetrate and seal rock cracks filled with fine material. Grain fineness and surfactant properties have important influences on the ability of injection materials to penetrate in sand and in cracks narrower than about 0.3 mm. Dynamic viscosity, on the other hand, appears to have less importance. See TABLE 1 and FIG. 1.

These experiments will be supplemented by others involving wider pressure variations and temperature variations, and possibly other injection materials. Preliminary field experiments in small tunnels using combinations of the injection materials thus far investigated will be conducted sometime in the future.

Rapport R45:1970

TUNNELTÄTNING. INJEKTERINGSMEDELS INTRÄNGNING I
SAND OCH SMALA SPALTER

TUNNEL SEALING. PENETRATION OF INJECTION
COMPOUND INTO SAND AND NARROW CRACKS

av Sten G. A. Bergman

Kjell Lindman

Pehr Söderman

Denna rapport avser anslag C 449 från Statens råd för byggnadsforskning till tekn. dr Sten G. A. Bergman. Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

Rotobekman AB, Stockholm 1971, 10 8545 0

INNEHÅLL

FÖRORD	5
BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	6
1 PROBLEMSTÄLLNING	7
2 ANVÄNDA INJEKTERINGSMATERIAL	9
3 INTRÄNGNING I SANDPELARE	13
3.1 Försöksanordningar	13
3.2 Försöksresultat	21
3.3 Kommentarer	25
4 INTRÄNGNING I SMALA SPALTER	35
4.1 Försöksanordningar	35
4.2 Försöksresultat	40
4.3 Kommentarer	51
5 DISKUSSION	54
5.1 Anknytning sandpelar - spaltförsök	54
5.2 Minsta spalttjocklek för inträngning	57
5.3 Viskositet - ytaktivitet	59
5.4 Tryck	60
5.5 Temperatur	60
6 SLUTSATSER	61
7 FORTSATT FÖRSÖKSVERKSAMHET	64
8 LITTERATUR	65

FÖRORD

IVA:s Bergmekanikkommitté, arbetsgrupp 5 (Bergets förstärkning) tog 1967 upp frågan om möjligheterna att täta bergrum och tunnlar mot små vattenläckage till diskussion. En kommitté bestående av direktör Carl-Olof Morfeldt, Hagconsult AB och direktör Claes Alberts, Stabilator AB, redovisade problemets aktualitet och det tekniska kunskapsläget samt föreslog att forskningsverksamhet borde påbörjas. Bergmekanikkommittén bedömde att detta projekt hade hög angelägenhetsgrad.

På basis av herrar Alberts och Morfeldts förslag utarbetades en projektbeskrivning för forskningsuppgiften "Tätning av berg mot små vattenläckage för förhindrande av grundvattensänkningar". Som första etapp i denna forskningsuppgift förutsågs en experimentell undersökning av olika injekteringsmaterials strömnings- och tätningsegenskaper i tunna sprickor och fin-korniga material.

Statens Råd för Byggnadsforskning beviljade den 6. 6. 1968 50 000:- under rubriken "Tunneltätning" (forskningsanslag nr C 449) för forskningsprojektets första etapp. Härvid förut-sattes att de båda företagen, Hagconsult AB och Stabilator AB, som förklarat sig intresserade att ekonomiskt och personellt stödja projektet, tillsammans bidrog med minst samma belopp. Den totala ekonomiska ramen för projektets första etapp har således utgjort 100 000:-.

Försöksverksamheten, som påbörjades hösten 1968 och med diverse avbrott pågick till december 1969, har efter hand re-dovisats inför och diskuterats med IVA:s Bergmekanik-kommitté, arbetsgrupp 5. Särskilt tack vill förf. rikta till gruppmedlemmarna Alberts och Morfeldt för välvilligt stöd och intresse vid försökens genomförande.

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

a	sandpelares diameter
d	spalttjocklek, sprickvidd
d_f	fiktiv spalttjocklek, se avsnitt 5.1
v	injekteringsfrontens inträngningshastighet
D	diameter hos sfäriska korn i ideal sand, se avsnitt 5.1
D_m	medelvärde av övre och undre kornstorleks- gräns för "rensiktad" sandtyp
B 1	} sandtyper enligt tabell 4
B 2	
L 0	
L 1	
L 2	
F	
cP	centipois = $0,001 \text{ Ns/m}^2$ mätstorhet för dyna- misk viskositet

1 PROBLEMSTÄLLNING

Metoden att göra otäta bergpartier mindre genomsläppliga för vatten genom att pressa in tätande material i sprickor och slag (injektering) har använts sedan slutet på 1800-talet.

Härvid användes nästan uteslutande cement som injekteringsmedel. Vid anläggningsarbeten i berg, t. ex. vid dammanläggningar, tunnlar o. dyl. är numera cementinjektering en tämligen rutinmässig operation.

Erfarenheterna visar att man endast undantagsvis med cementinjektering kan uppnå en fullgod tätning. Detta är också naturligt eftersom cement är ett tämligen grovkornigt material, som inte har förutsättningar att tränga in i de finaste sprickorna. Härtill kommer att man på längre sikt alltid riskerar urlakning av kalken i cementen, varvid tätningseffekten nedgår.

Även om man ofta talar om att "täta berg med cementinjektering" är det således ett faktum att det tekniska uppnåeliga målet med denna metod är begränsat till att minska vattenströmningen till värden, som vid många tillämpningar anses tolerabla.

Under senare år har bergtunnlar blivit allt vanligare i urbaniserade områden - tunnelbanor och framför allt ledningstunnlar för avlopp, kablar m. m. Särskilt under tätbebyggelse där praktiskt taget allt regnvatten avledes via avloppssystem, kan sådana tunnlar få en dränerande effekt med besvärande grundvattensänkningar som följd. Vatteninläckningen i tunnlar kan anses vara mycket obetydlig och fullt tolerabel ur tunnelbyggnadens synpunkt, men grundvattensänkningen kan ändå på sikt vålla stora skador på ovanliggande byggnader, t. ex. genom sättningar i gatumark och hos källargolv, genom brustna rör och kablar, hussprickor.

Vid "lerbassänger" kan stora skador uppstå, när t. ex. träpålar och rustbäddar genom dräneringen kommer ovanför grundvattenytan och härigenom ruttnar.

En rad exempel på denna typ av skador finns belagda, t. o. m. så tidigt som 1912 då Holmenkollenbanan i Oslo drogs i berg-tunnel invid Slottsparken, Morfeldt (1967) och Morfeldt, Nordin, Rosaar (1967).

Som redan antytts kan dessa dräneringseffekter inte förhindras med cementinjektering - i bästa fall kan man uppnå en viss fördröjningseffekt. På grund av den ringa ytvattentillrinningen kan grundvattensänkningen åstadkommas även genom läckage av relativt små vattenmängder genom de fina spricksystem eller fyllda spalter, där cementet inte kan ge tätningseffekt.

Det finns emellertid en rad andra injekteringsmaterial, som borde kunna ge bättre och säkrare tätning av fina spricksystem, t. ex. bentonit, vattenglas, vissa härd- och termoplaster och epoxiplaster. Sådana material har provats sporadiskt i praktiska tillämpningar, men det föreligger inte så mycket objektiva och jämförande data att projekterande tekniker har möjlighet att avgöra dessa materials tekniskt-ekonomiska berättigande i olika situationer.

En praktiskt komplicerande aspekt av problemet är också, att tunnelbyggaren i regel är mycket måttligt intresserad av dyrbara injekteringar, vilka dessutom mycket ofta allvarligt stör bergsprängningens rytm. Mindre vattenläckage ter sig ur tunnelbyggarens snäva synpunkter oväsentliga. Det är först om man kan göra sannolikt att uteblivna tätningsåtgärder kan medföra stora följdkostnader, som man kan räkna med aktivt intresse från tunnelprojektörens och byggarens sida.

Det större forskningsprojekt, av vilket den här redovisade undersökningen endast täcker en del av den första ursprungliga etappen, har till syfte att söka få fram objektiva och relevant tekniskt underlag för bedömning och föreskrivande av lämpliga metoder att täta berg mot små vattenläckage. Man har därvid förutsett följande undersökningsetapper:

- a) Undersökning av olika injekteringsmaterials strömnings- och tätningsegenskaper i tunna sprickor och i sand under bl. a. olika tryck och temperatur.
- b) Utprovning av praktiska blandnings- och injekteringsförfaranden för lämpliga material.
- c) Praktiska prov i fält med gängse eller modifierade injekteringsutrustningar. Jämförelse med cementinjektering i fråga om resultat och kostnader.
- d) Framtagning av lämpliga arbetsbeskrivningar.

I denna rapport redovisas försök som utförts med olika injekteringsmaterials framträngningsförmåga i tunna spalter och i sandpelare. Spalttjocklek, finkornighet och tryck har varierats i viss utsträckning, däremot inte temperatur.

2 ANVÄNDA INJEKTERINGSMATERIAL

Enligt det preliminära försöksprogrammet avsåg man att undersöka strömningsegenskaperna hos blandningar innehållande cement, bentonit, härd- och termoplaster, epoxiplaster och vattenglas.

Försöken visade sig emellertid efterhand dels bjuda på väsentligt större metodiksvårigheter, dels kräva betydligt större tid och materialkostnader än som från början förutsetts.

Det preliminära programmet här därför måst beskäras, och de provade injekteringsblandningarna framgår av tabell 1.

Den dynamiska viskositeten (enl. Brookfield) bestämdes för de olika blandningarna på Stabilator AB:s laboratorium och anges i tabell 1 i cP. Som praktisk jämförelse kan nämnas att glycerin vid rumstemperatur anges ha en dynamisk viskositet ca 1100 cP.

Vid bestämning av viskositeten för cement + H₂O användes omrörare med hastigheten 900 varv/min och dispergeringstid 2 min. Vid bentonitblandningar användes 10 min dispergeringstid.

Vid tillredning av cement + bentonit + H₂O tillsattes alltid bentoniten sist. Den ordningsföljd som användes kan spela stor roll för blandningens viskositet, när bentonit är en ingående komponent.

Innan man bestämde sig för att välja Bentonit HC typ M (HC = Hagconsult) gjordes vissa jämförande prov beträffande viskositeten hos dels HC-M, dels Stabilator typ M och Yellowstone W vid olika blandningsförhållanden. Tabell 2 visar de resultat som erhöles. Bentonit HC-M valdes därför att den synes ge hög viskositet vid lågt värde på blandningsförhållande Bentonit = H₂O, vilket antogs påverka inträngningsförmågan gynnsamt.

En provserie för bestämning av viskositeten hos cement: H₂O-blandningar med olika blandningsförhållanden utfördes också. Resultaten framgår av tabell 3. Som framgår av tabell 1 valdes blandningsförhållandet 2:1 vid strömningsproven.

IB-Pox 3TM, se tabell 1, är ett injekteringspreparat på epoxibas, vilket tidigare med viss framgång använts för vissa praktiska tätningsuppgifter av Stabilator AB. Komponent A utgör själva epoxihartset modifierat med vissa viskositetsänkande tillsatser. Komponent B är en aromatisk amin, som fungerar som härdare. Den i tabell 1 angivna gelningstiden 7 h avser den tid efter vilken en massa på 50 g vid rumstemperatur stelnat så mycket, att den icke kan användas för injekteringsändamål.

Polyester Engwall är ett av Ingenjörsfirma Pehr Engwall salufört härdplastpreparat för injektering, se tabell 1. Detta provades endast vid sandpelarförsöken.

Då man av den ekonomiska ramen tvingades begränsa antalet injekteringsmaterial, var det naturligt att i första hand

TABELL 1. Använda injekteringsmaterial - egenskaper vid +20° till +25°C.

Material	Blandningsförhållande efter vikt	Dynamisk viskositet (centipois) cP	Gelningstid för 50 g h
Limhamns snabbcement: H ₂ O	2:1	≈1 000	—
Limhamns snabbcement: Bentonit HC-M:H ₂ O	4:1:20	≈700	—
Bentonit HC-M:H ₂ O	1:20	≈3 000	—
Epoxi IB-Pox 3 TM, Komponent A : komponent B	1:1	150-230	7
Polyester Engwall - Hartz : härdare: styrén: promotor	100:4:10:0.3	200-250	0.5

TABELL 2. Dynamisk viskositet (cP) enligt Brookfield för olika bentonitsorter vid varierande blandningsförhållanden bentonit:H₂O. Temperatur +20°C.

Bentonit typ	Blandningsförhållande efter vikt		
	1:20	1:13,4	1:10
Stabilator typ M	≈ 3000	≈ 8000	—
Hagconsult typ M (HC-M)	≈ 3000	≈ 11000	—
Yellowstone W	—	≈ 100	≈ 2500

TABELL 3. Dynamisk viskositet (cP) enligt Brookfield för olika blandningsförhållanden Limhamns snabbcement:H₂O. Temperatur +20°C.

Limhamns snabbcement: H ₂ O (efter vikt)	Dynamisk viskositet cP
3,33:1	ca 6300
2,5:1	ca 2000
2:1	ca 1000
1,67:1	ca 800
1,43:1	ca 300

vattenglas skulle utgå. Då polyesterpreparatet vid sandproven före härdning visade mycket god överensstämmelse med epoxipreparatet, bedömdes polyestern kunna utgå ur spaltförsöken.

3 INTRÄNGNING I SANDPELARE

3.1 FÖRSÖKSANORDNINGAR

Försöken med inträngning i sandpelare utfördes vid Stabilator AB:s laboratorium. De "sandpelare" som användes vid dessa försök utgjordes av med sand fyllda glasrör. Sanden vibrerades under 30 s efter påfyllning för att säkerställa en god och från försök till försök likvärdig packningsgrad.

Vid alla försök var sandpelarens längd 200 mm. Pelardiametern, dvs. glasrörens innerdiameter, varierades 10, 20 resp. 50 mm. Dock utfördes de flesta försöken med 10 mm diameter.

Tre olika sandsorter ur Ahlsell & Ågrens(1966) sortiment användes:

- B = Baskarpsand nr 7. Detta är en naturprodukt med runda korn och en kornmedelstorlek 0,15 mm. Siktkurvor framgår av fig. 1. Sanden har en kvartshalt på 86,8 %. Glödgningsförlust endast 0,2 %.
- L = Lemundasand nr 9. Detta är en krossprodukt med 96,6 % kvartshalt. Glödgningsförlust 0,2 % och kornmedelstorlek 0,17 mm. Siktkurvor framgår av fig. 2.
- F = Fylesand nr 3. Detta är en tvättad naturprodukt med kantiga korn och kornmedelstorlek 0,31 mm. Kvartshalten är ca 99 % och glödgningsförlusten 0,1 %. Siktkurvor framgår av fig. 3.

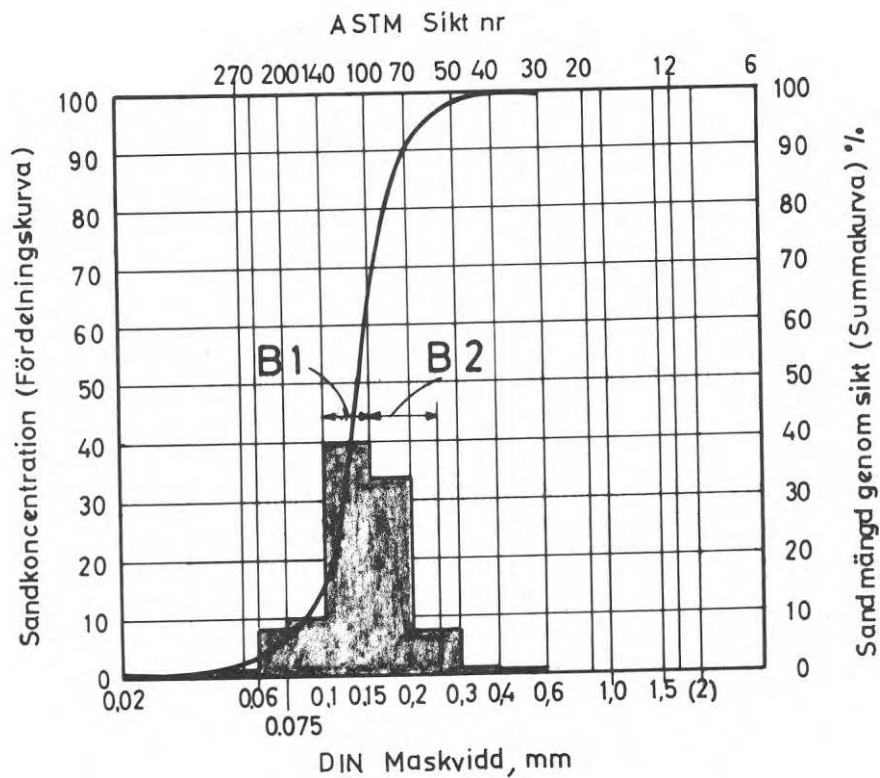


FIG. 1. Siktcurvor för Baskarpsand nr 7. De rensiktade fraktionerna B 1: 0,1 - 0,15 mm och B 2: 0,15 - 0,25 mm har markerats.

Grading curves for Baskarp sand No. 7. Gradings B 1 (0.1 to 0.15 mm) and B 2 (0.15 to 0.25 mm) are marked.

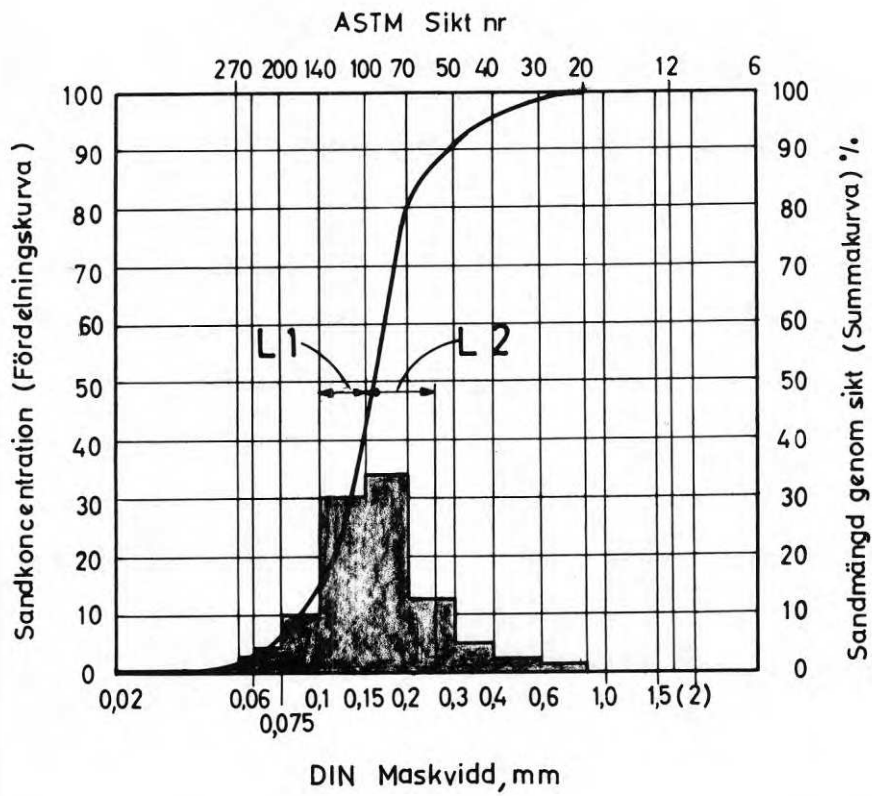


FIG. 2. Siktcurvor för Lemundasand nr 9. De rensiktade fraktionerna L 1: 0,1 - 0,15 mm och B 2: 0,15 - 0,25 mm har markerats.

Grading curves for Lemunda sand No. 9. Gradings L 1 (0. 1 to 0. 15 mm) and B 2 (0. 15 to 0. 25 mm) are marked.

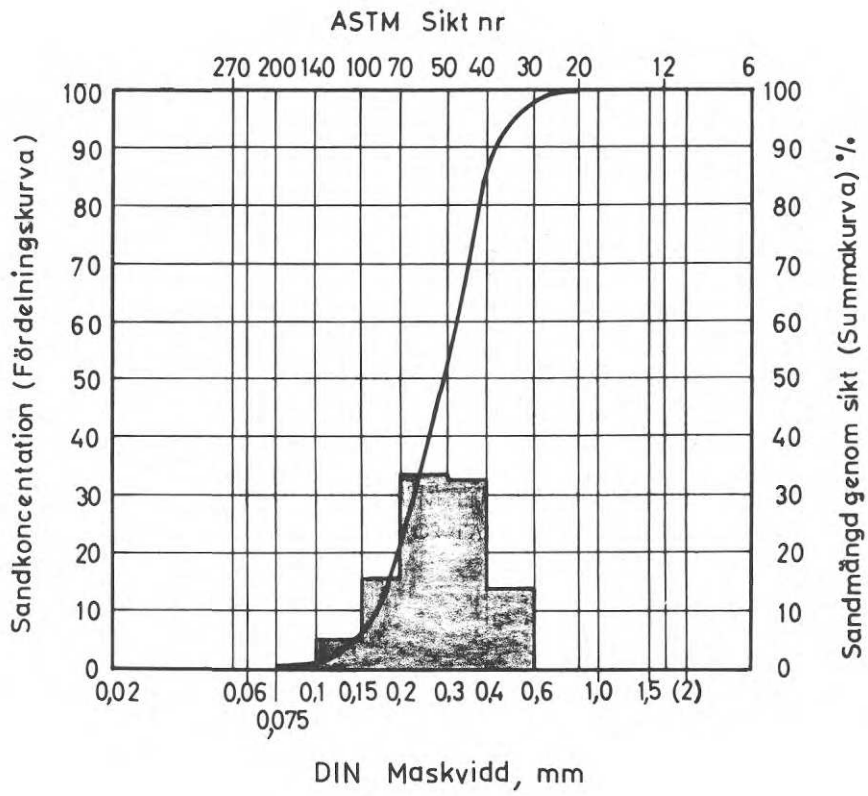


FIG. 3. Siktcurvor för Fylesand nr 3. Observera att finfraktionerna $< 0,1$ mm praktiskt taget helt saknas.

Grading curves for Fyle sand No. 3. Note that fine gradings < 0.1 mm are virtually lacking.

Avsikten med sandpelarförsöken var bl. a. att undersöka inträngningen vid olika grad av porositet hos sanden. Av Bas-karpsanden och Lemundasanden rensiktades därför kornfraktionerna 0,1 - 0,15 mm samt 0,15 - 0,25 mm, se fig. 1 och 2. Försöken genomfördes med användande av de sex varianter, som framgår av tabell 4.

Försöksanordningen med sandpelarna (glasrören) monterade vertikalt och parallellt på en med mm-rutpapper beklädd tavla framgår i frontalvy av fig. 4. Överst i varje sandpelare fanns tillledning för injekteringsmaterial. På tavlan fanns dessutom monterat ett tidtagningsur, en termometer samt plats för protokolldata.

Fig. 5 visar en sidovy av anordningen. Injekteringsmedlet i 500 ml E-kolvar står under avsett tryck (0,005, 0,1 resp. 0,2 bar) från en vattenpelare. Kolven står via slangar och glasrör i förbindelse med respektive sandpelare.

Försöken, där maximalt 8 sandpelare provades samtidigt, genomfördes enligt följande procedur.

De vibrerade sandpelarna monterades tillsammans med protokolldata. Viskositet och temperatur på använda injekteringsmedel mättes, varefter dessa överfördes till E-kolvarna, som placerades på magnetomrörare - se fig. 5. Injekteringsmedlen transporterades sedan under avsett tryck till sandpelarna på sådant sätt, att överytan på alla pelarna praktiskt taget samtidigt nåddes av injekteringsmedlen.

Injekteringsmedlen var färgade. Protokollföringen skedde med färgfotografering från en på stativ monterad kamera Canon FT med macro 1:3,5/50. Som film användes Kodachrome - IIA och Kodacolor - X. Intervallet mellan bildtagningarna bestämdes av den hastighet, med vilken inträngningen skedde.

TABELL 4. Sammanställning av använda sandsorter, kornfraktioner och korntyp.

Sandsort	Fraktion	Kornstorlek mm	Korntyp
Baskarpsand 7	B 1	0,1 - 0,15	Rund
Baskarpsand 7	B 2	0,15 - 0,25	Rund
Lemundasand 9	L 0	0 - 1,0	Kross
Lemundasand 9	L 1	0,1 - 0,15	Kross
Lemundasand 9	L 2	0,15 - 0,25	Kross
Fylesand 3	F	0,1 - 0,6	Kantig

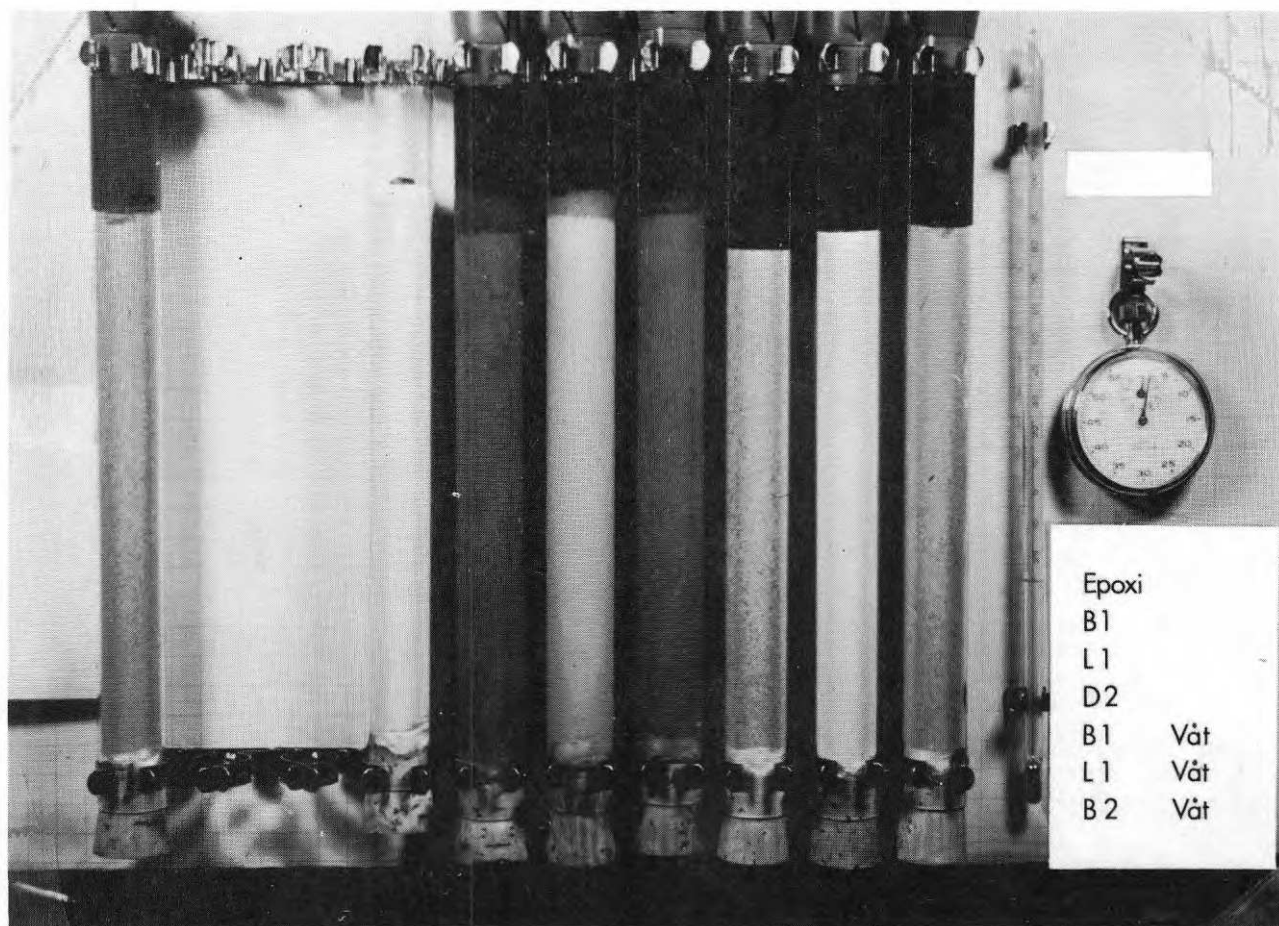


FIG. 4. Frontalvy av millimeterrutad monteringsstavla för sandpelare, termometrar, klocka och protokollsdata. Epoxipreparatets inträngningsdjup kan tydligt avläsas.

Front view of millimetre grid background used for sand columns, thermometers, clocks and report data. The penetration depth of the epoxy compound can be easily read.

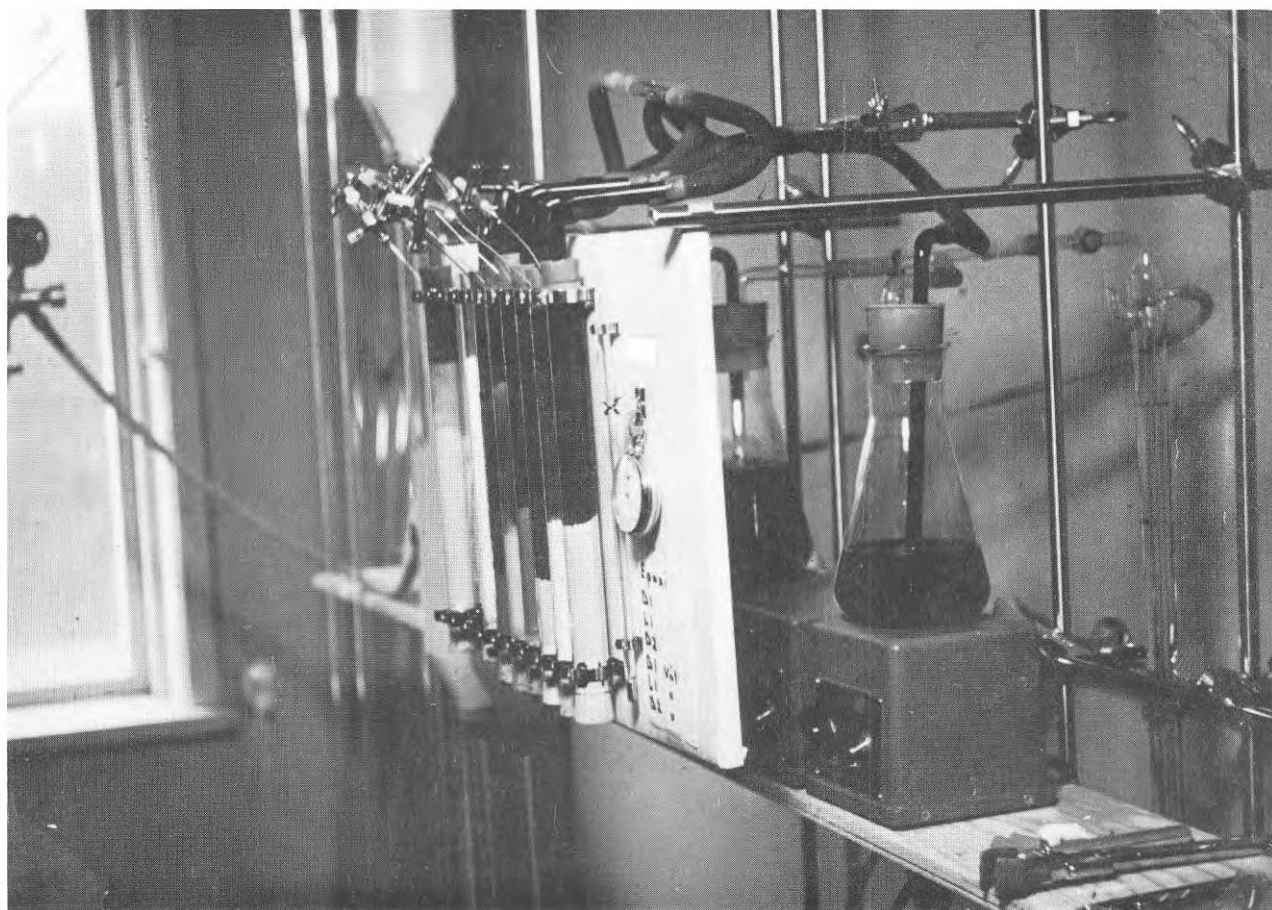


FIG. 5. Sidovy av försöksanordning med sandpelare. Kolvarna med injekteringsmedel står på magnetomrörare.

Side view of test apparatus with sand column. The injectors with injection compound are mounted on a magnetic stirrer.

3.2 FÖRSÖKSRESULTAT

Samtliga av de genomförda sandpelarförsöken har sammanställts i tabell 5 på ett sådant sätt, att man kan få en uppfattning om vilka faktorer, som varierats, och omfattningen av olika serier.

Som framgår av tabell 5 har huvuddelen av försöken utförts med tryck 0,1 bar och pelardiametern 10 mm. Vissa försök har utförts för att ge en uppfattning om tryckets resp. diameters inverkan. Inverkan av torr resp. fuktig sand har studerats tämligen genomgående i huvudförsöken.

Figur 6 visar inträngningen hos injekteringsmedlets front som funktion av tiden för epoxihartsen IB-Pox 3 TM vid tryck som varit 0,05, 0,1 resp. 0,2 bar. Två sandtyper av samma kornfraktion 0,1 - 0,15 mm har använts - B1 med runda korn och L1, som är en krossprodukt med kantiga korn, se tabell 4.

För att vinna tydlighet har de olika inträngningskurvorna fasförskjutits i tiden. Detta är ett genomgående representationsätt för sandpelarförsöken.

Figur 6 synes visa att vid torr sand och epoxi skillnaden i korntyp är oväsentlig för inträngningsförloppet.

Inverkan av trycket är påtaglig och förefaller vara ungefär likartad under inträngningsförloppet. De slutliga inträngningarna står i relation till varandra ungefär som tredje roten ur tryckförhållandet.

Figur 7 visar inträngning av bentonit i sandpelare av typ F, se tabell 4, vid varierande diametrar. Den största inträngningen erhålles vid den minsta diametern, 10 mm, vilket torde få tillskrivas glasrörsomkretsens inverkan. Eftersom huvudproblemställningen för hela undersökningen gäller tunna sprickor, ansågs det rimligt att lägga huvudförsöken vid pelardiametern 10 mm.

INTRÄNGNING, mm

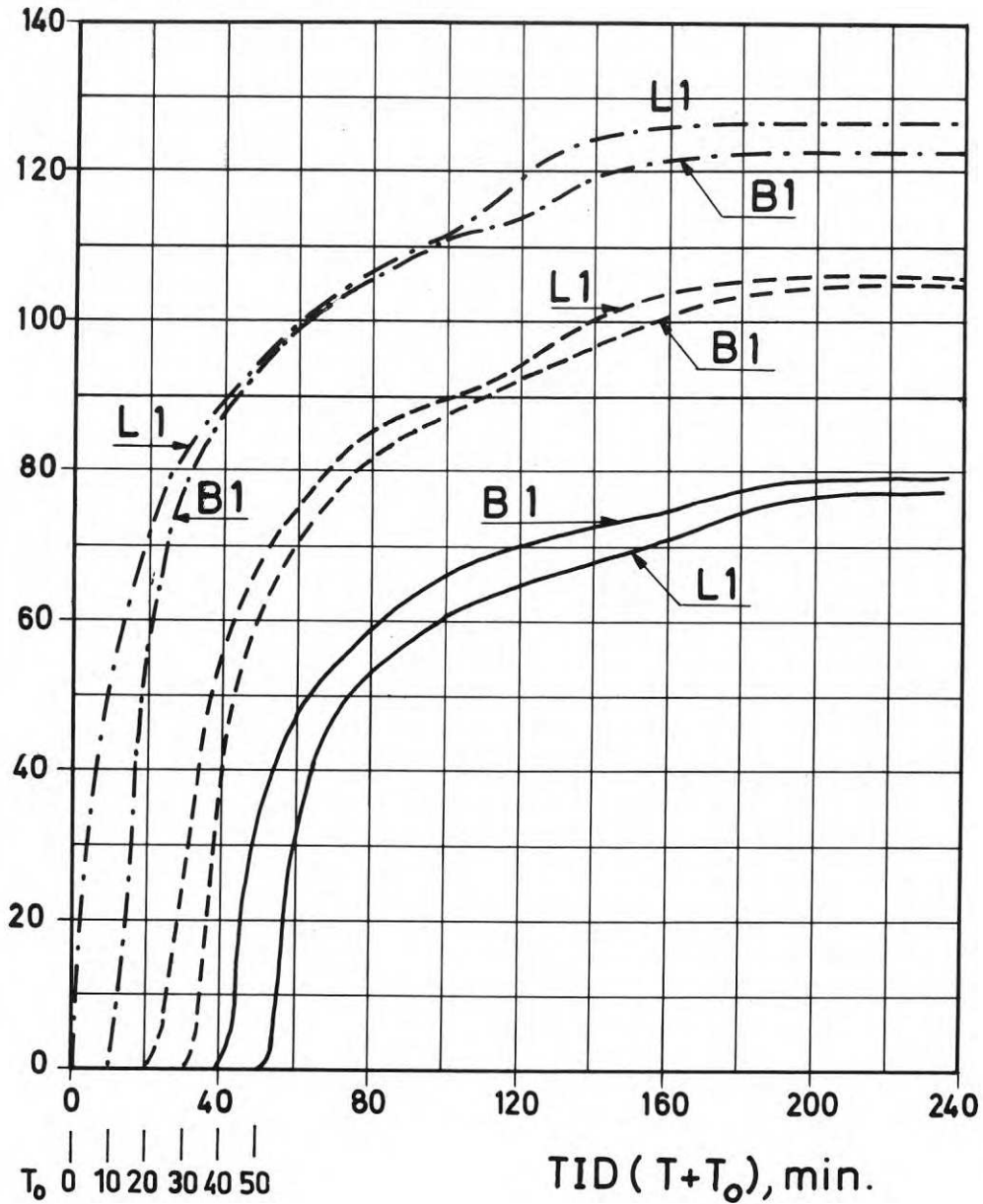


FIG. 6. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM i \varnothing 10 mm sandpelare, viskositet 200-230 cP, vid varierande tryck och $+25^{\circ}\text{C}$. B 1 = 0,1 - 0,15 mm runda korn; L 1 = 0,1 - 0,15 mm krossprodukt. Torr sand. - · - · - · 0,2 bar. - - - - 0,1 bar. — 0,05 bar.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM in a 10 mm diam. sand column. Viscosity was 200 to 230 cP. Varying pressures and $+25^{\circ}\text{C}$. B i was 0.1 to 0.15 mm spherical-grain sand. L 1 was 0.1 to 0.15 mm crushed sand. The sand was dry. - · - · - · 0.2 bar, - - - - 0.1 bar. — 0.05 bar.

INTRÄNGNING, mm

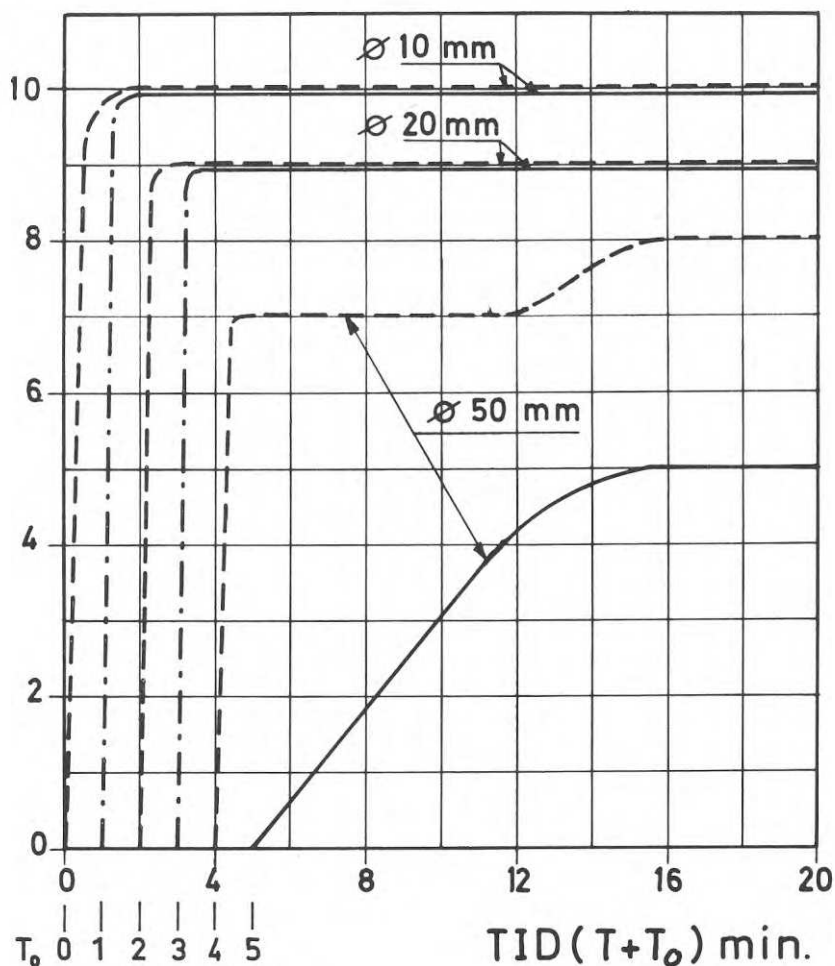


FIG. 7. Inträngning av Bentonit M-HC: H₂O 1:20 i sandpelare av olika diametrar, viskositet 2760 cP vid 0,1 bar och +25°C. Fylesand nr 3 (F) med sikt-kurva enl. FIGUR 3, kantiga korn. — Fuktig sand. ----- Torr sand.

Penetration of a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 in sand columns of different diameters. Viscosity was 2760 cP. 0.1 bar and +25°. Angular-grain Fyle sand No. 3 (F) with grading curve as shown in FIG. 3. — moist sand. ----- dry sand.

Vid de försök som gjordes med cement-bentonitblandning, se tabell 1 och 5, erhöles över huvud taget inte någon mätbar inträngning ens i de grova sandtyperna B2 och L2.

Figur 8 - 10 redovisar erhållna inträngningskurvor för bentonit, se tabell 1 och 5, i olika sandsorter. Betecknande för praktiskt taget samtliga kurvor är en ganska snabb inträngning under någon minut och därefter nära stopp. De oregelbundenheter, som återfinns på vissa kurvor i figur 8 och 9, kan hänföras till vibrationer i laboratoriets närhet. Dessa har tydligen förmågan att kunna "återuppliva" ett stagnerat förlopp av tixotrop karaktär.

Figur 11-12 redovisar försöksresultaten för IB-Pox 3 TM, se tabell 1 och 5, i olika sandsorter. Genomgående karaktäriseras dessa inträngningskurvor av att förloppet stadigt fortgår, fastän i successivt minskande takt under 1 à 2 timmars tid. Figur 12 gäller ett försök som avsåg att mera i detalj studera inträngningsförloppets början.

Figur 13 redovisar försöksresultat med polyesterpreparat, se tabell 1 och 5. Inträngningsförloppet är här likartat det för epoxiharts, men förloppet avstannar snabbare - redan efter ca 20 min. - vilket medför att totalinträngningen inte hinner bli så stor.

3.3 KOMMENTARER

Reproducerbarhet - spridning

Vid genomgång av försöksresultaten framgår att spridningen är delvis mycket stor. Särskilt gäller detta för bentonitförsöken, där den totala inträngningen är liten och avstannar snabbt, jfr figur 8 och 9. Inträngningen berör ju här bara ett ytskikt, och det förefaller helt naturligt att i och för sig obetydliga lokala variationer i t. ex. packningsgrad, kornstorleksfördelning, fuktighet m. m. skall kunna ge störningseffekter, som döljer eller överskuggar principiella funktions samband.

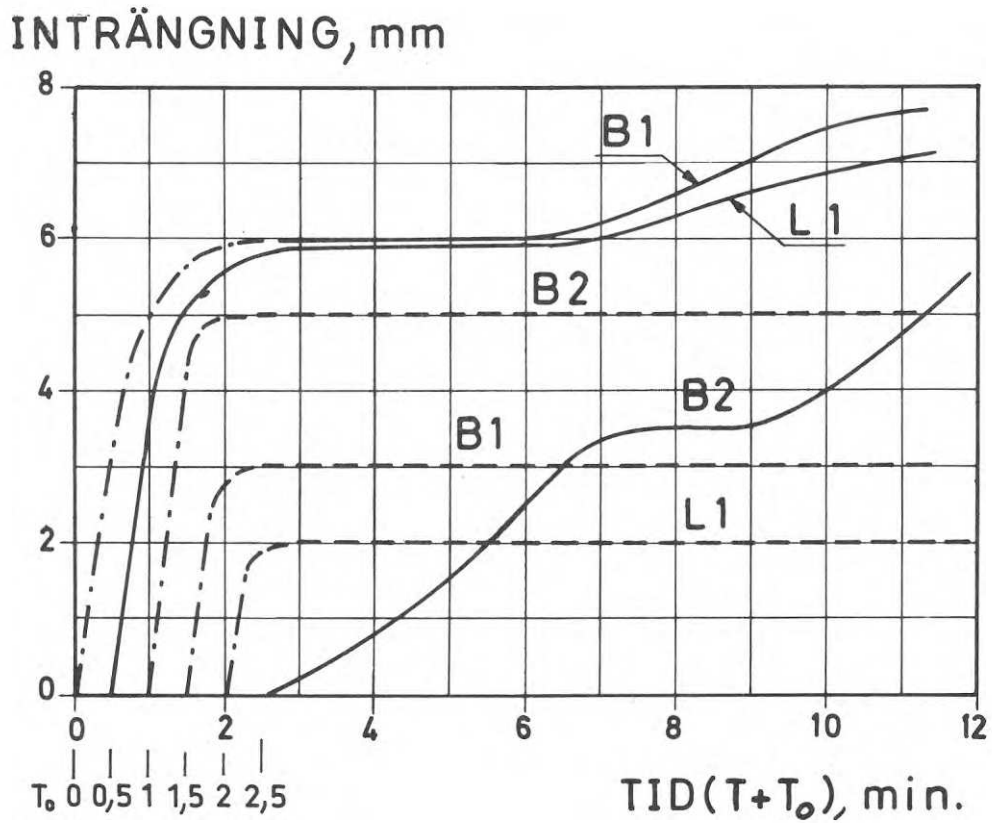


FIG. 8. Inträngning av Bentonit M-HC:H₂O 1:20 i \varnothing 10 mm sandpelare, viskositet 2760 cP, vid 0,1 bar och +25°C. B 1 = 0,10 - 0,15 mm runda korn; L 1 = 0,10 - 0,15 mm krossprodukt. — Fuktig sand. ----- Torr sand. - . - . - . Observationer osäkra.

Penetration of a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 in a 10 mm diam. sand column. Viscosity was 2760 cP. 0,1 bar and +25°C. B 1 was 0,10 to 0,15 mm spherical-grain sand, L 1 was 0,10 to 0,15 mm crushed sand. — moist sand, ----- dry sand, - . - . - . results uncertain.

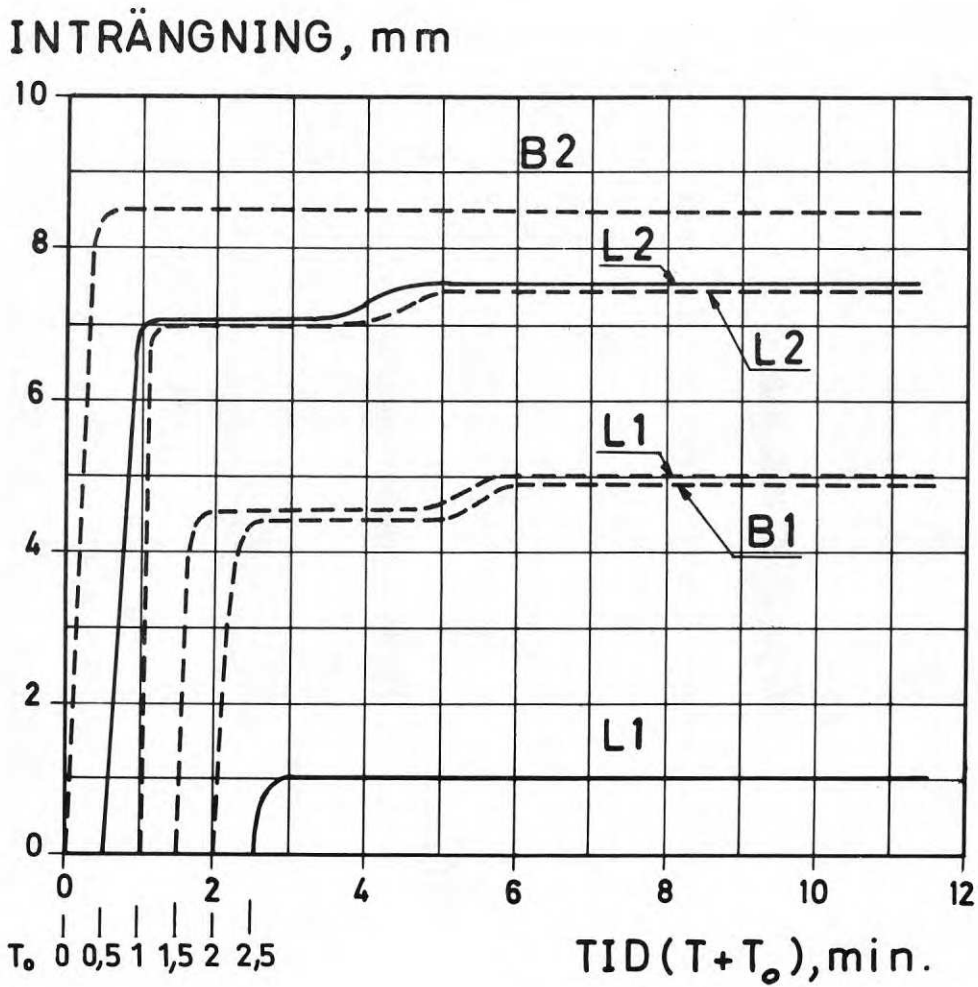


FIG. 9. Inträngning av Bentonit M-HC:H₂O 1:20 i \emptyset mm sandpelare, viskositet 3000 cP, vid 0,1 bar och +25°C. B 1 = 0,10 - 0,15 mm runda korn. L 1 = 0,10 - 0,15 mm krossprodukt; L 2 = 0,15 - 0,25 mm krossprodukt. — Fuktig sand. ----- Torr sand.

Penetration of a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 in a 10 mm diam. sand column. Viscosity was 3000 cP. 0.1 bar and +25°C. B i was 0.10 to 0.15 mm spherical-grain sand, L i was 0.10 to 0.15 mm crushed sand. L 2 was 0.15 to 0.25 mm crushed sand. —moist sand. ----- dry sand .

INTRÄNGNING, mm

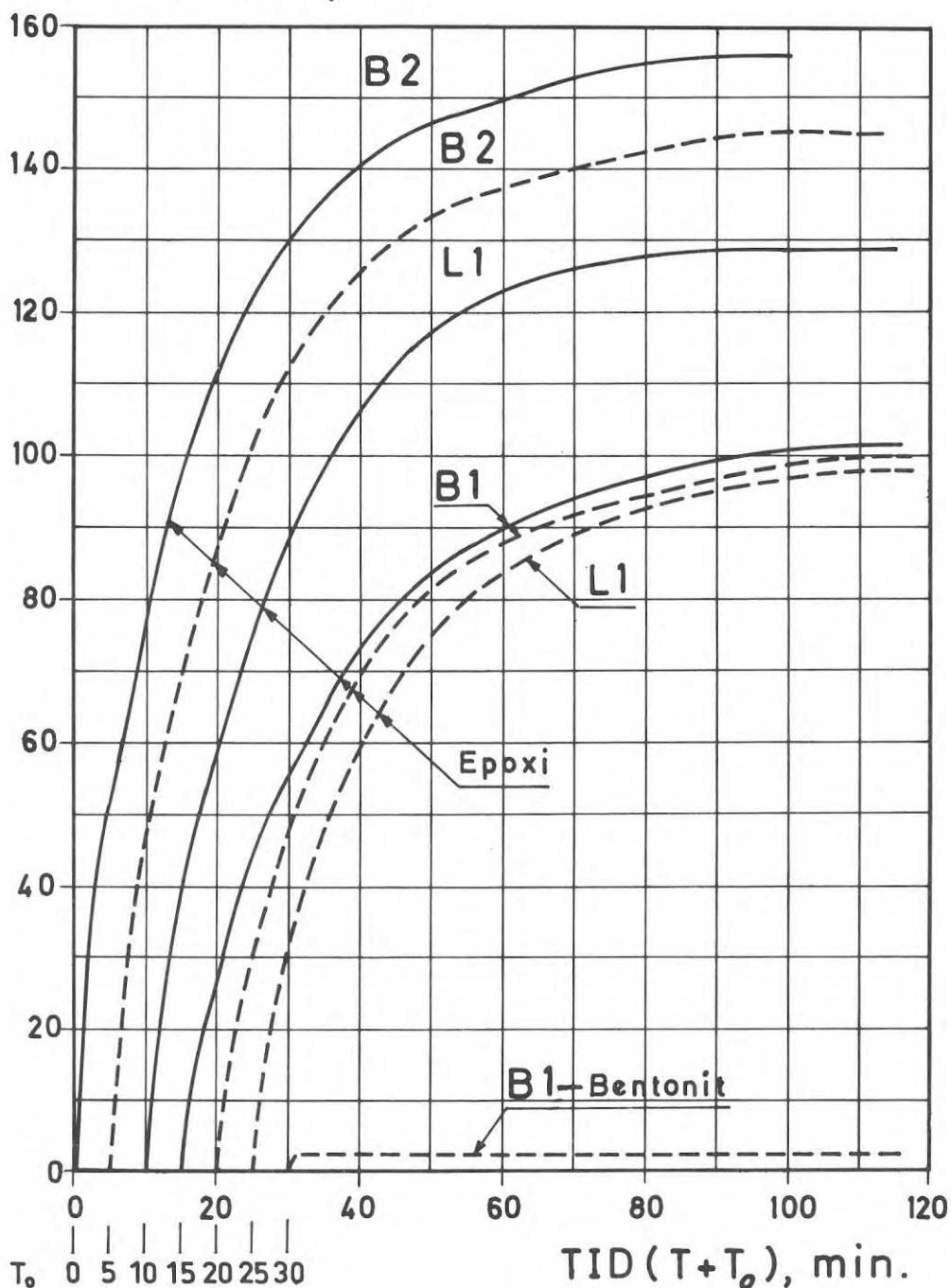


FIG. 10. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM i \varnothing 20 mm sandpelare, viskositet ca 150 cP, resp. Bentonit M-HC: H_2O 1:20, viskositet ca 2700 cP, vid 0,1 bar och $+25^\circ C$. B 1 = 0,10 - 0,15 mm runda korn; B 2 = 0,15 - 0,25 mm runda korn. L 1 = 0,10 - 0,15 mm krossprodukt. — Fuktig sand. ----- Torr sand.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM in a 20 mm diam. sand column with a viscosity of about 150 cP as compared with a mixture of bentonite M-HC and water at a ratio of 1:20 which had a viscosity of about 2700cP. 0.1 bar and $+25^\circ C$. B 1 was 0.10 to 0.15 mm spherical-grain sand, B 2 was 0.15 to 0.25 mm spherical-grain sand. L i was 0.10 to 0.15 mm crushed sand. — moist sand. ----- dry sand.

INTRÄNGNING, mm

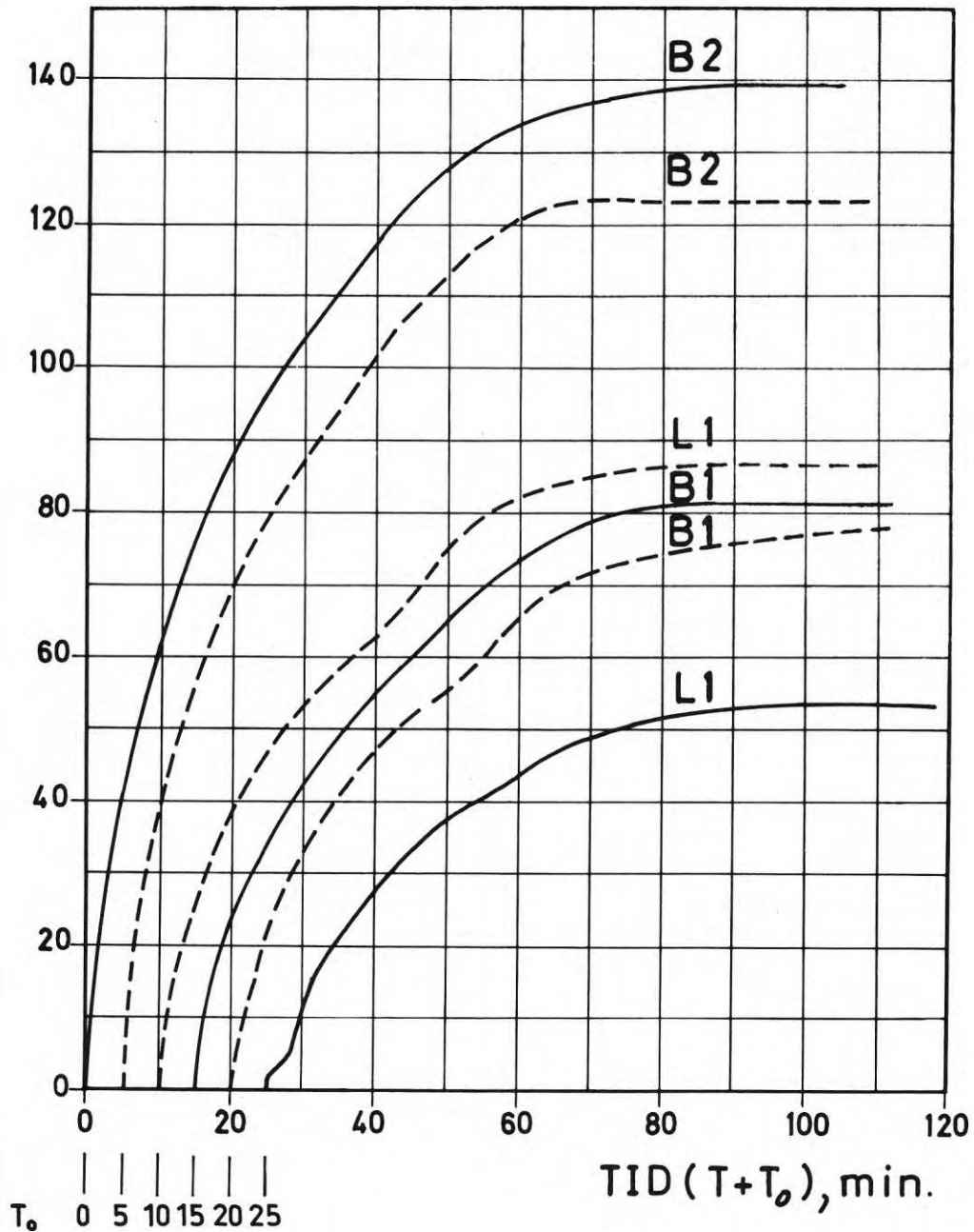


FIG. 11. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM i \emptyset 10 mm sandpelare, viskositet 200-300 cP, vid 0,1 bar och $+25^{\circ}\text{C}$. B 1 = 0,1 - 0,15 mm runda korn; B 2 = 0,15 - 0,25 mm runda korn. L 1 = 0,1 - 0,15 mm krossprodukt. — Fuktig sand. ----- Torr sand.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM in a 10 mm diam. sand column. Ciscosity was 200-300 cP. 0.1 bar and $+25^{\circ}\text{C}$. B i was 0.1 to 0.15 mm spherical-grain sand. B 2 was 0.15 to 0.25 mm spherical-grain sand, L i was 0.1 to 0.15 mm crushed sand. — moist sand, ----- dry sand.

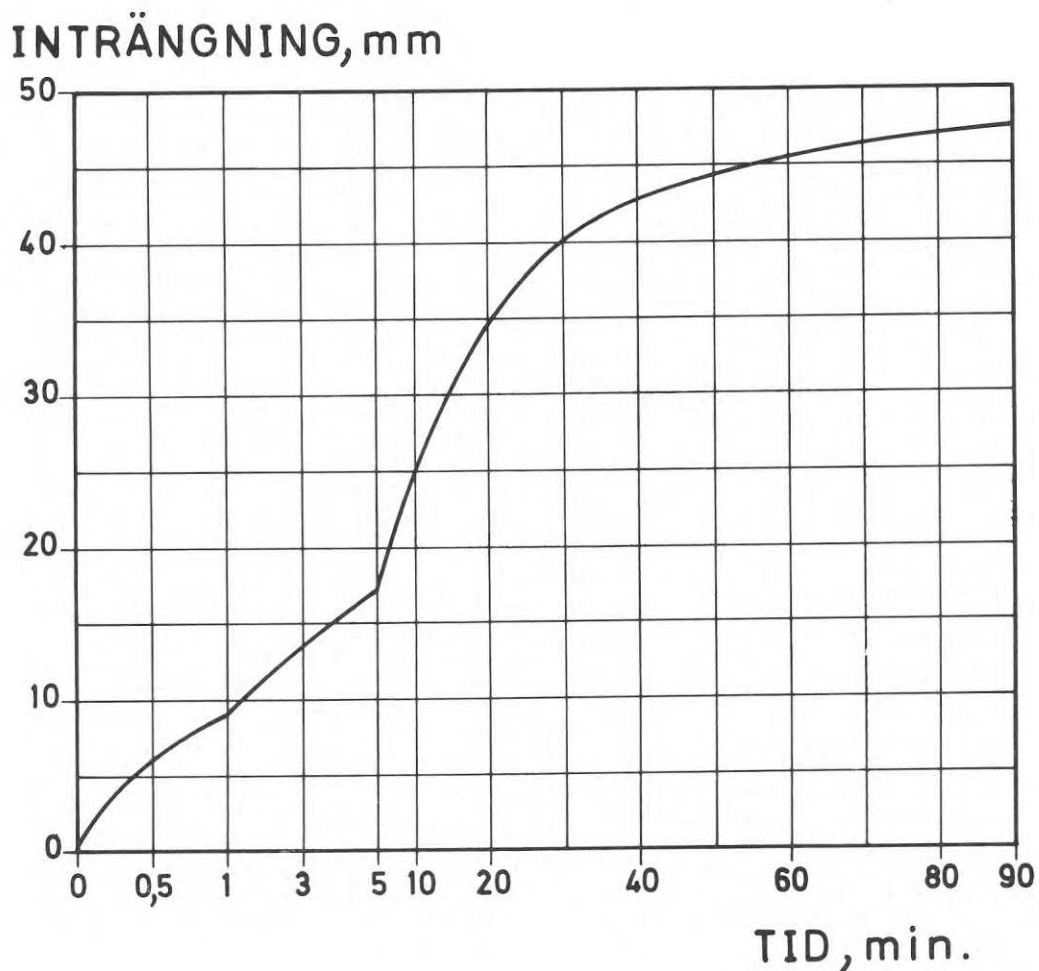


FIG. 12. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM i \emptyset 20 mm sandpelare, viskositet ca 200 cP, vid 0,1 bar och $+25^{\circ}\text{C}$. Lemundasand nr 9 (LO) med siktkurva enl. FIGUR 2, krossprodukt. Torr sand.
(Obs. skaländringarna på abscissan vid 1 resp. 5 min.)

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM in a 20 mm diam. sand column. Viscosity was about 200 cP, 0.1 bar and $+25^{\circ}\text{C}$. Lemunda sand No. 9 (LO) with grading curve as shown in FIG. 2. Dry, crushed sand. (Note change in scale of abscissa at 1 and 5 minutes.)

INTRÄNGNING, mm

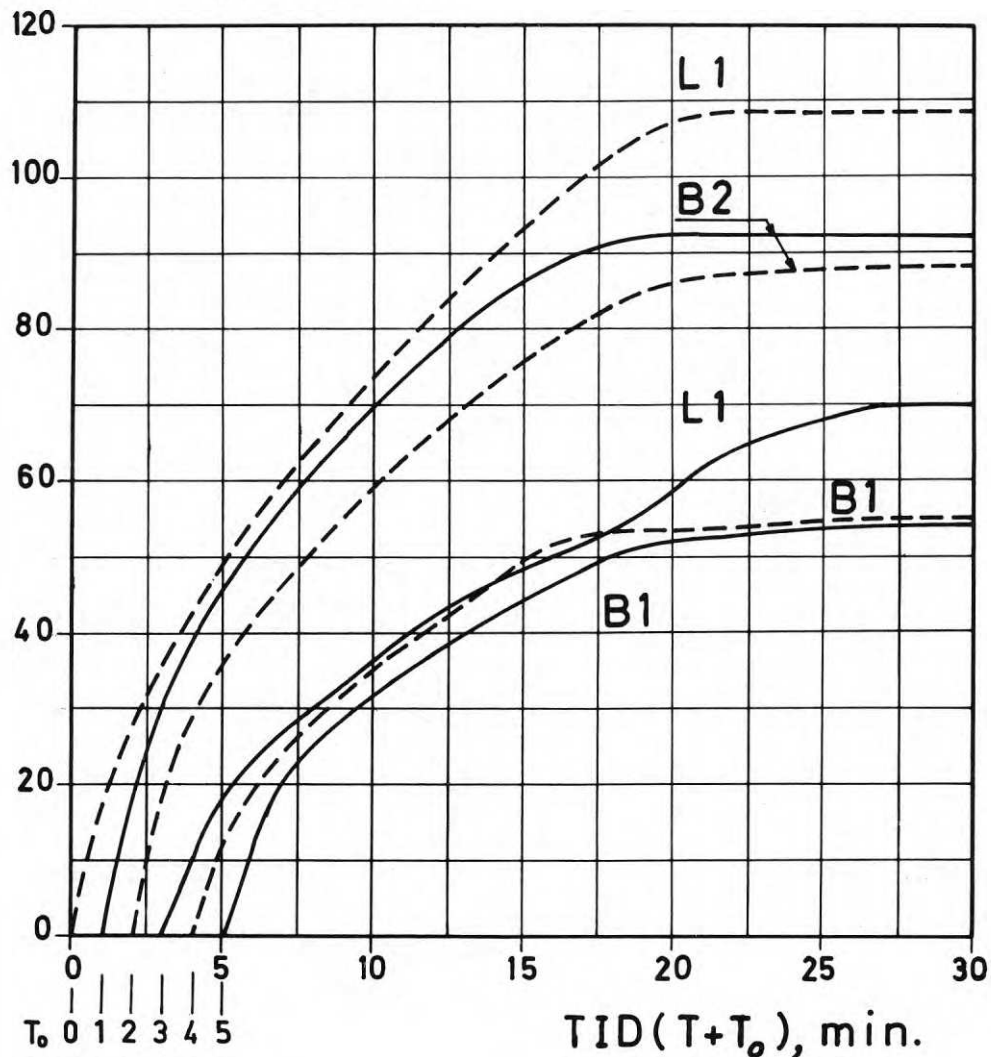


FIG. 13. Inträngning av Polyester Engwall (Harts: härdare: styrén: acc. = 100:4:10:0,3) i \varnothing 20 mm sandpelare, viskositet 200-250 cP, vid 0,1 bar och $+25^{\circ}\text{C}$.

B 1 = 0,10 - 0,15 mm runda korn; B 2 = 0,15 -

- 0,25 mm runda korn; L 1 = 0,10 - 0,15 mm

krossprodukt. — Fuktig sand.

----- Torr sand.

Penetration of polyester Engwall (resin, hardening agent, styrene, accelerator at a ratio of 100:4:10:0.3) in a 20 mm diam. sand column. Viscosity was 200-250 cP. 0.1 bar and $+25^{\circ}\text{C}$. B 1 was 0.10 to 0.15 mm spherical-grain sand. B 2 was 0.15 to 0.25 mm spherical-grain sand. L 1 was 0.10 to 0.15 mm crushed sand. — moist sand. ----- dry sand.

Även vid försöken med plastpreparat förekommer emellertid oväntade relationer mellan grov, torr sand B2 resp. fin, torr sand L 1 i figur 13. Det är sannolikt att dessa och liknande "egendomliga" resultat är att hänföra till spridning på grund av svårigheterna att hålla försöksbetingelserna väl definierade - viskositet, fuktighet, packningsgrad m. m.

Trots de konstaterade spridningarna är det möjligt att draga vissa kvalitativa och även en del kvantitativa slutsatser ur försöken.

Inträngningsdjup

En jämförelse av de olika injekteringsmaterialens inträngning i olika sandsorter under i övrigt lika förhållanden, figur 6-13, visar att IB-Pox 3 TM tränger in ungefär 1,3 - 2 gånger längre än Polyester Engwall och 10-100 gånger så långt som Bentonit M-HC + H₂O.

Figur 14 ger för sandtyp B1, torr, en föreställning om inträngningsrelationerna.

Tryck

Som tidigare nämnts under 3.2 är i varje fall för IB-Pox 3 TM inverkan av olika injekteringstryck påtaglig. Enligt figur 6 erhålles en inträngning som är ungefär proportionell mot tredje roten ur pålagt tryck. Liknande relation torde kunna förväntas för polyesterpreparat.

För bentonit har det på grund av det ringa inträngningsdjupet inte bedömts vara motiverat att undersöka tryckberoendet.

Diameter

Som nämnts under 3.2 erhöles vid Bentonit M-HC + H₂O minskad inträngning vid ökad diameter på sandpelaren, se figur 7.

En jämförelse mellan figur 10 och figur 11 visar för IB-Pox 3 TM ett motsatt förhållande - här ökar genomgående inträngningen vid diameterökning från 10 mm till 20 mm.

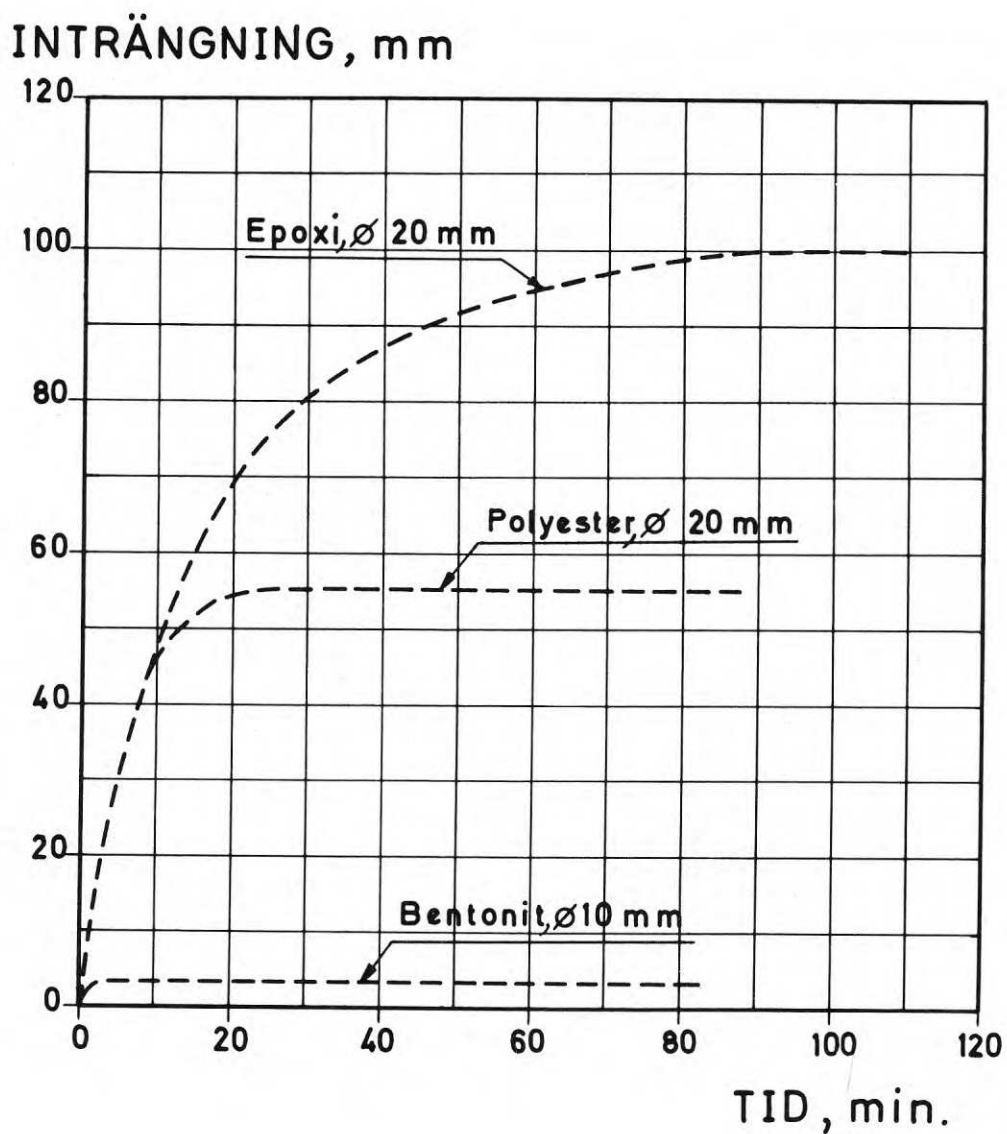


FIG. 14. Jämförelse mellan inträngningen av Epoxi IB-Pox 3 TM, Polyester Engwall resp. Bentonit M-HC: $H_2O = 1:20$ i sand B 1, torr, vid 0,1 bar och $+25^\circ C$.

Comparison between penetration of epoxy IB-Pox 3 TM, polyester Engwall and a mixture of bentonite M-HC and water at a ratio of 1:20 in dry B i sand at 0.1 bar and $+25^\circ C$.

Dessa olika resultat torde få tolkas som beroende på de två injekteringsmedlens olika ytaktivitetsegenskaper. För bentoniten, som har låg ytaktivitet (vätningsförmåga), betyder glasrörsytan ökad framkomlighet, vilken då ökar med minskad diameter i relation $1/a$ (a = pelardiameter). För den ytaktiva epoxiplasten däremot ökar framkomligheten statistiskt med ökad pelararea.

Torr resp. fuktig sand

För Bentonit M-HC + H₂O finner man ur fig 7, 8 och 9 att den största inträngningen i de flesta fall erhållits i fuktig sand. Detta är också vad man har anledning förvänta med hänsyn till bentonitens låga ytaktivitet. Några egendomliga undantag finns dock i figur 9 för sandtyp L 1.

Resultaten i figur 10 och 11 visar för IB-Pox 3 TM samma tendens med större inträngning i fuktig än i torr sand. Det enda undantaget gäller sandtyp L 1 i figur 11.

Även för Polyester Engwall, figur 13, utgör sandtyp L 1 ett särfall med bättre inträngning i torr än i fuktig sand.

Det är inte möjligt att avgöra, om det är av en slump eller av någon systematisk orsak som krossprodukten L 1 i så många fall klart avviker från huvudtendensen att inträngningen blir större i fuktig än i torr sand.

Kornstorlek

För samtliga injekteringsmedel, d. v. s. bentonit, epoxi och polyester, gäller som huvudtendens att för samma sandsort inträngningen blir större i grövre sand än i finare, d. v. s. större i B 2 än i B 1 och större i L 2 än i L 1. Se figur 8, 9, 10, 11 och 13.

Det enda undantaget i resultaten utgör värdena B 2 och B 1 i figur 8 - bentonit.

Korntyp

Korntyperna är angivna i tabell 4: B 1 och B 2 rund natursand - L 1 och L + kantig, krossprodukt.

Av figur 8 och 9 synes framgå att bentonit lättare framtränger mellan runda än mellan kantiga korn.

För epoxi- och polyestermedlen finns enligt figur 6, 10, 11 och 13 inte någon entydig tendens. Möjligen kan man säga, att inträngningen i krossprodukten L förefaller vara större än i natursanden B.

Vibrationer

I många inträngningskurvor - och detta gäller samtliga injekteringsmedel - förekommer oväntade "knyckar" där inträngningshastigheten plötsligt ökar efter att tidigare ha retarderat på ett regelbundet sätt. Exempel härpå finns i samtliga figurer 6-11 samt i figur 13.

Man kan finna att "knyckarna" utlösts av tidsmässigt klart bestämda fenomen. Orsaken var vibrationer från spontningsarbeten, som bedrevs i närheten av laboratoriet.

4 INTRÄNGNING I SMALA SPALTER

4.1 FÖRSÖKSANORDNINGAR

Försöken med inträngning i tunna spalter utfördes vid Hagconsult AB:s laboratorium.

Målet var att få fram en försöksanordning, varmed injekteringsmedels framträngning i spalter med tjocklekar mellan 0,05 mm och 0,5 mm skulle kunna undersökas. I de första diskussionerna planerade man för att kunna använda relativt höga tryck vid försöken - upp till 3 à 4 bar. Efterhand som planer och konstruktionsarbete framskred, och erfarenheter och säkerhetsaspekter kom med i bedömningarna, sänktes kravet på högt tryck till

0,5 bar som normalt fall och 1 à 2 bar exceptionellt.

Förförsök

Den första försöksanordningen, som kom till utförande, byggde på principen att en väldefinierad spalt skulle kunna åstadkommas av två plana glasskivor, som med limmade distansklotsar hölls på avsett avstånd från varandra. Genom att distansorganen av \varnothing 10 mm mässingsplåt kunde placeras tämligen tätt, skulle hållfasthetskraven på glaset bli måttliga.

Glasskivorna med plandimension 600 x 600 mm kunde efter hoplimning placeras i en mässingsram av U-balk, vilken i sin tur vilade på ledbar upphängning i ett stativ. Härigenom skulle spalten kunna orienteras i valfri riktning från horisontellt till vertikalt läge.

Glasskivorna utgjordes av 6 mm slipat maskinglas, s. k. tunn-kristall. Distansorgan var utom förut nämnda \varnothing 10 mm "klotsar" ca 10 mm breda stålbleck, som löpte längs alla kanter. Olika limsorter provades, bl. a. Kodak Eastman 910 och Ciba Araldit.

Den övre glasplattan var försedd med \varnothing 5 mm hål 50 cm in från två motstående kanter. Vid ena kanten infördes injekteringsmedlet i ett hål via polyetenslang och ett mot glasplattan med gummi-packning tätat rör. Flera hål på den motstående kanten utgjorde luftningsmöjlighet. Injekteringsmedlet förvarades i en 1 liters tryckbehållare av mässing och trycktes med luft från en liten Graetz EAL 25-2 G 8 kompressor.

Ett ganska stort antal försök utfördes med denna försöksanordning. Det visade sig dock omöjligt att få tillräcklig hållfasthet hos distansklotsarnas limfogar, trots att mycket noggranna limningsmetoder användes med bl. a. ångtvättning av limytorna med trikloretylen. Vissa försök lyckades men vid de allra flesta släppte först någon och därefter flera (ev. alla) distansklotsar, varvid dels spaltvidden givetvis ändrades på okontrollerat sätt genom glasskivornas deformation, dels risken för explo-

sionsartat glasbrott blev påtaglig om inte trycket omedelbart sänktes.

Hela denna försöksanordning måste därefter övergivas, och en ny anordning utprovas. Erfarenheterna från den första anordningen bl. a. i vad avser det praktiska handhavandet av de olika injekteringsmedlen, diverse tändningsproblem etc., kunde därvid utnyttjas.

Slutlig försöksanordning

Den nya apparaten gjordes tämligen enkel. Glasskivornas plan-dimension ändrades till 500 x 650 mm.

Vid försök med cement och/eller bentonitblandningar användes två plattor av slipat spegelglas med 15 mm tjocklek. Dessa rengjordes mellan försöken.

Vid försök med epoxiplast användes mellan de tjocka 15 mm plattorna två extra plattor av 6 mm maskinglas. Spalten bildades mellan de tunna plattorna, och dessa betraktades som förbrukningsmaterial och kastades efter varje försök. Rengöring efter epoxiharts visade sig nämligen vara en mycket omständlig, tidsödande, svårkontrollerbar och besvärlig procedur.

Försöksanordningen visas i figur 15.

Den avsedda spalttjockleken erhöles genom att glasplattorna (vid epoxiharts de dubbla glasplattorna) hölls separerade med dels \emptyset 10 mm distansklotsar, dels distansbleck längs en kortsida och två långsidor. Distansbleck och klotsar hölls på plats och tätade mot glasytorna med ett tunt lager av kiselfett. Glasplattorna hölls ihop med ett antal skruvtvingar, som placerats längs omkretsen, se figur 15.

Injekteringen skedde genom ett \emptyset 10 mm hål i den övre plattan (de övre plattorna) centralt placerat ca 50 mm från ena kortsidan, se figur 15. Till hålet hade limmats ett mässingsrör.

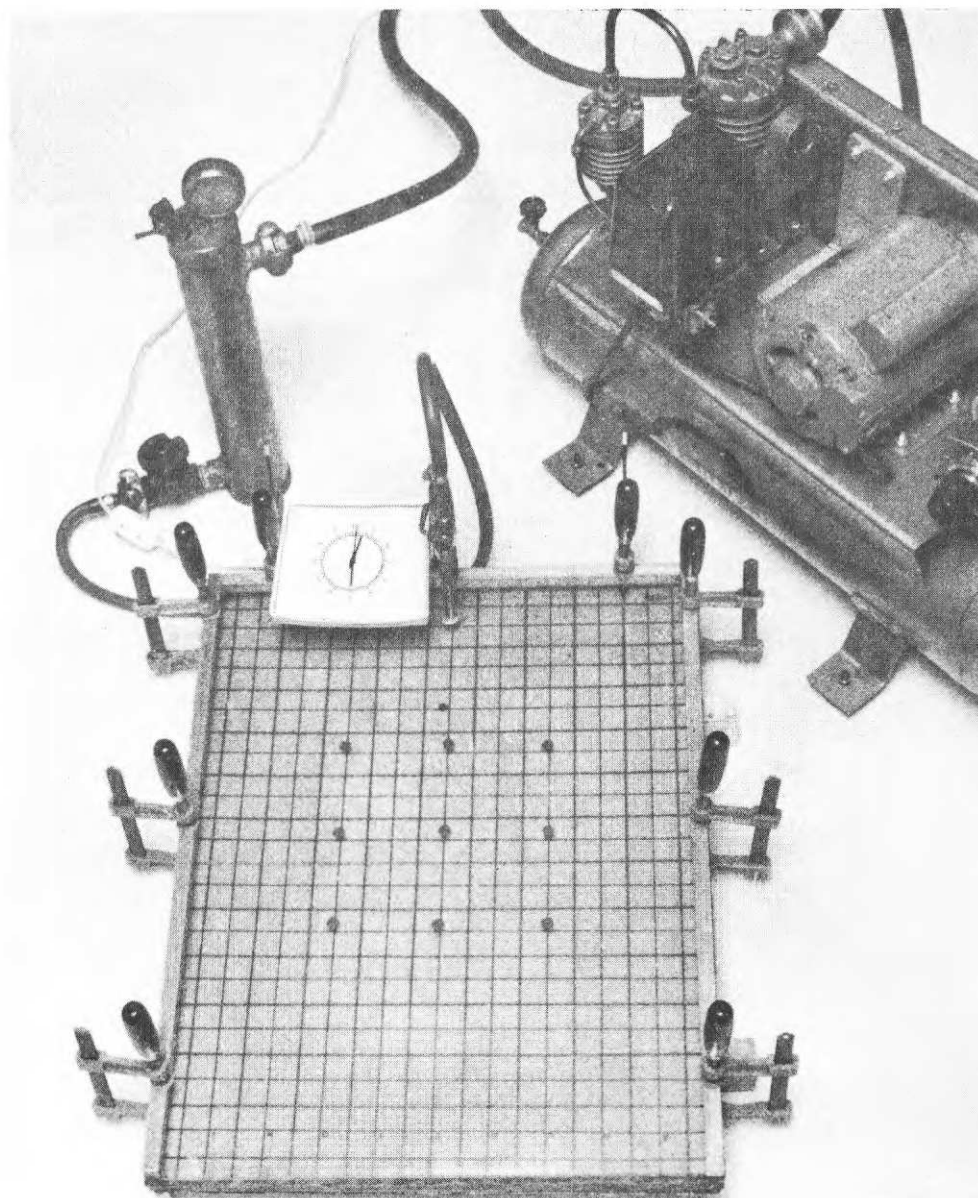


FIG. 15. Foto av den slutliga försöksanordningen. Glasplattorna var monterade över en med rutnät försedd skiva mot vilken injekteringsfronten avtecknade sig. I bakgrunden tryckbehållare, synkronur, injekteringshål och kompressor.

Photograph of the test apparatus finally adopted. The glass plates are mounted on a plate provided with background grid against which the penetration front could be observed. The pressurized container, synchronous timer, injection hole and compressor are visible at rear.

Vid plattornas andra kortsida hade spalten fri förbindelse med ytterluften.

Som framgår av figur 15 var hela anordningen placerad över ett rutnät på sådant sätt att injekteringsmedlets front avtecknade sig mot rutnätet och därmed kunde lägesbestämmas.

Ett elektriskt synkronur var placerat intill injekteringshålet och kunde igångsättas samtidigt som ventilen till injekteringsledningen öppnades.

Liksom vid förförsöken förvarades injekteringsmedlet i en 1 liters tryckbehållare, se figur 15, och trycktes fram med luft från Graetz-kompressorn. Trycket hölls så konstant som möjligt med hjälp av en reduceringsventil och en manometer. På grundval av försökserfarenheterna uppskattades tryckets felgränser ligga inom ca $\pm 10\%$ av det önskade trycket.

Spaltförsöken, som omfattade spalttjocklekar från 0,05 mm till 0,4 mm genomfördes samtliga med horisontella spalter och enligt följande procedur:

Injekteringsmedlet tillreddes med färgtillsats och samma blandningsförhållande och blandningstid som använts vid sandpelarförsöken, se avsnitt 2 samt tabell 1. Som blandare användes en s.k. färgomrörare, dvs. en elborrmaskin försedd med "propeller". Injekteringsmedlet tappades därefter i mässingstryckbehållaren, som tillskruvades, varefter tryck omedelbart påfördes. Injekteringsmedlet fick tränga genom slang och injekteringsrör fram så långt, att det började tränga fram i spalten. Därefter stängdes ventilen.

Inträngningsförloppet filmades i Super 8 mm färgfilm. Filmkameran startades så snabbt som möjligt, därefter startades synkronuret och ventilen i injekteringsledningen öppnades, sedan trycket kontrollerats. Om inträngningsförloppet gick mycket sakta, kunde kameran köras intermittent med t. ex. 5 s. per halvminutsintervall. Hela tiden måste trycket **passas** uppmärksam med eventuell justering av regleringsventilen.

När injekteringsmedlet nått nästan fram till motsatta kortsidan eller då inträngningen avstannat, avbröts försöket. Det var långt ifrån problemfritt att få försöken att löpa väl enligt denna procedur, där snabbhet att starta försöket var väsentligt för att inte injekteringsmedlet skulle ändra konsistens eller "sätta sig" i tilledningen.

Tyvärr skulle en omrörare i tryckbehållaren inte förbättra förhållandena i tilledningen.

4.2 FÖRSÖKSRESULTAT

Samtliga de lyckade försöken med inträngning i tunna spalter har sammanställts i tabell 6 på ett sådant sätt, att omfattning och variation av faktorer framgår. Alla försök utfördes vid tämligen hög rumstemperatur ca + 25° C.

Av tabell 6 framgår att trycket endast i ett försök med epoxiplast avvikit från "normaltrycket" 0,5 bar. Vid några försök med cementinjektering höjdes trycket sedan fronten stannat till 1 bar, vilket tryck emellertid då sannolikt aldrig nådde nämnvärt förbi injekteringsröret.

Inträngning i spalttjocklekar mindre än 0,2 mm erhöles endast för bentonit och epoxi och i spalttjocklek $d = 0,05$ mm endast för epoxi.

Inträngningsförloppet var - om man bortser från frontens hastighet - i princip likartat oberoende av injekteringsmaterial, tryck och spalttjocklek. Först skedde en ganska snabb, närmast cirkulär utbredning runt injekteringshålet, varvid ofta eventuella luftblåsor i injekteringsmedlet vållade smärre oregelbundenheter. Sedan området närmast kortsidan med injekteringshålet blivit utfyllt av injekteringsmedel, fortskred den svagt krökta fronten med närmast konstant hastighet mot motsatta kortsidan. I några fall stoppade den upp innan den nådde fram.

Förloppet illustreras av två bilder från en av filmupptagningarna, vilka sammanställts i svart-vitt i figur 16. Av bilderna framgår tydligt, att distansklotsarna $\varnothing 10$ mm inte stör inträngningsförloppet märkbart. Denna erfarenhet är

TABELL 6. Sammanställning av inträngningsförsök i smala spalter med olika injekteringsmaterial, tryck och spaltjocklek. Temperatur +25°C.

Injekteringsmaterial, se tabell 1	Tryck bar	Spaltjocklek d mm				
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
Limhamns snabbcement + H ₂ O	0,5			x	x	x
Limhamns snabbcement + bentonit HC-M + H ₂ O	0,5			x		x
Bentonit HC-M + H ₂ O	0,5		x	x		xx
Epoxi IB-Pox 3 TM	0,2			x		
Epoxi IB-Pox 3 TM	0,5	x	xx	x	x	x

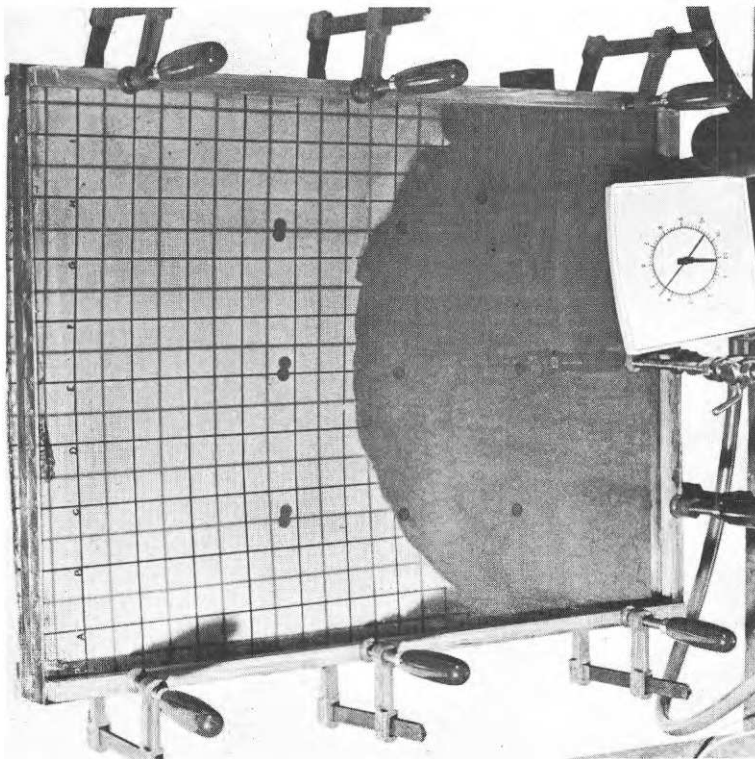
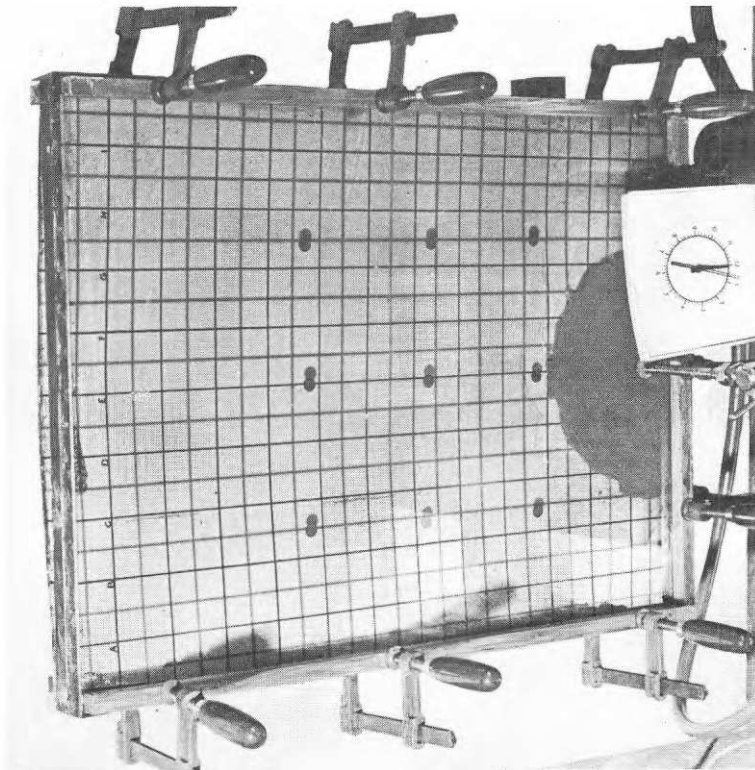


FIG. 16. Två filmbilder från inträngning av Epoxi IB-Pox
3 TM i spalt, $t = 0,2$ mm.

Two frames taken from a film showing the penetration of epoxy IB-Pox
3 TM into a 0.2 mm (t) wide gap.

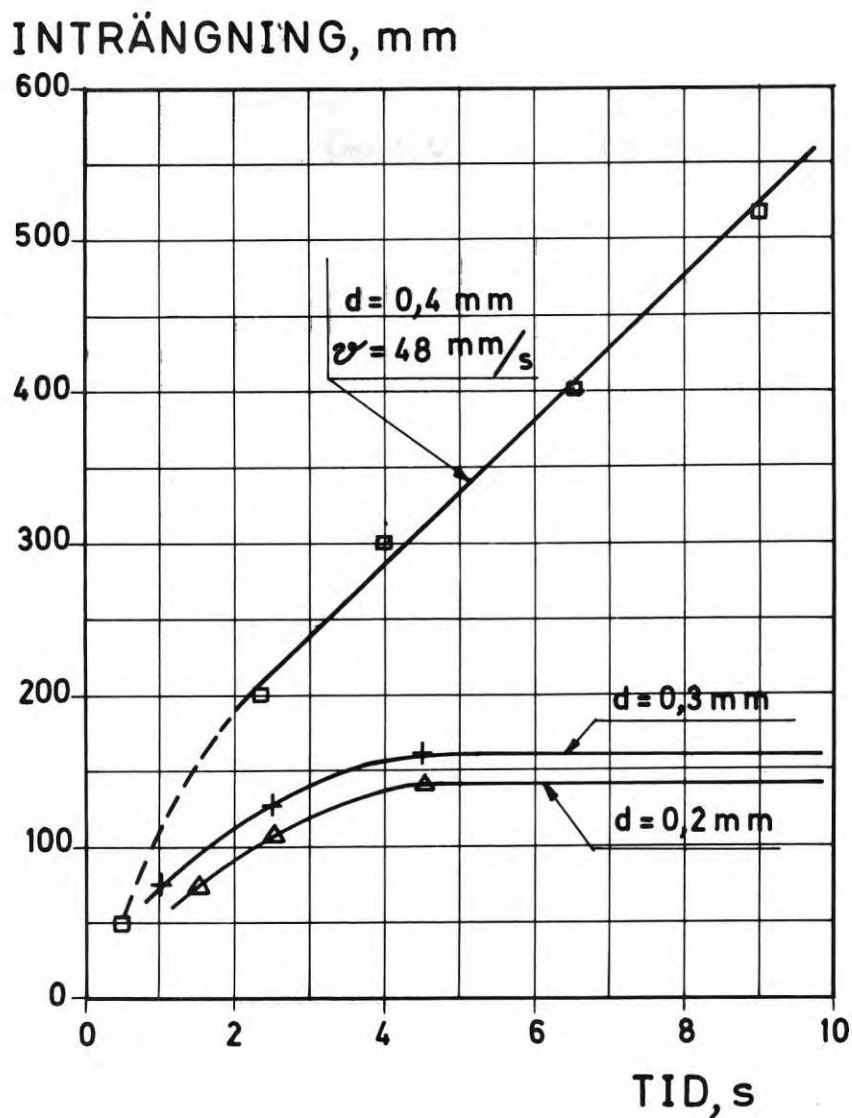


FIG. 17. Inträngning av Limhamns snabbcement: $\text{H}_2\text{O} = 2:1$, viskositet ca 1000 cP i spalter 0,2 mm, 0,3 mm och 0,4 mm, vid 0,5 bar och $+25^\circ\text{C}$.

Penetration of a mixture of Limhamn quick-setting cement and H_2O at a ratio of 2:1 with a viscosity of about 1000 cP into gaps 0.2 mm, 0.3 mm and 0.4 mm wide at 0.5 bar and $+25^\circ\text{C}$.

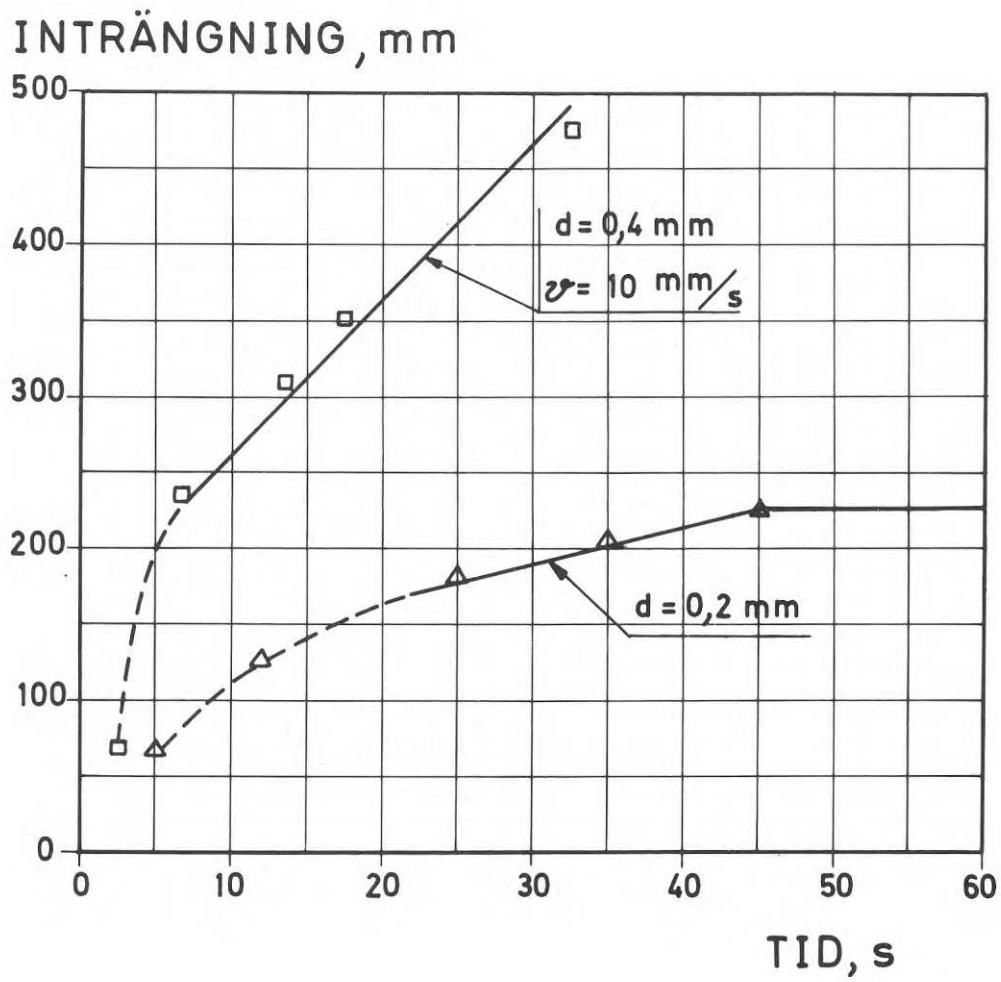


FIG. 18. Inträngning av Cement: Bentonit M-HC:H₂O = 4:1:20, viskositet 500-700 cP i spalter $d = 0,2 \text{ mm}$ och $d = 0,4 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och +25°C.

Penetration of a mixture of cement, bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 4:1:20 with a viscosity of 500-700 cP into gaps 0.2 mm (d) wide and 0.4 mm (d) wide at 0.5 bar and +25°C.

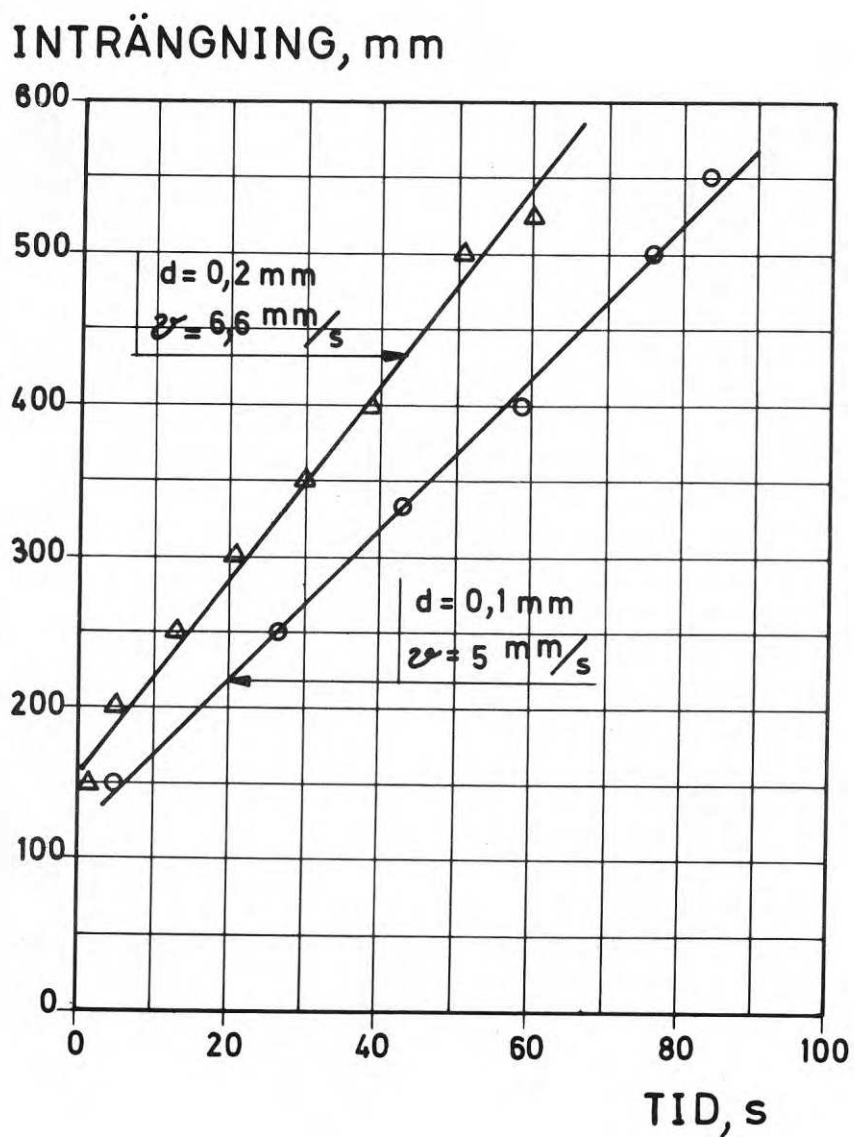


FIG. 19. Inträngning av Bentonit M-HC: H₂O 1:20, viskositet ca 3000 cP i spalter $d = 0,1 \text{ mm}$ och $d = 0,2 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och +25°C.

Penetration of a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 into gaps 0.1 mm (d) and 0.2 mm (d) wide at 0.5 bar and +25°C.

INTRÄNGNING, mm

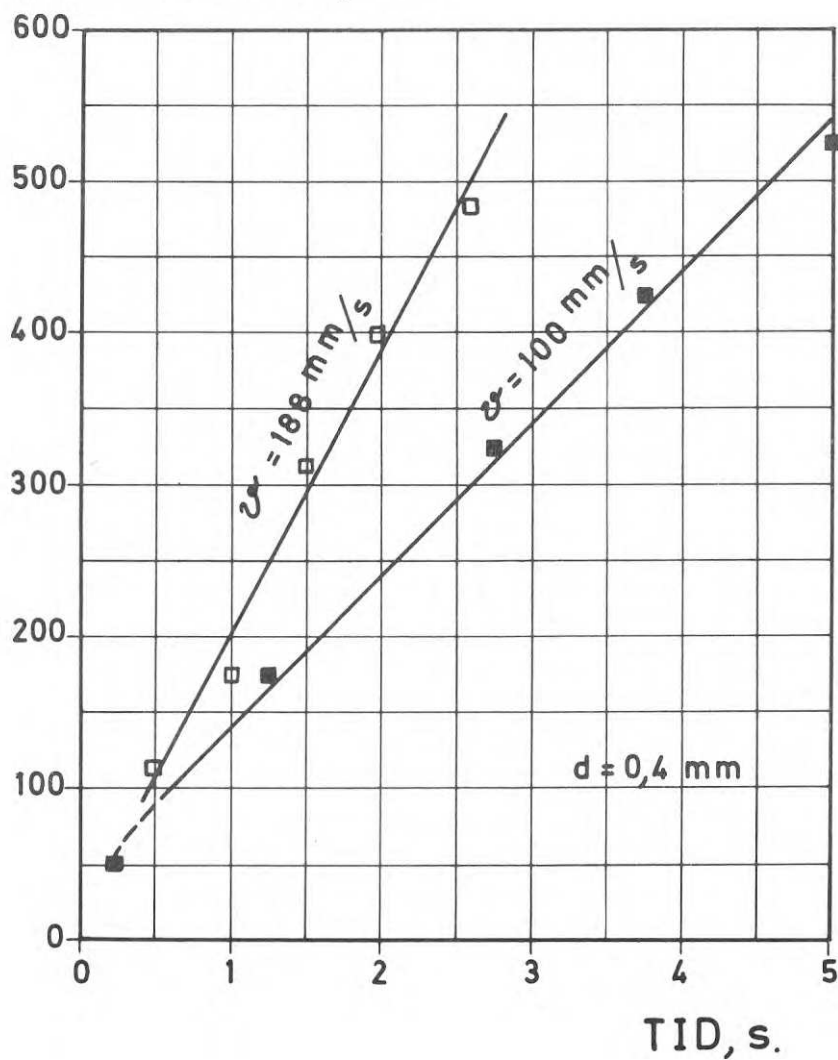


FIG. 20. Inträngning av Bentonit M-HC: H₂O 1:20, viskositet ca 3000 cP i spalt $d = 0,4 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och +25°C.

Penetration of a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 with a viscosity of about 3000 cP into a gap 0,4 mm (d) wide at 0,5 bar and +25°C.

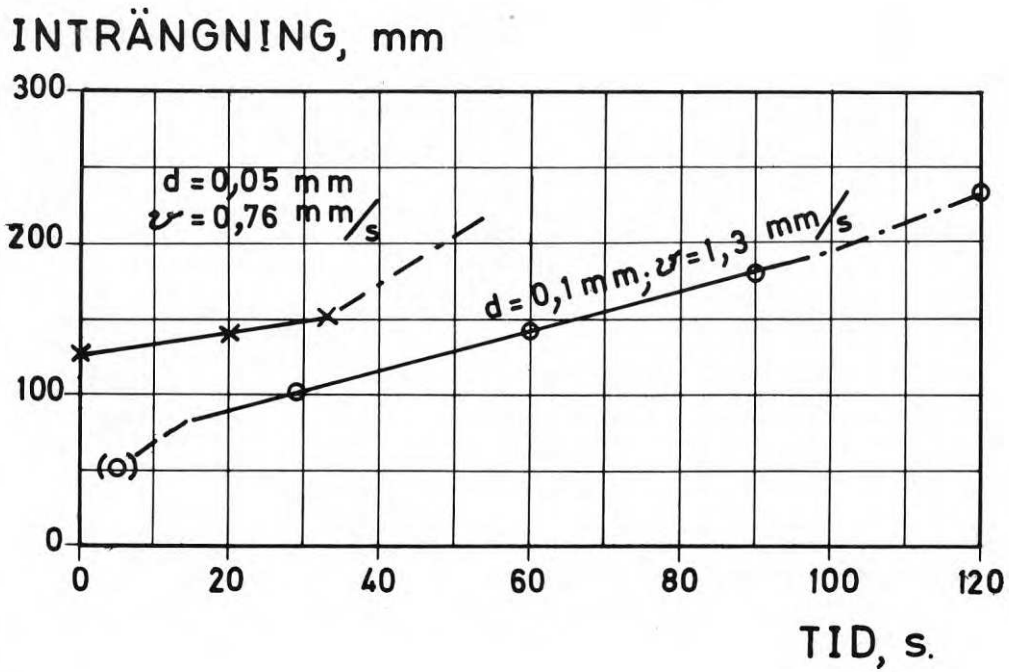


FIG. 21. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM, viskositet 150-200 cP i spalter $d = 0,05 \text{ mm}$ och $d = 0,1 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och $+25^{\circ}\text{C}$, heldragna linjer.

På grund av oavsiktlig tryckstegring (-.-.) måste båda försöken avbrytas.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM having a viscosity of 150-200 cP into gaps 0.05 mm (d) and 0.1 mm (d) wide at 0.5 bar and $+25^{\circ}\text{C}$. The continuous lines represent the parts of the experiment successfully completed. The chain lines represent an inadvertent pressure rise that resulted in the interruption of both experiments.

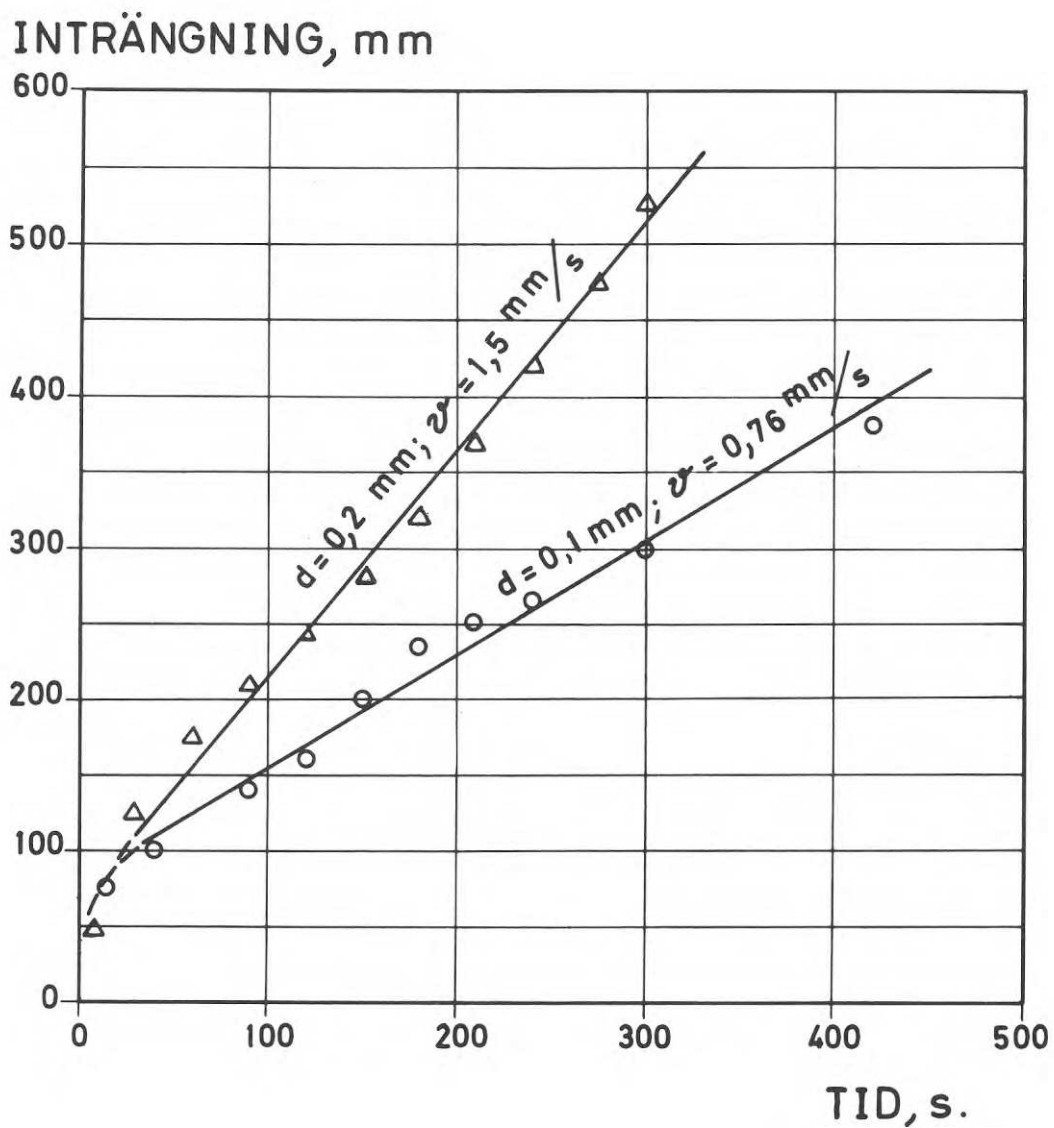


FIG. 22. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM, viskositet 150-200 cP i spalter $d = 0,1 \text{ mm}$ och $d = 0,2 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och $+25^{\circ}\text{C}$.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM having a viscosity of 150-200 cP into gaps 0.1 mm (d) and 0.2 mm (d) wide at 0.5 bar and $+25^{\circ}\text{C}$.

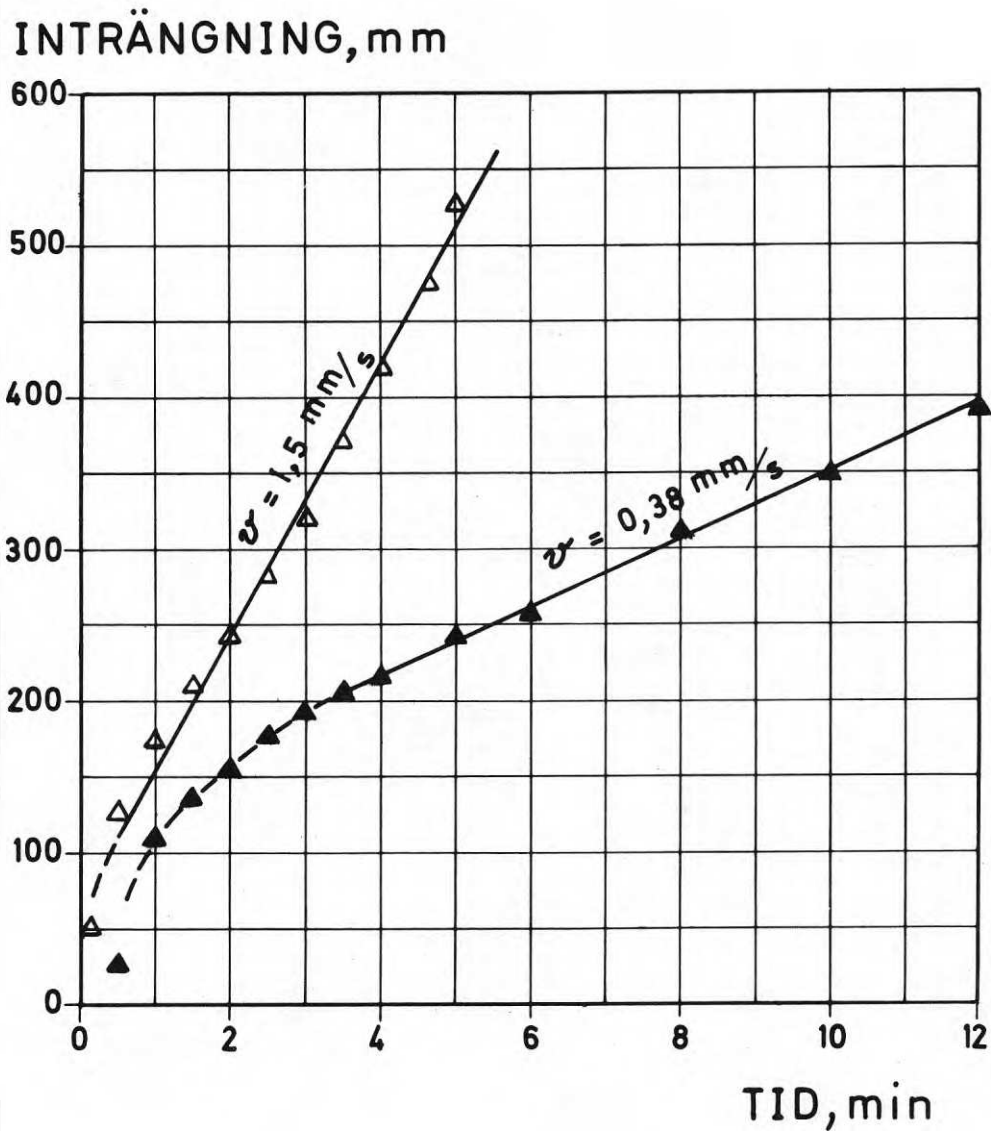


FIG. 23. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM, viskositet 150-200 cP i spalt $d = 0,2$ mm, vid 0,5 bar Δ resp. 0,2 bar \blacktriangle och $+25^{\circ}\text{C}$.

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM having a viscosity of 150-200 cP into a gap 0,2 mm (d) wide at 0,5 bar Δ and $+25^{\circ}\text{C}$ and at 0,2 bar \blacktriangle and $+25^{\circ}\text{C}$.

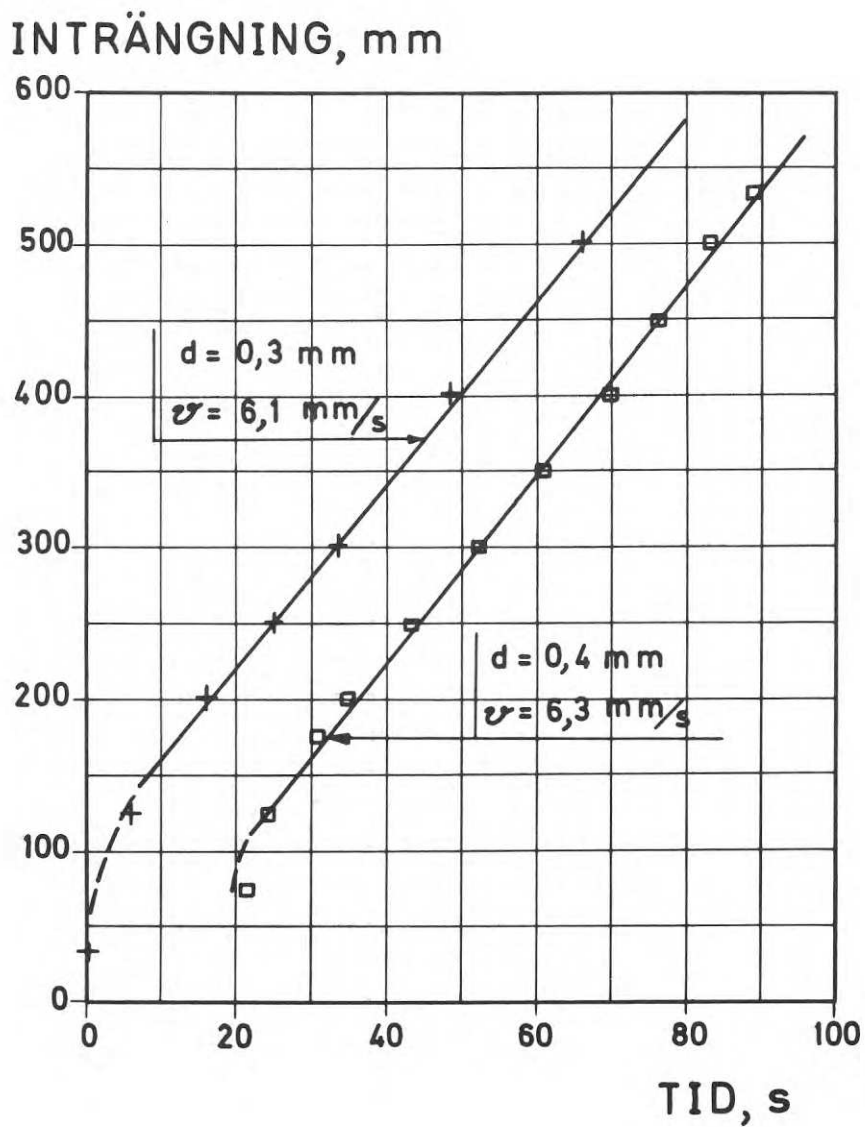


FIG. 24. Inträngning av Epoxi IB-Pox 3 TM, viskositet 150-200 cP i spalter $d = 0,3 \text{ mm}$ och $d = 0,4 \text{ mm}$, vid 0,5 bar och $+25^{\circ}\text{C}$. (Kurvan för $d = 0,4 \text{ mm}$ har förskjuten tidskala.)

Penetration of epoxy IB-Pox 3 TM having a viscosity of 150-200 cP into gaps 0.3 mm (d) and 0.4 mm (d) wide at 0.5 bar and $+25^{\circ}\text{C}$. (Note that the time scale for the 0.4 mm (d) gap curve has been shifted.)

genomgående vid granskning av filmerna.

Ur filmerna har injekteringsfrontens läge som funktion av tiden kunnat bestämmas med hjälp av det underliggande rutnätet, se fig 17-24. De punkter, som anges, utgör avläsningar för frontläget längs plattornas centrumlinje. Ur inträngningstidskurvorna kan fronthastigheten v bestämmas.

Figur 17 visar de resultat, som erhöles med cement + H_2O . Vid spalttjocklek $d = 0,2$ mm och $d = 0,3$ mm stoppade injekteringsfronten helt efter ca 150 mm. Härvid kunde man urskilja att en smal vattenrand frigjordes framför fronten, vilket tyder på separation. I båda fallen höjdes trycket, sedan fronten stannat, till 1,0 bar, men ingen ändring inträdde. Vid $d = 0,4$ mm erhöles en ganska snabb inträngning med konstant hastighet, sedan fronten stabiliserats, se figur 17.

Vid försök med cement + bentonit + H_2O erhöles liknande resultat som i figur 18. I spalt $d = 0,2$ mm stoppade fronten upp efter ca 200 mm inträngning. Här kunde dock ingen separation iakttagas. Vid $d = 0,4$ mm kunde injekteringsmedlet tränga fram med tämligen konstant hastighet.

Fig 19 och 20 ger resultaten från försök med Bentonit M-HC + H_2O . Figur 20 exemplifierar väl den stora spridningen hos resultaten.

Spaltförsöken med Epoxi IB-Pox 3 TM redovisas i fig 21 - 24. De enda försök, som utfördes med olika tryck (se tabell 6) - nämligen $d = 0,2$ mm och tryck 0,2 resp. 0,5 bar har sammanförts i figur 23.

4.3 KOMMENTARER

Spalttjocklek

De eftersträlvade spalttjocklekarna $d = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3$ resp. 0,4 mm erhöles, som tidigare beskrivits, genom användning av distansbleck och distansklotsar $\varnothing 10$ mm. Den effektiva spalttjockleken bestämdes dock väsentligen av distansklotsarna,

som var utplacerade i strömningsfältet, se figur 15.

Distansklotsarnas måttnoggrannhet i fråga om tjocklek kan anges till ca $\pm 0,005$ mm. Klotsarna fästes på plats med en mycket tunn hinna av kiselfett. Tjockleken av denna hinna har ej kunnat mätas, men den uppskattas till ca $0,005$ mm. Vid de "lyckade" försöken kunde alltid konstateras, att kiselfett-hinnan ej genombrutits av injekteringsmedlet, vilket talar för att distansklotsarna stått under tryck.

De "normerade" värden på d , som använts i fig 17 - 24, utgår från distansklotsarnas tjocklek. Den "verkliga" spalttjockleken kan således uppskattas ha legat mellan värdena $(d + 0,005)$ mm och $(d + 0,015)$ mm.

Denna möjliga variation skulle givetvis få sin största relativa betydelse vid de mycket låga värdena $d = 0,05$ och $d = 0,1$ mm. Ett studium av de vid dessa försök upptagna filmerna ger emellertid snarast anledning förmoda att variationerna varit mindre än de uppskattade. Injekteringsfronterna rör sig nämligen mycket jämnt och symmetriskt även i dessa fall.

Distansklotsarnas inverkan på strömningen

Man kunde befara, att utplaceringen av distansklotsar i spaltens strömningsfält skulle störa och orsaka ryckigheter hos injekteringsfronten. Ett studium av de upptagna filmerna visar emellertid ingen nämnvärd sådan störning - injekteringsmedlen flyter lugnt förbi klotsarna. Inträngningskurvorna enligt fig 17 - 24 ger heller ingen antydning om störning.

Man kan således konstatera, att distansklotsar i den omfattning, som användes vid dessa försök (se figur 15), icke synes förrycka resultaten.

Reproducerbarhet - spridning

Frågan om reproducerbarhet och spridning kan endast bedömas för bentonit, fig 19 och 20, och epoxiglas, fig 21 - 24.

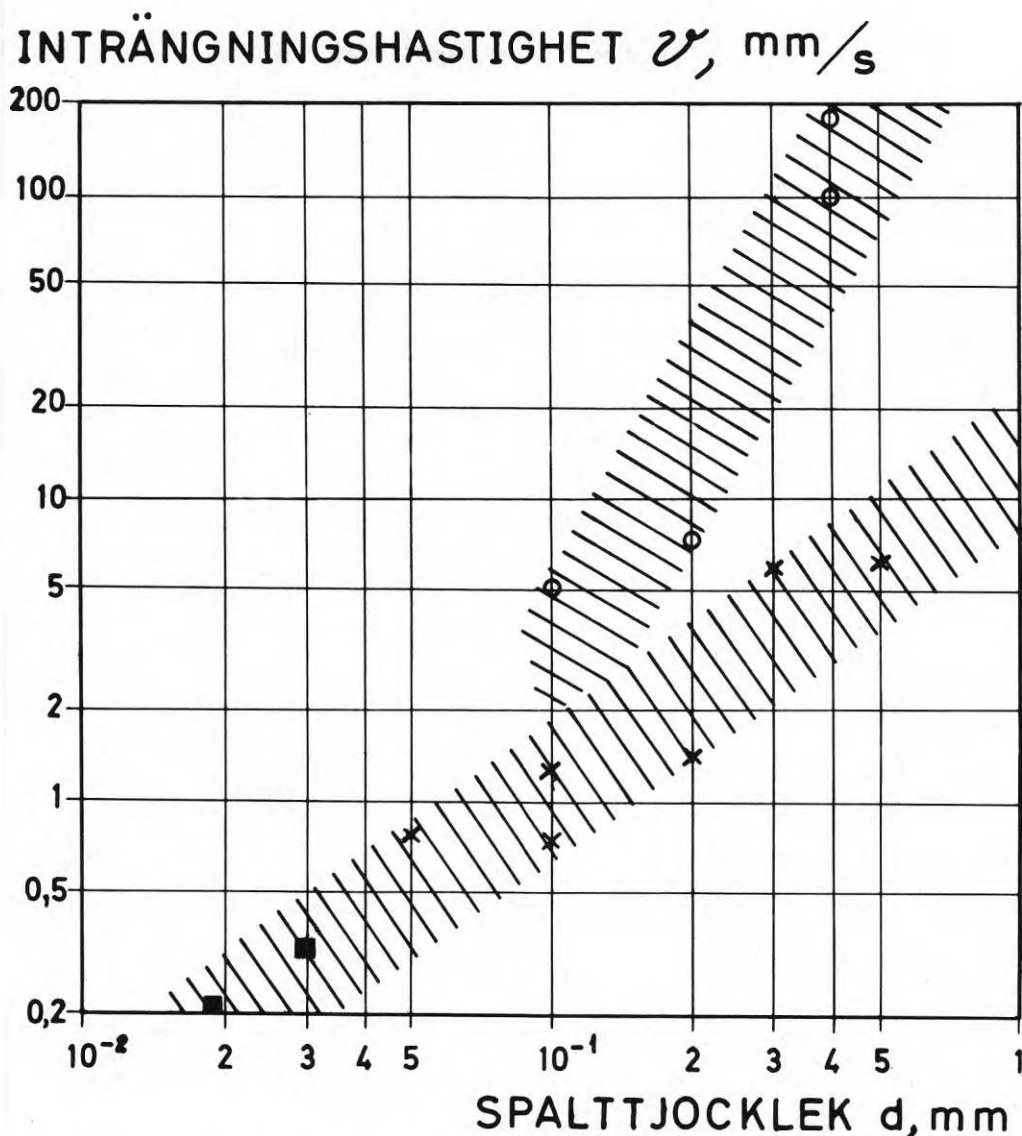


FIG. 25. Inträngningshastighet v som funktion av spaltbredd d för (x) Epoxi IB-Pox 3 TM och (o) Bentonit M-HC:H₂O = 1:20 vid 0,5 bar och +25°C. De fyllda kvadraterna (■) hänför sig till omräknade medelvärden från sandpelarförsöken med epoxipreparaten, se avsnitt 5.

Penetration rate (v) as a function of gap with (d) for epoxy IB-Pox 3 TM (x) and a mixture of bentonite M-HC and H₂O at a ratio of 1:20 (o) at 0,5 bar and +25°C. The shaded squares represent converted average values obtained from the sand column experiment carried out using an epoxy compound. See section 5.

För att få en bättre överblick kan de utvärderade inträngningshastigheterna v angivas som funktion av spalttjockleken d i ett dubbellogaritmiskt diagram, figur 25. Man kan då få en viss uppfattning om de indikerade spridningsbanden.

Som framgår av figur 25 är spridningarna mycket stora. För bentonit kan det kanske röra sig om en faktor 5 och för epoxiharts en faktor 3.

Det är emellertid inte förvånande, att spridningen är stor. Möjligheterna att strikt behärska alla de faktorer, som kan inverka på resultatet är ganska små. Särskilt gäller detta injekteringsmedlens konsistens, viskositet, ytaktiva faktorer m.m.

5 DISKUSSION

5.1. ANKNYTNING SANDPELAR - SPALTFÖRSÖK

Det är av visst intresse, bl.a. med hänsyn till försöksmetodernas eventuella utnyttjande för egenskapsundersökning av injekteringsmedel, att se om resultaten från sandpelarförsöken och spaltförsöken kan anknytas till varandra.

Ett påtagligt sätt att göra detta är genom att försöka "översätta" den genomströmningsbara volymen (porvolymen) i sandpelarna till någon form av "fiktiv spalttjocklek". Endast de sandtyper, som har ett snävt kornstorleksintervall, dvs. sandtyperna B 1 och L 1, B 2 och L 2, kan härvid ifrågakomma, se tabell 4.

Om man förutsätter en ideal sand med sfäriska korn av samma diameter D och ett packningssätt, som ger minsta porvolym, kan man tänka sig två olika modeller för bestämning av "fiktiv spalttjocklek".

I den ena modellen dividerar man porvolymen med sandpelarens höjd och finner då en "genomsnittlig läckarea" svarande mot 36 % av pelartvärsnittet. Divideras denna "läckarea" med

halva totalomkretsen hos alla korn i samma tvärsnitt - den "fiktiva spalten" begränsas av två ytor - erhålles följande "fiktiva spalttjocklek"

$$d_f = 0,23 D$$

I den andra modellen dividerar man hela sandpelarens porvolym med halva totalytan hos alla korn i pelaren och får då

$$d_f = 0,19 D$$

Nu är vid de verkliga sandtyperna kornen inte sfäriska, och de har dessutom olika storlek även om storleksintervallet gjorts tämligen snävt genom siktning, se tabell 4. Detta innebär att de verkliga sandtyperna vid vibrering kan packas avsevärt tätare än den ideala modellen med lika sfäriska korn. Hur mycket detta kan inverka på det lanserade begreppet "fiktiv spalttjocklek" kan ej beräknas, men i princip sänks värdet på d_f .

Vi gör här uppskattningen att sänkningen blir 25 à 30 % i förhållande till det ideala fallet, dvs.

$$d_f \approx 0,15 D_m$$

där D_m = medelvärdet av övre och undre kornstorlek för sandtypen ifråga.

För sandtyperna B 1 och L 1 innebär detta (se tabell 4)

$$d_f = 0,15 \frac{(0,10 + 0,15)}{2} = 0,019 \text{ mm}$$

och för sandtyperna B 2 och L 2

$$d_f = 0,15 \frac{(0,15 + 0,25)}{2} = 0,03 \text{ mm}$$

De enda injekteringsmedel, som vid sandpelarförsöken gav tillräckligt stora inträngningar för att man skall kunna göra en någorlunda säker uppskattning av inträngningshastigheten un-

der det första skedet, se fig 10 - 13, var plastpreparaten. För dessa överensstämde inträngningarna väl under första skedet, se figur 14.

Vid försöken med Epoxi IB-Pox 3 TM finner man ungefär samma inträngningshastighet i sandtyperna B 1 och L 1. Som medeltal av 10 försök erhålles en hastighet vid trycket 0,1 bar

$$v_{0,1 \text{ bar}} \approx 0,12 \text{ mm/s}$$

I avsnitt 3.3 angavs på grundval av resultaten i figur 6 att trycket påverkade inträngningen ungefär som tredje roten ur tryckförhållandet. Användes denna relation erhåller vi den till 0,5 bar omräknade inträngningshastigheten

$$v_{0,5 \text{ bar}} = \sqrt[3]{\frac{0,5}{0,1}} \cdot 0,12 \approx 0,2 \text{ mm/s}$$

För sandtypen B 2 erhålles på liknande sätt som medeltal av 4 försök

$$v_{0,1 \text{ bar}} \approx 0,2 \text{ mm/s}$$

vilket ger det till 0,5 bar omräknade värdet

$$v_{0,5 \text{ bar}} \approx 0,34 \text{ mm/s}$$

Värdeparen

för B 1 och L 1 - $v_{0,5 \text{ bar}} = 0,2 \text{ mm/s}$; $d_f = 0,019 \text{ mm}$

och för B 2 - $v_{0,5 \text{ bar}} = 0,34 \text{ mm/s}$; $d_f = 0,03 \text{ mm}$

har införts i figur 25, där i övrigt resultaten från spaltförsöken med epoxi och bentonit sammanställts. Som synes faller dessa värdepar väl in som en fortsättning på resultaten från spaltförsöken med epoxi.

I och för sig bör kanske detta inte tillmätas allt för stor betydelse.

Spridningsbandet för epoxi spänner över en faktor ca 3, varför det finns stort utrymme för variationer i sättet för omräkning från sandpelar- till spaltförsök.

5.2 MINSTA SPALTTJOCKLEK FÖR INTRÄNGNING

I figur 25 har bandet för bentonit fått upphöra vid $d = 0,1$ mm. Något direkt belägg för att inte inträngning skulle kunna ske vid t. ex. $d = 0,05$ mm finns nu inte, eftersom något spaltförsök härmed inte utfördes. Däremot bör nog sandpelarförsöken, där inträngningen blev ur praktisk synpunkt negligierbar (se figur 14), tolkas så att bentoniten i varje fall har mycket dålig inträngningsförmåga vid $d \leq 0,05$ mm.

För cement och cement + bentonit ger såväl sandpelar- som spaltförsök tämligen entydiga utslag, se t. ex. fig 17 och 18. Vid spalttjocklekar mindre än 0,4 mm mellan glasplattor kan nämnvärd inträngning ej förväntas. Tillsats av bentonit till cementen synes ge något förbättrad inträngningsförmåga, dock ej så stor att den får praktisk betydelse.

De tyska forskarna Wittke & Louis (1968) har beskrivit en modell för experimentell undersökning av vattenflöde i sprickor. Enligt muntlig uppgift (1969) har denna modell även använts för vissa försök med injekteringsmedel, bl. a. normal och speciellt finmalen cement. I det senare fallet har framträngning även erhållits i spalter d mindre än 0,4 mm - något gränsvärde har dock ej angivits.

Det bör beaktas, att i spaltförsöken har använts glasplattor med mycket släta begränsningsytor mot spalterna. I sprickor i berg har begränsning ytorna normalt en helt annan råhetsgrad, vilket måste öka motståndet mot inträngning. En gränstjocklek $d = 0,4$ mm mellan slipade glasytor motsvarar antagligen $d \approx 0,6$ mm för bergsprickor.

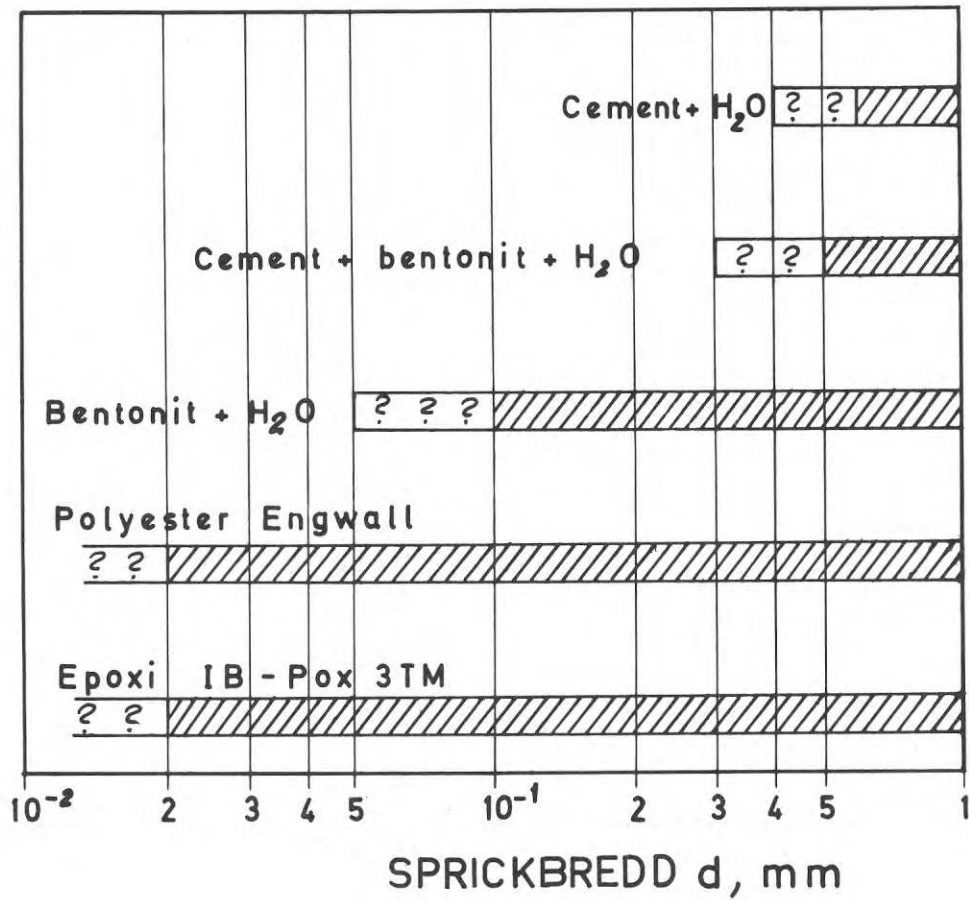


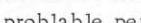
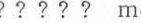


FIG. 26. Försöksresultatens tolkning för praktiska tillämpningar i öppna sprickor  = inträngning är trolig,  = inträngning är möjlig men saknar stöd i försöksresultaten. (Temperatur +20^o till +25^oC.)

An interpretation of how these experimental results could be applied to open cracks,  means probable penetration,  means possible penetration (no evidence having been found in the experiment results). Temperature +20^o C.

Figur 26 är ett försök att via sådana bedömningar "överföra" eller "tolka" försöksresultaten med hänsyn till praktiska tillämpningar för öppna sprickor i berg.

För sprickor som är fyllda av sand- eller lermaterial anvisar försöksresultaten endast plastpreparaten som möjligt injekteringsmedel, se t. ex. figur 9.

5.3 VISKOSITET - YTAKTIVITET

För samtliga injekteringsmedel bestämdes den dynamiska viskositeten, se tabell 1. Det föreföll vara en rimlig hypotes att inträngningsförmågan skulle bl. a. bero på viskositeten, som ju är ett mått på medlets inre friktion och därmed dess trögflutenhet.

Försöken synes emellertid visa att vid de tunna spalter, som här varit aktuella, är det andra faktorer som dominerar fenomenen. För de injekteringsmedel, som innehåller cement, är t. ex. cementkornens storlek och eventuellt deras tendens att "flocka sig" en så gränssättande faktor, att den i och för sig låga viskositeten blir utan betydelse vid d mindre än 0,4 mm. Bentonit + H_2O å andra sidan uppvisar ovanför gränsen $d = 0,1$ mm trots sin höga viskositet, ca 3000 cP, en betydligt snabbare inträngning än epoxiplasten med viskositet endast ca 200 cP, se figur 25.

Orsakerna till detta till synes egendomliga förhållande torde få sökas i helt olika ytaktiva egenskaper hos bentonit och epoxiplasten. Bentoniten har ringa ytaktivitet, och när spalten ligger över en viss gränstjocklek fungerar den i princip som vatten, se Wittke & Louis (1968). Epoxiplasten däremot har hög ytaktivitet, vilket resulterar i å ena sidan en "tröghet" vid tjocka spalter, å andra sidan en förmåga att nästan utan påliggande tryck "våta sig fram" genom mycket små spalter.

Skillnaden i ytaktiva egenskaper synes helt dominera över viskositetens eventuella inflytande.

5.4 TRYCK

Försöken har endast omfattat relativt låga injekteringstryck - maximalt 0,2 bar vid sandpelarförsöken och 0,5 bar vid spaltförsöken. Endast ett fåtal försök med tryckvariationer har kunnat utföras.

Vid verklig berginjektering används betydligt högre tryck - 7 - 20 bar är ej ovanligt och exceptionellt höga tryck som 50 - 60 bar förekommer. Vad innebär nu detta för försöksresultatens praktiska tillämplighet?

Vi kan till att börja med konstatera att mycket höga injekteringstryck i berg i vissa fall kan medföra att vissa sprickor vidgar sig, vilket då givetvis medför ökad inträngningsmöjlighet för injekteringsmedlet. Detta är dock så att säga en geometrisk effekt, som ligger utanför ramen för denna undersökning. En utvidgning av vissa sprickor kan emellertid ske på bekostnad av en hoptryckning hos andra sprickor, så att dessa blir för tunna för att nås av injekteringen. Det är alltså ingalunda självklart, att ett högt injekteringstryck genom sprickutvidgning verkligen kommer att bidra till tätning mot små läckage genom tunna sprickor.

Den väsentliga frågan gäller, om de tryckgradienter som tillämpats vid försöken varit någorlunda av samma storleksordning, som de som blir aktuella i närheten av injekteringsfronten i berg. Vid försöken har man haft värden från ca 0,02 bar/mm (vid stagnerad front) till ca 0,001 bar/mm. I berget byggs det vid injektering snabbt upp ett mottryck i icke injekterade sprickor vilket i förening med friktionsförluster gör att tryckgradienten nära fronten sannolikt är ganska flack. Försöksvärdena bedöms därför kunna vara tämligen representativa för verkliga förhållanden.

5.5 TEMPERATUR

Samtliga försök har utförts vid temperatur ca + 25° C. Detta kan innebära en begränsning av resultatens tillämplighet, särskilt vad gäller plastpreparaten, se tabell 1.

Innan försök utföres med direkta injekteringstillämpningar i berg bör därför kompletterande sandpelar- och spaltförsök utföras vid t. ex. till $+ 10^{\circ}$ C, eventuellt ännu lägre temperaturer.

Det är självklart att även härdningsegenskaperna, t. ex. gelningstid - se tabell 1 - bör undersökas vid motsvarande temperaturer.

6 SLUTSATSER

Tyvärr måste man konstatera att försökens omfattning inte räcker för att täcka variationer ens för alla de väsentliga faktorerna, t. ex. tryck och temperaturer. Härutöver uppvisar resultaten en mycket stor spridning, vilken förefaller till största delen kunna hänföras till svårigheterna att tekniskt behärska injektionsmaterialens egenskaper.

Trots detta ger försöksresultaten en allmän kvalitativ och delvis även kvantitativ bild av fenomenen, vilken tillåter vissa slutsatser av sannolikt praktisk betydelse.

a) I figur 26 har sådana slutsatser med tillämpning på öppna (ofyllda) sprickor framställts grafiskt. Enligt dessa kan man beräkna att injektering skall vara möjlig

för cement + H ₂ O	vid d	≥	0,6 mm
cement + bentonit + H ₂ O	vid d	≥	0,5 mm
bentonit + H ₂ O	vid d	≥	0,1 mm
polyester	vid d	≥	0,02 mm
epoxi IB-Pox 3 TM	vid d	≥	0,02 mm

Beträffande inekteringsmedlens egenskaper m.m. se tabell 1.

b) För sprickor, som är fyllda med finmaterial, kan endast plastpreparaten ge någon möjlighet till tätning.

c) För framträngningsegenskaperna i fina sprickor, d mindre än eller lika med ca 0,3 mm, eller i finkorniga material är injekteringsmedlets finkornighet och ytaktiva egenskaper av stor betydelse. Däremot synes den dynamiska viskositeten spela en underordnad roll.

De vid försöken använda sandpelarproven och spaltproven bör därför tills vidare kunna användas som kvalitativ test på injekteringsmedels inträngningsförmåga i tunna och/eller med finmaterial fyllda sprickor.

d) Om de erhållna resultaten står sig vid praktisk tillämpning, kan man tänka sig att en rationell "tätning" av en tunnel bör utföras som figur 27 antyder. Med relativt djupgående cementinjektering fylles alla grövre öppna sprickor (d större än 0,6 mm). En något grundare skärm av bentonit användes för att täta fina öppna sprickor (d större än 0,1 mm). Slutligen lägges en grund tätskärm av epoxi eller motsvarande preparat med uppgift att täta finsprickor och med finmaterial fyllda sprickor.

En injektering av denna typ bör på lång sikt dessutom ha möjlighet att verka som ett självtätande filter, där mycket fina partiklar förs fram mot och förstärker tätningseffekten hos epoxiskärmen.

Enligt uppgift av Hoffman (1967) har en modifikation av denna injekteringsmetod använts för tätning av ammoniak-behållare i oinklätt berggrum.

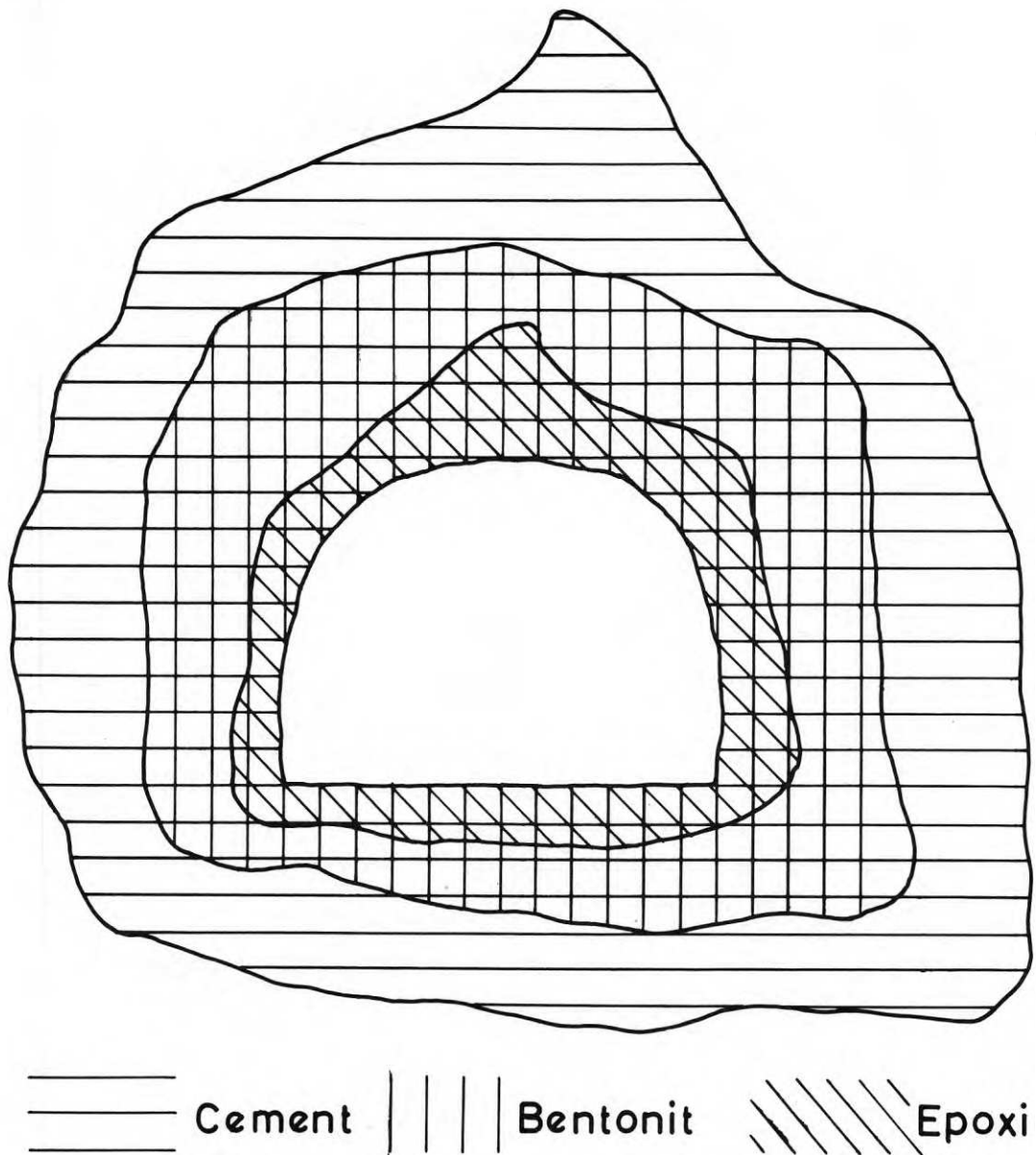


FIG. 27. Förslag till tätinjektering kring bergrum med utnyttjande av injekteringsmedlens olika egenskaper.

Proposal for sealing an underground chamber by means of injection, taking advantage of the various properties of the different injection compounds.

7 FORTSATT FÖRSÖKSVERKSAMHET

De här redovisade försöken har ej helt kunnat täcka undersökningsetapp a) i den ursprungliga försöksplanen, se avsnitt 1. Bl. a. bör kompletterande laboratorieförsök göras med fler injekteringsmedel, större tryckvariationer och lägre temperaturer.

Den fortsatta försöksverksamheten bör givetvis i första hand inriktas på att ge denna komplettering. Dessutom vore det lämpligt att nästa etapp kunde omfatta förberedande fältprov, t. ex. i någon tunnel med vattenförande berg. Ett begränsat bergparti av lämplig struktur kan injekteras med cement, bentonit och epoxipreparat i successiva operationer. Före och mellan injekteringstillfällena göres vattenförlustmätningar i lämpligt placerade borrhål. Praktiska blandnings- och injekteringsförfaranden bör studeras.

En undersökningsetapp enligt denna skiss borde kunna ge erforderligt underlag för större praktiska fältprov och framtagning av lämpliga arbetsbeskrivningar, dvs. den ursprungliga försöksplanens etapper c) och d), se avsnitt 1.

8 LITTERATUR

Ahlsell & Ågren AB, 1966, En bok om sand, Stockholm.

Hoffman, W, 1967, Om sprøytebetong som driftsforsterkning og om bruk av injektionsarbeider som hjelp under tunnel-drift og ved senere tetningsarbeider. Foredrag vid Konferense i fjellsprenningsteknikk, 16 - 17 nov. 1967, Oslo.

Morfeldt, C.O., 1967, Problem med vatten vid tunneldrivning i berg (IVA Bergmekanikkommitté) Diskussionsmöte 3.3.1967, p. 21, Stockholm.

Morfeldt, C.O., Nordin, P.O., Rosaar, H, 1967, Byggnadsgeologi - Bebyggelseplanering med hänsyn till den geologiska jämvikten. Byggmästaren, 6, 1967 (Även Hagconsult Publ. 13:67), Stockholm.

Wittke, W. & Louis, C., 1968, Modellversuche zur Durchströmung klüftiger Medien. XVII. Koll. Österreich. Ges. für Geomechanik, Salzburg, 1967, p. 53 (Springer) Berlin.

R45:1970

Denna rapport avser anslag nr C 449 från Statens råd för byggnadsforskning till Sten Bergman, Stocksund

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Abonnemangsgrupp: k (konstruktion)**

Pris: 13 kronor