



ISSN 0347 - 8165

**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**  
**GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN**

**Geologi**  
**Geoteknik med grundläggning**  
**Vattenbyggnad**  
**Vattenförsörjnings- och avloppsteknik**

# **Jorderosion i rörgravar för VA-ledningar**

**Laboratorieförsök och litteraturstudie**

**av**  
**Per Warnolf**



ISSN 0347 - 8165

**CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN**

**Geologi  
Geoteknik med grundläggning  
Vattenbyggnad  
Vattenförsörjnings- och avloppsteknik**

---

# **Jorderosion i rörgravar för VA-ledningar**

**Laboratorieförsök och litteraturstudie**

**av  
Per Warnolf**

Adress : Geohydrologiska forskningsgruppen  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Tel. 031/72 21 66, 72 21 67



## FÖRORD

Funktionskontroll av avloppsledningar har under 1980-talet rönt ett allt större intresse. Dels med hänsyn till de konsekvenser otäta avloppsledningar medför, dels med hänsyn till ledningarnas kondition.

Projektet "Rörgravens utformning med hänsyn till funktionskrav och geohydrologi" startades 1983 med siktet inställt på att beskriva konsekvenserna av olika rörgravsutformningar. En första rapport om rörgravskostnader, skador och driftstörningar publicerades 1984 med titeln: "Byggande, drift och förnyelse av kommunala va-ledningar".

Fortsättningsvis har projektet i huvudsak varit inriktat mot jorderosion i rörgravar.

Föreliggande rapport redovisar laboratoriestudier om jorderosion i rörgravar och baseras på egna undersökningar och undersökningar, som utförts i England och USA.

Resultaten från Water Research Centre i England publiceras med tillstånd av WRC, vars originalrapporter är interna. Ett samarbetsavtal med WRC har möjliggjort att vi fått ta del av deras försöksresultat. Vi tackar härmed WRC för deras medverkan.

Stort tack riktas till vännerna och medarbetarna vid institutionen för hjälp och givande synpunkter under projektets gång. Speciellt tackar jag projektledaren Gilbert Svensson som jag har haft stort stöd och hjälp av vid projektets uppläggning och genomförande.

Karl-Oskar Djärv, Börje Sjölander och Lars-Åke Sidenberg tackas för sinnrik konstruktion och byggande av försöksutrustningen.

Slutligen vill jag även tacka Alicja Janiszewska som ritat figurerna och Lisbeth Teiffel och Inger Hessel som skötte ordbehandlingen.

Göteborg i april 1988

Per Warnolf

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
FÖRORD	I
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	II
SAMMANFATTNING	V
1. INLEDNING	1
1.1 Vattenströmmar i ledningsgraven	1
1.2 Erosion	1
1.3 Konsekvensen av jordtransport	3
2. BESKRIVNING AV FÖRSÖKSANLÄGGNINGEN I LABORATORIUM, TESTADE JORDARTER OCH ANVÄND UTRUSTNING	5
2.1 Inledning	5
2.2 Försöksanläggningen	5
2.3 Testade jordarter och packning av jord i lådorna	7
2.4 Styrning av vattenflöden	9
2.5 Verktyg för att utföra en defekt monterad gummiring i en betongrörsfog	10
2.6 Mätning av fogöppning	12
2.7 Mätning av passerad mängd jord	13
2.8 Luftevakuering	13
3. FÖRSÖKSBEKRIVNING OCH RESULTAT AV DE OLIKA FÖRSÖKEN	15
3.1 Försök med inläckande vatten genom fogdefekt	15
3.1.1 Syfte	15
3.1.2 Försöksuppställning	15
3.1.3 Resultat	16
3.1.4 Kommentarer	18
3.2 Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd ovan markytan	19
3.2.1 Syfte	19
3.2.2 Försöksuppställning	19
3.2.3 Resultat	21
3.2.4 Kommentarer R1-R5	27

3.3	Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Jord 2, utan överlast	28
3.3.1	Syfte	28
3.3.2	Försöksuppställning	28
3.3.3	Defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, två försöksserier	29
3.3.4	Defekt bestående av slits i hjässan på röret, en försöksserie	32
3.3.5	Defekt bestående av slits i hjässan på röret, löst packad jord, en försöksserie	33
3.4	Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast	35
3.4.1	Syfte	35
3.4.2	Försöksuppställning - överlastens påförande på jorden	35
3.4.3	Resultat av försök med defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, jord 2	36
3.4.4	Defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, jord 1	36
3.4.5	Defekt bestående av slits i hjässan på röret, en försöksserie, jord 1	37
3.4.6	Defekt bestående av slits i hjässan på röret med försökslådans vattenventil öppen, jord 2	38
4.	GENOMGÅNG AV FÖRSÖK UTFÖRDA VID WATER RESEARCH CENTRE	40
4.1	Inledning	40
4.2	Jordtransport genom springa i liten försökslåda, sex olika jordar (Experimental studies of soil particle migration through cracks /6/)	40
4.3	Jordtransport genom springa i liten försökslåda med språnggraderade jordar och lerjordar, samt utläckage ur ledning (Further studies of soil particle migration through cracks /7/)	43
4.3.1	Försök med fyra språnggraderade jordar	43
4.3.2	Försök med sex lerjordar	47
4.3.3	Försök med utläckande vatten (reverserade flöden), tre försöksjordar	50

## IV

4.4	Jordtransport genom springa i liten låda med jord från ett område i London med kända ledningskollapser (Soil migration studies on Camden Sand /8/)	52
4.5	Försök med stor försökslåda med omväxlande in- och utläckage genom spalt för siltig sand (Void simulation rig trials with a silty fine sand /9/)	57
4.6	Försök med liten försökslåda med omväxlande in- och utläckage genom spalt. Överlast simulerad för tre jordar (Soil migration studies with reverse flow apparatus /10/)	69
4.6.1	Försök med Camden Sand	71
4.6.2	Försök med Boulder Clay	75
4.6.3	Försök med Dwyfor Sand	78
5.	GENOMGÅNG AV FÖRSÖK UTFÖRDA VID US ARMY ENGINEERING WATERWAYS EXPERIMENTAL STATION (WES)	84
5.1	Försök med inläckage genom korrugerade fogar och enkel spalt /11/	84
5.1.1	Inledning	84
5.1.2	Testgenomförande - inledande resultat	85
5.1.3	Resultat	87
6.	DISKUSSION	89
	REFERENSER	91
	BETECKNINGAR	92
	FIGUR- OCH TABELLFÖRTECKNING	93
	BILAGA 1	97

## SAMMANFATTNING

Läckvatten från dagvattenledningar eller vattenledningar söker sig i svenska rörgravar till den lägre liggande spillvattenledningen, som också ofta är otät och därmed medger inläckage. Denna överläckning kan ge upphov till jorderosion i återfyllningen och transport av finmaterial med det överläckande vattnet. Jorderosion och fortgående materialtransport kan ge upphov till sättningar i rörgraven och till och med kollaps av hela rörgravskonstruktionen.

Förutsättningarna för att en kollaps ska kunna uppstå är att materialtransporten fortgår kontinuerligt. Denna motverkas dock av att naturliga filter bildas, som fångar upp materialet. Välgraderade återfyllningsmaterial medför att riskerna för materialtransport är liten medan ensgraderade återfyllningsmaterial medför hög risk för materialtransport. Även om filter bildas kan dock dessa förstöras, om vatten strömmar i motsatt riktning mot den som rådde när filtret bildades. Ett exempel på denna process är när filter bildas vid inläckagepunkter hos en otät spillvattenledning, filter som förstörs när ledningen vid något tillfälle går dämd, dvs vatten strömmar ut ur ledningar.

Riskerna för jorderosion och fortgående materialtransport har undersökts vid laboratorieförsök med en otät betongrörledning ( $d=225$  mm). Otätheten har bestått i en defekt fog eller en slits i hjässan på röret. Återfyllningen i försöksgraven, som haft en bottenyta på  $0,2 \text{ m}^2$  och höjden 1,2 eller 1,5 m, har bestått av två olika jordar. Båda har uppfyllt Mark AMA:s krav för återfyllning men den ena har varit välgraderad och den andra mer ensgraderad. Packning liksom överlast har varierats för de olika försöken, som omfattat både ren inläckning och omväxlande in- och utläckning.

Ett stort antal försök har utförts, som visar:

- att vid ensidig inläckning sker ingen fortgående materialtransport
- att vid omväxlande in- och utläckning sker en materialtransport, men att denna avtar med antalet cykler av in- och utläckage



De erhållna försöksresultaten har jämförts med resultat från försök vid Water Research Centre i England och vid Waterways Experimental Station i USA. De utländska försöken visar att risk finns för materialtransport, men om försök med så likartade försöksbetingelser som möjligt jämförs, är försöksresultaten relativt samstämmiga. Dock har de utländska försöken omfattat både lösare packade återfyllningsmaterial och mer ensgraderade.

Sammanfattningsvis visar försöken att för normala svenska återfyllningsmaterial som packats enligt Mark AMA, är risken för materialtransport som fortgår till en rörgravskollaps liten. Det sker emellertid en icke obetydlig materialtransport vid omväxlande in- och utläckage av vatten, som kan ge upphov till sättningar i rörgraven.

## 1. INLEDNING

### 1.1 Vattenströmmar i ledningsgraven

Sedan lång tid tillbaka har det varit känt att otäta fogar i avloppsledningar ger upphov till att vatten läcker ur eller in i ledningar. Det inläckande vattnet kan ha olika ursprung, som grundvatten vid en hög grundvattenyta eller dricksvatten från en läckande vattenledning. Även överläckning av vatten från en otät dagvattenledning till en otät spillvattenledning kan förekomma. Utläckage av vatten kan förekomma i de fall ledningar går dämnda till följd av överbelastning.

Det förekommer således att vatten strömmar genom kring- och återfyllnadsmassorna i ledningsgravar. Syftet med denna studie är att undersöka i vilken omfattning vatten i ledningsgraven ger upphov till transport av jord från kringfyllningen och in i röret via i första hand otäta fogar.

Att jord finns i ledningssystemet är väl känt. Bland annat i samband med utförda flödesmätningar i avloppsledningar vid institutionen för VA-teknik, Chalmers tekniska högskola /1/, har jordmaterial påträffats i de vid dessa tillfällen använda mätöverfallen. En möjlighet är att detta jordmaterial härrör från kringfyllningen och att det transporterats in i ledningen av inläckande vatten genom otäta fogar. Andra exempel är att sand i avsevärda mängder påträffats såväl i pumpstationer som i själva ledningsnätet. Att det även härrör från andra källor är uppenbart.

### 1.2 Erosion

Erosion förekommer både som ytvatten- och grundvattenerosion. Givetvis är det endast den senare som är aktuell i det här fallet.

När vatten strömmar genom ett jordmaterial skiljer man mellan tre olika fenomen beroende på vattenhastigheten. När vattenhastigheten successivt ökas börjar först de enskilda kornen vibrera och omlagras för att vid ytterligare hastighet ryckas med och föras

bort med vattenströmmen. Den vattenhastighet vid vilken detta sker kallas gränshastigheten och motsvarande fenomen, erosion. Vid en lägre hastighet då endast partiklar följer med strömmen utan att erosion sker kallas för transport. Vid ytterligare minskad vattenhastighet då ingen transport sker, utan partiklarna ligger stilla, talar man om sedimentation.

Förekomst av erosion, sedimentation och transport beror främst på jordkornens storlek och vattenhastigheter. Även densitet, kornform och lagringsätt inverkar, vilket medför att gränshastigheten varierar. Gränsen mellan erosion och transport kan därför variera, se fig 1.

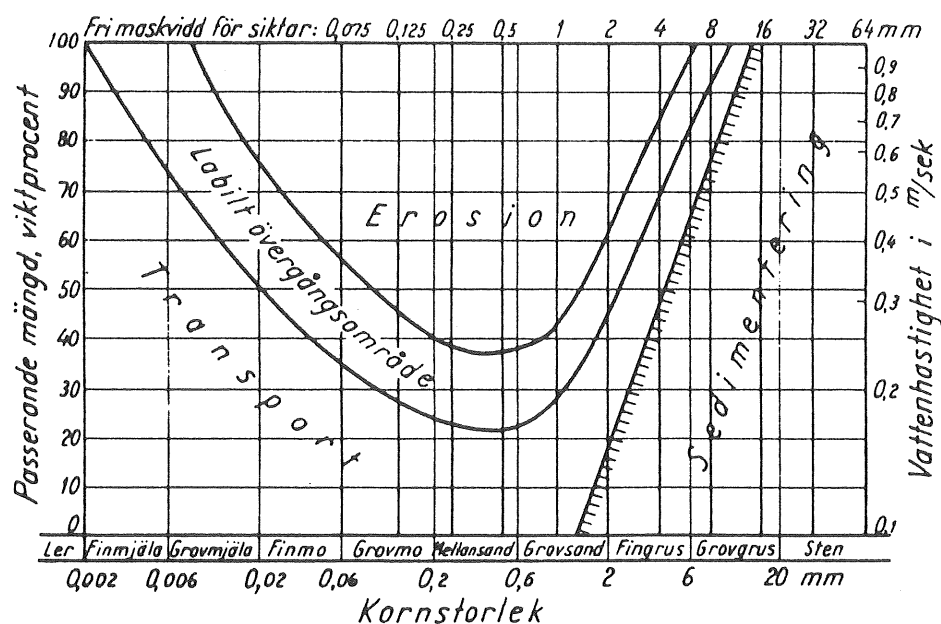


Fig 1 Erosionsområde vid olika kornstorlekar och vattenhastigheter.

Av figuren framgår även att gränshastigheten för erosionen avtar med minskande kornstorlek ned till 0,2-0,5 mm för att sedan åter öka vid minskad kornstorlek. Detta beror på att för de minsta kornstorlekarna existerar attraktionskrafter mellan kornen som först måste övervinnas innan de rycks loss och följer med vattenströmmen. De mest lättröderade materialen består alltså av grovmo och mellansand (finsand, mellansand enligt senare beteckningar). Förhållandet ovan gäller för sorterade jordarter. Vid osorterade jordarter försvåras erosionen av att naturliga filter uppstår. Uppkomsten av filter behandlas längre fram.

Problemet med erosion är uppmärksammat främst i samband med dammbyggnader. Där ger erosionen upphov till så kallad piping (kanalbildning) under dammkonstruktionen /2/. Förloppet är att vatten söker sig läckvägar i erosionskänsligt material under dammen. Härvid uppkommer erosion, som fortskrider från mynningen vid nedströmsänden och bakåt längs de kanaler i vilka grundvattenströmmen rinner. Hindras ej uppkommen erosion, koncentreras allt fler strömlinjer mot erosionskanalerna, materialtransporten ökar, kanalerna vidgas till tunnlar, som slutligen störtar in.

För vatten- och avloppsledningar kan man tänka sig ett liknande förlopp, om än i mindre skala. Vid fältstudier utförda av institutionen för VA-teknik, CTH /1/, uppdagades att vattenläckage från dag- till spillvattenledning i vissa fall är omfattande. Vattenströmmen i ledningsgraven bör då även kunna ge upphov till erosion av återfyllnadsmaterialet.

### 1.3 Konsekvensen av jordtransport

Om jordtransport genom otäta fogar förekommer ger detta självfallet upphov till sättningar i ledningsgraven. Dessa sättningar kan i sin tur medföra att ledningarna får upplagsreaktioner, som de ej är dimensionerade för, med brott som följd. I SKTFs Handling nr 18, /3/, beskrivs konsekvenserna av otäta ledningar i Borlänge, där mjåla trängt in och resulterat i underminering och katastrofala sättningar.

Beträffande avloppsledningar med kortare fogavstånd kan jordens sättningar ge upphov till svackor på ledningen så att profillinjen så småningom avviker från den projekterade. Resultatet av sådana svackor blir dels att det kan uppstå sedimentavlagringar i ledningen som behöver åtgärdas regelbundet, dels att de ger upphov till sämre hydraulisk kapacitet hos ledningen. Om avvinklingen i fogen går så långt att redan tidigare defekter förstoras, påskyndas givetvis jordtransporten. Detta kan t ex förekomma vid äldre cementbruksfogade rör.

Även vattenledningar drabbas. Enligt ett examensarbete vid institutionen för VA-teknik, CTH /4/, leder en deformation av 4 mm på

ett fritt upplagt gjutjärnsrör till brott. I områden med såväl stor skadefrekvens på vattenledningar som känt in- och utläckage på avloppsledningar kan bedömningen att skadorna eventuellt kan vara orsakade av jordtransport, utgöra ett ytterligare incitament att fogtäta avloppsledningar i sådana områden.

## 2. BESKRIVNING AV FÖRSÖKSANLÄGGNINGEN I LABORATORIUM, TESTADE JORDARTER OCH ANVÄND UTRUSTNING

### 2.1 Inledning

Jordtransport kring rör i mark har valts att studeras i laboratorium. Detta hänger samman med svårigheterna att mäta i fält. I projektets inledning gjordes en inventering av pumpstationer, med avseende på jordförekomst. I de pumpstationer där jord påträffades undersöktes sedan om jordmaterialet var avsatt i ledningsnätet uppströms pumpstationen. I ett par fall påträffades sedimenthögar av sand och grus. Då uppstod emellertid frågan om materialets ursprung. Lika väl som att materialet kom från ledningsgraven kan det ha kommit in genom t ex otätheter i brunnslock och från hushållen.

För att konstatera om otätheter i ledningarna förelåg gjordes överläckningsmätningar på de aktuella sträckorna. Dessa gjordes genom att vatten från en brandpost leddes in i dagvattenledningen, varefter observerades om något ökat flöde kunde noteras i spillvattenledningen. I inget fall kunde detta konstateras.

Ett ytterligare skäl varför laboratoriestudier föredragits är att de kritiska händelserna på nätet inträffar oregelbundet och med för långa återkomsttider. De kritiska händelser som i det här fallet är intressanta är höga grundvattenytor samt fyllda eller dämnda ledningar. Sådana förhållanden kan simuleras i laboratorium.

### 2.2 Försöksanläggningen

För att efterlikna förhållanden i en rörgrav användes två stycken lådor där lådorna utgör en modellsektion av en rörgrav. Båda lådorna har basmått 0,35 m x 0,6 m och består av ramar av svetsade stålkonstruktioner med ilagda väggar av 20 mm tjocka plexiglasskivor. Den ena lådan har höjden 1,5 m och den andra 1,2 m. Orsaken till höjdskillnaden var rent praktiska materialanskaffningsproblem. Respektive lådas ena kortsida är löstagbar för att möjliggöra påfyllnad och tömning av jordmaterial. Botten av

lådan, på vilken ramen vilar, består av en 10 mm tjock plåt med en centriskt placerad 1,5 tums dränerings-/avtappningsventil. Ventilen är försedd med ett finmaskigt nät för att förhindra jordtransport. Lådans överdel utgöres likaledes av en 10 mm tjock plåt och är försedd med ett uttag för en 2,2 m hög stigarledning, som via en T-koppling i dess nedre del även kan tjäna som påfyllnadshål för vatten. Vid försök med överlast ändrades lådans topp, vilket beskrives i kapitel 3.4.

I den nedre delen av de bägge långsidorna gjordes cirkelrunda håltagningar i plexiglasen. Genom dessa hål stacks två  $\varnothing 225$  mm betongrör in för att åstadkomma en fog inne i lådan. Vid vissa försök ersattes den otäta fogen med ett genomgående  $\varnothing 225$  mm rör med en slits i hjässan. I båda fallen tätades genomföringen med en gummiring med anliggning mot såväl rör som plexiglas. Gummiringen fixerades med hjälp av en styv plastring som pressades mot gummiringen. Principfigur över tätningen visas i fig 2.

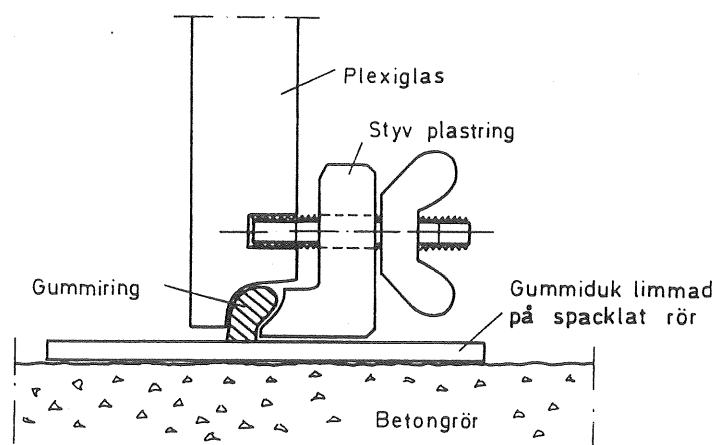


Fig 2 Detalj av tätning mellan rör och plexiglasskiva.

Vattengången i rören var placerad 0,1 m över lådans botten och gav sålunda utrymme för en underliggande ledningsbädd.

Lådan och genomföringarna var helt vattentäta för de aktuella vattentrycken. Provtryckning med 2,2 m vattenpelare över lådans topp har utförts. Enda möjligheten för utdränering av jorden var genom slitsen i röret, den otäta fogen eller genom att dräneringsventilen i botten står öppen. En översiktsbild av anläggningen visas i fig 1, bilaga 1.

### 2.3 Testade jordarter och packning av jord i lådorna

Vid försöken har två jordar använts. Dessa har valts ut med hänsyn till innehållet av finjordsfraktioner. Alltför finkorniga jordar är mindre lämpliga på grund av den låga permeabiliteten. Å andra sidan får heller ej jorden vara så grovkornig att det blir geometriskt omöjligt för kornen att passera genom en spalt eller en otät fog. Båda jordarna är naturliga jordar och uppfyller fordringarna för kringfyllning av betongrörsledning enligt Mark-AMA 83 /5/. Fortsättningsvis kommer jordarna att benämnas jord 1 respektive jord 2. Jord 1 är den grövre av de båda. Siktdiagrammen framgår av fig 3.

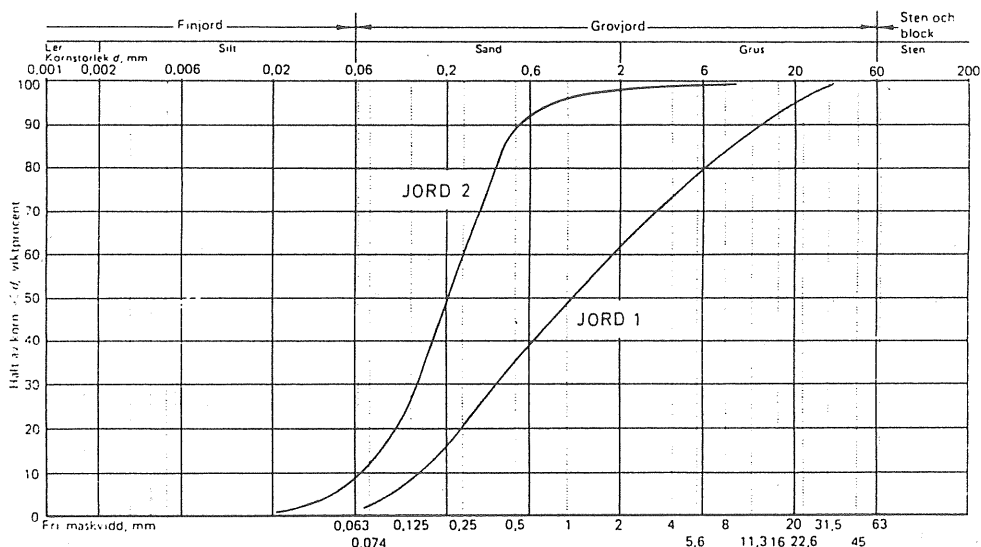


Fig 3 Siktdiagram för försöksjordarna, jord 1 och jord 2.

Maximala torrdensiteten bestämdes till  $2060 \text{ kg/m}^3$  för jord 1 och  $1780 \text{ kg/m}^3$  för jord 2. Packningen gjordes med CTH's packningsförfarande, som ungefär motsvarar modifierad Proctor.

Fig 4 visar packningsdiagrammet för de båda jordarna.



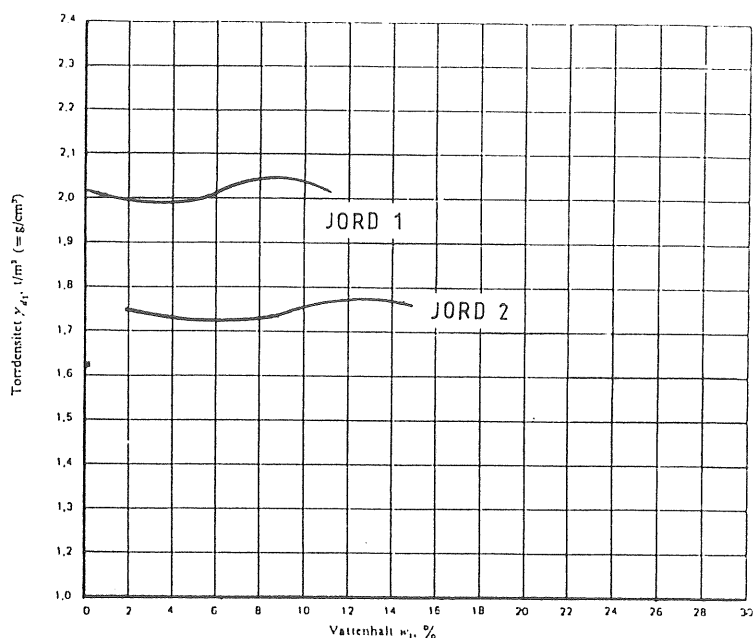


Fig 4 Packningsdiagram för jord 1 och jord 2.

De i Mark-AMA 83 angivna packningsmetoderna för kringfyllning och resterande fyllning i ledningsgravar skall motsvara ett packningsresultat motsvarande 90-95% modifierad Proctor, under hårdgjord yta. De standardarbetsredskap och metoder som anges i Mark-AMA går av uppenbara skäl inte att tillämpa i en laboratorieuppställning med en packningsyta som mätes 35 x 60 cm. I stället utarbetades, efter ett antal provpackningar, ett speciellt packningsförfarande som sedan användes vid packning av jorden i lådan.

Provpackningen utfördes i en låda med höjden 21 cm och med en bottenyta på 46 x 62 cm, dvs något större än försöklådorna. Packningsredskapet bestod av en specialbyggd vibrator med en vikt av 16 kg och med en platta med måtten 25 x 22 cm. För att kalibrera packningsmetoden utfördes ett antal provpackningar. Packningarna utfördes vid optimal vattenhalt enligt packningsdiagrammen, i cirka 4 cm tjocka lager med olika antal överfarter.

Det framkom i samtliga fall att packningen blev bättre än den avsedda 90% modifierad Proctor då vibratorn användes. För att erhålla det avsedda packningsresultatet användes redskapet som en vanlig handstamp med vibratorn bortkopplad. Fallhöjden var cirka

5 cm. Detta packningsförfarande användes sedan vid packning av lådorna. Vid samtliga försök, där inte annat anges, var packningsgraden 90% modifierad Proctor.

#### 2.4 Styrning av vattenflöden

Under projektets gång har en successiv utveckling av apparaturen för styrning av vattenflödena skett. Vid de första provkörningarna åstadkoms erforderligt vattentryck och vattenflöde genom att en vanlig tappkran "stod på rinn". Detta visade sig vara en olämplig metod dels på grund av det varierande trycket på nätet, dels på att det gick åt mycket vatten. I stället byggdes ett slutet vattensystem enligt fig 5. Delarna bestod av ett 120 liter stort vattenkar, varifrån vattnet med hjälp av en impellerpump pumpades upp i en plexiglaskolonn 3,5 m över golvnivå för att erhålla önskvärd tryckhöjd. I händelse av att pumpen skulle stanna till följd av strömavbrott kopplades automatiskt vattenledningsnätet in och försåg kolonnen med vatten. Detta skedde via en magnetventil som öppnade vid strömbortfall. Detta var en extra säkerhet mot driftavbrott vid långa kontinuerliga försök.

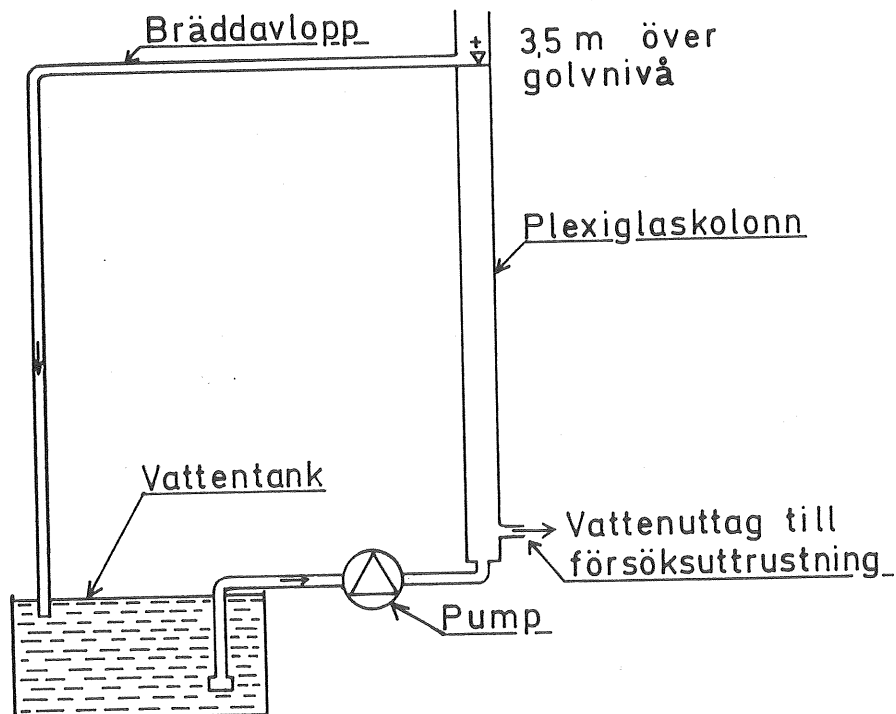


Fig 5 Principritning över vattensystemet med konstant tryckhöjd.

Kolonnen var försedd med ett bräddavlopp och bräddat vatten leddes tillbaka till vattenkaret. Vattenflödet till försökslådorna togs ut genom uttag i kolonnens nedre del. Returvatten från lådorna leddes också tillbaka till karet.

Styrning av flöden vid försöken med dämnda rör gjordes först genom att manuellt öppna och stänga ventilen, men med hänsyn till de korta cykeltiderna (30 minuter) tog förfarandet mycket tid i anspråk. Dessutom medgav det inte kontinuerlig drift dygnet runt. En automatisering var därför nödvändig. Denna bestod i korthet av en mikrodator som programmerades att ge signaler för öppning respektive stängning av magnetventiler. Programmet var menystyrt och gjorde det möjligt att variera antal cykler och cykeltider.

## 2.5 Verktyg för att utföra en defekt monterad gummiring i en betongrörsfog

Försöken har genomgående gjorts med ett  $\varnothing 225$  mm betongrör. Den otäta fogen har erhållits genom att gummiringen hänger ner ca 1/3 av rördiametern från hjässan räknat, se fig 6. För att foga respektive dra isär rören har specialtillverkade verktyg använts.

Vid fogning fixerades först gummiringen med hjälp av ståltråd vid den ena rörhalvan. För att centrera rörhalvorna i förhållande till varandra användes ett PVC-rör som stacks in i betongrören. För att underlätta införandet av PVC-röret sågades detta i två lika stora delar i längsled. För att dra ihop betongrören användes en gängad järnstång. Järnstången hade en fast mutter påsvetsad i ena änden som via en järnplåt låg an mot betongrörsändan. En likadan skiva anbringades på stångens andra ände och pressades mot den andra betongrörskanten med hjälp av rörlig mutter på järnstången.

För att få den gängade stången placerad i centrum av betongrörsledningen och därigenom undvika vinkeländring i fogen vid hopdragningen, användes ett verktyg som även nyttjades vid särdragning av rören efter avslutat försök. Verktuget bestod av två stycken 3 cm tjocka cirkulära skivor med vardera ett centriskt, mot skivan vinkelrätt placerat järnrör. Rören var av olika dimen-

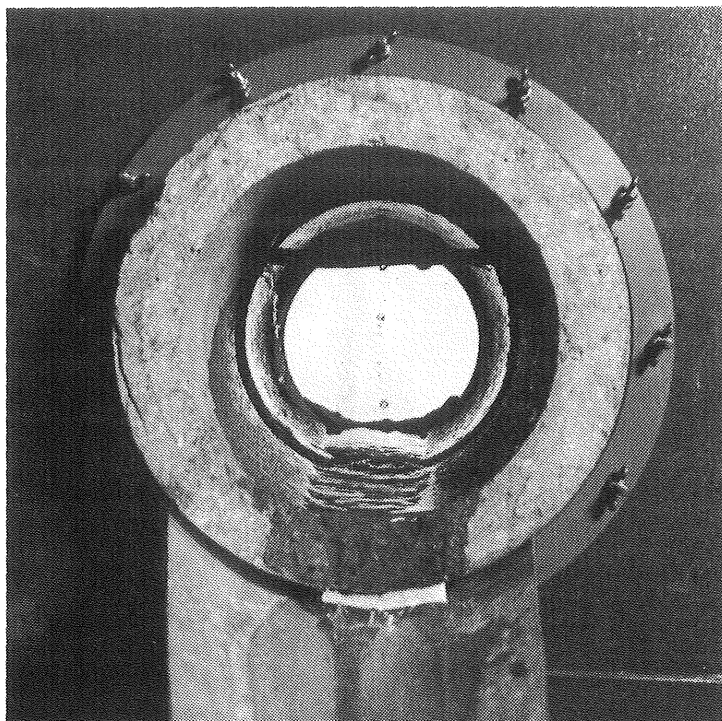


Fig 6 Foto av inhängande gummiring.

sion så att de kunde fogas in i varandra. Längs skivornas periferi var sex stycken justerbara bultar fästa. Verktögen visas i fig 2, bilaga 1.

Verktöget användes på så sätt att de bägge skivorna sattes in invändigt i var sitt betongrör på ömse sidor om fogen. Järnrören stacks härvid in i varandra. Vid hopdragningen av rören användes som ovan sagts verktöget endast för centrering av järnstången. Vid särdragning av rören spändes de justerbara bultarna ut mot betongrören så att de cirkulära skivorna satt fast mot vardera ett betongrör. Därefter tvingades de båda järnstyckena isär med hjälp av den gängade stången varvid även betongrören drogs isär. Verktöget, då det är hopsatt för särdragning av rören visas i fig 3, bilaga 1.

## 2.6 Mätning av fogöppning

Den begränsande sektionen för materialtransport genom en betongrörsfog utgöres av "överlappet" mellan rören, dvs avståndet A enligt fig 7.

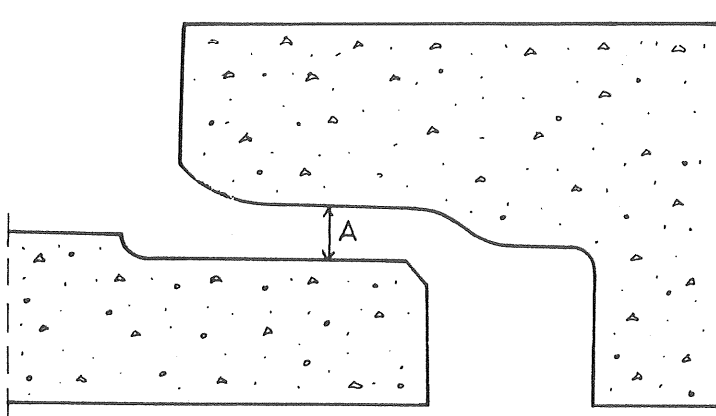


Fig 7 Detalj av rörfog.

För att mäta detta avstånd, injicerades flytande silikonmassa i fogen. När silikonerna härdat togs rören isär, med ovan angiven utrustning och på avgjutningen kunde aktuellt mått uppmätas.

Ytterligare en avsikt med foginjekteringen var att om möjligt få en avgjutning av jordmaterialets fraktioner närmast fogen. Till viss del visade det sig fungera, men silikonerna trängde inte in så långt i jordmaterialet.

En annan svårighet var att göra ett snitt genom de i silikonerna ingjutna stenarna. Silikonens elasticitet gör den nämligen svår-sågad, även med en diamantklinga, vilket innebär att jordpartiklarna lätt lösgöres och faller ur ingjutningen. Fig 8 visar en avgjutning.

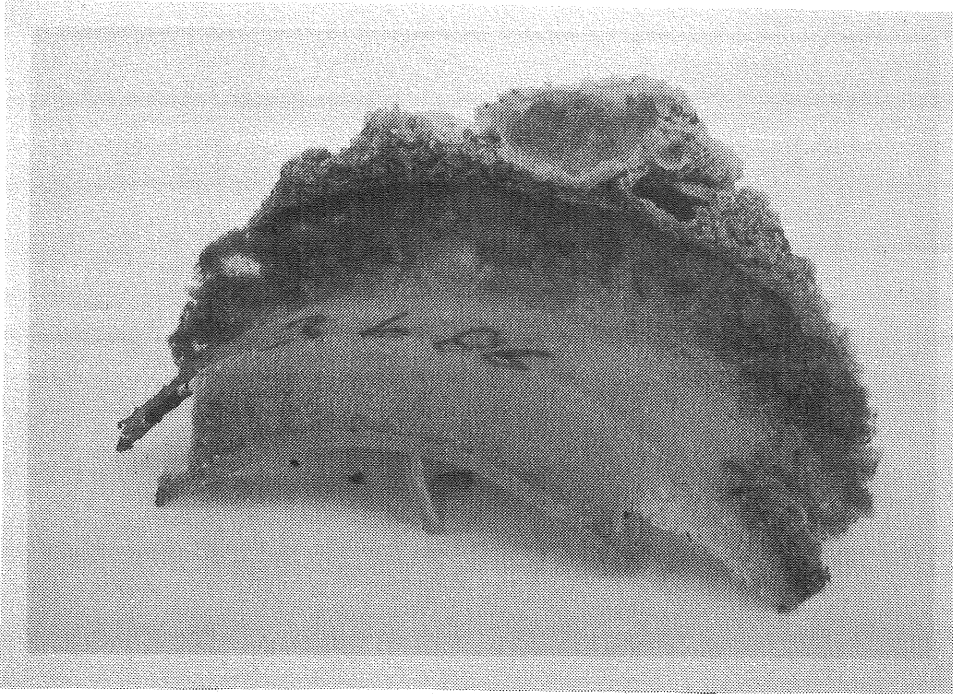


Fig 8 Fogavgjutning.

### 2.7 Mätning av passerad mängd jord

Under försökens gång uppmättes passerad mängd jord genom fogen/spalten med vissa intervall. För att suga upp jord-vatten-blandningen i röret användes en vacumpump till vilken kopplats två sand- och vattenavskiljande flaskor, i vilket materialet samlades upp, se fig 4, bilaga 1. Därefter torkades proverna under 24 timmar vid  $105^{\circ}\text{C}$  och vägdes.

### 2.8 Luftevakivering

Vid försök med reverserade flöden, då vattenflödet kontinuerligt tränger uppåt genom bädden och vid försöken med dämnd ledning är det viktigt att inte luft stängs inne i röret. Därför borrades ett hål i yttersta kanten på röret, på den delen som stack utanför lådan. Genom hålet stacks ett kopparrör som sedan förbands med ett plaströr. Vid vissa försök tjänade detta luftevakiveringsrör även som vattenståndsrör för att mäta vattentrycket vid rörets hjässa. Som framgår av fig 9 var luftningsröret placerat så att det ej blockerades av tättningsproppen.

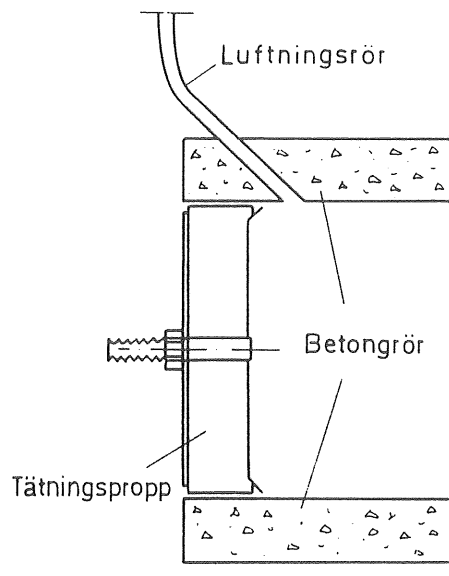


Fig 9 Sektion genom betongrör med luftevakueringsrör.

### 3. FÖRSÖKSBESKRIVNING OCH RESULTAT AV DE OLIKA FÖRSÖKEN

#### 3.1 Försök med inläckande vatten genom fogdefekt

##### 3.1.1 Syfte

Avsikten med dessa försök var att efterlikna en ledningsgrav där vatten utifrån söker sig in i en avloppsledning. Sådant vatten kan härröra från en läckande dagvattenledning eller från grundvatten vid en hög grundvattenyta.

##### 3.1.2 Försöksuppställning

Vid dessa försök passerade vattnet från uttaget i kolonnen genom en rotameter och därefter till stigarledningen, fig 10. Försöken inleddes emellertid med att jorden vattenmättades genom att vatten släpptes på genom bottenventilen och långsamt fick stiga upp genom jordbädden. Metoden att vattenmätta underifrån tillämpades för att driva ut luft ur bädden. Vid denna vattenmättnad var betongrören proppade i båda ändar. När vattenmättnaden avslutades började själva försöket, genom att den förutbestämda tryckhöjden ställdes in genom en reglerventil, placerad direkt efter rotametern. Vid denna försöksuppställning dräneras lådan endast genom fogen. I verkligheten kan detta inträffa i en ledningsgrav i en tät jord som återfyllts med ett mera vattengenomsläppligt material. Under försökens gång hölls tryckhöjden konstant. Detta medförde att tryckhöjden måste justeras ett flertal gånger dagligen med hjälp av reglerkranen.

Materialet som transporterades genom fogen av det utdränerade vattnet, stannade i huvudsak kvar i springan mellan rörändarna. Endast en mindre del av de finare partiklarna följde med vattenströmmen för att senare fångas upp av en filterduk placerad i en tratt vid utloppet. När tillräckligt mycket material ansamlats i fogen tömdes den med hjälp av vacumsugen.



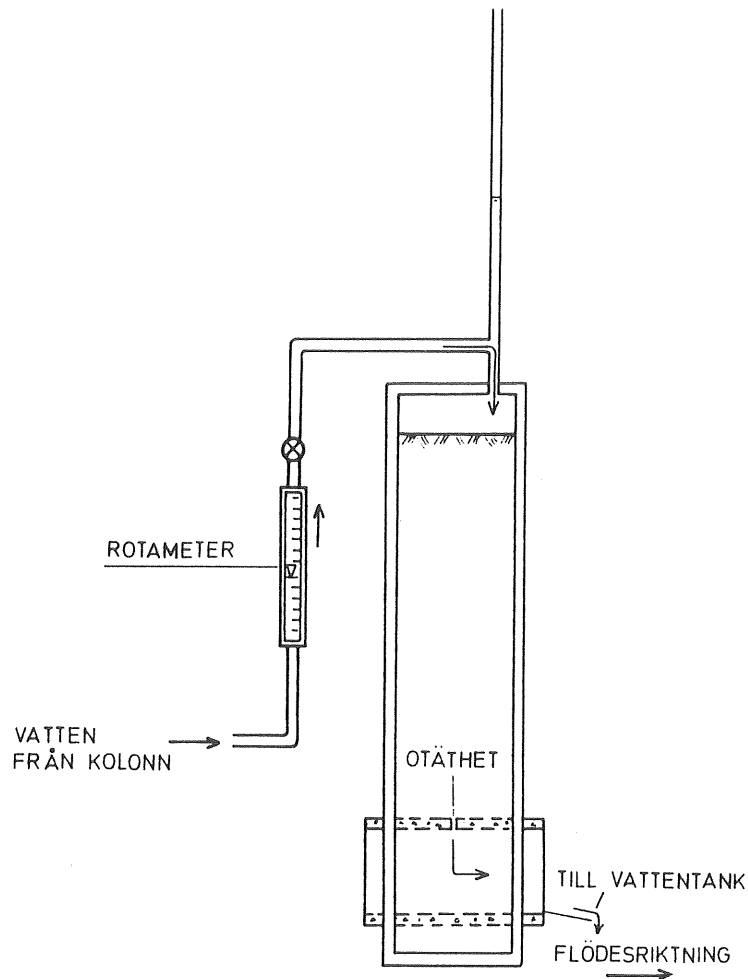


Fig 10 Försöksupställning vid försök med inläckande vatten.

### 3.1.3 Resultat

Försöken 1-3 utfördes med jord 1. Fogöppningen var 4,3 mm. Avstånd A enligt fig 7.

#### Försök 1

Vid detta försök var tryckhöjden 1,7 m ovan rörets hjässa. Försöket pågick under 18 dagar. Prov togs efter 1 vecka och vägde 139 g. Ingen ytterligare jordtransport genom fogen observerades. Initialflödet var 1,2 l/min. Maximala flödet 4,0 l/min samt lägst uppmätta flöde 1,0 l/min.

## Försök 2

Detta försök som pågick under 26 dagar var en direkt övergång från försök OD 1. Tryckhöjden ökades från 1,7 m till 2,2 m utan mellanliggande tömning/återfyllnad av lådan. På grund av den längre försöksperioden skedde viss algpåväxt under försökets gång. Detta medförde att flödet minskade under ett par dagar troligen till följd av igensättning. Botemedlet var att dosera klor i form av natriumhypoklorid till vattnet. Effekten härav, mätt som en ökning av vattenföring, märktes mycket snabbt.

Initialflödet direkt efter tryckhöjningen var 1,9 l/min, maxflödet 4,4 l/min och slutliga flödet vid försökets slut 2,0 l/min.

Totala mängden material som trängde in genom fogen uppgick till 18,5 g.

## Försök 3

I likhet med försök OD 2 var tryckhöjden under detta försök 2,2 m. Provtiden var 21 dagar. Försöket inleddes med att ny jord packades i lådan. Den därefter följande vattenmättnaden förmådde inte att helt driva ut luften ur bädden. Detta hade till följd att flödet blev missvisande. Efter en veckas försökstid gjordes ett nytt försök att driva ut luften ur lådan. Detta utföll väl och det egentliga försöket (21 dagar) startade.

Initialflödet var 2,2 l/min, maxflödet 4,0 l/min och slutflödet 1,4 l/min.

Totalt transporterades 330 g jord genom fogen under försöket. På samma sätt som under de tidigare försöken skedde transporten under den inledande fasen av försöken. Efter det att maximala flödet uppmäts och nedgången påbörjats var den transporterade mängden jord försumbar.

## 3.1.4 Kommentarer

De tre försöken uppvisade samma förlopp. Inledningsvis steg flödet genom fogen för att nå ett maximivärde, varefter det åter avtog för att senare stabilisera sig på ett lägre värde. Förloppet visas schematiskt i fig 11. Skeendet förklaras av att det initieellt spolats ur material ur jordbädden närmast fogen vilket ger upphov till ett ökat vattenflöde. När denna urspolningsfas avslutats följer en uppbyggnad av ett filter, som i takt med att det blir tätare och tätare resulterar i ett sjunkande vattenflöde. Förklaringen stämmer bra med de iakttagelser som gjordes beträffande materialtransporten, dvs att sådan förekom under de inledande 4-5 dygnen av försöken för att därefter nästan bli försumbara.

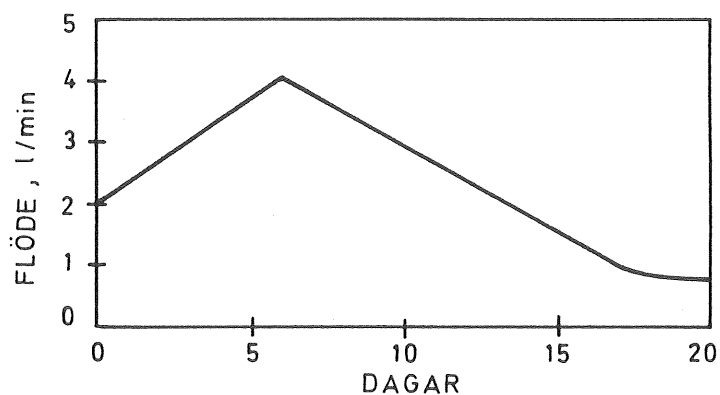


Fig 11 Schematiskt flödesförlopp vid försök 1-3 med inläckande vatten.

### 3.2 Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd ovan markytan

#### 3.2.1 Syfte

Denna försöksserie kan ses som ett ytterlighetsfall. Försöken syftar till att efterlikna det fall att vattnet från en grunt liggande ledning vid dämning tillåts stiga upp till markytan. Alternativt kan man tänka sig en situation att vattnet får strömma ur ledningen ut i ett hålrum eller t ex en makadam ovanför ledningsgravens kringfyllnadsmaterial. Försöksserien får dock ändå ses som ett teoretiskt fall där mycket små effektivspänningar finns för handen på grund av det höga portrycket.

#### 3.2.2 Försöksuppställning

Lådkonfigurationen framgår av fig 12. Försöken inleddes med att vattnet strömmade enligt pilarna på den vänstra delen av figuren, här kallat rättvänt flöde, till skillnad mot reverserat flöde då vattnet strömmade uppåt genom bädden. Ändringen från rättvänt till reverserat flöde åstadkoms till att börja med genom att ventil (1) stängdes, varvid vattnet började stiga inne i röret. Samtidigt härmed pressades luft ut genom luftevakueringsröret i betongrörets hjässa. När vattnet började strömma genom luftningsröret stängdes detta med hjälp av en slangklämma. Den luft som blev innesluten i fogen på grund av dess högre belägenhet än luftningsröret drevs ut genom bädden. Utdrivningen syntes i form av luftbubblor som lämnade jordbädden och steg genom vattnet överst i lådan. I en befintlig ledning som går dämnd torde samma fenomen med innesluten luft uppstå.

När det konstaterats att betongröret vattenfyllts ändrades ventilerna (2) och (3) så att vattenströmmen blev enligt den högra delen av fig 12. Som framgår av figuren fick det tidigare påfyllnadsröret vid reverseringen tjäna som utloppsrör (bräddavloppsrör).

Trycket i det dämnda röret mättes med ett vattenståndsror kopplat till betongröret.

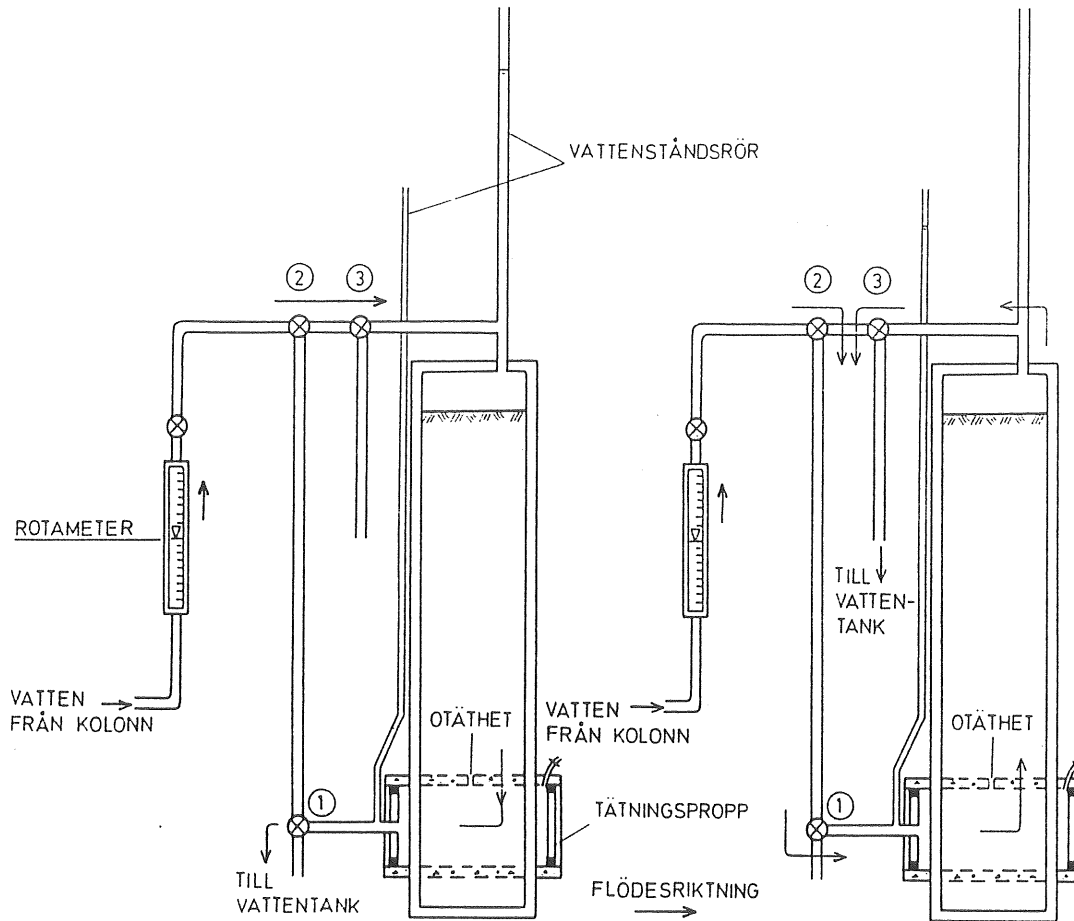


Fig 12 Försökuppställning vid omväxlande in- och utläckage ur ledning.

Dämningstrycket vid det reverserade flödet upprätthölls under 30 minuter varefter vattenströmmen åter vändes till rättvänt flöde. Det rättvända flödet upprätthölls tills stationära förhållanden uppnåtts vilket dröjde ungefär 60 minuter, varefter proceduren med dämning åter påbörjades.

Tre försök, alla med jord 1, utfördes. Nedan är de dock uppdelade på fem olika delar med hänsyn till deras olika förlopp. Försöken benämns R1 - R5, där R1 och R2, R3 samt R4 + R5 utgör de egentliga tre separata försöken, med urgrävning respektive återfyllning och packning. Packningen var i samtliga försök 90% modifierad Proctor. Själva fogen ändrades inte under försöken. På avgjutningen som gjordes efter försökens slut uppmättes en öppning på 6,6 mm.

## 3.2.3 Resultat

Försök R1 - R2

Efter det att jordmaterialet vattenmättats, följde sju dagar med rättvänt flöde. Tryckhöjden var 2,2 m. Flödet var under denna fas ungefär 2 l/min. Variationerna framgår av fig 13.

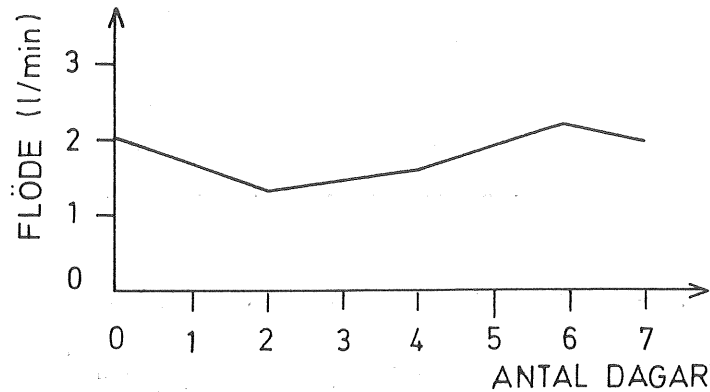


Fig 13 Flödesvariation vid inledande rättvänt flöde under försök R1.

Inledningsvis utfördes 37 cykler med tryckhöjden 1,25 m vid reverserat flöde. Därefter utfördes 17 cykler med reverserad tryckhöjd på 1,50 m. Efter ett uppehåll på tre veckor återstartades försöken med ytterligare 12 cykler vid 1,5 m tryckhöjd. Det är dessa sista försök som benämnes R2.

Vattenflöden som passerade vid reverserat respektive rättvänt flöde uppgick till 2-3 l/min respektive 9 l/min. Flödesvariation visas i fig 14 och 15.

Materialtransporten genom fogen framgår av tabellen nedan. Prover togs efter 10, 22, 37, 54 och 66 cykler. Totalt passerade 1677,9 g under de 66 cyklerna.

Tabell 1 Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R1 - R2.

Tryckhöjd vid reverserat flöde (mvp)	Försök	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
1,25	R1	10	131,7
1,25	R1	12	6,5
1,25	R1	15	5,0
1,5	R1	17	5,6
1,25	R2	12	9,4

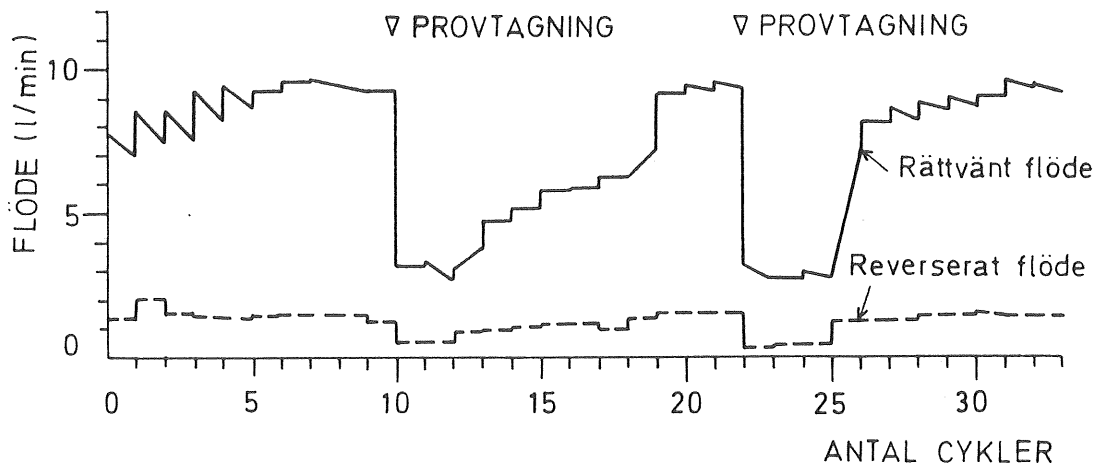


Fig 14 Flödesvariation under försök R1 - R2.

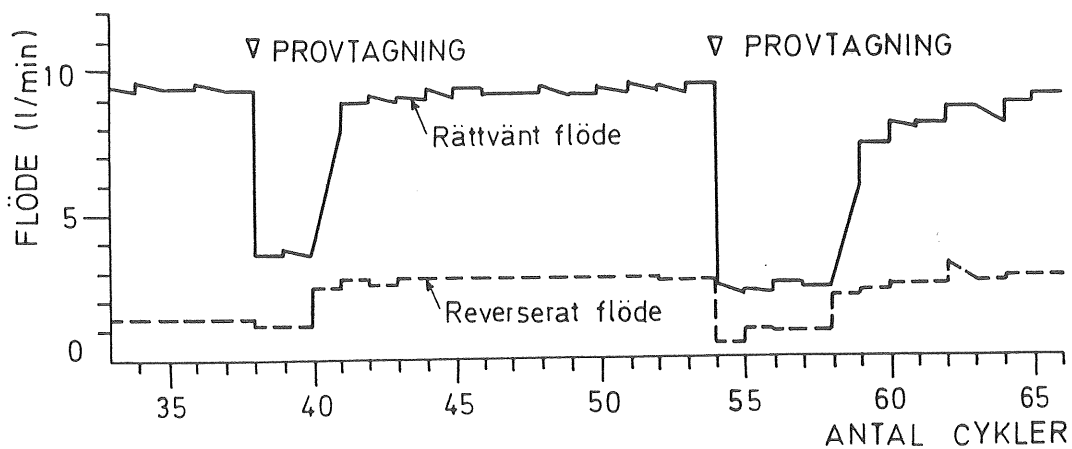


Fig 15 Flödesvariation under försök R1 - R2 (fortsättning).

Som framgår dröjer det ett antal cykler innan flödet efter en provtagning når upp till samma värde som före densamma. Anledningen var att luft var närvarande i jorden efter provtagningen då lådorna temporärt dränerades ut. Luften syntes som uttorkade, ljusa delar av jordmaterialet i lådan.

Efter de sex första cyklerna med 1,5 m reverserat flöde började jordpartiklarna överst i lådan att röra sig i vattenflödet, eller med andra ord, effektivtrycket vid det strömmande vattnet var noll.

Vid försök R2 var luft närvarande under nästan hela försöket varför det avbröts efter 12 cykler.

### Försök R3

Vid detta försök vattenmättades jorden med 70-gradigt varmt vatten, på grund av dess lägre innehåll av lösta gaser. I samband med vattnet avkyldes då det steg genom bädden upptog det gaser.

Tryckhöjden vid reverseringen var 1,5 m. Vid rättvänt flöde var tryckhöjden som tidigare 2,2 m.

Efter de första nio cyklerna uppmättes 811 g intransporterat material, motsvarande 90,1 g per cykel, vilket är i samma storleksordning som vid det förra försöket, trots de lägre vattenflödena i detta försök.

Flödena under försöket framgår av fig 16. Med anledning av de små flödena torrlades inte lådan vid provtagningen. Som visas i figuren inträffade en kraftig flödesökning direkt efter provtagningen. Anledningen till flödesökningen har inte kunnat förklaras.



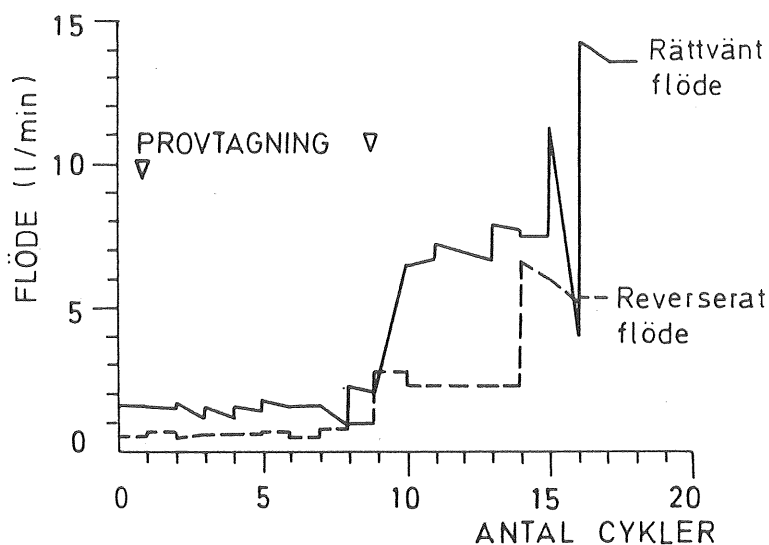


Fig 16 Flödesvariation under försök R3.

Vid reverseringen under den artonde cykeln, gjordes en oavsiktlig felmanövrering av ventiler varvid en mycket kraftig tryckhöjning uppstod. Denna orsakade en kraftig urspolning av bädden med resulterande kanalbildningar, bestående av grovt material.

På grund av genombrottet i bädden avbröts försöket.

#### Försök R4 - R5

Försök R4 var en duplicering av försök R3, med tryckhöjd 2,2 m respektive 1,5 m vid rättvänt respektive reverserat flöde. Flödet var under de sju första cyklerna av samma storlek som i försök R3, för att därefter stiga till det tre- eller fyrdubbla. Någon orsak till den momentana höjningen har inte heller här kunnat hittas. Efter flödesökningen var som framgår av fig 17 flödet tämligen konstant fram till försökets slut. Totalt utfördes 35 - cykler varvid det passerade sammanlagt 660,2 g fördelade enligt tabellen nedan.

Tabell 2 Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R4.

Tryckhöjd vid reverserat flöde (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
1,5	10	56
1,5	10	5,8
1,5	15	2,8

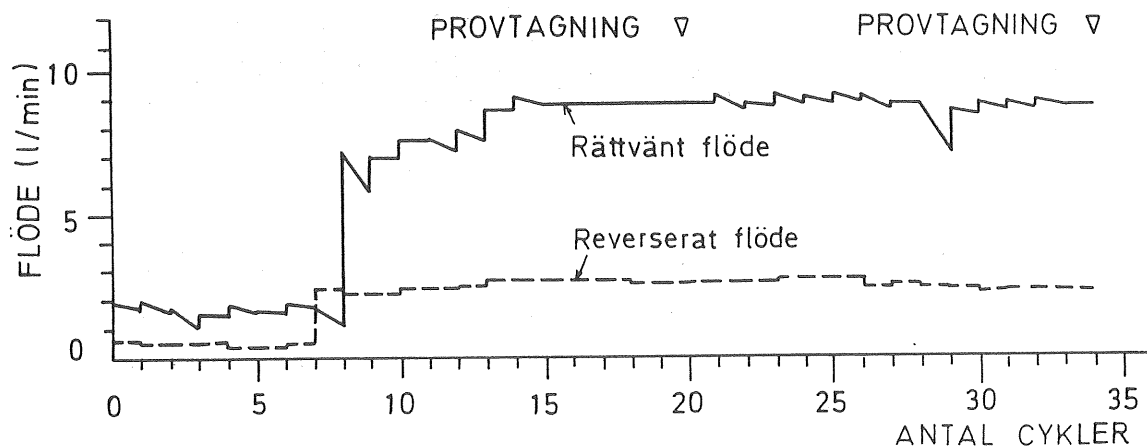


Fig 17 Flödesvariation under försök R4.

Försök R5 var en direkt fortsättning av försök R4. Något byte av jordmaterial i lådan ägde inte rum. Skillnaden mot försök R4 var ökningen av tryckhöjden vid reverserat flöde. Avsikten var att höja tryckhöjden till 1,8 m. Inte helt oväntat ledde detta liksom i försök R3 till genombrott i jordmaterialet, med kanalbildning/urspolning som följd. Till följd av kanalbildningen och därmed den ökade permeabiliteten kunde inte den avsedda tryckhöjden hållas. Detta gällde såväl för det rättvända som det reverserade flödet. Foto av urspolningen i den översta delen av jordmaterialet visas i fig 18.

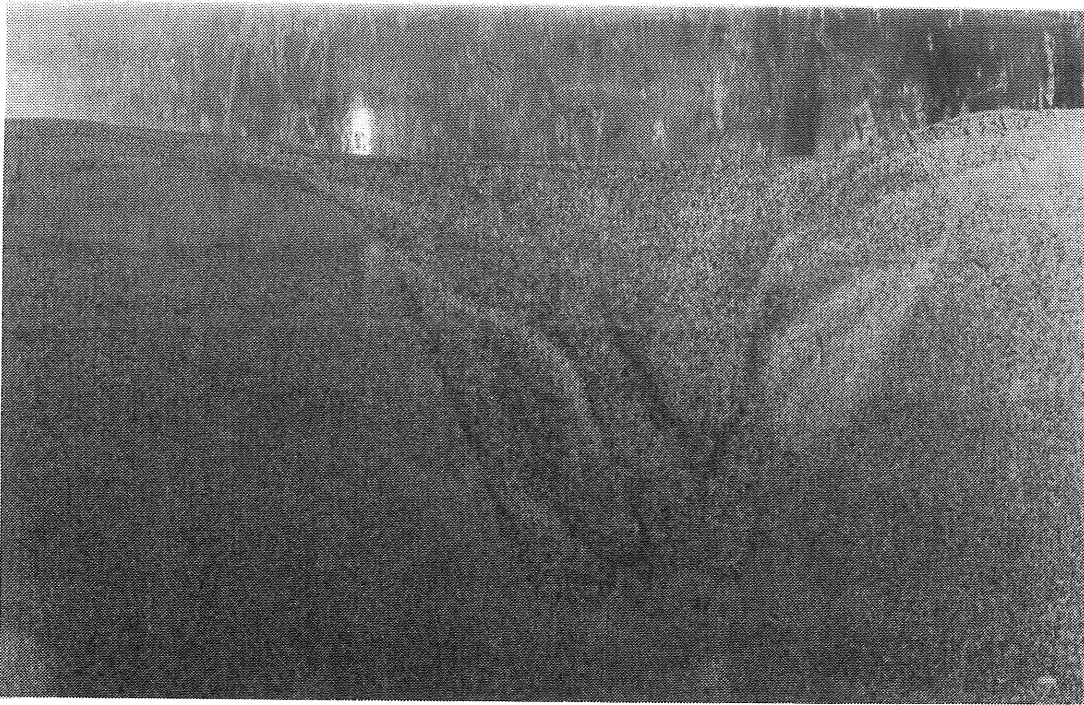


Fig 18 Foto av urspolning överst i lådan.

Initiellt uppgick tryckhöjden vid rättvänt flöde till 2,2 m för att mot slutet vara så låg som 1,2-1,3 m. Motsvarande tryckhöjd vid det reverserade flödet var 1,8 m respektive 1,6 m, dvs närmre det avsedda värdet.

Flödena framgår av fig 19. Observera att höjdskalet är ändrad på grund av de höga flödena vid detta försök.

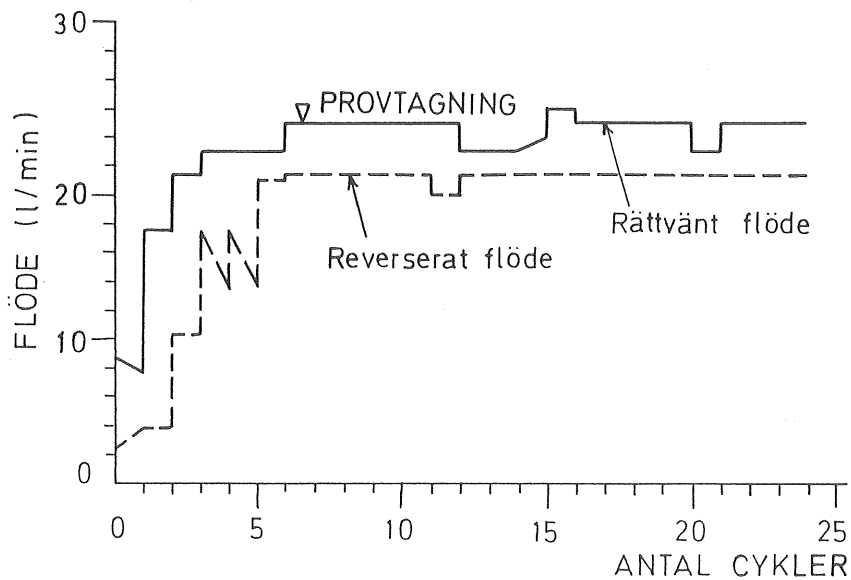


Fig 19 Flödesvariation under försök R5.

Materialtransporten genom fogen uppgick under försök R5 till 145,2 g under de 22 cyklerna som försöket omfattade. Tabellen nedan avser fördelning per cykel.

Tabell 3 Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R5.

Tryckhöjd vid reverserat flöde (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
1,8	5	8,74
1,6-1,8	5	12,6
1,6-1,8	5	6,0
1,6-1,8	7	1,2

### 3.2.4 Kommentarer R1-R5

Vid samtliga försök inträffade den största materialtransporten under den inledande fasen som framgår av fig 20. I figuren visas ackumulerad vikt av jordmaterialet som transporterats genom fogen som funktion av antalet cykler för samtliga försök R1-R5.

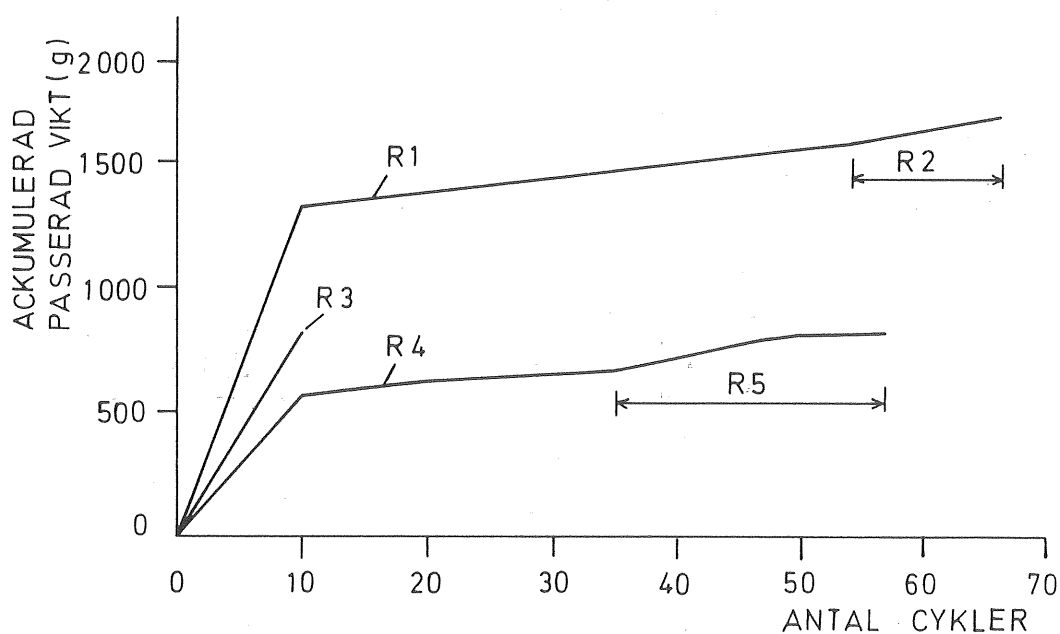


Fig 20 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antal cykler vid försök R1-R5.

### 3.3 Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Jord 2, utan överlast

#### 3.3.1 Syfte

Syftet med dessa försök var att efterlikna förhållanden då en ledning går dämnd. Med dämnd ledning avses att trycknivån i ledningen går över rörets hjässa. Det som sker vid dämning är då att vatten inne i ledningen, till följd av trycket, söker sig ut ur ledningen genom otätheter. När sedan flödet i ledningen avtar och trycklinjen åter ligger under hjässan kan vattnet åter infiltreras in genom otätheten.

#### 3.3.2 Försöksuppställning

Den principiella försöksutformningen framgår av fig 21. Vid dämning fördes vattnet in direkt till röret, för att sedan via otätheten stiga inne i lådan till i höjd med aktuell nivå i bräddöverfallet. Dämningstiden har i samtliga försök varit 30 minuter.

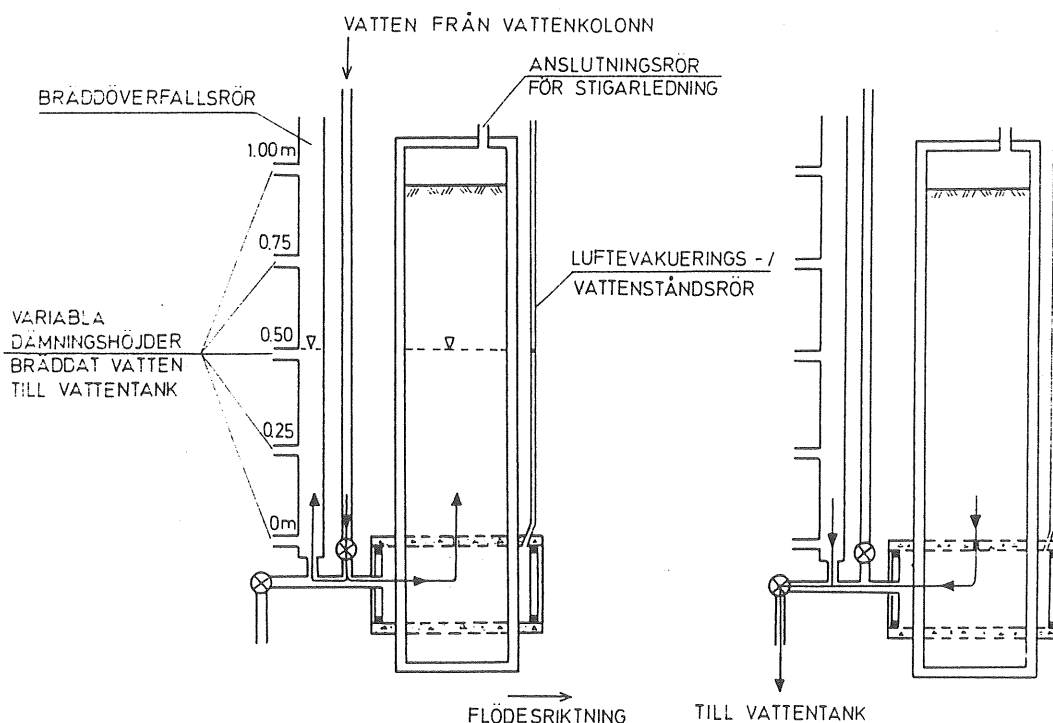


Fig 21 Försöksuppställning vid försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan.

Dämningen avslutades genom att tilloppsventilen stängdes och utloppsventilen öppnades, så att vattnet i bädden fritt kunde dräneras ut genom röret. Dräneringstidens längd var i samtliga försök utom ett också 30 minuter.

Försöken gjordes med såväl rör med otät fog som med rör med simulerad spricka i hjässan. Storleken på vattenflödet som trängde in i bädden mättes vid ett antal tillfällen och uppgick till cirka 0,2 l/min vid dämningens början. Vid försöken användes den finare jorden, jord 2.

### 3.3.3 Defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, två försöksserier

I båda försöken ökades tryckhöjden vid dämning, i steg på 0,25 mvp, från 0,25 - 1,0 mvp. Fogöppningen under försöken var 4,2 mm.

#### Försök 1

Totalt utfördes 215 cykler, där tryckhöjden under de 195 första cyklerna ökades enligt ovan. Vid de avslutande 20 cyklerna sattes tryckhöjden åter till 0,25 mvp. Fördelningen av antalet cykler per tryckhöjd framgår av tabellen nedan.

Tabell 4 Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Försök 1.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	15	19,1
0,50	30	8,6
0,75	60	19,7
1,0	90	22,1
0,25	20	15,2

Totalt passerade 4022 g jord genom fogen, eller i medeltal 18,7 g per cykel. Den lägre trycknivån vid slutet av försöket gav, som framgår av tabellen en något lägre passerad mängd per cykel.

### Försök 2

Sammanlagt utfördes 220 cykler under detta försök. De sista 40 cyklerna utfördes emellertid sedan lådan utsatts för en okontrollerat hög tryckhöjd på grund av ett ventilfel.

De första 180 cyklerna fördelade sig på nedanstående tryckhöjder.

Tabell 5 Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Försök 2.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	30	46,3
0,50	60	13,0
0,75	70	2,1
1,0	20	3,4

Totalt transporterades 2389 g genom fogen under de första 180 cyklerna, dvs i medeltal 13,3 g per cykel. Således i samma storleksordning som i försök 1.

Efter försökets slut, observerades en kanalbildning i jordmaterialet. Kanalbildningen ses som den ljusa cirkeln i fig 22. Bilden är tagen ungefär 20 cm över fogen.

Den ackumulerade vikten som funktion av antalet cykler vid de båda försöken framgår enligt fig 23. För försök 2 är även inlagt, med prickad linje, de 40 cyklerna som inträffat efter störningen.

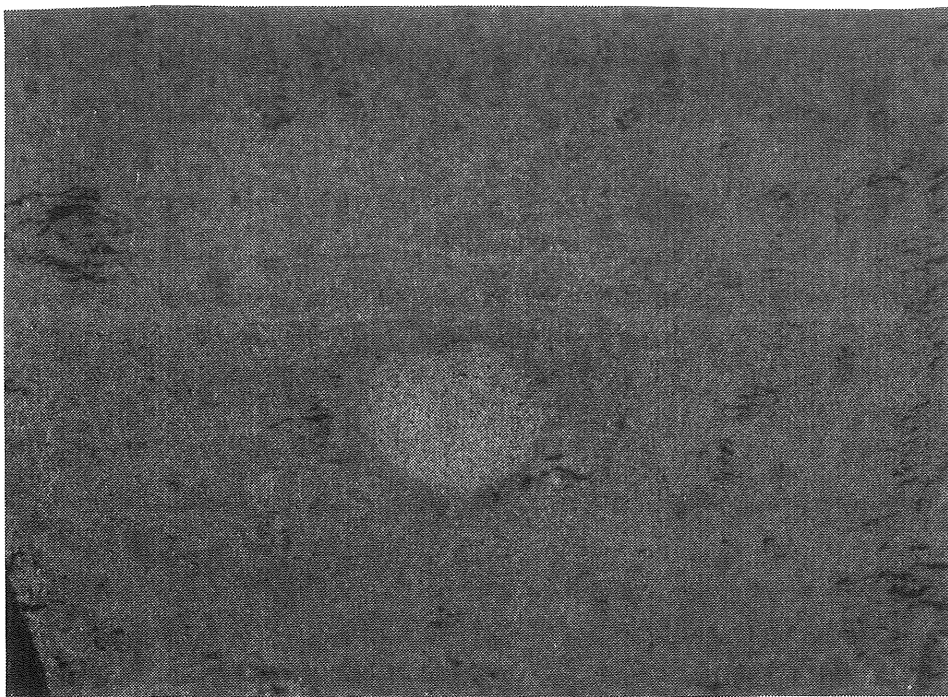


Fig 22 Foto av kanalbildning i jordmaterialet.

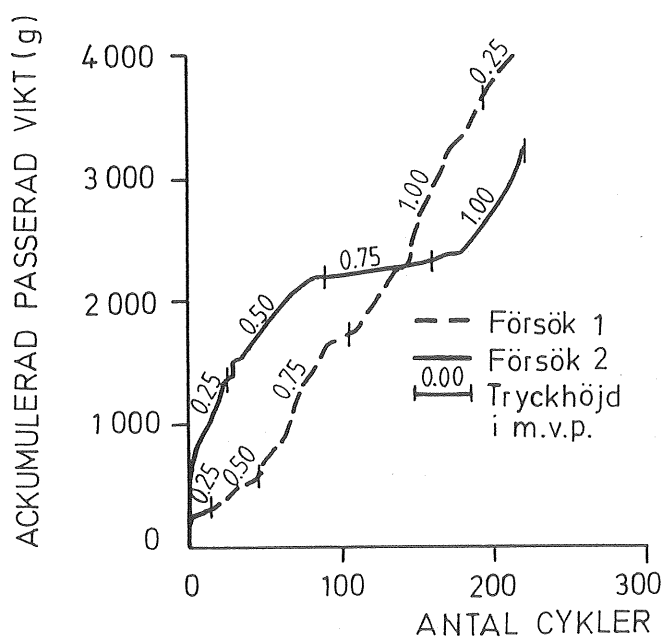


Fig 23 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.



### 3.3.4 Defekt bestående av slits i hjässan på röret, en försöksserie

Vid detta försök bestod rördefekten av en uppsågad 3,1 mm bred slits i rörhjässan i stället för den defekt monterade fogen. Längden på slitsen var invändigt 250 mm och utvändigt 300 mm på röret. Lådans hydrauliska utformning var i övrigt identisk med de två föregående försöken.

Totalt utfördes 705 cykler med varierande tryckhöjd mellan 0,25 mvp och 1,0 mvp som i enlighet med tidigare ökades i steg om 0,25 mvp.

Fördelningen av de 2475,5 g som transporterades genom fogen på olika tryckhöjder framgår av följande tabell. I medeltal över alla cyklerna passerade 3,51 g per cykel.

Tabell 6 Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	35	43,6
0,5	70	2,56
0,75	60	1,47
1,0	540	1,26

Försöket stoppades temporärt under 11 dagar efter den 325:e cykeln för att jorden i lådan skulle få tillfälle att torka ut. Syftet med detta var att undersöka om den torra jorden skulle vara mer utsatt för jordtransport. Någon effekt av denna uttorkning kunde inte märkas.

Akkumulerad vikt som funktion av antalet cykler framgår av fig 24.

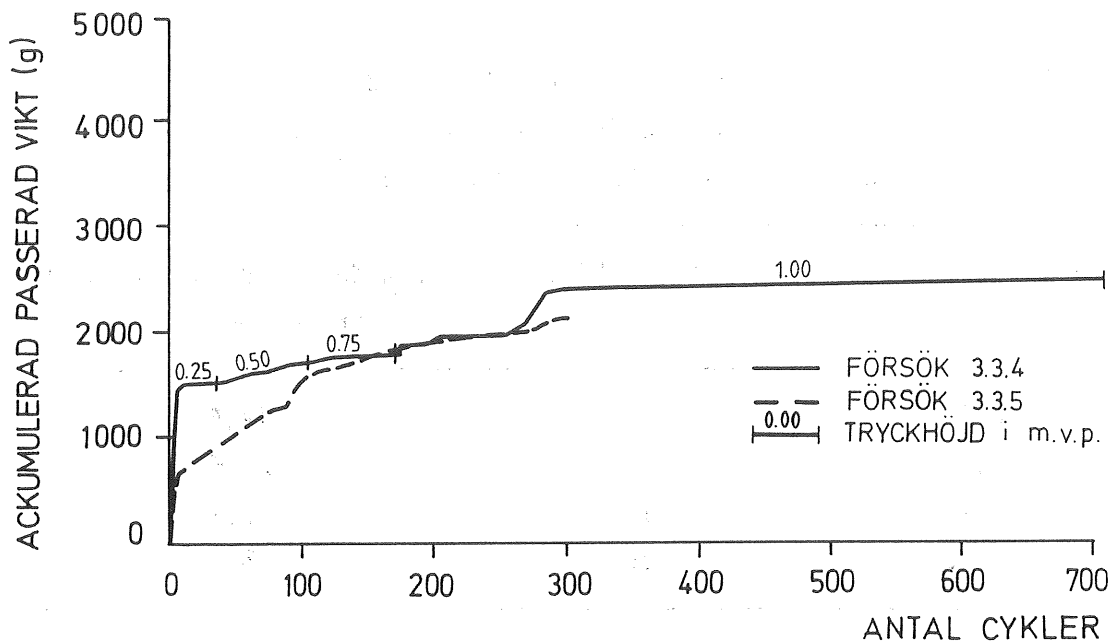


Fig 24 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.

### 3.3.5 Defekt bestående av slits i hjässan på röret, löst packad jord, en försöksserie

Detta försök utfördes som ett extremfall med avseende på packningen. Det i de tidigare försöken genomgående tillämplande packningsförfarandet, med ett packningsresultat på 90 procent modifierad Proctor tillämpades inte i detta försök, utan jorden påfylldes i lådan utan någon som helst packning.

Avsikten var att se om materialtransporten avsevärt förändrades vid låg packning. Den hydrauliska utformningen var som vid tidigare dämmningsförsök enligt fig 21 och samma stegvisa ökning av dämmningsstycket på 0,25 mvp från 0,25 till 1,0 mvp tillämpades.

Försöket omfattade sammanlagt 300 cykler. Vid tryckhöjden 0,5 mvp ändrades tillfälligt cykeltiden från de ordinära 30 minuterna till 6 minuter. 20 cykler genomfördes med denna kortare cykeltid.

Antalet cykler vid de olika tryckhöjderna och passerad mängd jord genom fogen visas i tabellen nedan.

Tabell 7 Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Löst packad jord.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	90	14,4
0,50	70 *)	6,8
0,75	115	2,7
1,0	25	5,2

\*) varav 20 st korta cykler

Resultatet av de 20 kortare cyklerna blev en något mindre jordtransport än de längre cyklerna. Under de närmast föregående 10 cyklerna passerade i medeltal 7,7 g per cykel, under de 20 korta cyklerna 2,9 g/cykel och under de 20 efterkommande, 4,1 g/cykel.

Vid detta försök uppstod en håligheter i jorden, en cirka 5 cm hög och 15 cm bred lins cirka 30 cm över rörets hjässa och i kanten på lådan. Håligheten uppstod vid tryckhöjden 0,5 mvp, men fylldes igen av ovanförhängande jord då tryckhöjden ökades till 0,75 mvp.

Akkumulerad vikt som funktion av antalet cykler framgår av fig 24.

### 3.4 Försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast

#### 3.4.1 Syfte

Anledningen till att införa en överlast var att lådan endast medger en fyllnadshöjd över röret på som mest drygt 1,0 m, vilket är ett i praktiken sällan förekommande läggningsdjup. Överlasten simulerar sålunda ett större läggningsdjup.

#### 3.4.2 Försöksuppställning - överlastens påförande på jorden

Vid försöken var anliggningsstrycket mot jorden 47 kPa, vilket motsvarar ungefär 3 meters jordöverlast, med de i försöken använda jordarna. Överlasten påfördes med en belastad perforerad platta som låg an mot jorden i lådans topp, se fig 25. Mellan plattan och jorden anbringades en filterduk för att förhindra jordtransport. Plattan i sin tur belastades med hjälp av en hydraulisk domkraft. För att kraftöverföringen från plattan till jorden skulle bli god kontrollerades anliggningen mycket noga.

Endast den mindre av lådorna var utrustad med denna simuleringsmöjlighet. Överlastförsökens hydrauliska lådkonfiguration var densamma som de övriga försöken med dämnd ledning, enligt fig 21.

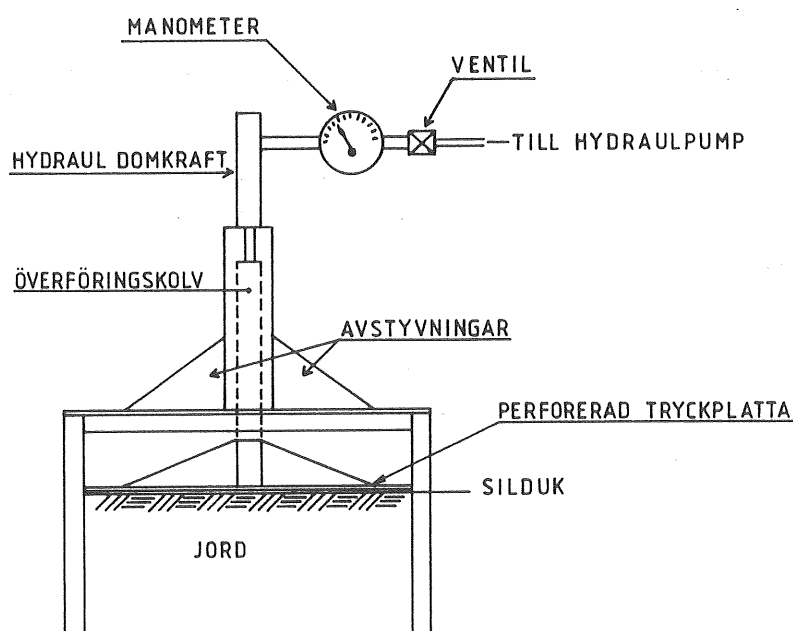


Fig 25 Överlastanordning.

### 3.4.3 Resultat av försök med defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, jord 2

Detta försök utfördes med jord 2. Försöket omfattade 310 cykler, fördelningen på antal cykler vid olika tryckhöjder och därvid i medeltal passerad mängd jord per cykel framgår av tabell nedan.

Tabell 8 Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 2.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	50	16,4
0,50	30	1,79
0,75	80	1,44
1,0	150	0,74

Sammanlagt passerade 1100 g jord genom fogen, eller i genomsnitt 3,55 g per cykel. Ackumulerad vikt som funktion av antalet cykler framgår av fig 26. Fogöppningen var 5,7 mm.

### 3.4.4 Defekt bestående av nedhängande gummiring i fog, jord 1

Vid detta försök med jord 1 utfördes 435 cykler. Under de avslutande 30 cyklerna var jorden avlastad. Antalet cykler per tryckhöjd var enligt tabell 9.

Tabell 9 Materialtransport genom fog vid in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 1.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	40	0,67
0,50	60	0,21
0,75	70	0,08
1,0	265	0,1

Totalt passerade 71,2 g jord genom fogen, dvs i genomsnitt 0,16 g per cykel. Som framgår av fig 26 var materialtransporten störst i början på försöket. Avlastningen resulterade inte i någon ökad materialtransport. Fogöppningen var 6,0 mm.

#### 3.4.5 Defekt bestående av slits i hjässan på röret, en försöksserie, jord 1

I likhet med försök 3.4.4 utfördes detta försök med en slits i rörets hjässa i stället för med en defekt monterad fog. Slitsöppningen var 3,1 mm. Försöket utfördes med den grövre jorden, jord 1. Försöket omfattade 546 cykler. Cyklerna fördelade sig på nedanstående tryckhöjder.

Tabell 10 Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 1.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0,25	90	2,02
0,50	120	0,3
0,75	115	0,12
1,0	210	0,03

I medeltal passerade 0,44 g per cykel under de ovanstående 535 cyklerna. Totalt passerade 238,15 g genom fogen under försöket. Efter de 535 cyklerna gjordes ett uppehåll på en månad, då jordmaterialet gavs tillfälle att torka ut.

Efter denna tid utfördes 1 cykel med full överlast, samt därefter 10 cykler då jorden var avlastad. Ingen av åtgärderna medförde någon ytterligare materialtransport.

Akkumulerad vikt av jordmaterial som passerade genom slitsen framgår av fig 26.

#### 3.4.6 Defekt bestående av slits i hjässan på röret med försökslådan bottenventil öppen, jord 2

Detta försök skiljde sig på så sätt mot de övriga att bottenventilen i lådan stod öppen och således möjliggjorde utdränering av jorden under röret. I de övriga försöken tilläts endast dränering att ske genom fog eller spalt. Försöket innebar därmed ändrade flödesförhållanden i försökslådan. Försöket motsvarar en rörgrav grävd i ett relativt genomsläppligt omgivande material.

Slitsöppningen var 3,1 mm och försöket utfördes med den grövre jorden, jord 1. Försöket omfattade totalt 530 cykler. Vid de inledande 45 cyklerna var tryckhöjden vid utläckage precis i nivå med rörets hjässa (0 mvp). Cyklernas fördelning på olika tryckhöjder framgår av tabellen nedan.

Tabell 11 Materialtransport genom slits, vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, bottenventilen i försökslådan öppen.

Tryckhöjd (mvp)	Antal cykler	I medeltal passerad mängd jord per cykel (g)
0	45	0,67
0,25	30	0,19
0,50	275	0,40
0,75	125	0,19
1,00	55	0

Totalt passerade 173,6 g under de 530 cyklerna, eller i medeltal 0,33 g/cykel. Ackumulerad vikt av jord som passerade genom slit-  
sen som funktion av antalet cykler framgår av fig 26.

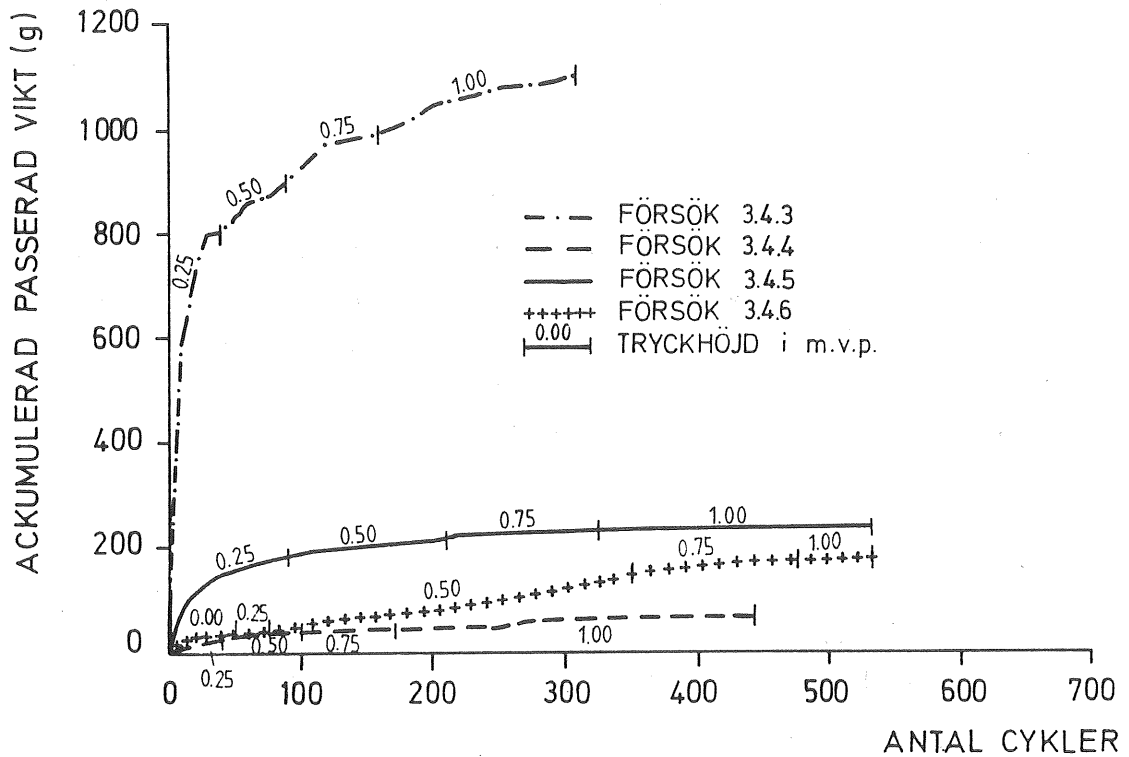


Fig 26 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.



#### 4. GENOMGÅNG AV FÖRSÖK UTFÖRDA VID WATER RESEARCH CENTRE

##### 4.1 Inledning

Merparten av den forskning som utförts inom ämnet har initierats och även till viss del utförts av WRC (WATER RESEARCH CENTRE) i England. De försök som har utförts och rapporterats har samtliga utförts i laboratorium och med likartad utrustning. Till skillnad mot våra försök har man ej studerat en verklig fog omgiven av jord. I stället har man i de flesta fall valt att studera transporten genom en springa, placerad i botten på en jordfylld låda. Forskningen finns rapporterad i interna publikationer från WRC som ej är offentliga. Genom ett ingånget samarbetsavtal med WRC har vi fått tillgång till resultaten. Det är även med WRC:s medgivande som resultaten refereras här.

##### 4.2 Jordtransport genom springa i liten försöklåda, sex olika jordar (Experimental studies of soil particle migration through cracks /6/)

Det första uppdraget som initierades av WRC är publicerat i rapporten "Experimental studies of soil particle migration through cracks", mars 1982. Arbetet har utförts av firma Scott Wilson Kirkpatrick & Partners, SWK. Försökens primära syfte var att finna den minsta öppning på springan (sprickan) vid vilken jordtransport av ett visst jordmaterial inträffar. Denna öppning, den så kallade "critical crack width",  $W_c$ , bestämdes genom att successivt öka sprickvidden.

Den använda testapparaturen bestod av en låda med höjden 600 mm, längden 300 mm och med bredden 150 mm. Frontväggen bestod av en genomskinlig plexiglasskiva. Den variabla springan i lådans botten löpte från bakväggen till frontväggen. Vattnet påfördes genom lådans lock. I toppen av lådan fanns även en tryckmätare placerad.

Försöken utfördes genom att låta vatten rinna nedåt genom bädden och ut genom springan i botten. Totalt genomfördes åtta försök på

sex olika jordar. Dessa sex jordar hade en kornstorleksfördelning från 0,001 mm till 3,35 mm, dvs från lera till fingrus. De finare fraktionerna var ej naturliga material utan hade erhållits från leverantörer till den keramiska industrin. De grövre jordarterna utgjordes av blandningar från olika naturliga jordar. Siktkurvor-  
na framgår av fig 27 nedan.

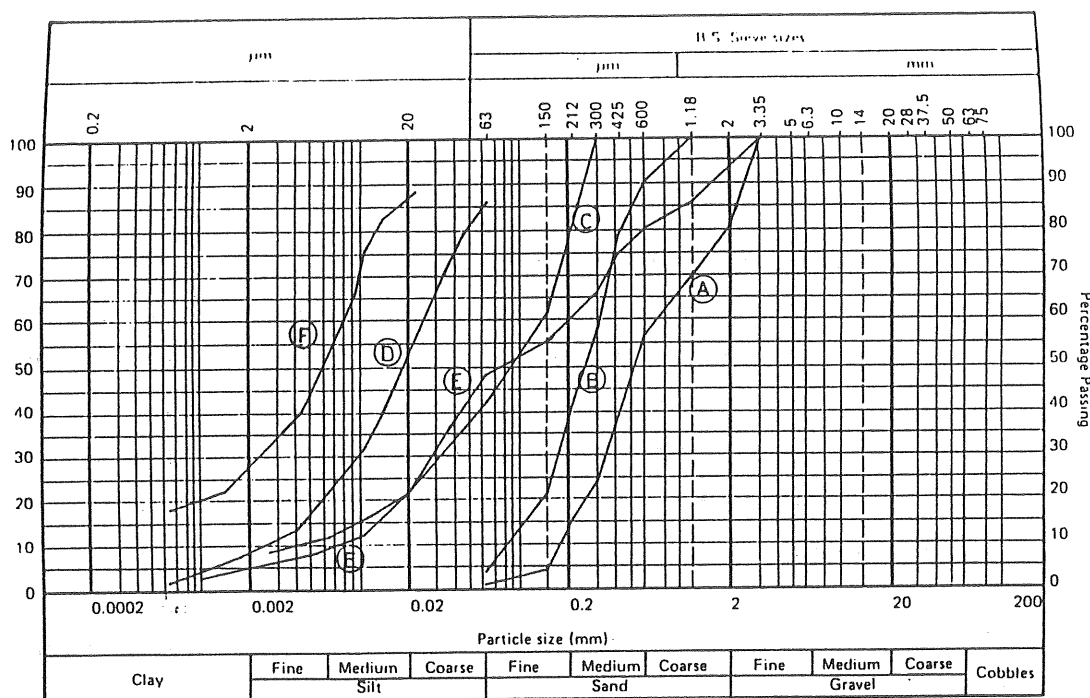


Fig 27 Siktdiagram för jordar använda vid experimenten.

Endast ett försök per jord utfördes, utom för jord A på vilken fyra försök gjordes. Ett av dessa fyra försök avsåg emellertid ett testförsök.

De erhållna värdena på den minsta sprickvidden,  $W_c$ , framgår av tabell 12 nedan. Som framgår av tabellen är sprickvidden mindre för löst än för hårdare packad jord. Som även framgår av figuren har man valt att korrelera sprickvidden med materialets  $D_{85}$ -kornstorlek. Just Terzaghis  $D_{85}$ -storlek befanns vara av avgörande betydelse även för jordtransport genom en spricka.

Tabell 12 Kritiska sprickvidder  $W_c$  i mm för de testade jordarna.

Test	%MDD	$W_c$	$W_c/D_{e5}$
A1	92.6	7.5	3.3
A2	93	7.5	3.3
A3	93	7.75	3.4
A4	85.4	6.0	2.7
B	90.6	2.5	4.8
C	86.8	0.5	2.2
D	88.6	0.2	3.3
E	92.4	5.25	5.0
F	90.8	Test in progress	

En annan slutsats vid studien var att den minsta sprickvidden var oberoende av tryckhöjden. Denna slutsats baseras på det inledande försöket A1. På grund av denna slutsats använde man sig av en tryckhöjd av 1,5 m vattenpelare (mvp) för de mer permeabla materialen A, B, C och E. För material D, silten och även för den siltiga leran, material F, användes olika tryckhöjder upp till 5 m vattenpelare.

Förklaringen till tryckoberoendet anses vara att de grövre jordpartiklarna bildar en brygga över springan. Dessa grövre partiklar håller i sin tur tillbaka de finare. Denna brygga kan endast raseras endera genom nedkrossning av kornen eller genom att valvet blir instabilt. Ingetdera anses kunna åstadkommas med i praktiken förekommande vattentryck.

Avslutningsvis fastslås i rapporten att de erhållna resultaten endast gäller för en vattenmättad jord. Någon överföring av resultaten på en endast delvis vattenmättad jord eller för en jord med en språnggraderad siktkurva, antogs inte vara möjlig. Som förslag på fortsatta forskningsinsatser nämns studier av vad som sker då vatten läcker ut ur sprickor i en ledning som går dämnd. I försöksmodeller innebär detta att vattnet skulle strömma underifrån och uppåt genom springan, ett så kallat reverserat flödesförlopp.

4.3 Jordtransport genom springa i liten försökslåda med språnggraderade jordar och lerjordar, samt utläckage ur ledning  
 (Further studies of soil particle migration through cracks /7/)

Ytterligare en rapport har skrivits av Scott Wilson Kirkpatrick & Partners för WRC:s räkning. Titeln på arbetet är enligt rubriken ovan. I denna rapport tar man upp de områden för fortsatt forskning som föreslagits i den tidigare rapporten. Följaktligen behandlas jordtransport med språnggraderad, (gap-graded) jord, lerjordar och fall med reverserade flöden.

4.3.1 Försök med fyra språnggraderade jordar

Testen med språnggraderad jord utfördes med fyra olika jordar, GG1 - GG4. Syftet med försöket var att fastställa om den tidigare relationen, en kritisk sprickvidd för välgraderad jord mellan  $2,5 D_{85}$  och  $4,5 D_{85}$ , även gäller för mindre välgraderade jordar. Sikt-kurvorna för de fyra jordarna framgår av fig 28.

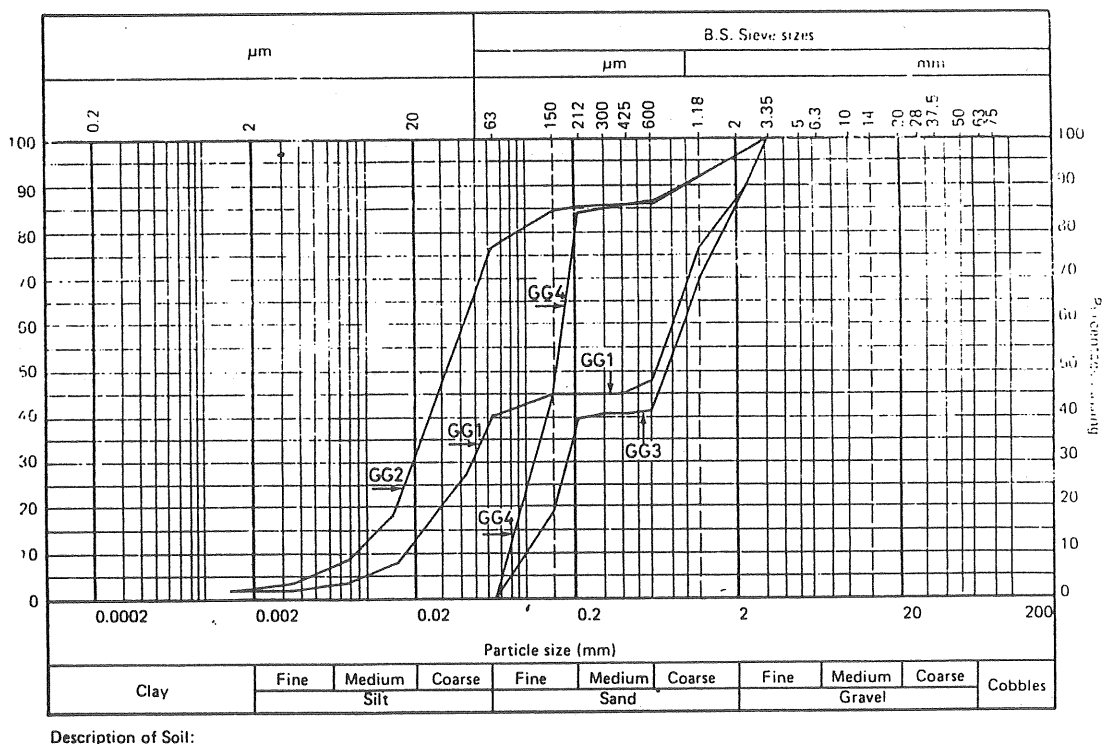


Fig 28 Sikt-kurvor för språnggraderade jordar.

Som betydelsefulla karakteristika antogs gapets bredd och de fraktioner som saknades.

Ytterligare ett sätt att karakterisera jordar infördes för att få överensstämmelse med Terzaghis kriterium ( $d_{15}^{\text{filter}} < 4 \cdot d_{85}^{\text{bas}}$ ). Enligt fig 29 nedan gjordes en uppdelning av materialet i en grövre fraktion som tänktes utgöra filtermaterial och en finare fraktion som på samma sätt skulle betraktas som basmaterial, det material som enligt gängse teori skall skyddas mot materialtransport. För "respektive material" identifierades sedan  $D_{15}^f$  och  $D_{85}^b$ .

Om såväl Terzaghis kriterium för det sålunda uppdelade materialet, som det tidigare funna sambandet att sprickvidden inte får överstiga fyra gånger hela materialets  $D_{85}$  storlek är uppfyllda, antogs materialtransport ej kunna uppkomma.

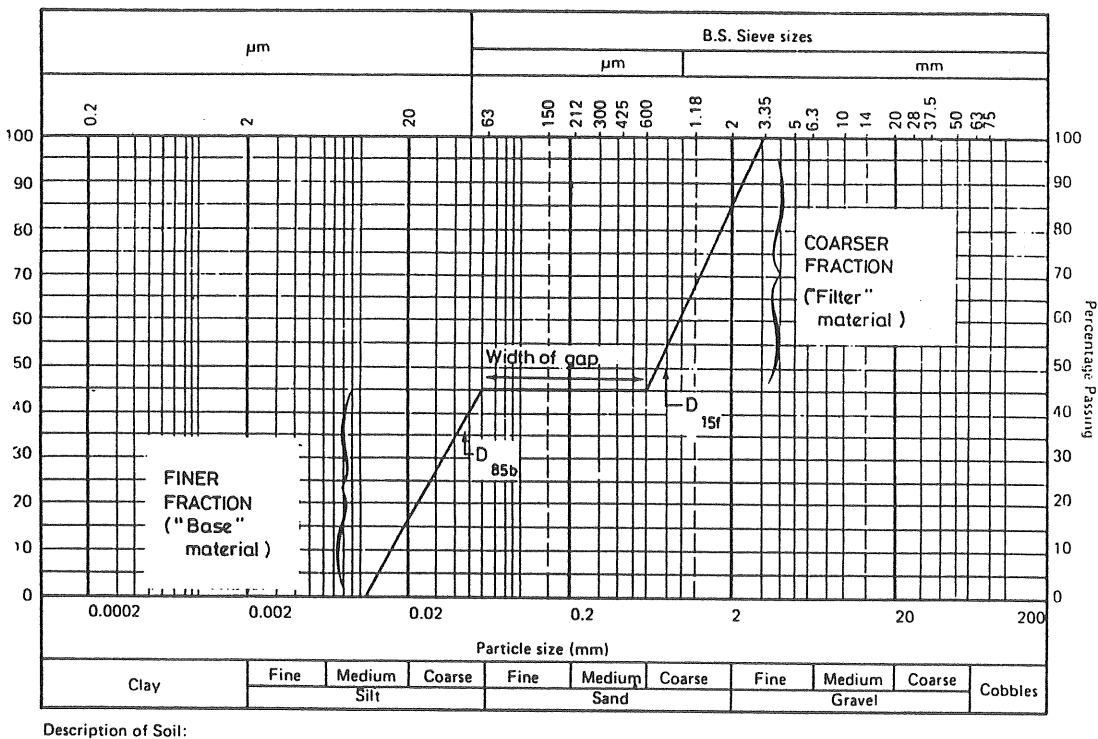


Fig 29 Exempel på språngvis graderad jord samt definition av storheter.

De olika materialens data anges i tabell 13.

Tabell 13 Kornstorleksdata för de språnggraderade jordarna.

Soil type	"Filter" $D_{15f}$ (mm)	"Base" $D_{85b}$ (mm)	$\frac{D_{15f}}{D_{85b}}$	% "Filter"	$D_{85}$ (whole sample) (mm)
GG1	0.75	0.04	18.75	55	2.0
GG2	0.70	0.04	17.50	15	0.15-0.6
GG3	0.75	0.17	4.40	55	2.0
GG4	0.70	0.17	4.10	15	0.2-0.6

Som framgår är  $D_{15}^f/D_{85}^b < 4$ -kriteriet inte uppfyllt för de två första jordarna.

En redovisning av försöksresultaten för de olika materialen ger följande: Material GG1 uppvisade två distinkta faser vid försöken. En första kritisk sprickvidd,  $W_c$ , inträffade vid 0,2 mm då finmaterial började transporteras genom fogen.

$$\frac{W_c}{D_{85}^b} = \frac{0,2}{0,04} = 5$$

Den andra fasen markeras av en kritisk sprickvidd av 7,5 mm då det grövre materialet började transporteras genom sprickan. Vid denna senare transport var förhållandet  $W_c/D_{85}^b = 7,5/2,0 = 3,8$ . Kontentan av det hela blir att något filter enligt Terzaghi inte utvecklas på grund av att för många kornstorlekar saknas - språnget i siktkurvan är för brett. Däremot gällde att någon transport enligt  $D_{85}$ -kriteriet, för hela materialet, inte inträffade innan den kritiska sprickvidden uppnåddes.

GG2-jorden uppvisar liknande egenskaper som jorden GG1. Inte heller här sker någon naturlig filteruppbyggnad - självfiltreeringsprocess, på grund av språnget i siktkurvan. De finare partiklarna började strömma genom spalten vid en öppning på 0,2 mm. Däremot märktes ingen andra kritiska sprickvidd som för materialet GG1, utan materialet strömmade kontinuerligt ut tills testapparaturens maximala sprickvidd 10,5 mm uppnåtts. Något värde på kvoten  $W_c/D_{85}^b$  ges inte för GG2. En jämförelse med material D, enligt den tidigare rapporten, visar att materialen är likartade. För material D befanns  $W_c$  vara just 0,2 mm, dvs material GG2 uppträder som en renodlad silt.

För material GG3 visade det sig att språnget i graderingen var tillräckligt smalt, för att ett naturligt filter skulle uppstå. Materialtransporten styrdes i det här fallet helt av  $D_{85}$ -storleken för hela materialet. Relation  $W_c/D_{85}$  uppgick till 2,9 och höll sig således inom angivna gränser för välgraderat material.

Det fjärde materialet slutligen, GG4, hade samma resultat som jord GG3 på grund av likheten i språngvidden.  $D_{85}$ -storleken för materialet är svår att ange. Den uppskattas ligga mellan 0,2 och 0,6. Det högre värdet, 0,6, används för att beräkna relationen  $W_c/D_{85}$  som då fås till 7,7 (4,6/0,6). En jämförelse med  $D_{90}$ -storleken (1,0 mm) göres också. Med detta värde fås motsvarande relation till 4,6. De höga värdena förklaras med att provet var ovanligt väl packat, 99,4%.

En sammanfattning av resultaten ges i tabell 14 nedan.

Tabell 14 Sammanfattning av resultaten med språnggraderad jord.

Test	% MDD	Critical Crack Width, $W_c$ , and Comments
GG1	97.5	2 distinct phases: phase 1, steady flow of finer material for $W_c = 0.2$ mm; phase 2, $W_c = 7.5$ mm (whole sample), $W_c/D_{85} = 3.8$ .
GG2	98.2	Steady flow of finer material for $W_c = 0.2$ mm. Final washout at $W_c = 10.5$ mm after 12 hour delay.
GG3	98.2	Negligible migration of finer materials through crack. $W_c = 5.75$ mm, $W_c/D_{85} = 2.9$ .
GG4	99.4	Negligible migration of finer material through crack. $W_c = 4.6$ mm, $W_c/D_{85} = 7.7$ , $W_c/D_{90} = 4.6$ .

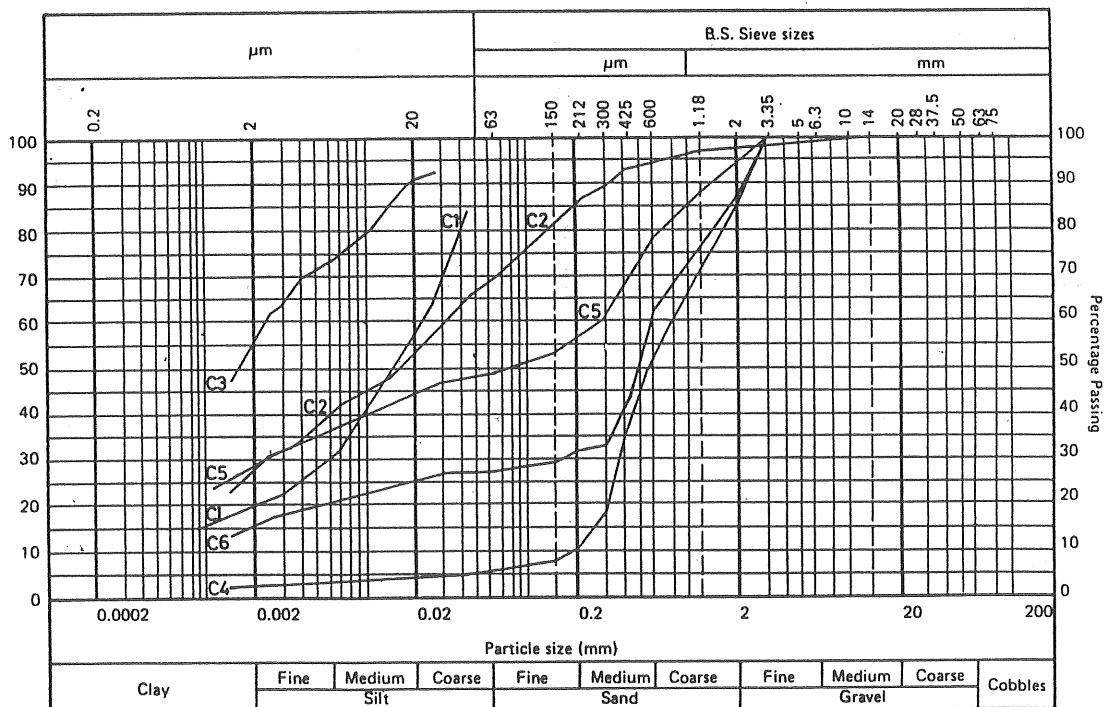
Sammanfattningsvis fastslås på basis av det ringa antalet utförda tester, att om  $D_{15}^f/D_{85}^b$  är kring 4, vilket gäller för det senare paret, GG3-4, sker en uppbyggnad av ett filter. För paret GG1-2 där relationen  $D_{15}^f/D_{85}^b$  är omkring 18, passerar de mindre kornen genom hålrummen mellan de grövre kornen och därefter genom spaltöppningen.

## 4.3.2 Försök med sex lerjordar

Det andra området som rapporten behandlar är lerjordars benägenhet för materialtransport genom sprickor. Totalt undersöktes sex leriga jordar. Siktanalysen över dessa framgår av fig 30 nedan.

Jorden C1 är ej en naturlig jord utan är som tidigare beskrivits en "air-blown dust", hämtad från tegelindustrin. Försöket inledes med ett konstant vattentryck av 1,5 mvp under en period av 3 månader. Under denna tid ökades successivt sprickvidden till 10 mm. Någon materialtransport under denna period förekom inte. Först när tryckhöjden ökades till 3 mvp skedde erosion av leran och då genom att en kanal uppstod, i den bakre delen av lådan. Efter en "kort" tid vidgades kanalen snabbt och en avsevärd mängd jord spolades genom sprickan.

Jord C2, den sandiga siltiga leran, testades på två sätt. Det första gjordes med en packningsgrad på 99% MDD och porvolym 5,1%. Vid det andra försöket var motsvarande värden 103% respektive 2,1%.



Description of Soil:

Fig 30 Siktcurvor för lerjordar.



Utfallet av det första testet blev att det, på samma sätt som för jord C1, bildades en kanal. Fenomenet inträffade här vid en sprickvidd på 5 mm och ett vattentryck av 2,5 mvp. I kanalen eroderades jorden kraftigt. En efterföljande minskning av såväl vattentryck som sprickvidd gav ingen minskad effekt på materialtransporten.

Vid det andra försöket, med den mindre porvolymen, uppstod ingen erosion ens vid en tryckhöjd av 5 mvp och en sprickvidd på 10 mm. Resultatet blev i stället att jordmaterialet trycktes ned i och pluggade igen sprickan. Provet testades under dessa villkor under 30 timmar varefter trycket höjdes till 10 mvp med en provtid på 24 timmar. Inte heller denna tryckhöjd gav upphov till någon materialtransport.

Den tredje jorden, C3, var en oblandad "London clay". Materialet gavs avsiktligt en dålig packning för att få en stor porvolym; 89% MDD och 13,2% porvolym. Trots den höga porvolymen blev flödet genom jorden ringa även vid så höga tryck som 10 mvp. Även materialtransporten blev således mycket liten. Resultatet förklarades med att leran hade låg permeabilitet.

Det fjärde provet, C4, var en icke-plastisk lerig siltig sand som packades till 100% MDD. Denna jord uppvisade snarlika egenskaper som friktionsjordarna som testades och redovisades i SWK's första rapport. Vid ett vattentryck på 1,5 mvp uppmättes den kritiska sprickvidden till 6,0 mm. Relationen  $W_c/D_{85}$  var 3,0 och provet betedde sig som en friktionsjord på grund av den låga lerhalten (3,0%).

Proven C5 och C6 slutligen, hade lerhalter som låg mellan proven C3 och C4. Lerhalterna för C5 och C6 låg på 27% respektive 15%. Med en tryckhöjd av 5 mvp och en sprickvidd på 10 mm kunde ingen materialtransport konstateras.

Resultaten av de sex proven finns sammanfattade i tabellen nedan.

Tabell 15 Sammanfattning av resultaten med lerjordar.

Test	Plasticity Index (%)	Clay Content (%)	Moisture Content (%)	% MDD (Proctor)	% of Air Voide	Results (W = crack width P = pressure head)
C1	5	20	12	91	14.2	Failed at W = 10.0 mm, P = 30 kN/m <sup>2</sup>
C2 (Test 1)	12	28	14	99	5.1	Failed at W = 5.0 mm, P = 25 kN/m <sup>2</sup>
C2 (Test 2)	12	28	14	103	2.1	No migration
C3	49	55	25	89	13.2	No migration
C4	Non-plastic	3	11	100	9.8	Failed at W = 6.0 mm, P = 15 kN/m <sup>2</sup>
C5	34	27	16	96	5.6	No migration
C6	29	15	12	98	4.3	No migration

För att överföra resultaten till praktiska förhållanden förs ett resonemang om att den största naturliga tryckhöjden över en ledning knappast överstiger 5 mvp och att sprickvidder över 10 mm är osannolika. 10 mm sprickvidd kan uppträda i tegelkultvertar där murbruket mellan stenarna av någon anledning saknas. Med detta resonemang som grund görs en gränsdragning vid 5 mvp och 10 mm sprickvidd. De försök som inte uppvisar materialtransport vid dessa värde definieras som stabila, övriga instabila. Med denna indelningsgrund har resultaten plottats upp på basis av porvolym och lerhalt, fig 31. Även värdena från WES försök har medtagits i figurerna.

Den slutsats SWK drar av fig 31 är att jordar med lerhalt över 15% sannolikt är stabila. Övriga data tyder på att även jordar med låg plasticitet kan vara stabila, förutsatt att porvolymen är låg. Detta uttalande baseras emellertid endast på ett försök, nämligen C2. Det påpekas dock att återfyllnadsmassor i ledningsgravar sällan är så väl packade att dylika låga porpolymer (mindre än 5%) åstadkoms. Vidare gäller att t ex utläckande avloppsvatten från ledningar i vissa fall är aggressivt vilket ökar jor-

dens eroderbarhet. Detta är faktorer man bör ha i minnet när man bedömer jordens stabilitet och att 15%-gränsen i figuren nedan endast är preliminär.

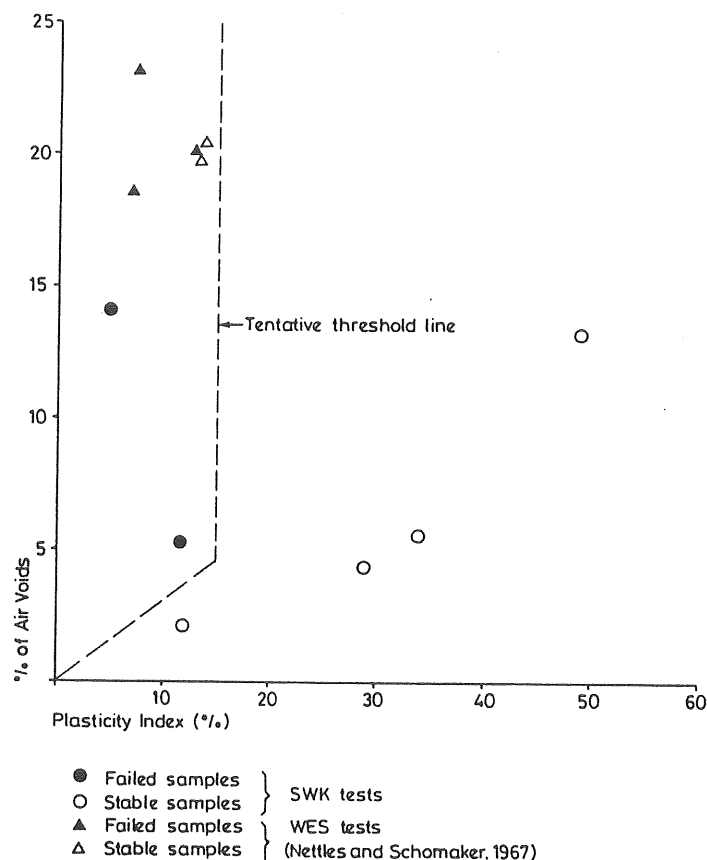


Fig 31 Försöksresultat med lerjordar, med hänsyn till lerhalt och porvolym.

#### 4.3.3 Försök med utläckande vatten (reverserade flöden), tre försöksjordar

Det tredje området rapporten behandlar är försök med reverserade flöden. Den använda apparaturen bestod av den tidigare använda lådan, kompletterad med en mindre låda placerad under den första och med täta anslutningar mot densamma. Även den nedre lådan, eller kammaren, kunde sättas under vattentryck. På så sätt kunde vatten fås att tränga uppåt genom sprickan. Ungefär på samma sätt som utläckage skulle skett genom en otäthet i en dämnd ledning.

Själva försöket utfördes genom att provet först vattenmättades. Efter detta första steg lät man vattenflödet rinna neråt under en

viss tid varefter flödet stoppades och man lät provet dränera ut. Provet som då befann sig i ett partiellt vattenmättat tillstånd utsattes därefter för ett uppåtriktat flöde, skapat genom att sätta den undre kammaren under vattentryck. Denna cykel upprepad sedan ett antal gånger.

Ytterligare ett sätt att använda apparaterna är möjlig. Genom att strypa utloppet från den undre kammaren och på så sätt skapa en liten tryckhöjd vid inloppet, kunde ett horisontellt flöde fås att strömma över sprickan i den övre lådans botten.

De jordar som provades valdes bland dem som man tidigare gjort försök med. Man valde tre av dessa, nämligen GG3, C4 och C5. Syftet med försöken var att se om jordarna var stabila för sprickvidder under  $W_c$ , vid reverserat flöde.

GG3-jorden packades till 97,7 MDD dvs ungefär som tidigare. Spältvidden i lådan förinställdes till 3,5 mm. (Vid nedåtriktat flöde fastställdes  $W_c$  till 5,75 mm,  $D_{85}$  var 2,0 mm.) Vid den första reverseringen under den första cykeln uppstod en störd zon med tillhörande hålrum pga att luft tvingades upp genom spalten. Hålrummet fylldes snart med fint material, för att senare försvinna och ersättas med en "tratt" av grövre material, där det finare materialet spolats ur.

Vid de försök som gjordes med horisontellt flöde spolades även det grövre materialet ur fogen, även om det var ett mycket långsamt förlopp. Inga uppgifter ges om tryckhöjder, tidslängder för dämning, antal cykler eller mängd utspolat material.

Jordtyp C4 är, som tidigare beskrivits, en icke-plastisk jord, men med en lerhalt på 3%.  $W_c$  vid försöket med nedåtriktat flöde var 6,0 mm och vid det reverserade försöket inställdes spaltöppningen till 3,0 mm.  $D_{85}$ -storleken för materialet är 2,0 mm. Förloppet vid provningen var i stort lika som för jord GG3. Dels uppstod en tratt av grövre material vid det reverserade flödet, dels spolades detta grövre material ut vid horisontellt flöde. Det var således inte enbart en språnggraderad jord som i det föregående testet, som medför jordtransport, utan även ett väl-sorterat material ger upphov till materialtransport då det ut-

sätts för reverserat flöde. SWK fastslår att reverseringsförloppet hindrar såväl bryggbildnings- som självfiltreringsförloppen, vilka uppstår vid endast nedåtriktat flöde. Uppgifter om tryckhöjd, dämning, antal cykler och mängd urspolat material saknas även här.

Det tredje och sista reverserade flödesförsöket utfördes på jordtyp C5 (plasticitetsindex 34, lerhalt 27%). Liksom vid nedåtriktat flöde visade sig jorden även nu vara opåverkad av flödesriktningssväxlingar, trots att det utsattes för ett flertal kombinationer av övertryck.

Den generella slutsatsen av dessa reverserade försök var att den tidigare konstaterade relationen att spalten kunde vara 2,5 - 4,5 gånger större än  $D_{85}$ -storleken, inte var tillämpbar på friktionsjordarna. Det reverserade flödet orsakade att det finare materialet spolades genom spalten. Det horisontella flödet, med låg tryckhöjd, orsakade i sin tur att även de grövre partiklarna passerade spalten.

#### 4.4 Jordtransport genom springa i liten låda med jord från ett område i London med kända ledningskollapser (Soil migration studies on Camden sand /8/)

Den tredje rapporten som WRC publicerat har utförts av Geotechnical Consulting Group (GCG) för WRC's räkning. Testerna har utförts i SWK's laboratorium under överinseende av GCG. Även SWK's provningsutrustning användes. Materialproven levererades av WRC.

Att WRC valde att prova Camden sand beror på att det är en jordtyp som är känslig för jordtransport. Camden är också mycket riktigt, ett område i London där det inträffat ett antal ledningskollapser. Camden sand är en lerig siltig sand. Dess plasticitetsindex är 10 procent. Siktanalysdiagrammet enligt fig 32. Kurva A är framtagen av WRC, kurva B av SWK.

Syftet med testen var, att undersöka kritiska spaltbredden  $W_c$ , med hänsyn till jordens packningsgrad. De aktuella packningsgraderna i denna testomgång varierar mellan 60% och 90% MDD, se tabell 16.

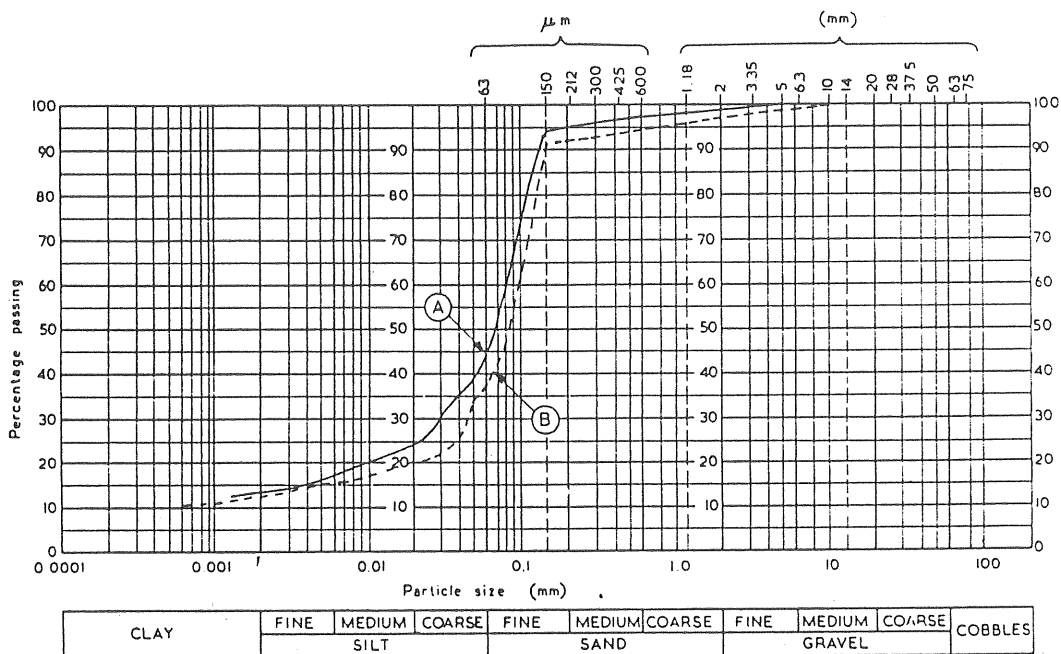


Fig 32 Siktcurvor för Camden sand.

Tabell 16 Torrdensitet och vattenhalter vid försöken med Camden sand.

Test	% MDD before inundation	% MDD after inundation	moisture content at placement	natural material or oven-dried
CS1	90.1	not measured	19.2	natural
CS2	80.2	78.4	19.8	natural
CS3	60.0	70.2	19.8	natural
CS4	63.7	72.9	17.9	oven-dried
CS5	90.2	87.8	17.8	natural
CS6	79.6	78.1	18.9	natural

Totalt gjordes sex olika försök. De fyra första testerna avsåg att undersöka densitetens inverkan på den kritiska sprickvidden ( $W_c$ ). Syftet med de resterande två försöken var att undersöka långtidspåverkan på vattenflödet och materialtransporten vid två

olika densiteter. Provet packades vid dessa två försök mot en spaltvidd av 2 mm och försöket varade i sju (7) dagar.

Tryckhöjden vid samtliga försök var 1,5 mvp, med tillfälliga variationer för de fyra första försöken. Innan försöken började vattenmättades jorden under 48 timmar vid en tryckhöjd av 1,5 mvp och spaltvidd 0,1 mm.

Resultatet av det första testet, CS1, med en densitet på 90% MDD, var att endast en ringa mängd, 4 gram, trängde genom spalten, då denna ökades från 0,1 mm till 4,0 mm. Endast då tryckhöjden ökades med bibehållen sprickvidd på 4,0 mm förekom jordtransport och då först vid 5,0 mvp. En efterföljande reduktion av tryckhöjden till 3,0 mvp resulterade i att jordtransporten upphörde efter en kort tid. Vid återigen ökande tryckhöjd observerades viss transport vid 4,0 mvp, men kom att bli betydande först när 5,0-metersnivån återigen uppnåddes. Vid ökande sprickvidder till 5,0 mm, 6,0 mm och 7,0 mm, blev motsvarande kritiska vattentryck 4,0 m, 3,0 m respektive 1,5 m.

När försöket avbröts konstaterades en vertikal kanal genom jordprovet, där fuktigheten var avsevärt större än i den övriga jorden.

Försöket med prov CS2, 80,2% MDD, resulterade i en kraftig och kontinuerlig materialtransport redan vid en spaltvidd på 1,0 mm. Efter 30 minuter avtog transporten varvid spaltvidden ökades stegvis och materialet under en ny 30-minutersperiod uppmättes. Denna procedur upprepades successivt till 9 mm spaltvidd då materialet fullständigt spolades ur lådan. Den ackumulerade vikten av passerat material framgår av fig 33.  $W_c$  uppskattades till mellan 1,0 och 2,0 mm.

CS3-provet uppvisar ett likartat resultat som CS2-provet. I samband med vattenmättnad steg densiteten från ursprungliga 60,0% MDD till 70,2% MDD, varför densitetsskillnaden mot prov CS2 inte blev lika stor som avsedd. Den ackumulerade vikten av uppsamlat material framgår av fig 33. Total ursköljning av materialet inträffade vid spaltvidden 8,0 mm. Även för detta prov uppskattades  $W_c$  till 1,0 à 2,0 mm.

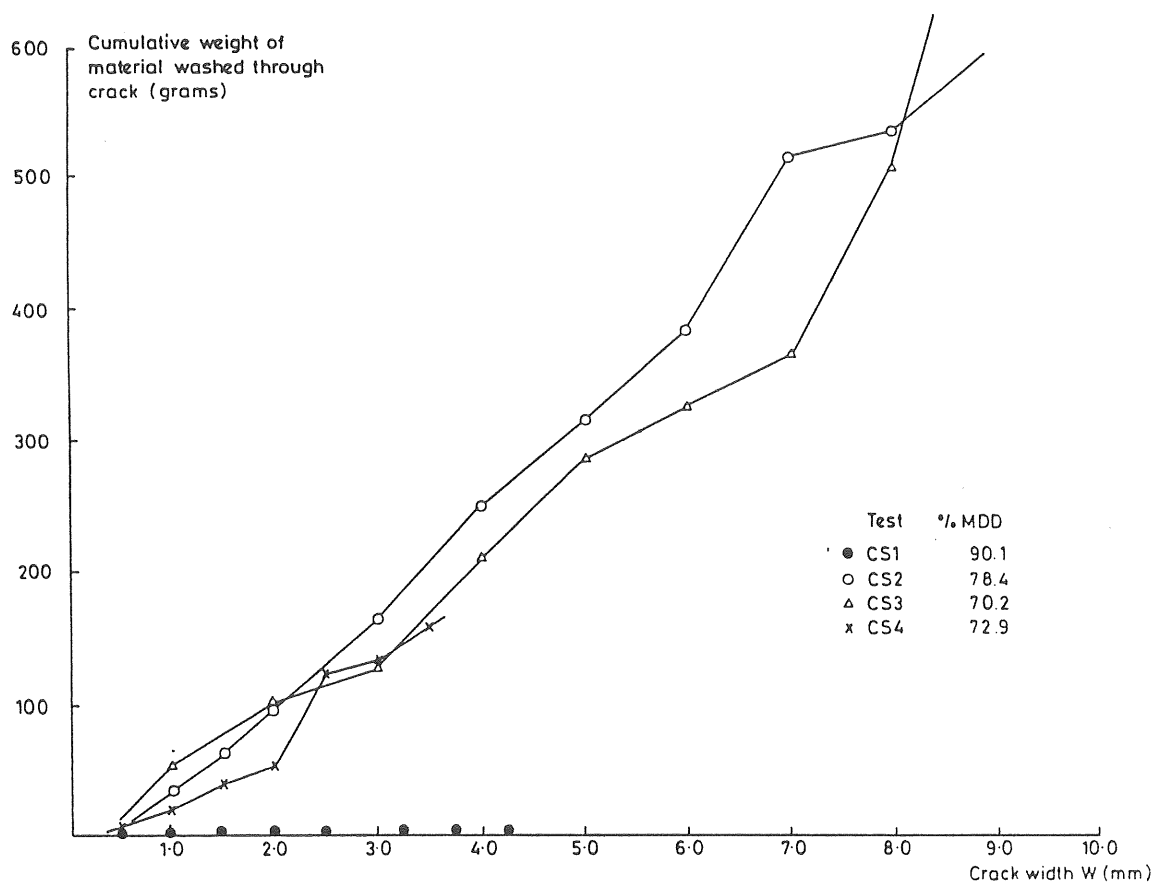


Fig 33 Ackumulerad vikt som funktion av spaltöppning.

Test CS4 avsågs vara ett duplikattest till CS3. Enda skillnaden var att detta prov varit ugnstorkat, medan de övriga tagits direkt från provtagningsplatser och med naturlig fukthalt. På samma sätt som för CS3 ökade densiteten under vattenmättnadsfasen. Dessvärre skedde inte en riktig vägning av materialet för spaltvidder över 3,5 mm, men sägs i rapporten vara likartad test CS2 och CS3. Detta prov skiljer sig även beträffande kritisk sprickvidd. För detta prov inträffade materialtransport vid 0,5 mm sprickvidd. Se fig 33.

Långtidstester CS5 och CS6 utfördes, som tidigare nämnts, med en sprickvidd av 2,0 mm och en tryckhöjd 1,5 mvp. Diagrammen nedan visar uppmätt flöde, fig 34 och ackumulerad vikt, fig 35, av material som passerat spalten. För prov CS5 upphörde nästan materialtransporten vid provtidens slut (7 dagar), medan den fortfarande var påtaglig för CS6. En annan skillnad var vattenflödet som för CS6 sjönk under nästan hela testet, för att sedan dramatiskt öka vid provtidens slut. För prov CS5 däremot var det konstant under större delen av försöket, men även här steg det kraftigt i slutfasen.



Densiteterna för proven var inledningsvis 90,2 % respektive 79,6% MDD. Båda värdena sjönk lite under vattenmättnadsfasen, till 87,8 % respektive 78,1% MDD.

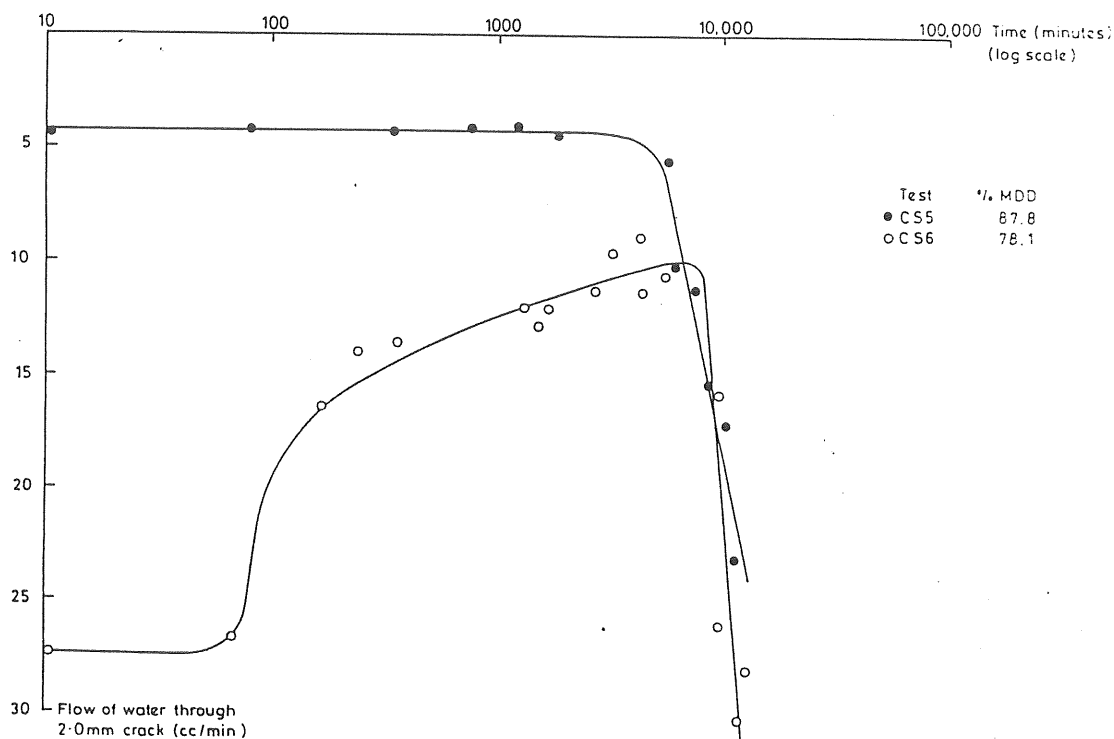


Fig 34 Flödesvariation vid försök CS5 och CS6.

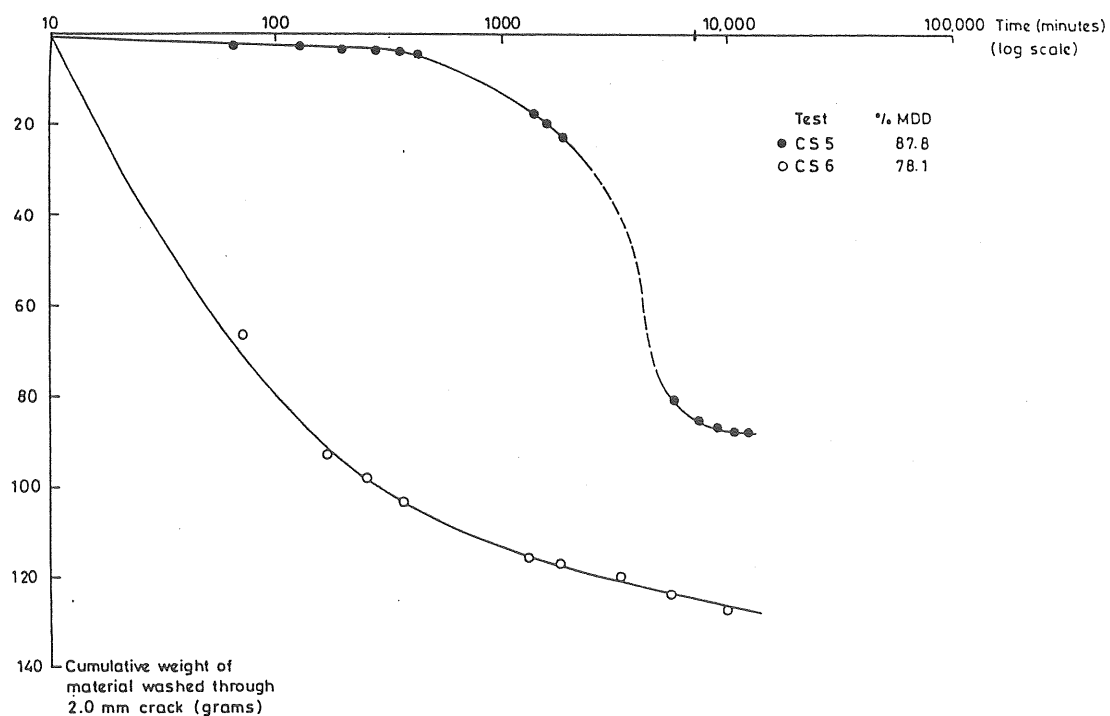


Fig 35 Ackumulerad vikt som funktion av tiden för försök CS5 och CS6.

Som orsak till de ökade vattenflödena i slutet av testperioden nämns en ökad kanalbildning i proven som en möjlighet. Mer sannolikt anses det däremot vara att provet efter hand blir mer vattenmättat och att inneslutna luftbubblor, som tidigare hindrat flödet försvinner.

Slutligen konstateras att om jorden vore helt fri från kohesion borde den kritiska sprickvidden  $W_c$  ligga omkring 0,5 mm, eftersom materialets  $D_{85}$ -storlek är ungefär 0,12 mm. Att  $W_c$  blir större än det förväntade värdet antas bero på att lerhalten i provet har en signifikant inverkan. Lerhalten i proven ligger på ca 13% och  $PI = 10$ . Betydelsen av jordens plasticitet visades även av test CS1 i form av tryckhöjdens inverkan på  $W_c$ . För en ren friktionsjord har i tidigare rapporter konstaterats att tryckhöjden är betydelselös.

Densitetens inverkan på  $W_c$  anses klarlagd genom försöken CS1 - CS4. CS1 hade inget passerande material vid en sprickvidd på 4,0 mm, medan för CS4 sådan uppträdde vid 0,5 mm sprickvidd.

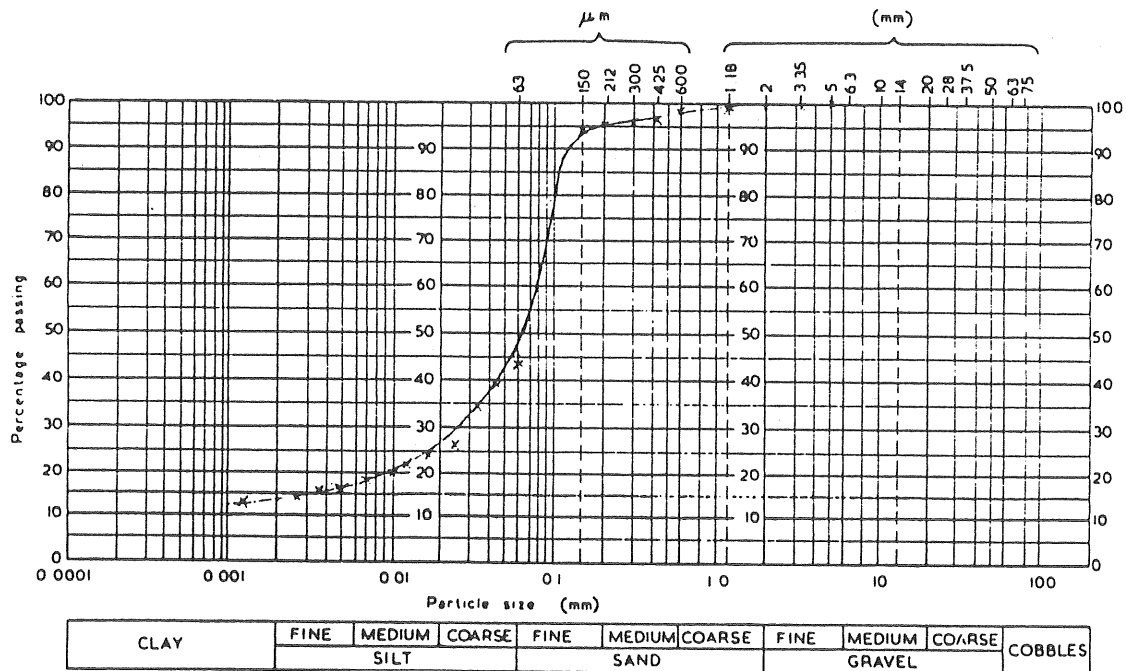
#### 4.5 Försök med stor försökslåda med omväxlande in- och utläckage genom spalt för siltig sand (Void simulation rig trials with a silty fine sand /9/)

Ett testprogram med ovanstående rubrik har utförts vid WRC's laboratorium i Swindon, England. Författarna till rapporten är Willis, Rogers och Jones. Rapporten över försöket är daterad mars 1984. Testprogrammet består av fyra olika försök på en och samma jord, en siltig finsand, tagen från Hampstead Heath-distriktet i London. Kornstorleksfördelningen framgår av fig 36. Plasticitetsindex är 11%. ( $LL = 35\%$ ,  $PL = 24\%$ , max torrdensitet  $1,75 \text{ ton/m}^3$ , BS 1377:1975.) Jorden ansågs vara så pass plastisk, att något verkligt värde på den kritiska sprickvidden  $W_c$  inte fanns. För att kunna driva försöken i någorlunda snabb takt valdes en fast sprickvidd på 6 mm. Denna sprickvidd är således stor i förhållande till jordens  $D_{85}$ -storlek på ungefär 0,1 mm.

Provningsutrustningen skiljer sig från tidigare utförda försök i det att det är en betydligt större låda som använts. Måtten är

ungefär: bredd 2200 mm, höjd 1400 mm och djup 200 mm. Väggarna var gjorda i plexiglas. I nedre delen av lådan fanns ett rör med dimensionen  $\varnothing 150$  mm placerat. I rørets hjässa hade det sågats upp en 6 mm bred slits. En simulerad grundvattennivå i lådan åstadkoms med hjälp av två vattentankar, placerade i lådans kortändar. Dessa två tankar stod genom ett filter i förbindelse med jordprovet i lådan. Grundvattennivån varierades genom att variera vattennivån i dessa tankar.

I utrustningen ingick även en vattentank som är höj- och sänkbar. Tanken stod via en slang i förbindelse med røret i lådan och användes för att åstadkomma ett reverserat flöde. Det reverserade flödet var i likhet med tidigare försök tänkt att simulera det fallet att ledningen går däm, med utläckage som följd.



Operator: SM

Job: 2235  
Vaz

Site: CAMOON

Date: 18/3/83

Borehole No:

Description of soil:

Clay, Silty Sand.

Sample No: 023/5

Depth of sample

British Standard test sieves

Fig 36 Siktendiagram för en siltig finsand från Hampstead Heath.

Riggen som sådan var avsedd som en demonstrationsanläggning, för att för myndigheter och branschfolk påvisa riskerna för jordtransport in i ledningar. Rapporten är till sin karaktär mycket av ett protokoll över gjorda observationer och beskriver i detalj, minut för minut, förändringar i jordmaterialet. Fig 37 visar försökslådan.

De fyra försöken i testprogrammet framgår av nedanstående schema, tabell 17.

Tabell 17 Schema över försöksprogrammet.

TEST	BRIEF DESCRIPTION
1	Initial test with low density soil. Rig configuration 1. Static Head surcharges.
2	Moderately low density, fully saturated soil. Rig configuration 1. Static Head surcharges.
3	Moderately low density, partially saturated soil. Rig configuration 1. Static Head surcharges.
4	Relatively high density, partially saturated soil. Rig configurations 1, 2 and 3. Static Head surcharges with rig configurations 1 and 2. Tests with flow through pipe using rig configuration 3.

Under försökens gång gjordes en del modifieringar med avseende på vattentillförseln till riggen via röret. Dessa modifieringar beskrivs vidare i den löpande texten.

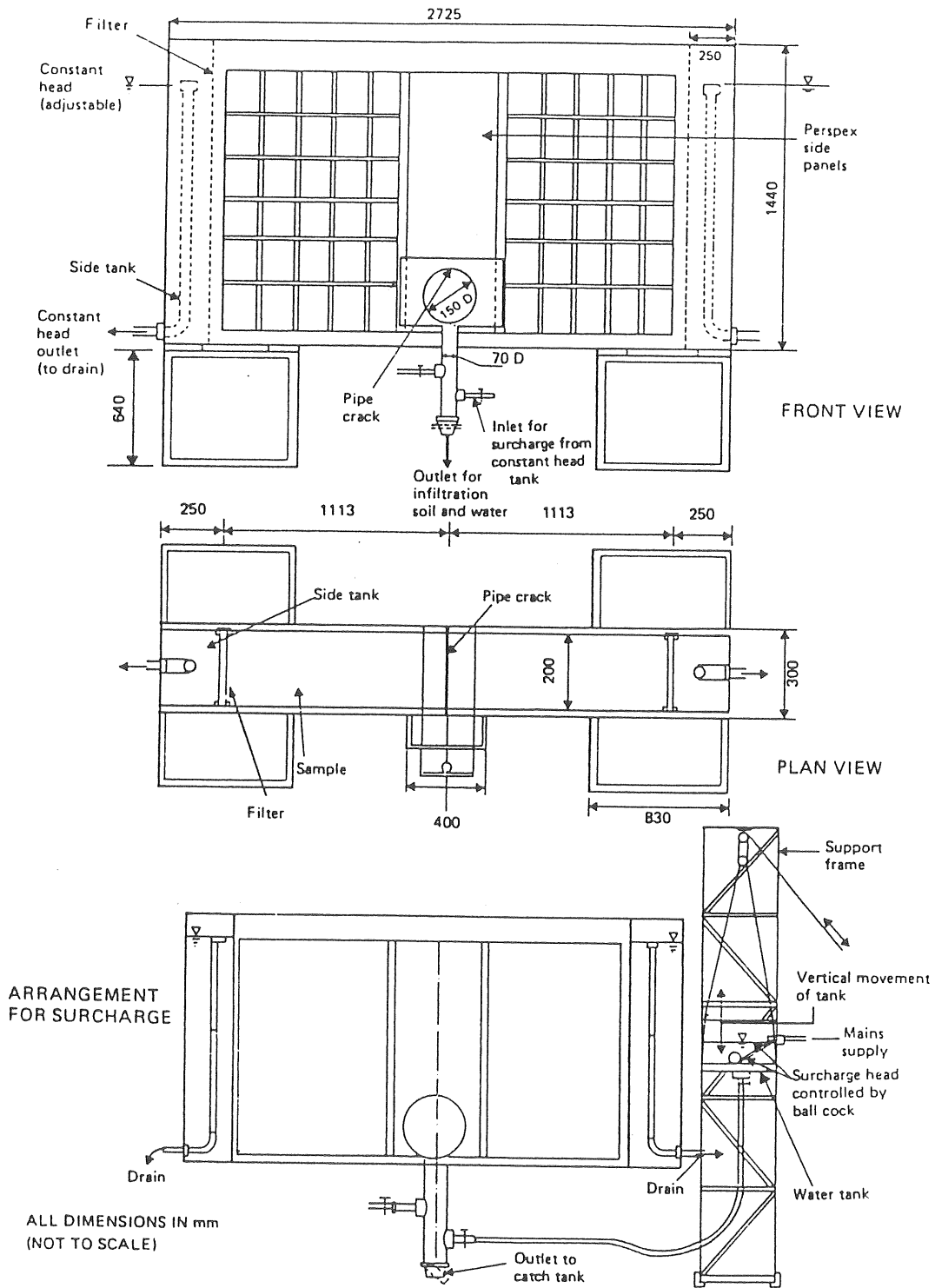


Fig 37 Figur av WRC's försökslåda.

## TEST 1

Vid detta inledande försök var jordens torrdensitet ungefär  $1,0 \text{ t/m}^3$ . Provet tjänade mest som en demonstration av apparaturen, varför ringa möda lades ned på packningsförfarandet. I samband med att provet vattenmättades via rörslitsen konsoliderades provet och ett hålrum (void) bildades just ovanför röret. Fortsatt vattenmättnad av provet från sidotankarna orsakade sprickbildning och ojämna sättningar i jordprovet. Provet utsattes för totalt 6 st reverseringar av flödet, med tryckhöjden varierande från 0,5 - 1,0 mvp. Detta orsakade såväl hålrum som kanalbildning i provet.

Kommentar. Provets densitet är så låg, att det torde vara tvivelaktigt att mäta motsvarande densitet i en verklig ledning, vilket också framhålls i rapporten. Detta i kombination med att provet blev inhomogent efter vattenmättnadsförloppet, gör att försöket inte redovisas vidare.

## TEST 2 (Helt vattenmättat)

Torrdensiteten i detta prov var  $1,25 \text{ t/m}^3$ . Jorden packades upp till en nivå av 70 cm över rörets hjässa. Vattennivån i sidotankarna sattes till cirka 50 mm under den högsta jordnivån. Fallet skall motsvara full vattenmättnad hos jordprovet. Vattenmättnaden av jorden från sidotankarna skedde under tre dygn, följt av ett dygns dränering som var standard även för de efterföljande testen 2 och 3. Den reversering av flödet som följde efter vattenmättnadsfasen varade under 5 minuter med en efterföljande period på 10 min, då provet dränerades genom spalten i röret. Även denna procedur var standard för samtliga försök, med vissa undantag under enskilda försök.

Under test 2 använde man sig av lådkonfiguration 1, vilket innebär att den i spalten inneslutna luften, vid reversering av flödet, inte gavs någon möjlighet att evakueras någon annanstans än uppåt genom jordmaterialet.

Vid försök 2 varierades tryckhöjden över rörets hjässa från 0,1 mvp till 0,5 mvp vid reversering.

Vid den inledande dräneringen av försöket observerades en betydande jordtransport genom slitsen. Den följande första dämningen, med 0,3 mvp tryckhöjd, resulterade i att, vad rapportförfattarna benämner det, ett hydrauliskt grundbrott inträffade, varför dämningen stoppades. Även vid den därpå följande dräneringen konstaterades materialtransport.

Nästa tryckhöjd vid dämning som sattes till 0,1 mvp, orsakade kanalbildning och små håligheter som bildades och kollapsade om vartannat. Ytterligare 18 cykler med samma tryckhöjd genomfördes med samma resultat innan tryckhöjden ökades till 0,2 mvp.

Vid 0,2 mvp tryckhöjd uppkom under de tre första cyklerna ett mindre vattenfyllt hålrum som förblev stabilt. Ytterligare 17 cykler medförde en mindre förstoring av hålrummet.

Vid ökning av tryckhöjden till först 0,3 m under 2 cykler och därefter till 0,5 m under 1 cykel observerades kanalbildning och hydrauliskt grundbrott. Ytterligare 4 cykler med tryckhöjden 0,3 m gav ingen märkbar förändring.

Efterföljande ökning till 0,5 m tryckhöjd medförde smärre grundbrott och kanalbildning. Hålrummet rörde sig uppåt och ökade i storlek under varje cykel. Totala antalet cykler var 10 st.

Efter tretton dagar avbröts försöket. Vikten av urspolat material var 0,797 kg, varav 33% passerade 63  $\mu\text{m}$ -sikten.

### TEST 3 (Partiellt vattenmättat)

Test 3 skiljer sig från test 2 genom att jorden endast var partiellt vattenmättad. Detta åstadkoms genom att sätta vattennivån i sidotankarna i höjd med sprickan i röret. I övrigt var provningsförfarandet detsamma.

Testet inleddes med cykler vid 0,1 mvp tryckhöjd. Ingen påverkan på jorden observerades. Dräneringsvattnet innehöll dock jordmaterial. Totalt 20 cykler genomfördes.

Vid 0,2 mvp tryckhöjd observerades grundbrott just över spalten. Grundbrottet resulterade i en störd zon med lös jord. Ytterligare 20 cykler genomfördes, varav de 9 sista var verkningslösa.

Fem reverseringar med 0,3 mvp tryckhöjd resulterade i uppkomst av hålrum, som dock kollapsade under dräneringsskedet. Ytterligare 15 st cykler genomfördes.

Innan tryckhöjden ändrades till 0,35 mvp, modifierades dräneringsförloppet på så sätt att luft tilläts strömma in i röret, för att förhindra undertryck och därmed att vatten sögs ut genom spalten.

När testet återupptogs uppstod först en spricka i materialet som efter ett antal cykler omvandlades till ett hålrum. Hålrummet rörde sig uppåt med varje cykel genom att "taket" i detsamma eroderades. Även storleken på hålet ökades under de 20 cykler som genomfördes. Vid slutet av testet befann sig håligheten 180 mm över rörsprickan.

Ytterligare 20 cykler, nu med 0,4 mvp tryckhöjd, resulterade i fortsatt stegvis förflyttning uppåt av hålet. Håligheten stabiliserade sig på en nivå 330 mm över spalten. Detta var också ungefärliga nivån för vattenmättnad.

Nästa steg i testförloppet blev en återgång till 0,2 mvp tryckhöjd. Vid denna tryckhöjd bildades ett antal mindre hålrum, som efterhand sammansmälte till ännu en större hålighet. Det första, ovanförhängande hålet påverkades ej.

Ytterligare ökning av tryckhöjden till 0,30 respektive 0,35 mvp med 20 cykler vid vardera tryckhöjden medförde att det undre hålet rörde sig uppåt, för att slutligen tillsammans med det första hålet bilda ett enda större hål.

De avslutande 60 cyklerna med 0,4, 0,45 och 0,5 mvp tryckhöjd resulterade i att hålrummet ökade i storlek.



Den totala mängden jord som transporterades genom spalten uppgick till 0,965 kg. Test 3 pågick under 25 dagar.

Vid en jämförelse mellan det vattenmättade testet, test 2, och det partiellt vattenmättade testet, test 3, som är packade till samma densitet och utsatta för samma testprogram, konstaterar författarna följande:

- Materialet har tillräcklig plasticitet för att de större partiklarna skall överbrygga det relativt stora gapet på 6 mm. Även självfiltreringsmekanismerna träder i kraft.
- Vid reverserade flöden upp till 0,3 mvp slås uppbyggda filter sönder, turbulent flöde råder och fina partiklar suspenderas i vattnet. Vid återgång till rättvänt flöde förs såväl finare som grövre partiklar med strömmen.
- Tryck över 0,3 mvp anses vara så stora att dessas verkan hindrar självfiltreringsmekanismerna att träda i kraft, åtminstone för de effektiva jordtryck som råder i lådan. Högre effektivspänning antas kunna reducera jordförlusten.
- Hålrum av någorlunda storlek uppstår endast i partiellt vattenmättad jord. I partiellt vattenmättad jord påstås hålrum vara stabila, något som inte gäller för vattenmättade förhållanden, om hålrummet överstiger en storlek på ca 2 kubikcentimeter. Stabiliteten är beroende av jordens kohe-sion, som i fallet med denna jord beror på ler- och siltfraktionen. Störst betydelse anses emellertid ytspänningen i den partiellt vattenmättade zonen ha.
- Beträffande risken för hydrauliskt grundbrott konstateras att den ökar vid jordtransport till ledning, på grund av densitetsminskningen.
- Vid demontering av lådan iakttoogs att spalten i rören delvis var igensatt med packad jord. Endast en eller två öppningar tillät vattenpassage. Det sägs i rapporten att detta kan ha orsakat ett "pseudo stable state" i de ovan relaterade testerna och att större tryckhöjder vid dämning kan rensa spalten och därmed orsaka ökad materialtransport.

TEST 4

Det fjärde och sista försöket utfördes med jorden packad till en högre densitet. Någon uppgift på densiteten vid försökens början anges ej. Istället har man efter försökens slut uppmätt en medeltorrtdensitet av  $1,63 \text{ ton/m}^3$  i de delar av provet som ansetts opåverkat av testförloppet.

I övrigt var testförhållandena de samma som för test 3, dvs jorden var partiellt vattenmättad.

Test 4 pågick under 109 dagar och var således avsevärt längre än övriga test. Under testperioden utfördes en hel del modifieringar, varför försöket kan underindelas enligt följande:

Tabell 18 Underindelning av försök 4.

TEST	DESCRIPTION
4A	Four different heads, 100 mm to 400 mm. 10 surcharges at each head.
4B	Ten different heads, 450 mm to 900 mm. surcharge at each head.
4C	Air bleed added to pipe, six different heads, 100 mm to 600 mm, surcharge at each head.
4D	Rig modified to allow water flow in pipe, four different heads, 100 mm to 600 mm. five flow rates at each head.
4E	No flow in pipe, four different heads, 100 mm to 600 mm, 20 surcharges at each head.
4F	Long term flow test.

Vid försök 4A och 4B användes samma vattentillförselsystem som för tidigare försök, dvs lådkonfiguration 1, som innebar att luften i spalten evakuerades genom bädden.

Lådkonfiguration 2 användes vid försök 4C. Modifieringen innebar att en luftevakueringsanordning monterades i höjd med spalten i röret. Ändringen innebar att den i spalten inneslutna luften kunde strömma ut ur röret innan vattnet via spalten nådde fram till jorden.

Vid försök 4D, E och F ändrades vattentillförseln så att ett flöde längs med spalten kunde simuleras. Denna tredje lådkonfiguration hade även samma luftevakueringsmöjlighet som vid konfiguration 2.

De olika försöken refereras nedan i kronologisk ordning.

#### TEST 4A

Under detta försök varierades den reverserade statiska tryckhöjden mellan 0,1 och 0,4 mvp. Röret dämades som tidigare under 5 minuter och dränerades därefter under 10 minuter. Jorden befanns vara lufttät och man observerade innesluten luft i spalten som hindrade vattnet att nå jorden. Jorden förblev opåverkad.

#### TEST 4B

Fortsättning på försök 4A men med stegvis ökad tryckhöjd från 0,45 - 0,9 mvp i 0,05 m intervall. Luftfickan var fortfarande existerande och ingen jordpåverkan märktes.

#### TEST 4C

Med luftevakueringsanordningen, lådkonfiguration 2, installerad kunde under detta försök observeras att vattnet kom i kontakt med jorden, men någon inströmning av vatten i lådan kunde ej konstateras. Tryckhöjden varierades från 0,1 mvp till 0,6 mvp i steg om 0,1 m. Ingen jordtransport förekom.

#### TEST 4D

Eftersom jorden befanns vara opåverkbar med endast statiska vattentryck enligt ovan infördes vid detta försök en vattentillförselmetod, som innebar strömmande vatten längs spalten (konfiguration 3) i kombination med statisk tryckhöjd. Fyra olika tryckhöjder (0,1, 0,2, 0,4 och 0,6 mvp) ansattes med fem olika vatten-

föringar, för varje tryckhöjd. Resultatet sammanfattas kortfattat i nedanstående tabell.

Tabell 19 Sammanfattning av resultaten i försök 4 D.

Tryckhöjd (mvp)	Flöde (l/min)	Observationer
0,1	3,5-24,5	Hålrum med 30 mm bredd och 5 mm höjd bildas vid ett flöde av 4,5 l/min. Storleken på hålet ökar diskontinuerligt med ökad vattenföring, till 85x5x25 mm vid flödet 24,5 l/min. Hålet följer rörets periferi.
0,2	1,0-27,0	Inga synliga jordrörelser upp till ett flöde av 19 l/min, därefter liten storleksökning.
0,4	1,0-27,0	Små diskontinuerliga storleksökningar med början vid 5 l/min vattenföring. Hålet nu 10 mm högt på en bredd av 30 mm just ovanför spalten.
0,6	1,0-27,0	Vid lägsta flöde börjar jorden ovanför spalten vattenmättas inom ett område av 180x80 mm. Ingen förändring av hålets storlek. Vid 15 l/min vattenmättas jorden ytterligare, sjunker ihop och bildar på så sätt ett nytt ovanförhängande hålrum, 20 mm ovan spalten med basen 40 mm och höjden 10 mm. Vattenföringen 20 l/min ger upphov till nytt hål vid sidan om det andra. Vid 27 l/min vattenfylls hålrummet. När försöket avslutas kvarstår ett hålrum med dimension; bredd 70 mm, höjd 40 mm. Höjden över spalten har minskat till 10 mm.

#### TEST 4E

Direkt efter försök D med strömmande vatten, gjordes ånyo försök med endast statisk tryckhöjd, lådkonfiguration 1, för att undersöka om detta hade någon effekt på de redan bildade hålrummen i lådan. 20 st dämningar vid vardera tryckhöjderna 0,1, 0,2, 0,4 och 0,6 mvp genomfördes.

För att öka överskådligheten redovisas även här resultaten i tabellform.

Tabell 20 Sammanfattning av resultaten i Försök 4 E.

Tryckhöjd (mvp)	Observationer
0,1	Inget vatten når in i hålet. (Botten 10 mm över rörspalten.) Vid dränering transporteras jord ut och lämnar slutligen ingen jord kvar mellan rör och hålrum. Hålet nu 50 mm brett och 50 mm högt.
0,2	Vattnet stiger 5 mm över röret. Jord transporteras från bädden under dränering.
0,4	Vattnet stiger till mellan 20-30 mm upp i hålet.
0,6	Vattnet når "taket" i håligheten som rasar ner och ger avlagringar i botten. Under dräneringsfasen hinner inte vattnet dräneras ut ur hålet. Vid slutet av försöket dräneras hålet ut under natten. Storleken är: 90 mm brett och 20 mm högt. Botten befinner sig 70 mm ovanför spalten.

#### TEST 4F

En återgång till konfiguration 3 (strömmande vatten) gjordes. Maximal vattenföring användes under hela testet. Beroende på att "kranvatten", med dess varierande vattentryck användes, varierade vattenföringen mellan 24 och 27 l/min. Tryckhöjden under försöket var 0,2, 0,3 och 0,6 mvp. Av samma skäl som för flödet, varierade även tryckhöjden avsevärt under försökets gång. Vid ett flertal tillfällen översteg den 1,0 mvp och ideliga justeringar gjordes.

Resultaten av de två första tryckhöjderna var att hålet sjönk nedåt en aning. Vid den större tryckhöjden steg det emellertid igen, för att vid försökets slut befinna sig på en höjd av 400 mm ovan spalten. Hålet hade då vuxit till totalt 160 mm på bredden och 30 mm på höjden. Under försökets gång uppstod åtskilliga nya håligheter i jorden, de flesta av dem av mindre format. Många av dem kollapsade. Det uppmärksammades även att jorden mellan röret och det översta stora hålet, blev helt vattenmättad. Försöket varade i 59 dagar. Någon uppgift om totalt urspolad jordmängd ges ej i rapporten.

I en avslutande summering av test 4 fastslås att den väl packade jorden var mindre känslig för statistiskt vattentryck än för ett flöde längs sprickan. En jämförelse av flödet i riggen och i verkligheten ger vid handen, att riggflödet på ungefär 0,5 l/sek motsvarar ca en tjugondel av flödet i en helt fylld 150 cm ledning (6 inch), som är 10-20 l/sek.

4.6 Försök med liten försöklåda med omväxlande in- och utläckage genom spalt. Överlast simulerad för tre jordar (Soil migration studies with reverse flow apparatus /10/)

På grundval av de studier WRC bedrivit med sin "Void Simulation Rig" uppdrogs det åt Royal Military College of Science (RMCS), Shrivenham, England, att utföra ytterligare tester med reverserat flöde genom jord.

Huvudsyftet med försöket var, som i tidigare studier, att studera jordtransport genom en spricka. Vad som skiljer dessa försök från de tidigare är att en jordöverlast simulerades.

De använda testriggarna var desamma som använts vid de försök som utförts vid SWK och GCG, men med vissa modifieringar. För att simulera överlast placerades en uppblåsbar gummikudde överst i lådan. Den belastning som på detta sätt överfördes på jorden motsvarade ett ledningsdjup på 4-5 m. Även luftningsventiler monterades för att möjliggöra luftutdrivning.

Tre olika jordar testades. Jordarna hämtades från områden som var kända för ledningskollaps. En av dessa var Camden sand, känd sedan tidigare. De övriga två var Dwyfor sand och Boulder clay (moränlera). Graderingskurvorna visas i fig 38, 39 och 40.

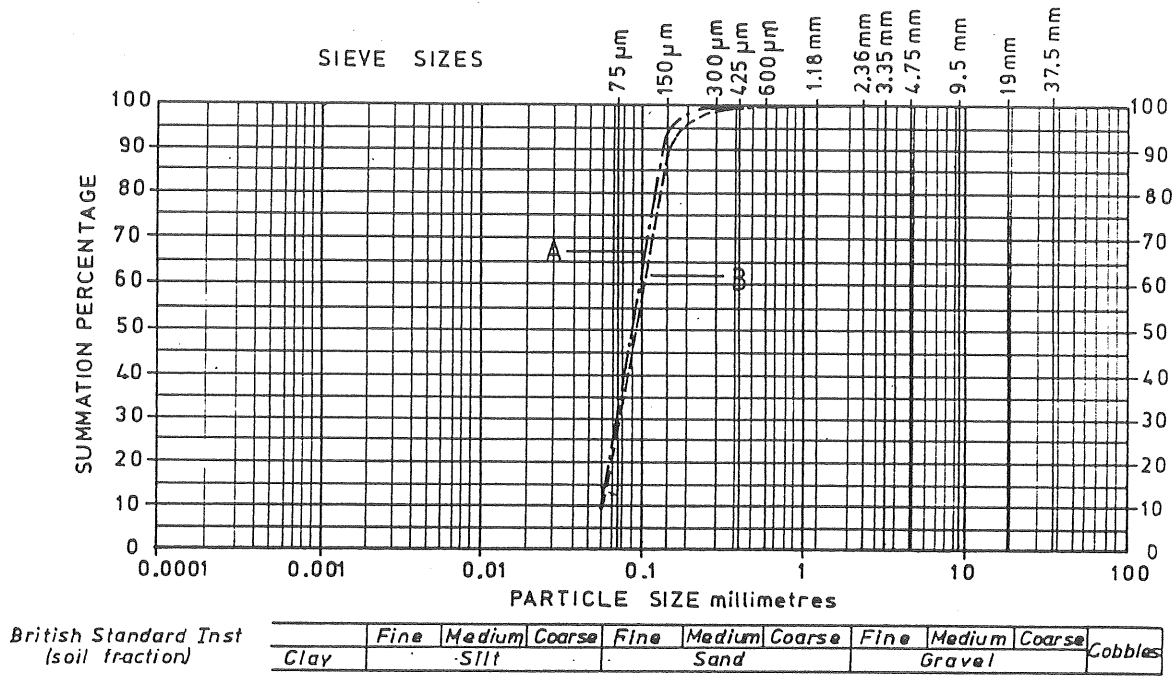


Fig 38 Siktkurva för Dwyfor Sand.

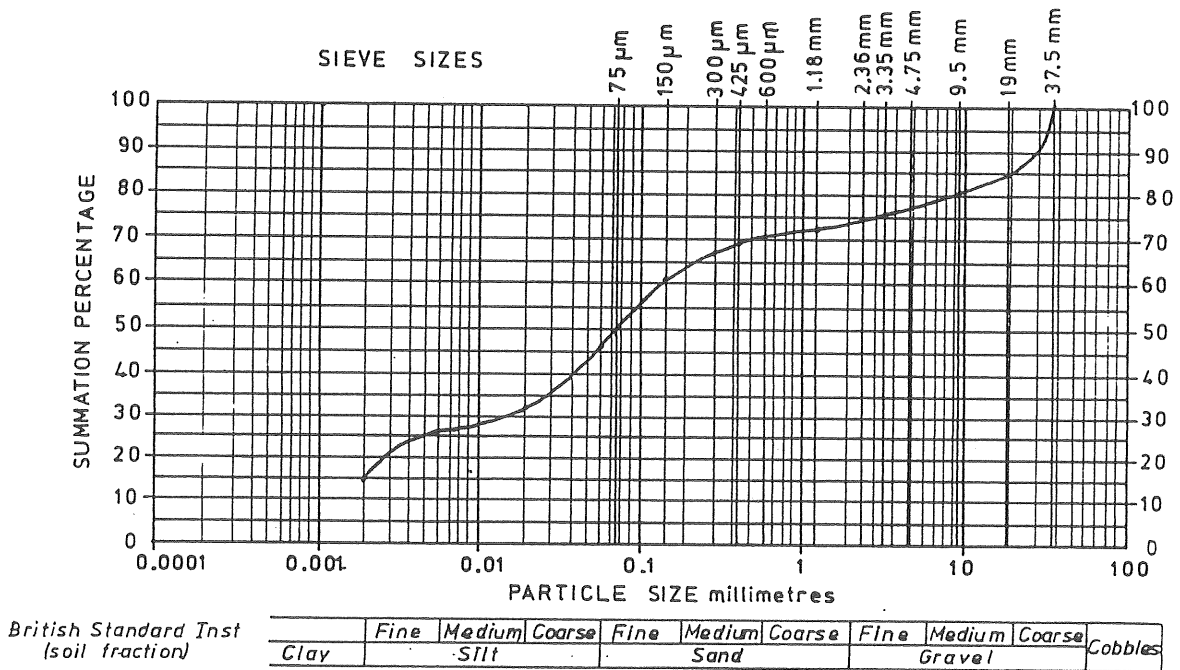


Fig 39 Siktkurva för Boulder Clay.

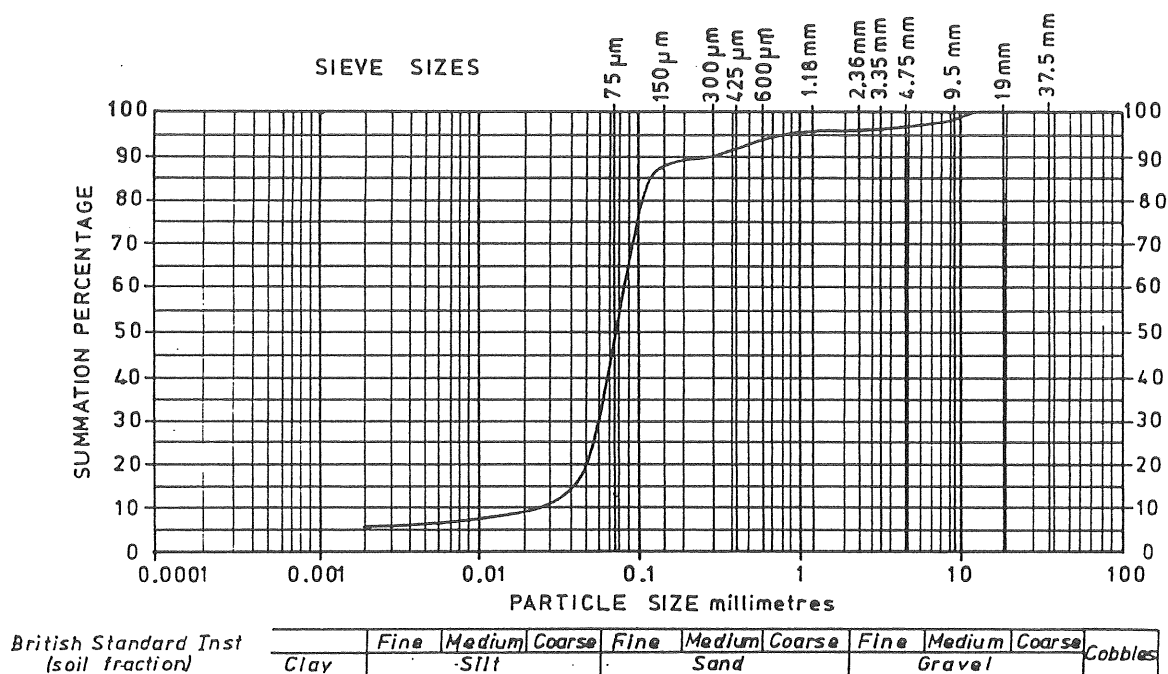


Fig 40 Siktkurva för Camden Sand.

Testproceduren vid försöken innebar att man först packade jorden i lådan till en förutbestämd densitet. Därefter sattes locket på och överlast simulerades genom gummiblåsan. Jorden vattenmätades genom springan och tillsammans med efterföljande dränering räknades detta som en cykel. Vattenmättnad ansågs föreligga när vattnet nådde toppen av lådan.

#### 4.6.1 Försök med Camden Sand

Camden sand är en dåligt graderad siltig sand med låg plasticitet. Lerhalten i RMCS's prov var 6% medan den i tidigare försök vid GCG (1983) uppgick till 12%. På grund av den låga lerhalten kunde inte plasticitetsgränsen fastställas. Flytgränsen var 33%. MDD enligt BS 1377 test 12 var  $1780 \text{ kg/m}^3$ .

Det fullständiga försöksschemat för Camden sand framgår av tabell 21.



Tabell 21 Försöksprogrammet för Camden Sand.

<u>TEST SCHEDULE FOR CAMDEN SAND</u>											
Series No	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Test No.	1P	1A	1B	1B1	1B2	1B3	1B4	1B4/1	1C	D	1D/1
Box Bo.	1	4	1	1	1	1	1	1	2	3	3
Soil Density (%MDD)	85	80	70	70	70	70	70	70	70	80	80
Surcharge Head (12 Pa)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Overburden (12 Pa)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Crack size (mm)	10	10	10	1	2	3	4	4	10	10	10
Preformed Cavity (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	12	12	20
Period between Surcharge (mm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Water type	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap

Som framgår av tabell 21 utfördes totalt elva försök. Av dessa var ett prov packat till 85% MDD, tre stycken var packade till 80%, medan de övriga sju endast packats till 70%. Överlasten var 50 kPa och tryckhöjden vid dämning 5 kPa (0,5 mvp) vid samtliga försök.

Ett genomgående resultat vid samtliga försök var att överlasttrycket sjönk i samband med den första dämningen. I samband härmed skedde även materialtransport genom spalten. Trycket sänktes från ursprungliga 50 kPa till i genomsnitt 35 kPa. Trycket återställdes till ursprungsvärdet oftast efter den första cykeln.

#### FÖRSÖK 1P

Totalt uppmättes för detta försök 20 g jord som passerat spaltvidden 10 mm under de första 20 cyklerna av totalt 164. Jorden var packad till 85% MDD, vilket var den högsta för Camden sand.

#### FÖRSÖK 1A

Vid en packningsgrad på 80% MDD, uppstod ett hålrum under vattenmättnadsfasen. I samband härmed pressades en stor mängd material

genom spalten och överlasttrycket sjönk till 26 kPa. Under den femte cykeln återställdes överlasttrycket med resultatet att jord fyllde såväl hålet som spalten. Ytterligare två cykler medförde stor materialtransport samt uppkomst av nytt hål. Efterföljande 50 cykler gav inte upphov till någon större transport, varför dämningstrycket ökades till 10 kPa (1.mvp). Inte heller detta hade någon positiv effekt på materialtransporten. Efter 80 cykler avslutades försöket. Total urspolad mängd uppgick till 1687 g. Dess fördelning efter antal cykler framgår av fig 41.

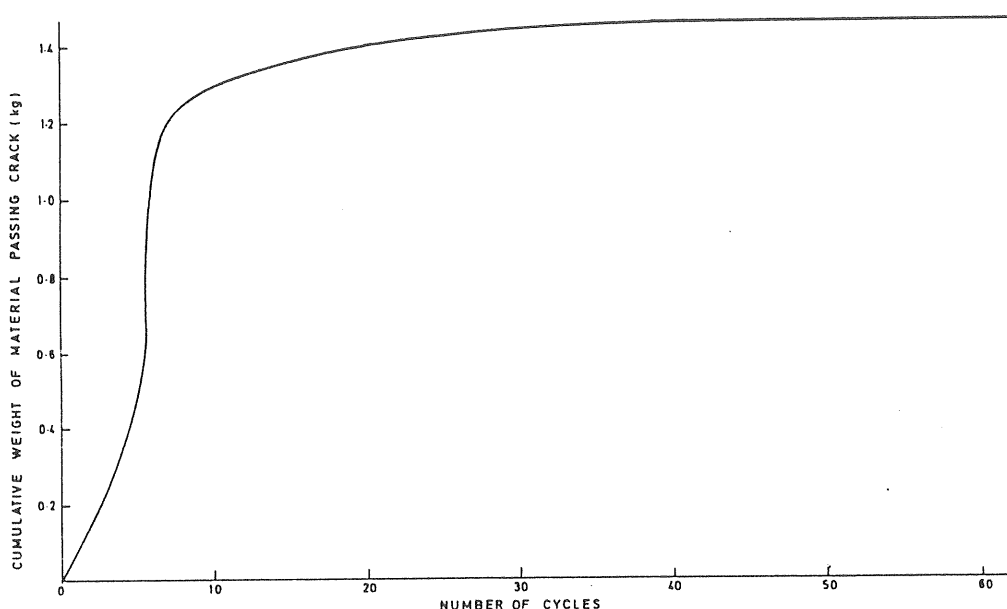


Fig 41 Ackumulerad passerad vikt genom spalten som funktion av antalet cykler.

Det nämns inte i rapporten om hålet förblev stabilt under hela försöket.

#### TEST 1B

En ytterligare minskning av packningsgraden till 78% MDD och med oförändrad sprickvidd på 10 mm, ledde till att jord pressades ur lådan under vattenmättnadsfasen. Ett försök att återställa överlasttrycket resulterade i en fortsatt jordutpressning, varför försöket stoppades.

TEST 1B1 till 1B4

Dessa försök utfördes med samma betingelser som försök 1B, fast med spaltvidden minskad till mellan 1 och 4 mm. Mycket lite material passerade spalten. Resultaten är sammanfattade i tabell 22.

Tabell 22 Resultat av försöken 1B1 till 1B4.

Test number	1B1	1B2	1B3	1B4
Crack width mm	1	2	3	4
Drop in overburden pressure kPa	35	32	40	32
Materials passing crack g	negligible	12	negligible	12
No of cycles	44	25	20	25
MDD after test %	79	85	83.6	85

TEST 1B4/1

Samma test som 1B4 fast utan inledande vattenmättnad. Skillnaden i resultat var liten; 27 g passerade under 20 cykler.

De nästföljande tre försöken 1C, 1D och 1D1 genomfördes med en på förhand urgröpt hålighet i jorden just ovanför spalten. På samma sätt som tidigare sjönk trycket i gummikudden under vattenmättnaden.

TEST 1C

Den urgröpta håligheten i detta försök var 12 mm i diameter. Ursprunglig densitet 70% MDD. I samband med återställning av tryckfallet i gummikudden efter första cykeln, pressades jord genom spalten. När väl trycket stigit till 50 kPa upphörde dock transporten. Efter 15 cykler, då jorden helt slutat passera genom spalten, ökades överlasten till 100 kPa. Detta gav under de fyra första cyklerna upphov till att ytterligare lite material passerade. Totalt passerade 791 g under de första 15 cyklerna, medan under de resterande 85 cyklerna endast 78 g passerade. Slutlig densitet var 82% MDD.

TEST 1D

I detta försök ökades packningsgraden till 80% MDD. Urgröpningen var densamma som i föregående försök, 12 mm. Försöksförloppet blev nästan detsamma som för föregående test och beskrivs därför inte närmare. Under de första 20 cyklerna passerade 865 g. Nästföljande 30 cykler medförde att mängden ökades med 100 g.

TEST 1D/1

Samma förutsättningar gällde för detta försök som för föregående, med den skillnaden att urgröpningen ökats till 20 mm i diameter. Även resultatet blev detsamma. Jordförlusten blev under cyklerna:

0-16	263 g
17-20	20 g
21-30	0 g

## 4.6.2 Försök med Boulder Clay

Boulder clay är ett välgraderat material, se fig 13. MDD enligt BS 1377 test 12 är  $1880 \text{ kg/m}^3$ . Plasticitetsindex är 12% (LL = 29%, PL = 17%). På grund av den antagna låga permeabiliteten ökades under slutfasen såväl tryckhöjd (1,5 mvp) som dämningstid. (I figuren nedan betecknas dessa försök med asterix.) Mellan dessa längre dämningscyklar (5 timmar) lades det in perioder med kortare cykler. Dessa perioder bestod av 10 korta cykler på två till tre minuter med så låg dämningshöjd, att vattnet endast nådde upp i nivå med spalten. Avsikten med detta var att simulera förhållandet i en ledning då vattenytan i ledningen är i höjd med hjässan.

Testprogrammet bestod av i grunden fyra olika försök. Två olika packningsgrader (80 och 90% MDD) ansattes. Vid varje packningsgrad utfördes försök med två olika överlastar, 25 kPa och 50 kPa. Varje försök avslutades sedan med den förlängda dämningstiden och ökad dämningshöjd. Testprogrammet framgår även av tabell 23.

Tabell 23 Försöksprogrammet för Boulder Clay.

TEST SCHEDULE FOR BOULDER CLAY								
Series No	2	2	2	2	2	2	2	2
Test No.	2A	2A/1*	2B	2B/1*	2C	2C/1*	2D	2D/1*
Box No.	1	1	2	2	3	3	4	4
Soil Density (% MDD)	80	80	80	80	90	90	90	90
Surcharge head (12 Pa)	5	15	5	15	5	15	5	15
Overburden (12 Pa)	25	25	50	50	25	25	50	50
Crack size (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10
Period between surcharging	30 mins	5 hrs	30 mins	5 hrs	30 mins	5 hrs	30 mins	5 hrs
Water type	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap

\*The asterisk indicates a continuation of the previous test - the soil remaining in the box. The 5 your cycles included intermediate "lapping" cycles of very short duration.

Resultaten av de olika försöken blev inbördes mycket lika. Vid samtliga inledande försök, dvs med den kortare cykeltiden, upphörde materialtransporten efter de första sex cyklerna. För proven med den lägre densiteten 80% MDD inträffade dessutom merparten av jordförlusten under den första "vattenmättnadscykeln".

De efterföljande längre cykeltiderna med större tryckhöjd orsakade att ytterligare en liten mängd jord passerade. Det påpekas i rapporten att grunden till detta inte klart kan anges då både dämningstid och tryckhöjd ökades.

För försöken 2A/1 och 2C/1 pågick transporten intill den tjugonde cykeln då försöken avbröts. Passerad mängd per cykel uppgick då till 0,5-1 g respektive 0,8 g. För dessa två fall anges att orsaken till jordtransporten var att de lägre densiteterna som uppmättes i slutet av försöket i kombination med det högre dämningstrycket gav lägre effektivspänningar.

En sammanfattning av resultaten ges i tabell 24.

Tabell 24 Sammanfattning av försöksresultat från försöken med Boulder Clay.

Test	Antal cykler	Störst mängd under första cykeln? Passerad mängd	Cykel då transport upphör Passerad mängd	Uppmätt densitet vid försökets slut	Material/Cykel
2A	40	Ja 489 g	6 (186 g)	-	-
2A/1	20	Ja Ej angett	- -	93% MDD	0,5-1 g
2B	60	Ja 340 g	6 (110 g)	-	-
2B/1	20	Nej	Minimal transport under inledande 3-4 cyklerna	96,6% MDD	Försumbart
2C		Ja Ej angett	5 68 g	-	-
2C/1		Ja Ej angett	- -	92 % MDD	0,8 g
2D		Ja Ej angett	5 30 g	-	-
2D1		Nej	Liten förlust under 3-4 inledande cyklerna	94% MDD	-

Inga hålrum av betydelse noterades under försöken.

De variabler som undersöktes vid försök med Boulder clay var packningsgrad, överlast och dämningstryck.

Avseende överlastens betydelse kan jämförelsen mellan försöksparen 2A och 2B respektive 2C och 2D göras. Ökningen av överlast resulterade i en omedelbar materialtransport som upphörde efter ett antal cykler (5-6 st). Förklaringen till detta antas vara att effektivspänningarna i materialet initieilt minskar till följd av ökat porvattentryck då belastningen påföres. Efter ett tag utjämnas sedan porvattentrycket vilket får till resultat att effektivspänningarna återigen ökar och materialtransporten minskar.

Tryckhöjdens betydelse vid dämning har berörts tidigare. Som framgått ökar transporten initieilt vid tryckhöjning för att sedan snabbt avtaga.

## 4.6.3 Försök med Dwyfor Sand

Dwyfor sand är en siltig finsand, med ensartad gradering. Försök att mäta plasticitets- och flytgränsen misslyckades till följd av den ringa lerhalten i proven. Maximala torrdensiteten enligt BS 1377 test 12 uppgick till  $1600 \text{ kg/m}^3$ . Försöken utfördes på två olika prover, A och B. Som framgår av siktkurvorna, fig 38 sid 70, är skillnaden mellan proven obetydlig.

Försöksprogrammet för Dwyfor sand framgår av tabell 25.

Tabell 25 Försöksprogrammet för Dwyfor Sand.

TEST SCHEDULE FOR DWYFOR SAND														
Series No.	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Test No	3A	3B	3B/1	3B/2	3B/3	3B/4	3B/5	3C	3C/1	3C/2	3C/3	3C/4	3C/5	3D
Sample	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A
Box No.	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4
Soil Density (% MDD)	80	80	80	80	80	80	80	90	90	90	90	90	90	90
Surcharge pressure (kPa)	5	5	15	0	5	15	0	5	15	0	5	15	0	5
Overburden Pressure (kPa)	25	25	25	25	50	50	50	25	25	25	50	50	50	25
Crack size (mm)	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10
Period between surcharge (mins)	30	30	30	*	30	30	*	30	30	*	30	30	*	30
Water type	tap	tap	tap	tap	tap	tap	tap							

\* The asterisk indicates a 2 hour period of "lapping" cycles.

Schemat kan förefalla komplicerat, men i själva verket rör det sig endast om fyra huvudförsök, som framgår enligt de inritade stora rektanglarna. Med huvudförsök menas att jorden fyllts på och packats i lådan, och försöken påbörjats med ett opåverkat jordprov. Inom de olika huvudförsöken, rektanglarna, har sedan jorden successivt utsatts för olika behandlingar, men med samma icke utbytta jordprov kvar i lådan. De stora variationerna har gjorts i försök 3B (sandprov A) och 3C (sandprov B). Den enda skillnaden mellan dessa två försök var att jorden i försök 3B packats till 80% MDD medan den i försök 3C packats till 90% MDD.

Vid dessa två huvudförsök var spaltvidden 5 mm till skillnad mot de övriga två huvudförsöken där motsvarande vidd var 10 mm. Inom varje försök 3B och 3C har två olika överlaster, på 25 kPa respektive 50 kPa, ansatts och vid varje överlast har provet utsatts för tre olika dämmningshöjder: 5, 15 och 0 kPa.

Vid de försök som är utmärkta med asterix (0 kPa dämningstryck) i schemat utsattes provet under två timmar för 30-sekunderscykler där vattenytan, i likhet med Boulder clay-försöken, endast tilläts stiga till i nivå med spalten. Tryckhöjden i detta fallet kontrollerades genom att luftevakueringsventilen nu fick tjäns-göra som bräddavlopp.

I stora drag kan det således sägas att Dwyfor sand undersöktes med avseende på packningsgrad, överlast och tryckhöjd vid dämning.

#### FÖRSÖK 3B, 3B/1, 3B/2

Vid dessa försök var överlasten konstant 25 kPa och packningsgraden 80% MDD. Endast dämningstrycket varierades (5, 15 och 0 kPa).

Den första cykeln under försök 3B (5 kPa) resulterade i bildandet av ett hålrum med åtföljande stor materialtransport (175 g). Under nästföljande cykler kollapsade hålet. Efter 162 cykler, då försöket avslutades, pågick fortfarande en konstant jordtransport. Passerad mängd under cykel 2-162 var 310 g. Totalt passerade  $485/162 \approx 3$  g/cykel.

För försök 3B/1 (15 kPa) ökade transporten under de 49 första cyklerna, då 1265 g uppmättes dvs 25,8 g/cykel. Cykel 50-191 gav 830 g och cykel 192-238 115 g. Jordtransport pågick fortfarande vid försökets avslutande.

Test 3B/2, med de korta cyklerna och liten tryckhöjd, medförde endast försumbar transport.



Effekten av ökat dämningstryck blev således en ökad materialtransport. RMCS redovisar i tabell 26 endast de 44 första cyklerna i försök 3B/1 vid bedömningen av tryckhöjdens inverkan.

#### FÖRSÖK 3B/3, 3B/4, 3B/5

Dessa försök utfördes med överlasten ökad till 50 kPa. Samma dämningstryck (5, 15 och 0 kPa) som i föregående serie ansattes.

Vid 3B/3 (5 kPa) sprack gummikudden vid tryckökningen. En ny installerades och vid försökens fortsättning uppmättes en passerad mängd av 205 g efter 36 cykler (= 5,7 g/cykel), då transporten avtog.

En ökning av dämningstrycket till 15 kPa i försök 3B/4 gav under de första 35 cyklerna upphov till en jordtransport på 680 g (= 19,4 g/cykel). Cykel 36-74 medförde en passerad mängd på 215 g. Materialförlusten höll sig konstant till försöksslut.

Test 3B/5 hade ingen nämnvärd effekt på jordtransporten.

Bedömningen av tryckhöjdens inverkan tar även här endast hänsyn till de 35 första cyklerna i försök 3B/4, se tabell 25.

Inga hålrum bildades vid dessa tre försök.

#### FÖRSÖK 3C, 3C/1, 3C/2

Vid dessa försök packades jorden till 90% MDD. Överlasten var 25 kPa.

Den låga dämningshöjden 5 kPa (0,5 mvp), försök 3C, resulterade i att totalt 10 g passerade under 162 cykler (= 0,06 g/cykel).

Effekten av tryckhöjningen i försök 3C/1 till 15 kPa blev en förhöjd jordtransport. Under cykel 0-45 passerade 272 g (= 6 g/cykel), under cykel 46-238 145 g (0,75 g/cykel). Under den 49:e cykeln uppstod ett hålrum som ökade i storlek efter hand.

Överlappningscyklerna i test 3C/2 resulterade i en passerad mängd av 145 g.

De första 45 cyklerna av försök 3C/1 är medtagna i tabell 26. Räknat på detta sätt, medför tryckhöjden en klart ökad passerad mängd jord per cykel.

#### FÖRSÖK 3C/3, 3 C/4, 3C/5

Dessa tre försök utfördes vid en överlast på 50 kPa och med samma variation i dämningshöjd som tidigare.

Test 3C/3 resulterade i 2,2 g passerad mängd per cykel under 36 cykler.

Med ökad tryckhöjd till 15 kPa i försök 3C/4 kollapsade hålrummet som bildades i test 3C/1. Detta inträffade under den 35:e cykeln. Under 47 cykler var den genomsnittligt passerade mängden 0,85 g/cykel och under cykel 48-74 0,38 g/cykel.

I detta fall minskade alltså materialtransporten vid högre dämningstryckhöjd.

Hela test 3C avslutades med försök 3C/5. Under de två timmarnas kortvariga cykler passerade 240 g jord.

#### FÖRSÖK 3D och 3D/1

Dessa två försök var identiska med försök 3C respektive 3C/1 förutom att spaltvidden ökats till 10 mm.

Till skillnad mot försök 3C uppstod ett hålrum under försök 3D. Passerad mängd jord ökade också påtagligt; vid 162 cykler passerade 170 g (1,05 g/cykel) mot totalt 10 g för försök 3C.

Vid försök 3D/1 då tryckhöjden ökades till 15 kPa kollapsade hålrummet med en stor mängd passerad jord som följde. Under försökets

gång bildades ytterligare ett hålrum som även det kollapsade med stor materialtransport som följd. Följande mängder passerade:

Efter 14 cykler	-	715 g		= 51,1 g/cykel
Efter 151 cykler	-	1346 g	(715 + 631)	= 8,9 g/cykel
Efter 191 cykler	-	3546 g	(1346 + 2200)	= 11,5 g/cykel

I detta fallet medförde återigen en ökad tryckhöjd ökad jordtransport. Det fullständiga resultatet av försök 3B, 3C och 3D redovisas nedan i tabell 26.

Tabell 26 Resultat av försök 3B, 3C och 3D.

Test	Overburden Pressure	Surcharge Pressure	No of Cycles	Loss of Material	Approx loss per cycle	Remarks
3C	25	5	162	10	.06	
3C/1	25	15	45	272	6.04	
3C/2	25	0	240	145	.6	90% MDD
3C/3	50	5	36	80	2.2	5 mm crack
3C/4	50	15	47	40	.9	
3C/5	50	0	240	240	1.0	
3B	25	5	162	485	30	
3B/1	25	15	44	1265	28.8	80% MDD
3B/2	25	0	0	0	0	5 mm crack
3B/3	50	5	36	205	5.7	
3B/4	50	15	35	680	19.4	
3B/5	50	0	0	0	0	
3D	25	5	162	170	1.04	90% MDD
3D/1	25	15	151	1340	8.8	10 mm crack

Effekten av olika överlast jämförs för följande fyra provpar med samma dämningshöjd enligt tabell 27.

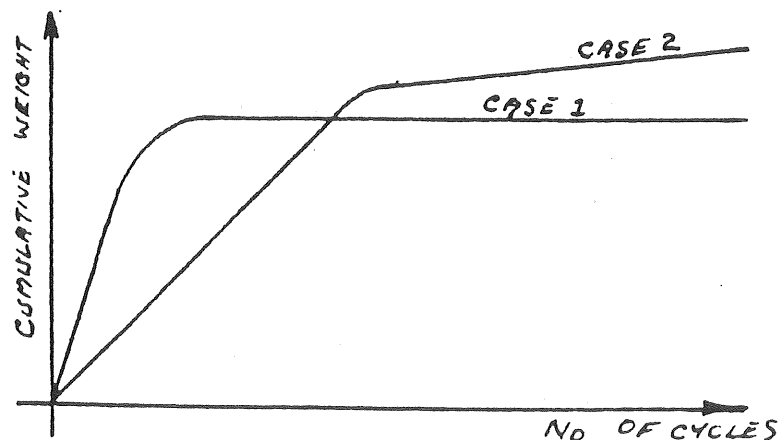
Tabell 27 Jämförelse av överlastens inverkan på jordtransporten.

test number	number of cycles	weight of material passing crack	overburden pressure	remarks
		g	kPa	
3B	162	485	5	Steady flow
3B/3	36	205	50	Flow stopped
3B/1	478	2200	25	Steady flow
3B/4	74	895	50	Flow stopped
3C	162	10	25	Flow stopped
3C/3	36	80	50	Steady flow
3C/1	238	417	25	Flow stopped
3C/4	74	50	50	Flow stopped

Det konstateras att en liten ökning av överlasten inte märkbart ökar materialtransporten. Undantaget är test 3C/3 där den ökade överlasten ger upphov till en kontinuerlig jordtransport. Fortsatta prov rekommenderas för att kunna förklara fenomenet.

Med följande konklusioner avslutar RMCS sin rapport:

1. Ökning av överlasten tycks ha liten inverkan på materialtransporten, förutom just vid lastökningen.
2. Jordtransportförloppet tog sig två former. Den första innebar en stor initiell transport som upphör efter ett fåtal cykler. Fall två inträffar för låga packningsgrader och stora dämningstryck, vilket ger upphov till en liten men kontinuerlig jordtransport. De båda fallen visas nedan.



3. Mekanismen vid hålrumsbildning består mer i en erosion än i en transport av finmaterial inne i massan.
4. Reduktion av effektivspänningar till följd av ökade dämningstryck ger upphov till kontinuerlig jordtransport vid låg packningsgrad, men passerad mängd per cykel är liten.
5. Korta cykler utan tryckhöjd gav endast upphov till en inledande liten jordtransport som efterhand upphörde.
6. Dwyfor sand hade en tendens till kontinuerlig jordtransport och hålrumsbildning, orsakad av låg plasticitet.
7. En betydande hållfasthetsförlust uppmättes i jorden ovanför spalten i försöket med Boulder clay.

5. GENOMGÅNG AV FÖRSÖK UTFÖRDA VID US ARMY ENGINEERING WATERWAYS EXPERIMENTAL STATION (WES)

5.1 Försök med inläckage genom korrugerade fogar och enkel spalt  
(Laboratory investigation of soil infiltration through pipe joints) /11/

5.1.1 Inledning

Försök med jordtransport genom otäta fogar har även utförts av US Army Engineering Waterways Experimental Station (WES).

Syftet med projektet var att klassificera olika jordar med hänsyn till deras utsatthet för transport genom fogar. Detta skulle sedan resultera i riktlinjer om i vilka jordar vattentäta fogar skulle föreskrivas.

De parametrar som antogs påverka jordtransporten och som undersöktes i studien var tryckhöjd (hydraulisk gradient), testets varaktighet, packningsgrad och i mindre omfattning även effekten av vibrationer.

Två typer av otätheter på en ledning studerades. Den ena var en enkel spaltöppning, medan den andra var en för svenska förhållanden något ovanlig konstruktion som bestod i en fogning av korrugerade stålrör. Fogning av dessa rör görs så att rörändarna ställs mot varandra varefter ett likaledes korrugerat stålband spänns runt ändarna. Hur själva fastspänningen av bandet går till framgår inte av rapporten, men är inte heller av principiell betydelse för försöken. Två olika bredder på band användes vid dessa fogningar. Bredderna var 20,3 cm (8 in.) respektive 30,4 cm (12 in.). Principen för fogen framgår av fig 42.

Testapparaturen i vilken de två olika defekterna studerades bestod av en plexiglaslåda med måtten 15,2 x 30,4 x 66 cm (6 x 12 x 26 in.). Som framgår av fig 42 var lådans botten utformad som en "korrugerad" fog. De båda fogbandsbredderna var representerade med sina halva bredder. Så som lådan var utformad testades således de olika fogbandsbredderna samtidigt.

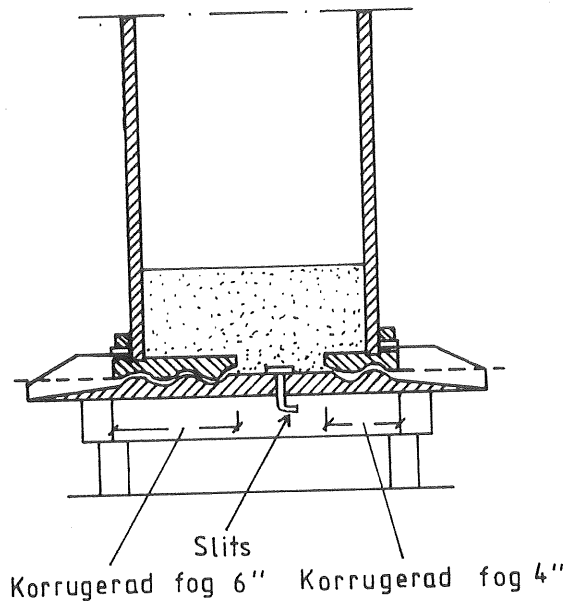


Fig 42 Detalj av WES försöksapparat.

Även en tvärgående slits fanns i lådans botten genom vilken jorden kunde passera. Slitsen var dock tätad vid försöken med de korrugerade fogarna och vice versa. Fyllnadshöjden med jord i lådan var 14,6 cm (5,75 in.).

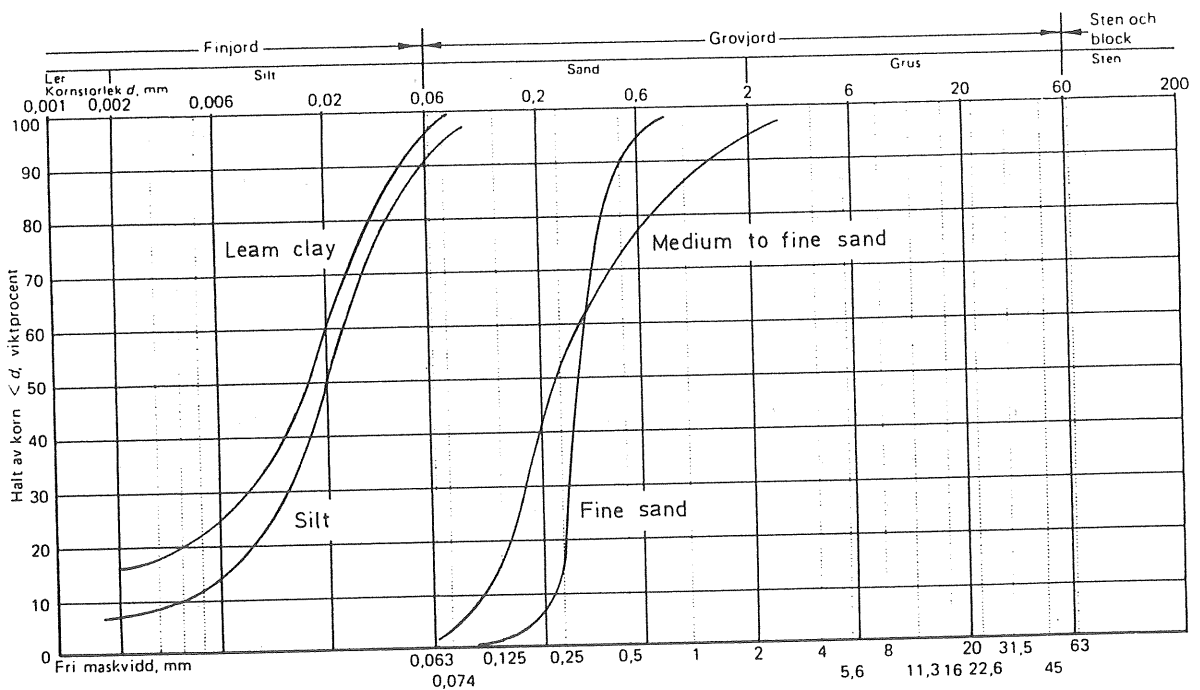


Fig 43 Kornstorleksdiagram.

Fyra jordar studerades, varav två typer av sand med olika grade-ring. Den mest ensgraderade benämndes Uniform sand och den något mer välgraderade för medium till fin sand, M-F-sand. De två övriga jordarna var finjordar, som benämndes Lean Clay respektive silt. Kornstorleksdiagram för jordarna visas i fig 43.

### 5.1.2 Testgenomförande - inledande resultat

Spaltvidder mellan 0,33 mm (0,013 in.) och 6,6 mm (0,260 in.) studerades. Spaltvidden ändrades inte kontinuerligt utan lådorna ompackades med nytt material vid varje ändrad spaltöppning. Den första tryckhöjden som applicerades på jordarna hade en varaktighet mellan 3 och 20 timmar. Vid följande tryckhöjningar var varaktigheten så lång att flödet hann stabiliseras. Flödesmätning utfördes periodiskt medan någon mätning av transporterat material genom fogen inte utfördes, så när som vid några inledande försök. Någon flödesmätning redovisades inte heller för merparten av försöken.

Vid de inledande försöken studerades inverkan av nedanstående faktorer:

- Testens varaktighet. Slutsats: 80-90% av jordmaterialet som infiltrerades gjorde så inom ett par minuter efter försökets början, 90% efter 6,5 timmar. Testperioder på upp till 42 timmar genomfördes.
- Provets storlek. Slutsats: Inverkar ej.
- Ökade tryckhöjder. Slutsats: Varje tryckhöjning gav en ytterligare materialtransport, även här direkt efter ökningen på samma sätt som vid punkt 1.
- Packningarna. Slutsats: Högre packning gav mindre jordtransport.
- Längden på överlappet vid de korrugerade rören. Slutsats: I de flesta fallen ger den längre överlappningen mindre jordtransport, men även motsatsen förekommer.

- Vibrationer. Slutsats: Vid proven med sand gav en vibration eller slag upphov till en momentan, men övergående ökning av jordtransporten. Vid prov med silt gav det mindre effekt.

Efter de inledande testen som gjordes med M-F sand och Uniform sand följde 13 test med M-Fsand, 8 test med Uniform sand, 22 med silt och 3 med Lean clay.

Vid försöken med M-F sand var öppningen i den korrugerade fogen mellan 2,0 mm och 5,3 mm (0,080 in. och 0,210 in.) och för den enkla slitsen mellan 2,4 och 3,8 mm (0,095 och 0,150 in.).

Uniform sand testades enbart med korrugerad fogöppning, som varierades mellan 0,66 mm och 3,2 mm (0,026 och 0,126 in.). Öppningen vid försöken med silt varierade från 0,33 mm till 6,6 mm (0,013 till 0,126 in.) vid den korrugerade fogen och mellan 1,2 mm och 6,3 mm för slitsen.

Lean clay slutligen, testades enbart med korrugerad öppning, som varierades mellan 5,3 mm och 6,6 mm.

Den maximala tryckhöjd proven utsattes för uppgick till 7,25 mvp (23,79 ft), vilken dock inte applicerades i alla försök.

Packningsgraden i nästan alla försök uppgick till 85% CE-55, utom för några av försöken med silt där packningsgraden var 90% CE-55. (CE-55 packningsmetoden är nästan identisk med modifierad AASHO.)

### 5.1.3 Resultat

Vid resultatredovisningen talar man om begreppen total och partiell urspolning. Total urspolning definieras som urspolning av material så att en öppen kanal uppstår i jorden. Partiell urspolning definieras som en materialtransport som orsakar en fördjupning på jordmaterialets ovanyta, utan kanalbildning.

#### M-F sand och Uniform sand

Både partiell och total urspolning inträffade vid de korrugerade fogarna, medan inga partiella, utan endast totala urspolningar,



inträffade vid den enkla slitsen. Förhållandet förklarades med att ett filter byggs upp i den korrugerade fogen, vilket verifierades i samband med särtagning av fogen. I fallet med den enkla slitsen ansågs ingen filteruppbyggnad möjlig varför stadiet av partiell urspolning direkt övergick i total urspolning. Urspolningarna inträffade vidare vid lägre tryckhöjder för den korrugerade fogen jämfört med slitsen.

För M-F sanden indikerade testen att total urspolning inträffade vid en fogöppning såväl vid korrugerad fog som enkel slits på 3,1 mm (0,125 in.) eller större och för Uniform sand vid 2,0 mm (0,080 in.).  $D_{85}$  för M-Fsanden var 0,9 mm (0,035 in.) och för Uniform sand 0,43 mm (0,017 in.).

För de båda jordarna representerar detta ett förhållande mellan slits och  $D_{85}$ -storlek på 3,57 respektive 4,76.

### Silt

Samma resultat som ovan, att någon partiell urspolning inte inträffade vid försöken med slits, gäller även för silten.

På basis av försöken med den korrugerade fogen ansågs den lägre gränsen för total urspolning vara 1,9 mm (0,075 in.). Rent allmänt konstaterades att den högre packningsgraden motverkade jordinfiltration.

### Lera

Resultaten av dessa tre test kunde man inte dra någon slutsats av.

## 6. DISKUSSION

Att döma av de försök som utförts vid CTH bör inte materialtransport i rörgravar vara något allvarligt problem för svenska förhållanden. Utifrån de försök, som utförts under de för materialtransport mest gynnsamma förhållandena (kap 3.2), kan slutsatsen dras att även om materialtransport sker, upphör denna efter ett relativt litet antal dämningcykler. Detta framgår av fig 20, som visar en kraftig minskning av materialtransporten efter ca 10 cykler. Vid dessa försök är effektivspänningarna mycket låga och antalet cykler som utförts är stort. Det är i praktiken osannolikt att en befintlig rörgrav utsättes för dessa förhållanden.

En jämförelse med försök utförda vid WRC och WES är intressant eftersom materialtransport har skett i högre utsträckning vid försöken vid WRC och WES. CTH jord 2 och WRC Camden och Dwyfor sand är mest lika M-F-sand som använts vid WES försök, varför jämförelsen begränsar sig till försök med dessa jordar.

WES försök visar på en total urspolning av jorden när fogöppningen är 3,1 mm. Försöken vid CTH visar inte detta, trots att fogöppningen till och med är lite större. Orsakerna kan vara flera, men det som skiljer mest är försöklådornas storlek och därmed jordprovets storlek. CTH:s försök har en fyllnadshöjd över rörhjässan på 0,6 - 1,0 m medan WES redovisar en fyllnadshöjd på 0,14 - 0,30 m. När väl ett genombrott kommer vid den låga fyllnadshöjden, ökar vattenhastigheten och därmed erosionen till följd av en ökad permeabilitet i jordprovet. Vid en större fyllnadshöjd sker emellertid ingen sådan ökning, varför någon total urspolning inte sker.

WRC redovisar försöksresultat som är mer samstämmiga med CTH:s försöksresultat.

- Stor initiell transport som upphör efter ett fåtal cykler
- Hålrumsbildning beror mer på erosion än på transport av finmaterial inne i jordmassan

- I de fall kontinuerlig jordtransport sker är det vid låga effektivspänningar, men passerad mängd per cykel är liten

Laboratorieförsöken på CTH visar sammanfattningsvis att för normala återfyllningsmaterial, som är godkända enligt Mark AMA och packats normenligt, sker ingen fortgående materialtransport. Fallet med omväxlande in- och utläckage ger dock en inte obetydlig materialtransport, som kan ge upphov till sättningar i rörgraven. Materialtransporten avtar emellertid snabbt med ökande antal dämningcykler, vilket tyder på att de filter som bildas inte helt bryts vid varje dämning.

## REFERENSER

- 1 Bäckman H: Överläckning från dag- till spillvattenledningar. Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola, Meddelande nr 77, Göteborg 1985.
- 2 Statens vattenfallsverk: Anvisningar för utförande och kontroll av jorddammar.
- 3 Gudmundson: Diskussionsinlägg vid SKTFs kongress i Halmstad 1963. SKTFs handlingar nr 18, 1963.
- 4 Institutionen för VA-teknik, CTH, Opublicerat examensarbete: Orsaker till rörbrott på vattenledningar av gjutjärn.
- 5 MarkAMA 83 - Allmän material- och arbetsbeskrivning för markarbeten. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm 1983.
- 6 WRC: Experimental Studies of Soil Particle Migration through Cracks. Mars 1982.
- 7 WRC: Further Studies of Soil Particle Migration through Cracks. December 1982.
- 8 WRC: Soil Migration Studies on Camden Sand. Augusti 1983.
- 9 WRC; Willis S, Rogers C, Jones G M A: Void Simulation Rig Trials with a Silty Fine Sand. Mars 1984.
- 10 WRC; Littleton I, Valvona P: Soil Migration Studies with Reverse Flow Apparatus. September 1984.
- 11 Nettles E H, Schomacher N B: Laboratory Investigation of Soil Infiltration through Pipe Joints. Highway Research Record nr 203, sid 37-56, 1967.

Förkortning: WRC - Water Research Centre.

## BETECKNINGAR OCH FÖRKORTNINGAR

BS	British Standard
$d_{85}$ , $d_{15}$	Den kornstorlek som på kornstorleksfördelningskurvan motsvarar 85 respektive 15% halt av korn $< d$ . Index <sup>bas</sup> = basmaterial (som skall skyddas) Index <sup>filter</sup> = filtermaterial
LL	Liquid Limit, flytgräns
MDD	Maximal torrdensitet ( $\text{g/cm}^3$ ), Maximum Dry Density
mvp	Tryckhöjd i meter vattenpelare (m)
PI	Plasticity Index, plasticitetsindex
PL	Plastic Limit, plasticitetsgräns
SKTF	Svenska kommunaltekniska föreningen
$W_c$	Kritisk sprickvidd (mm)
WES	Waterways Experimental Station
WRC	Water Research Centre

## FIGUR- OCH TABELLFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
<u>Figurförteckning</u>	
Fig 1	Erosionsområde vid olika kornstorlekar och vattenhastigheter. 2
Fig 2	Detalj av tätning mellan rör och plexiglasskiva. 6
Fig 3	Siktdiagram för försöksjordarna, jord 1 och jord 2. 7
Fig 4	Packningsdiagram för jord 1 och jord 2. 8
Fig 5	Principritning över vattensystemet med konstant tryckhöjd. 9
Fig 6	Foto av inhängande gummiring. 11
Fig 7	Detalj av rörfog. 12
Fig 8	Fogavgjutning. 13
Fig 9	Sektion genom betongrör med luftevakueringsrör. 14
Fig 10	Försöksuppställning vid försök med inläckande vatten. 16
Fig 11	Schematiskt flödesförlopp vid försök 1-3 med inläckande vatten. 18
Fig 12	Försöksuppställning vid omväxlande in- och utläckage ur ledning. 20
Fig 13	Flödesvariation vid inledande rättvänt flöde under försök R1. 21
Fig 14	Flödesvariation under försök R1 - R2. 22
Fig 15	Flödesvariation under försök R1 - R2 (fortsättning). 22
Fig 16	Flödesvariation under försök R3. 24
Fig 17	Flödesvariation under försök R4. 25
Fig 18	Foto av urspolning överst i lådan. 26
Fig 19	Flödesvariation under försök R5. 26
Fig 20	Akkumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antal cykler vid försök R1-R5. 27
Fig 21	Försöksuppställning vid försök med omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. 28
Fig 22	Foto av kanalbildning i jordmaterialet. 31

	<u>Sid</u>
Fig 23 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.	31
Fig 24 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.	33
Fig 25 Överlastanordning.	35
Fig 26 Ackumulerad passerad vikt genom fogen som funktion av antalet cykler.	39
Fig 27 Siktdiagram för jordar använda vid experimenten.	41
Fig 28 Siktkurvor för språnggraderade jordar.	43
Fig 29 Exempel på språngvis graderad jord samt definition av storheter.	44
Fig 30 Siktkurvor för lerjordar.	47
Fig 31 Försöksresultat med lerjordar, med hänsyn till lerhalt och porvolym.	50
Fig 32 Siktkurvor för Camden sand.	53
Fig 33 Ackumulerad vikt som funktion av spaltöppning.	55
Fig 34 Flödesvariation vid försök CS5 och CS6.	56
Fig 35 Ackumulerad vikt som funktion av tiden för försök CS5 och CS6.	56
Fig 36 Siktdiagram för en siltig finsand från Hampsted Heath.	58
Fig 37 Figur av WRC's försökslåda.	60
Fig 38 Siktkurva för Dwyfor Sand.	70
Fig 39 Siktkurva för Boulder Clay.	70
Fig 40 Siktkurva för Camden Sand.	71
Fig 41 Ackumulerad passerad vikt genom spalten som funktion av antalet cykler.	73
Fig 42 Detalj av WES försöksapparat.	84
Fig 43 Kornstorleksdiagram.	85

#### Tabellförteckning

Tabell 1	Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R1 - R2.	22
Tabell 2	Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R4.	25

	<u>Sid</u>	
Tabell 3	Materialtransport vid omväxlande in- och utläckage genom fog. Försök R5.	27
Tabell 4	Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Försök 1.	29
Tabell 5	Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Försök 2.	30
Tabell 6	Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan.	32
Tabell 7	Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan. Löst packad jord.	34
Tabell 8	Materialtransport genom fog vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 2.	36
Tabell 9	Materialtransport genom fog vid in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 1.	37
Tabell 10	Materialtransport genom slits vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, jord 1.	37
Tabell 11	Materialtransport genom slits, vid omväxlande in- och utläckage ur ledning, dämmningshöjd upp till 1,0 mvp ovan rörhjässan, med överlast, bottenventilen i försökslådan öppen.	38
Tabell 12	Kritiska sprickvidder $W_c$ i mm för de testade jordarna.	42
Tabell 13	Kornstorleksdata för de språnggraderade jordarna.	45
Tabell 14	Sammanfattning av resultaten med språnggraderad jord.	46
Tabell 15	Sammanfattning av resultaten med lerjordar.	49
Tabell 16	Torr densitet och vattenhalter vid försöken med Camden sand.	53
Tabell 17	Schema över försöksprogrammet.	59
Tabell 18	Underindelning av försök 4.	65
Tabell 19	Sammanfattning av resultaten i försök 4 D.	67
Tabell 20	Sammanfattning av resultaten i Försök 4 E.	68
Tabell 21	Försöksprogrammet för Camden Sand.	72



Tabell 22	Resultat av försöken 1B1 till 1B4.	<u>Sid</u> 74
Tabell 23	Försöksprogrammet för Boulder Clay.	76
Tabell 24	Sammanfattning av försöksresultat från försöken med Boulder Clay	77
Tabell 25	Försöksprogrammet för Dwyfor Sand.	78
Tabell 26	Resultat av försök 3B, 3C och 3D.	82
Tabell 27	Jämförelse av överlastens inverkan på jordtransporten.	82

## BILAGA 1

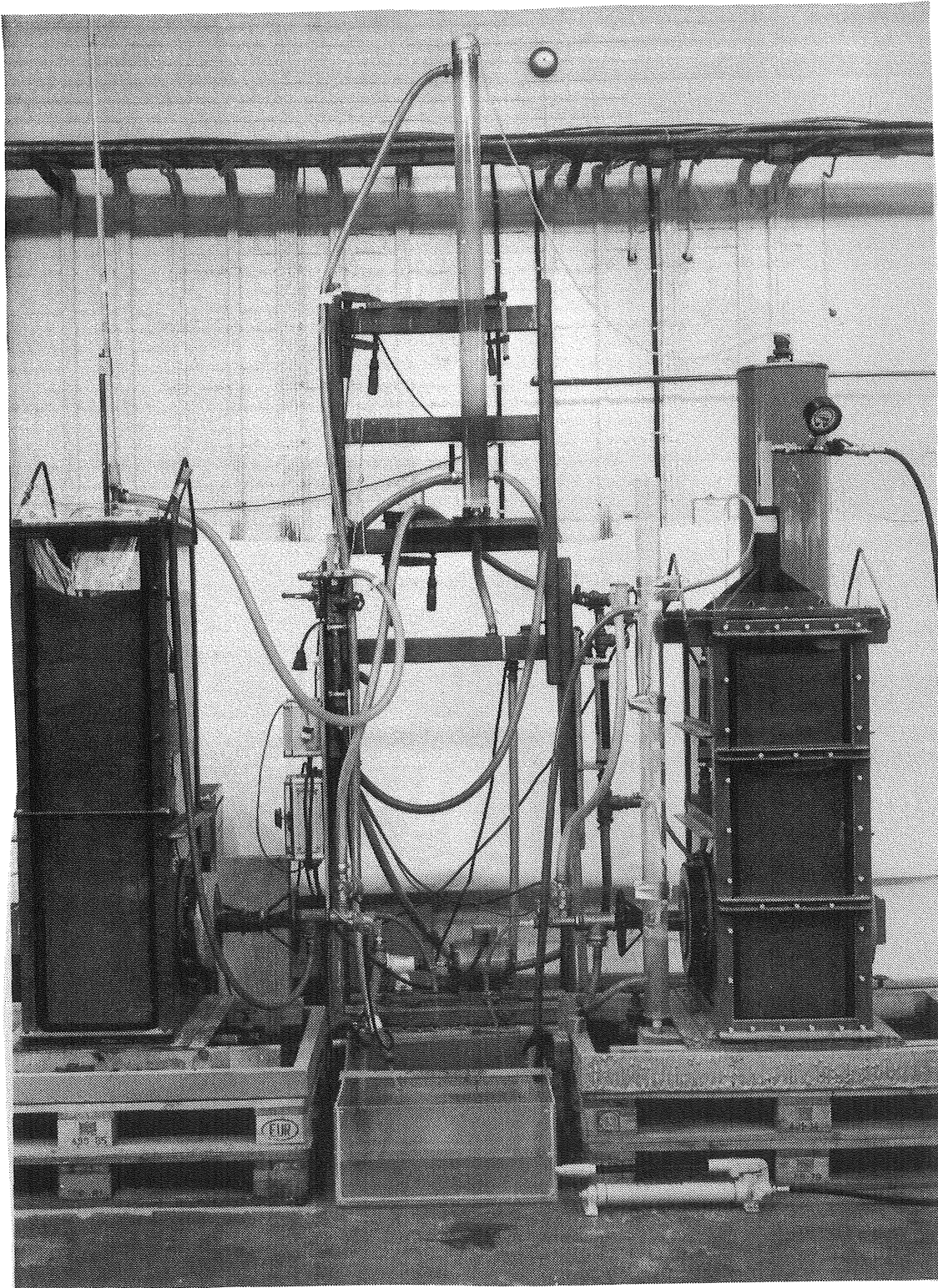


Fig 1.1 Översiktsbild av försöksanläggningen.

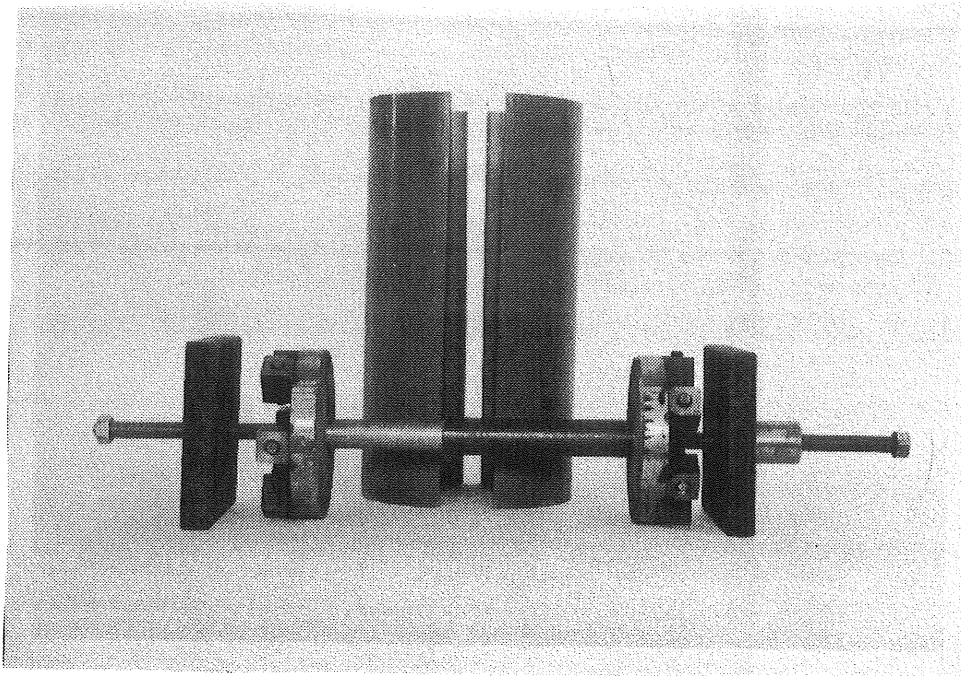


Fig 1.2 Verktg för fogning av betongrören.

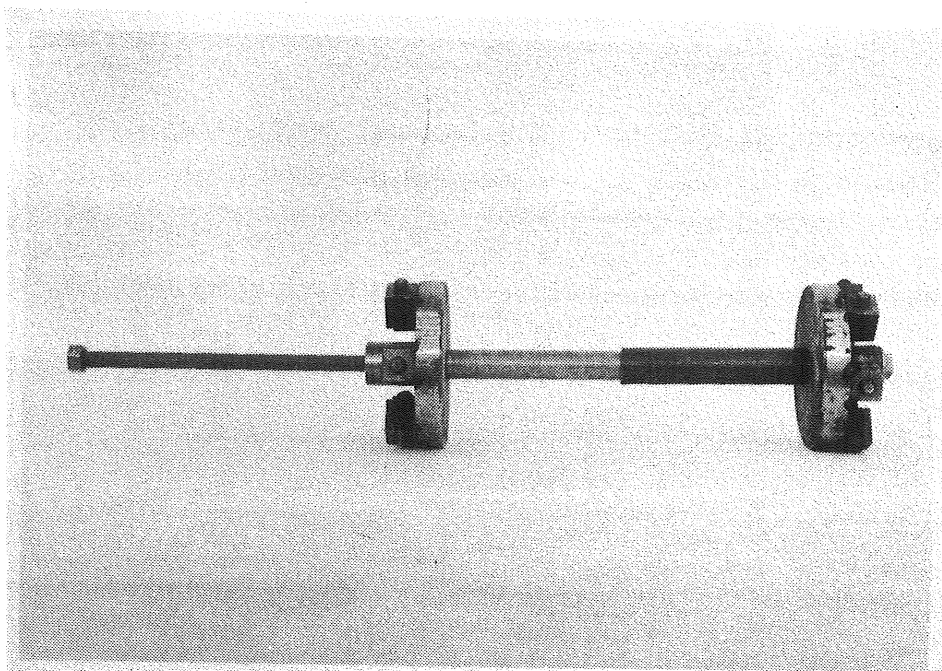


Fig 1.3 Verktget hopsatt för särdragning av betongrör.

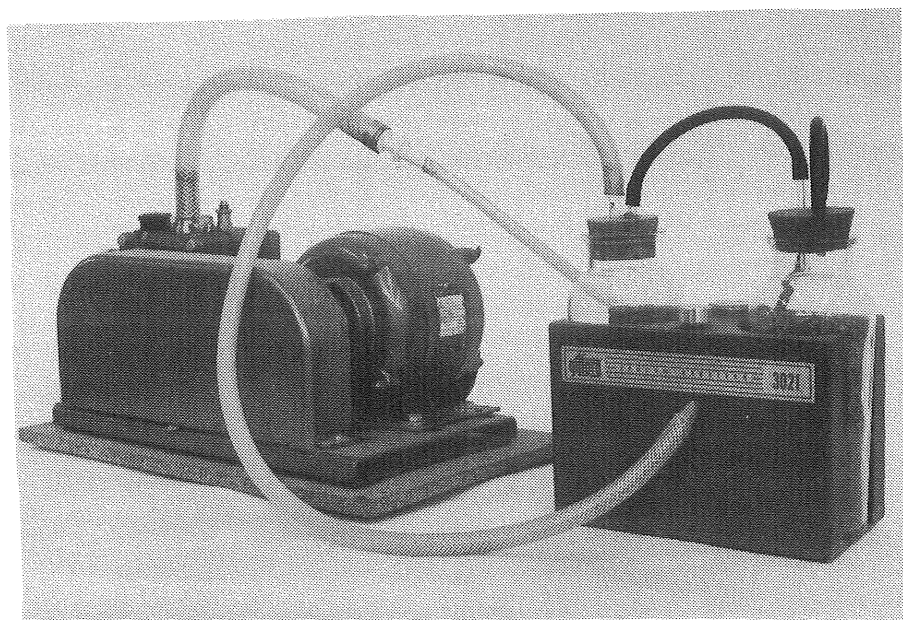


Fig 1.4 Vacumpump och flaskor för uppsamling av passerat jordmaterial.



Meddelande:

- nr 1 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1972-07-01 - 1973-03-01). 1973. 100 sidor. (Utgången)
- nr 2 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1. Evaluering av akviferers geohydrologiska data med hjälp av propumpningsdata. 1973. 67 sidor.
- nr 3 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2. Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska diffusivitet med hjälp av propumpningsdata. 1973. 17 sidor.
- nr 4 Viktor Arnell: Nederbördsräknare. En sammanställning av några olika mätartyper. 1973. 39 sidor. (Utgången)
- nr 5 Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden 1926-1971. 1974. 68 sidor.
- nr 6 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1973-03-01 - 1974-02-01). 1974. 167 sidor.
- nr 7 Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska kartor - litteraturstudier. 1974. 55 sidor. (Utgången)
- nr 8 Anders Sjöberg: Interim Report. Mathematical Models for Gradually Varied Unsteady Free Flow. Development and Discussion of Basic Equations. Preliminary Studies of Methods for Flood Routing in Storm Drains. 1974. 74 sidor. (Utgången)
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974. 38 sidor. (Utgången)
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974. 53 sidor. (Utgången)
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper. Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969-1972. Engelsk sammanfattning. 1974. 46 sidor. (Utgången)
- nr 12 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. Geohydrologiska forskningsgruppen i samarbete med VA-verket i Göteborg. 1975. 50 sidor.
- nr 13 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975. 92 sidor.
- nr 14 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Delrapport. Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Engelsk sammanfattning. 1975. 73 sidor.
- nr 15 Dagvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg 1975. 1976. 33 sidor. Följande uppsatser ingår:  
Arnell V. Beräkningsmetod för analys av dagvattenflödet inom ett urbant område.  
Lyngfelt S. Nederbörds-avrinningsstudier i Bergsjön, Göteborg.  
Sjöberg A. CTH-ledningsnätmodell DAGVL-A.  
Svensson G. Dagvattnets sammansättning, inverkan av urbanisering. (Utgången)
- nr 16 Grundvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg 1975. 1976. 43 sidor. Följande uppsatser ingår:  
Andréasson L, Cederwall K. Rubbningar av grundvattenbalansen i urbana områden.  
Carlsson L. Djupinfiltration i slutna akviferer.  
Torstensson B-A. Följder av grundvattensänkning inom lerområden.  
Wedel P. Exempel på dränering av jordlager på grund av tunnelbyggande. (Utgången)
- nr 17 Olov Holmstrand, Per Wedel: Markvattenundersökningar i ett urbant område. 1976. 127 sidor.
- nr 18 Göran Ejdeling: Beräkningsmodeller för prognos av grundvattenförhållanden. 1978. 130 sidor.
- nr 19 Viktor Arnell, Jan Falk, Per-Arne Malmquist: Urban Storm Water Research in Sweden. 1977. 30 sidor.
- nr 20 Viktor Arnell: Studier av amerikansk dagvattenteknik. Resa i december 1976. 1977. 64 sidor.
- nr 21 Leif Carlsson: Reserapport från studieresa i USA samt deltagande i 2nd International Symposium on Land Subsidence in Anaheim, USA. 29 nov-17 dec 1976. 1977. 61 sidor.

- nr 22 Per O Wedel: Grundvattenbildning, samspelet jordlager och berggrund. Exemplifierat från ett försöksområde i Angered. 1978. 130 sidor.
- nr 23 Viktor Arnell: Nederbördsdata vid dimensionering av dagvattensystem med hjälp av detaljerade beräkningsmodeller. En inledande studie. 1977. 29 sidor.
- nr 24 Leif Carlsson, Klas Cederwall: Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Geohydrologisk forskning vid CTH, Sektion V, under perioden 1972-75. 1977. 17 sidor.
- nr 25 Lars O Ericsson (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01 - 1977-01-31. 1977. 120 sidor.
- nr 26 Ann-Carin Andersson, Jan Berntsson: Kontrollerad grundvattenbalans genom djupinfiltration. En inventering av djupinfiltrationsprojekt. 1978. 273 sidor.
- nr 27 Anders Eriksson, Per Lindvall: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Resultatredovisning av enkät rörande drift och konstruktion av perkolationsanläggningar. 1978. 126 sidor.
- nr 28 Olov Holmstrand (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977-02-01 - 1977-11-30. 1978. 69 sidor.
- nr 29 Leif Carlsson: Djupinfiltrationsstudier i Angered. 1978. 70 sidor.
- nr 30 Lars O Ericsson: Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. 1978. 45 sidor.
- nr 31 Lars O Ericsson, Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. 1978. 15 sidor.
- nr 32 Lars O Ericsson, Stig Hård: Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. 1978. 145 sidor.
- nr 33 Jan Hällgren, Per-Arne Malmquist: Urban Hydrology Research in Sweden 1978. Swedish Coordinating Committee for Urban Hydrology Research. 1978. 14 sidor.
- nr 34 Bo Lind, Göte Nordin: Geohydrologi och vegetation i Dalen 5, Karlskoga. 1978. 63 sidor.
- nr 35 Eivor Bucht, Bo Lind: Metodfrågor vid naturanpassad stadsplanering - erfarenheter från studie i Karlskoga. 1978. 65 sidor.
- nr 36 Anders Sjöberg, Jan Lundgren, Thomas Asp, Henriette Melin: Manual för ILLUDAS (version S2). Ett datorprogram för dimensionering och analys av dagvattensystem. 1979. 67 sidor.
- nr 37 Per-Arne Malmquist m fl: Papers on Urban Hydrologi 1977-78. 99 sidor.
- nr 38 Viktor Arnell, Per-Arne Malmquist, Bo-Göran Lindquist, Gilbert Svensson: Uppsatser om Dagvattenteknik. 1978. 30 sidor.
- nr 39 Bo Lind: Dagvatteninfiltration - förutsättningar inom ett bergsområde, Östra Gårdsten i Göteborg. 1979. 32 sidor.
- nr 40 Per-Arne Malmquist (red.): Geohydrologiska forskningsgruppen 1972-78. Sammanställning av uppnådda resultat. 1979. 96 sidor. Kostnadsfri.
- nr 41 Gilbert Svensson, Kjell Øren: Planeringsmodeller för avloppssystem. NIVA-modellen tillämpad på Torslanda avrinningsområde. 1979. 71 sidor.
- nr 42 Per-Arne Malmquist (red.): Infiltrera dagvatten. Diskussioner och figurer från CTH-seminarium 1979-04-20. 1979. 86 sidor.
- nr 43 Bo Lind: Dagvatteninfiltration - perkolationsanläggning i Halmstad. 1979. 58 sidor.
- nr 44 Viktor Arnell, Thomas Asp: Beräkning av bräddvattenmängder. Nederbördens varaktighet och mängd vid Lundby i Göteborg 1921-1939. 1979. 80 sidor.
- nr 45 Stig Hård, Thomas Holm, Sven Jonasson: Dagvatteninfiltration på grönytor - Litteraturstudie, kunskaps-sammanställning och hypotes. 1979. 278 sidor.
- nr 46 Per-Arne Malmquist, Per Lindvall: Dräneringsrörs igensättning - en jämförande laboratoriestudie. 1979. 44 sidor.
- nr 47 Per-Arne Malmquist, Gunnar Lannér, Erland Högberg, Per Lindvall: SÖDRA NÅSET - ett exempel på förenklad utformning av gator och dagvattensystem i ett upprustningsområde. 1980.
- nr 48 Viktor Arnell, Håkan Strandner, Gilbert Svensson: Dagvattnets mängd och beskaffenhet i stadsdelen Ryd i Linköping, 1976-77. 1980.
- nr 49 Lars O Ericsson, Stig Hård: Termisk registrering, en metod att kartera markvattenhalt - Termovisionsförsök i klimatkammare. 1980. 65 sidor.

- nr 50 Viktor Arnell: Dimensionering och analys av dagvattensystem. Val av beräkningsmetod. 1980. 56 sidor, 22 figurer.
- nr 51 Lars O Ericsson: Markvattenförhållanden i urbana områden. Slutrapport. Göteborg 1980. 115 sidor.
- nr 52 Olov Holmstrand (red.): Ingenjörsgelogisk kartering. Seminarium 1980-04-17. 110 sidor.
- nr 53 Olov Holmstrand: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Sammanfattning av forskning om dagvatteninfiltration vid CTH 1976-79. 90 sidor.
- nr 54 Olov Holmstrand, Bo Lind, Per Lindvall, Lars-Ove Sörman: Perkolationsmagasin i ett lerområde. Lokalt omhändertagande av dagvatten i Bratthammar, Göteborg. 172 sidor.
- nr 55 Erland Högberg, Gunnar Lannér: Gatuplanering i bostadsområden i utlandet. Nya principer och lösningar i Danmark, Holland och England. 1981. 110 sidor.
- nr 56 Sven Lyngfelt: Dimensionering av dagvattensystem. Rationella metoden. 1981. 82 sidor.
- nr 57 Erland Högberg: Samband mellan gatustandard och trafiksäkerhet i bostadsområden. En förstudie. 1981.
- nr 58 Jan A Berntsson: Portryckförändringar och markrörelser orsakade av trädvegetation. 1980. 121 sidor.
- nr 59 Per-Arne Malmquist, Stig Hård: Grundvattenpåverkan av dagvatteninfiltration. 1981.
- nr 60 Annika Lindblad: Infiltrationsmätningar utförda vid Geologiska institutionen, CTH/GU, 1972-80. Sammanställning och statistisk bearbetning. 1981. 78 sidor.
- nr 61 Lars O Ericsson, Stig Hård: Termisk registrering - en metod att kartera markvattenhalt. Slutrapport. 1981. 18 sidor.
- nr 62 Jan Pettersson, Elisabeth Sjöberg: SÖDRA NÄSET - En intervjuundersökning rörande två alternativa upprustningsförslag av gator och dagvattentransport. 1981. 36 sidor.
- nr 63 Olov Holmstrand: Praktisk tillämpning av ingenjörsgelogisk kartering. 1981. 114 sidor.
- nr 64 Anders Sjöberg, Nils Mårtensson: REGNENVELOPEMETODEN. En analys av metodens tillämplighet för dimensionering av ett 2-års perkolationsmagasin. 1982. 29 sidor.
- nr 65 Gösta Lindvall: ENERGIFÖRLUSTER I LEDNINGSBRUNNAR - Litteraturstudie. 1982. 35 sidor.
- nr 66 Per-Arne Malmquist: Lathund för beräkning av Dagvattnets föroreningar. 1982. 32 sidor.
- nr 67 Sven Nyström: Kommuns skadeståndsansvar mot VA-abonnet för översvämningsskador. 1982. 71 sidor.
- nr 68 Sven Lyngfelt, Gilbert Svensson: Dagvattenavrinning från stora urbana områden. Simuleringsmetodik exemplifierat på Göteborgsregionen. 1983. 118 sidor.
- nr 69 Hans Bäckman, Gilbert Svensson: Flödesmätning i avloppsnät med portabla utrustningar. Mät noggrannhet under kontrollerade förhållanden i en 225 mm:s betongledning. 1983. 51 sidor.
- nr 70 Olov Holmstrand (red): Naturanpassad stadsplanering i Dalen 5, Karlskoga. Erfarenheter av planeringsprocess och teknik under och efter byggandet. 1983. 114 sidor.
- nr 71 Olov Holmstrand (red): Reservvattentäkter. Redovisning av diskussionsdag 1983-05-18. 1983. 115 sidor.
- nr 72 Gilbert Svensson, Håkan Strandner (övers. och bearb.): NIVANETT manual. Ett datorprogram för simulering av flöden i avloppsnät. 1983. 101 sidor.
- nr 73 Gilbert Svensson (red): Byggnad, drift och förnyelse av kommunala va-ledningar. -Är driftstörningarna omfattande? -Projekterar vi på bästa sätt? - Var ligger kostnaderna? 1984. 98 sidor.
- nr 74 Hans Bäckman: Avloppsledningar i svenska tätorter i ett historiskt perspektiv. -Ett sammandrag av tekniska förutsättningar, idéer och diskussioner under 1900-talets ledningsbyggande. 1984. 123 sidor.
- nr 75 Ann-Carin Andersson, Olov Holmstrand, Erik Almling, Rolf Rosen, Kjell Söderström: Infiltration och alternativa åtgärder vid grundvattensänkning. Jämförande beskrivningar och val av metoder. 1984. 115 sidor.
- nr 76 Viktor Arnell, Henriette Melin: Rainfall data for the design of sewer detention basins. 1984. 79 sidor.
- nr 77 Hans Bäckman: Överläckning från dag- till spillvattenledningar. Metoder för att påvisa och kvantifiera överläckning samt redovisning av mätresultat från kommunala avloppsnät. 1985. 102 sidor.



- nr 78 Chester Svensson, Göran Sällfors: Beräkning av dimensionerande grundvattentryck. 1. Göteborgsregionen. 1985. 43 sidor.
- nr 79 Jan-Arne Nilsdal: Källaröversvämning i samband med regn. Reflexioner kring ett skadedrab-  
bat bostadsområde i Göteborg. Några förslag på hur förbättrad säkerhet hos kommunala  
avloppsledningar kan erhållas. 1985. 68 sidor.
- nr 80 Bo Lind, Mats Nyborg: Moränstruktur och hydraulisk konduktivitet. 1986. 55 sidor.
- nr 81 Gösta Lindvall: Energiförluster i ledningsbrunnar. Laboratiemätningar. 1986. 49 sidor.



VASASTADENS BOKBINDERI AB  
GÖTEBORG 1988