

2e EXEMPLAAR

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

stabiliteit van granulaire filters bij cyclische  
verhangen evenwijdig aan het grensvlak

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

M 1544

juli 1981

M 1544

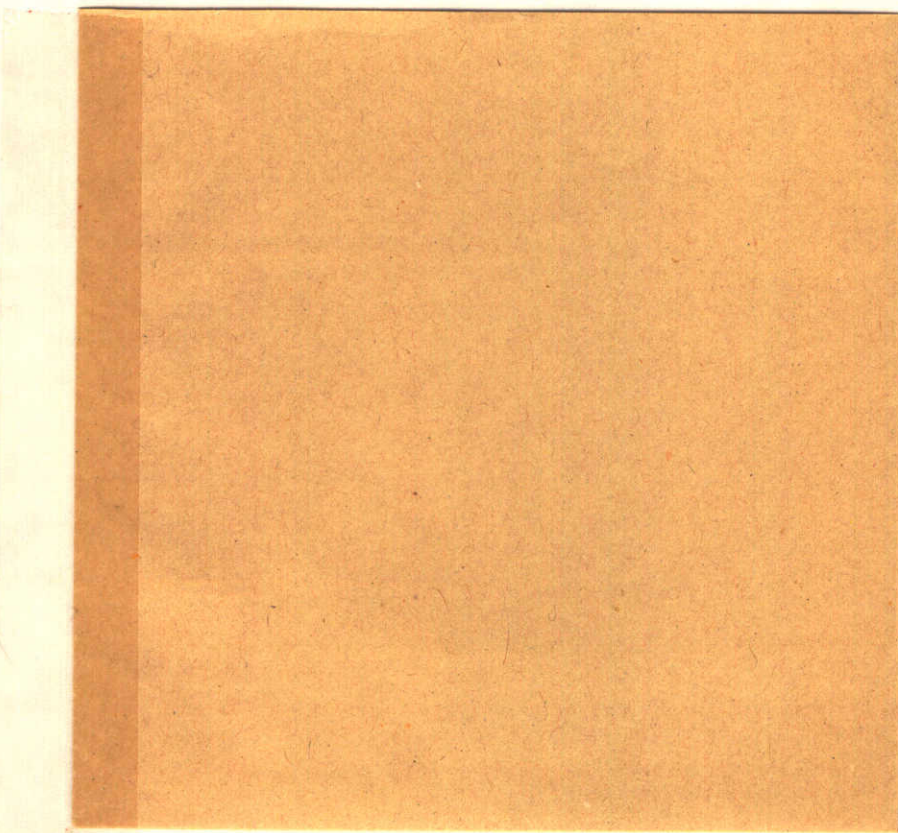
09.DEC.1981

BIBLIOTHEEK  
Waterloopkundig Laboratorium  
Postbus 177 - DELFT

2e EXEMPLAAR

---

stormvloedkering Oosterschelde



s bij cyclische  
grensvlak

---

juli 1981

## INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u> .....	1
2. <u>Conclusies</u> .....	2
3. <u>Opbouw van de drempel</u> .....	4
4. <u>Proefopstelling</u> .....	5
5. <u>Uitvoering van de proeven</u> .....	7
6. <u>Uitgevoerde proeven</u> .....	9
6.1 Vergelijking met de Filterbak (T1 en T2) .....	9
6.2 Kritieke verhangen fundatiebed (T3, T4 en T5) .....	10
6.3 Inwendige verhangen (T6 en T7) .....	11
6.4 Asymmetrische golfbeweging (T8) .....	12
6.5 Interne stabiliteit fundatiebed (T9) .....	13



## FIGUREN

- 1 Opbouw van de drempel
- 2 Proefopstelling
- 3 Inbouw filterpakket
- 4 Zeefkrommen wadzand en grof zand
- 5 T1 en T2, zeefkrommen filtermateriaal
- 6 T1, cyclische horizontale kritieke verhangen
- 7 T2, cyclische horizontale kritieke verhangen
- 8 T3, zeefkromme Füller-mengsel
- 9 T4, zeefkrommen afwijkend mengsel
- 10 T4, cyclische horizontale kritieke verhangen
- 11 T6, inwendige cyclische verhangen (grof zand/afwijkend mengsel)
- 12 T7, inwendige cyclische verhangen (wadzand/Füller-mengsel)
- 13 T9, zeefkrommen interne stabiliteit



FOTO'S

- 1 Inbouwen filterpakket
- 2 T3, wadzand/Füller-mengsel
- 3 T4, wadzand/afwijkend mengsel
- 4 Het "2 lagen-systeem" (T5 en T6)
- 5 Drukaansluitingen (T6 en T7)

BIJLAGE

Berekening van het cyclische horizontale kritieke verhang in granulaire filters

## STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

### STABILITEIT VAN GRANULAIRE FILTERS BIJ CYCLISCHE VERHANGEN EVENWIJDIG AAN HET GRENSVLAK

#### 1. Inleiding

In het kader van het onderzoek ten behoeve van de stormvloedkering in de Oosterschelde werd in de eerste helft van 1978 onderzoek verricht naar de stabiliteit van granulaire filters onder cyclische omstandigheden.

Cyclische omstandigheden zijn van groot belang voor de stormvloedkering ten gevolge van de aanwezigheid van golven, en met name ten gevolge van de hierdoor veroorzaakte bewegingen van de pijlers. Het korrelskelet van de fundatiematerialen wordt door deze bewegingen vervormd, hetgeen wateroverspanningen tot gevolg heeft.

De grootte van de te verwachten verhangen werd met behulp van berekeningen door het Laboratorium voor Grondmechanica bepaald.

Het onderhavige onderzoek had tot doel om de geschikte materialen te bepalen, teneinde bij de te verwachten verhangen stabiele granulaire filters te verkrijgen. Deze vraag was van praktische aard en bij de beantwoording daarvan ging het er in eerste instantie om te weten of cyclische verhangen een wezenlijke invloed hebben op de stabiliteit van granulaire filters bij horizontale stroming, en zo ja welke invloed.

Aangezien een dergelijk onderzoek voor het eerst werd uitgevoerd, zijn er naast het bovengenoemde tevens een aantal andere aspecten onderkend, waarop in het kader van dit onderzoek slechts beperkt kon worden ingegaan.

Het onderzoek is uitgevoerd in het Laboratorium De Voorst onder leiding van ir. A.F.F. de Graauw, projectingenieur van het Waterloopkundig Laboratorium. Hij heeft tevens dit verslag samengesteld.



## 2. Conclusies

Uit de resultaten van het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Vergelijking van de gemeten kritieke stationaire verhangen in een tweetal faciliteiten, t.w.: de Filterbak en de Golftunnel, toont aan dat onder de toegepaste omstandigheden de proeven in de Golftunnel vrij zijn geweest van modeeffecten (T1, T2, T4). Tevens bleek een periode van 20 s als kwasi-stationair te mogen worden beschouwd, wat betreft het kritieke verhang.
2. De volgende filterpakketten hadden een kritieke verhangamplitude groter dan 500% bij een periode van 10 s, en  $\bar{I} = 0\%$ :
  - wadzand/Füller-mengsel (T3)
  - wadzand/grof zand (T5)
  - grof zand/afwijkend mengsel (T6)De combinatie wadzand/afwijkend mengsel (T4) bleek een kritieke verhangamplitude van slechts ca. 35% te bezitten, bij een periode van 10 s, en  $\bar{I} = 0\%$ .
3. Er bleken verticale verhangen op het grensvlak te ontstaan door verschil in demping van de horizontale golfbeweging in het basis- en het filtermateriaal (T6 en T7). Van een faseverschil tussen de lokale drukken in beide materialen bleek nauwelijks sprake te zijn. Het was dus onmogelijk om in de gebruikte proefopstelling een zuiver horizontaal cyclisch verhang te bewerkstelligen.
4. Aangezien de opgetreden verticale verhangen (indien groter dan 100%) een nadelige invloed hebben op de stabiliteit van het basismateriaal bij horizontale stroming, kan worden gesteld dat de hierboven (punt 2) gegeven resultaten met betrekking tot zuiver horizontale kritieke verhangen pessimistisch zijn.
5. Asymmetrische golfbeweging bleek de stabiliteit van de materialen, in de te verwachten omstandigheden in het prototype, niet in gevaar te brengen (T8).

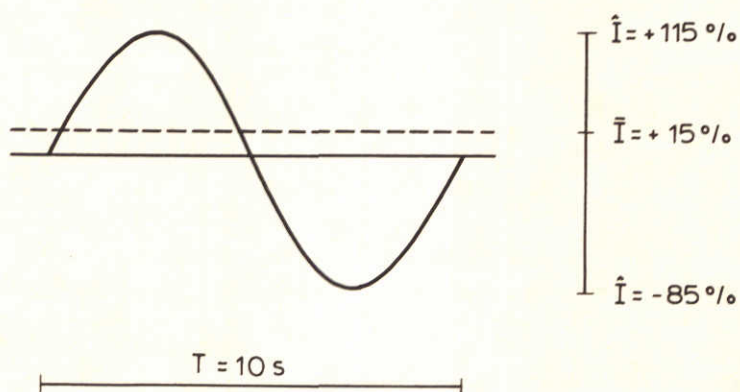
6. De interne stabiliteit van het Füller-mengsel is onder cyclische omstandigheden verzekerd tot een verhangamplitude groter dan 300% bij een periode van 10 s. Het uittreden van het materiaal uit een zone van ca. 0,05 m achter de roosters bleek snel met de tijd af te nemen (T9).
  
7. In de bijlage van dit verslag wordt een methode aangegeven voor het berekenen van cyclische horizontale kritieke verhangen in granulaire filters. Hieruit blijkt dat, bij de in dit onderzoek onderzochte materialen, de cyclische kritieke verhangamplitude gróter wordt dan het stationaire kritieke verhang bij perioden kleiner dan 1 s. De uitgevoerde proeven (periode > 2 s) zijn derhalve niet geschikt om deze berekeningsmethode te toetsen.

### 3. Opbouw van de drempel

In figuur 1 is een overzicht van de opbouw van de drempel van de stormvloedkering weergegeven. De drempel bestaat uit opeenvolgende lagen materiaal met naar boven toenemende korreldoorsnede. De verhouding tussen de korreldoorsneden van de materialen van 2 opeenvolgende lagen werd zodanig gekozen dat de grensvlakken onder de heersende omstandigheden stabiel waren. Als randvoorwaarde geldt hierbij het in de Oosterschelde aanwezige zand enerzijds, en het door de weigerende schuif-situatie bepaalde materiaal van de toplaag anderzijds.

Zoals in figuur 1 is te zien, wordt de pijler "op staal" op een fundatiebed bestaande uit zeegrind gefundeerd. Ten gevolge van de golfkrachten zal de pijler aan bewegingen onderhevig zijn, waardoor in de onderliggende lagen cyclische verhangen zullen ontstaan, met name in de omgeving van de rand van de pijlervoet aan Oosterscheldezijde. De berekeningen (door het Laboratorium voor Grondmechanica uitgevoerd) tonen aan dat de maximale horizontale cyclische verhangen op het grensvlak zand/fundatiebed tot ca. 100% kunnen oplopen. Uiteraard is deze waarde afhankelijk van de toegepaste materialen in de drempel. Deze waarde behoort in dit geval bij een "open drempel" met gegradeerd zeegrind als materiaal voor het fundatiebed.

Het hierbij optredende gemiddelde verhang is, volgens de berekeningen globaal gelijk aan 15%.





#### 4. Proefopstelling

De Golftunnel (zie figuur 2) bestaat in principe uit een langgerekte U-vormige buis met korte verticale benen, waarin het water wordt bewogen door middel van een zuiger, welke op zijn beurt wordt gestuurd door een electrohydraulisch servosysteem.

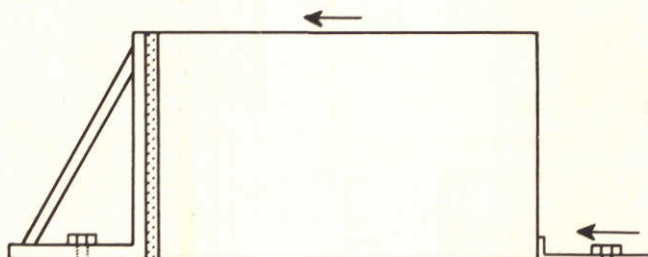
De zuiger beweegt in olie, teneinde lek langs de cylinderwand, en daarmee parasitaire debieten, te voorkomen. De olie geeft de zuigerverplaatsing door aan het water in de meetsectie; tussen de beide vloeistoffen is een rubber membraan aangebracht in een ketel met grote doorsnede.

De meetsectie, bestaande uit een stalen frame met ruiten, is toegankelijk door middel van luiken in het plafond. In deze luiken zijn kogelscharnieren aangebracht voor het doorvoeren van meetinstrumenten (zandconcentratiemeter; micromolen). Ook door de ruiten kan worden gemeten, zowel de zandconcentraties (fotografie) als de stroomsnelheden (laser-dopplerapparatuur). In de meetsectie kan een zandbodem worden geïnstalleerd; ter weerszijden daarvan zijn trechtervormige zandvangen aangebracht.

De gehele tunnel werkt onder verhoogde druk om cavitatie te voorkomen en de ruiten te beveiligen.

Het te onderzoeken filterpakket werd in een speciaal hiervoor ontworpen bak ingebouwd (figuur 3). De zijwanden van deze bak bestonden uit perspex, en de voor- en achterkant uit roosters. Het basismateriaal werd gesteund door een waterdoorlatend vlies en het filtermateriaal door gaas met maaswijdte 1 mm.

Voor iedere proef werd de bak gevuld met de gewenste materialen en in de Golftunnel gehesen. De bak werd vervolgens in de Golftunnel met behulp van steunen bevestigd:



De bak werd tegen de linker steun geschoven, zodanig dat een rubber afdichting samengeperst werd, waarna de steun aan de rechter zijde kon worden vastgezet.

Aan de rechterzijde was de afdichting op de bak gemonteerd en kon met behulp van vleugelmoeren tegen de wand van de Golftunnel worden gedrukt.



## 5. Uitvoering van de proeven

Nadat de bak met het filterpakket in de Golftunnel was ingebouwd en de Golf-tunnel met water was gevuld, kon met de uitvoering van de proef worden gestart.

In de eerste 2 proeven, waarbij filtermateriaal werd gebruikt dat reeds eerder in de Filterbak was onderzocht, werd allereerst het stationaire kritieke verhang bepaald. Het instellen van een stationair verhang over het filterpakket vond in de Golftunnel plaats door het laten terugstromen van het water van (13) naar (4) (figuur 2). Dit was echter om modeltechnische redenen een zeer tijdrovende zaak, zodat in latere proeven werd volstaan met een kwasi-stationair verhang met een periode van 20 s.

Het bepalen van het begin van beweging (c.q. uittreden van het basismateriaal door het filtermateriaal en het rooster) vond visueel plaats. Wegens tijdgebrek moest een poging om het begin van beweging vast te stellen met behulp van een concentratiemeter worden gestaakt.

Zowel de amplitude als de periode van het cyclische verhang waren elektronisch in te stellen. Bij iedere proef werd bij een aantal perioden (2, 4, 6, 8, 10 en 15 s) de kritieke amplitude van het verhang bepaald.

Tijdens de proeven bleek dat het filtermateriaal een sterke neiging tot verdichting vertoonde ten gevolge van de cyclische omstandigheden. Hierdoor nam het kritieke verhang toe. Tevens bleek dat de grootste verdichting bij de kleinste periode optrad. Er werd derhalve besloten om alle perioden 2 maal achtereenvolgens in te stellen: eerst van grote naar kleine periode, en dan andersom. Dit had tot doel om de invloed na te gaan van de "hydraulische verdichting" op het kritieke verhang enerzijds, en anderzijds het bepalen van het kritieke verhang voor diverse perioden bij een constante verdichting.

Door het bepalen van het (kwasi-)stationaire kritieke verhang voor en na de tweede serie perioden kon worden nagegaan of er inderdaad geen extra "hydraulische" verdichting was opgetreden.

Een aantal drukaansluitingen werd in het filterpakket aangebracht, teneinde het drukverloop in het materiaal te bepalen. Er werden 4 drukaansluitingen aangebracht met hun opening op 0,01 m boven het grensvlak en 2 drukaansluitingen met hun opening op 0,04 m onder het grensvlak. De lagere ligging van beide laatsten was bedoeld om rekening te houden met een eventuele verlaging van het grensvlak ten gevolge van uitschuring en verdichting tijdens de proef.



De drukaansluitingen konden tijdens de proef per paar aan een differentiaal-drukdoos worden gekoppeld. Hierdoor zijn dus geen drukken, maar drukverschillen gemeten. Deze meetmethode is gekozen in verband met de veel grotere nauwkeurigheid van de verhangmeting.

Tenslotte wordt vermeld dat alle proeven, op één na (T8), werden uitgevoerd met een sinusvormig verloop van het verhang met een gemiddeld verhang  $\bar{I} = 0\%$ .

## 6. Uitgevoerde proeven

Er zijn totaal 9 proeven in de Golftunnel uitgevoerd. De eerste 2 proeven (T1 en T2) waren bedoeld als toetsing van de proefopstelling in de Golftunnel ten opzichte van de Filterbak. De kritieke verhangen van diverse filtermaterialen werden bepaald in de proeven T3 t/m T6. In T6 en T7 werden tevens de inwendige verhangen gemeten met behulp van de ingebouwde drukaansluitingen. Eén proef (T8) werd uitgevoerd met een asymmetrische golfbeweging ( $\bar{I} \neq 0\%$ ), en de laatste proef (T9) had betrekking op de interne stabiliteit van één van de filtermaterialen.

Alle proeven, behalve T6 en T8, zijn uitgevoerd met wadzand met  $D_{50} = 150 \mu\text{m}$  als basismateriaal. Bij de proeven T6 en T8 bestond het basismateriaal uit grof zand met  $D_{50} = 550 \mu\text{m}$  (figuur 4).

### 6.1 Vergelijking met de Filterbak (T1 en T2)

De zeefkrommen van de filtermaterialen zijn in figuur 5 weergegeven en komen overeen met het filtermateriaal van de proeven T8 en T4 in de Filterbak (zie verslag modelonderzoek M 1488-I).

Aangezien de uitgetreden hoeveelheden basismateriaal niet konden worden gemeten, moest het begin van beweging dus visueel worden waargenomen. Deze proeven waren daarom van groot belang voor het "ijken" van deze waarnemingen op de resultaten van de Filterbak. Het bleek dat het in de Filterbak gevonden stationaire kritieke verhang overeenkwam met het kleinst zichtbare transport in de Golftunnel. Deze goede overeenstemming toonde aan dat hier geen sprake was van modeeffecten. In de figuren 6 en 7 is de vergelijking tussen de resultaten in de Golftunnel en in de Filterbak weergegeven voor de stationaire situatie ( $T = \infty$ ).

In de figuren 6 en 7 zijn tevens de resultaten van de cyclische proeven weergegeven. Bij proef T1 werden de kritieke verhangen slechts bij afnemende perioden bepaald. De toename van het kritieke verhang bij afnemende periode werd toegeschreven aan de reeds genoemde hydraulische verdichting van het filtermateriaal. In proef T2 werden tevens de kritieke verhangen bepaald bij toenemende perioden (figuur 7). Hieruit bleek dat de kritieke verhangen nagenoeg onafhankelijk werden van de ingestelde periode. Tevens bleek dat de kritieke verhangen bij een periode  $T = 20 \text{ s}$  nagenoeg gelijk waren aan de stationaire



kritieke verhangen. In de volgende proeven werd hiervan dankbaar gebruik gemaakt.

## 6.2 Kritieke verhangen fundatiebed (T3, T4 en T5)

In proef T3 werd voor het filtermateriaal uitgegaan van het zogenaamd "Füller-mengsel" (0,3 - 32 mm, figuur 8). Voor de achtergronden van deze keuze wordt verwezen naar paragraaf 8.1 van het verslag modelonderzoek M 1488-I. Dit materiaal heeft de eigenschap een lage porositeit te bezitten, omdat de poriën van de grove fracties optimaal worden opgevuld door fijnere korrels. Dit heeft tot gevolg dat het materiaal onder stationaire omstandigheden intern zeer stabiel is en een groot kritiek verhang bezit (zie paragraaf 8.3 van het verslag M 1488-I).

Bij proef T3 bleken de kritieke verhangen zeer groot te zijn, en vielen daarvoor buiten het bereikbare gebied van de proefopstelling:

T (s)	20	15	10	8	6	4	2
$\hat{I}_{cr}$ (%)	>190	>260	>500	>500	>500	>500	-

Tabel 1 T3, resultaten proef(wadzand/Füller-mengsel)

Zeer opvallend bij deze proef was echter het optreden van verticale zandin-dringing in het filtermateriaal (foto 2), hetgeen alleen tot stand kon komen door de aanwezigheid van verticale verhangen, waarvan het ontstaan moest worden gezocht in het grote verschil in doorlatendheid tussen het basis- en het filtermateriaal. Hierop zal nader worden ingegaan in paragraaf 6.3.

Voorts bleek dat tijdens deze proef, evenals bij T1 en T2, weer hydraulische verdichting was opgetreden. Ditmaal trad langs de wand ontmenging van het Füller-mengsel op (foto 2). Door monsternamen bleek echter dat in het inwendige van het filterpakket deze ontmenging nauwelijks optrad (figuur 8). De zichtbare ontmenging op foto 2 moet dus worden toegeschreven aan wandeffecten.

Omdat het sterk gegradeerde Füller-mengsel gevoelig is voor ontmenging tijdens storten werd tevens een proef (T4) uitgevoerd met het zogenaamde "afwijkende mengsel" (1 - 32 mm, figuur 9). De kritieke verhangen zijn in figuur 10 weer-gegeven. Wegens een storing aan de Golftunnel kon de proef niet volledig worden afgewerkt. De orde van grootte van de bereikte kritieke verhangen toont



echter wel aan dat dit afwijkende mengsel een sterk nadelige invloed op de stabiliteit van het wadzand heeft. Dit afwijkende mengsel werd tevens in de Filterbak onderzocht (paragraaf 8.3 in het verslag M 1488-I), waaruit bleek dat het stationaire kritieke verhang weer goed overeenkwam met het kwasi-stationaire kritieke verhang bij  $T = 20$  s in de Golftunnel.

Tijdens het onderzoek naar het Füller-mengsel bij cyclische vertikale verhangen was gebleken dat de stabiliteit van het wadzand bij de optredende verhangen in het prototype niet verzekerd was. Dit was de aanleiding tot het invoeren van een extra laag grof zand met  $D_{50} = 550 \mu\text{m}$  (figuur 4) tussen het wadzand en het Füller-mengsel.

In de proeven T5 en T6 werden respectievelijk de grensvlakken wadzand/grof zand en grof zand/afwijkend mengsel ingebouwd (foto 4). In beide gevallen bleken de kritieke verhangen zeer groot te zijn:

T (s)	20	15	10	8	6	4	2
$\hat{I}_{cr}$ (%)	>270	>500	>500	>500	-	-	-

Tabel 2 T5, resultaten proef (wadzand/grof zand)

T (s)	20	15	10	8	6	4	2
$\hat{I}_{cr}$ (%)	>180	>290	>500	>500	>500	>500	>500

Tabel 3 T6, resultaten proef (grof zand/afwijkend mengsel)

### 6.3 Inwendige verhangen (T6 en T7)

Zoals reeds bij proef T3 werd opgemerkt, bleken verticale verhangen op het grensvlak aanwezig te zijn. Er werden derhalve drukaansluitingen in de materialen geplaatst (figuur 3) om de lokale drukverschillen te meten. Deze metingen werden verricht in de bovengenoemde proef T6 en in een herhaling van proef T3 (T7).

In de figuren 11 en 12 zijn de resultaten van deze metingen weergegeven. Uit de bovenste figuur blijkt dat het verhang niet constant over de lengte van het grensvlak is, hetgeen aantoont dat het drukverloop in het filterpakket

niet lineair is. Zoals bekend worden cyclische drukken in een poreus medium gedempt (exponentiële demping); het ligt daarom voor de hand dat de drukken en de lokale verhangen aan de zuigerkant het grootst waren. In de middelste figuur is te zien dat het verhang in het filtermateriaal groter is dan in het basismateriaal. Dit kan in principe door het verschil in demping in beide materialen worden verklaard. De onderste figuur toont de gemeten verticale verhangen over het grensvlak. Hieruit blijkt dat het verticale verhang toeneemt met de afstand vanaf de zuigerkant van het filterpakket. Ook dit is weer te verklaren uit het verschil in demping tussen beide materialen: in het fijnere basismateriaal neemt de druk sneller af als functie van de afstand, zodat het verticale drukverschil (en dus het verticale verhang) toeneemt. Hierbij kan nog worden vermeld dat uit eveneens uitgevoerde simultane drukmetingen blijkt dat er nauwelijks sprake is van faseverschillen tussen de drukken in beide materialen, zodat het ontstaan van verticale verhangen uitsluitend te wijten is aan amplitude-verschillen tussen de drukken in beide materialen.

Tenslotte dient te worden vermeld dat de mate van demping van cyclische drukken in poreuze media sterk afhankelijk is van de materiaaleigenschappen (samen-drukbaarheid van het korrelskelet en van het water), waarbij de aanwezigheid van lucht in het filterpakket van maatgevend belang kan zijn. Dit laatste zou een oorzaak kunnen zijn van belangrijke verschillen tussen model en prototype: in het model was het luchtgehalte vermoedelijk groter dan dit in het prototype het geval zal zijn. Hierdoor is de demping in het model groter, evenals de optredende verticale verhangen.

Uit deze drukmetingen kan dus worden geconcludeerd dat het in de proefopstelling in de Golftunnel onmogelijk was om een zuiver horizontaal cyclisch verhang in te stellen.

Aangezien de opgetreden verticale verhangen (indien groter dan 100%) ongetwijfeld een nadelige invloed hebben gehad op de (zuiver) horizontale kritieke verhangen, zijn de resultaten van dit onderzoek, voor zover betreft de zuiver horizontale kritieke verhangen, dus als pessimistisch ten opzichte van het prototype te kenmerken.

#### 6.4 Asymmetrische golfbeweging (T8)

Alle tot hier beschreven proeven werden uitgevoerd met een gemiddeld verhang



$\bar{I} = 0\%$ , dat wil zeggen dat er geen netto debiet door het filterpakket stroomde.

Deze situatie komt niet geheel overeen met de situatie in het prototype, waar een gemiddeld verhang  $\bar{I} = 15\%$  wordt verwacht (paragraaf 3).

Ten tijde van de uitvoering van de proeven in de Golftunnel was het niet mogelijk een netto debiet via een omloopleiding terug te voeren naar de zuigerkant van het filterpakket.

De beweging van de zuiger werd daarom zodanig geprogrammeerd dat het netto debiet om de 4 perioden dóór het filterpakket (met zeer lage stroomsnelheid) werd teruggevoerd.

Wegens tijdgebrek konden in deze proef (T8) slechts een beperkt aantal combinaties van  $\bar{I}$ ,  $\hat{I}$  en T worden ingesteld. In geen van deze gevallen werd transport waargenomen.

T (s)	15	10	8	6	4	2
$\bar{I}$ (%)	10	35	55	95	125	180
$\hat{I}_{cr}$ (%)	>85	>165	>245	>415	>465	>680

Tabel 4 T8, resultaten proef (grof zand/afwijkend mengsel)

In deze gevallen was  $\bar{I}$  globaal gelijk aan  $1/4$  van de grootste gemeten  $\hat{I}$ , terwijl deze faktor in het prototype slechts ca.  $1/8$  zal bedragen. De belastings-toestand tijdens de proef was hierdoor ongunstiger dan in het prototype verwacht kan worden. Hieruit kan worden geconcludeerd dat bij een asymmetrische golfbeweging de onderzochte materialen stabiel zullen blijven bij de in het prototype te verwachten omstandigheden.

#### 6.5 Interne stabiliteit fundatiebed (T9)

Een laatste proef (T9) werd uitgevoerd teneinde de interne stabiliteit van het Füller-mengsel (0,3 - 32 mm) onder cyclische omstandigheden na te gaan. Hierbij werd het gaas met maaswijdte 1 mm op de beide kopzijden van de bak verwijderd, waardoor slechts een rooster met maaswijdte 5 mm overbleef.



Het verhang werd stapsgewijs (met stappen van 50%) opgevoerd tot 300%. De periode bedroeg steeds 10 s. Na iedere stap werd zolang gestroomd totdat er geen materiaal meer door de roosters uittrad (ca. 1/4 uur), en bij het verhang  $\hat{I} = 300\%$  werd 1 uur lang gestroomd.

Het bleek dat na iedere verhoging van het verhang enig transport optrad dat echter snel tot nul afnam. Het uitgetreden materiaal bleek uit een zone van ca. 0,05 m achter de roosters afkomstig te zijn, en kan worden bestempeld als een randeffect. Ter illustratie zijn in figuur 13 de zeefkrommen weergegeven van verschillende monsters.



OOSTERSCHELDEZIJDE

N.A.P.

11.50

ZEEZIJDE

diepe delen van het sluitgat

1:4

1:4

- ⑧ stortsteen 1/3 ton
- ⑨ stortsteen 6/10 ton 3.30 dik
- ⑩ bovëndorpel (schematisch)
- ⑪ pijler
- ⑫ schuif (schematisch)
- ⑬ onderdorpel (schematisch)

N.A.P.

- ① zand 0.3 / 1 à 2 mm 150 m dik
- ② gegraadeerd zeegrind 0.3 / 30 mm 150 m dik
- ③ afdeeklaag steen 2/200 mm 0.5 m dik
- ④ uitvullaag steen 50/200 mm 2.00 m dik
- ⑤ fosforslakken dik variabel
- ⑥ stortsteen 10/60 dik variabel
- ⑦ stortsteen 60/300 kg. 120 m dik

ondiepe delen van het sluitgat

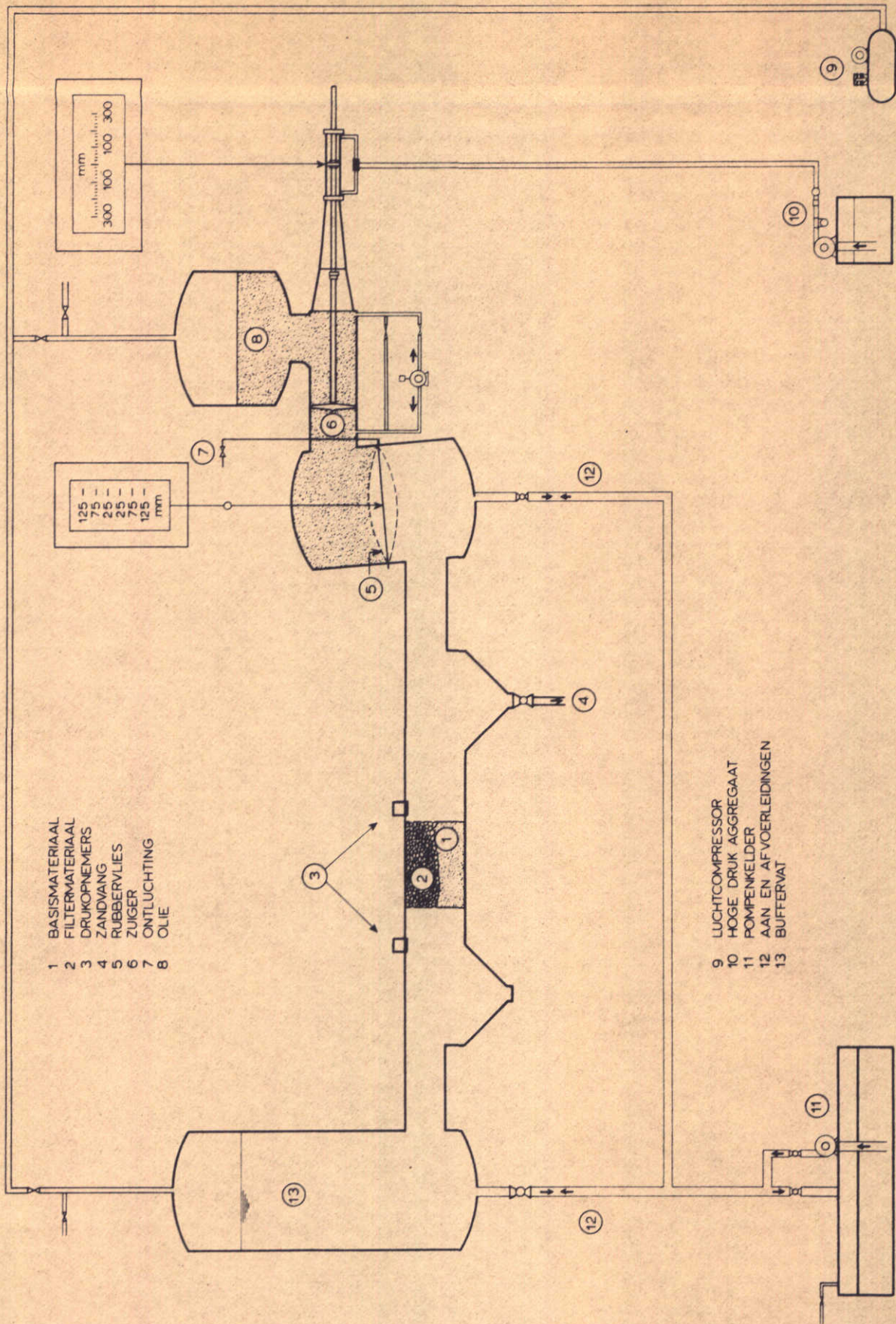
1:7

1:7

50 m

# OPBOUW VAN DE DREMPEL





- 1 BASISMATERIAAL
- 2 FILTERMATERIAAL
- 3 DRUKOPNEMERS
- 4 ZANDVANG
- 5 RUBBERVLIES
- 6 ZUIGER
- 7 ONTLUCHTING
- 8 OLIE

- 9 LICHTCOMPRESSOR
- 10 HOGE DRUK AGGREGAAT
- 11 POMPFENKELDER
- 12 AAN EN AFVOERLEIDINGEN
- 13 BUFFERVAT

hoogte	mm
300	
100	
100	
300	

diameter	mm
125	
75	
25	
25	
75	
125	

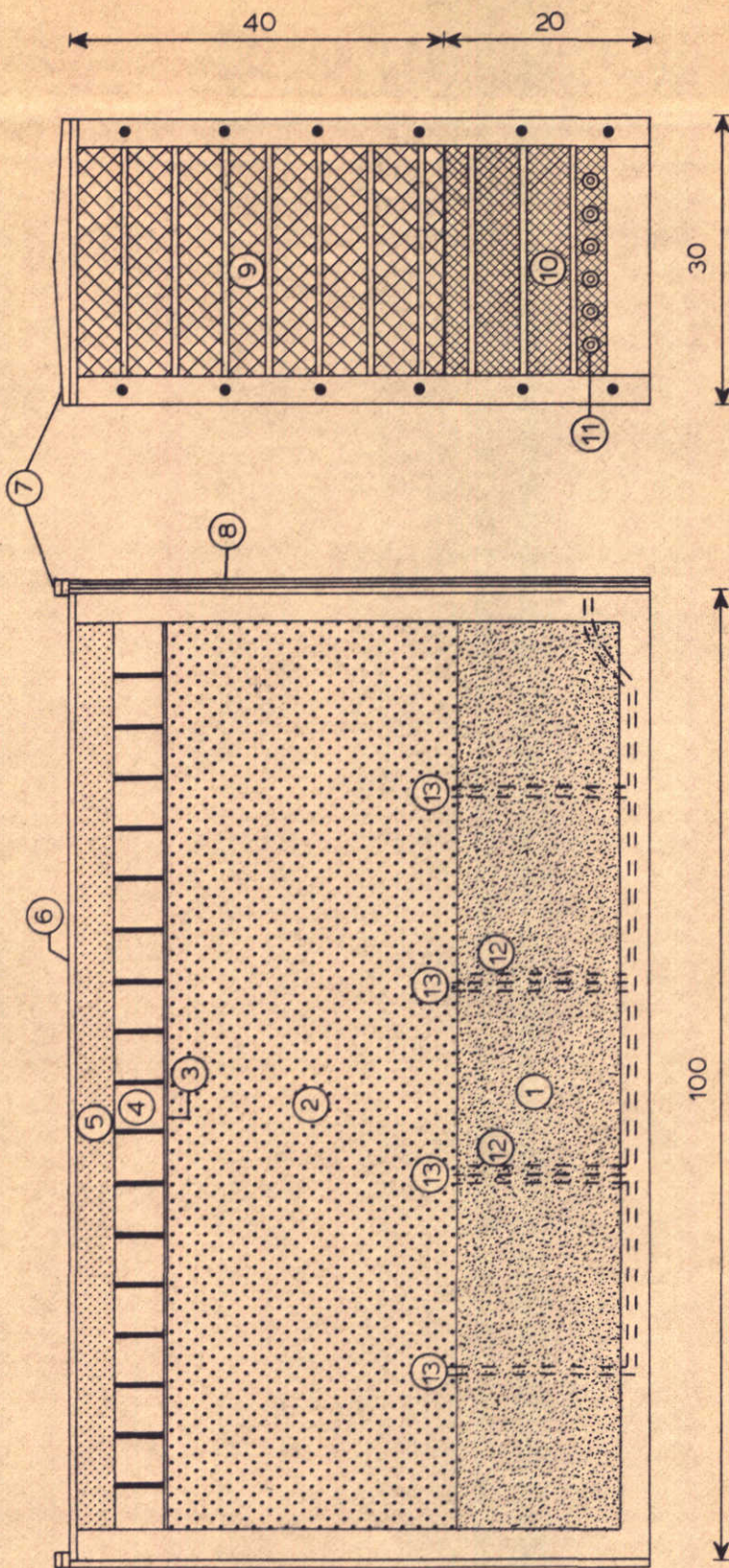
PROEFOPSTELLING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 2





- |   |                   |    |                                 |
|---|-------------------|----|---------------------------------|
| 1 | basismateriaal    | 8  | rubber afdichting               |
| 2 | filtermateriaal   | 9  | gaas                            |
| 3 | flexibele plaat   | 10 | zanddicht vliës                 |
| 4 | lood              | 11 | aansluiting stijgbuisjes        |
| 5 | schuimplastic     | 12 | stijgbuisjes in basismateriaal  |
| 6 | deksel            | 13 | stijgbuisjes in filtermateriaal |
| 7 | rubber afdichting |    |                                 |

maten in cm.

INBOUW FILTERPAKKET

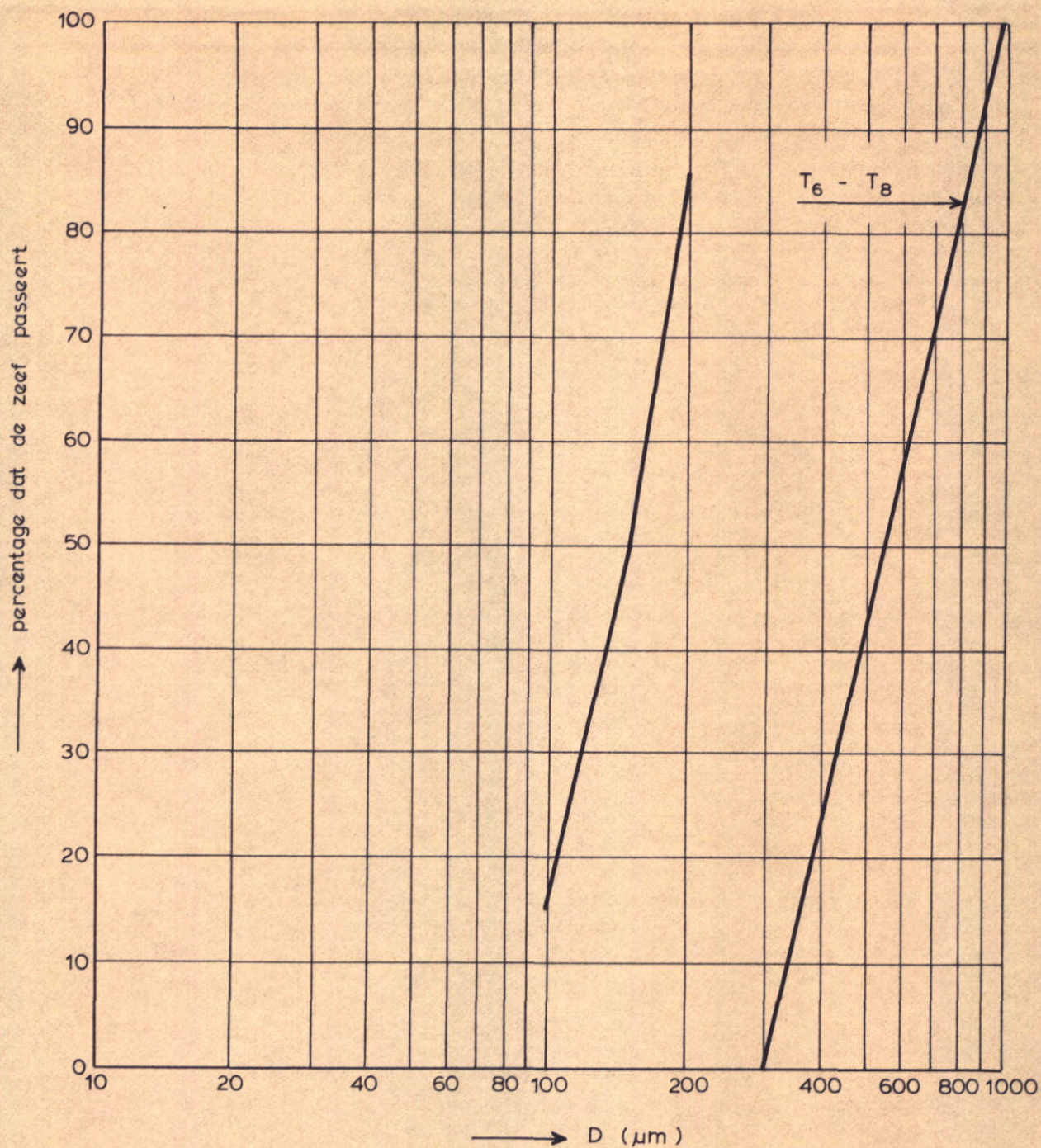
SCHAAL 1:75

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 3





ZEEFKROMMEN WADZAND EN GROF ZAND

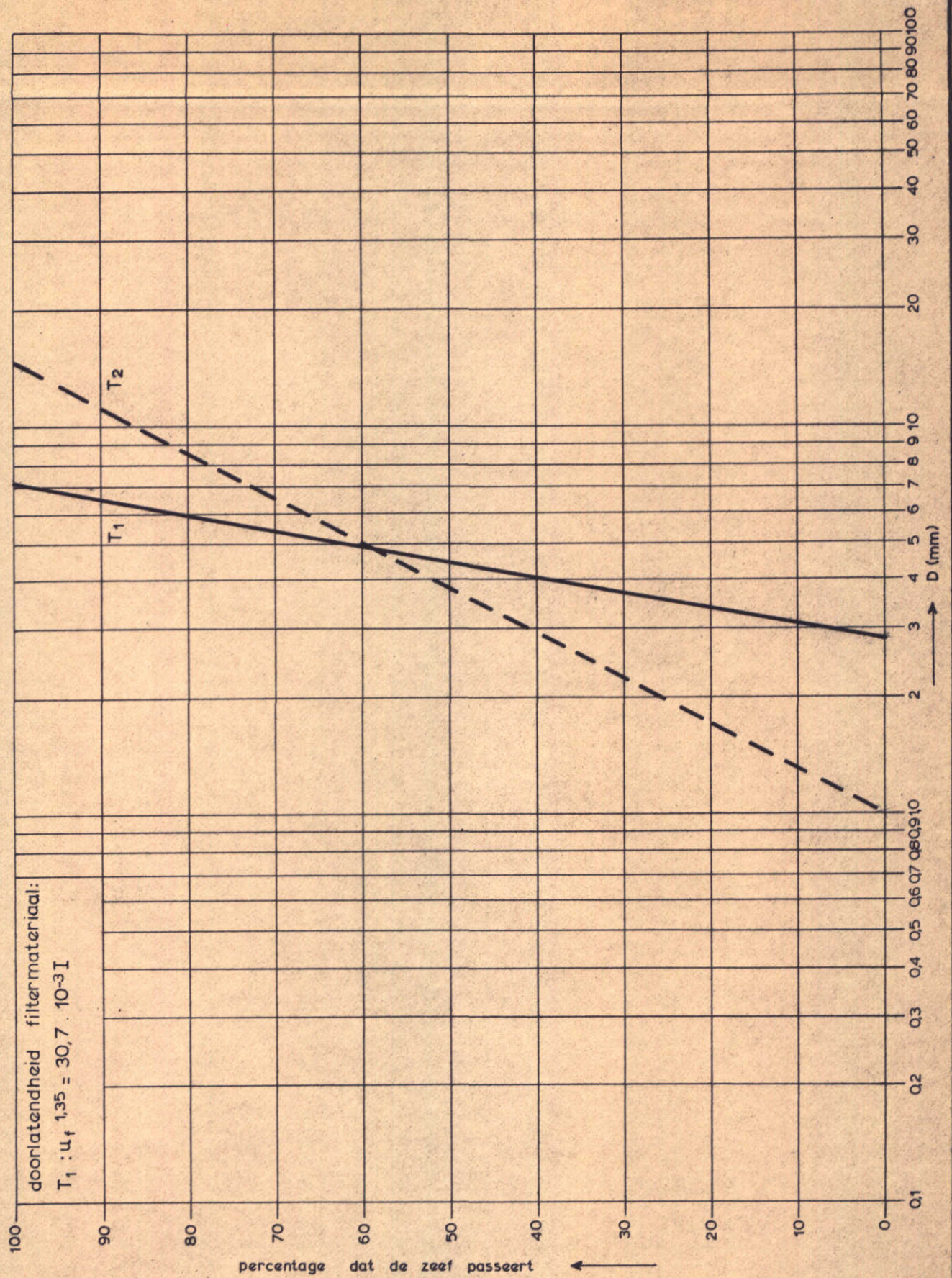
GOLFTUNNEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 4





ZEEFKROMMEN FILTERMATERIAAL

GOLFTUNNEL

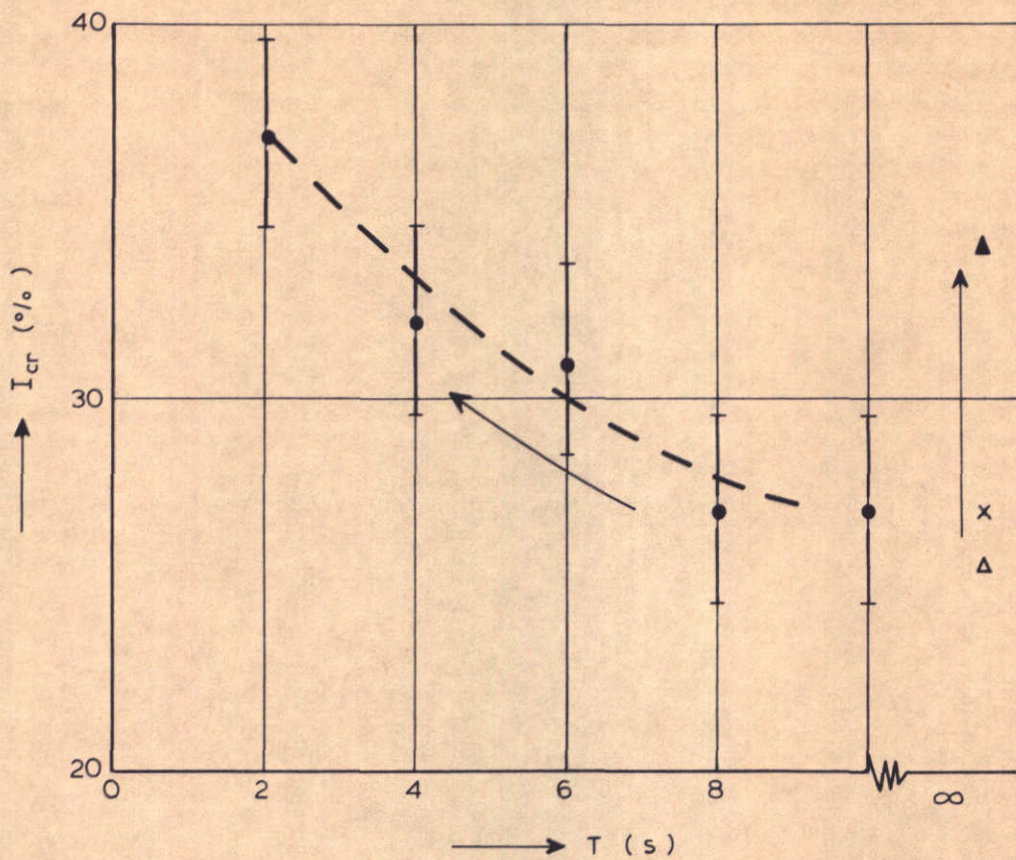
T1 - T2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

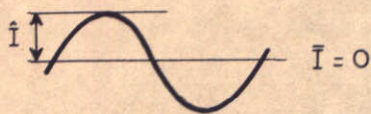
FIG. 5





stationair (  $T = \infty$  ) :

- x Filterbak
- Δ voor proef T1
- ▲ na proef T1



CYCLISCHE HORIZONTALE KRITIEKE VERHANGEN

( vergelijking Filterbak / Golftunnel )

GOLFTUNNEL

T1

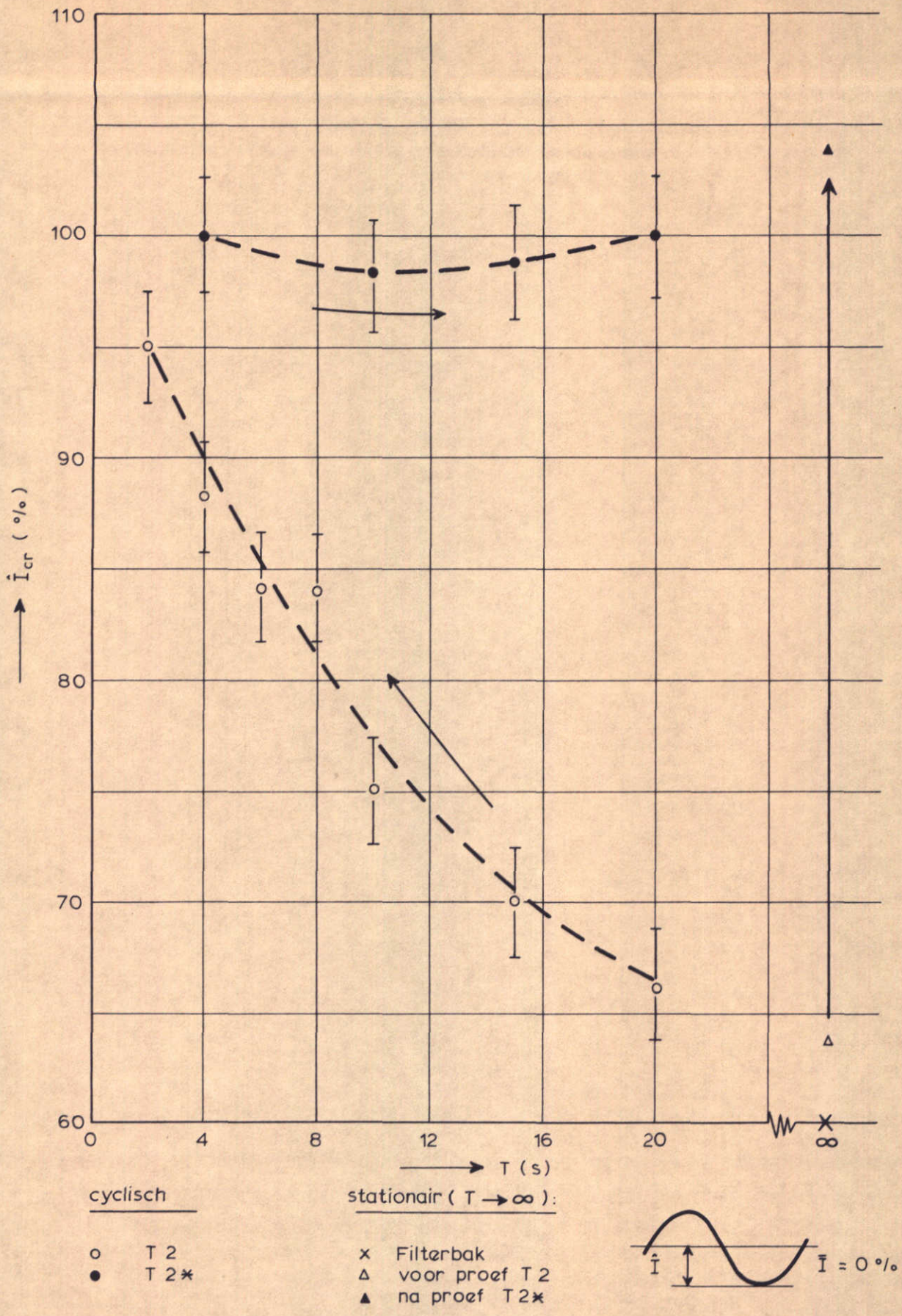
$D_{50b} = 150 \mu\text{m}$   
 $D_{50f} = 4,5 \text{ mm}$   $p = 2,5$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 6





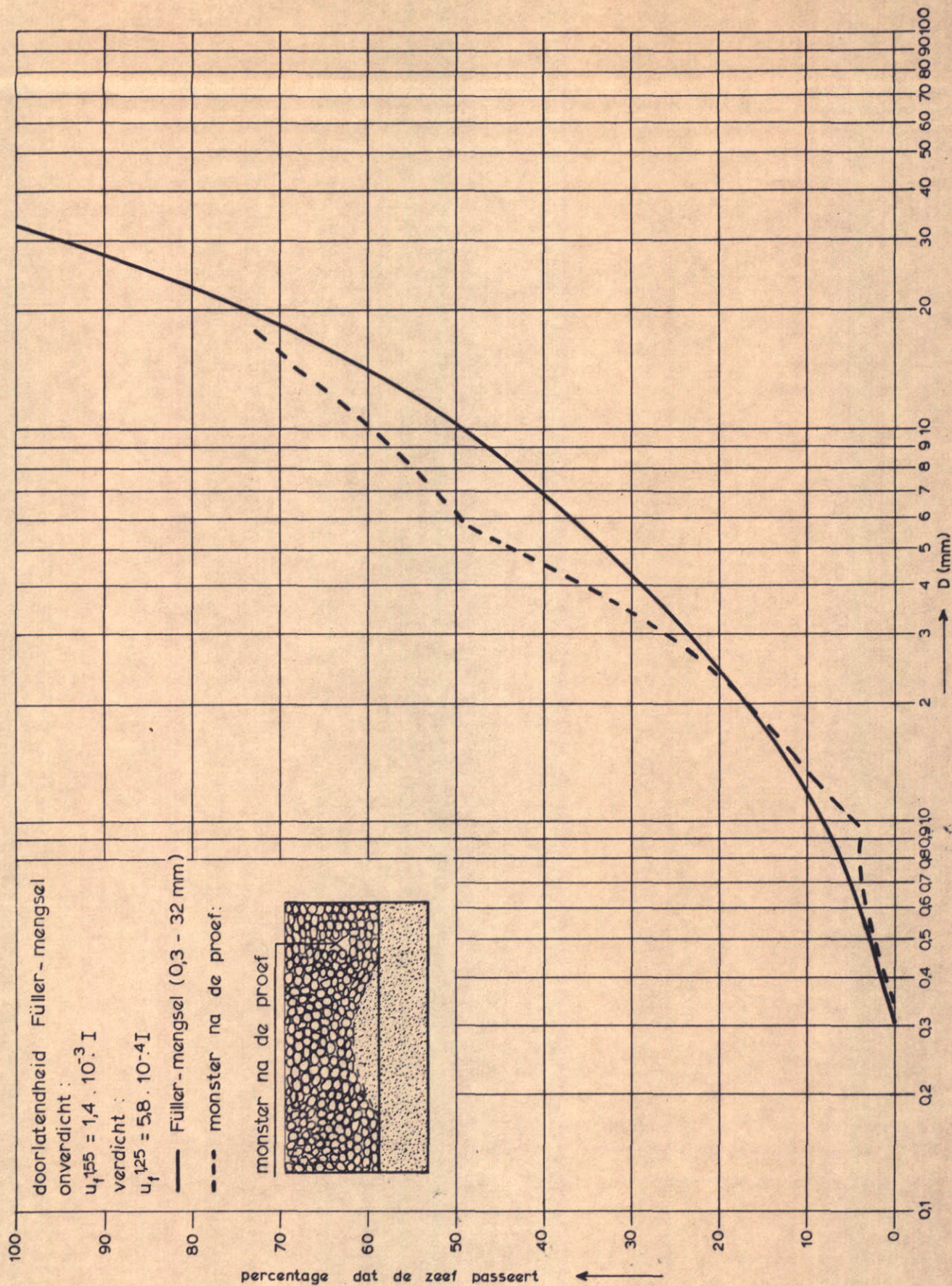
CYCLISCHE HORIZONTALE KRITIEKE VERHANGEN  
 (vergelijking Filterbak / Golftunnel)

GOLFTUNNEL	T2
$D_{50b} = 150 \mu m$	
$D_{50f} = 38 mm$	$p = 8$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544	FIG. 7
--------	--------





ZEEFKROMMEN FÜLLER - MENGSEL

GOLFTUNNEL

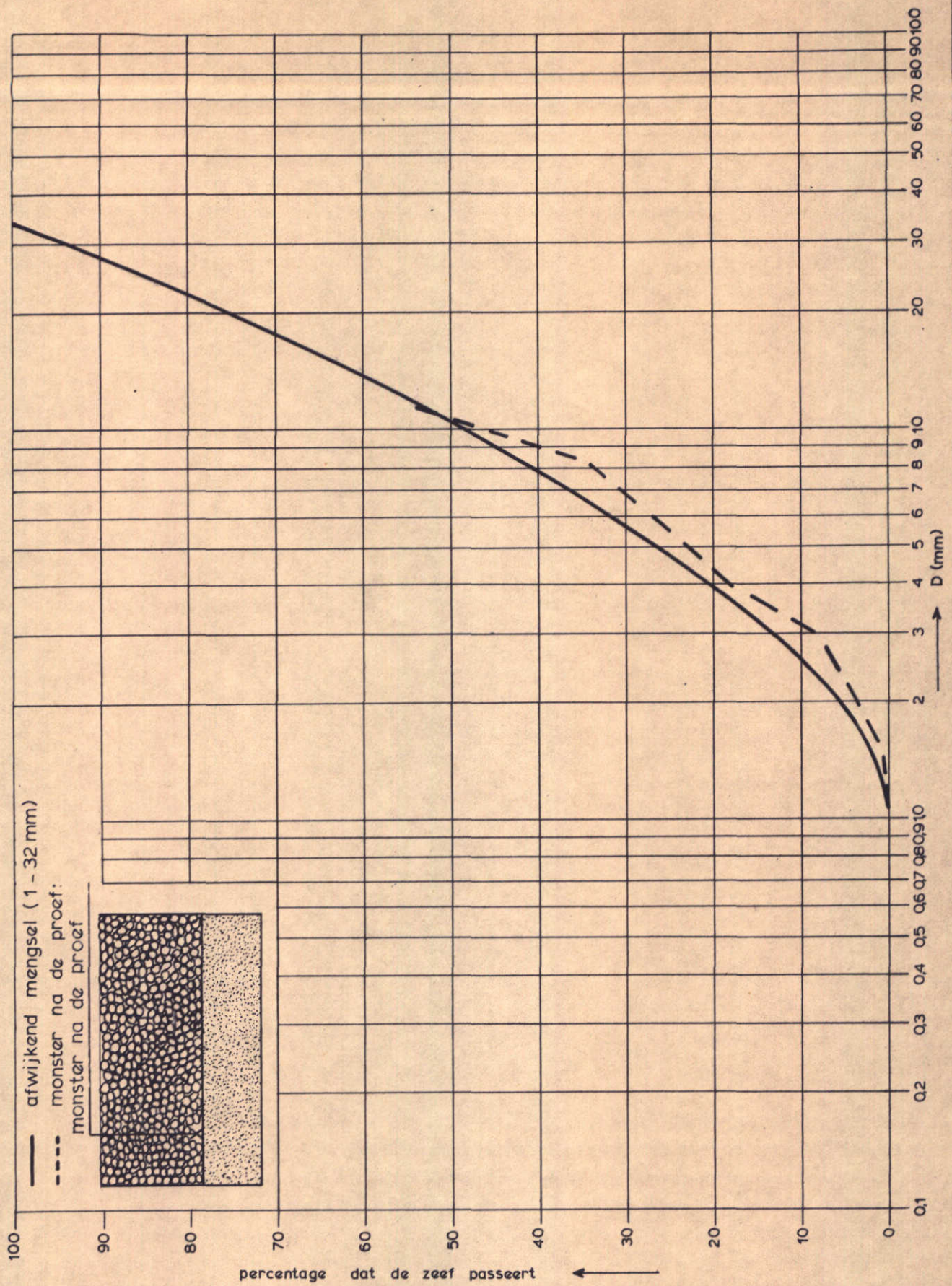
T 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 8





ZEEFKROMMEN AFWIJKEND MENGSEL

GOLFTUNNEL

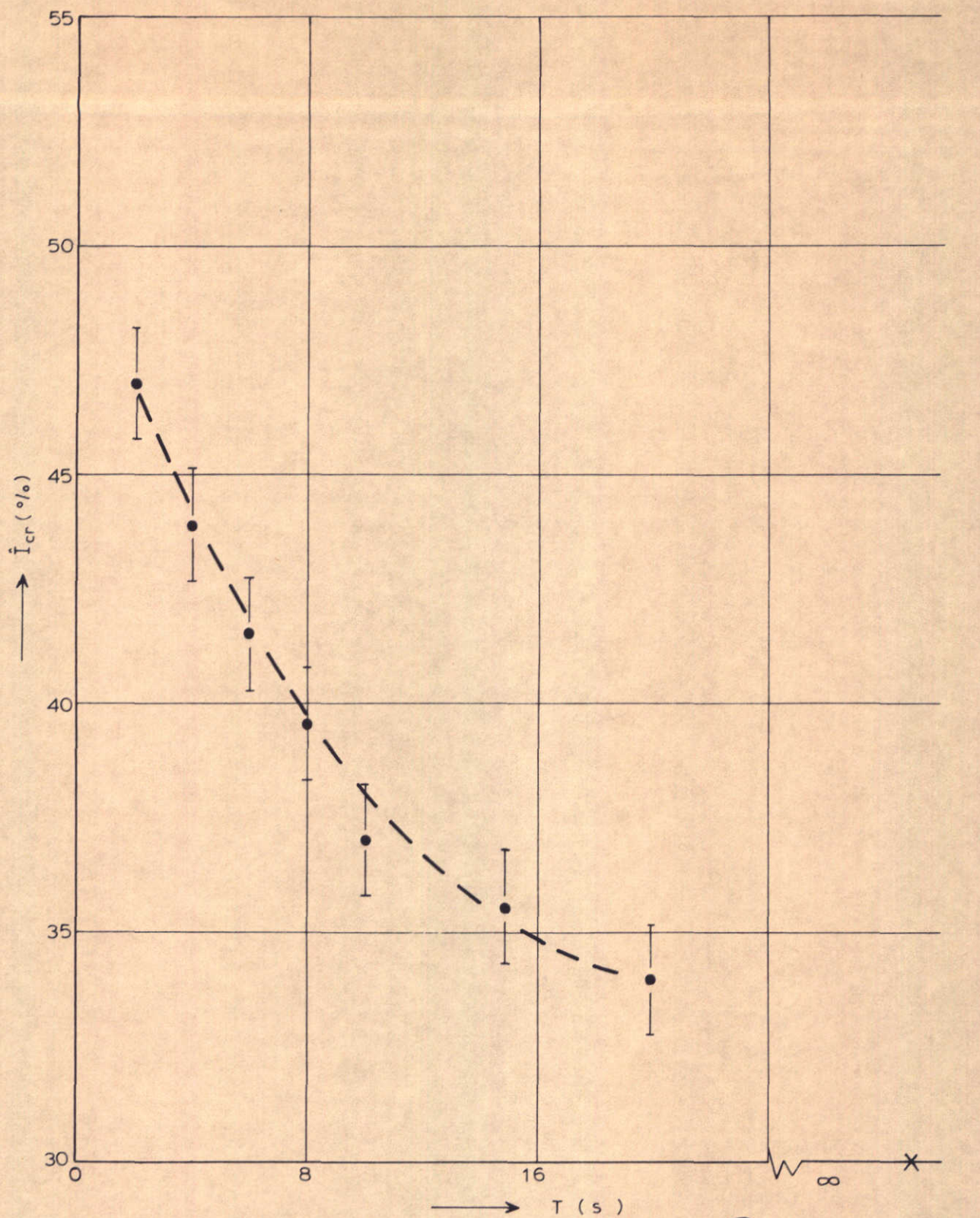
T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

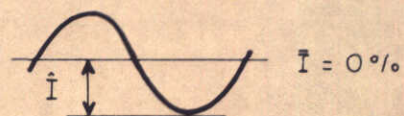
M 1544

FIG. 9





x Filterbak (stationair)



CYCLISCHE HORIZONTALE KRITIEKE VERHANGEN  
( wadzand / afwijkend mengsel )

GOLFTUNNEL

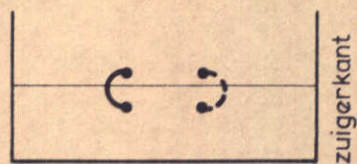
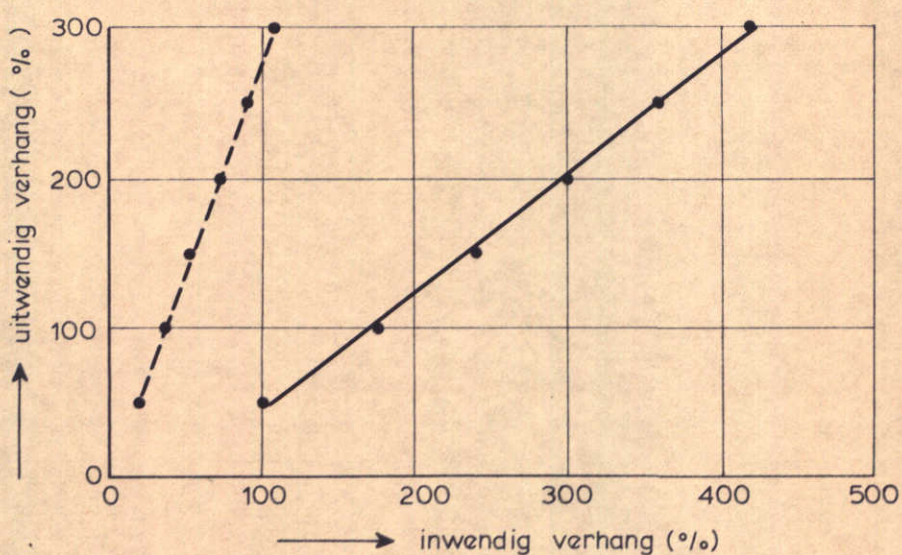
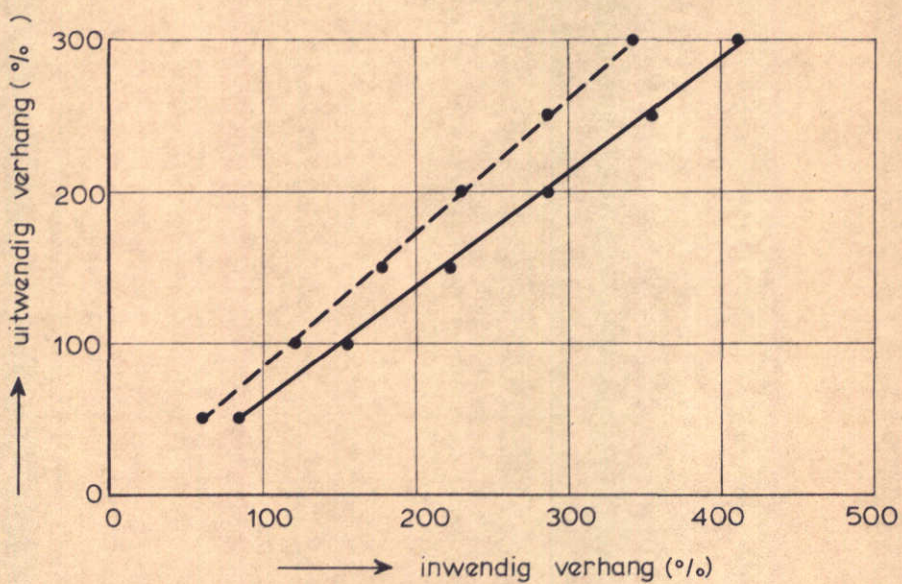
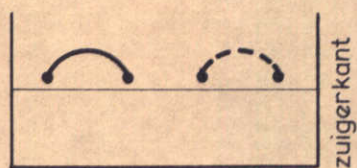
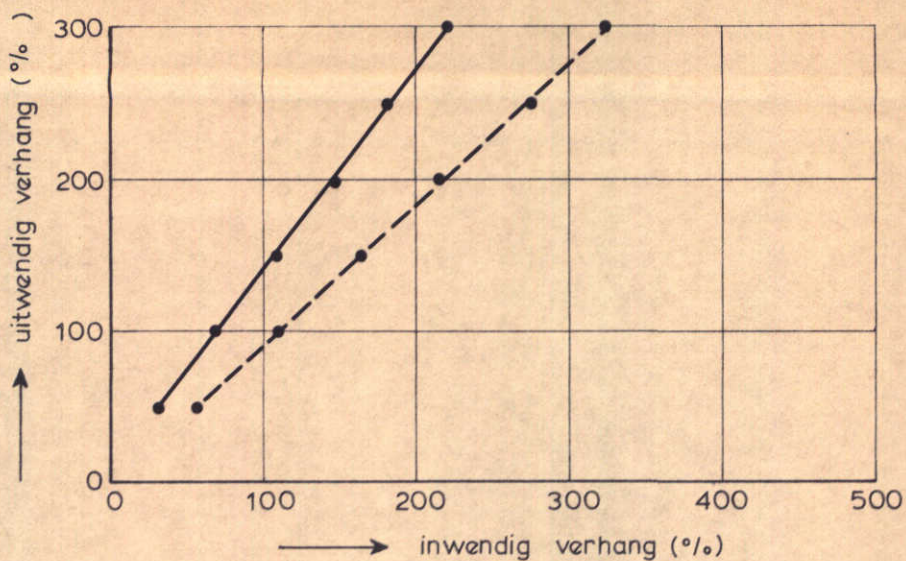
T4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 10





INWENDIGE CYCLISCHE VERHANGEN  
( grof zand / afwijkend mengsel )

GOLFTUNNEL

T6

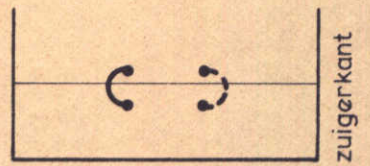
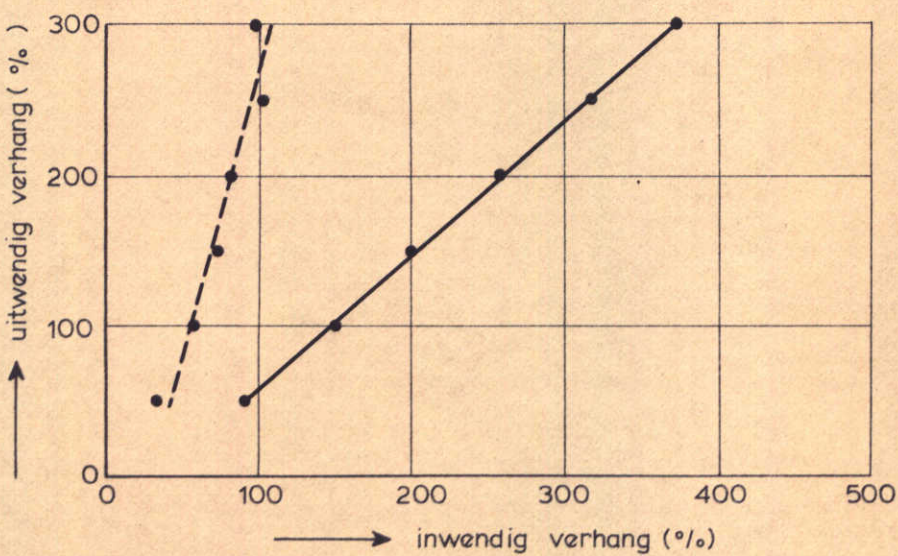
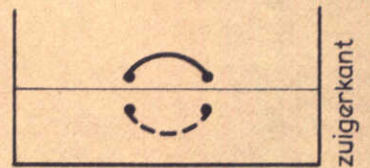
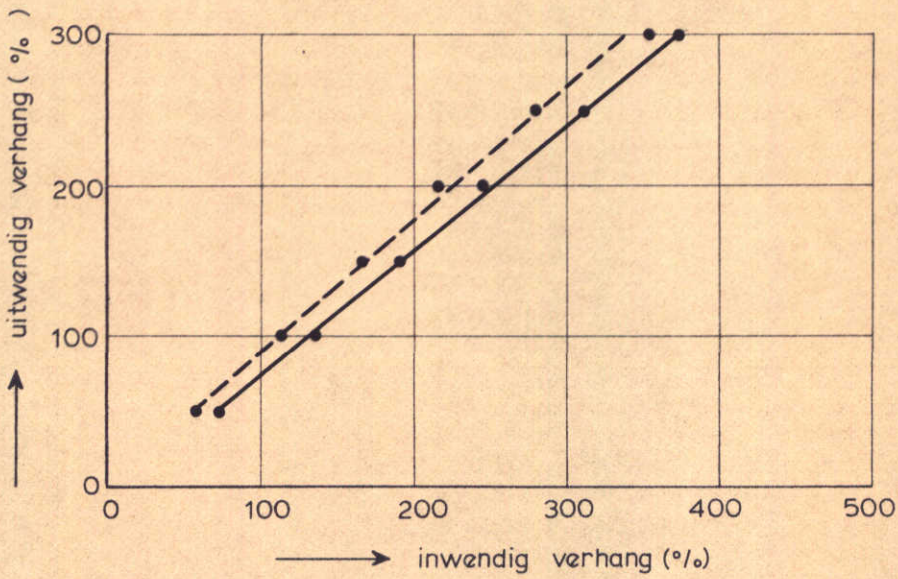
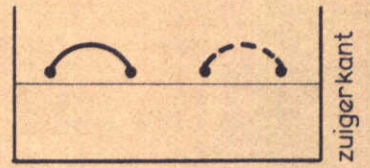
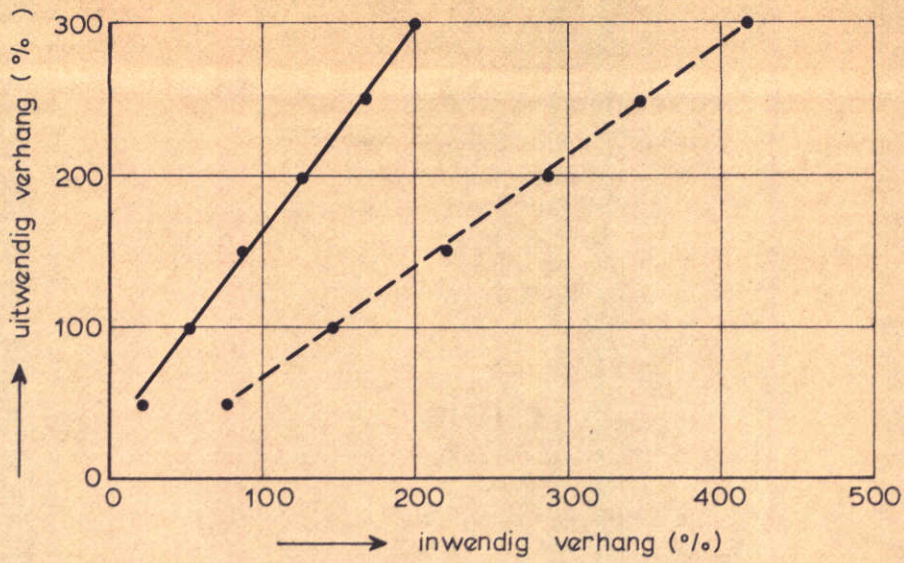
T = 10 s

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 11





INWENDIGE CYCLISCHE VERHANGEN  
( wadzand / Füller mengsel )

GOLFTUNNEL

T 7

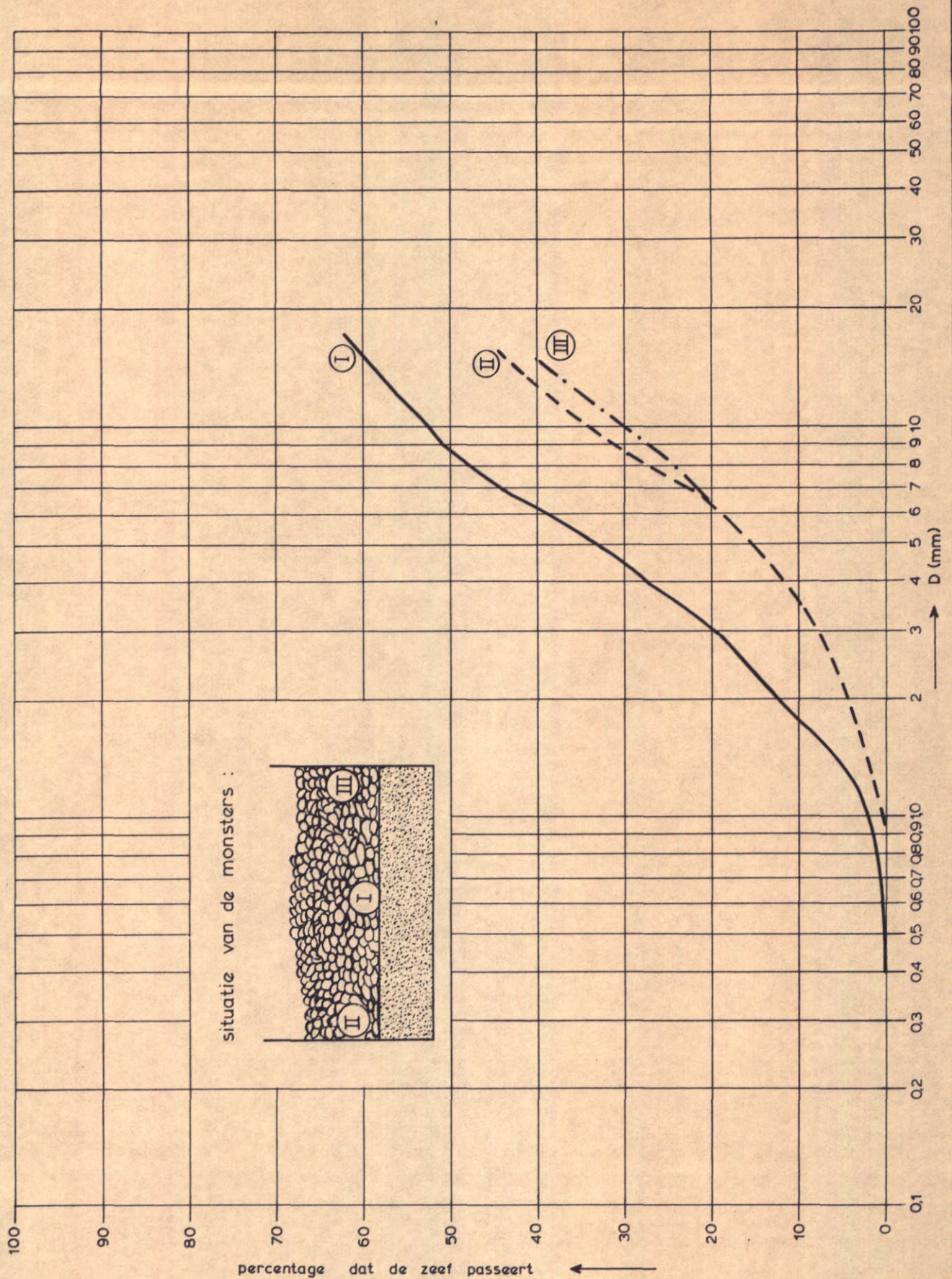
T = 10 s

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 12





ZEEFKROMMEN INTERNE STABILITEIT

GOLFTUNNEL

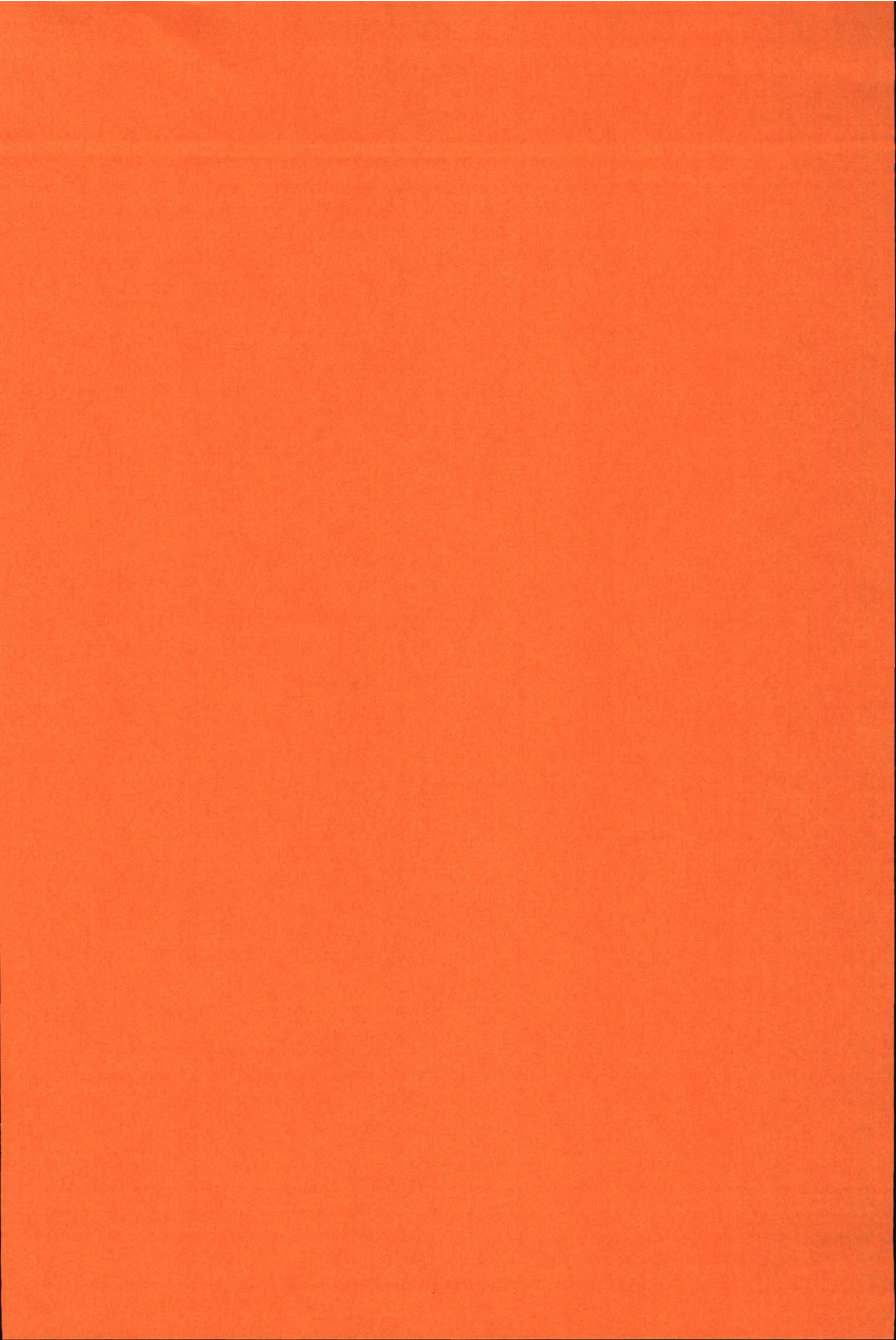
T9

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

FIG. 13







BIJLAGE: BEREKENING VAN HET CYCLISCHE HORIZONTALE KRITIEKE VERHANG IN  
GRANULAIRE FILTERS

1. Inleiding

Onder stationaire omstandigheden is gebleken dat het mogelijk is door middel van berekeningen een schatting te maken van het te verwachten kritieke verhang in een granulair filter bij horizontale stroming (bijlage verslag M 1488 -I). Deze berekeningen berusten in principe op een analogie tussen stroming in de poriën van een poreus medium en de stroming in leidingen.

Een kritieke situatie (voor begin van beweging van het basismateriaal) ontstaat dan wanneer de waarde van  $V_*$  in het filtermateriaal de kritieke waarde  $V_{*cr}$  van het basismateriaal overschrijdt.

Onder cyclische omstandigheden is een soortgelijke aanpak mogelijk, mits de invloed van versnellingskrachten op de schuifspanning (c.q.  $V_*$ ) in rekening wordt gebracht. Uit literatuurstudie bleek dat hierover reeds het een en ander bekend is. Voor laminaire stroming in een ronde buis is een exacte oplossing door Uchida verkregen.

Aan turbulente buisstromingen is nog weinig systematisch onderzoek verricht. Bij hoge frekwenties zijn door Emsmann metingen verricht bij  $Re = \hat{V} D/\nu > 20.000$ . Hoewel de stroming duidelijk turbulent was, waren de schuifspanningen slechts weinig groter dan die berekend met de theorie voor de laminaire stroming.

2. Schuifspanning volgens Uchida

In granulaire filters is de stroming over het algemeen niet laminair, maar uit de berekeningen onder stationaire omstandigheden blijkt dat de "laminaire term" vaak een overheersende invloed op het kritieke verhang uitoefent.

Als eerste benadering zal derhalve de cyclische schuifspanning volgens Uchida worden aangehouden:

$$f_w = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{16}{Re} \left\{ 1 + \frac{X_{cn}}{X_o} \sigma \cos (\omega t - \delta) \right\} \quad (1)$$

met:

$f_w$  = wrijvingscoëfficiënt

[ - ]

$\tau$  = wandschuifspanning =  $\rho V_*^2$

[ N/m<sup>2</sup> ]

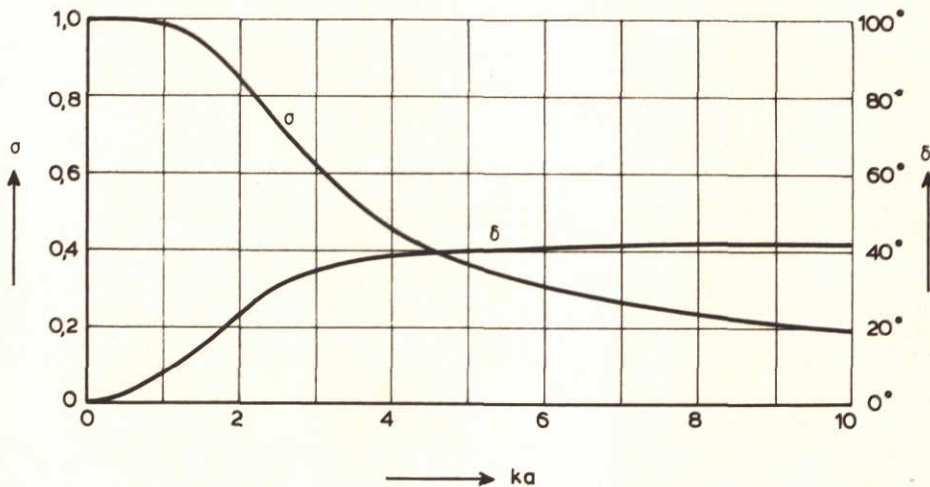


$\rho$ = dichtheid water	[kg/m <sup>3</sup> ]
$V_*$ = schuifspanningssnelheid = $\sqrt{\tau/\rho}$	[m/s]
$V$ = gemiddelde stroomsnelheid in buis = $\frac{a^2 X_0}{8\nu}$	[m/s]
$Re$ = Reynoldsgetal = $\frac{V \cdot D}{\nu}$	[-]
$D$ = doorsnede buis = $2a$	[m]
$X_0$ = stationaire component van de stroming	[m/s <sup>2</sup> ]
$X_{cn}$ = cyclische component van de stroming	[m/s <sup>2</sup> ]

De cyclische stroming wordt hierbij als volgt beschreven:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = X_0 + X_{cn} \cos \omega t \quad (2)$$

De waarden van de coëfficiënten  $\sigma$  en  $\delta$  uit (1) worden in de onderstaande figuur weergegeven (volgens Uchida):



Hierbij geldt:

$a$  = straal van de buis

$$k = \sqrt{\omega/\nu}$$

[m]  
[m<sup>-1</sup>]

Na substitutie van:

$$V = \frac{a^2 X_0}{8\nu}$$

$$Re = \frac{2a \cdot V}{\nu}$$

$$\tau = \rho V_*^2$$



in (1) volgt:

$$V_*^2 = \frac{1}{2} a \{ X_o + X_{cn} \sigma \cos (\omega t - \delta) \} \quad (3)$$

### 3. Cyclisch horizontaal kritiek verhang

In (2) worden de verhangen ingevoerd:

$$\begin{aligned} X_o &= g\bar{I} \\ X_{cn} &= gI_a \end{aligned} \quad (4)$$

waarbij:

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \text{gemiddeld verhang} & [-] \\ \bar{I}_a &= \text{verhangamplitude} & [-] \end{aligned}$$

Voorts wordt een hydraulische straal gedefiniëerd:

$$R = \frac{1}{4} D = \frac{1}{2} a,$$

zodat tenslotte kan worden geschreven:

$$V_*^2 = gR \{ \bar{I} + I_a \sigma \cos (\omega t - \delta) \} \quad (5)$$

De maximale waarde is dan:

$$V_*^2 = gR (\bar{I} + \sigma I_a) \quad (6)$$

In de stationaire situatie is  $I_a = 0$ , dan geldt:

$$gR I_{cr} = V_{*cr}^2, \quad (7)$$

waarin  $I_{cr}$  het kritieke stationaire verhang voorstelt. Na substitutie in (6) volgt:

$$V_*^2 = \frac{V_{*cr}^2}{I_{cr}} (\bar{I} + \sigma I_a) \quad (8)$$

In de kritieke situatie geldt  $V_* = V_{*cr}$ , zodat:



$$\frac{I_{acr}}{I_{cr}} = \frac{1}{\sigma} \left(1 - \frac{\bar{I}}{I_{cr}}\right) \quad (9)$$

Relatie (9) geeft dus de kritieke combinaties van  $\bar{I}$  en  $I_a$  voor een granulair filter met stationair kritiek verhang  $I_{cr}$ . De coëfficiënt  $\sigma$  is een functie van  $ka$ , en daardoor van de periode  $T$ . Het blijkt dat de parameter  $ka$  goed kan worden vervangen door een ander dimensieloos getal:

$$ka = \sqrt{\frac{\omega}{v}} \cdot 2R = 2 \sqrt{2\pi} \cdot \frac{R}{\sqrt{vT}}$$

Als dimensieloos getal kan worden gekozen:

$$A_r = \frac{vT}{R^2} \approx \left(\frac{5}{ka}\right)^2 \quad (10)$$

Het blijkt dan dat:

$$A_r = \frac{St}{Re} ,$$

waarin:

$Re = \text{Reynoldsgetal} = (V \cdot R / v)$

$St = \text{Strouhal getal} = (V \cdot T / R)$

Het kernprobleem in deze beschouwing is de aan te houden grootte van de hydraulische straal in een poreus medium.

Uit de literatuur blijkt dat verschillende onderzoekers zich hiermee bezig hebben gehouden zonder een eenduidig antwoord te kunnen leveren. Uit het onderzoek ten behoeve van de berekening van de kritieke verhangen onder stationaire omstandigheden (bijlage in verslag modelonderzoek M 1488-I) is gebleken dat kan worden aangehouden:

$$R = \frac{1}{40} (\epsilon D_f)^{2/3} , \quad (11)$$

waarin:

$D_f = D_{50}$  van het filtermateriaal [m]

$\epsilon = \text{porositeit van het filtermateriaal}$  [-]

In figuur 1 is de kritieke amplitude  $I_{acr}$  uitgezet tegen het dimensieloze getal  $A_r$  voor diverse waarden van het gemiddelde verhang  $\bar{I}$ . Uit deze figuur



blijkt dat voor  $A_r < 10$  (dus voor kleinste periode en/of grof filtermateriaal) de waarde van  $I_{acr}$  gaat toenemen. Dit wijst erop dat het effect van een kortere belastingstijd overheerst boven het effect van grotere versnellingskrachten. Er moet dus waarschijnlijk in termen van impuls worden gedacht.

In het geval van proef T2 geldt:

$$D_{50 \text{ basis}} = 150 \text{ } \mu\text{m}$$

$$V_{*cr} = 0,0118 \text{ m/s}$$

$$D_{50 \text{ filter}} = 3,8 \text{ mm}$$

$$\epsilon = 0,33$$

$$I_{cr} \approx 1$$

$$\nu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Dan volgt:

$$R = \frac{1}{40} (0,33 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3})^{2/3} = 290 \cdot 10^{-6}$$

$$A_r = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{(290 \cdot 10^{-6})^2} \cdot T \approx 15 T$$

De periode  $T$  werd gevariëerd tussen 2 en 20 s, zodat  $A_r$  vrij groot was en buiten de grafiek van figuur 1 viel. Dit houdt in dat  $I_{acr} \approx I_{cr}$ , (bij  $\bar{I} = 0$ ), hetgeen niet door de metingen wordt tegengesproken.

Uit deze gegevens blijkt dus dat de kleinste periode (2 s) als kwasi-stationair kan worden gezien ten aanzien van de stabiliteit van het beschouwde filterpakket. Uit figuur 1 blijkt dat er slechts een invloed op de kritieke verhangamplitude merkbaar zou worden als  $T < 1$  s.

Voorts dient te worden opgemerkt dat de uitgevoerde proeven in geen geval een toetsing van de bovenstaande beschouwingen hebben geleverd. Er kan hoogstens worden gezegd dat de proeven hiermee niet in strijd zijn.

Een bevestiging van de bovengenoemde beschouwing zou slechts mogelijk zijn bij uitvoering van proeven met grover filtermateriaal. Indien de invloed van dynamische omstandigheden op de kritieke verhangen merkbaar wordt bij  $A_r < 10$  (figuur 1), dan kunnen de volgende "kritieke perioden" worden aangegeven voor diverse soorten filtermateriaal (hierbij is aangehouden  $\epsilon = 0,38$  en  $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).



$D_{50}$ filter (mm)	1	5	10	25	50
R (mm)	0,13	0,38	0,61	1,1	1,8
$A_r/T$ ( $s^{-1}$ )	73	8,5	3,4	1,0	0,4
$T_{cr}$ (s)	0,15	1,2	3	10	25

Concluderend kan worden gesteld dat de kritieke (horizontale) verhangamplitude toeneemt wanneer het dimensieloze getal  $A_r$  kleiner is dan 10. Uit de definitie van  $A_r$  blijkt dat de genoemde invloed van cyclische omstandigheden (in de gangbare gevallen met periode van 3 à 10 s) merkbaar wordt bij filtermaterialen met korreldoorsnede groter dan 0,01 à 0,025 m.



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Stabiliteit van granulaire filter,  
Verslag modelonderzoek M 1488-I, 1981

EMSMANN, S., 1973

Experimentelle Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung in einer oszillierenden turbulenten Rohrströmung.

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, T.U., Berlin, Mitteilung nr. 79

HINO, M. et al, 1976

Experiments on transition to turbulence in an oscillating pipe flow.  
Journal of Fluid Mechanics 75 (1), p. 193-207

MERKLI, P., THOMANN, H., 1975

Transition to turbulence in oscillating pipe flow.  
Journal of Fluid Mechanics, 68 (3), p. 567-575

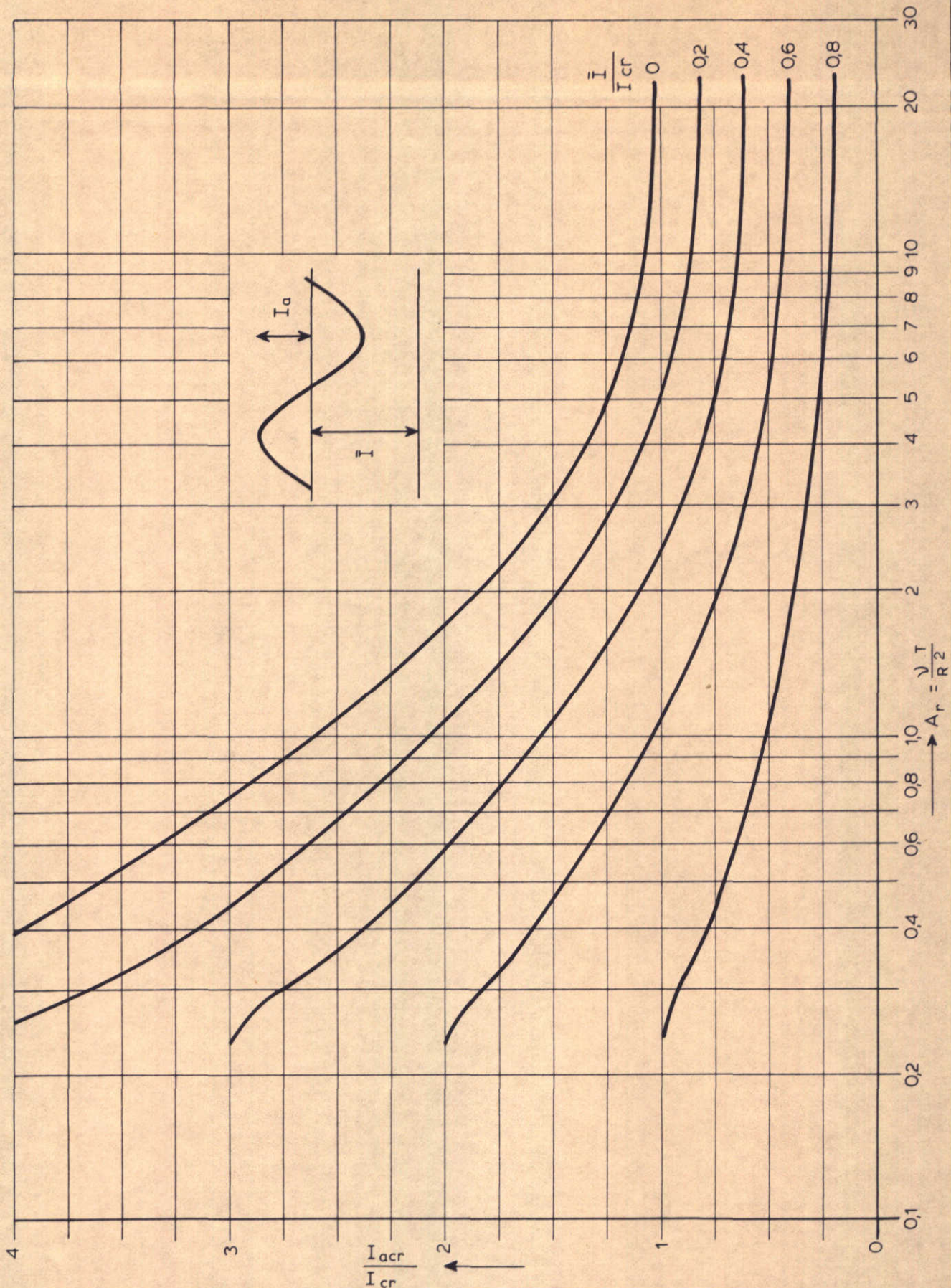
UCHIDA, S., 1956

The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe.  
ZAMP 7, p. 403-422

VASILIEV, O.F., KVON, V.I., 1971

Friction forces of unsteady flows in open channels and pipes.  
14th IAHR Congress, Paris 2, p. 187-196





KRITIEKE VERHANG - AMPLITUDE  
ALS FUNCTIE VAN T EN  $\bar{I}$

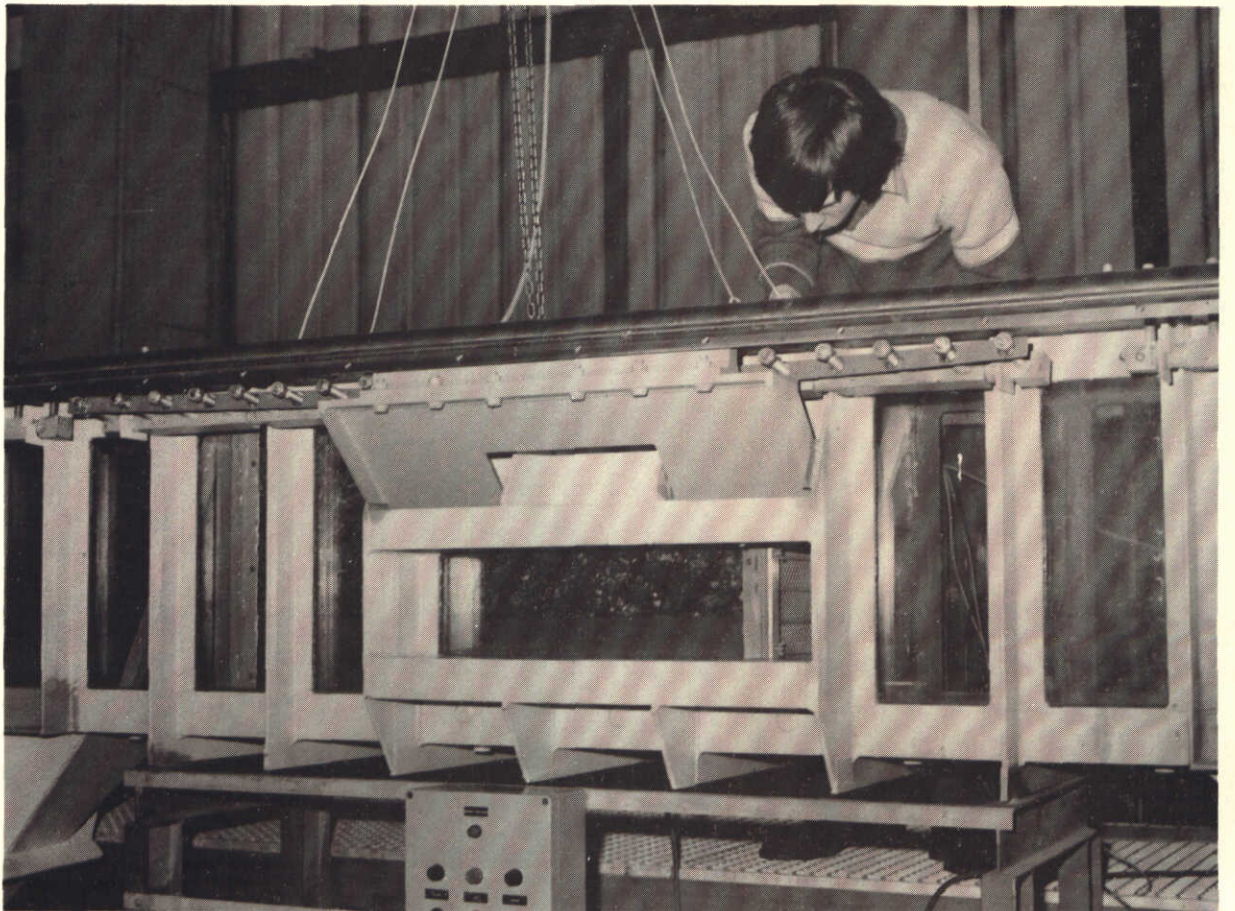
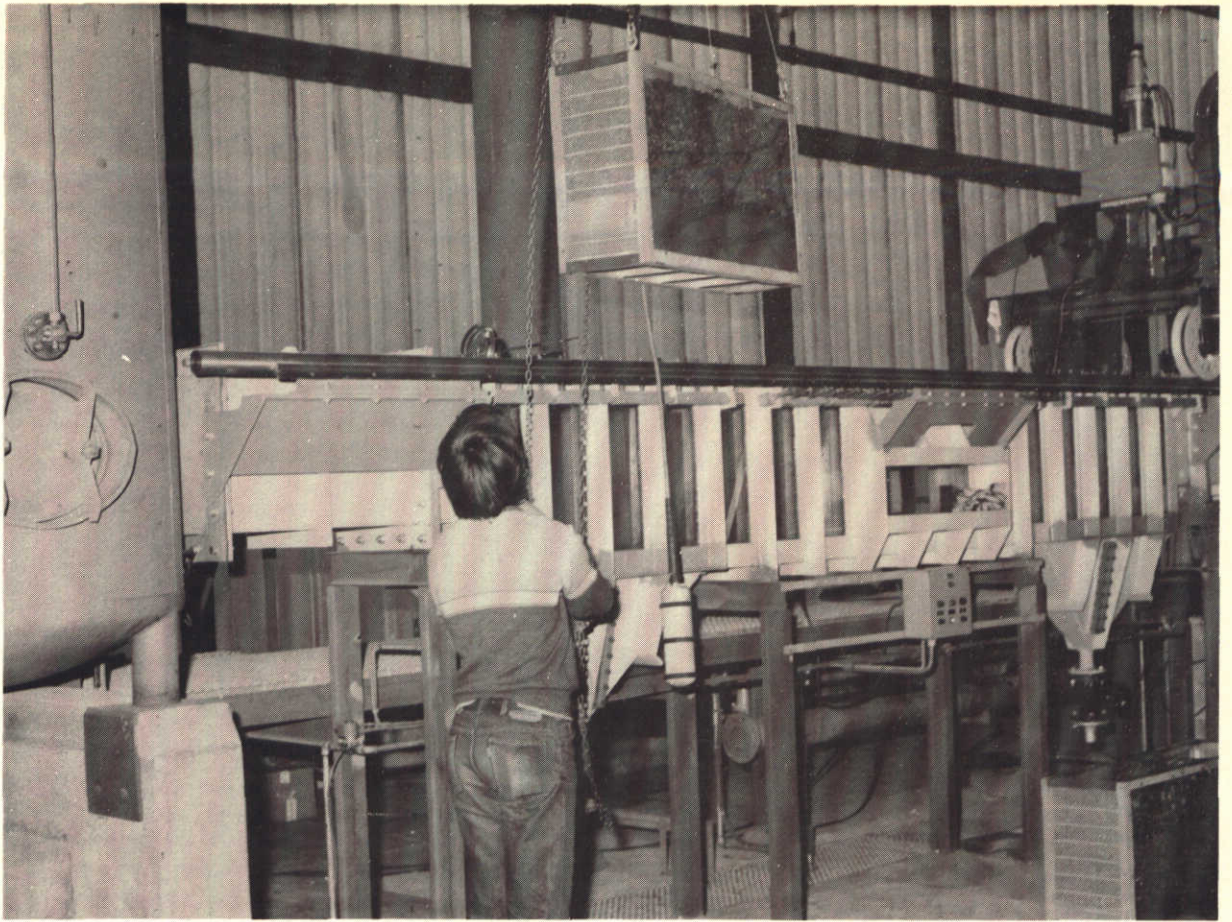
BIJLAGE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1544

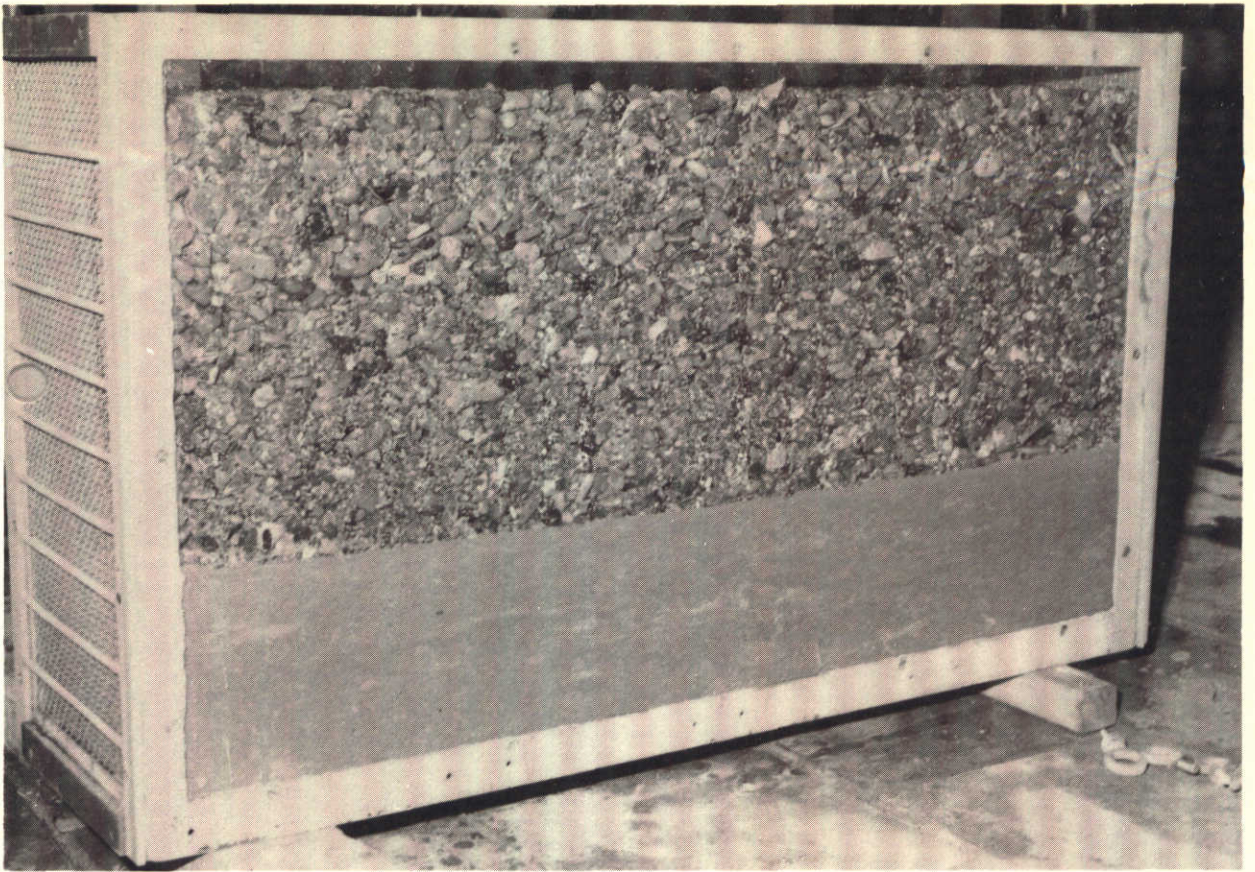
FIG. 1



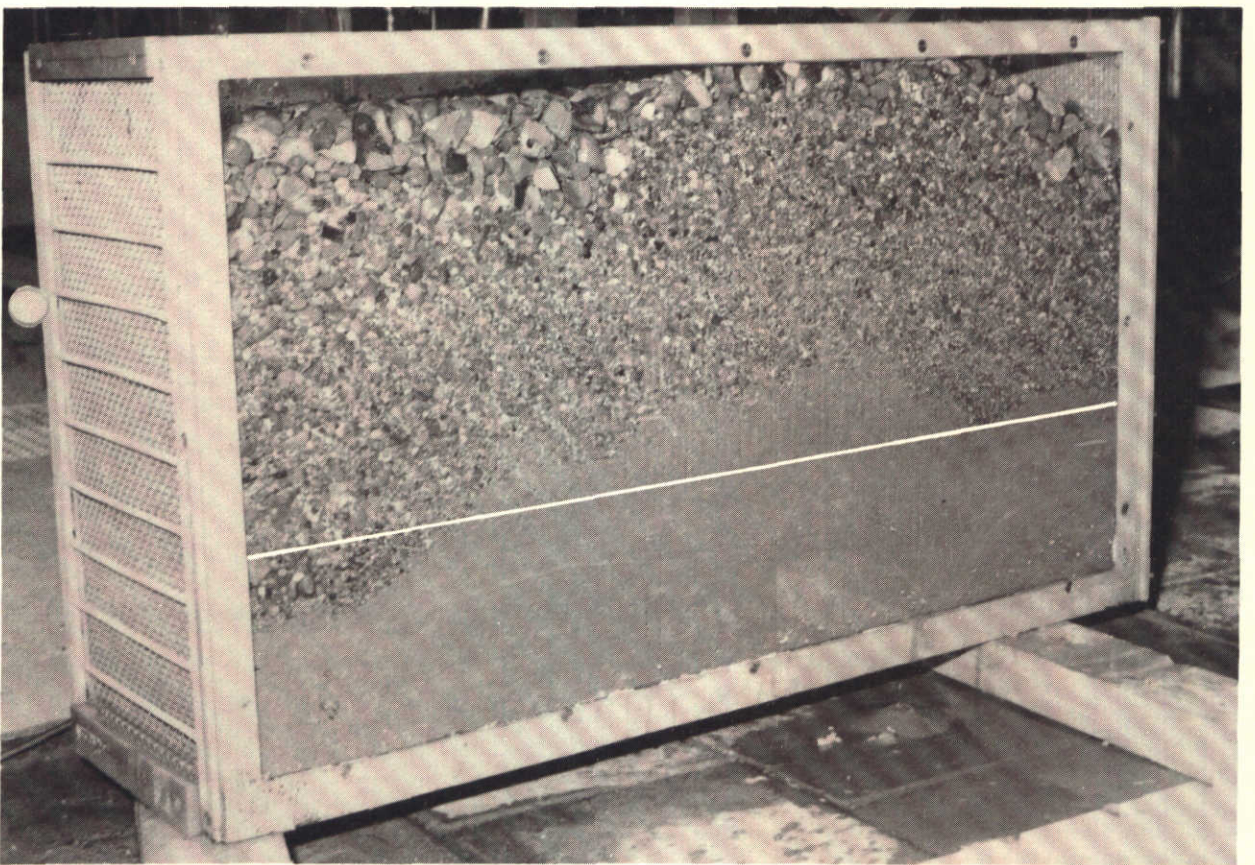


1. Inbouwen filterpakket





Voor de proef



Na de proef

2. Wadzand/Füller-mengsel ( T3 )





Voor de proef



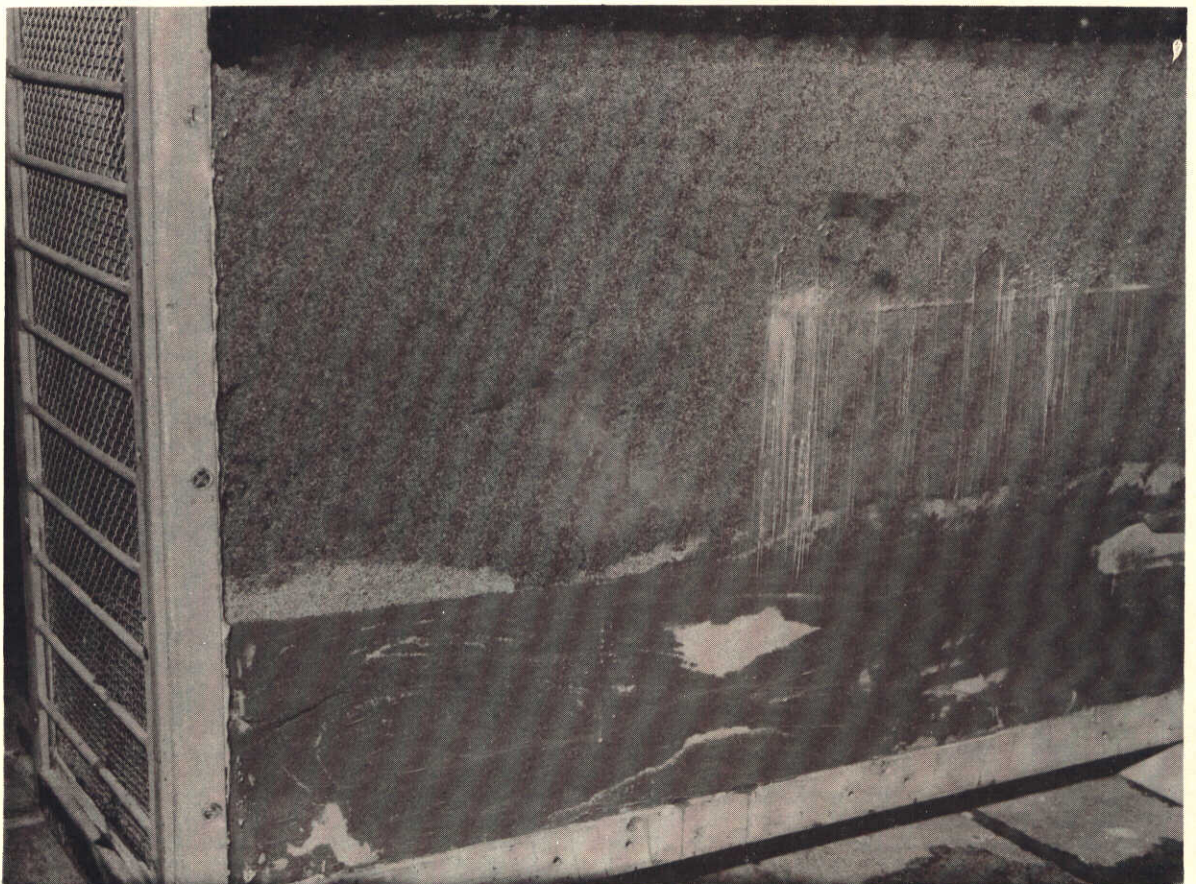
Na de proef

3. Wadzand/afwijkend mengsel ( T4 )





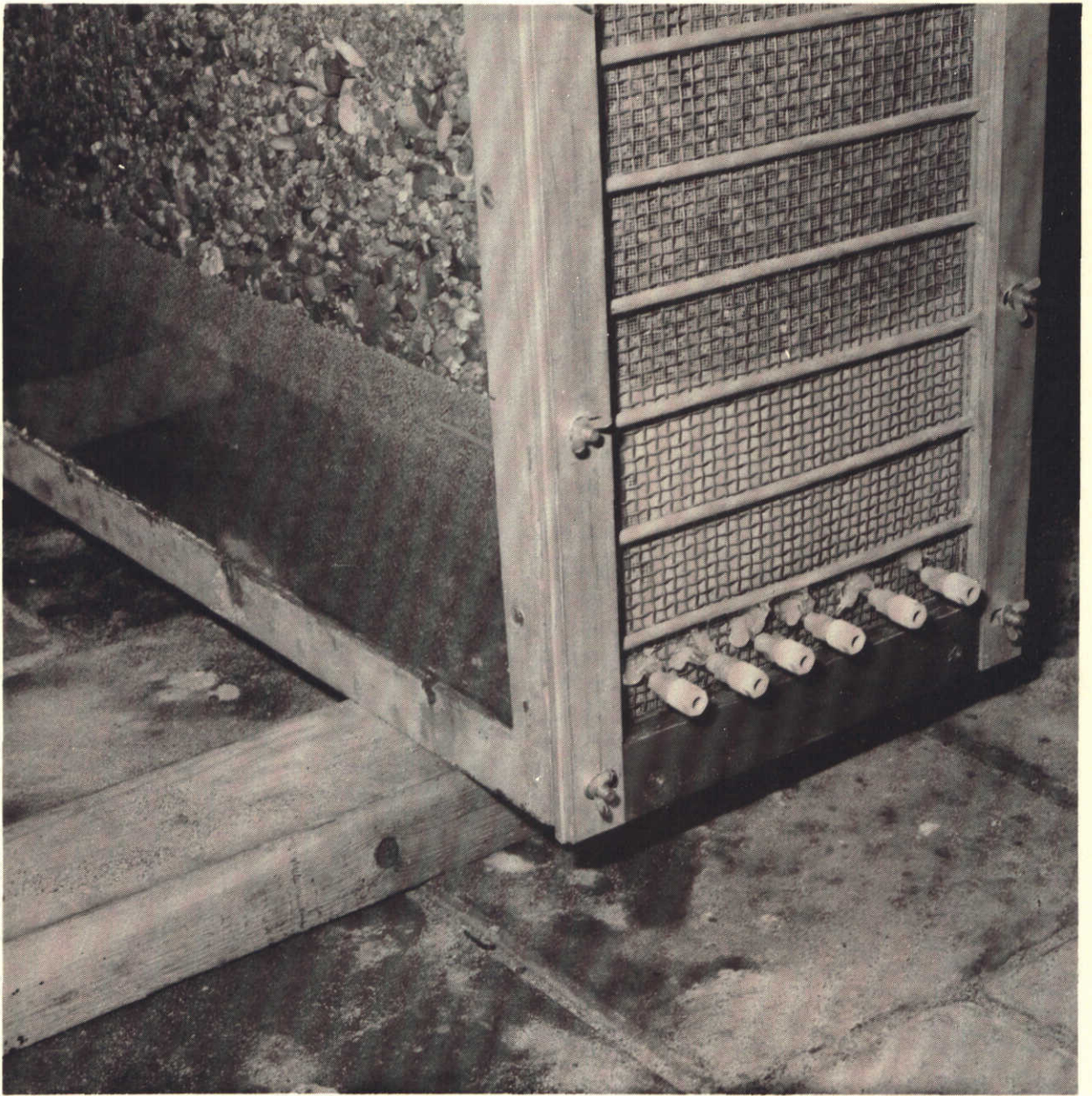
Grofzand/afwijkend mengsel (voor de proef)



Wadzand/Grofzand (voor de proef)

4. Het "2-lagen-systeem" ( T5 en T6 )





5. Drukaansluitingen ( T6 en T7 )



p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands