ID 157748

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

# stabiliteit van granulaire filters bij cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak

verslag modelonderzoek

M 1488 deel II

december 1981

C 1951

BIBLIOTHEEK DIRECTIE SLUIZEN
EN STUWEN VAN DE RIJKSWATERSTAAT
NR. C 1951
90488

stormvloedkering Oosterschelde

# stabiliteit van granulaire filters bij cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak

verslag modelonderzoek

M 1488 deel II

december 1981

Inhoud


| | | blz. |
|---|---|---|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 2. | Conclusies | 2 |
| 3. | Optredende verhangen | 4 |
| 4. | Proefopstelling | 5 |
| 5. | Bepaling van het kritieke verhang | 7 |
| 6. | Uitgevoerde proeven | 8 |
| 6.1 | Materialen | 8 |
| 6.2 | Proeven met Füller-mengsel | 8 |
| 6.2.1 | onverdicht filtermateriaal | 8 |
| 6.2.2 | "hydraulische verdichting" | 9 |
| 6.2.3 | verdicht filtermateriaal | 10 |
| 6.3 | Proeven met afwijkend mengsel | 10 |
| 6.4 | Proeven met overvuld Füller-mengsel | 11 |
| 6.5 | Proeven met grof zand | 12 |
| 7. | Vervolg-onderzoek | 13 |

Bijlage: Cyclische verhangen in de Filterbak

Figuren

1. Opbouw van de drempel
2. Proefopstelling
3. Zeefkrommen wadzand en grof zand
4. Zeefkrommen fundatiebed
5. Stabiliteit wadzand/Füller mengsel
6. Stabiliteit wadzand/verdicht Füller mengsel
7. Stabiliteit wadzand/overvuld Füller mengsel
8. Stabiliteit "2-lagen-systeem"
9. Vertikale kritieke verhangen

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

# Stabiliteit van granulaire filters bij cyclische verhangen loodrecht op 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 naar de stabiliteit van granulaire filters onder cyclische omstandigheden verricht.
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. Aangezien er nagenoeg geen ervaring aanwezig was met het gedrag van granulaire filters onder cyclische omstandigheden moest een relatief groot aantal proeven worden verricht om enig inzicht te krijgen in de verschijnselen ten behoeve van het ontwerp van geschikt filtermateriaal voor het fundatiebed dat bij de te verwachten verhangen stabiel kon zijn.
Zowel vertikale cyclische verhangen (loodrecht op het grensvlak) als horizontale cyclische verhangen (evenwijdig aan het grensvlak) werden onderzocht. In het onderhavige verslag worden slechts de proeven met vertikale cyclische verhangen beschreven, die in de zogenaamde Filterton werden uitgevoerd.
Het onderzoek naar horizontale cyclische verhangen vond plaats in een andere faciliteit (de Golftunnel) (zie verslag modelonderzoek M1544).

Tenslotte wordt vermeld dat het onderzoek bij stationaire omstandigheden in hoofdstuk 10 van het verslag M1488, deel I is beschreven. Het onderzoek werd geleid door ir. A.F.F. de Graauw, die tevens dit verslag heeft samengesteld.

## 2. Conclusies

Ten behoeve van het ontwerp van het fundatiebed van de stormvloedkering in de Oosterschelde werd de stabiliteit van wadzand onder sterk gegradeerde filtermaterialen bij cyclische stromingen loodrecht op het grensvlak onderzocht (periode van 10 s.). De in dit verslag genoemde verhangen zijn in procenten uitgedrukt.

1. Cyclische omstandigheden blijken het kritieke verhang loodrecht op het grensvlak ongunstig te beïnvloeden. De kritieke amplitude van het cyclische verhang is een factor 3 à 4 kleiner dan het stationaire kritieke verhang.

2. Een en ander kan worden verklaard uit de veronderstelling dat de stabiliteit van granulaire filters door boogvorming van het basismateriaal tussen de korrels van het filtermateriaal wordt verzekerd. Deze boogvorming kan onder cyclische omstandigheden niet tot stand komen, met name wanneer de stroming periodiek omlaag is gericht.

3. Ten gevolge van de cyclische omstandigheden treedt een "hydraulische verdichting" van het filtermateriaal op. Voor de beproefde materialen (0,3 - 32 mm en 0,15-32 mm) blijkt dat verschijnsel op te treden als de amplitude van het cyclische verhang in het basismateriaal groter is dan 200 à 300% (bij gemiddeld verhang $\bar{I}$ = 0%). De zakkingen van het filtermateriaal ten gevolge van deze hydraulische verdichting nemen als functie van de amplitude minder snel toe dan dit het geval is bij zakkingen ten gevolge van indringing.

4. Het verdichten van het filtermateriaal (0,3 - 32 mm) blijkt een gunstige invloed te hebben op de kritieke amplitude van het cyclische verhang. Bij $\bar{I}$ = 0%, is de kritieke amplitude 1,5 à 2 maal zo groot als bij het onverdichte filtermateriaal.

5. Hoewel het, met behulp van een Füller diagram ontworpen, sterk gegradeerde filtermateriaal onder stationaire omstandigheden aan hoge eisen voldoet, is het onder cyclische omstandigheden niet zanddicht. Indien géén zakking ten gevolge van indringing wordt toegelaten, zal een tussenlaag, bestaande uit grof zand (0,3-1 mm), moeten worden toegepast om aan de gestelde eisen te kunnen voldoen.

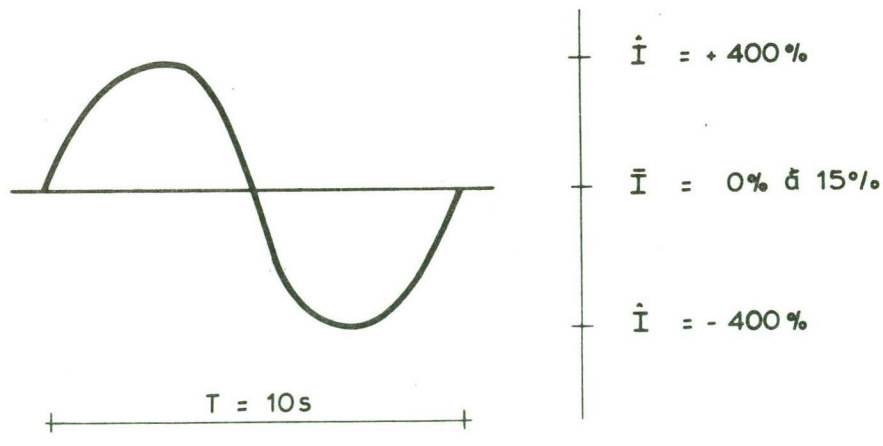
6. Als voorlopige benadering van de kritieke verhangen bij vertikale stroming kan figuur 9 worden aangehouden. Bij ontwerp van filtermaterialen is voorlopig nog controle van deze benadering door middel van proeven gewenst.

7. Uit nader onderzoek zullen betere ontwerpregels moeten volgen voor het samenstellen van sterk gegradeerde filtermaterialen. Tevens zal het onderzoek naar het gedrag van granulaire filters onder cyclische omstandigheden moeten worden voortgezet met andere materialen en andere perioden . Een eerste aanzet tot nader onderzoek is in het onderzoek M1591 te vinden.

## 3. Optredende verhangen

In figuur 1 zijn twee doorsneden van de drempel weergegeven, geldend voor de diepe en ondiepe delen van de sluitgaten. In beide gevallen bestaat de drempel uit opeenvolgende lagen materiaal met naar boven toenemende korreldiameter. De verhouding tussen de korreldiameters van de materialen van twee opeenvolgende lagen werd zodanig gekozen dat de grensvlakken onder de heersende omstandigheden stabiel zijn. Als randvoorwaarden 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 kunnen zijn,waardoor in de onderliggende lagen grote cyclische verhangen kunnen ontstaan, met name in de omgeving van de rand van de pijlervoet aan de Oosterscheldezijde.De berekeningen (door het Laboratorium voor Grondmechanica uitgevoerd) tonen aan dat de maximale vertikale cyclische verhangen op het grensvlak zand/fundatiebed tot meer dan 400% 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 klein. Deze is in de proeven derhalve gelijk aan nul gekozen:




Aangezien geen zakking van de fundatie van de pijler kan worden toegelaten, werd een volledig zanddichte filterconstructie geeist, dus een kritieke verhang-amplitude groter dan 400% op het grensvlak zand/fundatiebed.

## 4. Proefopstelling

In figuur 2 wordt een overzicht gegeven van de proefopstelling waarmee de cylische verhangen in de Filterton werden opgewekt. Voor een nadere beschrijving van de Filterton wordt verwezen naar paragraaf 3.3 van het verslag M1488, deel I.

Met behulp van een elektrische afsluiter werd de waterstand in de waterkolom gevarieërd tussen $H_{max}$ en $H_{min}$. Vanuit de waterkolom stroomde het water naar de Filterton en naar een verdeelleiding. Deze laatste was nodig omdat de weerstand van het wadzand te groot is om de inhoud van de waterkolom tussen $H_{max}$ en $H_{min}$ in een halve periode af te voeren. Met behulp van de afsluiter op de verdeelleiding kon dus de totale weerstand worden gevarieërd,hetgeen vooral de amplitude bleek te bepalen. Door de hoogte van de overstortbak te variëren kon vooral de gemiddelde stand $\bar{H}$ worden bepaald. Het is echter duidelijk dat de amplitude en de gemiddelde stand bij deze wijze van instellen niet werkelijk onafhankelijk zijn. Dit leverde de nodige instelproblemen op. Een additionele instel-mogelijkheid was de hoogteligging van de afvoer van de Filterton zelf. Hiermee kon vooral op $H_{min}$ enige invloed worden uitgeoefend. Tenslotte bestond nog een vrijheid in de keuze van de doorsnede van de waterkolom,(hoe kleiner hoe groter de amplitude, doch extra leidingverliezen). In extreme gevallen werd de waterkolom zelfs geheel weggelaten.
Op de elektrische afsluiter werd een tijdklok aangesloten. De periode van open en dicht gaan van de afsluiter werd bij alle proeven op 10 s ingesteld. Het nadeel van een elektrische afsluiter is echter wel dat er een waterslag optreedt bij het open- en vooral bij het dicht gaan van de afsluiter. Om dit enigszins tegen te gaan werd een windketel aangebracht,waarin een luchtkussen een belangrijk deel van de drukfluctuaties absorbeerde. De waterslag was echter niet volledig te onderdrukken, zoals uit het registratie-voorbeeld van figuur 2 blijkt.

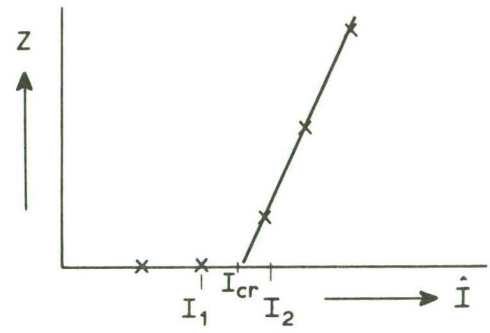
De materialen werden tussen roosters aangebracht. Op het bovenste rooster werd een verzwaring (120 kg lood) aangebracht om eventuele fluïdisatie bij hoge verhangen te voorkomen. Het verhang in het basismateriaal werd gemeten met behulp van twee in de wand van de Filterton geplaatste drukdozen. Zowel de afzonderlijke drukken als het drukverhang werden op schrijvers geregistreerd.
Het indringen van zand in het filtermateriaal kon aan de wand worden waargenomen. Ten gevolge van wandeffecten ("piping") bestonden er twijfels over de

representativiteit van dergelijke waarnemingen voor het werkelijk gebeuren. Daarom werd besloten de zakking van de bovenkant van het filtermateriaal (c.q. van het bovenste rooster) na een uur stromen als kriterium aan te houden. Teneinde toch een indruk te krijgen van de zandindringing in het filtermateriaal werd een "dichtheidsmeter" aangebracht (figuur 2). Deze bestaat uit een staaf waarop twee ringen als electroden zijn gemonteerd. Door de weerstand tussen deze ringen te meten kan de dichtheid van het omliggende materiaal worden bepaald.

## 5. Bepaling van het kritieke verhang

Het kritieke verhang (Icr) is gedefiniëerd als het verhang in het basismateriaal waarbij, na een uur stromen, nog net geen indringing optreedt. Zoals gezegd werd de zakking van het bovenste rooster als maatstaf hiervoor aangehouden.

In principe kan het kritieke verhang worden bepaald door het ingestelde verhang stap voor stap te vergroten totdat zakking wordt geconstateerd. De nauwkeurigheid van het op deze wijze gevonden kritieke verhang is dan wel evenredig met de stapgrootte. In de praktijk bleek (zie resultaten figuur 5) dat na het begin van zakking,de zakking als lineaire functie van het verhang toenam. Hiervan werd gebruik gemaakt om het kritieke verhang nader te bepalen binnen een stap tussen twee ingestelde verhangen $I_1$ en $I_2$:




Op deze wijze kon een redelijke nauwkeurigheid in de bepaling van Icr worden bereikt zonder daarvoor de stapgrootte tussen de ingestelde verhangen te klein te maken,waardoor de totale proefduur beperkt kon worden.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat het bovengenoemde beeld om de volgende redenen verstoord kan worden:

- Met name bij gegradeerde materialen kan tijdens de inbouw enige ontmenging optreden,waardoor de samenstelling over de hoogte niet constant is. Hieraan is praktisch niet te ontkomen zodat dit in wezen als een eigenschap van het materiaal gezien moet worden.
- Door de in hoofdstuk 4 genoemde instelproblemen kon het voorkomen dat gedurende korte tijd een te groot verhang werd ingesteld. Dit kon, vooral in het begin van de proef, zakkingen teweeg brengen die niet representatief waren.

In beide gevallen leidden deze verstoringen tot enige spreiding in de resultaten. Ten gevolge van de beperkte tijd die beschikbaar was om de proeven uit te voeren, zijn over het algemeen geen reproductieproeven uitgevoerd (behalve in twee gevallen, figuur 5).

# 6. Uitgevoerde proeven

## 6.1 Materialen

Voor het basismateriaal is in nagenoeg alle proeven wadzand met $D_{50}$= 150 μm gebruikt (figuur 3).

Voor het filtermateriaal zijn diverse soorten zeegrind gebruikt (figuur 4).
Als uitgangspunt werd het zogenaamde "Füller-mengsel" (0,3-32 mm) toegepast, (voor de achtergronden van deze keuze wordt verwezen naar paragraaf 10.1 van het verslag M1488, deel I). Dit materiaal heeft de eigenschap een lage porositeit te bezitten,omdat de porieën van de grove fracties optimaal worden opgevuld door fijnere korrels. Dit heeft tot gevolg dat het materiaal onder stationaire omstandigheden intern stabiel is en een groot kritiek verhang bezit (paragraaf 10.4 van het verslag M1488, deel I).
Omdat dit sterk gegradeerde materiaal gevoelig is voor ontmenging (tijdens opslag en storten) werden tevens proeven uitgevoerd met het zogenaamde "afwijkend mengsel" (1-32 mm).
Vervolgens werden proeven uitgevoerd met een "overvuld Füller-mengsel" (0,15 - 32 mm). Omdat dit mengsel relatief veel fijn materiaal bevat, werd verwacht dat het aan hogere eisen zou kunnen voldoen.
Tenslotte werden proeven verricht met een uniform materiaal (0,3-1 mm, figuur 3) dat zich in de drempel tussen het zand en het Füller-mengsel zou gaan bevinden. Ook bij dit "twee-lagen-systeem" werd verwacht dat aan hoge eisen met betrekking tot de stabiliteit zou kunnen worden voldaan.

## 6.2 Proeven met Füller-mengsel

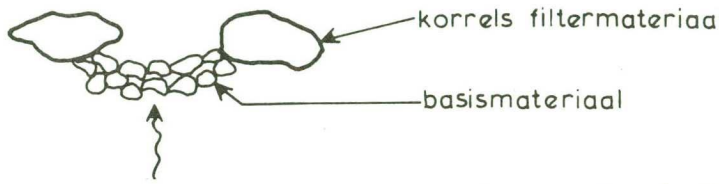
### 6.2.1 Onverdicht filtermateriaal

De eerste vraag die zich voordeed was in hoeverre het gemiddelde verhang $\bar{I}$ een invloed uitoefende op het kritieke maximale verhang $\hat{I}_{cr}$ (c.q. de kritieke amplitude $I_{a\ cr} = \hat{I}_{cr} - \bar{I}$). Om dit te onderzoeken werden 4 proeven uitgevoerd met respectievelijk $\bar{I}$ = 0%, 100%, 200% en 400%. In figuur 5 worden de resultaten van dit onderzoek weergegeven. Het bleek dat in alle gevallen de zakking van het bovenste rooster een lineair verloop vertoonde als functie van $\hat{I}$. Door extrapolatie naar nul volgde voor iedere $\bar{I}$ een bijbehorende waarde van $I_{a\ cr}$ .

In het stationaire onderzoek was gebleken dat $I_{cr} \approx 500\%$ en er is aangenomen dat hierbij een $I_{a\ cr} = 0\%$ behoort.

Voor $\bar{I} = 0\%$ tot 400% blijkt de kritieke amplitude $I_{a\ cr}$ te variëren tussen 125% en 160% (c.q. 0,25 $I_{cr}$ en 0,32 $I_{cr}$). Bij $\bar{I} > 400\%$ (c.q. 0,80 $I_{cr}$) neemt $I_{a\ cr}$ snel af.

Cyclische omstandigheden blijken dus zeer ongunstig te zijn voor de stabiliteit van granulaire filters. Een verklaring hiervoor volgt uit de (in verslag M1488-I, hoofdstuk 9 genoemde) hypothese dat in het algemeen de stabiliteit van het basismateriaal onder het filtermateriaal het gevolg is van boogvorming:




Onder cyclische omstandigheden kunnen bogen,bestaande uit basismateriaal,tussen de korrels van het filtermateriaal niet tot stand komen. Dit geldt met name in het geval dat de stroming op het grensvlak periodiek omlaag is gericht (omdat een boog bestaande uit losse elementen geen trekspanning kan opnemen). Dit verklaart het feit dat bij $\bar{I} = I_a \approx 125\%$ een minimum ontstaat in figuur 5. Dan is immers de grootste stationaire stroomkracht gecomibneerd met een nog juist van teken wisselend verhang aanwezig. De laatste breekt de bogen af, terwijl de eerstgenoemde een transportcapaciteit levert.

Gezien de geringe invloed van een klein gemiddeld verhang $\bar{I}$ op de kritieke verhang-amplitude $I_{a\ cr}$, is in het vervolg van het onderzoek $\bar{I} = 0\%$ aangehouden.

Er dient tenslotte te worden opgemerkt dat, wegens ontmenging van het filtermateriaal bij het inbouwen van de proeven, enige variatie in de samenstelling van het materiaal op het grensvlak is opgetreden, hetgeen tot enige spreiding in de resultaten kan hebben geleid (figuur 4). Voorts dient te worden opgemerkt dat de proefopstelling met bijbehorende meet- en instelapparatuur niet aan zeer hoge nauwkeurigheidseisen voldeed. Een absolute fout in $I_{a\ cr}$ van ± 15 à 20% (% verhang) is zeker niet denkbeeldig.

### 6.2.2 "Hydraulische verdichting"

Omdat tijdens de proeven het vermoeden was gerezen dat de gemeten zakkingen van de bovenkant van het filtermateriaal misschien voor een belangrijk deel te wijten waren aan verdichting van het materiaal ten gevolge van de cyclische

omstandigheden, werd een proef uitgevoerd,waarbij een zanddicht vlies op het grensvlak tussen wadzand en filtermateriaal werd aangebracht. Dit maakte het mogelijk alle indringing van wadzand in het filtermateriaal te verhinderen, zodat de gemeten zakkingen uitsluitend het gevolg waren van de opgetreden verdichting.
Hieruit bleek een hydraulische verdichting inderdaad op te treden (figuur 6), maar de amplitude waarboven de verdichting optrad bedroeg $I_a$ = 200% (bij $\bar{I}$ = 0%) en het verloop van de zakkingen als functie van $\hat{I}$ was veel flauwer dan in het geval zonder vlies. De bovengenoemde resultaten met onverdicht filtermateriaal werden door deze hydraulische verdichting derhalve niet noemenswaardig beïnvloed.

### 6.2.3 Verdicht filtermateriaal

Uit eerder verricht onderzoek (zie bijlage in verslag M1488, deel I)is het gebleken dat de porositeit $\varepsilon$ van het filtermateriaal een belangrijke invloed heeft op het kritieke verhang. Bij stroming evenwijdig aan het grensvlak kon globaal worden gesteld:

$$I_{cr} : \varepsilon^{-3} \qquad (1)$$

Dit houdt in dat verdichting van het filtermateriaal een gunstige invloed moet hebben op het kritieke verhang.

Er werden twee proeven uitgevoerd,waarbij in het eerste geval een gedeeltelijke verdichting door trilling langs de wand van de Filterton werd toegepast, en in het tweede geval het filtermateriaal zo goed mogelijk bij het inbouwen werd verdicht. Beide proeven werden uitgevoerd met $\bar{I}$ = 0%. Uit deze proeven bleek dat de kritieke amplitude gelijk was aan 200% à 250%. Het verschil tussen gedeeltelijk en volledig verdicht filtermateriaal kwam vooral tot uiting in de helling van het verloop van de zakkingen (figuur 6), en moet vermoedelijk worden verklaard uit verschillen in de samenstelling van het filtermateriaal op het grensvlak.

## 6.3 Proeven met afwijkend mengsel

Deze proeven worden hier slechts pro memorie genoemd. Bij het stationaire onderzoek (paragraaf 10.4.2 in het verslag M1488-I) bleek namelijk dat het kritieke

verhang van het afwijkende mengsel gelijk was aan 100 à 150%. Dit lag zo dicht bij het minimale kritieke verhang van 100% (hoofdstuk 9 van verslag M1488-I), dat het niet zinnig werd geacht hiermee onderzoek te verrichten onder cyclische omstandigheden.

## 6.4 Proeven met overvuld Füller-mengsel

Uit het voorgaande is duidelijk geworden dat het ontworpen Füller-mengsel niet voldeed aan de gestelde eisen (paragraaf 3). Er moest dus een nieuw mengsel worden ontworpen dat aan hogere eisen zou kunnen voldoen dan het Füller-mengsel.

Uit eerder verricht onderzoek (zie verslag M898, deel III) was gebleken dat de onderstaande vuistregel kon worden aangehouden bij het ontwerp van zanddichte filtermaterialen bij grote verhangen:

$$\frac{D_{20\ \text{Filter}}}{D_{50\ \text{basis}}} < 6 \qquad (2)$$

In het geval van het Füller-mengsel was deze verhouding gelijk aan 17. Er werd daarom een filtermateriaal ontworpen dat rijker was aan fijn materiaal zodanig dat de bovengenoemde verhouding gelijk aan 7 werd. Voor de verdere samenstelling van dit filtermateriaal werd nog steeds gebruik gemaakt van het Füller-diagram (figuur 4). De porositeit van dit mengsel was gelijk aan 19%.

Met dit mengsel werden twee proeven uitgevoerd, bij $\bar{I}$ = 0%. De eerste proef had betrekking op de zanddichtheid en de tweede op de hydraulische verdichting. In figuur 7 is het verloop van de zakkingen als functie van $\hat{I}$ gegeven. Hieruit blijkt dat er nauwelijks sprake is van hydraulische verdichting. De kritieke amplitude is gelijk aan 200%. Door monstername vóór en na de proef, kon met behulp van zeefanalysen worden aangetoond dat tijdens de proef inderdaad zand-indringing in het filtermateriaal was opgetreden. Door de aanwezigheid van de fijne fractie in het filtermateriaal was waarneming van de indringing langs de wand van de Filterton met het blote oog immers onmogelijk geworden.

Wegens tijdgebrek werd het onderzoek met betrekking tot de ideale samenstelling van Füller-mengsels hierbij gestaakt. Nader onderzoek met het oog op verbetering van de zanddichtheid van Füller-mengsels onder cyclische omstandigheden lijkt echter gewenst.

## 6.5 Proeven met grof zand

Nadat was gebleken dat het niet mogelijk was om op korte termijn één filtermateriaal voor het fundatiebed te ontwerpen dat aan de gestelde eisen voldeed, werd besloten een extra filterlaag tussen het wadzand en het Füller-mengsel toe te passen en over te gaan op het zogenaamde "twee-lagen-systeem".
In figuur 3 is de zeefkromme van het gebruikte grove zand (0,3-1 mm) gegeven.
Het voordeel van deze oplossing is niet alleen dat de zanddichtheid op beide grensvlakken verbeterd wordt, maar tevens dat de optredende verhangen op het tweede grensvlak (grof zand/Füller-mengsel) veel kleiner worden. Daar staat tegenover dat een extra filterlaag extra kosten met zich meebrengt.

Er werden twee proeven uitgevoerd bij $\bar{I} = 0\%$ waarin het grensvlak grof zand/fundatiebed werd onderzocht. Het fundatiebed bestond achtereenvolgens uit het Füller-mengsel en uit het afwijkende mengsel. Uit figuur 8 blijkt dat de resultaten van de proef met grof zand/Füller-mengsel niet geheel eenduidig zijn, omdat reeds bij $\hat{I} = I_a = 200\%$ enige zakking is opgetreden. Indringing langs de wand trad echter pas bij $I_a = 300\%$ op. Er kan dus redelijkerwijs worden geconcludeerd dat $I_{a\ cr} = 200$ à $300\ \%$. De resultaten van de proef grof zand/afwijkend mengsel wijzen vrij eenduidig op $I_{a\ cr} = 130\%$.

Tenslotte werd een proef uitgevoerd, waarbij het grensvlak wadzand/ grof zand werd onderzocht. Uit figuur 8 volgt een kritieke amplitude van 150%.
Uit de overige gegevens met betrekking tot deze proef blijkt echter dat de kritieke amplitude veel groter is:

- er was langs de wand tot $I_a = 400\%$ geen zand-indringing in het filtermateriaal zichtbaar hoewel het daar, wegens wandeffecten, in de regel het eerste optreedt.
- de ingebouwde dichtheidsmeter bij het grensvlak toonde aan dat de porositeit tot $I_a = 400\%$ constant bleef (39,5%).
- het verloop van de zakkingen als functie van $\hat{I}$ is flauw, hetgeen wijst op hydraulische verdichting.
- de verhouding $\varepsilon_f\ D_{20f}/D_{50b} \approx 1$, hetgeen inhoudt dat zandindringing in het filtermateriaal fysisch onmogelijk is.

Uit deze gegevens werd geconcludeerd dat de kritieke amplitude op het grensvlak wadzand/grof zand groter moest zijn dan 400%, en dat de gemeten zakkingen het gevolg zijn geweest van hydraulische verdichting of van een zand-lek bij het onderste rooster.

## 7. Vervolg-onderzoek

Uit dit onderzoek is gebleken dat cyclische omstandigheden het gedrag van granulaire filters ongunstig beïnvloeden. Hierdoor kunnen deze omstandigheden maatgevend zijn voor het ontwerp van granulaire filters.
De resultaten van het onderzoek zijn samengevat in figuur 9. Hierin zijn tevens de resultaten van het onderzoek onder stationaire omstandigheden gegeven (verslag M1488-I, figuur 13).
Onder cyclische omstandigheden blijkt een analoge relatie te bestaan tussen de karakteristieken van de materialen en het kritieke verhang (figuur 9). De te stellen eisen zijn echter strenger dan bij stationaire gevallen. De genoemde relatie moet met de nodige voorzichtigheid worden bekeken vanwege het beperkte aantal proeven en vormt derhalve slechts een allereerste schatting van de gezochte ontwerpregels.

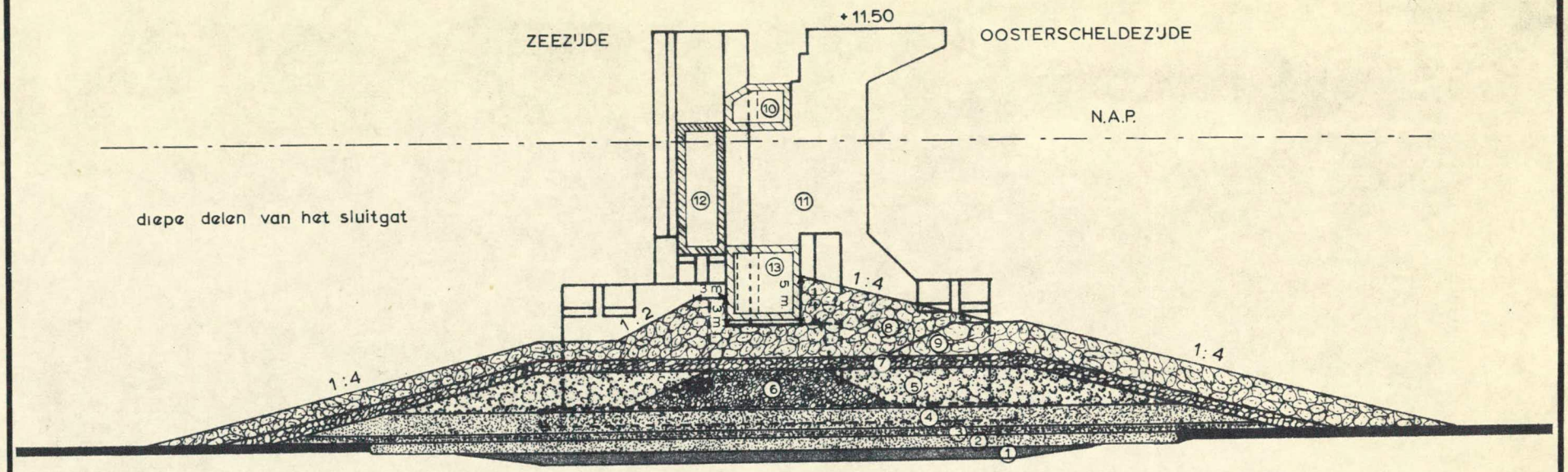
Vervolg-onderzoek zou zich op twee aspekten moeten richten:

1. Het opstellen van regels voor het ontwerpen van zanddichte en intern stabiele gegradeerde filtermaterialen.
2. Het systematisch onderzoeken van de invloed van cyclische stromingen op het gedrag van granulaire filters.

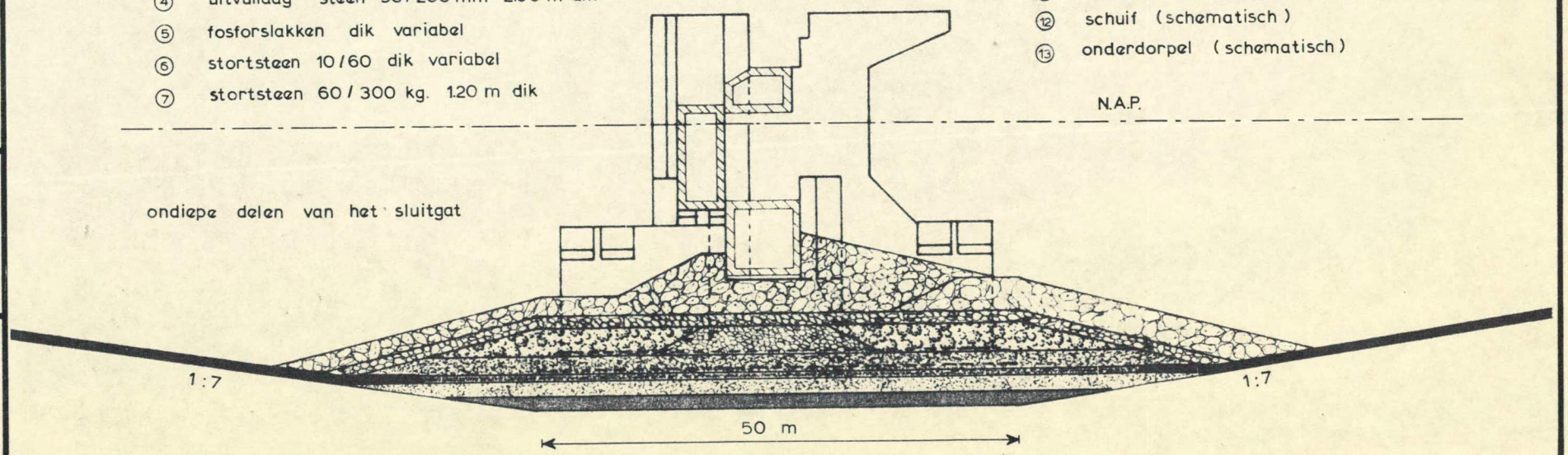
ad 1. Uit het onderhavige onderzoek is gebleken dat gegradeerde filtermaterialen die volgens het Füller-diagram werden samengesteld, aan hoge eisen kunnen voldoen. Uit het nader onderzoek zou moeten blijken of de verhouding $\varepsilon_f\ D_{20f}/D_{50b}$ bij Füller-mengsels, evenals bij uniforme filtermaterialen, een maatgevende rol speelt. Met andere woorden: is het filtermateriaal, dat in dit onderzoek het "overvulde Füller-mengsel" werd genoemd, voor verbetering vatbaar zowel ten aanzien van de zanddichtheid als van de interne stabiliteit. In een nader onderzoek zouden derhalve meer mengsels met verschillende $D_{20}$ moeten worden onderzocht. Dit onderzoek zou zowel bij stationaire als bij cyclische stroming kunnen plaatsvinden.

ad 2. Nader onderzoek zou zich moeten richten op het controleren van de hier gevonden kritieke verhoudingen tussen $\bar{I}$ en $I_a$ (respectievelijk het gemiddelde en de amplitude van het cyclische verhang). Het onderzoek zou moeten worden uitgevoerd voor diverse perioden om de eventuele invloed

van de versnellingskrachten na te gaan (zie ook de bijlage in verslag M1544). Om de hier gevonden spreiding in de samenstelling van het filter materiaal te beperken zou het nader onderzoek kunnen worden uitgevoerd met uniforme filtermateiralen. Ten behoeve van het opstellen van algemene regels voor de kritieke verhoudingen tussen $\bar{I}/I_{cr}$ en $I_a/I_{cr}$ (waarin $I_{cr}$ het stationaire kritieke verhang is), zou het nader onderzoek met verschillende filtermaterialen moeten worden uitgevoerd. Een eerste aanzet tot nader onderzoek is in het verslag van het onderzoek M1591 weergegeven.




① zand 0.3 / 1 à 2 mm 1.50 m dik
② gegradeerd zeegrind 0.3 / 3.0 mm 1.50 m dik
③ afdeklaag 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. 1.20 m dik
⑧ stortsteen 1/3 ton
⑨ stortsteen 6/10 ton 3.30 m. dik
⑩ bovendorpel (schematisch)
⑪ pijler
⑫ schuif (schematisch)
⑬ onderdorpel (schematisch)

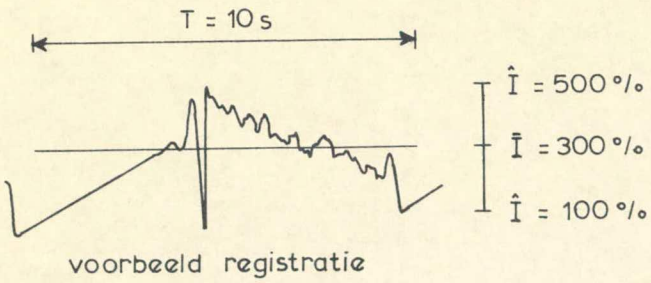


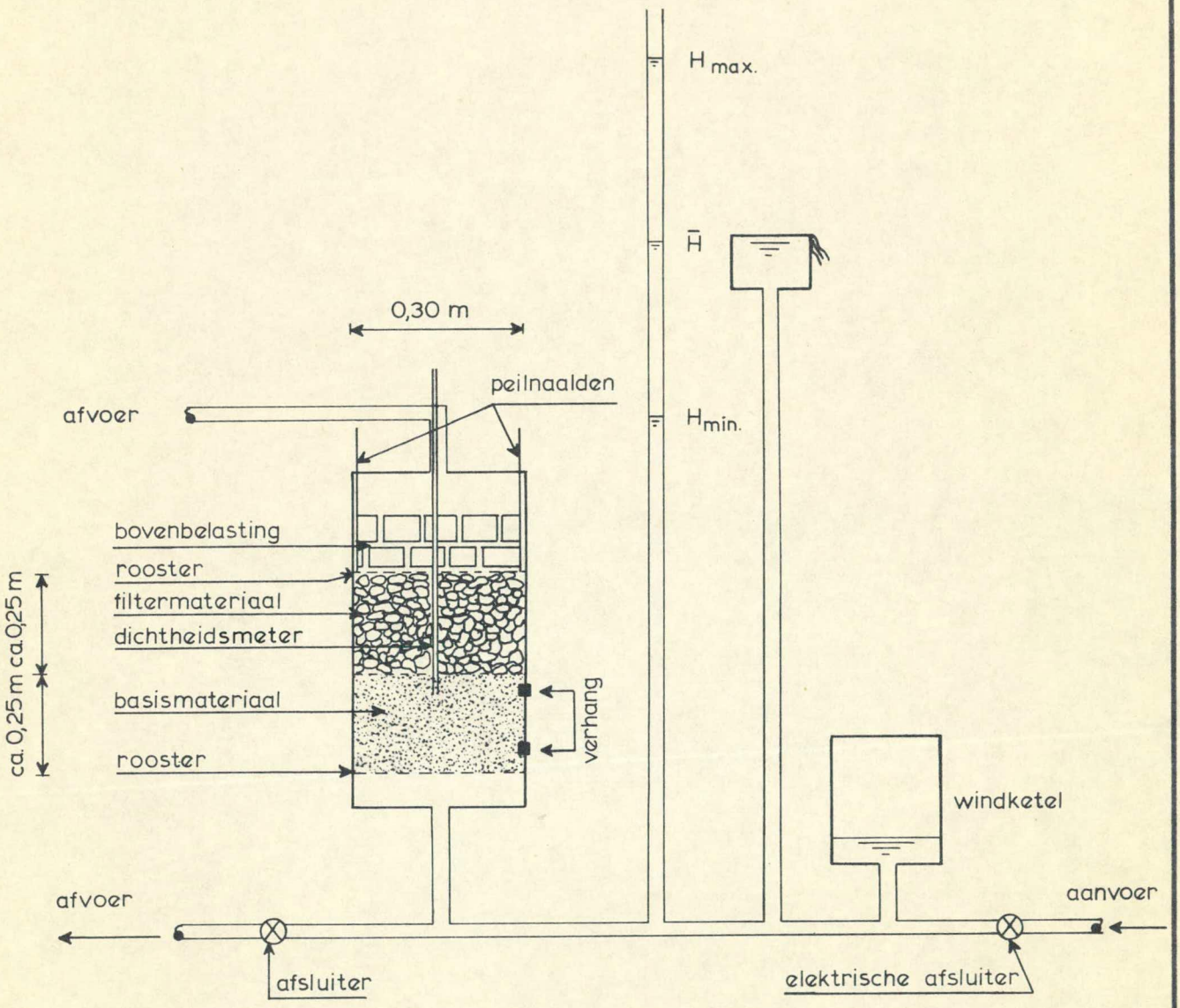

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

OPBOUW VAN DE DREMPEL

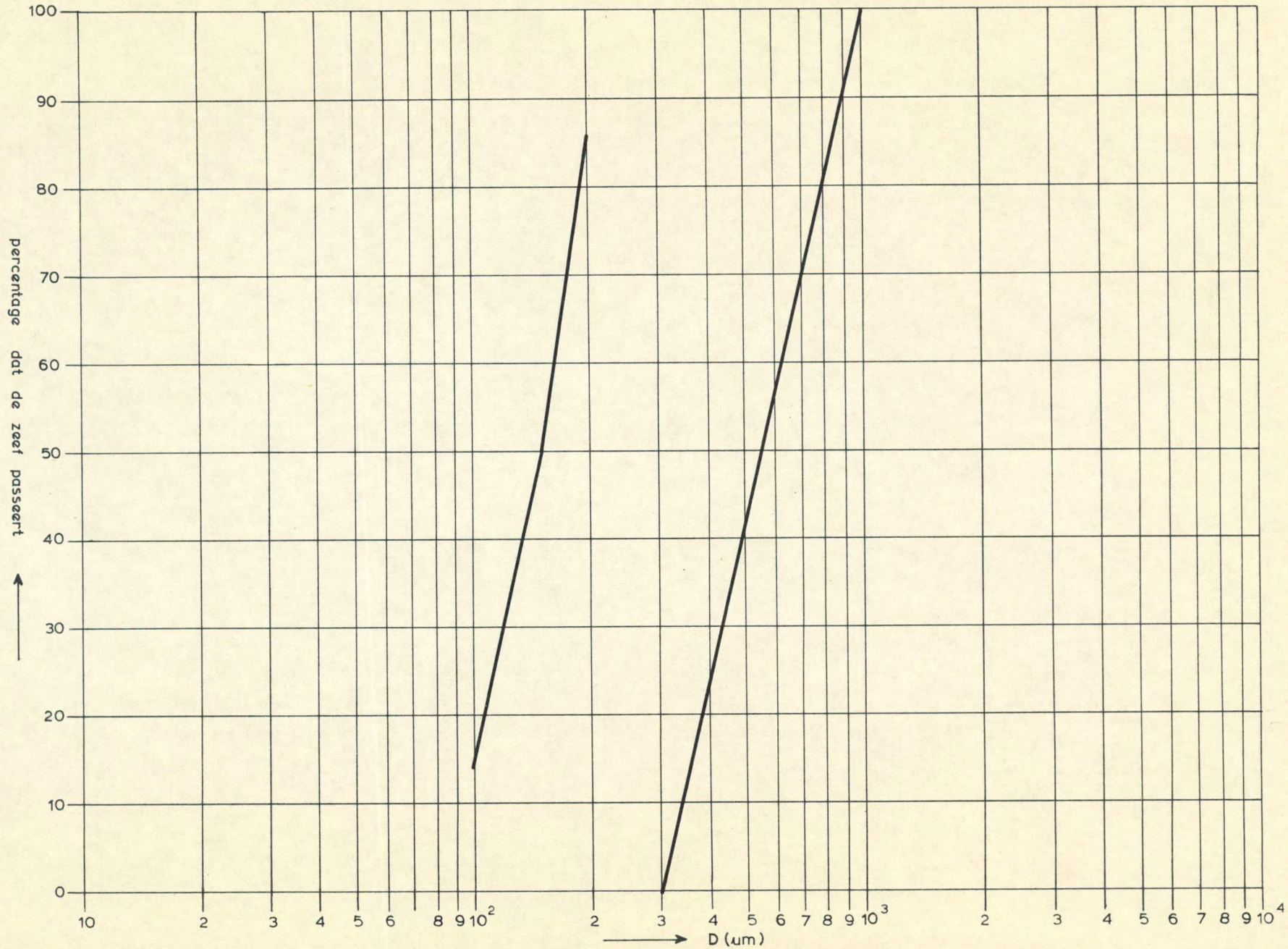
M 1488-II

FIG. 1




| | | |
|---|---|---|
| PROEFOPSTELLING | FILTERTON | |
| | STROMING ⊥ GRENSVLAK | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 2 |



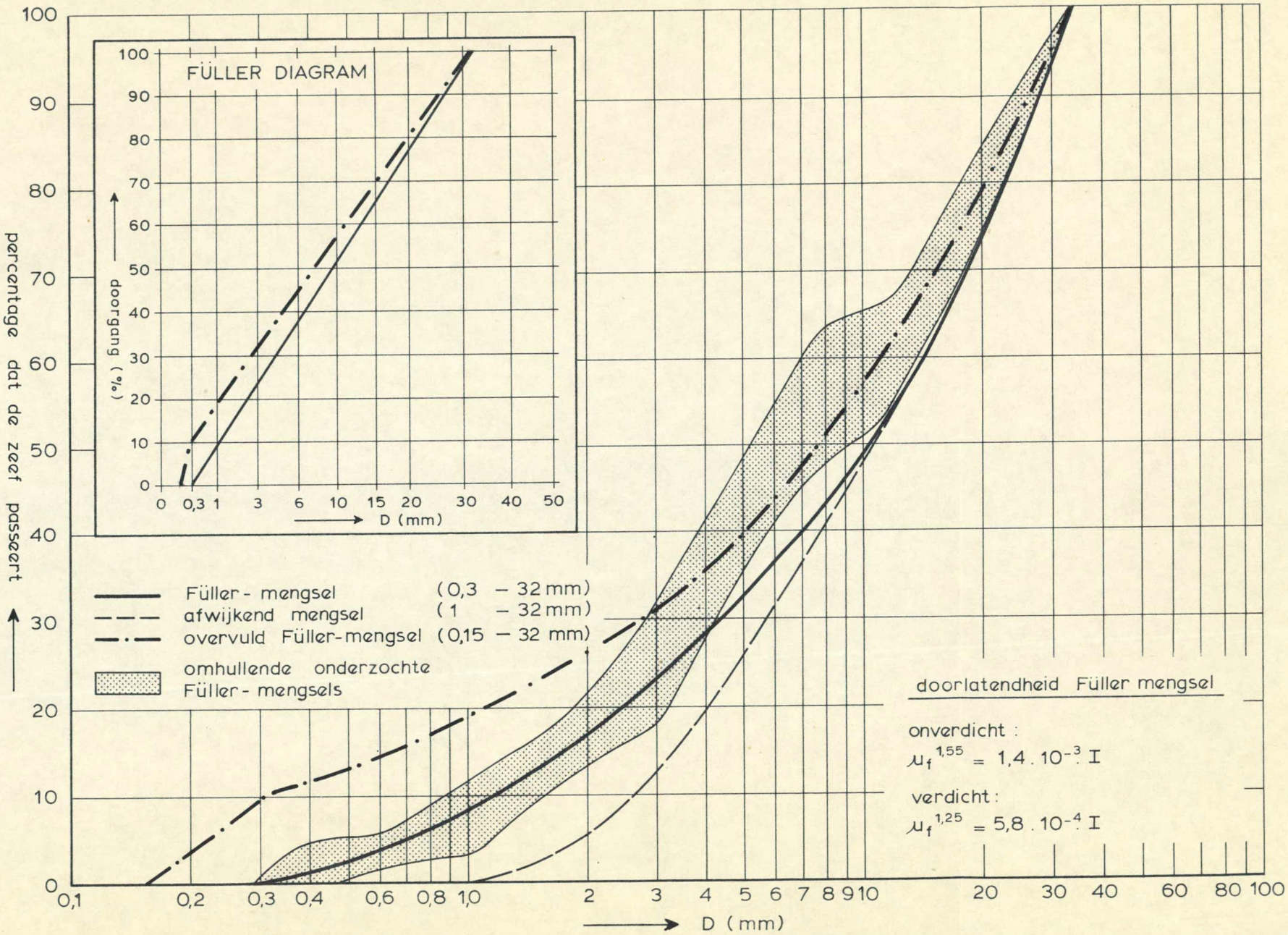

ZEEFKROMMEN WADZAND EN GROF ZAND

FILTERTON

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M1488-II

FIG. 3

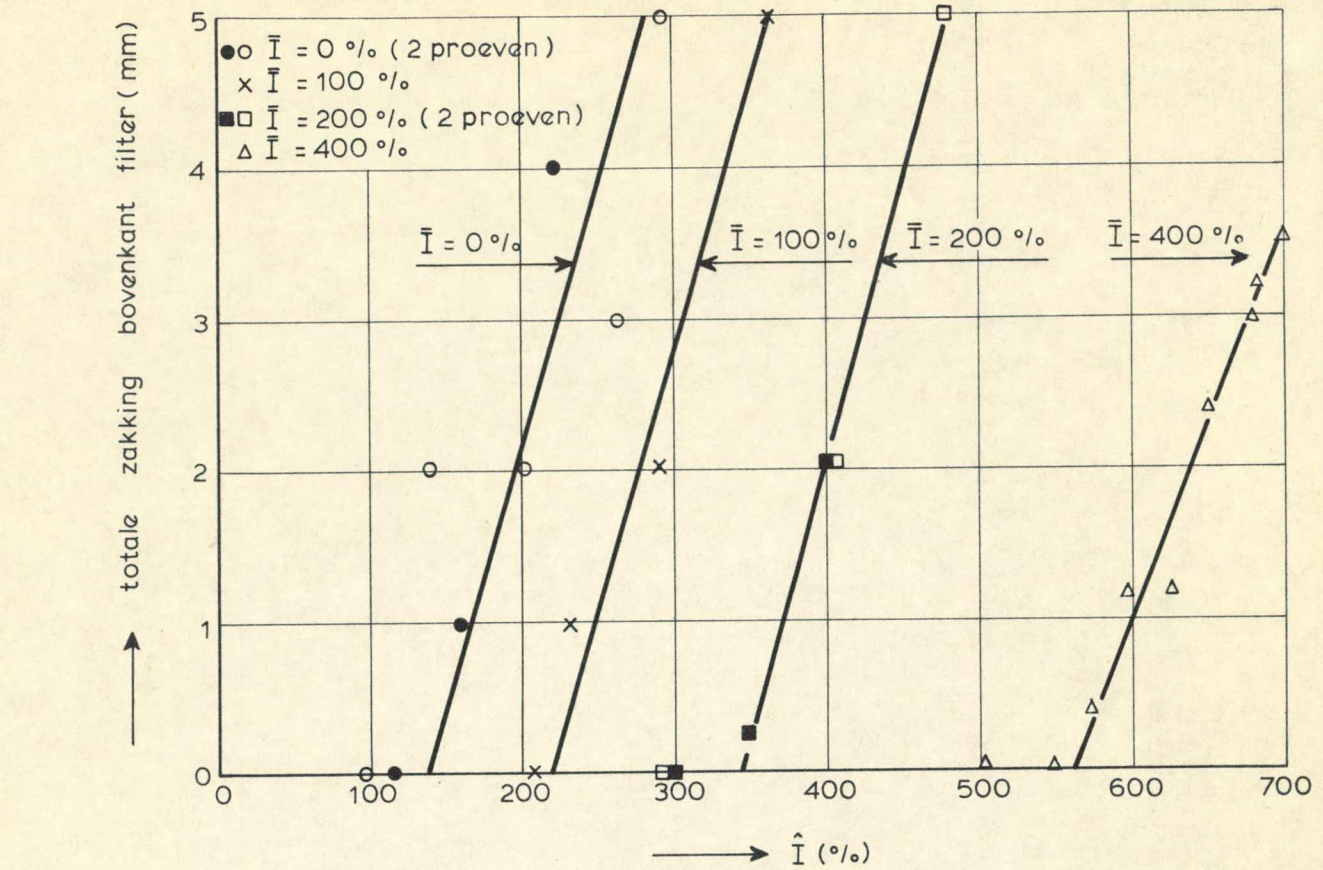


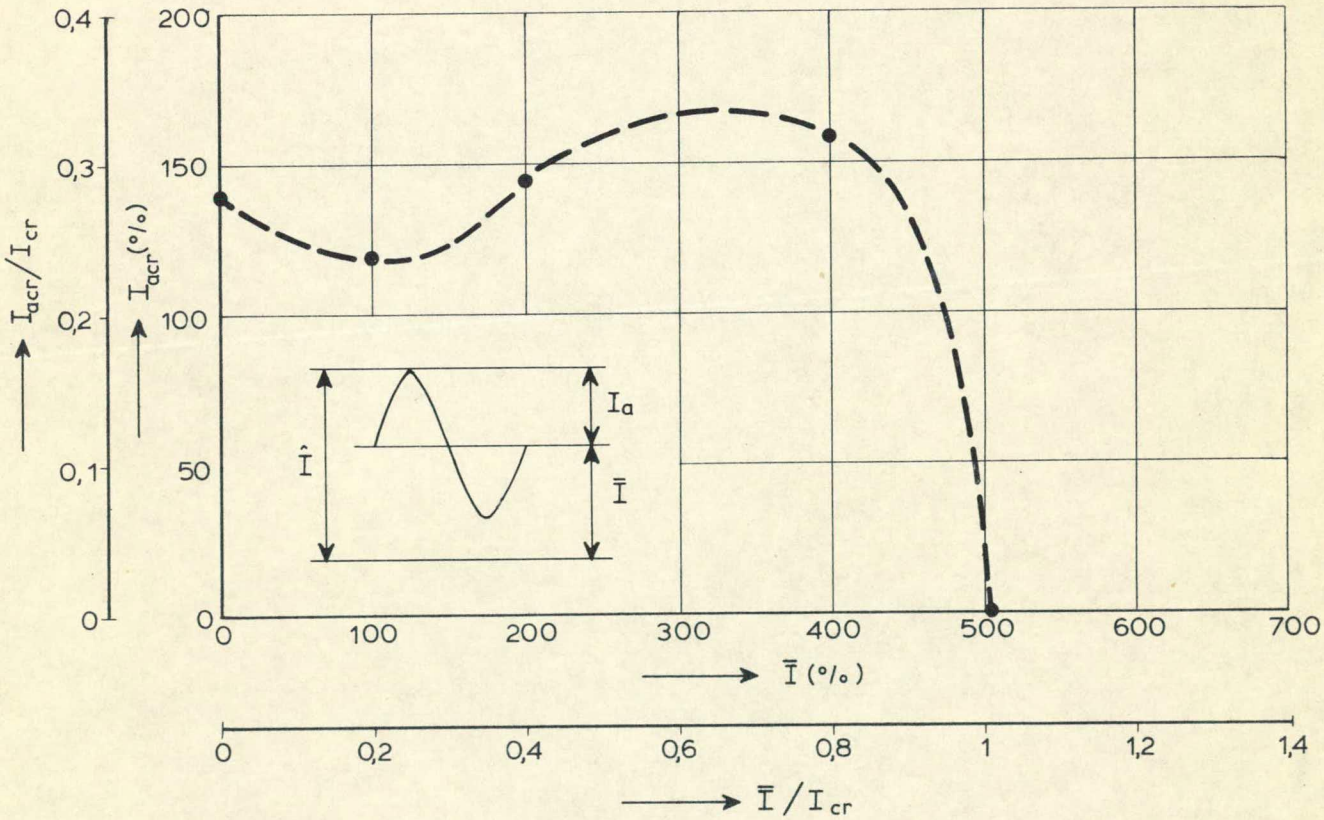

ZEEFKROMMEN FUNDATIEBED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

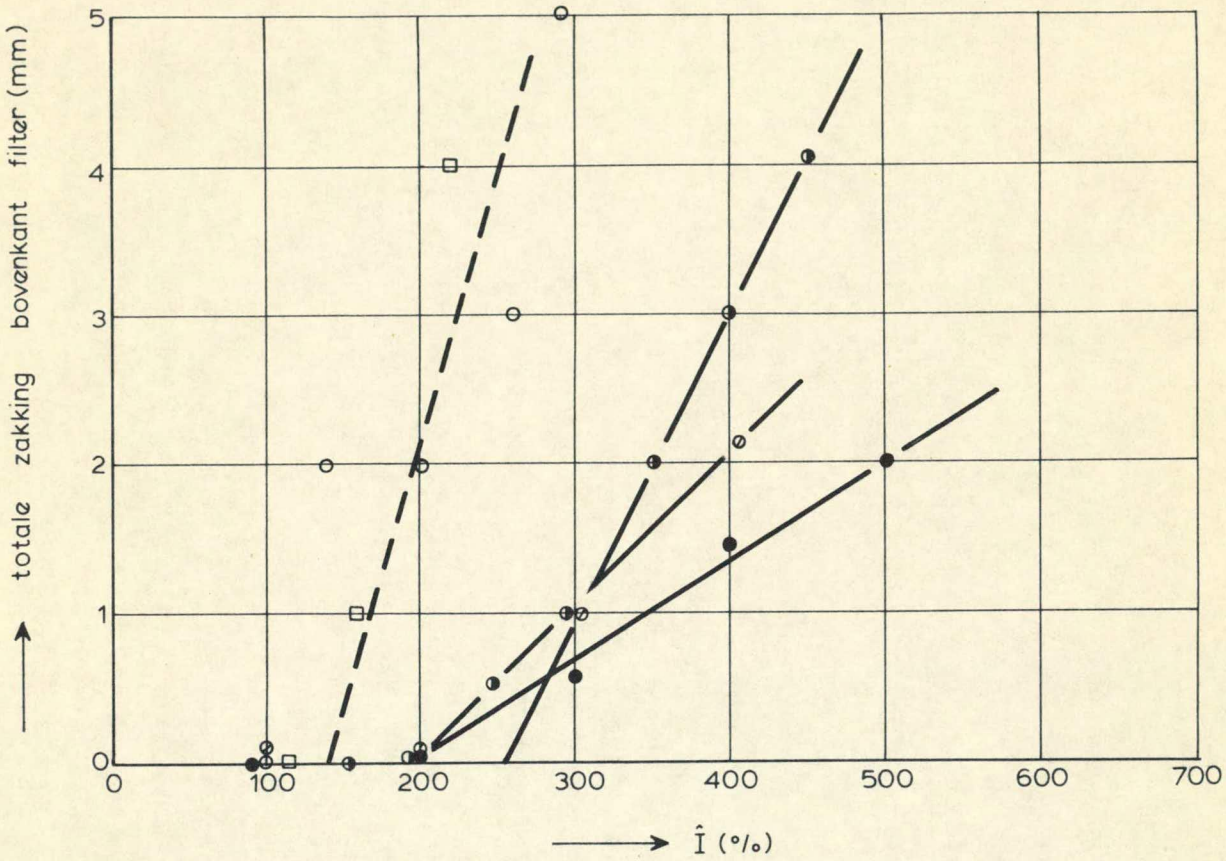
M 1488-II

FIG. 4



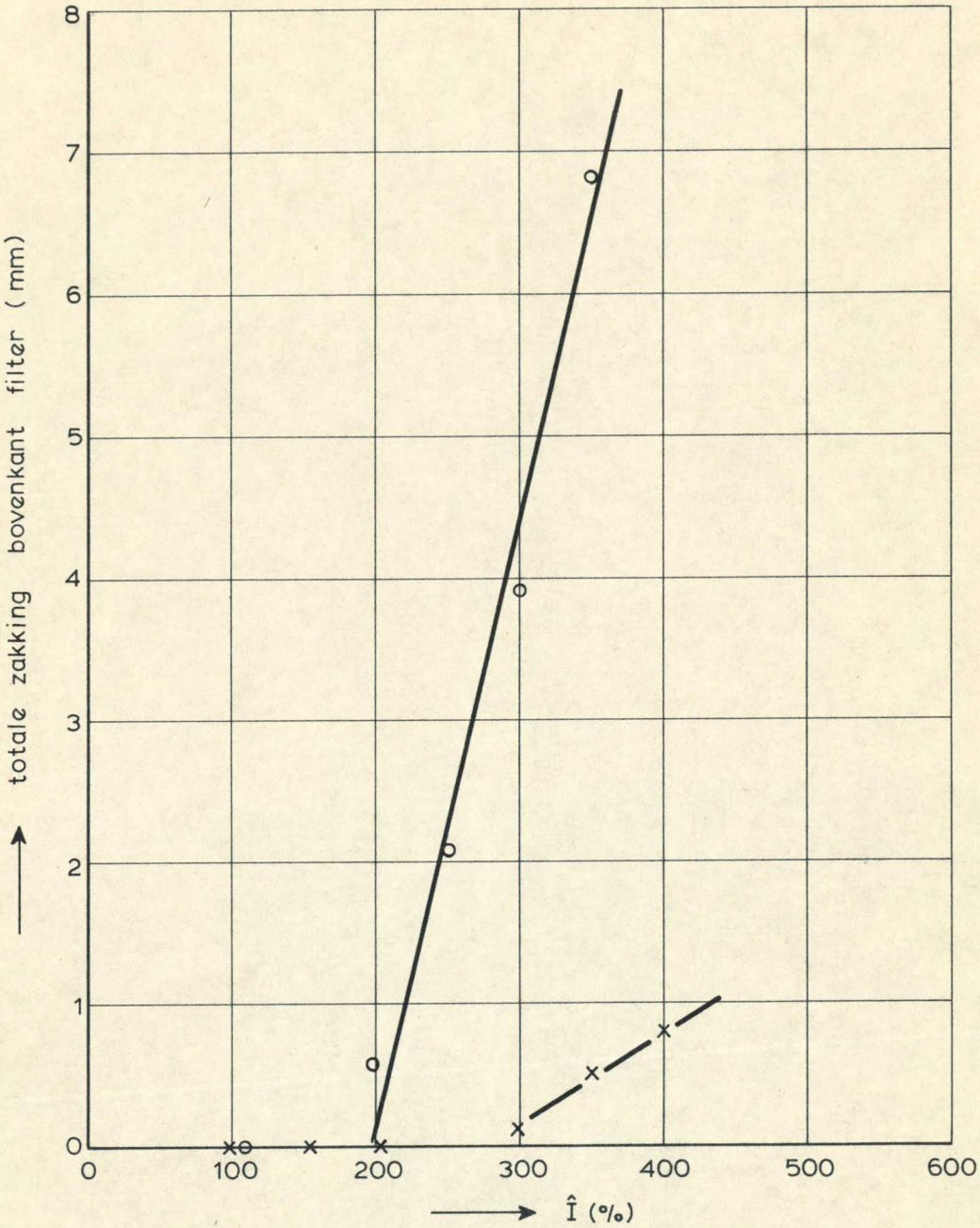




| | | |
|---|---|---|
| STABILITEIT WADZAND / FÜLLER MENGSEL | FILTERTON | T = 10 s |
| | STROMING ⊥ GRENSVLAK | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 5 |




□ ○ $\bar{I}$ = 0 % ( 2 proeven, onverdicht )
◑ $\bar{I}$ = 0 % (gedeeltelijk verdicht )
● $\bar{I}$ = 0 % (verdicht)
⊘ $\bar{I}$ = 0 % (vlies)

| | | |
|---|---|---|
| STABILITEIT<br>WADZAND/ VERDICHT FÜLLER MENGSEL | FILTERTON | T=10 s |
| | STROMING ⊥ GRENSVLAK | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 6 |

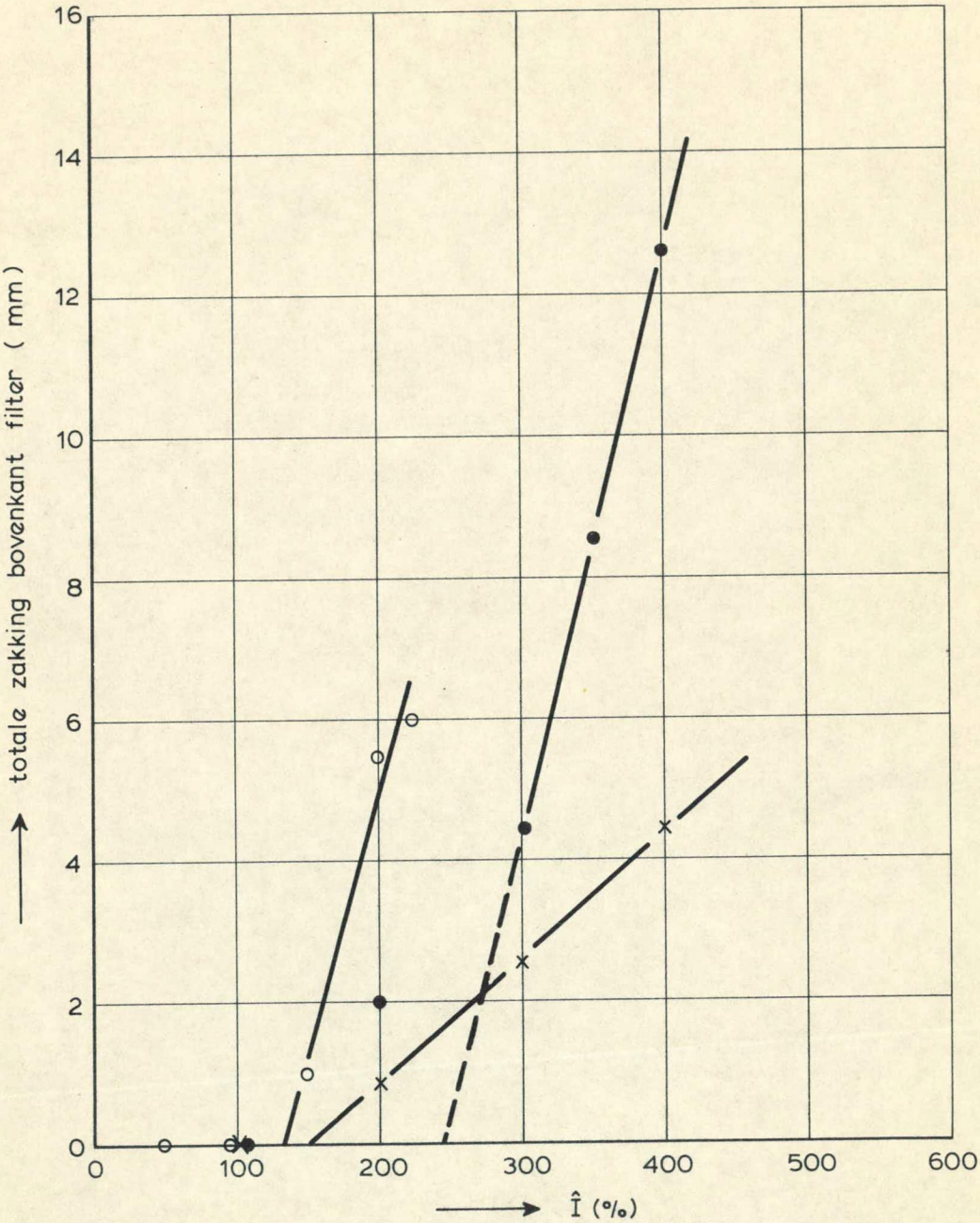



$\bar{I}$ = 0 %

o zanddichtheid

x hydraulische verdichting (met vlies)

| | | |
|---|---|---|
| STABILITEIT<br>WADZAND / OVERVULD FÜLLER MENGSEL | FILTERTON | T = 10 s |
| | STROMING ⊥ GRENSVLAK | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 7 |



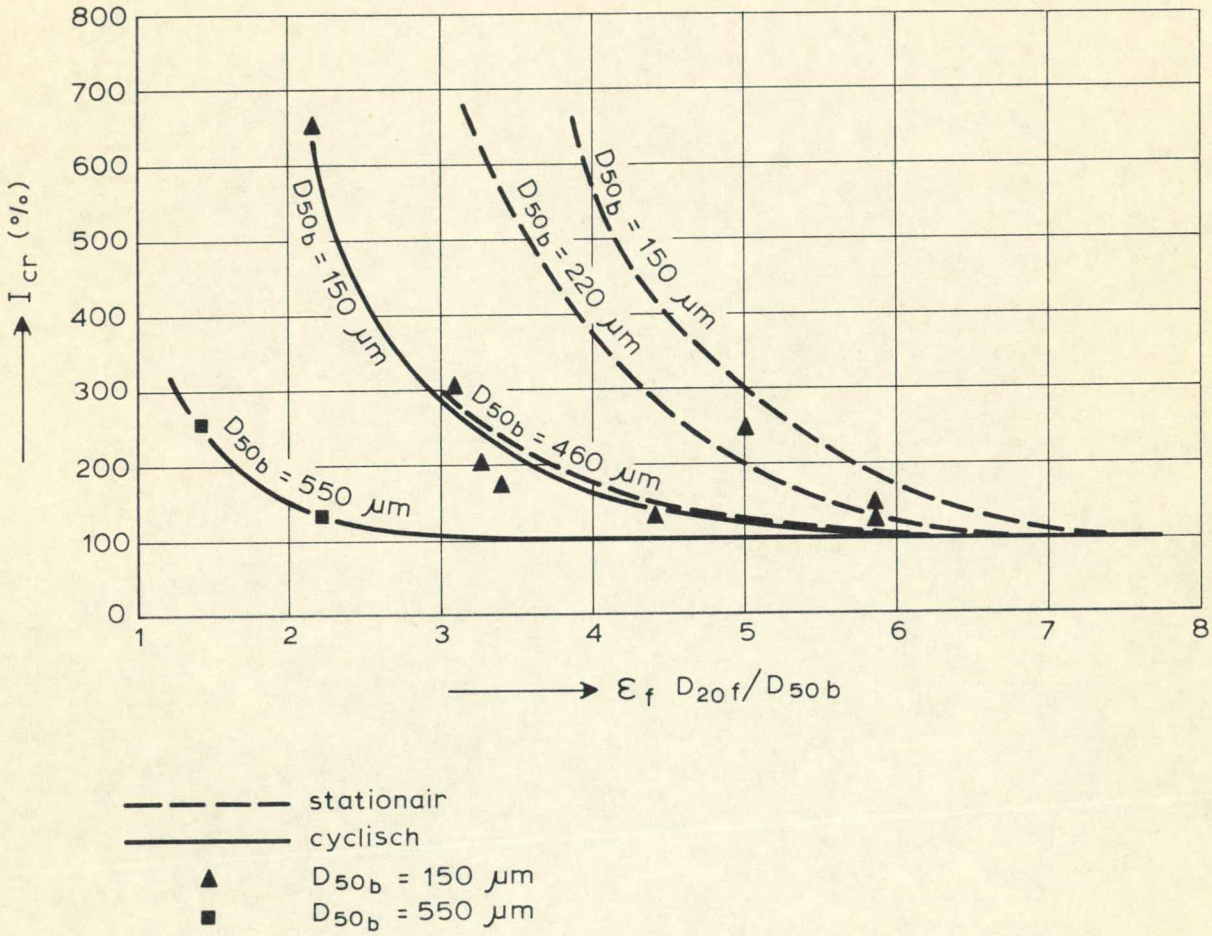

$\bar{I}$ = 0 %

● grof zand / Füller mengsel

o grof zand / afwijkend mengsel

x wadzand / grof zand

| | | |
|---|---|---|
| STABILITEIT<br>„ 2 - LAGEN - SYSTEEM " | FILTERTON | T=10 s |
| | STROMING ⊥ GRENSVLAK | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 8 |



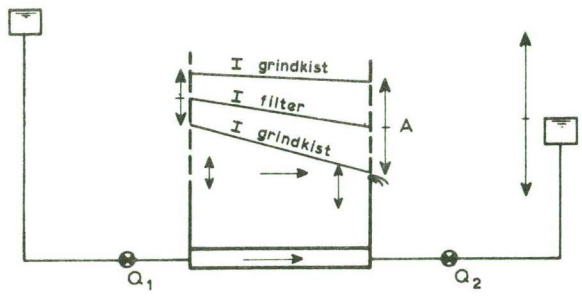

| | | |
|---|---|---|
| VERTIKALE KRITIEKE VERHANGEN | FILTERTON | |
| WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1488-II | FIG. 9 |

Bijlage: Cyclische verhangen in de Filterbak

Teneinde de mogelijkheden tot het uitvoeren van proeven met cyclische verhangen loodrecht op en evenwijdig aan het grensvlak te onderzoeken, zijn in de Filterbak enkele gidsproeven uitgevoerd.
Hoewel dit geen succes werd, wordt, ter voorkoming van herhaling van deze proeven in de toekomst, hier een kort verslag van deze poging gegeven.

Voor een toelichting op de proefopstelling in de Filterbak en de wijze van instellen van vertikale stationaire verhangen wordt verwezen naar paragraaf 3.2 van het verslag M1488, deel I.

In de uitgevoerde proeven werd steeds een stationair horizontaal verhang ingesteld en werd getracht een cyclisch vertikaal verhang daarop te superponeren. Om dit te bereiken werd in eerste instantie gedacht aan het op en neer bewegen van de benedenstroomse overstort-emmer teneinde het niveau A te doen variëren. Hierbij bleek dat de verhanglijn in de grindkist ($I_{grindkist}$) niet evenwijdig op en neer ging, waardoor de cyclische amplitude aan de benedenstroomse zijde van de Filterbak groter was dan aan de bovenstroomse zijde:

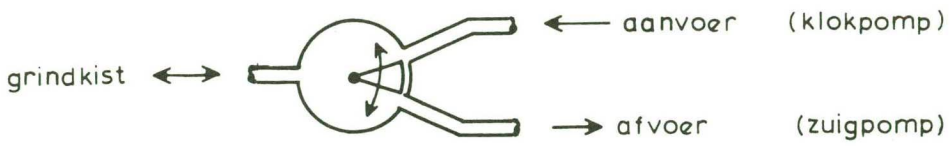



Door modeltechnische beperkingen waren de bereikte verhang-amplituden in het filterpakket beperkt (de amplitude van de overstort-emmer is veel groter dan de amplitude in het filterpakket).

Aangezien het bij dit systeem toch niet mogelijk bleek te zijn $I_{gr}$ evenwijdig aan $I_f$ te houden, werd besloten verder te gaan met constante hoogte van de overstort-emmer en cyclische sturing van een afsluiter $Q_2$. Dit had echter wel tot gevolg dat $I_{gr}$ nog meer variëerde, maar de grootste amplitude trad aan de benedenstroomse zijde van de Filterbak op, waar het getransporteerde basismateriaal wordt opgevangen, zodat toch een goede indruk kon worden verkregen van de invloed van (lokale) cyclische vertikale verhangen op de zanddichthied van het

filterpakket.
Uit de uitgevoerde proeven (waarbij afsluiter $Q_2$ met de hand werd bediend) bleek dat het niet mogelijk was grote negatieve vertikale verhangen (omlaag gerichte stroming) te verkrijgen, omdat de drukhoogte in de Filterbak onvoldoende was. Tevens waren de bereikte amplituden relatief klein (enkele tientallen procenten).

Hieruit werd geconcludeerd dat het systeem met een grindkist zich principieel niet leende voor dit soort proeven en dat moest worden overgestapt op een systeem analoog aan dat van de Filterton (zie figuur 2 in het verslag). De grindkist werd daarom leeg gemaakt, afsluiter $Q_1$ werd gesloten en afsluiter $Q_2$ werd door een 3-weg afsluiter vervangen:




Omdat de drukhoogte in de Filterbak te klein was om in een halve periode (5s.) voldoende water af te voeren werd een zuigpomp op de afvoerleiding aangesloten. Ook deze proefopstelling leverde weinig toepasbare resultaten op omdat er onvoldoende water kon worden afgevoerd (met andere woorden, het negatieve verhang in het basismateriaal was te klein). De oorzaak hiervan is dat over het gehele grensvlak (ca. 1 $m^2$)de onderdruk niet hoog genoeg kon worden opgevoerd.

Concluderend kan worden gesteld dat het niet mogelijk blijkt te zijn om in de Filterbak (voldoende) grote negatieve verhangen op te wekken waardoor zuiver cyclische vertikale verhangen(met amplitude groter dan ca. 50% in het wadzand) niet zijn in te stellen. Dit is in een kleinere proefopstelling wel mogelijk en er zou kunnen worden nagegaan of bijvoorbeeld in de Filterton horizontale verhangen zouden kunnen worden geïntroduceerd.

p.o. box 177 2600 mh delft the netherlands