

CONCEPT

NOTA : VERVOLG ONDERZOEK FILTERS

WERKGROEP DREMPEL ONTWERP

31DREO-N-78106

VAN : M.R. VAN DER DOES DE BYE

J. SWART

J.W. Vrijling

X

I N H O U D S O P G A V E

=====

		<u>Blz.</u>
<u>1.</u>	<u>Inleiding</u>	1
<u>2.</u>	<u>"Spoor A" filosofie</u>	2
2.1.	Inleiding	2
2.2.	Interactie tussen randvoorwaarden en materialen	2
<u>3.</u>	<u>Randvoorwaarden en belastingen</u>	3
3.1.	Vertaling van randvoorwaarden in uitwendige belastingen	3
3.2.	Vertaling van de uitwendige belastingen naar verhangen	3
3.2.1.	Inleiding	3
3.2.2.	Resultaten	4
3.2.3.	Kombinatie langs- en dwarsbelastingen	6
3.2.4.	Invloed parameters op cyclisch verhang	8
<u>4.</u>	<u>Sterkte</u>	10
4.1.	Inleiding	10
4.2.	Filterproeven	10
4.2.1.	Inleiding	10
4.2.2.	Spanningsverdeling in Tonnetje en prototype	11
4.2.3.	Resultaten van de filterproeven	13
4.3.	Literatuur onderzoek	13
4.3.1.	Inleiding	13
4.3.2.	Resultaten LGM studie	13
4.3.2.1.	Filtercriteria	13
4.3.2.2.	Interne stabiliteit	14
4.3.3.	Evaluatie WL proeven	16
4.3.3.1.	Stationaire stroming	16
4.3.3.2.	Cyclische stroming	18
4.4.	Interpretatie van de resultaten	19
<u>5.</u>	<u>Aanpak vervolg onderzoek</u>	21
5.1.	Analyse van de te onderzoeken facetten	21
5.2.	Onderzoek programma	22
5.2.1.	Interne stabiliteit	22
5.2.2.	Partiële veiligheidscoëfficiënten	22
5.2.2.1.	Belasting f_s	22
5.2.2.2.	Materiaaleigenschappen f_{m1}	23
5.2.2.3.	Spreading in sterkte eigenschappen f_{m2}	23
5.2.2.4.	Bezwijkgedrag f_c	23
5.2.3.	Uitwerking	23

1. Inleiding

Zoals bekend wordt in nota DREMBU-M-78023 (Eindrapport Drempelontwerp) voor het fundatiebed de oplossing, bestaande uit een laag grof zand van 0,3 - 1 à 2 mm en een laag gegradeerd materiaal van 0,3 - 32 mm voorgesteld (zie voor de korrelverdelingen bijlage 1). Voor de beoordeling van de filterwerking van deze oplossing was het noodzakelijk een groot aantal proeven uit te voeren, omdat in de literatuur niet of nauwelijks filterregels beschikbaar waren, die geldig waren voor de extreme belastingen (cyclische verhangen met amplituden tot circa 400 %), zoals die in het geval van de stormvloedkering waren berekend. Parallel aan dit fysisch modelonderzoek werd evenwel een uitgebreide literatuurstudie opgestart, teneinde meer inzicht te krijgen in hetgeen wel beschikbaar is en om het mechanisme beter te begrijpen. In deze nota worden deze activiteiten geëvalueerd en wordt tevens een aanpak voorgesteld, waarmee het ontwerp van het fundatiebed nader onderbouwd kan worden.

2. "Spoor A" filosofie

2.1. Inleiding

XX
In de semi-probabilistische benadering (spoor A) wordt uit de statistische beschrijving van de totaalbelasting (of potentieële bedreiging) een extreme belasting gekozen, die met in acht name van een aantal nader te definiëren veiligheidscoëfficiënten gelijk aan of kleiner dan de karakteristieke sterkte van de konstruktie dient te zijn. Deze marge tussen de rekenbelasting en de karakteristieke sterkte ^{dient} zo klein mogelijk ^{te} worden gehouden uit economische overwegingen. Wanneer het kostenniveau ongevoelig is voor variatie in deze marge, is deze optimalisering vanuit economisch standpunt bezien niet bijster zinvol.

2.2. Interaktie tussen randvoorwaarden en materialen

Uit de frequentie verdeling van de randvoorwaarden kan de kansverdeling van de uitwendige belastingen op de kering worden afgeleid. Na inventarisatie van de materiaalparameters en invoering van de belasting kunnen met behulp van de elementenprogramma's SEEP en SPONS de stationaire- (SEEP) en de cyclische verhangen (SPONS) in de drempel tussen de pijlers en onder de pijlers worden berekend. Uit de berekeningen blijkt dat de cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak, met name in het fundatiebed bij de randen van de pijlers, maatgevend zijn (globaal een faktor 2 groter dan de verhangen evenwijdig aan het grensvlak). Een komplikatie wordt veroorzaakt door het feit, dat de materiaalparameters (doorlatendheid, stijfheid) niet alleen de grootte van de belastingen (verhangen) beïnvloeden, maar tevens de sterkte (zanddichtheid, filterwerking) bepalen. Variatie in de grootte van de materiaalparameters beïnvloedt dus beide grootheden. De grootte van de partiële veiligheidscoëfficiënten kan op dit moment nog niet nader worden gekwantificeerd vanwege het ontbreken van voldoende gegevens. Dit laatste maakt het tevens onmogelijk uit te gaan van een volledige probabilistische benadering ("Spoor B") omdat de kansverdeling van de sterkte niet kan worden beschreven. De interaktie tussen randvoorwaarden en materialen is nader aangegeven in bijlage 2.

3. Randvoorwaarden en belastingen.

3.1. Vertaling van randvoorwaarden in uitwendige belastingen

Zoals reeds in 2. is gesteld kunnen de uitwendige belastingen afgeleid worden uit de frequentieverdeling van de natuurrandvoorwaarden via overdrachtsfuncties. Omdat voor het ontwerp van het fundatiebed de cyclische verhangen maatgevend zijn is vooral de overdrachtsfunctie van golven naar golfmomenten van belang. Deze is volledig bekend, zodat de kansverdeling van de éénmalig optredende golfmomenten volledig kan worden beschreven. Op bijlage 3 wordt aangegeven dat bij het in beschouwing nemen van een groter aantal golven het bijbehorende golfmoment snel reduceert (bij dezelfde overschrijdingskans). Op deze bijlage 3 worden tevens aantallen golfmomenten aangegeven, waardoor de zwaarst belaste pijler gedurende de levensduur van de kering (200 jaar) wordt belast. Voor de beoordeling van de filterwerking van een materiaal kunnen beide konstateringen aanzienlijke konsekwenties hebben, n.l. indien voor het "bezwijken" van het filtermateriaal een groot aantal belastingwisselingen met konstante amplitude is vereist. Hierop wordt in paragraaf 4.4. nader ingegaan.

3.2. Vertaling van de uitwendige belastingen naar verhangen.

3.2.1. Inleiding.

De cyclische waterspanning en daarmee de verhangen zijn berekend met het elementenprogramma SPONS. SPONS is een tweedimensionaal consolidatieprogramma, gebaseerd op de vergelijkingen van Biot. Het korrelskelet is lineair elastisch. Het water kan samendrukbaar worden genomen. Het programma maakt gebruik van eindige elementen in de twee-dimensionale ruimte en van directe integratie in de tijd. Over de elementen geldt een kwadratisch verloop van de verplaatsingen en een lineair verloop van de waterspanningen. De gradiënten van de waterspanning (verhangen) zijn dus konstant per element.

Als randvoorwaarden kunnen in de tijd variërende verplaatsingen of effectieve spanningen en debieten of waterdrukken worden voorgeschreven.

Berekend worden de waterspanningen (ten opzichte van een opgegeven referentieniveau), de verplaatsing van het korrelskelet en de effectieve spanning.

Bij de berekening wordt dilatantie niet in beschouwing genomen. Het effect hiervan op de grootte van de verhangen zal nog nader gekwantificeerd dienen te worden.

3.2.2. Resultaten.

Voor een uitgebreide beschrijving van de resultaten van de SPONS berekeningen kan worden verwezen naar de nota DREMBU-M-78023 (Eindrapport Drempelontwerp).

Resumerend kan gesteld worden, dat de verhangen aan NZ-zijde ca. 20% groter zijn dan aan de OS-zijde, t.g.v. de golfdoordringing en het verschil in stijfheid van het fundatiebed aan de NZ- en de OS-zijde.

De berekeningen zijn in de meeste gevallen uitgevoerd voor relatief dikke filterlagen (zie bijlage 4: laagdikte grof zand 1 m, laagdikte zeegrind 1,5 m). Het effect van de grootte van de laagdikten op de grootte van de verhangen dient nader bepaald te worden, met name voor dunne lagen (orde 0,25 m). (Zie 3.2.4.)

De op bijlage 4 aangegeven grootten van de verhangen zijn berekend voor de zwaarst belaste pijler (Roompot 17). Uit berekeningen en uit de Katsproef M2 blijkt dat de cyclische verhangen praktisch evenredig zijn met het golfmoment. Zodoende kan de reductie van de grootte van de verhangen worden gerelateerd aan de grootte van de golfmomenten voor de diverse belastinggroepen (zie bijlage 4). Hieruit blijkt dat de verhangen bij de minst belaste pijler een faktor 2 lager zijn dan bij de maximaal belaste pijler.

Verder zijn de verhangen bij 42 pijlers \gt 23% lager dan bij de maximaal belaste pijler (= Roompot 17).

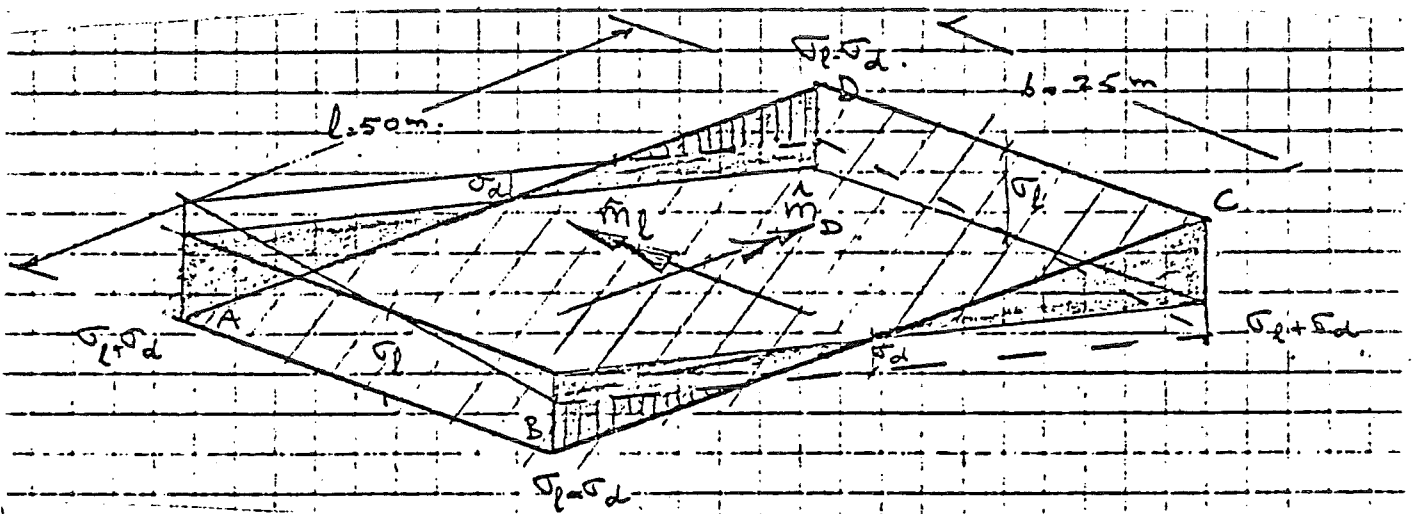
Naast de variatie van de verhangen over de sluitgaten kan tevens de variatie van de verhangen over de lengte van de pijlers worden aangegeven. Op bijlage 5 is dit voor de zwaarst belaste pijler (Roompot 17) weergegeven.

Uit de figuren blijkt dat de piekverhangen in een zeer beperkt gebied optreden. Op 10 meter uit de teen en 5 meter onder de teen zijn de verhangen al meer dan gehalveerd.

3.2.3. Kombinatie langs- en dwarsbelastingen

De invloed van de dwarsbelastingen op het cyclische verhang wordt berekend met de formule

$$\sigma_1 = \frac{M}{W} = \frac{M_1}{\frac{1}{6} b l^2} \quad \text{en} \quad \sigma_d = \frac{M_d}{\frac{1}{6} l b^2}$$



Met $b = 0,5 l$ volgt nu $\sigma_1 = 12 \frac{M_1}{l^3}$ $\sigma_d = 24 \frac{M_d}{l^3}$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_d}{\sigma_1} = 1 + 2 \frac{M_d}{M_1}$$

t.g.v. de dwarsbelasting wordt het verhang

$$2 \frac{M_d}{M_1} \text{ 100\% groter.}$$

Dat betekent dat t.g.v. het langs- en dwars-moment van de golf de cyclische verhangen per pijler kunnen worden bepaald uit

$$\frac{I \text{ Spons}}{M \text{ Spons}} (M_1 + 2 M_d)$$

De in bijlage 4 gegeven I Spons wordt nu:

groep	aantal pijlers	* verandering I aan O.S. in %	** I aan O.S. zijde %	
			zeegrind- grof zand	grof zand- ondergrond
I, IV	42	-42%/ + 8%	100-187	164-307
II	5	- 9%/ +21%	159-211	260-345
III	19	- 9%/ +32%	159-230	260-376

$$* I = \left(\frac{1 - M_1 + M_d}{M_{\text{spons}}} \right) 100\%$$

$$** I = \frac{I \text{ spons}}{M \text{ spons}} (M_1 + 2M_d)$$

- reductie

+ toename

Deze percentages zijn aan de hoge kant doordat:

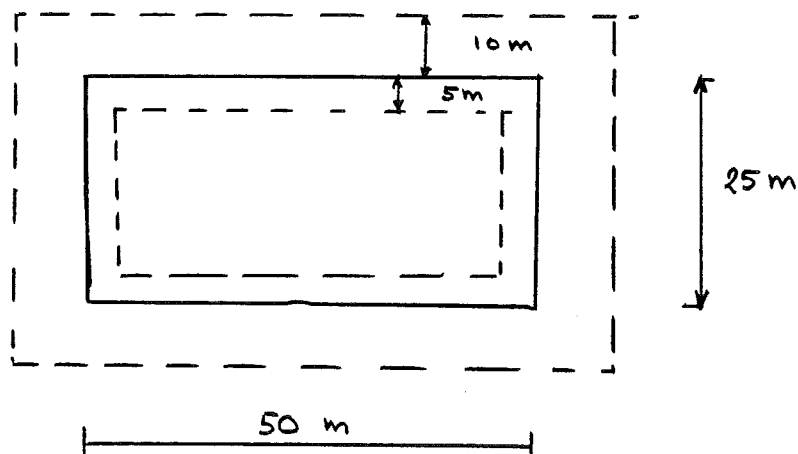
- a. aan de langszijde de drempel veel meer belasting zal opnemen dan aan de kopse wanden
- b. driedimensionale afstroming op een hoekpunt een grotere rol zal spelen.

Uit deze berekeningen blijkt dat een combinatie van dwars en langsbelasting grotere verhangen geeft dan alleen het geval langsbelasting (toename 30% voor de pijler met de minimale verhangen en 45% voor de pijler met de maximale verhangen).

De verhangen bij de minst belaste pijler zijn een faktor 2 lager dan bij de maximaal belaste pijler.

Verder zijn de verhangen bij 42 pijlers 23% lager dan bij de maximaal belaste pijler.

De piekverhangen treden in een zeer beperkt gebied op. Aangenomen kan worden dat op 10 meter uit de teen en 5 meter onder de teen rondom de pijler de verhangen al meer dan gehalveerd zijn (zie ook bijlage 5).



Wat betreft de piekverhagen kan nog worden opgemerkt dat bij een gering transport van fijn materiaal uit het basismateriaal in het filtermateriaal afvlakking van de verhagen optreedt door afvlakking van de doorlatendheid. Bij steile korrelverdelingen zal dit effect een minder grote rol spelen dan bij flauwe korrelverdelingen. Door verdichten zal bij los gestorte filters een overgangszone worden gecreëerd waardoor eveneens de piekverhagen worden gereduceerd.

3.2.4. Invloed parameters op cyclische verhang

De invloed hiervan is berekend met een één-dimensionale consolidatie som. Hierbij zijn de volgende aannamen gedaan:

- geen horizontale afstroming
- grondspanning (= watersp. + korrelsp.) is konstant over de hoogte.

De volgende berekeningen zijn uitgevoerd (zie eindrapport drempe-lontwerp DREMBU-M-78023):

- Toetsingsberekeningen aan 3 Sponsruns

De resultaten kwamen redelijk goed overeen, indien de in de ondergrond met Spons berekende maximale waterspanning als bovenbelasting werd aangebracht. Bij de drie Sponsberekeningen bleek deze maximale waterspanning konstant te zijn (run 3 zeegrind 2,5 m; run 4 zeegrind 1,5 m; grof zand 1 m; run 5 zeegrind 2,5 m)

grof zand 4 m). Op deze wijze is het tweedimensionale effect van Spons ingebracht. Voor laagdiktes die niet te ver van de met Spons beschouwde laagdiktes liggen kunnen op deze wijze betrouwbare verhangen berekend worden.

- Invloed elementhoogte

De in Spons gehanteerde elementhoogte van 50 cm op het grensvlak bleek voldoende te zijn.

- Invloed laagdikte

Uit de berekeningen blijkt dat de dikte van het zeegrind weinig invloed heeft op de grootte van het cyclische verhang van de scheidingslaag zeegrind - grof zand en iets meer invloed op de grootte van het verhang van de scheidingslaag grof zand - ondergrond (dikte zeegrind van 1 m naar 0,25 m toename verhang ongeveer op scheidingslaag grof zand - ondergrond 12%).

De dikte van het grof zand heeft veel meer invloed op het verhang op de scheidingslaag grof zand - ondergrond (dikte grof zand van 1 m naar 0,25 m toename verhang ongeveer 25% bij zowel 0,25 m als 1 m zeegrind).

- Invloed materiaalkonstanten

De volgende variatie in materiaalkonstanten is in beschouwing genomen:

$$K = \bar{K} (1 \pm 0,25)$$

$$k \text{ [m/s]}$$

- zeegrind	$5 \cdot 10^{-4} \leq k \leq 50 \cdot 10^{-4}$
- grof zand	$1 \cdot 10^{-4} \leq k \leq 10 \cdot 10^{-4}$
- ondergrond	$1 \cdot 10^{-5} \leq k \leq 12 \cdot 10^{-5}$

Om de maximale en de minimale cyclische verhangen te berekenen is uitgegaan van de meest ongunstige en de meest gunstige combinatie van materiaalkonstanten.

Voor laagdikten van 1,5 m zeegrind op 1 m grof zand en 2,5 m zeegrind op 4 m grof zand blijkt het verhang een factor 2 groter te kunnen worden bij een ongunstige combinatie en een factor 3 à 4 kleiner bij een gunstige combinatie.

4. Sterkte.

4.1. Inleiding.

Voor de nadere kwantificering van het begrip "sterkte" zijn criteria nodig.

Wordt een grensvlak tussen twee lagen beschouwd, dan zullen bij overschrijding van een bepaalde waarde van het verhang korrels van het basismateriaal de ruimtes tussen de korrels van het filtermateriaal indringen. Daarbij vullen korrels van het filtermateriaal de door de verplaatsing van de korrels van het basismateriaal achtergelaten ruimtes op. Bij een horizontaal grensvlak resulteert dit in een zakking van de bovenkant van het filtermateriaal, zodoende is zakking te relateren aan zandindringing en kan de zakking als criteria voor de sterkte van een filtermateriaal worden gehanteerd.

4.2. Filterproeven.

4.2.1. Inleiding.

Zoals reeds eerder is gesteld, was het noodzakelijk een groot aantal proeven de verrichten, omdat er geen ervaring was met de extreme verhangen zoals die in het fundatiebed kunnen optreden. Bij de proeven werd in eerste instantie uitgegaan van het gegradeerde, volgens de Fuller-kromme samengestelde, mengsel 0,3-32 mm. Later is overgegaan op de oplossing, waarbij een laag grof zand 0,3-1 à 2 mm tussen het holoceen en het "Fuller" mengsel 0,3-32 mm werd toegepast. De proeven zijn voornamelijk verricht in een drietal faciliteiten:

- De golftunnel.

In deze faciliteit kan het effect van cyclische stroming evenwijdig aan het grensvlak tussen twee lagen worden onderzocht, alsmede de interne stabiliteit van een materiaal onder cyclische omstandigheden.

- Cyclisch triaxiaalapparaat.

Hierin kan cyclische stroming loodrecht op het grensvlak,

gekombineerd met stationaire stroming evenwijdig aan het grensvlak worden onderzocht.

- Het Tonnetje.

In deze faciliteit kunnen stationaire en cyclische verhangen loodrecht op het grensvlak tussen twee lagen worden ingesteld. Tevens kan de interne stabiliteit van een materiaal onder stationaire en cyclische omstandigheden worden onderzocht.

In paragraaf 2.2. is reeds gesteld, dat het fundatiebed voornamelijk door cyclische stroming loodrecht op de diverse grensvlakken wordt belast.

Uit de resultaten van de proeven blijkt, dat de kritieke verhangen in het geval van stroming loodrecht op het grensvlak lager zijn dan in het geval van stroming evenwijdig aan het grensvlak.

Om deze reden wordt niet verder ingegaan op de resultaten van de golftunnelproeven.

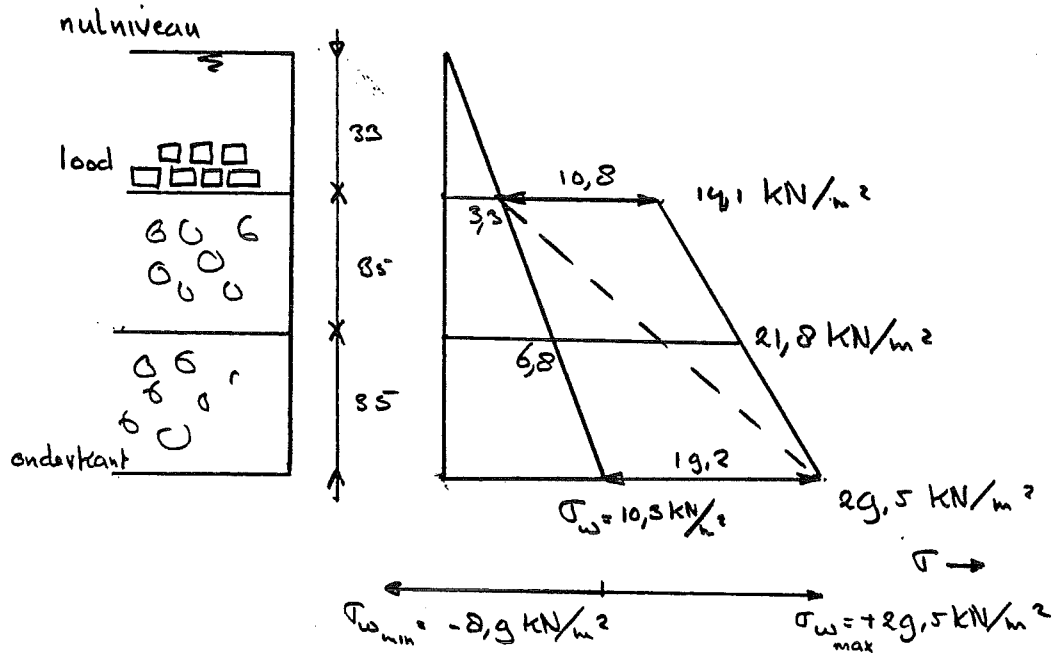
T.a.v. het cyclisch triaxiaalapparaat kan worden opgemerkt, dat in dit geval de grondspanning (celdruk) wordt gevarieerd zodat het materiaal in de cel net zoals in het prototype in feite "zelf" voor de verdeling van de grondspanning in korrel- en waterspanning zorg draagt. Dit in tegenstelling tot het tonnetje, waarin de waterspanning wordt gevarieerd. Een verhoging van de waterspanning heeft automatisch een verlaging van de korrelspanning tot gevolg, omdat de grondspanning konstant is. De spanningsverdeling in het triaxiaalapparaat is vanwege het axiale karakter buitengewoon gekompliceerd en een wiskundige beschrijving is nog niet operationeel.

Daarentegen is een wiskundige beschrijving van het spanningsverloop in het tonnetje wel mogelijk en reeds uitgevoerd. Zodoende kunnen de korrel- en de waterspanningen in het tonnetje vergeleken worden met die in het prototype.

4.2.2. Spanningsverdeling in tonnetje en prototype.

Wordt in het tonnetje het mengsel 0,3-32 mm over een hoogte

van 70 cm ingebouwd, dan wordt bij een bovenbelasting van 100 kg lood de spanningsverdeling (korrel- en waterspanning), uitgaande van een porositeit $\epsilon = 0,30$



Het cyclische verhang wordt verkregen door de waterdruk aan de onderzijde te variëren. Maximum hierbij is (wegens fluidisatie), $\sigma_w = 29,5 \text{ kN/m}^2$.

Gezien de grote doorlatend van het filtermateriaal is de drukverdeling over de hoogte op ieder tijdstip nagenoeg hydrostatisch. Op het grensvlak is de korrelspanning gelijk aan 15 kN/m^2 . Met deze opstelling is het maximale verhang gelijk aan $1,92/0,7 \approx 275\%$.

In het prototype zijn de gemiddelde korrelspanningen onder de teen $200\text{--}300 \text{ kN/m}^2$. Dit houdt in dat in het tonnetje de korrelspanningen globaal een factor 10 te laag zijn.

Hierdoor zullen de in het model gevonden waarden van de kritieke verhangen lager zijn dan in het prototype om vergroting van de korrelspanning (bijv. t.g.v. verdichten) een gunstig effect op de grootte van het kritieke verhang heeft.

Om de gevoeligheid hiervan af te tasten zouden proeven verricht kunnen worden met variabele bovenbelasting.

4.2.3. Resultaten van de filterproeven.

Tot op heden is het kritieke verhang gedefinieerd als het verhang, in het basismateriaal waarbij nog juist geen indringing van basismateriaal in het filtermateriaal dringt (zakking nul). De resultaten van de diverse proeven zijn weergegeven in bijlage 6. Hieruit blijkt, dat in geen van de faciliteiten het kritieke verhang I_{cr} voor het grensvlak holoceen-grof zand kon worden bepaald ($I_{cr} > I$ instelbaar = ca. 500%).

Daarentegen bleek het kritieke verhang voor het grensvlak grof zand-Fullermengsel qua order van grootte bij de met SPONS berekende waarde te liggen. Hieruit blijkt, dat de samenstelling van de twee filtermaterialen aangepast zou kunnen worden, zodat de marge (veiligheids coëfficiënt) tussen het optredende en het kritieke verhang voor de grensvlakken holoceen-grof zand en grof zand-Fullermengsel ongeveer even groot is. Dit zou bereikt kunnen worden door het grove zand enigszins grover te maken.

↓ 4.3. Literatuuronderzoek.

4.3.1. Inleiding.

Parallel aan de filterproeven is een uitgebreid literatuuronderzoek verricht. Hierbij is met name onderzocht, of in de literatuur filterregels beschikbaar zijn, die gelden voor cyclische omstandigheden. Deze studie wordt uitvoerig beschreven in de LGM nota "Aspekten van filters" zodat in deze nota slechts zal worden ingegaan op de resultaten van de studie. Daarnaast zijn de resultaten van de in het WL uitgevoerde filterproeven geëvalueerd.

4.3.2. Resultaten LGM studie.

4.3.2.1. Filtercriteria.

Een filter wordt als stabiel gedefinieerd, als deeltjes van de ene laag niet in de andere doordringen. In navolging van Terzaghi en Karpoff geven de meeste onderzoeken de criteria voor filterstabiliteit op door verhoudingen van bepaalde punten van de zeefkrommen te eisen. Naast criteria, die be-

trekking hebben op verhoudingsgetallen van de zeefkrommen moeten ook eisen gesteld worden aan de absolute afmetingen van de korrels. Dit wordt toegeschreven aan het feit, dat het aantal manieren, waarop kleine deeltjes tot stilstand gebracht kunnen worden, groter is dan voor grovere deeltjes. De discussie over dit fenomeen is nog niet afgerond. In de nota "Aspekten van filters" worden ontwerpcriteria voorgesteld, waarvan een deel verhoudingsgetallen van relevante punten van de zeefkromme geven, ("relatieve" filtercriteria), terwijl tevens een criterium voor de absolute afmetingen wordt beschreven ("absoluut" filtercriterium), (zie ook bijlage 7).

In formule vorm:

$$\frac{D60}{D10} > .415 \times \frac{D50}{D50} - 3.32$$

$$\frac{D60}{D10} > .941 \times \frac{D10}{D10} - 5.65 \quad \text{"relatieve" filtercriteria}$$

$$\frac{D60}{D10} > .4 \times \frac{D10}{D10} - 2.0$$

$$\log \left[\frac{D10}{D10} - 2 \right] < \frac{1.9}{\log \left[(D_{10}^* - 0.001) \times 10^3 \right]} \quad \text{"absoluut" filtercriterium}$$

Alle criteria zijn afgeleid uit de resultaten van filterproeven met stroming loodrecht op het grensvlak basismateriaal - filtermateriaal.

De bij de proeven ingestelde verhangen hadden voornamelijk een stationair karakter

4.3.2.2. Interne stabiliteit.

Naast de filtercriteria dient een filtermateriaal tevens te voldoen aan regels t.a.v. de interne stabiliteit. Bij ver-

lies hiervan kunnen korrels van een bepaalde afmeting door de filterlaag worden getransporteerd, wat zettingen ten gevolg kan hebben, maar bovendien de filterwerking nabij het grensvlak kan beïnvloeden. Vindt nl. in deze zone verlies van interne stabiliteit plaats, dan verdwijnen dus korrels van bepaalde afmetingen uit deze zone en kan de ontstane ruimte worden ingenomen door korrels van het basismateriaal.

Net als bij de criteria voor de stabiliteit van filters heeft men getracht de stabiliteit van een pakket grond zelf uit te drukken in karakteristieke getallen van de zeefkromme. (De uniformiteitscoëfficiënt $U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$:

Geen interne migratie	$U < 6 \text{ à } 10$
Mogelijk interne migratie (afhankelijk van de grootte van het verhang	: $10 < U < 20$
Interne migratie	: $U > 20$

Voor de interne stabiliteit zijn in voornoemd rapport criteria afgeleid waarbij een zeefkromme in elk willekeurig punt in tweeën wordt verdeeld waarna wordt gecheckt of dit filter voldoet aan de relatieve filtercriteria.

x Voor korrelverdelingen van de vorm $Pr(d) < \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^{\frac{1}{n}}$ is in bijlage 8 het verband aangegeven tussen $\frac{d_{min}}{d_{max}}$ en n. Uit deze bijlage blijkt, dat voor $n = 2$ (Fullerkromme) een minder gegradeerd mengsel kan worden toegelaten ($\frac{d_{min}}{d_{max}} = 0,1$) dan voor $n = 0,9$ ($\frac{d_{min}}{d_{max}} = 0,025$).

In het ontwerp van het fundatiebed wordt tot nu toe uitgegaan van een veel ruimer gegradeerd Fullermengsel

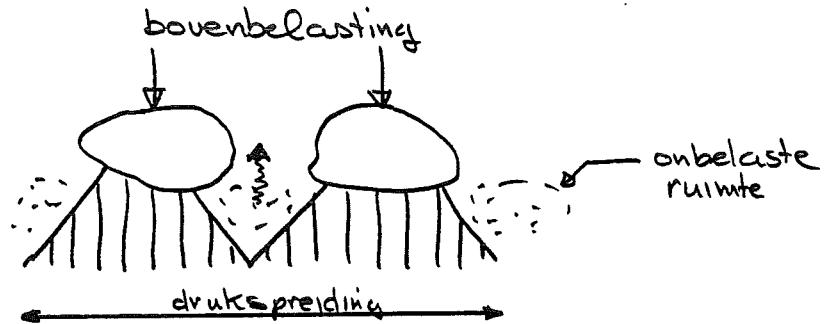
($\frac{d_{min}}{d_{max}} = 0,01$). Dit mengsel is dus niet onder alle omstan-

digheden intern stabiel.

4.3.3. Evaluatie WL proeven.

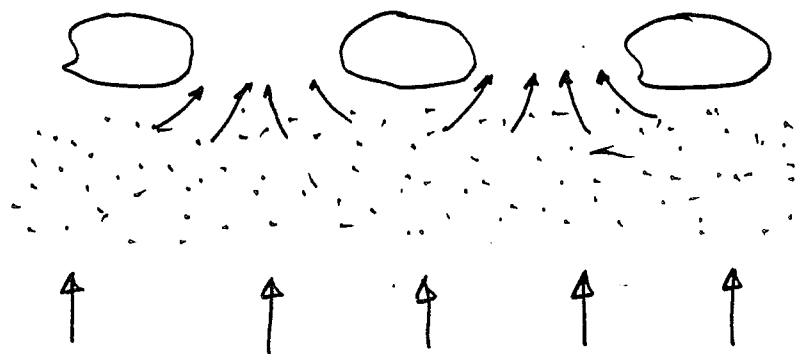
4.3.3.1. Stationaire stroming.

Tijdens het uitvoeren van de stationaire proeven in het tonnetje (vertikale stroming loodrecht op het grensvlak) werd opgemerkt dat zand-indringing in het (vrij grove) grind optrad bij een verhang van ca. 100% in het zand, welke onafhankelijk was van de bovenbelasting. Dit gaf aanleiding tot het definiëren van "lokale fluïdisatie" naast algehele fluïdisatie van het filterpakket. Deze lokale fluïdisatie van het zand kan ontstaan tussen de korrels van het grind:



In de onbelaste ruimten geldt een fluïdisatiegrens $I_{FI} \approx 100\%$. Bij het bereiken van dit verhang zullen zandkorrels opstijgen in de poriën van het grind en door de hoge bovenbelasting zal het afschuiven onder de grindkorrels plaatsvinden zodat het proces zich voort kan zetten.

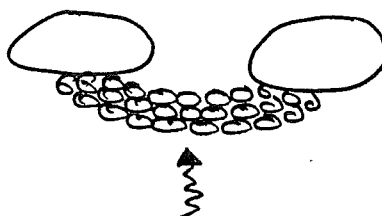
Ten gevolge van verhang-konsentraties in de omgeving van het grensvlak, kan de lokale fluïdisatie aldaar optreden als het gemiddelde verhang in het basismateriaal kleiner is dan 100%:



Uit de bovenstaande veronderstelling dat lokale fluïdisatie de oorzaak is van het stabiliteitsverlies bij verticale stroming loodrecht op het grensvlak volgt dat het kritieke verticale verhang altijd gelijk is aan ca. 100% als de poriën van het filtermateriaal voldoende groot zijn ten opzichte van de doorsnede van de korrels van het basismateriaal.

Bij de verhouding $D_{20f}/D_{50b} < 6$ wordt indringing fysisch onmogelijk (eerder verricht onderzoek, M 898), zodat daarbij zeer hoge verticale verhangen toelaatbaar zijn.

Er bestaat dus een gebied (ca. $6 < D_{20f}/D_{50b} < ca\ 15$) waarin het kritieke verticale verhang afneemt van zeer groot tot 100%. In dit gebied wordt verondersteld dat de stabiliteit van het granulaire filter wordt verzekerd door boogvorming van korrels van het basismateriaal tussen de korrels van het filtermateriaal:



Bij bogen geldt dat de uniform verdeelde bezwijkbelasting omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de overspanning. In het geval van granulaire filters zou het verhang in het basismateriaal als uniform verdeelde belasting kunnen worden gezien, en de verhouding D_{20f}/D_{50b} zou als maat voor de overspanning kunnen worden aangehouden. Dan volgt:

$$I_{cr} \quad :: \quad \frac{1}{\left(\frac{D_{20f}}{D_{50b}}\right)^n}$$

bij parabolische bogen geldt $n = 2$.

In de bovenstaande beschouwingen is steeds de korreldiameter als karakteristiek voor het filtermateriaal aangehouden, maar in werkelijkheid is de grootte van de poriën in het filter-

materiaal maatgevend: eigenlijk zou de verhouding $\epsilon \frac{D_{20f}}{D_{50b}}$ moeten worden gehanteerd. Dit wordt met name duidelijk wanneer het filtermateriaal wordt verdicht (dan neemt de porositeit ϵ , vooral bij gegradeerd filtermateriaal, meestal sterk af).

Ingeval van boorvorming tussen de grindkorrels zal het kritieke verhang bij verdicht filtermateriaal sterk toenemen ten opzichte van onverdicht filtermateriaal omdat enerzijds de overspanning van de bogen kleiner wordt en anderzijds de oplegpunten van de boog (de grindkorrels) vaster komen te liggen.

Een nabeschouwing van de resultaten van eerder verricht onderzoek (M 898) toonde aan dat een hyperbolsiche relatie voor het kritieke verhang is aan te geven met asymptoten op $I_{cr} = 100\%$ en $\frac{D_{20f}}{D_{50b}} = 6$ (bijlage 9).

Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze figuur uitsluitend geldt voor het onderzochte basismateriaal met $D_{50} = 460$ μm . Om een algemeen geldende relatie te verkrijgen moeten tevens andere eigenschappen van het basismateriaal in rekening worden gebracht.

WL stelt voor om de korreldiameter (of bij kleine diameters de valsnelheid van de korrels) in rekening te brengen. (zie bijlage 9).

4.3.3.2. Cyclische stroming.

Dynamische omstandigheden blijken zeer ongunstig te zijn voor de stabiliteit van granulaire filters. Een verklaring hiervoor volgt uit de hypothese dat in het algemeen de stabiliteit van het basismateriaal onder het filtermateriaal het gevolg is van boogvorming. Onder dynamische 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 ge-

richt (omdat een boog bestaande uit losse elementen geen trekspanning kan opnemen).

Op bijlage 10 zijn tevens de resultaten van de uitgevoerde proeven met dynamische verhangen weergegeven. Hieruit blijkt dat de voor stationaire stroming geldende relatie wordt verschoven naar kleinere waarden van $\epsilon \cdot d_{20f}/D_{50b}$ (faktor 2 à 2,5), de vorm van de kromme blijkt echter gehandhaafd te blijven (voor zover dit is af te leiden uit het beperkt aantal proeven).

4.4. Interpretatie van de resultaten.

Een nadere beschouwing van de bijlagen 9 en 10 leert, dat de spreiding rondom de door WL aangegeven relatie tussen $W I_{cr}$ en $\epsilon \cdot d_{20f}/D_{50b}$ aanzienlijk is.

Op bijlage 11 zijn de resultaten van de filterproeven van het WL uitgezet op de grafieken, die de "LGM" relaties weergeven. Hieruit blijkt dat de LGM relaties niet eenduidig genoemd kunnen worden.

Hierdoor kan voor het ontwerp van het fundatiebed niet volledig worden uitgegaan van de op bijlagen 7 t/m 10 uitgezette filterregels. Deze regels dienen nader onderbouwd te worden met de resultaten van fundamenteel filteronderzoek.

In paragraaf 4.2.3. is reeds vermeld, dat op grond van de filterproeven gekonkludeerd kan worden, dat het grove zand enigszins grover zou kunnen worden genomen om een evenwichtiger opbouw van het fundatiebed te verkrijgen.

Daarnaast werden in paragraaf 4.3.2.2. vraagtekens gezet bij de interne stabiliteit van het Fullermengsel.

Overigens kan worden opgemerkt, dat de in de WL proeven gevonden waarden van het kritieke verhangen nader beschouwd dienen te worden:

- er in de meeste gevallen gewerkt is met min of meer onverdichte materialen

- er gedurende een bepaalde tijdsduur een cyclisch verhang met een konstante amplitude is ingesteld, zodat de onderzochte grenslagen bloot zijn gesteld aan een wisselende belasting met konstante amplitude. In paragraaf 3.1 is reeds aangegeven, dat wanneer een aantal golven wordt beschouwd, het bijbehorende golfmoment snel reduceert.

De met SPONS berekende verhangen zijn gebaseerd op een eenmalig golfmoment met een overschrijdingsfrequentie van $2,5 \times 10^{-4}$ /jaar en de experimenteel bepaalde kritieke verhangen zijn gerelateerd aan de bijbehorende (hoge) waarden van de optredende verhangen.

Daarnaast dient het uitgangspunt voor de definitie van het kritieke verhang, nl. zakking nul ter discussie gesteld te worden. De definitie van het kritieke verhang dient gerelateerd te worden aan de toelaatbare deformaties.

Hiervoor is het noodzakelijk meer inzicht te krijgen in het bezwijkgedrag van de diverse filtermaterialen.

Gekonkludeerd kan worden dat de tot op heden gehanteerde onderzoekstrategie leidt tot relatief lage waarden van het kritieke verhang.

5. Aanpak vervolgonderzoek

5.1. Analyse van de te onderzoeken facetten

Het vervolgonderzoek dient zodanig opgezet te worden, dat de partiële veiligheidscoëfficiënten nader gekwantificeerd kunnen worden. Hiertoe dient onderzoek verricht te worden naar:

- 1 De overdrachtsfunctie, die het verband legt tussen de kansverdeling van de randvoorwaarden en de kansverdeling van de belastingen (verhangen). Deze overdracht wordt m.b.v. het mathematisch model SPONS bepaald m.b.v. de ééndimensionale meerlagen konsolidatieberekeningen. De mate van representativiteit, gevoeligheid voor variatie van materiaalparameters dient gekwantificeerd te worden. (Partiële veiligheidscoëfficiënt f_s)
- 2 De sterkte van een filtermateriaal dient nader onderzocht te worden. Er dient met name inzicht verkregen te worden in het bezwijkgedrag van de diverse materialen, zowel als functie van de tijd bij konstant verhang als als functie van het verhang bij konstante tijd. (Partiële veiligheidscoëfficiënt f_c)
- 3 De te verwachten spreiding in de materialen t.g.v. levering en uitvoeringsonnauwkeurigheden. In feite dient de kansverdeling van de zeefkrommes bepaald te worden.
Het effect van afwijkingen van de in het ontwerp aangegeven zeefkrommes t.g.v. spreiding in materialen t.g.v. levering en uitvoeringsonnauwkeurigheden op zowel de belastingen als de sterkte dient te worden onderzocht. (Partiële veiligheidscoëfficiënt f_{m1})
- 4 Tenslotte dient de representativiteit van het fysisch model nader te worden gekwantificeerd. Facetten hierbij zijn:
 - de juiste weergave van de korrel en waterspanning in het model
 - de reproduceerbaarheid
 - de nauwkeurigheid(Partiële veiligheidscoëfficiënt f_{m2})

X
wee?

X

5.2. Onderzoekprogramma

5.2.1. Interne stabiliteit

In paragraaf 4.3.2.2 wordt aangegeven, dat het Füllermengsel niet "absoluut" intern stabiel is, dat wil zeggen bij overschrijding van een bepaalde waarde van het verhang zou het mengsel zijn interne stabiliteit kunnen verliezen.

Wanneer om deze reden een steilere zeefkromme toegepast zou moeten worden, kan dit leiden tot een extra filterlaag (in de oplossing van de nota DREMBU-M-78023 bestaat het fundatiebed uit drie lagen tussen het holoceen en steen 10/60 kg, te weten grof zand, het Füllermengsel en grind 50/200 mm).

Het is dan ook van groot belang meer algemeen inzicht te krijgen in de interne stabiliteit van mengsels.

Om deze reden wordt voorgesteld in eerste instantie een min of meer systematisch onderzoek naar de interne stabiliteit van mengsels te verrichten. Met de resultaten van het onderzoek kan aangetoond worden, of de regels t.a.v. de interne stabiliteit, zoals weergegeven op bijlage 8 geldig zijn.

Om een directe koppeling met het ontwerp te blijven maken dient van voor het ontwerp relevante korrelverdelingen te worden uitgegaan (bijvoorbeeld het Füllermengsel 0,3 - 32 mm). Met de resultaten van het onderzoek dient tevens het aantal lagen te worden vastgesteld.

Vervolgens kan onderzoek ten behoeve van de bepaling van de partiële veiligheidscoëfficiënten worden aangevangen.

5.2.2. Partiële veiligheidscoëfficiënten

5.2.2.1. Belasting f_g

Voor de materiaalparameters k en E worden voor de verschillende lagen de gemiddelde waarde en de standaardafwijking bepaald. Met behulp van de golfbelasting kunnen nu verhangen berekend worden over de grenslagen. Deze verhangen worden uitgedrukt in een gemiddeld verhang en een standaardafwijking. Aldus kunnen karakteristieke waarden voor de cyclische verhangen bepaald worden bij een zekere belasting. Deze belasting kan worden be-

rekend aan de hand van het criterium indringing, indien enige zandindringing is toegestaan. (Dit hangt samen met het bezwijkgedrag van de filtermaterialen en de gevolgen hiervan voor de kering, zie ook 5.2.2.4.) Dit geldt zowel voor de interne stabiliteit van een (ruim) gegradeerd materiaal als voor de stabiliteit van het grensvlak tussen twee materialen. Bij een bepaalde amplitude zal een langere golfperiode meer indringing geven en bij een zelfde golfperiode zal een grotere amplitude meer indringing geven. Met behulp van een mathematische beschrijving van indringing zullen uit een storm significante golven worden bepaald.

5.2.2.2. Materiaaleigenschappen f_{m1}

De afwijkingen van de materialen t.g.v. spreiding in de levering in de levering en de uitvoeringsonnauwkeurigheden (de kansverdeling van de zeefkrommes) dienen bepaald te worden, alsmede het effect hiervan op de sterkte.

5.2.2.3. Spreiding in sterkte eigenschappen f_{m2}

Hiervoor kan in eerste instantie verwezen worden naar paragraaf 4.2.2. T.a.v. de reproduceerbaarheid kan worden opgemerkt, dat hier tot op heden nog geen aandacht is geschonken. Bij vervolgonderzoek zullen de proeven in principe twee maal worden herhaald.

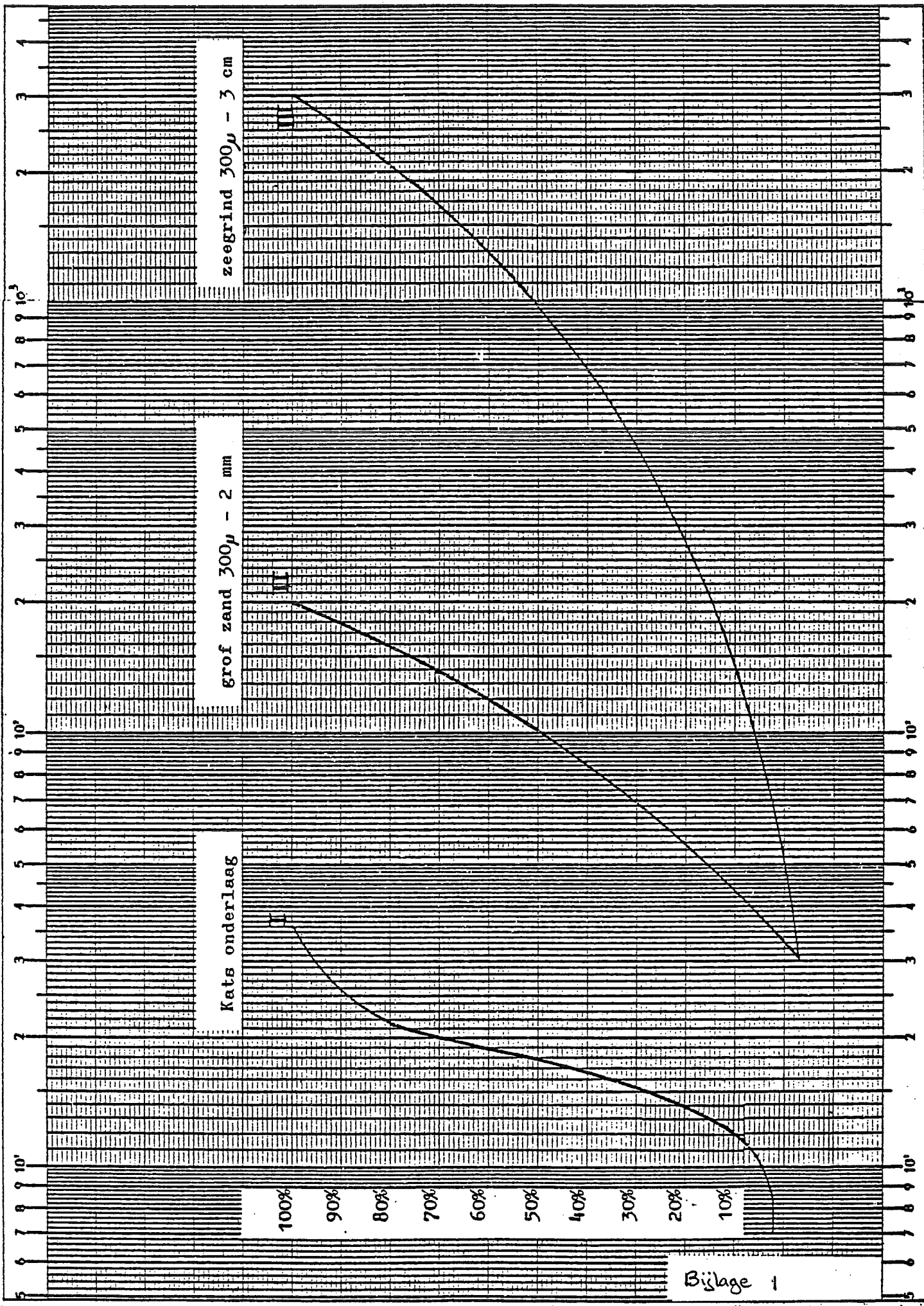
5.2.2.4. Bezwijkgedrag f_c

Hiervoor dienen voor de diverse materialen proeven verricht te worden naar het bezwijkgedrag. Het effect van het bezwijken (wijzigingen in doorlatendheid, poriëngehalte) op de grootte van de belastingen (verhagen) dient steeds m.b.v. SPONS of de ééndimensionale berekeningen te worden nagegaan, teneinde de grootte van de pariële veiligheidscoëfficiënt exakt te kunnen kwantificeren.

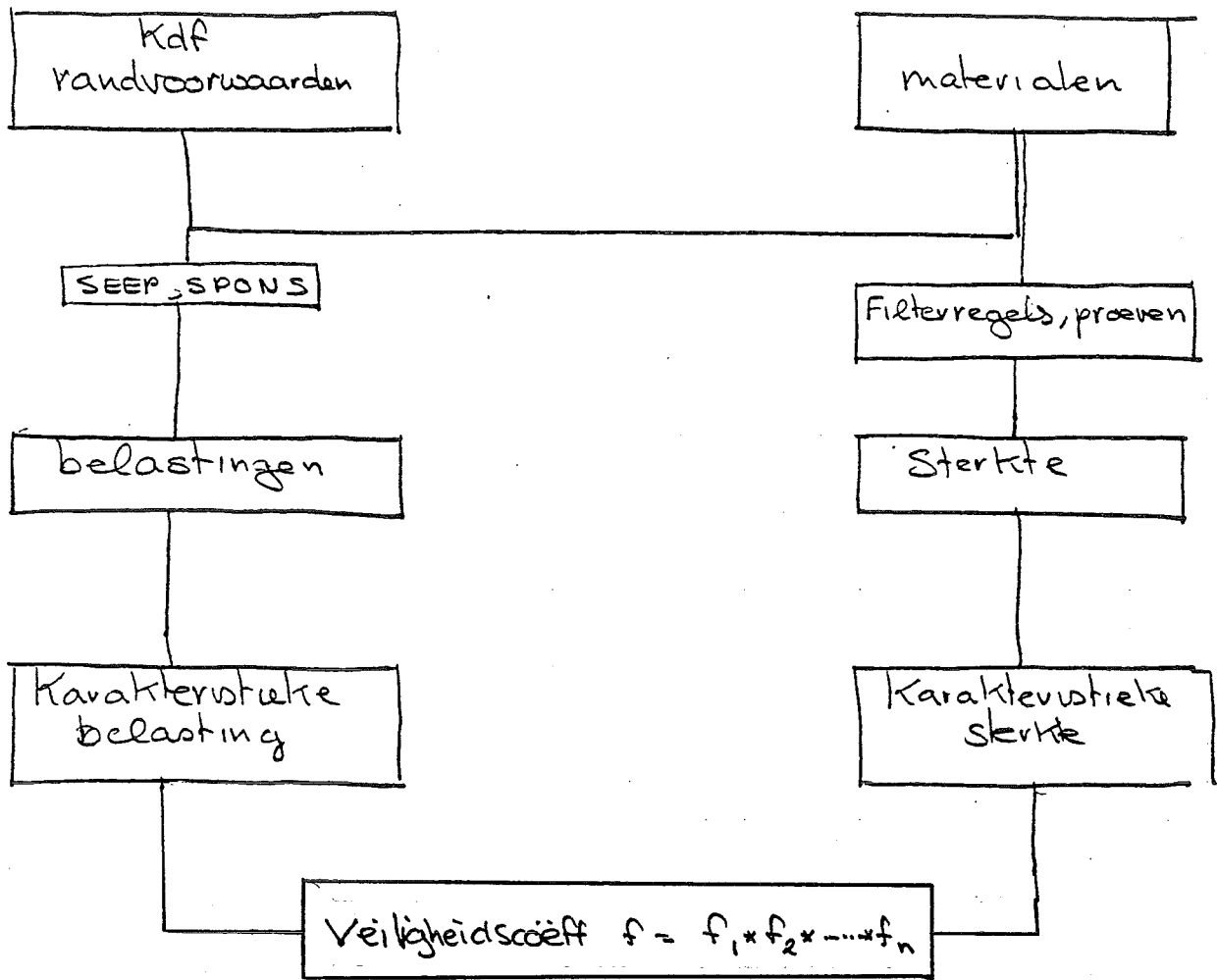
5.2.3. Uitwerking

Op grond van de in de vorige paragrafen beschreven aspecten dient het onderzoekprogramma te worden opgesteld. Dit dient in overleg met de onderzoeksinstituten te gebeuren, met als resultaat een

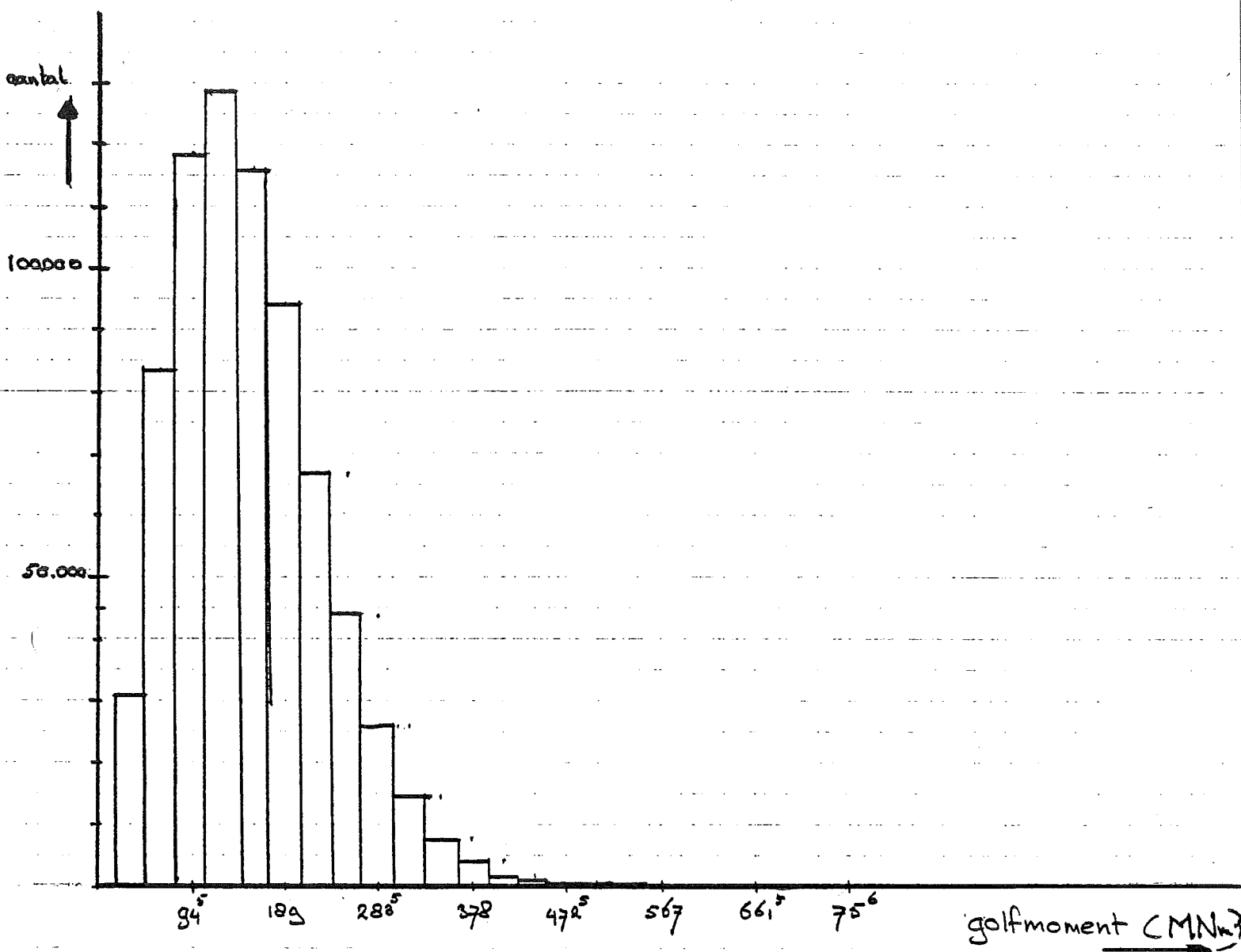
planning en een raming van de aan het onderzoek verbonden kosten. Bij een uitgebreid onderzoek kan het aantrekkelijk zijn i.v.m. de duur van het onderzoek een tweede faciliteit, waarin filteronderzoek (stroming \perp grensvlak) verricht kan worden, te bouwen.



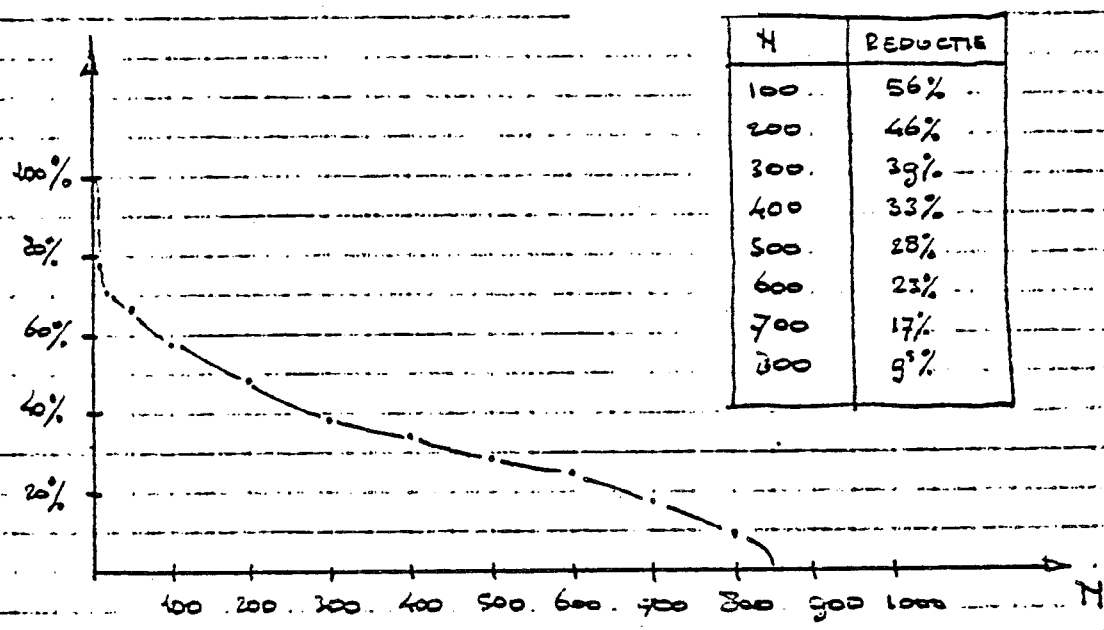
Bijlage 1



bijlage 2 "Spoor A" benadering

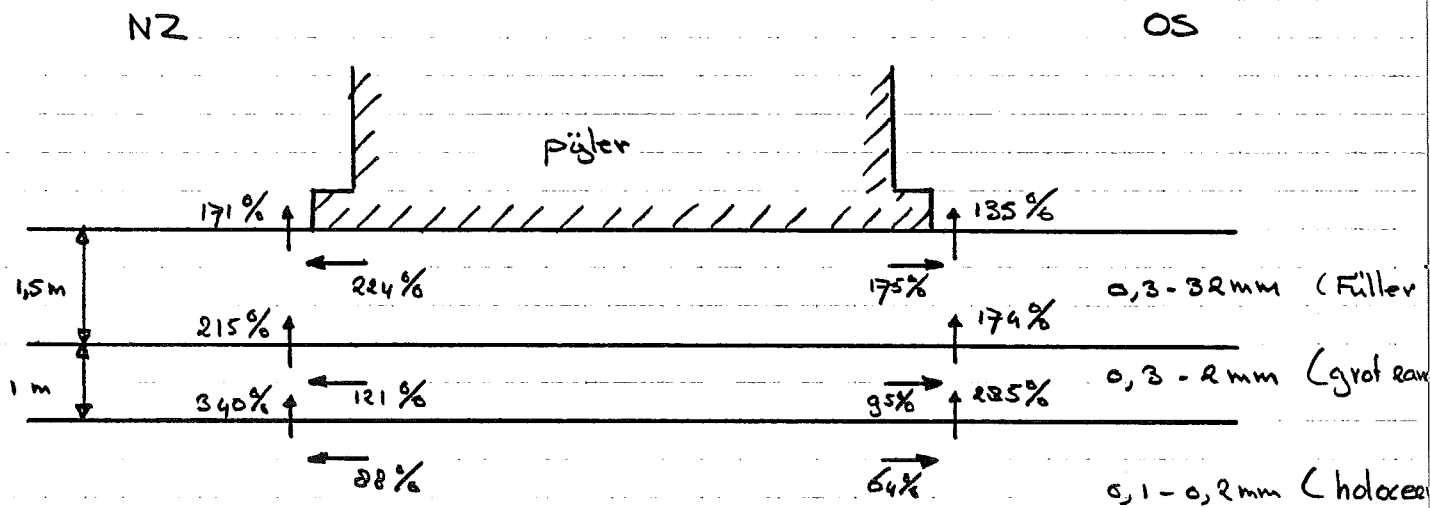


Histogram golfmomenten R 17 gedurende 200 jr.



N	REDUCTIE
100	56%
200	46%
300	39%
400	33%
500	28%
600	23%
700	17%
800	9%

Reduktie golfmoment als funktie van het aantal belastingwisselingen.



Cyclische verhangen Roompat 17 (M = 979 MNm)

groep	aantal pijlers	reduktie l (in %)
I, IV	42	30-57
II	5	18-24
III	19	9-16

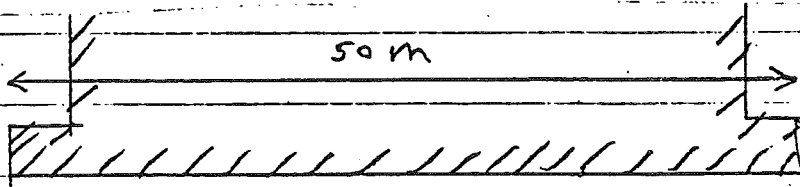
Variatie verhangen over de sluitgaten

over (best 19)
 2/10/19

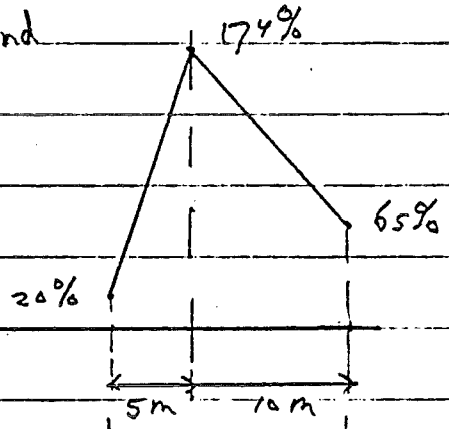
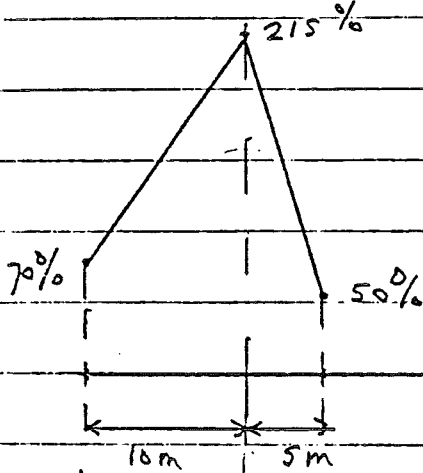
N2

50 m

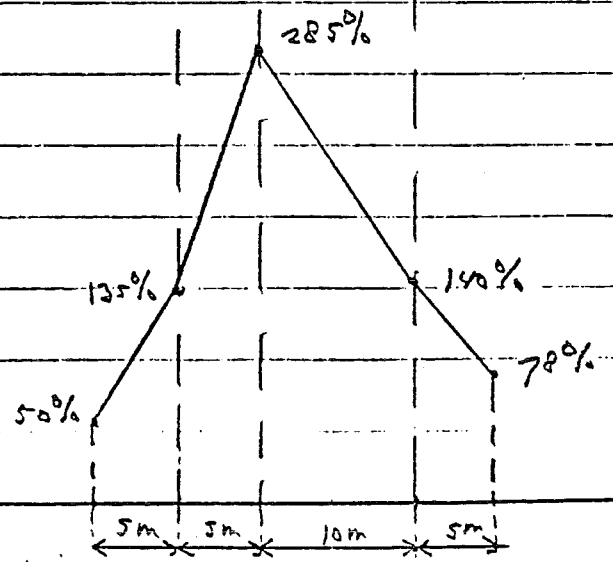
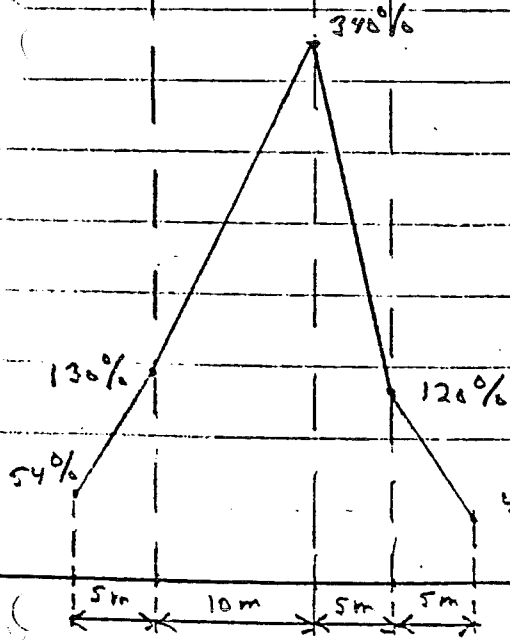
05



1,5 m zeegrond
op 1 m grof zand



zeegrond - grof zand



grof zand -
ondergrond

lit %?

Bijlage 5

Variatie verhangen in lengterichting.
oude de pylon?

\bar{I}_{cr} (%)	I_{acr} (%)	T (s)	D_{50} (mm)	D_{50} (mm)	perc. D = 1 mm (%)	porosi- teit ϵ (%)	Opmerkingen	Opstelling	- : niet relevant * : niet gemeten
> 450	-	-	-	ca 10	ca 8	*	Füller-mengsel	Tonnetje	Stationaire interne stabiliteit
ca 500	-	-	0,15	ca 10	ca 8	32-35	Füller-basis	Tonnetje	Stationaire zanddichtheid
100-150	-	-	0,15	ca 10	0	34,5	Afwijkend Füller-basis	Tonnetje	Stationaire zanddichtheid
0	140	10	0,15	6-10	5-12	32-35	Füller-basis	Tonnetje	
100	120	10	0,15	10	3	31,3	Füller-basis	Tonnetje	Systematisch onderzoek cyclische zanddichtheid.
200	145	19	0,15	*	*	*	Füller-basis	Tonnetje	
400	175	10	0,15	10	6	27,8	Füller-basis	Tonnetje	Vlies op grensvlak
0	200	10	0,15	7	3	*	Füller-basis	Tonnetje	verdicht filtermat.
0	250	10	0,15	6	11	27,0	Füller-basis	Tonnetje	Zanddichtheid 2-lagen systeem
0	250	10	0,60	6	8	*	Füller-grofzand	Tonnetje	
0	130	10	0,60	8	0	38,0	Afwijkend mengsel-grofzand	Tonnetje	
0	> 400	10	0,15	0,60	100	*	Grofzand-basis	Tonnetje	
0	180	10	0,15	8	19	18,9	Overvuld Füller basis	Tonnetje	Zanddichtheid overvuld Füller-mengsel
0	> 400	10	0,15	*	*	*	Overvuld Füller basis	Tonnetje	Vlies op grensvlak

Resultaten

Filteronderzoek

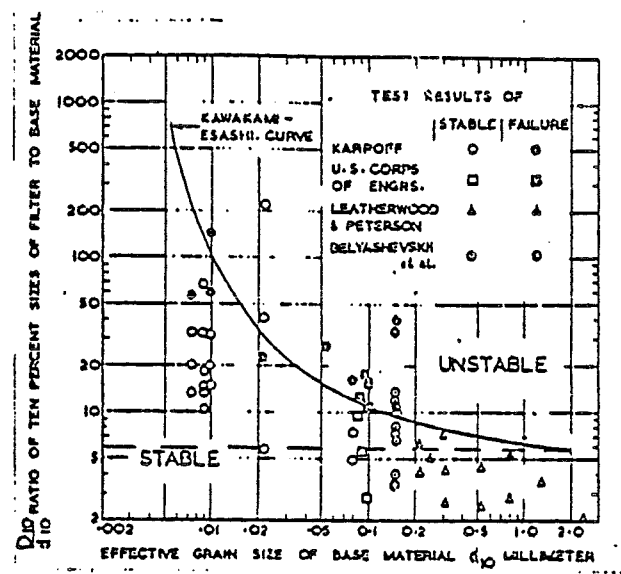
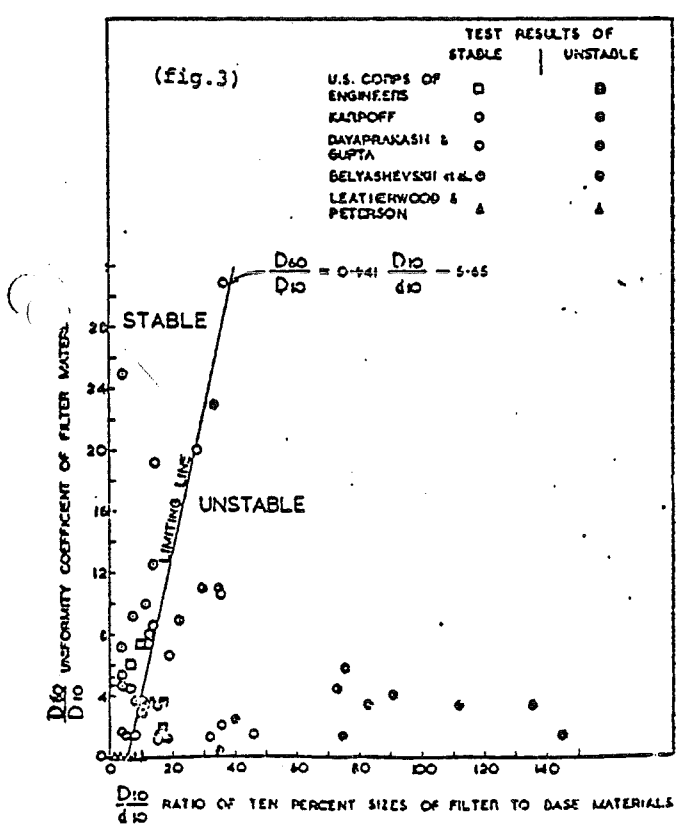
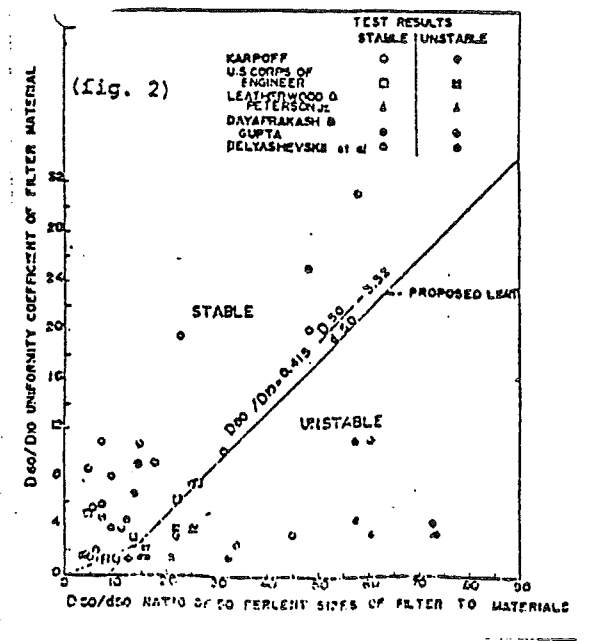
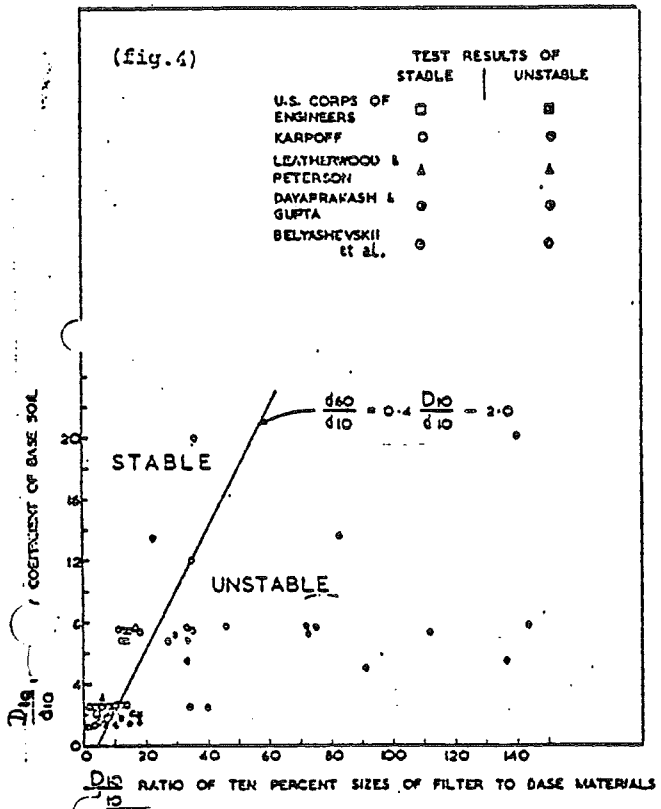
Bijlage 6a

Stromingstype	Verhang			Basis Mat.	Filtermateriaal				Proef	Opmerkingen
	\bar{I}_{cr} (%)	I_{acr} (%)	T (s)	D ₅₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	perc. D = 1 mm (%)	porositeit ϵ (%)	Opmerkingen	Opstelling	- : niet relevant * : niet gemeten
	60	-	-	0,15	3,8	0	*	Zeegrind [*] -basis	Groene Bak	Stationair
	63	-	-	0,15	3,8	0	*	Zeegrind-basis	Golftunnel	Stationair
	0	66	20	0,15	3,8	0	*	Zeegrind-basis	Golftunnel	Kwasi-stationair
	100	-	-	0,15	3,8	0	*	Zeegrind-basis	Golftunnel	Stationair na hydraulische verdichting
	30	-	-	0,15	10	0	*	Afwijkend mengsel-basis	Groene Bak	Stationair
	70	-	-	0,15	10	0	*	Afwijkend mengsel	Golftunnel	Stationair
	100	-	-	0,15	10	0	*	Afwijkend mengsel	Golftunnel	Stationair na hydraulische verdichting
	0	> 195	20	0,15	*	*	*	Füller-basis	Golftunnel	Stationair
	0	> 270	20	0,15	0,6	100	*	Grofzand-basis	Golftunnel	Zanddichtheid
	0	> 180	20	0,60	*	*	*	Afwijkend mengsel-basis	Golftunnel	2-lagen systeem kwasi stationair
	0	100	4-20	0,15	3,8	0	*	Zeegrind [*] -basis	Golftunnel	
	0	70-100	4-20	0,15	10	0	*	Afwijkend mengsel-basis	Golftunnel	
	0	> 500	4-10	0,15	*	*	*	Füller-basis	Golftunnel	
	0	> 450	8-15	0,15	0,60	100	*	Grofzand-basis	Golftunnel	Zanddichtheid
	0	> 730	2-10	0,60	*	*	*	Afwijkend mengsel-grofzand	Golftunnel	2-lagen systeem
	* $d_{50} =$			3,8 mm,	p=10					

vervolg

10

Bijlage Gb



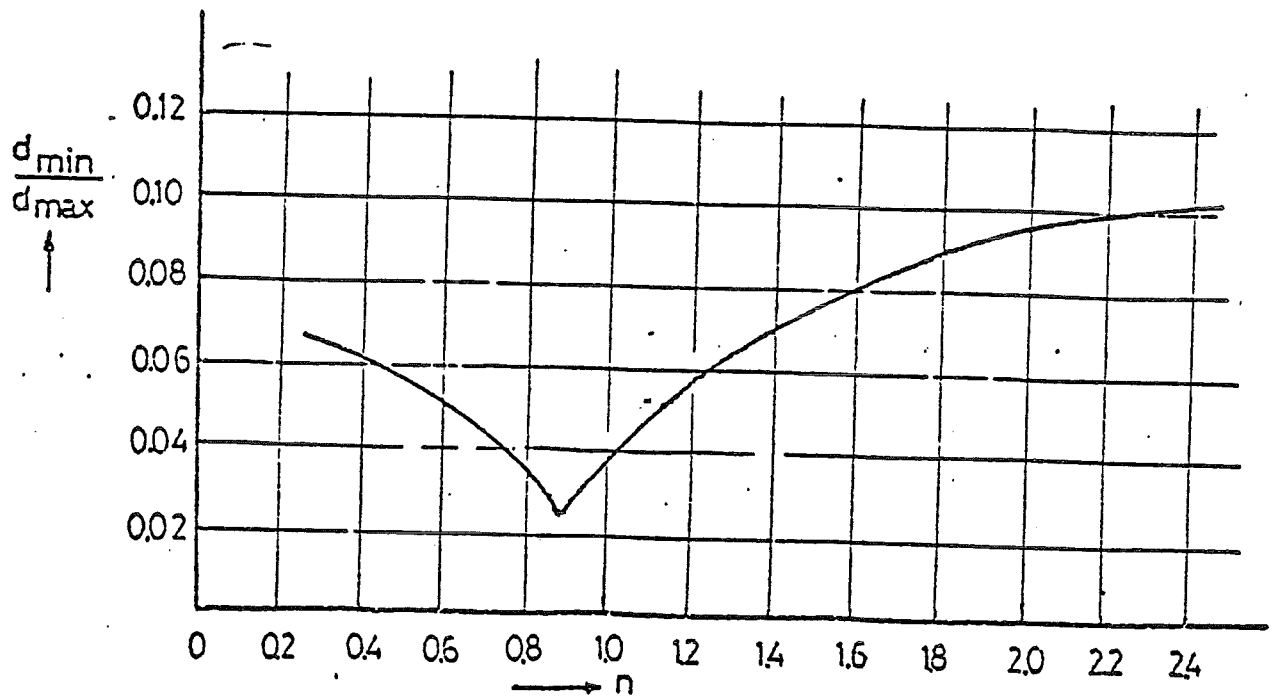
$$10 \log \left[\frac{D_{10}}{d_{10}} - 2 \right] < \frac{1.9}{10 \log \left[(d_{10} - 0.001) \times 10^3 \right]}$$

(d_{10} in millimeters)

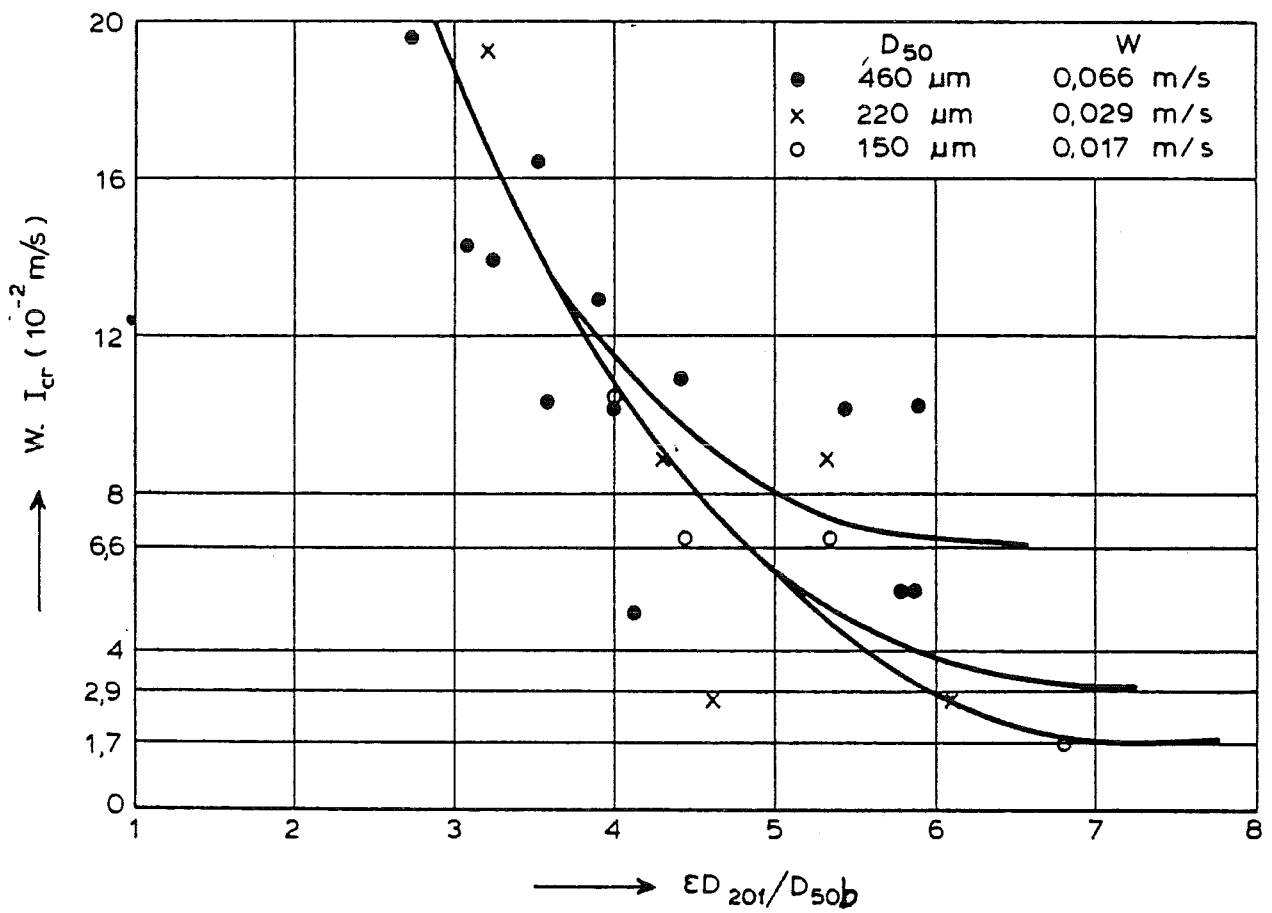
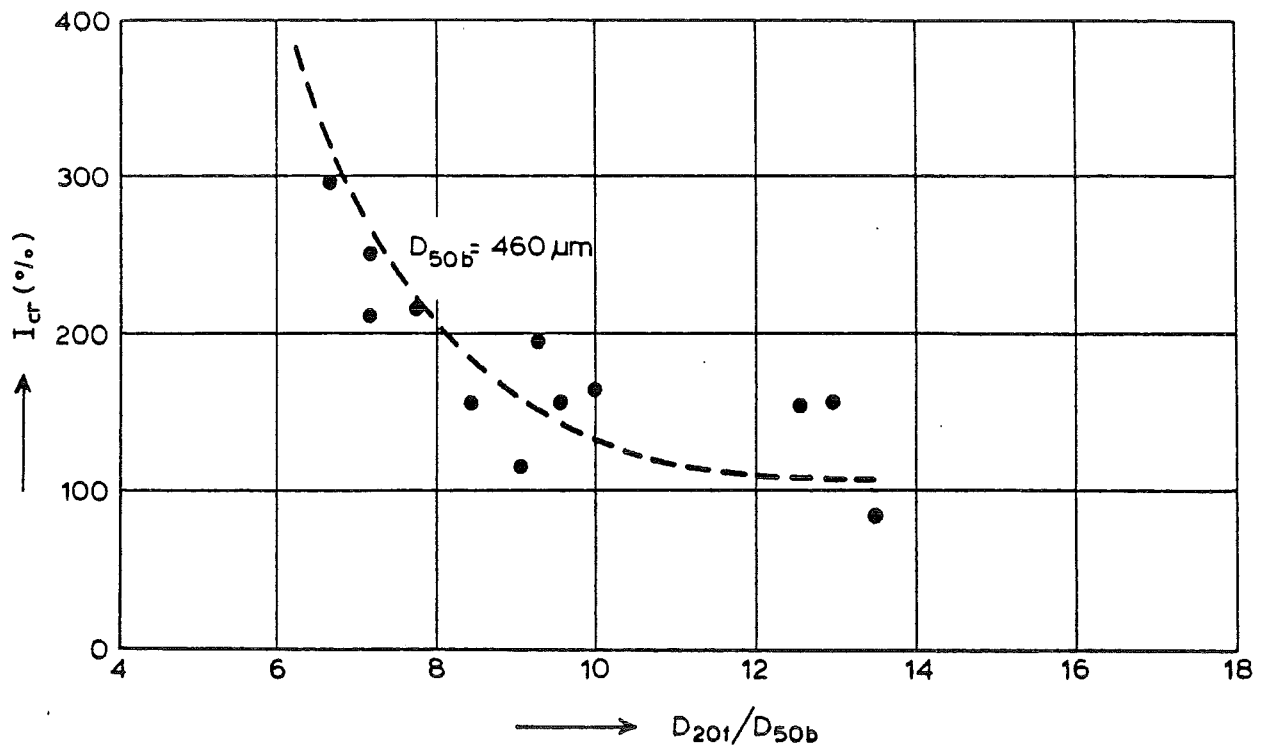
Filter regels

litteratuur studie

Bijlage 7



Minimaal toelaatbare $\frac{d_{\min}}{d_{\max}}$ als functie van n voor zeefkrommen
 van de vorm $(\frac{d}{d_{\max}})^{1/n}$

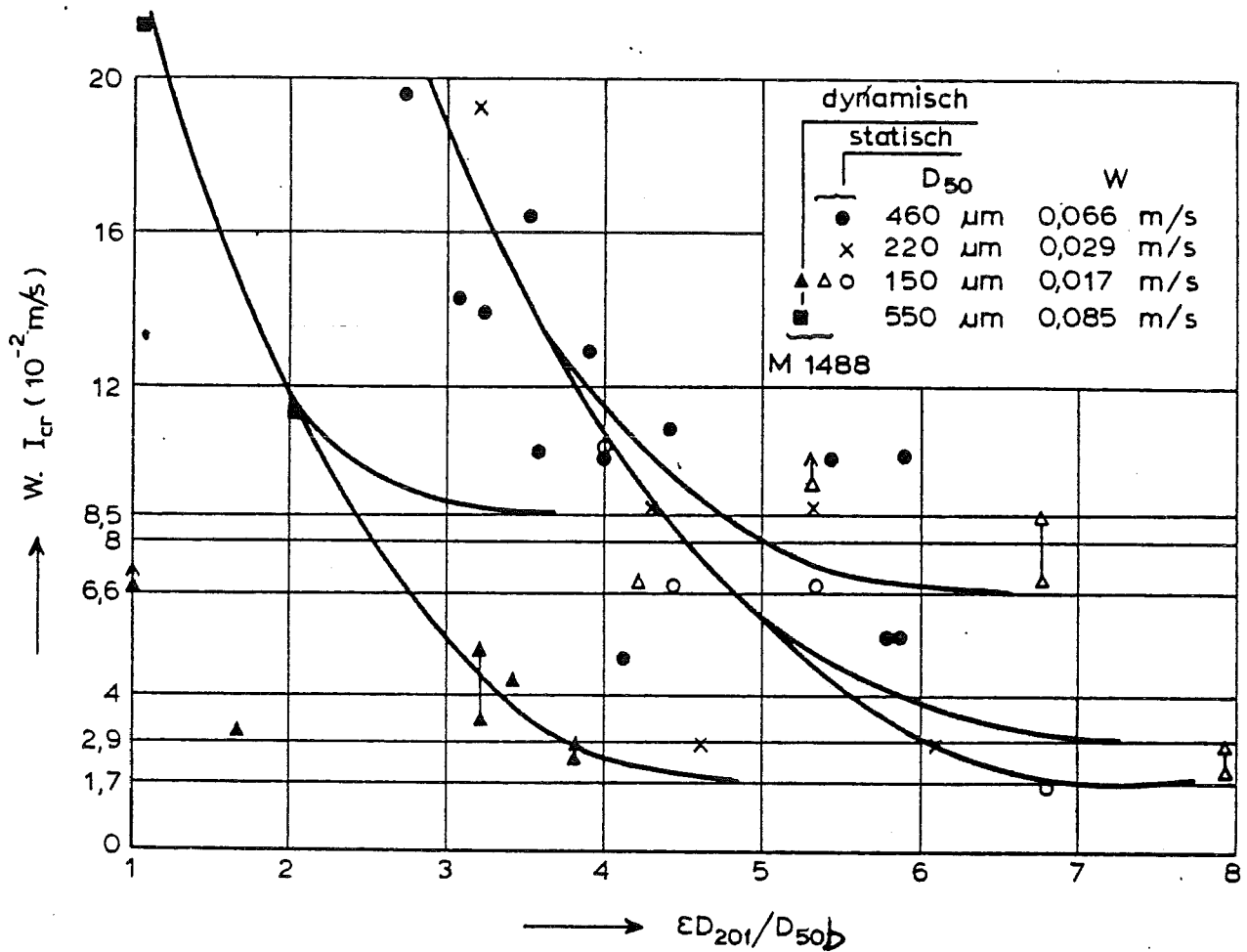
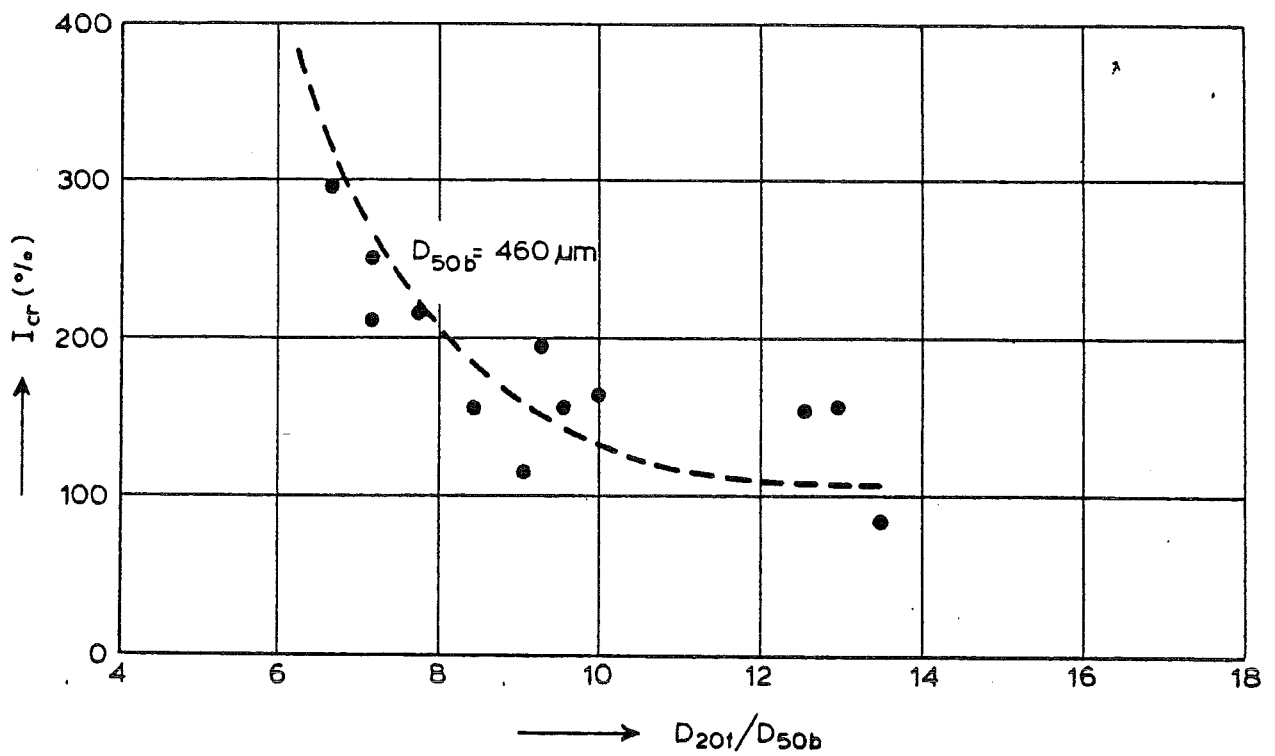


VERTIKALE KRITIEKE VERHANGEN
STATIONAIRE STROMING

TONNETJE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Bijlage 9

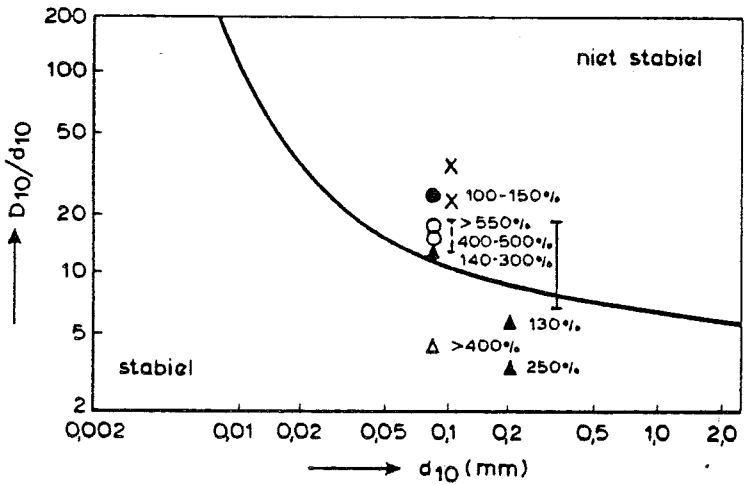
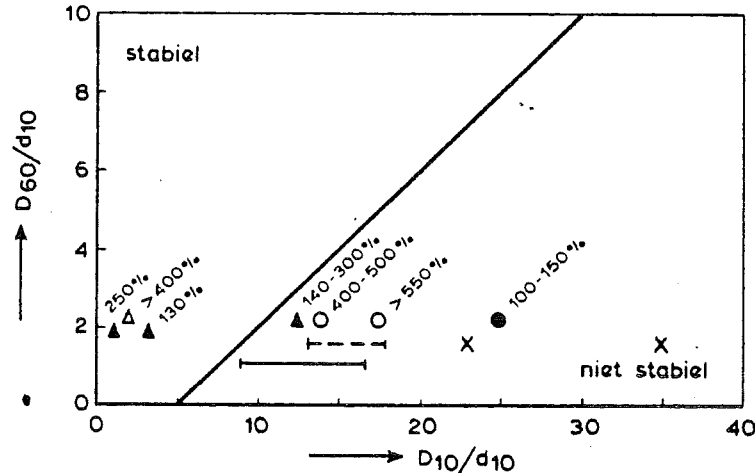
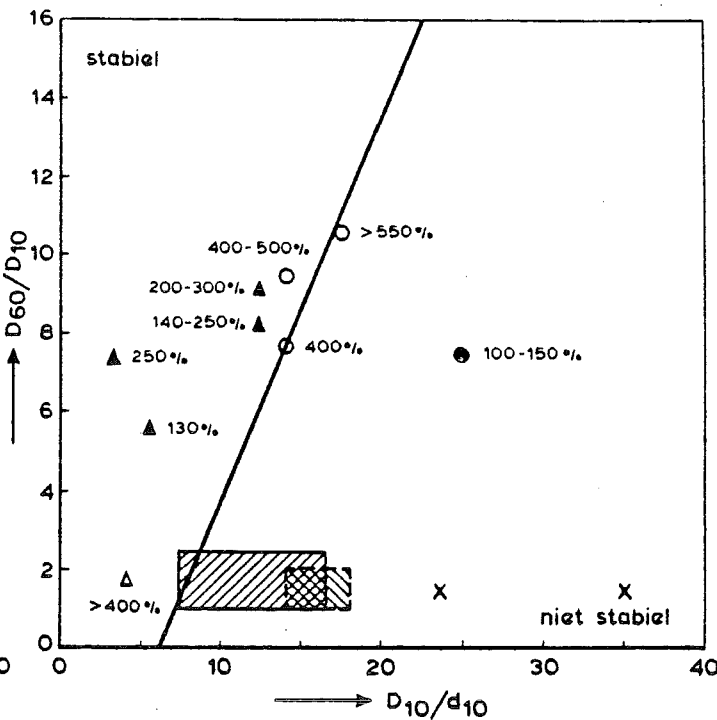
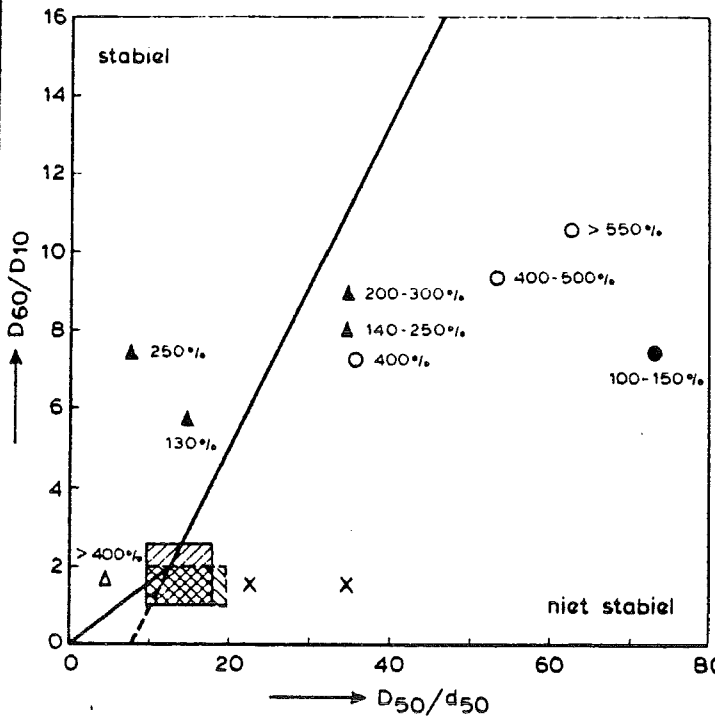


VERTIKALE KRITIEKE VERHANGEN
STAT. en. CYCLISCHE STROMING

TONNETJE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Bijlage 10



- statisch**
- stabiel (> 300%)
 - niet stabiel
- dynamisch**
- △ stabiel (> 300%)
 - ▲ niet stabiel

- M 898 (STATIONAIR)**
 $d_{50} = 460 \mu\text{m}$
- ▨ niet stabiel (100-250%)
- $d_{50} = 150 \mu\text{m}$
- ▩ stabiel (> 300%)
 - X niet stabiel (100%)

VERGELUKING FILTERREGELS MET
 PROEFRESULTATEN

TONNETJE

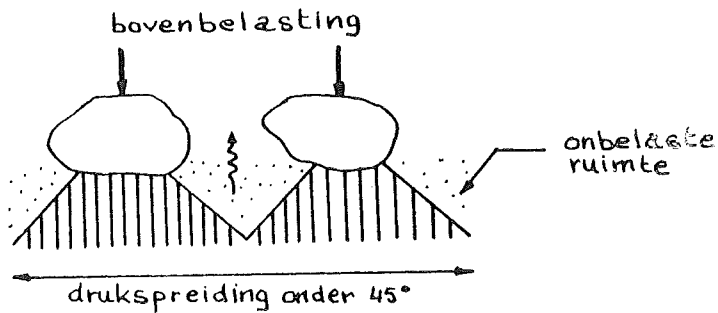
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Bijlage II

BEZWIJKMECHANISMEN VAN GRANULAIRE FILTERS ONDER INVLOED VAN VERTIKALE STROMING,
Discussienota

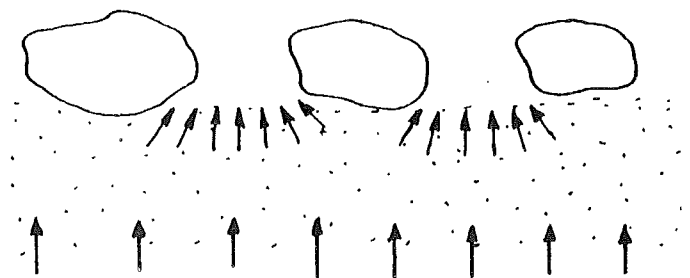
1 Bezwijkmechanisme in stationaire stroming

Tijdens het uitvoeren van de stationaire proeven in het tonnetje (vertikale stroming loodrecht op het grensvlak) werd opgemerkt dat zand-indringing in het (vrij grove) grind optrad bij een verhang van ca. 100% in het zand, welke onafhankelijk was van de bovenbelasting. Dit gaf aanleiding tot het definiëren van "lokale fluïdisatie" naast algehele fluïdisatie van het filterpakket. Deze lokale fluïdisatie van het zand kan ontstaan tussen de korrels van het grind:



In de onbelaste ruimten geldt een fluïdisatiegrens $I_{F1} \approx 100\%$. Bij het bereiken van dit verhang zullen zandkorrels opstijgen in de porieën van het grind en door de hoge bovenbelasting zal het afschuiven onder de grindkorrels plaatsvinden zodat het proces zich voort kan zetten.

Ten gevolge van verhang-concentraties in de omgeving van het grensvlak, kan de lokale fluïdisatie aldaar optreden als het gemiddelde verhang in het basismateriaal kleiner is dan 100%:

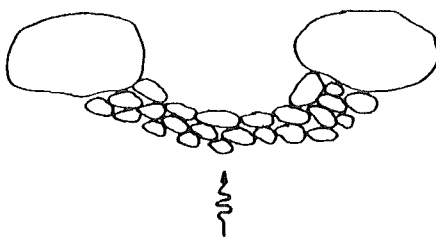


Uit de bovenstaande veronderstelling dat lokale fluïdisatie de oorzaak is van het stabiliteitsverlies bij verticale stroming loodrecht op het grensvlak volgt dat het kritieke verticale verhang altijd gelijk is aan ca. 100% als de porieën van het filtermateriaal voldoende groot zijn ten opzichte van de doorsnede van de korrels van het basismateriaal.

Bij de verhouding $D_{20f}/D_{50b} < 6$ wordt indringing fysisch onmogelijk (eerder verricht onderzoek, M 898), zodat daarbij zeer hoge verticale verhangen toelaatbaar zijn.

Er bestaat dus een gebied (ca. $6 < D_{20f}/D_{50b} < \text{ca } 15$) waarin het kritieke verticale verhang afneemt van zeer groot tot 100%.

In dit gebied wordt verondersteld dat de stabiliteit van het granulaire filter wordt verzekerd door boogvorming van korrels van het basismateriaal tussen de korrels van het filtermateriaal:



Bij bogen geldt dat de uniform verdeelde bezwijkbelasting omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de overspanning. In het geval van granulaire filters zou het verhang in het basismateriaal als uniform verdeelde belasting kunnen worden gezien, en de verhouding D_{20f}/D_{50b} zou als maat voor de overspanning kunnen worden aangehouden. Dan volgt:

$$I_{cr} \propto \frac{1}{\left(\frac{D_{20f}}{D_{50b}}\right)^n}$$

bij parabolische bogen geldt $n = 2$

In de bovenstaande beschouwingen is steeds de korreldiameter als karakteristiek voor het filtermateriaal aangehouden, maar in werkelijkheid is de grootte van de porieën in het filtermateriaal maatgevend: eigenlijk zou de verhouding $\epsilon D_{20f}/D_{50b}$ moeten worden gehanteerd. Dit wordt met name duidelijk wanneer het filtermateriaal wordt verdicht (dan neemt de porositeit ϵ , vooral bij gegradeerd filtermateriaal, meestal sterk af).

In geval van boorvorming tussen de grindkorrels zal het kritieke verhang bij verdicht filtermateriaal sterk toenemen ten opzichte van onverdicht filtermateriaal omdat enerzijds de overspanning van de bogen kleiner wordt en anderzijds de oplegpunten van de boog (de grindkorrels) vaster komen te liggen.

Een nabeschouwing van de resultaten van eerder verricht onderzoek (M 898) toonde aan dat een hyperbolische relatie voor het kritieke verhang is aan te geven met asymptoten op $I_{cr} = 100\%$ en

$$\frac{D_{20f}}{D_{50b}} = 6 \quad (\text{figuur 1, boven}).$$

Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze figuur uitsluitend geldt voor het onderzochte basismateriaal met $D_{50} = 460 \mu\text{m}$. Om een algemeen geldende relatie te verkrijgen moeten tevens andere eigenschappen van het basismateriaal, zoals de valsnelheid, in rekening worden gebracht (figuur 1 onder). In deze figuur is tevens de porositeit ϵ van het filtermateriaal in beschouwing genomen.

2 Bezwijkmechanisme in dynamische stroming

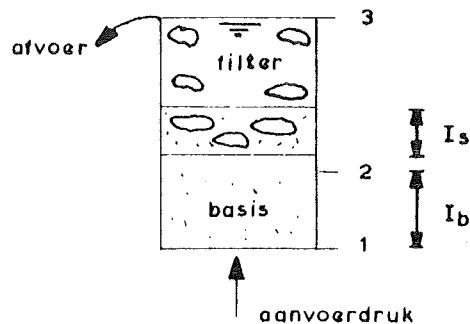
Dynamische omstandigheden blijken zeer ongunstig te zijn voor de stabiliteit van granulaire filters. Een verklaring hiervoor volgt uit de hypothese dat in het algemeen de stabiliteit van het basismateriaal onder het filtermateriaal het gevolg is van boogvorming. Onder dynamische omstandigheden kunnen 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 $I_a > \bar{I}$ de kritieke amplituden het kleinst zijn (figuur 2).

In de eerder genoemde Figuur 1 zijn tevens de resultaten van de uitgevoerde proeven met dynamische verhangen weergegeven (M 1488). Hieruit blijkt dat de voor stationaire stroming geldende relatie wordt verschoven naar kleinere waarden van $\epsilon \cdot D_{20f} / D_{50b}$ (factor 2 à 2,5), de vorm van de kromme blijkt echter gehandhaafd te blijven (voor zover dit is af te leiden uit een beperkt aantal proeven).

3 Mechanisme van indringing

3.1 Situatie in het tonnetje

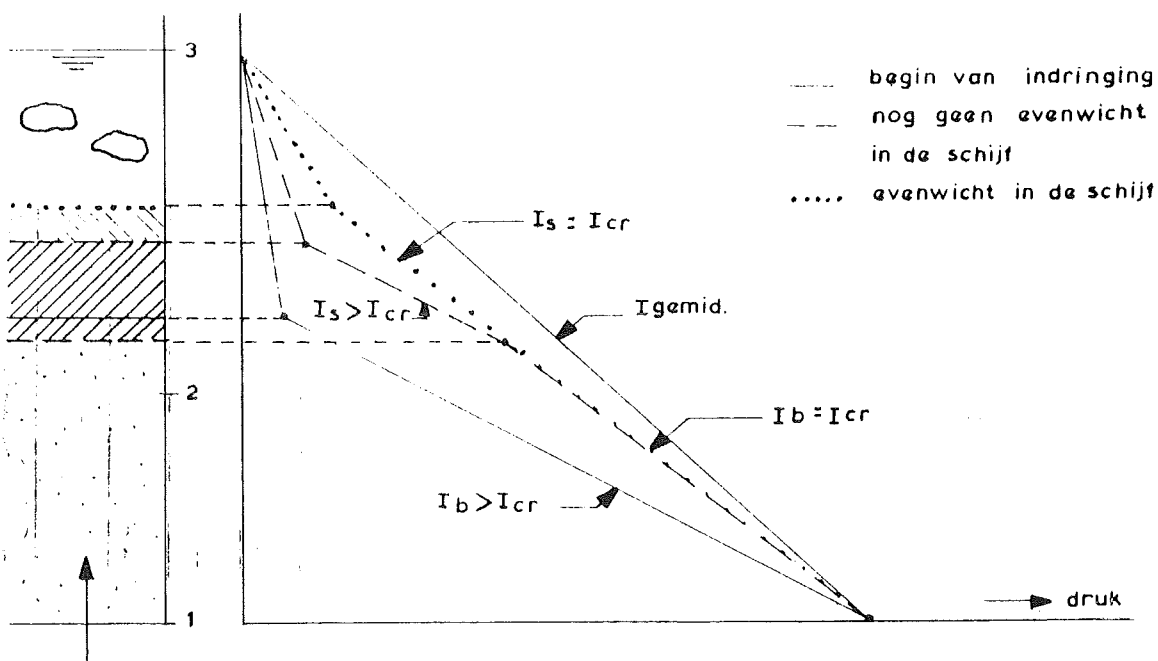
Terwille van de duidelijkheid wordt hier slechts een stationaire toestand bekeken. Daarbij worden in het tonnetje de aan- en afvoerdrukken constant gehouden:



Begin van indringing treedt op als I_b (in basis) = I_{cr} . In het filtermateriaal is dan $I < I_{cr}$, het zand kan dus niet verder. Zo ontstaat het eerste laagje zand in het grind. Terplaatse wordt de porositeit veel kleiner (theoretisch wordt $\epsilon = \epsilon_b \cdot \epsilon_p$).

Er zit nu dus een (relatief) waterdichte schijf in het filter. De totale doorlatendheid van het pakket is afgenomen, dus het debied neemt af. De drukken in punt 1 en 3 blijven echter gelijk (aan- en afvoerdrukken), waardoor het verhang I_b afneemt, en de druk in punt 2 toe neemt, dus het verhang I_s neemt toe. Het komt erop neer dat het verhang (verval) zich gaat concentreren in de schijf.

Als I_b oorsponkelijk niet véél groter is dan I_{cr} was dan is deze nu gelijk aan I_{cr} geworden en stopt de voeding voor verdere indringing(--):



indringing bij constante aanvoerdruk

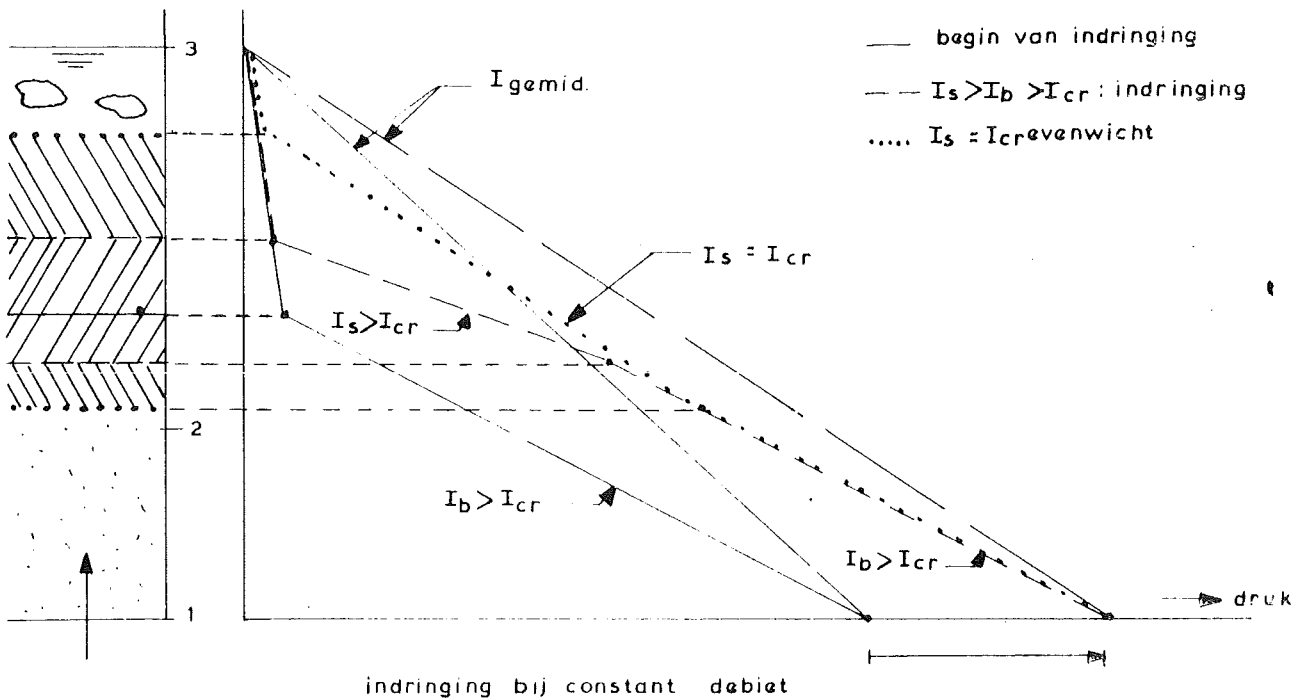
In de schijf kan de indringing nog even doorgaan tot ook daarin $I_s = I_{cr}$ zodat het evenwicht is bereikt.

Dit is dus een eindig proces omdat een herverdeling van de verhangen plaats vindt zodat $I_b = I_{cr}$ en $I_s = I_{cr}$ door middel van indringing (de enige mogelijkheid voor continu transport zou zijn dat $I_{gemid} \geq I_{cr}$). Hierbij wordt opgemerkt dat in wezen een "3-lagen-systeem" is ontstaan en dat de waarden van I_{cr} op beide grensvlakken ^{niet} gelijk zullen zijn aan de beginsituatie: omdat in de schijf de waarde van $\epsilon_s \cdot D_s$ kleiner is geworden dan $\epsilon_f \cdot D_f$ zal op het onderste grensvlak I_{cr} toenemen, terwijl op het bovenste grensvlak I_{cr} zal afnemen. De uiteindelijk te bereiken waarden van I_{cr} zijn vooral afhankelijk van de karakteristieken van het materiaal in de schijf (porositeit ϵ_s en korreldiameter D_s).

Tot zover wat er in het tonnetje zou gebeuren als de aan- en afvoer drukken constant zouden worden gehouden.

1.2 Situatie in het prototype

Dit gebeurt in bepaalde gevallen niet in het prototype. Onder invloed van bewegende pijler worden de wateroverspanningen opgelegd en veranderen nauwelijks bij enige indringing van basismateriaal in het filter. Deze situatie is dus te vergelijken met een situatie waarbij het debiet ongeveer constant is. Het verhang I_b is dus constant. Als I_b groter is dan I_{cr} , dan treedt indringing op en ontstaat weer een (relatief) waterdichte schijf. De totale doorlatendheid van het pakket neemt af en om in het tonnetje een constant debiet te behouden moet de aanvoerdruk dus toenemen, evenals de druk in punt 2 (het verhang I_b is immers constant). Dit betekent een verschuiving van de I_b - verhanglijn:



Een dergelijke verschuiving heeft in eerste instantie tot gevolg dat I_s toeneemt en zelfs groter kan worden I_b (τ). De indringing wordt dus voortgezet totdat de hoogte van de schijf zodanig is dat $I_s \approx I_{cr}$ is geworden, dan kan

verdere opwaartse beweging van de bovengrens van de indringingszone niet meer plaatsvinden en is er een evenwichtstoestand ingetreden. Desondanks is I_b nog groter dan I_{cr} , verdere indringing van onderaf wordt echter onmogelijk gemaakt omdat de porositeit van de indringingszone te klein is en er geen voeding nodig is voor opwaartse beweging van de bovengrens.

In wezen is wederom een "3-lagen-systeem" ontstaan waarin het onderste grensvlak zeer stabiel is (D_s/D_b is klein), en het bovenste grensvlak juist stabiel is.

Reproductie van deze situatie is in principe in het tonnetje wel mogelijk als er steeds voor wordt gewaakt dat I_b constant blijft.

4 Conclusies

De bovenstaande beschouwingen kunnen als volgt worden samengevat:

1 Stationaire stroming:

$\epsilon D_{20f} / D_{50b} < 2,5$: geen indringing mogelijk (bogen van 1 à 3 korrels zand tussen de grindkorrels)

$\epsilon D_{20f} / D_{50b} > 6 \text{ à } 7$: $I_{cr} = 100\%$ (lokale fluïdisatie tussen grindkorrels)

$2,5 < \epsilon D_{20f} / D_{50b} < 7$: hyperbolisch verloop van I_{cr}

In beide laatste gevallen is een invloed merkbaar van de absolute grootte van de materialen (niet dimensieloze relaties).

2 Dynamische stroming :

Kwalitatief geldt hetzelfde beeld. Kwantitatief moeten de stationaire waarden van $\epsilon D_{20f} / D_{50b}$ globaal door 2 à 2,5 worden gedeeld.

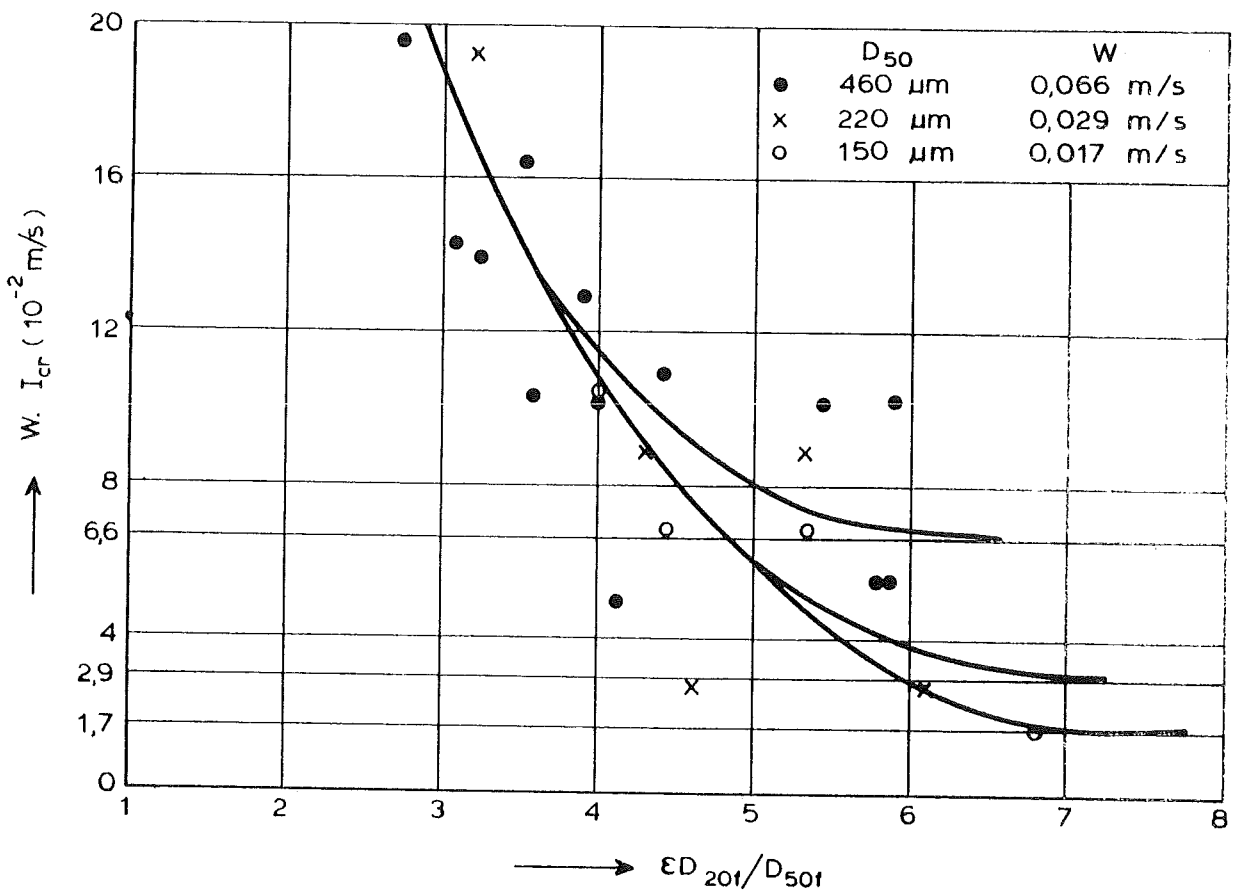
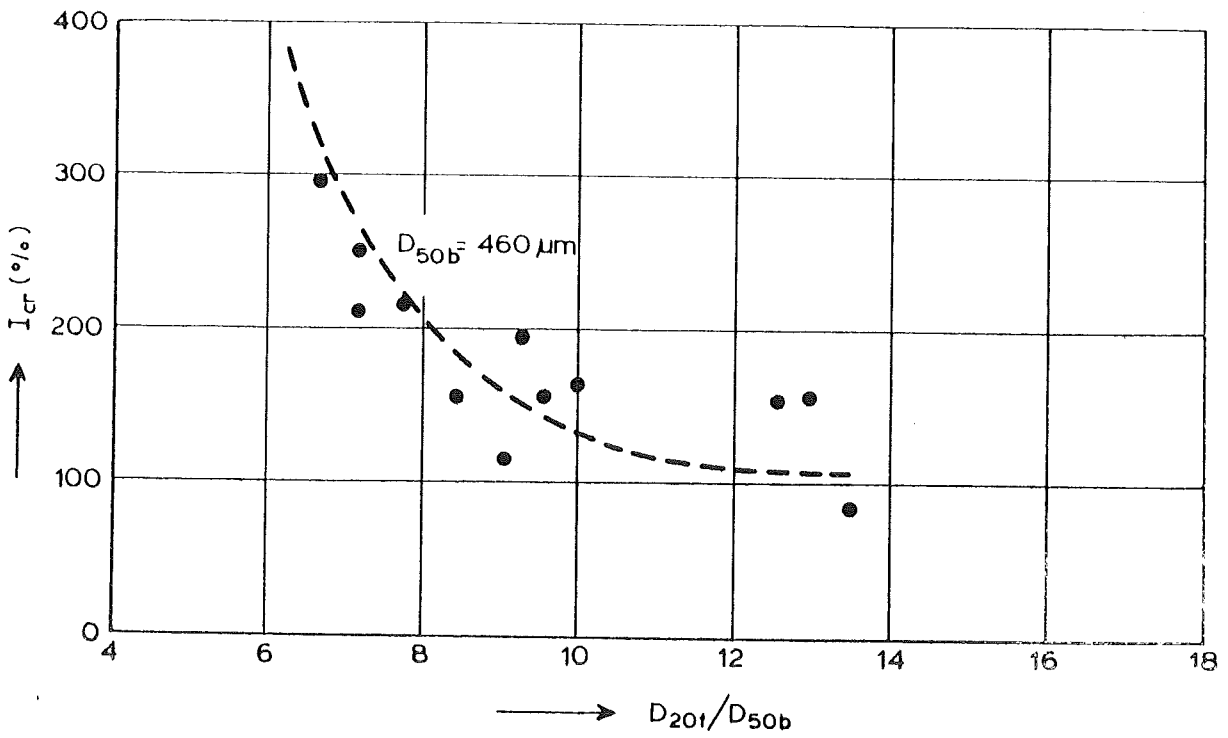
3 Mechanisme indringing:

Hoewel nog geen lange duur proeven zijn uitgevoerd, kan worden verondersteld dat een evenwichtstoestand zal optreden voor de indringingshoogte. Deze zal afhankelijk zijn van het ingestelde verhang.

4 In de literatuur blijken een aantal ontwerpregels te bestaan. Deze regels gaan echter voor een groot deel voorbij aan de invloed van de absolute grootte van de materialen (3 bovenste Figuren in Figuur 3).

Voorts gelden deze regels niet voor dynamische omstandigheden. Het enige artikel dat hierover handelt (Belyashevskii) geeft geen verhangen waar drukken op één punt en is dus niet bruikbaar. Bovendien zijn de toegepaste periodes zeer kort (0,6 à 0,2 s).

5 Bij gebrek aan beter zullen dus voorlopig de schattingen van de te kiezen materialen voor het fundatiebed moeten worden gebaseerd op figuur 1.



VERTIKALE KRITIEKE VERHANGEN

TONNETJE

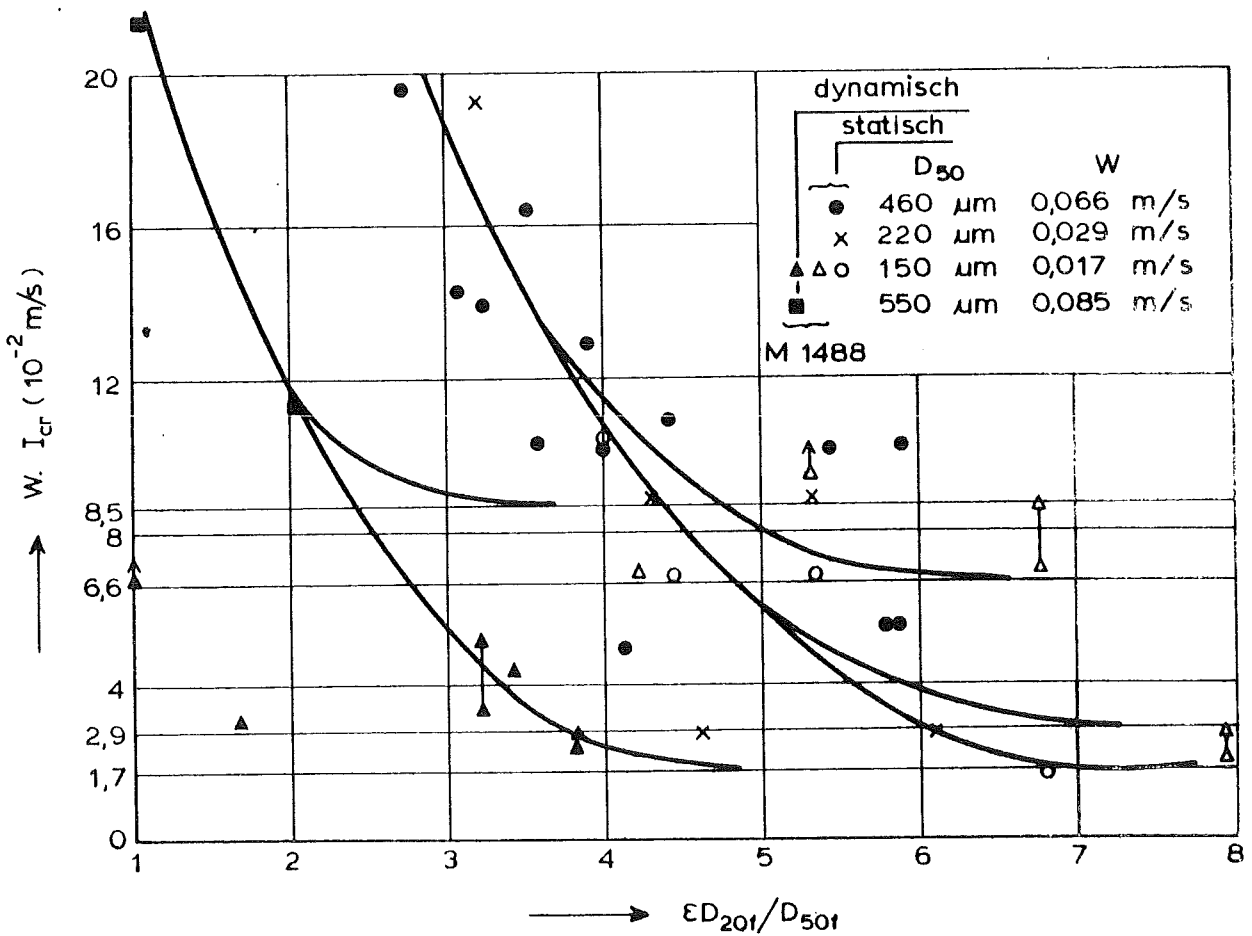
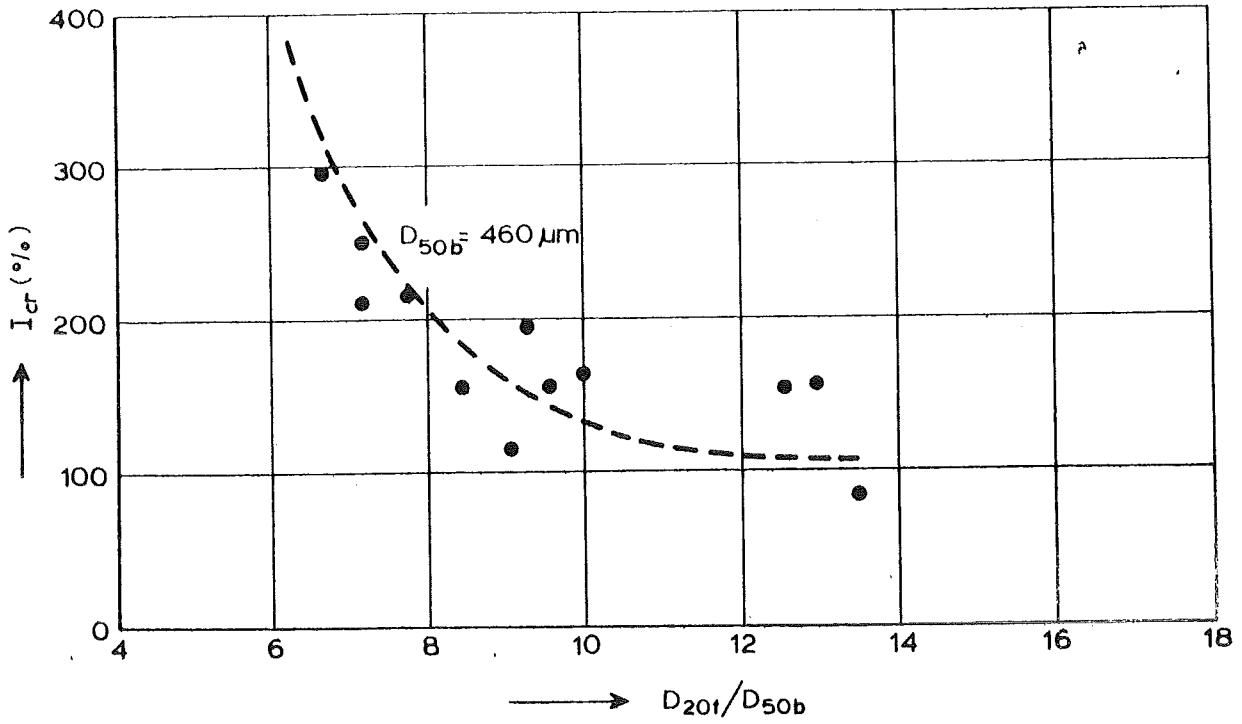
(M 898 III)

STROMING ⊥ GRENSVLAK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1488-I

FIG. 1



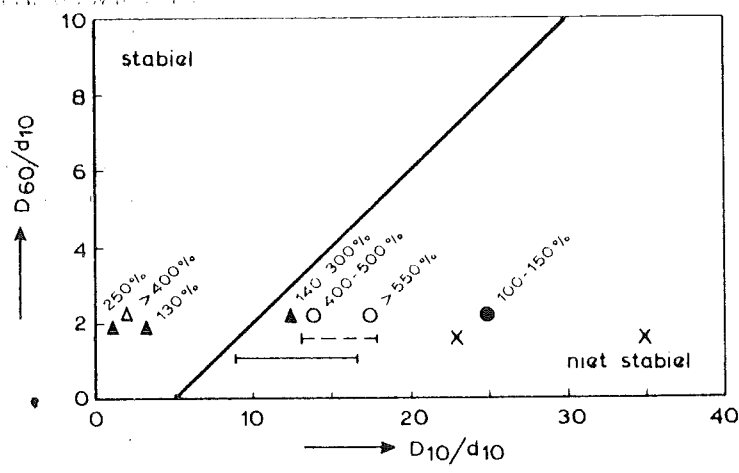
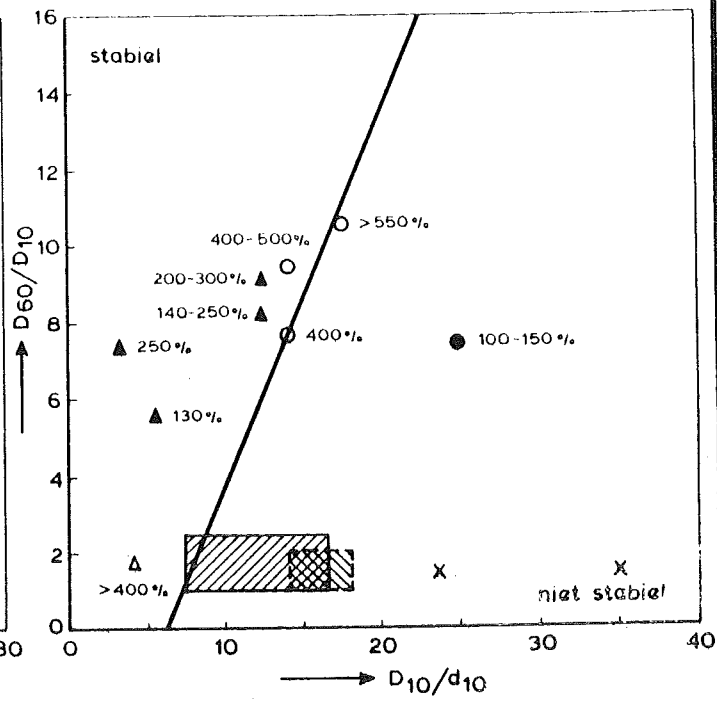
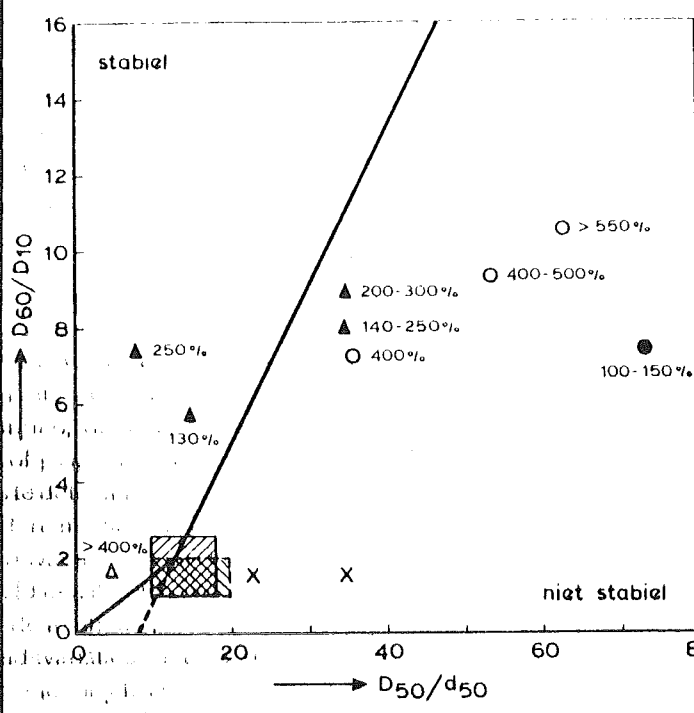
VERTIKALE KRITIEKE VERHANGEN

TONNETJE

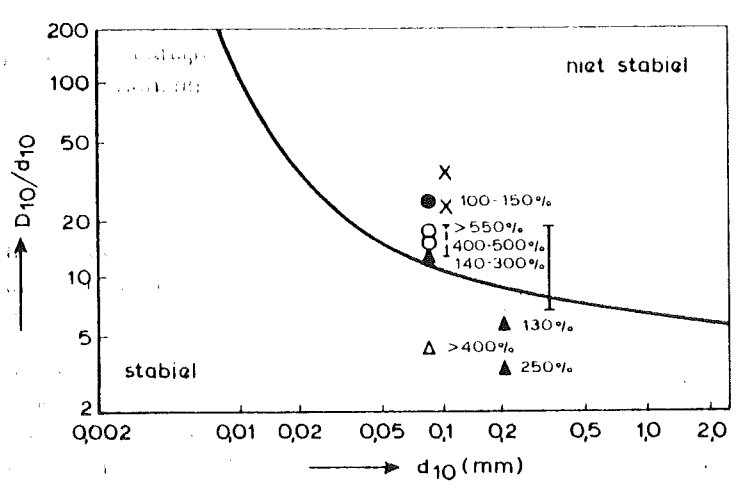
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1488-II

FIG. 2



- statisch**
- stabiel (> 300%)
 - niet stabiel
- dynamisch**
- △ stabiel (> 300%)
 - ▲ niet stabiel



- M 898**
- d₅₀ = 460 μm:**
- ▨ niet stabiel (100-250%)
- d₅₀ = 150 μm:**
- ▩ stabiel (> 300%)
 - X niet stabiel (100%)

VERGELIJKING FILTERREGELS MET
PROEFRÉSULTATEN

TONNETJE

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1488-II FIG. 3