
invloed van open paalschermen
op stromingen nabij de kust

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT

verslag modelonderzoek

16 SEP. 1991

M 1148

mei 1973

INHOUD

blz

1 Inleiding

1.1	Opdracht.....	1
1.2	Probleemstelling.....	1
1.3	Analyse van het probleem.....	2

2 Opzet van het onderzoek

2.1	Inleiding.....	7
2.2	Schematisering van het prototype.....	9
2.3	Schalen en inrichting van het model.....	10
2.4	Onderzochte paalscherminstellingen.....	12
2.5	Hydraulische condities.....	12
2.6	Meetmethoden.....	13

3 De meetresultaten

3.1	Overzicht van de metingen.....	15
3.2	Instelling van het model zonder paalschermen.....	15
3.2.1	Inleiding.....	15
3.2.2	Toestand met alleen stroom.....	16
3.2.3	Toestand met golven en stroom.....	17
3.3	Proeven met één paalscherm.....	19
3.3.1	Snelheidsverticaal nabij het paalscherm.....	19
3.3.2	Verschillende uitbouw lengten van één paalscherm.....	21
3.4	Proeven met verschillende paalscherminstellingen.....	22
3.4.1	Toestand met alleen stroom.....	22
3.4.2	Toestand met golven en stroom.....	25
3.5	Samenvatting.....	25

4 Evaluatie van de meetresultaten

4.1	Inleiding.....	26
-----	----------------	----

INHOUD (vervolg)

		blz
4.2	Vergelijking van paalschermen (alleen stroom).....	27
4.2.1	H.W.conditie; vergelijking van relatieve snelheden.....	27
4.2.2	H.W.conditie; vergelijking van snelheidsgradiënten.....	28
4.2.3	H.W.conditie; vergelijking van relatieve debieten.....	30
4.2.4	L.W.conditie.....	30
4.3	Vergelijking van paalschermen voor golven en stroom.....	31
4.4	Samenvatting.....	33
5	<u>Berekening van de invloed van paalschermen op een getijstroom</u>	
5.1	Eerste benadering: gelijkmatig verspreide palen.....	35
5.2	Tweede benadering: palen in rijen gegroepeerd.....	40
5.3	Invloed van golven op het effect van paalschermen.....	44
5.4	Samenvatting.....	45
6	<u>Berekening van de invloed van paalschermen op het zandtransport</u>	
6.1	Beperkingen.....	46
6.2	Berekening met getijstroom en loodrechte golfval.....	47
6.3	Berekening zonder getijstroom, met scheve golfval.....	50
6.4	Samenvatting.....	50
7	<u>Conclusies en aanbevelingen.....</u>	51
	<u>Literatuur.....</u>	53

TABELLEN

- 1 Onderzochte paalscherminconfiguraties
- 2 Hydraulische condities
- 3 Overzicht van de verrichte metingen
- 4 IJking; hydraulische conditie 1; meting met ottmolen
- 5 IJking; hydraulische conditie 2; meting met ottmolen
- 6 IJking met ottmolen; hydraulische condities 1 en 2; gemiddelde snelheid en variatie
- 7 IJking hydraulische conditie 1; meting met drijvers
- 8 IJking hydraulische conditie 2; meting met drijvers
- 9 IJking met drijvers; hydraulische condities 1 en 2; gemiddelde snelheden en variatie
- 10 IJking met stippelfoto's; hydraulische condities 1,2 en 6; gemiddelde snelheden
- 11 IJking met drijvers; hydraulische conditie 3
- 12 IJking met drijvers; hydraulische conditie 4
- 13 IJking met drijvers; hydraulische conditie 5
- 14 IJking met drijvers; hydraulische condities 3,4 en 5; gemiddelde snelheden en variatie
- 15 Situaties micromolenmeting bij solitair paalschermin
- 16 Snelheidsverticalen bij solitair paalschermin; absolute waarden
- 17 Snelheidsverticalen bij solitair paalschermin; relatieve waarden
- 18 Snelheden stroomafwaarts van uitgebouwd paalschermin
- 19 Situaties paalschermen en meetvakken
- 20 Snelheidsverdeling bij paalschermin type G-a; hydraulische conditie 1
- 21 Snelheidsverdeling en variatie bij paalschermin type G-b; hydraulische conditie 1

Snelheidsverdelingen

- 22 Paalschermin type D; hydraulische conditie 1
- 23 Paalschermin type E; hydraulische conditie 1
- 24 Paalschermin type A,B,C,F,H; hydraulische conditie 1
- 25 Paalschermin type C,D,E en F; hydraulische conditie 6
- 26 Paalschermin type B; hydraulische conditie 4
- 27 Paalschermin type C; hydraulische conditie 4
- 28 Paalschermin type E; hydraulische conditie 4
- 29 Samenvatting snelheidsverdelingen van alle typen paalschermen
- 30 Maximale snelheidsgradiënt in dwarsrichting; hydraulische condities 1 en 6

TABELLEN (vervolg)

- 31 Relatieve debieten van alle typen paalschermen; hydraulische conditie 1
- 32 Berekening totaal aangestroomd paaloppervlak per m^2 model
- 33 Berekening van C_b^2 en C_p^2
- 34 Relatieve snelheid met gelijkmatig verspreide palen
- 35 Bepaling van η volgens (23)
- 36 Relatieve snelheid met palen verenigd tot schermen
- 37 Snelheden in model en prototype bij korte en lange paalschermen
- 38 Zandtransport in het prototype bij korte en lange paalschermen
- 39 Relatief zandtransport bij korte en lange paalschermen
- 40 Relatief gesommeerd zandtransport bij korte en lange paalschermen

FIGUREN

- 1 Voorbeelden langs- en dwarstransport
- 2 Geschematiseerd kustprofiel met paalscherf
- 3 Weerstandscoefficiënt C_w voor verschillende voorwerpen
- 4 Overzicht model met kustprofiel en paalscherf
- 5 Onderzochte paalscherfconfiguraties

IJking

- 6 Snelheidsverdeling bij hydraulische condities 1 en 2
- 7 Snelheidsverdeling bij hydraulische conditie 6
- 8 Brekerplaats en brekerhoogte bij hydraulische condities 3,4 en 5
- 9 Stroombeeldschetsen bij hydraulische condities 3 en 4
- 10 Snelheidsprofielen bij hydraulische condities 3,4 en 5
- 11 Snelheidsverdeling bij hydraulische condities 3,4 en 5
- 12 Invalshoek golfkam bij hydraulische conditie 5
- 13 Snelheidsverticalen bij solitair paalscherf
- 14 Relatieve snelheden bij solitair paalscherf, M1 en M2
- 15 Relatieve snelheden bij solitair paalscherf, M3 en M4
- 16 Relatieve gemiddelde snelheden bij solitair paalscherf
- 17 Snelheidsverdeling bij verschillende paalscherflengten
- 18 Relatieve snelheidsverdeling bij verschillende paalscherflengten

Snelheidsverdelingen bij hydraulische conditie 1

- 19 Paalscherf type G-a
- 20 Paalscherf type E
- 21 Paalscherf type A,B,G,H
- 22 Paalscherf type C,D,E,F
- 23 Paalscherf type C,D,E,F. Snelheidsverdeling bij hydraulische conditie 6

Stroombeeldschetsen

- 24 Paalscherf type A,B,G,H. Hydraulische conditie 3
- 25 Paalscherf type C,D,E,F. Hydraulische conditie 3
- 26 Paalscherf type A,B,G,H. Hydraulische conditie 4
- 27 Paalscherf type C,D,E,F. Hydraulische conditie 4
- 28 Paalscherf type B,C,E. Snelheidsverdeling bij hydraulische conditie 4

FIGUREN (vervolg)

Snelheidsverdeling bij hydraulische conditie 1

- 29 Paalschermer type A, F
- 30 Paalschermer type E, H
- 31 Paalschermer type B, D

Drijverbanen bij hydraulische conditie 1

- 32 Paalschermer type C
- 33 Paalschermer type E

- 34 Relatieve debieten van alle paalschermen bij hydraulische conditie 1

Snelheidsverdeling bij hydraulische condities 1 en 4

- 35 Paalschermer type B
- 36 Paalschermer type C
- 37 Paalschermer type E

- 38 Variatie in het berekende verhang l_b als functie van k
- 39 Berekende relatieve snelheid met gelijkmatig verspreide palen
- 40 Geschematiseerd waterstandsverloop
- 41 Berekende relatieve snelheid met palen verenigd tot schermen
- 42 C_w als functie van u' volgens Ko en Graf
- 43 u' stroomsfwaarts van staafroosters volgens Lindh e.a.
- 44 C_w totaal van twee cilinders volgens Idel' cik
- 45 Openingspercentage als functie van de aanstroomhoek
- 46 Gemiddelde snelheid bij korte en lange paalschermen
- 47 Zandtransport berekend volgens Bijker
- 48 Zandtransport bij korte en lange paalschermen
- 49 Relatief zandtransport bij korte en lange paalschermen
- 50 Relatief gesommeerd zandtransport
- 51 Stroomsnelheid en zandtransport bij gereduceerde brandingsstroom

FOTO'S

Stroombeelden hydraulische conditie 1

- 1 Paalschermer type A
- 2 Paalschermer type B
- 3 Paalschermer type C
- 4 Paalschermer type D
- 5 Paalschermer type E
- 6 Paalschermer type F
- 7 Paalschermer type G

Stippelfoto's

- 8 Paalschermer type A. Hydraulische conditie 1
- 9 Paalschermer type F. Hydraulische conditie 6
- 10 Golfbeeld zonder paalschermer. Hydraulische condities 3,4 en 5

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In de brief van 28 september 1971, kenmerk 2405, werd door het Hoofd van de Studiedienst Vlissingen van Rijkswaterstaat aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht verleend tot het uitvoeren van een modelonderzoek naar de werking van paalschermen. Open paalschermen worden in toenemende mate toegepast ter beteugeling van kusterosie zoals die zich onder meer op Walcheren voordoet. Het modelonderzoek, dat in het Laboratorium De Voorst werd uitgevoerd van november 1971 tot mei 1972, vond plaats in een model met een vaste bodem. Het onderzoek, dat gericht was op het vastleggen van de stroomsnelheidsreductie bij verschillende paalschermconfiguraties, stond onder leiding van ir. C.H. Hulsbergen en ing. W. ter Horst, tevens samenstellers van dit verslag.

1.2 Probleemstelling

In Zeeland zijn, ter verdediging van de kustlijn tegen erosie, in het verleden constructies van uiteenlopende aard toegepast. Hieronder nemen massieve strandhoofden, al of niet voorzien van paalrijen, een belangrijke plaats in. Dat het succes wisselend is geweest behoeft niet te verwonderen, omdat enerzijds de omstandigheden zowel plaatselijk als in de loop van de tijd aan sterke schommelingen onderhevig zijn geweest, en anderzijds omdat het inzicht in het zeer complexe systeem van water- en zandbeweging slechts gebrekkig was. Ook thans is er nog geen sprake van een volledig begrip van de relevante zand-transportprocessen, maar wel bestaat er tegenwoordig meer inzicht in de samenstellende factoren, waardoor meer gericht onderzoek kan plaatsvinden.

In het onderhavige geval werd een systematisch onderzoek in een hydraulisch model nodig geoordeeld ter ondersteuning van het inzicht in de werking van open paalschermen, loodrecht op de kust geplaatst, die de laatste jaren op verscheidene plaatsen in Zeeland zijn aangebracht. Ten opzichte van de oude massieve constructies zijn deze paalschermen aantrekkelijk door de geringe kosten van de eigenlijke constructie, en doordat stroomcontractie zeewaarts van de kop in veel mindere mate optreedt; hierdoor kunnen kostbare maatregelen ter bescherming van de bodem in de onmiddellijke nabijheid van de constructie

achterwege blijven. Waar de paalschermen aangebracht zijn is veelal een verminderde erosie of zelfs een aanzanding waargenomen, hetgeen een stimulans vormde voor een nadere studie van de werking van paalschermen.

Met name is de vraag gesteld in hoeverre de geometrie van de paalschermen geoptimaliseerd zou kunnen worden; hierbij spelen factoren mee als onderlinge afstand van de palen in één paalscherm, lengte van een paalscherm, onderlinge afstanden tussen de paalschermen, en hoogte van de paalschermen. De vraag naar het criterium dat bij het optimaliseren gehanteerd moet worden komt ter sprake in paragraaf 1.3; daaruit blijkt dat het prototype-criterium een complex geheel vormt, met als voornaamste kenmerk: "erosie minimaliseren respectievelijk aanzanding maximaliseren". Dit is, in de beperkte opzet van het modelonderzoek met een vaste bodem, in eerste benadering als volgt geformuleerd: "minimaliseren van de stroomsnelheid in het kustgebied dat door de paalschermen wordt omvat".

1.3 Analyse van het probleem

Teneinde enig inzicht te verkrijgen in de werking van paalschermen lijkt het gewenst een korte analyse te geven van de problemen in het prototype. Deze analyse is tevens van belang om de geidealiseerde opzet van de modelproeven te verklaren en om aan te geven in hoeverre de modelresultaten bruikbaar zijn voor het prototype.

De eroderende kustgedeelten, waar de paalschermen (zullen) worden toegepast, worden gewoonlijk gekenmerkt door een vrij smal strand dat wegens het grote getijverschil van circa 4 m voor een aanzienlijk deel onderhevig is aan de invloed van stroom en golven; verder bevindt zich in veel gevallen vlak voor de kust een diepe getijgeul, die met een tamelijk steil talud aansluit op het natte strand. De tot nu toe aangebrachte paalschermen reiken tot een diepte van N.A.P. - 4 m tot N.A.P. - 6 m; hun voornaamste taak is het beschermen van het natte strand en daarmee het voorkomen van verdere achteruitgang van de duinvoet. Ze hebben niet ten doel het eventuele opdringen van de soms meer dan 20 m diepe getijgeul tegen te gaan.

De vraag, wat precies de oorzaken zijn van de erosie van de beschouwde stranden, is in zijn algemeenheid niet eenvoudig te beantwoorden; dezelfde

moeilijkheid doet zich voor bij pogingen om een zandbalans op te stellen voor een bepaald kustgedeelte. Toch is een inzicht in de natuurlijke zandtransportprocessen nodig om met succes een gerichte ingreep te kunnen doen. In het algemeen kan men, op grond van de continuïteitsregel voor het zand, stellen dat erosie of aanzanding het gevolg is van een van de volgende oorzaken, of van beide:

- een gradiënt in het zandtransport dat langs de kust gericht is, met dien verstande dat bij toenemend langstransport in de richting van dit transport, erosie zal optreden; bij afnemend langstransport treedt in de richting van dit transport aanwas op;
- een resulterend dwarstransport, waarbij zeewaarts gericht dwarstransport gepaard gaat met erosie van het kustwaarts gelegen strandvak, terwijl aanwas optreedt bij landwaarts gericht dwarstransport.

Voorts is het nuttig om vast te stellen, dat elke natuurlijke of gedwongen beïnvloeding van de bodemligging in het prototype slechts bereikt wordt via een gecompliceerde causale keten in het natuurlijke krachtenpel die, sterk geschematiseerd, als volgt kan worden weergegeven.

a geometrische randvoorwaarden in het huidige prototype: bodemligging

b meteorologische en hydraulische randvoorwaarden in het huidige prototype: wind, getij, golven

a + b

c snelheidsveld in het huidige prototype, als functie van plaats en tijd:

waterstanden

getijstromen

orbitaalbeweging

secundaire effecten, zoals brandingsstromen

muistromen

massatransport loodrecht op de golfkam

d eigenschappen bodemmateriaal

c + d

e zandtransporten als functie van plaats en tijd

f verandering in bodemligging

[f] is nu opnieuw een geometrische randvoorwaarde, die gesubstitueerd wordt in [a], waarna de hele cyclus zich (in feite continu) herhaalt: de bodemligging beïnvloedt het snelheidsveld en de zandtransporten, en omgekeerd. Het is vooral deze dynamische karaktertrek van de waterbeweging tussen niet-gefixeerde grenzen die het zo moeilijk maakt om door redenering (respectievelijk berekening) aan te geven waar het uiteindelijke evenwicht tussen water- en zandbeweging gevonden zal worden; de stabiliteit van een dergelijk systeem ligt ook bepaald niet a priori vast.

Op een gegeven moment wordt nu een wijziging opgelegd aan de geometrische randen van de bovengenoemde cyclus door de constructie van een serie paalschermen. Daarmee wordt primair de waterbeweging en pas in de tweede plaats ook het zandtransport beïnvloed, zodat de vraagstelling naar de werking van paalschermen (of een ander type constructie) gesplitst moet worden in twee onderdelen:

- 1 hoe wordt de waterbeweging beïnvloed door het aanbrengen van paalschermen?
- 2 hoe hangt het zandtransport af van de waterbeweging?

Geen van beide vragen is langs theoretische weg volledig te beantwoorden. Het in dit verslag beschreven onderzoek houdt zich in hoofdzaak bezig met een globale, voorlopige beantwoording van vraag 1. Om te weten welke eigenschappen van het totale complex van "de waterbeweging" in aanmerking komen om vastgelegd te worden op grond van vraag 1, dient eigenlijk het antwoord op de tweede vraag - althans in kwalitatieve zin - reeds bekend te zijn: welke parameters van de waterbeweging zijn het meest relevant voor het zandtransport, dat plaatsvindt onder invloed van de gezamenlijke werking van golven en stroom. Het huidige inzicht op dit punt, hoezeer ook beperkt in kwantitatieve zin, is vrij algemeen gebaseerd op de gedachte dat zand van de bodem wordt opgewerveld onder invloed van een schuifspanning die geleverd wordt door een combinatie van de oscillerende orbitaalsnelheid en de (kwasi-)permanente stroomsnelheid [1]. Deze stroomsnelheid kan op zijn beurt een combinatie zijn, opgebouwd door de getijstroom en de brandingsstroom, welke laatste veroorzaakt kan worden door scheefinvalende golven. Daarnaast kunnen recht- of scheefinvalende golven secundaire circulaties opbouwen, met een horizontale of verticale as. Nadat het zand in tijdelijk zwevende toestand is gebracht, kunnen de tijdsgemiddelde

watersnelheden voor het eigenlijke zandtransport zorgen.

Indien verondersteld wordt dat het zandtransport voornamelijk als zwevend transport plaatsvindt, dan is het transportproces globaal als volgt samen te vatten:

- [A] stroomsnelheid nabij de bodem, als functie van plaats en tijd.
 v_{bodem} is samengesteld uit: - orbitaalbeweging (oscillerend)
 - getijstroom
 - brandingsstroom
 - circulatiecellen
 - overige effecten
- } (kwasi-permanent)

- [B] snelheidsverticaal: tijdsgemiddelde stroomsnelheid als functie van de plaats

- [C] eigenschappen bodemmateriaal

A + B + C

- [D] concentratieverticaal: verdeling van de zandconcentratie over de waterdiepte

B + D

- [E] $\int_{\text{waterdiepte}} \text{concentratie} \times \text{gem. snelheid} = \text{zandtransport}$

Om de gedachten te bepalen zijn in fig. 1 een aantal voorbeelden geschetst die aangeven hoe het materiaaltransport, evenwijdig aan of loodrecht op de kust, voorgesteld kan worden als het product van de tijdsgemiddelde waarden van de stroomsnelheid en de zandconcentratie.

Terugkerend naar de oorspronkelijk geformuleerde probleemstelling in samenhang met de stranderosie, namelijk vermindering van het zandtransport in langs- en/of dwarsrichting, kan op grond van [E] in het bovenstaande schema gesteld worden dat gestreefd dient te worden naar een vermindering van de zandconcentratie en/of van de gemiddelde stroomsnelheden. Doordat ook de grootte

van de zandconcentratie, bij een gegeven bodemmateriaal, bepaald wordt door de watersnelheden, kunnen deze beide oorzaken tegelijkertijd in gunstige zin worden beïnvloed door verkleining van de watersnelheden. Dit kan worden gerealiseerd door

- a de golf te verlagen en
- b de stroomsnelheid evenwijdig aan de kust (getij- en brandingsstroom) te verlagen.

Een rechtstreekse ingreep in de golfhoogte wordt met de paalschermen niet beoogd; het zijn open constructies met 50 % of meer open ruimte, terwijl de onderlinge afstand van de paalschermen in de orde van 200 m bedraagt. Wel zullen de paalschermen een vermindering teweeg brengen in de stroomsnelheid evenwijdig aan de kust, zowel wat betreft de getijstroom als de brandingsstroom. Hierdoor wordt het langstransport op twee manieren verminderd, namelijk in de grootte van de zandconcentratie en in de grootte van de stroomsnelheid. Het dwarstransport daarentegen wordt slechts verminderd door de geringere zandconcentratie; de erosie tengevolge van een zeewaarts dwarstransport zal daarom moeilijker te bestrijden zijn.

Een aantal nadelen, die mogelijk verbonden zijn aan het gebruik van paalschermen, mogen hier niet onvermeld blijven. In het geval van een met succes verminderd langstransport volgt uit de zandbalans onmiddellijk dat een zijwaarts gelegen kustvak een geringere zandaanvoer krijgt, tengevolge waarvan daar erosie kan optreden. Een ander nevenverschijnsel, wat zowel bij langstransport als bij dwarstransport nadelig is, is het mogelijk optreden van een vergrote uitwisseling tussen het zandrijke, relatief ondiepe water tussen de paalschermen en het zandarme, diepere water op grotere afstand uit de kust. Deze vergrote uitwisseling kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van het zeewaarts afbuigen van de getij- of brandingsstroom bij de koppen van de paalschermen, van neervorming tussen de paalschermen of van het ontstaan van grote snelheidsgradiënten in dwarsrichting, loodrecht op de kust. Een derde aspect, dat al ter sprake kwam bij de vergelijking tussen massieve en open constructies, is de mogelijk optredende stroomcontractie zeewaarts van de kop, waardoor de zandtransportcapaciteit toeneemt en plaatselijk ontgronding kan ontstaan. Andere punten die in dit verband genoemd kunnen worden, zijn de eventuele ontgronding ten gevolge van de verhoogde turbulentie in de

onmiddellijke omgeving van de palen, en de vervorming van de snelheidsverticaal bij stroming over een gedeeltelijk ondergedompeld paalscherm. Naar aanleiding van de meetresultaten zal hierop nader worden ingegaan.

Resumerend kan men stellen dat paalschermen een gunstige invloed kunnen uitoefenen op een eroderend strand, doordat ze de golfwerking op het strand wellicht iets afzwakken en in het bijzonder de getij- en brandingsstroom afremmen. Daarbij dient er zorg voor te worden gedragen dat de stroom niet op abrupte wijze door de paalschermen van de kust wordt afgeleid, teneinde een resulterend zandtransport in zeewaartse richting te vermijden. Ook moet stroomcontractie voor de koppen zoveel mogelijk worden vermeden. Uit het voorgaande volgt dat bij een modelonderzoek naar de erosie-belemmerende werking van diverse uitvoeringswijzen van paalschermen een belangrijke eerste indruk verkregen kan worden door het vastleggen van de stromingscondities nabij en tussen de paalschermen.

2 Opzet van het onderzoek

2.1 Inleiding

In verband met de toepasbaarheid van de resultaten van het modelonderzoek voor het prototype zullen de omstandigheden in het model zo goed mogelijk moeten aansluiten bij die in het prototype, waar de paalschermen zijn of zullen worden toegepast. Dit betekent dat zowel aan de geometrie van het kustprofiel als aan de in te stellen hydraulische condities in het model bepaalde eisen dienen te worden gesteld. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de opzet van het onderzoek. Hoofdstuk 3 geeft de meetresultaten, die in hoofdstuk 4 nader worden geëvalueerd. In hoofdstuk 5 wordt aangegeven in hoeverre de invloed van paalschermen op een getijstroom door berekening bepaald kan worden op basis van een aantal vereenvoudigende aannamen, en in hoofdstuk 6 wordt een poging gedaan om de waargenomen snelheidsreductie ten gevolge van de paalschermen te vertalen in zandtransporten annex bodemhoogteveranderingen. In hoofdstuk 7 worden de conclusies vermeld en aanbevelingen gegeven voor eventueel verder onderzoek.

Aanvankelijk is overwogen het onderzoek uit te voeren in een model met beweeglijke bodem, waarmee in principe een direct inzicht in de werking van paalschermen met betrekking tot de morfologie zou kunnen worden verkregen. Om verschillende redenen is van een dergelijke opzet van het onderzoek afgezien.

Ten eerste zullen in een model met beweeglijke bodem de processen van het materiaaltransport zeer goed met die in het prototype moeten overeenkomen, opdat de onderzoekresultaten relevant zijn voor het prototype. In het prototype zijn deze processen zeer gecompliceerd en slechts ten dele bekend, terwijl de schaalwetten, die het verband aangeven tussen de hydraulische, sedimentologische en morfologische condities evenmin voldoende bekend zijn. Aan de eis van een exacte weergave van de morfologische verschijnselen in het model kan daarom niet met de vereiste zekerheid worden voldaan.

In de tweede plaats wijkt, mede in verband met het bovenstaande, in een model met beweeglijke bodem de vorm van het kustprofiel vrij sterk af van die in het prototype waar de paalschermen toepassing vinden. In het algemeen zijn de hellingen steiler dan in het prototype, wat een aanzienlijke invloed kan hebben op het brekerproces van de golven [2] en daarmee op de grootte en de snelheidsverdeling van de brandingsstroom. Bovendien zullen in een model met beweeglijke bodem toevallige en niet te vermijden onregelmatigheden in de bodemligging de stroombeelden verstoren.

Op grond van bovenstaande overwegingen is besloten het onderzoek te richten op het meten van de stroomsnelheden en stroomrichtingen in een model met vaste bodem. In een dergelijk model kan elk gewenst kustprofiel op een niet-samengetrokken schaal worden ingebouwd, waardoor de mogelijkheid aanwezig is de hydraulische condities juist weer te geven. Aan de hand van de gemeten stromingen in het model kan dan naderhand met behulp van de beschikbare relaties tussen de hydraulische en de morfologische condities een indruk worden verkregen van het effect van de verschillende paalschermconfiguraties op de materiaalbeweging (zie hoofdstuk 6).

2.2 Schematisering van het prototype

In het prototype vertonen zowel de bodemconfiguratie als de hydraulische condities vrij grote wijzigingen in plaats en in tijd. Voor een vergelijkend onderzoek van verschillende uitvoeringswijzen van paalschermen is het gewenst deze prototypeomstandigheden te schematiseren (fig. 2).

Het geschematiseerde kustprofiel heeft vanaf N.A.P. + 2,00 m tot N.A.P. - 2,00 m een helling van 1 : 35. Zeewaarts daarvan heeft het profiel een helling van 1 : 20, die op een diepte van N.A.P. - 10,00 m aansluit op een horizontale bodem.

De bovenkant van het landwaartse deel van de paalschermen steekt 1,70 m boven het bodemprofiel uit, met dien verstande dat deze bovenkant niet lager ligt dan N.A.P. + 0,50 m. De korte paalschermen lopen van N.A.P. + 2,00 m tot N.A.P. - 2,00 m, en zijn dus 140 m lang. De lange paalschermen reiken tot een diepte van N.A.P. - 5,00 m en zijn dus 200 m lang. Bij de tot nu toe meest gebruikte uitvoering hebben de lange paalschermen een dubbele rij palen in het diepe gedeelte; deze rijen staan 3,50 m uit elkaar. De onderlinge afstand van de lange schermen bedraagt 400 m. De korte paalschermen staan midden tussen de lange in en hebben eveneens een onderlinge afstand van 400 m. De palen zijn rond of vierkant met een diameter van omstreeks 0,25 m. Op het strand tussen N.A.P. + 2,00 m en N.A.P. - 2,00 m is de onderlinge afstand van de palen 0,50 m h.o.h. Verder zeewaarts is de afstand 0,70 m h.o.h., terwijl over de laatste 16 m deze nog toeneemt tot 1,00 m h.o.h. Het openingspercentage neemt dus in zeewaartse richting toe van 50 % tot 75 %.

Wat betreft de hydraulische condities is in dit onderzoek minder de nadruk gelegd op de brandingsstroom dan op de getijstroom, meestal in combinatie met hoogwater met een peil van N.A.P. + 2,00 m. In een enkel geval zijn ook metingen gedaan bij een laagwaterstand van N.A.P. - 2,00 m, waarbij alleen de lange paalschermen de stroom beïnvloeden. De snelheid van de getijstromen is in alle gevallen 1,0 m/s in het diepe gedeelte van het kustprofiel. De golfconditie die al of niet in combinatie met een getijstroom in enkele gevallen werd ingesteld, wordt als volgt gekarakteriseerd:

golfperiode $T = 6,5$ s, golfhoogte $H = 1,20$ m, hoek tussen de golfkammen en de kustlijn $\alpha = 15^\circ$ in het diepe horizontale gedeelte van het kustprofiel.

2.3 Schalen en inrichting van het model

Zoals in 2.1 is beschreven dienen voor een juiste weergave van de stromingen in het model, met name die ten gevolge van de brekende golven, de horizontale schaal en de verticale schaal van het model aan elkaar gelijk te zijn. Een verdere voorwaarde voor de modelschalen is dat nog tot op een geringe diepte nabij de kust de waterbeweging rondom de palen voldoende turbulent is, om te bereiken dat de weerstandscoefficiënt C_w van de palen van de schermen in het model slechts weinig afwijkt van die in het prototype.

Fig. 3 geeft het verband tussen de C_w waarde van een cirkelvormige cilinder en het Reynoldsgetal $Re = \frac{vD}{\nu}$, betrokken op de diameter D van de cilinder. De waarde in het prototype van Re ligt in de orde van grootte van 10^5 , waarbij de waarde van C_w ongeveer 1,0 bedraagt. Om in het model dezelfde grootte van C_w te krijgen mag Re dus niet kleiner zijn dan omstreeks 100. Uitgaande van een modelschaal $n_p = 40$, waarbij de diameter van de palen 0,6 cm bedraagt, is een stroomsnelheid van 2 cm/s in het model nog juist toelaatbaar. Gezien de schaal van de stroomsnelheden $n_v = \sqrt{n_l}$ komt dit overeen met 0,13 m/s in het prototype, wat aanvaardbaar wordt geacht als ondergrens.

Ook uit een oogpunt van beschikbare ruimte voldeed de geometrische schaal 40 goed, omdat hiermee drie aansluitende paalschermvakken met een stramienmaat van 400 m, een kustvak van 1200 m omvattend, juist een plaats konden vinden in een ook overigens geschikte modelruimte met een netto kustlengte van 32 m.

Een overzicht van het model wordt gegeven in fig. 4. Het model, dat is ondergebracht in een van de bestaande modelruimten, bestaat uit een rechthoekig bassin, waarvan de lange zijden de kustlijn respectievelijk de zeezijde vormen. Het kustprofiel is volkomen gelijkvormig aan het in paragraaf 2.2 beschreven geschematiseerde prototype; een onder 1 : 35 hellend strand met een breedte van 3,50 m tussen de H.W. en de L.W. lijn gaat op een

diepte van 5 cm beneden het vergelijkingsvlak over in de 1 : 20 hellende vooroever, welke zich over een afstand van 4,00 m in zeewaartse richting uitstrekt. Op een diepte van 25 cm beneden het vergelijkingsvlak begint de horizontale bodem die zich over een afstand van 4,60 m zeewaarts uitstrekt. Deze afstand tot de zeerland is zodanig gekozen, dat de rand slechts in geringe mate invloed kan uitoefenen op het te onderzoeken stroombeeld nabij de paalschermen; met name werd de eis gesteld dat, bij een onveranderd totaal debiet, de gemiddelde stroomsnelheid in het zeegebied niet meer dan 10 % mag toenemen in het extreme geval dat de paalschermen volledig ondoorlatend zouden zijn. Langs de zeezijde van het model staan zes golfmachines, elk ter lengte van 5 m, waarmee de gewenste golven kunnen worden opgewekt. Een filterconstructie dempt de van de kust gereflecteerde golven zoveel mogelijk. Met behulp van een stelsel van schuiven, aan- en afvoersloten en kleppen kan naar wens het debiet, de stroomrichting en de waterstand worden geregeld; de laatste kan worden afgelezen op een peilnaald, aangebracht halverwege de lengte van het model. De snelheidsverdeling dwars op de kust kan aan de korte zijden van het model worden ingesteld door middel van houten roosterwerken. De modelbodem bestaat uit glad afgewerkte mortel, behalve in het ondiepe gedeelte waar sparingen zijn aangebracht om de paalschermen te kunnen opstellen. Deze sparingen hebben een dwarsdoorsnede van $4 \times 14 \text{ cm}^2$ en een lengte van 5 m, overeenkomend met de langste toe te passen paalschermen. Een sparing kan opgevuld worden met een houten plank die precies aansluit bij de eigenlijke modelbodem; een aantal planken zijn voorzien van een enkel of een dubbel paalscherm, samengesteld uit staafjes betonstaal $\varnothing 0,6 \text{ cm}$. Over de gehele modellengte zijn deze sparingen aangebracht op onderlinge afstanden van 1,25 m teneinde de te onderzoeken paalschermconfiguraties snel en binnen ruime grenzen te kunnen variëren (zie paragraaf 2.4). Eveneens op een stramien van 1,25 m in langsrichting, en samenvallend met de sparingen, is het raaiselsel aangebracht; in dwarsrichting wordt gebruik gemaakt van een aanduiding in m afstand vanaf de H.W.-lijn. Deze beide raaiselsels zijn gevisualiseerd door middel van witte draden, die in langsrichting de raaien 5 tot en met 21 omvatten, en in dwarsrichting de afstanden 0 tot en met 8 m vanaf de H.W.-lijn. De raaidraden zijn juist boven het wateroppervlak aangebracht om parallax bij het meten van drijfverbanen tot een minimum te beperken. Ten behoeve van waarnemingen en metingen kan een mobiele meetbrug, steunend op rails langs de lange zijden

van het model, boven elk gewenst punt van het model worden gebracht.

2.4 Onderzochte paalscherminconfiguraties

Het onderzoek omvat een achttal verschillende opstellingen van paalschermen, die afgebeeld zijn in fig. 5; het type C komt vrijwel overeen met de in het prototype veelal toegepaste vorm. Daarnaast is detailonderzoek verricht aan verschillende uitvoeringen van een enkelvoudig paalscherm. Het aantal van acht verschillende configuraties kan uiteraard slechts een summier beeld geven; het volgende overzicht geeft een indruk van het aantal mogelijke en gerealiseerde vormen.

- Hoek tussen paalschermen en kustlijn; voor alle onderzochte typen gelijk $= 90^\circ$.
- Onderlinge afstand van rijen bij een dubbel paalscherm: voor alle onderzochte typen gelijk $= 8,75$ cm (prototype 3,50 m).
- Onderlinge afstand palen in een rij: voor alle onderzochte typen gelijk; zie fig. 4.
- Hoogte van de palen: voor alle onderzochte typen gelijk; zie fig. 4.
- Aantal rijen per paalscherm: gevarieerd volgens tabel 1.
- Onderlinge afstand tussen de paalschermen: gevarieerd volgens tabel 1.
- Lengte van de paalschermen: 3,50 m of 5,0 m; zie tabel 1.

2.5 Hydraulische condities

Voor het onderzoek naar de invloed van de diverse paalscherminconfiguraties op de stromingen nabij de kust zijn in eerste instantie 6 hydraulische condities vastgesteld (tabel 2). Tijdens de ijkfase van het onderzoek, waarbij geen paalschermen waren aangebracht in het model, zijn de stroomverdelingen gemeten voor al deze condities. Daaruit bleek dat de conditie 1 een iets gunstiger resultaat opleverde dan de conditie 2, zodat deze laatste voor het verdere onderzoek niet is toegepast.

Alle 8 voorgestelde paalschermsituaties zijn onderzocht voor H.W. met alleen stroom (hydraulische conditie 1), en de twee in aanmerking komende typen paalschermen, C (of D of E) en F, voor L.W. met alleen stroom (hydraulische conditie 6). Het aantal proeven met paalschermen voor H.W., stroom in beide

richting en golven (hydraulische condities 3 en 4) is zeer beperkt geweest, terwijl voor H.W. met alleen golven (hydraulische conditie 5) geen proeven met paalschermen zijn uitgevoerd.

Er kan nog worden opgemerkt dat zowel bij H.W. als bij L.W. het debiet voor de getijstroom zodanig is gekozen, dat in het diepe gedeelte van het model een gemiddelde stroomsnelheid van omstreeks 16 cm/s heerste, wat overeenkomt met 1,0 m/s in het prototype.

2.6 Meetmethoden

Om de verschijnselen in het model vast te leggen zijn uiteenlopende meetmethoden gebruikt, elk met zijn eigen specifieke voor- en nadelen, afhankelijk van de situatie. De gemeten verschijnselen hebben betrekking op:

- stroomrichtingen
- stroomsnelheden
- golfrichtingen
- golfhoogten

De verschillende toegepaste meetmethoden worden in het volgende besproken.

Visueel waargenomen fluoresceinevlekken

Deze methode is gebruikt om snel een globale indruk van het stroombeeld te verkrijgen. Het is dikwijls nuttig om een dergelijke waarneming vooraf te laten gaan aan een meer gedetailleerde en tijdrovende kwantitatieve meting.

Fotografisch vastgelegde fluoresceinevlekken

In dit geval worden vanaf een hoogte van 11 m boven het wateroppervlak foto's met bepaalde tijdsintervallen gemaakt van de fluoresceinevlekken. Als aanvulling op de in hoofdstuk 4 te bespreken kwantitatieve resultaten zijn dergelijke foto's aan het verslag toegevoegd ter illustratie van de stroomcondities (foto's 1 ... 7).

Visueel waargenomen oppervlaktedrijvers

Met deze methode is zowel de richting als de snelheid van de stroom gemeten. In het laatste geval wordt de tijd opgenomen die een drijver nodig heeft voor het afleggen van een bepaalde afstand, die gemarkeerd is door raaien. Bij

aanwezigheid van golven in het model bleek dit de enige in aanmerking komende methode voor het meten van de stroomsnelheden te zijn.

Fotografisch vastgelegde oppervlaktedrijvers (stippelfoto's)

Het grootste gedeelte van de stroommetingen is verricht met deze methode. Hierbij worden van een hoogte van 11 m boven het wateroppervlak op één negatief een groot aantal opnamen gemaakt met tijdsintervallen van 3 of 6 seconden. Op de verkregen zgn. "stippelfoto's" staat de plaats van de drijvers op een groot aantal tijdstippen aangegeven (zie foto's 8 en 9). Door het meegefotografeerde raaienstelsel is naderhand het gehele snelheidsveld op te meten. Bij aanwezigheid van golven waren de drijvers in de brandingszone niet voldoende zichtbaar op de foto's.

Ottmolen

Stroomsnelheidsmetingen met de ottmolen, die worden verricht met de molen ingesteld op de halve diepte, zijn alleen uitgevoerd tijdens het instellen van het model.

Micromolen

Met dit instrument van kleine afmetingen zijn tijdens het onderzoek een aantal snelheidsverticalen doorgemeten; voorts werden snelheden gemeten op halve diepte.

Fotografisch vastleggen van het golfbeeld

De hoek van de golfkammen met de kustlijn werd gefotografeerd nadat met behulp van aluminiumpoeder op het wateroppervlak de zichtbaarheid van de golfkammen was verbeterd (zie foto 10).

Golfhoogtemetingen

De gebruikelijke apparatuur met continue golfregistratie werd gebruikt voor het meten van de hoogte van de brekende golven.

3 De meetresultaten

3.1 Overzicht van de metingen

Het meetprogramma is in de loop van het onderzoek in overleg met de opdrachtgever op sommige punten aangepast aan de tussentijdse resultaten. Zo is besloten de proeven uit te voeren met slechts één kustprofiel in plaats van twee, zoals aanvankelijk de bedoeling was. Anderzijds zijn een paar proeven met één paalscherm ingevoegd, die van belang leken voor het interpreteren van enkele modelresultaten. Deze betreffen een serie metingen benedenstrooms van een paalscherm met een variabele uitbouw lengte, en metingen van de snelheidsverticaal boven- en benedenstrooms van een paalscherm.

Een overzicht van alle metingen, ingedeeld naar type paalscherm, hydraulische conditie en meetmethode wordt gegeven in tabel 3; tevens wordt in deze tabel verwezen naar de respectieve paragrafen waar de resultaten worden besproken.

3.2 Instelling van het model zonder paalschermen

3.2.1 Inleiding

Een eerste vereiste voor een betrouwbaar vergelijkend onderzoek naar de invloed van een aantal typen paalschermen op het stroombeeld is een eenduidig vastgelegd stroombeeld zoals dat bij afwezigheid van paalschermen gevormd wordt. Dit uitgangsstroombeeld dient een minimum aan snelheidsgradiënten te vertonen in de stroomrichting en wel in de eerste plaats voor het verkrijgen van een zo lang mogelijke meetsectie met een constante snelheidsverdeling in dwarsrichting.

In de tweede plaats is een gelijkmatig stroombeeld met rechte, evenwijdige stroombanen gewenst in verband met het verschijnsel van stroomrefractie in het geval dat er een golf aanwezig is. De hoek waaronder de golfkam op de kust breekt is immers enerzijds mede afhankelijk van de stroomrefractie, en anderzijds mede bepalend voor de grootte van de brandingsstroomsnelheid; een in langsrichting van het model variërende stroomrefractie zal dus gepaard gaan

met een - ongewenste - variatie van de brandingsstroom. Eerst zal in paragraaf 3.2.2 worden ingegaan op de instelling van het model zonder golven; in paragraaf 3.2.3 wordt de golfconditie mede in beschouwing genomen.

3.2.2 Toestand met alleen stroom

De ruwheid van de modelbodem is onveranderd gelaten, zodat uitsluitend door bijregelen van de modelranden (roosterwerk) invloed uitgeoefend kan worden op het stroombeeld in het model. De kwaliteit van het stroombeeld werd in eerste instantie steeds visueel beoordeeld door middel van fluoresceinevlekken, bij nader onderzoek door een snelheidsmeting met de ottmolen op halve diepte of met drijvers, beide in een beperkt aantal raaien. De uiteindelijk verkregen toestand, die voldoende werd geacht als uitgangspunt voor de proeven met paalschermen, werd nauwkeurig doorgemeten in een gebied dat wordt begrensd door de raaien 5 en 21, en door de afstanden 0 en 8,0 m uit de H.W.-lijn. Binnen dit meetvak vinden ook de metingen met paalschermen plaats, hoewel de paalschermen zelf ook buiten dit vak werden opgesteld.

De meting met de ottmolen op halve waterdiepte werd verricht voor de hydraulische condities 1 en 2; de afmetingen van het instrument maakten het onmogelijk de stroomsnelheden te meten in het gebied vanaf de H.W.-lijn tot 2 m zeewaarts daarvan. De afzonderlijke waarden zijn weergegeven in tabel 4 en 5, waarna in tabel 6 de gemiddelde waarden en de variatie zijn samengevat. Het blijkt dat de hydraulische conditie 1 een gelijkmatiger stroomverdeling oplevert dan de conditie 2, wat toegeschreven moet worden aan een verschil van de instroming aan beide einden van het model.

De meting met drijvers kon tot iets dichterbij de H.W.-lijn plaatsvinden; de resultaten zijn op overeenkomstige wijze samengevat als bij de vorige meting, en wel in de tabellen 7, 8 en 9. De snelheden zijn groter dan die gemeten met de ottmolen, omdat ze betrekking hebben op het oppervlak.

Met de stippelfoto's werd een gebied bestreken van raai 7 tot aan raai 18; de over deze afstand gemiddelde snelheden zijn weergegeven in tabel 10 voor de hydraulische condities 1, 2 en 6. In fig. 6 zijn de gemiddelde snelheden van

de bovenomschreven metingen grafisch weergegeven wat betreft de stroomtoestanden 1 en 2; de snelheidsverdeling behorend bij de laagwater-conditie 6 is in fig. 7 gegeven.

Op grond van de gemeten stroomverdelingen is voor het verdere onderzoek met alleen een getijstroom en een waterstand overeenkomend met H.W., de hydraulische conditie 1 toegepast. De stroomsnelheden bij de verschillende paalschermconfiguraties voor deze hydraulische conditie zijn steeds vastgelegd door middel van fotografische opnamen van oppervlaktedrijvers. Het begrip snelheidsreductie, dat in de rest van het verslag een centrale plaats inneemt, is dus gekoppeld aan de in tabel 10 gegeven basis-snelheidsverdeling voor conditie 1. Voor de proeven met alleen een getijstroom en een L.W. stand geldt als vergelijkingsbasis de stroomverdeling gegeven in tabel 10 voor de hydraulische conditie 6.

3.2.3 Toestand met golven en stroom

Er is, in verhouding tot het aantal metingen met paalschermen, veel aandacht besteed aan het vastleggen van de golf- en stroomcondities in de ijkfase van de toestand met golven. Dit is te verklaren door de grote gecompliceerdheid van het stroombeeld, wanneer een scheef invallende golf een brandingsstroom opwekt en er onder bepaalde omstandigheden instabiele circulatiecellen ontstaan onder invloed van de ingestelde getijstroom, welke laatste een andere richting kan hebben dan de brandingsstroom (hydraulische conditie 3). De plaats en de hoogte van de meest zeewaarts brekende golf is voor alle raaien uitgezet in fig. 8; de gemiddelde waarden zijn respectievelijk omstreeks 1,80 m uit de H.W.-lijn en circa 3 cm, met daaromheen een vrij grote spreiding. Onder alle golfcondities vertoont de brekerplaats, naast een kleinschalig fluctuatiefenomeen, een systematische variatie langs de kust; op de mogelijke oorzaken daarvan is niet nader ingegaan.

Een globale indruk van het stroombeeld voor de hydraulische condities 3 en 4 is verkregen door de visuele waarneming van de verplaatsing van fluoresceinvlekken (fig. 9). Conditie 4, met de brandingsstroom en de getijstroom in dezelfde richting, wordt gekenmerkt door rechte evenwijdige stroombanen,

afgezien van een kleine neer bij de instroming. Bij conditie 3 handhaaft zich op een afstand < 1 m vanaf de H.W.-lijn een doorgaande brandingsstroom, in een richting tegengesteld aan die van de getijstroom op een afstand > 4 m. Daartussen bevinden zich afwisselend plaatsen van gelijkmatige en geconcentreerde uitwisseling (muistromen) tussen de beide stroomsystemen.

Het snelheidsveld voor de drie golfcondities werd gemeten met behulp van visueel waargenomen oppervlaktedrijvers. De gemeten stroomsnelheden in de diverse raaien en de gemiddelde snelheden staan vermeld in de tabellen 11, 12 en 13 en alle snelheidsprofielen zijn weergegeven in fig. 10. Bij conditie 5, met alleen golven, werd in de meeste raaien voor afstanden $> 3,0$ m geen stroomsnelheid meer geconstateerd. In fig. 11 zijn de gemiddelde stroomsnelheden weergegeven, waaruit blijkt dat de stroom in de brandingszone slechts in geringe mate wordt beïnvloed door een mee- of tegengerichte getijstroom. Verder is in tabel 14 voor elke afstand tot de H.W.-lijn de standaardafwijking, alsmede de genormaliseerde standaardafwijking in de gemeten stroomsnelheden, weergegeven. De variatie in de stroomsnelheden is in verhouding erg groot, waarvoor de volgende oorzaken zijn aan te wijzen:

- het inhomogene brekerveld van de golven als gevolg van variaties in de golfhoogte
- de waarde van de gemiddelde snelheid, die vooral bij de condities 3 en 5 plaatselijk zeer gering is
- het moeilijk vaststellen van de gemiddelde langsstroomsnelheid in de brekerzone.

Foto 10 geeft een indruk van het refractiepatroon van de golven en van de plaats van breken bij de drie ingestelde hydraulische condities, zichtbaar gemaakt met behulp van aluminiumpoeder op het wateroppervlak. Zeewaarts van de brekerzone tekenen de golfkammen zich duidelijk af door de variatie in de dichtheid van het poeder onder invloed van de orbitaalsnelheden; ook het begin van de brekerzone is duidelijk zichtbaar tengevolge van het watermassatransport aan de oppervlakte, dat ontstaat door de brekende golven van het type "spilling".

Het blijkt dat de getijstroom slechts een geringe invloed heeft op de refractie van de golven. Nabij het breekpunt op $1,5$ à $2,0$ m van de H.W.-lijn is de

invalshoek in alle gevallen gelijk aan 8° à 9° . In fig. 12 is de hoek tussen de golfkammen en de kustlijn uitgezet als functie van de afstand tot de H.W.-lijn voor de situatie waarbij geen getijstroom aanwezig is, terwijl tevens de berekende hoek volgens de lineaire golftheorie is aangegeven.

3.3 Proeven met één paalscherp

3.3.1 Snelheidsverticaal nabij het paalscherp

Teneinde enig inzicht te verkrijgen in details van het stroombeeld zoals dat zich ontwikkelt in de onmiddellijke nabijheid van een paalscherp zijn in verschillende situaties, met uitsluitend stroom, metingen verricht met de micromolen. Hoewel het hier een uiterst fijnmechanisch precisieinstrument betreft is de diameter van de rotor (15 mm) toch nog te groot om de kleinschalige turbulentiestructuur achter de paalrijen vast te leggen. Er is dan ook uitsluitend gemeten aan de tijdsgemiddelde waarde van de snelheid, waarbij op grond van een vooronderzoek besloten werd tot een meettijd van 100 s. De snelheid werd per punt driemaal gemeten en daarna gemiddeld. De micromolen werd achtereenvolgens op verschillende hoogten boven de bodem opgesteld, met een minimum afstand van 2 cm tussen de as en de bodem en van 3 cm tussen de as en het wateroppervlak. De asrichting was steeds evenwijdig aan de kustlijn.

Er werden vier verschillende gevallen doorgemeten, waarbij het paalscherp zich steeds in raai 13 bevond, en waarbij de micromolen achtereenvolgens op afstanden van 100 en 20 cm bovenstrooms, en 20, 50, 100, 150 en 250 cm benedenstrooms werd geplaatst, op een vaste afstand van de waterlijn. Bij een dubbel paalscherp werd tevens tussen de twee paalrijen de stroomsnelheid gemeten. Deze vier gevallen zijn beschreven in tabel 15, met de aanduiding M1 ... M4. Bij M1 en M2 kwam de waterstand overeen met H.W., bij M3 en M4 was de waterstand 5 cm lager in het model, overeenkomend met N.A.P. De meetresultaten zijn als volgt gepresenteerd: in tabel 16 zijn de snelheden weergegeven, en in tabel 17 de percentages, waarbij de snelheden in het bovenstroomse punt op 100 % werden gesteld. De snelheidsverticalen zijn getekend in fig. 13. Fig. 14 illustreert aan de hand van de uitgezette

snelheidspercentages op de verschillende hoogten boven de bodem nog eens duidelijk het vervormen van de snelheidsverticaal als functie van de plaats; bij de beide overspoelde paalschermen (situaties M1 en M2); in fig. 15 is hetzelfde uitgezet voor de situaties M3 en M4, en hierbij valt op dat er in dit geval nauwelijks van vervorming gesproken kan worden. Tenslotte is in fig. 16 uitgezet hoe de over de verticaal gemiddelde relatieve snelheid voor alle vier de situaties verloopt als functie van de plaats, waarbij opvalt dat de gemiddelde snelheid bij de beide overstroomde paalschermen M1 en M2 ook benedenstrooms van het paalscherm nog duidelijk afneemt. Deze figuur geeft tevens een indruk van de verschillende mate waarin er een zeewaarts gerichte snelheidscomponent aanwezig moet zijn bij de respectieve situaties, als functie van het al dan niet juist overspoeld worden van een paalscherm, en van de dichtheid ervan (enkele of dubbele paalrij).

De grootte van deze zeewaarts gerichte snelheidscomponent is niet gemeten in het model, maar kan als volgt worden benaderd. In de situatie zonder paalschermen is het debiet bij H.W. tussen de H.W.-lijn en de 4 m lijn ongeveer 18,5 l/s en tussen de H.W.-lijn en de 5 m lijn ongeveer 37 l/s. Wanneer wordt aangenomen dat de stroomverdeling boven- en benedenstrooms van het paalscherm gelijkvormig is, dan wordt in M1 het debiet langs de kust over een afstand van 3,50 m gereduceerd van 100 % tot 77 %. Dit betekent dat 4,5 l/s de 4 m lijn in zeewaartse richting passeert en 9 l/s de 5 m lijn. Gemiddeld over een afstand van 3,50 m is de zeewaarts gerichte snelheidscomponent ter plaatse van de 4 m lijn dan 1,0 cm/s en ter plaatse van de 5 m lijn 1,5 cm/s.

Bij een waterstand van N.A.P. is in de situatie zonder paalschermen het debiet tussen de H.W.-lijn en de 4 m lijn ongeveer 4 l/s en tussen de H.W.-lijn en de 5 m lijn ongeveer 14 l/s. In de situatie M3 neemt het debiet af tot 67 % over een afstand van 1,50 m. Gemiddeld over deze afstand is de zeewaarts gerichte snelheidscomponent dan ter plaatse van de 4 m lijn 1,2 cm/s en ter plaatse van de 5 m lijn 2,5 cm/s. Nabij het paalscherm is de stroomsnelheidscomponent in zeewaartse richting groter. Over een afstand van 0,40 m neemt het debiet af van 87 % tot 71 %. Over deze afstand is dan de gemiddelde zeewaartse snelheidscomponent ter plaatse van de 4 m lijn 2,3 cm/s en ter plaatse van de 5 m lijn 4,8 cm/s. Op grond

van de bovenstaande berekening zou de maximale zeewaarts gerichte stroomsnelheidscomponent in het prototype in de orde van $4,8 \text{ cm/s} \times \sqrt{40} = 30 \text{ cm/s}$ kunnen zijn. Overigens is deze zeewaartse stroming het sterkst merkbaar bij het bovenstrooms gelegen paalscherm van een reeks, tenzij de onderlinge afstanden zo groot zijn dat alle schermen zich gedragen als een alleenstaand scherm.

3.3.2 Verschillende uitbouw lengten van één paalscherm

De hier te beschrijven proef, in feite pas uitgevoerd na afloop van de eigenlijke metingen aan de verschillende paalschermconfiguraties, hoort qua karakter bij het voorbereidend onderzoek en wordt derhalve reeds nu gepresenteerd. Het doel van de proef was het globaal vastleggen van de invloedssfeer in stroomafwaartse richting van een paalscherm met verschillende uitbouw lengten. Hiertoe werd stroomconditie 1 ingesteld, en werd een dubbel paalscherm in stappen van 0,5 m uitgebouwd in raai 13. Op een afstand van 5 m benedenstrooms, in raai 9, werden met de micromolen op halve waterdiepte stroomsnelheden gemeten op afstanden van 1,5 m tot en met 5,5 m uit de H.W.-lijn. Door de relatief geringe turbulentie kon in dit geval volstaan worden met 3 metingen van elk 50 s per meetpunt. De gemiddelde snelheden en de relatieve snelheden zijn samengevat in tabel 18. Het begrip relatieve snelheid wordt in dit geval gedefinieerd als de verhouding tussen de snelheid bij een gegeven uitbouw lengte L en de snelheid zoals die in datzelfde punt gemeten werd bij $L = 0$. In fig. 17 zijn enige bijbehorende snelheidsverdelingen uitgezet, waaruit blijkt dat de aanwezigheid van het deels uitgebouwde paalscherm zich ook 5 m benedenstrooms nog zeer duidelijk aftekent in het snelheidsverloop.

Een duidelijker inzicht in de situatie wordt verkregen uit een beschouwing van fig. 18. Daarin zijn voor de meetpunten op 1,5 m tot en met 3,5 m uit de H.W.-lijn de relatieve snelheden uitgezet als functie van de mate waarin de kop van het uitgebouwde paalscherm zich landwaarts respectievelijk zeewaarts bevindt ten opzichte van het beschouwde meetpunt. Voor zover de kop van het paalscherm landwaarts van het meetpunt ligt varieert v_{rel} tussen 94 % en 109 %; in het andere geval varieert v_{rel} van 70 % tot 95 %. De relatieve snelheid vertoont in alle gevallen een scherpe daling op het

ogenblik dat het meetpunt precies in de "schaduw" komt te liggen van het paalscherf, hoewel de afstand tussen meetpunt en paalscherf niet onaanzienlijk is. Uit het verloop van de gemiddelde waarde van v_{rel} blijkt deze tendens zeer duidelijk aanwezig. Bovendien komt hierbij nog een bijzonderheid naar voren: naarmate het meetpunt verder in de "schaduw" van het zeewaarts uitgebouwde paalscherf komt te liggen, vertoont v_{rel} een lichte maar duidelijke stijging. Dit is een merkwaardig resultaat, waarvan de verklaring wellicht gezocht moet worden in een grotere effectieve weerstand van die gedeelten van het paalscherf die zich in dieper water bevinden. In hoofdstuk 5 wordt hierop verder ingegaan. Een andere mogelijkheid zou kunnen zijn, dat de beperkte breedte van het model hier een rol speelt; bij een volledig tot de zeerand uitgebouwd paalscherf zou het onveranderd ingestelde debiet van 450 l/s immers toch het scherm passeren zodat de snelheid benedenstrooms van het paalscherf dan ongeveer gelijk zou zijn aan de oorspronkelijke snelheid zonder paalscherf. Naar aanleiding van de eigenlijke paalscherfmetingen komt een verklaring van dit effect nader ter sprake in paragraaf 4.2.1.

3.4 Proeven met verschillende paalscherfconfiguraties

De in deze paragraaf te bespreken proeven vormen de kern van het eigenlijke onderzoek. Een overzicht van de onderzochte paalscherfconfiguraties, met daarbij aangegeven de stroomconditie, de situering van de schermen en die van de door de foto's en de drijvers bestreken meetvakken, is gegeven in tabel 19.

3.4.1 Toestand met alleen stroom

Eerst worden de situaties met H.W. (hydraulische conditie 1) besproken, waarbij de foto's 1 ... 7 een indruk geven van het stroombeeld bij de paalscherftypen A ... G. Voor de opstellingen G,D en E zijn nog enige bijzondere metingen verricht. De resultaten daarvan zijn van belang voor de interpretatie van de overige uitkomsten, en zullen daarom hier eerst ter sprake worden gebracht.

Type G

Tijdens het modelonderzoek bleek het gewenst een inzicht te verkrijgen in de mate waarin de in een bepaald paalschermvak geregistreerde snelheid afhankelijk is van het aantal bovenstrooms gelegen vakken. Dit vraagstuk is ook van belang voor het ontwerpen van een reeks paalschermen ter bescherming van een bepaald kustvak in het prototype. Daarom werd de proevenserie G-a uitgevoerd, waarbij de camera de drijversnelheden steeds in vak 7-4 registreerde, terwijl aanvankelijk slechts de twee paalschermen in raai 7 en 4 aanwezig waren. Achtereenvolgens werd nu telkens een paalscherm bijgeplaatst in de raaien 10, 13, 16, 19 en 22, zodat het aantal bovenstrooms aanwezige vakken van 0 tot 5 werd uitgebreid. De verkregen snelheidsverdelingen zijn weergegeven in tabel 20 en gedeeltelijk in fig. 19; duidelijk blijkt dat een toevoeging van meer dan twee vakken slechts in zeer geringe mate effectief is. Voorts valt op dat de spreiding in de snelheden sterk toeneemt in het gebied juist zeewaarts van de paalschermen, hetgeen wijst op een minder stabiel stroombeeld aldaar.

Om een indruk te krijgen van de spreiding in de gemeten snelheden, die optreedt doordat het stroombeeld niet exact permanent is, en waarbij in feite ook een rol wordt gespeeld door onnauwkeurigheden in het fotograferen en uitwerken van de foto's, is de proevenserie G-b opgezet. Met de camera vast opgesteld boven de sectie 16-13 werden 7 stippelfoto's gemaakt binnen een tijdsbestek van enige minuten. De resulterende snelheden, de gemiddelde snelheid en de relatieve snelheid als percentage van de basissnelheid, alsmede de (genormaliseerde) standaardafwijking zijn vermeld in tabel 21. Ter plaatse van de grootste snelheidsgradiënt, die juist buiten de kop van het paalscherm tussen 3,5 en 4,0 m afstand uit de H.W.-lijn optreedt, wordt ook de grootste waarde van de variatiecoëfficiënt aangetroffen, namelijk 17 %. Ter vergelijking met de basissnelheden is ook de variatiecoëfficiënt met betrekking tot de ijking bepaald; in dit geval treedt het maximum van 13 % op ter plaatse van 4,0 m uit de H.W.-lijn. De gemiddelde waarde van de variatiecoëfficiënt van 2,0 m tot 6,0 m bedraagt ruim 7 %. Dit geeft een indicatie bij de beoordeling of bepaalde waargenomen verschillen tussen uiteenlopende paalschermopstellingen al of niet significant zijn.

Type D

Van het paalschermtypen D zijn twee versies van de situering van de paalschermen

onderzocht. De in tabel 22 gepresenteerde snelheden tonen aan dat opstelling D-b, ondanks de aanwezigheid van een groter aantal paalschermvakken bovenstrooms van de meetsectie, een geringere snelheidsreductie te zien geeft dan opstelling D-a. Mogelijke oorzaken zijn wellicht de verschillende weersomstandigheden (invloed van wind) tijdens de metingen en de nabijheid van de benedenstroomse modelrand bij opstelling D-b.

Type E

Bij de 4 verschillende opstellingen, waarin type E is onderzocht, lopen de snelheidsverdelingen vrij sterk uiteen (zie tabel 23 en fig. 20). Op grond van het aantal aanwezige paalschermvakken zouden E-a-2 en E-b-1 gelijke uitkomsten moeten geven; verder verwacht men in de volgorde E-a-1, E-a-2 (of E-b-1), E-b-2 een voortgaande vergroting van de snelheidsreductie tussen de paalschermen tengevolge van het feit dat respectievelijk 0,1 en 2 vakken bovenstrooms aanwezig zijn. Als verklaring voor het gedeeltelijk afwijkende gedrag wordt verwezen naar de onder D genoemde mogelijkheden.

Het snelheidsverloop, absoluut en relatief, van de korte paalscherm typen A, B, G en H, is weergegeven in fig. 21 en de bijbehorende waarden in tabel 24. De snelheden voor type G zijn ontleend aan de eerder beschreven meting G-b, waarbij de ontbrekende snelheden op afstanden $< 1,5$ m en $> 6,0$ m uit de H.W.-lijn zijn ontleend aan meting G-a met twee paalschermen bovenstrooms van de meetsectie. Een voorbeeld van een stippelfoto met paalscherm type A is weergegeven in foto 8.

Het snelheidsverloop van de lange paalschermen C, D, E en F is weergegeven in fig. 22 en de bijbehorende waarden staan vermeld in tabel 24. Voor het paalscherm type D is het gemiddelde van de snelheidsverdelingen van de proeven D-a en D-b aangehouden en voor het type E van de proeven E-a-1, E-a-2, E-b-1 en E-b-2.

Wat betreft de situaties met L.W. kunnen slechts twee typen opstellingen onderscheiden worden, al naar gelang er zeewaarts van 3,5 m uit de H.W.-lijn enkele schermen h.o.h. 5 m of dubbele schermen h.o.h. 10 m staan. Het resultaat voor de typen F en C, D, E is vermeld in fig. 23, waarbij als referentie voor het bepalen van de relatieve snelheid gebruik is gemaakt van

de bijbehorende basissnelheidsverdeling van stroomtoestand 6 (zie tabel 10); de respectieve waarden staan vermeld in tabel 25. Foto 9 is een voorbeeld van een stippelfoto met paalscherm type F in de L.W.conditie.

3.4.2 Toestand met golven en stroom

Alvorens een beperkt aantal paalschermtypen in detail door te meten is van alle opstellingen eerst een stroombeeldschets vervaardigd met de golfcondities 3 en 4, dus met de getijstroom en de brandingsstroom respectievelijk tegengesteld en gelijk gericht (zie tabel 2 en 3). Deze stroombeeldschetsen, vervaardigd aan de hand van verplaatsende fluoresceïnievlekken, zijn weergegeven in fig. 24, 25, 26 en 27, waarbij de situering van de paalschermen tevens op de schetsen is aangegeven. Het stroombeeld zonder paalschermen werd eerder gegeven in fig. 9 (paragraaf 3.2.3). Bij golfconditie 4 valt bij sommige paalschermopstellingen een neiging van de stroom waar te nemen om vlak voor de paalschermen enigszins zeewaarts af te buigen; er zijn echter ook gevallen waarbij de stroomlijnen evenwijdig aan de kust door de paalschermen heengaan. Bij golfconditie 3 treedt, met of zonder paalschermen, ongeveer hetzelfde stroombeeld op, dat in beide gevallen wordt gekenmerkt door een weinig stabiele neervorming. De paalschermen kunnen blijkbaar wel een aanzet zijn voor een geconcentreerde uitwisselingsstroom tussen de twee tegengesteld gerichte stroomsystemen, maar uitwisseling treedt ook elders op; bij sommige paalschermen vindt geen geconcentreerde uitwisseling plaats.

Gedetailleerde drijvermetingen van het stroombeeld zijn verricht bij de typen B, C en E voor de hydraulische conditie 4. De afzonderlijke waarden voor elke raai en afstand, alsmede de gemiddelde waarde per afstand en de relatieve snelheden zijn gegeven in de tabellen 26, 27 en 28. In verband met de in paragraaf 3.2.3 vermelde inhomogeniteit van het stroombeeld in de brandingszone is, ter berekening van de relatieve snelheid, gebruik gemaakt van slechts de overeenkomstige basissnelheden uit tabel 12 in plaats van de over alle raaien gemiddelde snelheid. In fig. 28 zijn de snelheden en de relatieve snelheden voor de drie onderzochte opstellingen grafisch weergegeven.

3.5 Samenvatting

- 1 Na het instellen van het model zijn de snelheidsverdelingen gemeten zoals die voor de verschillende hydraulische condities optreden bij afwezigheid van paalschermen. Daarbij blijkt de brandingsstroom veruit te domineren over de getijstroom.
- 2 Stroomafwaarts van een gedeeltelijk overspoeld paalscherm treedt een duidelijke vervorming van de snelheidsverticaal op; na een afstand van circa

- 20 maal de hoogte van het scherm heeft de snelheidsverticaal zijn oorspronkelijke vorm weer teruggekregen.
- 3 Stroomafwaarts van een niet-overspoeld paalscherf treedt geen duidelijke vervorming van de snelheidsverticaal op.
 - 4 Bij het meest bovenstrooms gelegen paalscherf van een reeks kan in het prototype plaatselijk een snelheidscomponent in zeewaartse richting optreden ter grootte van omstreeks 0,30 m/s.
 - 5 De door een solitair paalscherf teweeggebrachte verandering in de stroomsnelheidsverdeling handhaaft zich stroomafwaarts tenminste over een afstand van enige paalscherflengten.
 - 6 Stroomafwaarts van de twee meest bovenstrooms gelegen paalscherfvakken van een reeks heeft zich een vrijwel stabiele snelheidsverdeling ingesteld.
 - 7 Neervorming heeft zich alleen voorgedaan bij de hydraulische conditie 3, met tegengesteld gerichte getij- en brandingsstromen.

4 Evaluatie van de meetresultaten

4.1 Inleiding

Om een duidelijk uitgangspunt te verkrijgen voor de onderlinge vergelijking van de paalschermen zijn in tabel 29 alle snelheden nog eens samengevat, en tevens alle relatieve snelheden, uitgedrukt als percentages van de respectieve basissnelheden. De bijbehorende grafische voorstellingen konden niet in één figuur worden samengevat zonder de leesbaarheid geweld aan te doen; daarvoor wordt verwezen naar de figuren:

- fig. 21: 4 korte paalschermen; hydraulische conditie 1
- fig. 22: 4 lange paalschermen; hydraulische conditie 1
- fig. 23: 2 lange paalschermen; hydraulische conditie 6
- fig. 28: 3 diverse paalschermen; hydraulische conditie 4

In de volgende paragrafen worden vergelijkingen gemaakt tussen verschillende groepen paalschermen van wisselende samenstelling. In eerste instantie zal dit gebeuren op grond van de in bovenstaande figuren vermelde grafische presentatie van de relatieve snelheden enerzijds, en de tot nu toe gegeven beschrijving van de geometrie der paalschermen anderzijds; in tweede instantie zullen als vergelijkingscriteria nieuwe hydraulische en geometrische parameters worden geformuleerd, met behulp waarvan een duidelijker totaalbeeld kan worden verkregen.

4.2 Vergelijking van paalschermen (alleen stroom)

4.2.1 H.W. conditie; vergelijking van relatieve snelheden

In het ondiepe gedeelte (0 - 3,5 m) vertonen de korte paalschermen als groep een grotere snelheidsreductie dan de lange; in het diepere deel (3,5 - 5,0 m) is dat uiteraard juist omgekeerd, en wel mede door de snelheidstoename die bij de korte schermen optreedt voor de afstanden ≥ 4 m. Een overeenkomstige snelheidstoename vindt bij de lange schermen pas plaats voor afstanden ≥ 6 m. In geen van de gevallen wordt een relatieve snelheid van 114 % overschreden. Hierbij moet bedacht worden dat dit gemiddelde snelheden zijn over een gehele meetsectie; plaatselijk kunnen voor de kop van een paalscherm hogere snelheden optreden (zie paragraaf 4.2.2).

Bij de korte paalschermen wordt in de volgorde A, G, B steeds meer materiaal voor de paalschermen gebruikt per eenheid van kustlengte (respectievelijk 2, 2,7 en 4 paalrijen per 10 m kustlengte) en het is dan ook niet verwonderlijk dat in dezelfde volgorde ook de snelheidsreductie toeneemt, waarbij opgemerkt kan worden dat de grote hoeveelheid extra materiaal in type B bepaald niet in dezelfde mate met een verdere snelheidsreductie wordt gehonoreerd. Ook is het een opvallend feit dat type H een duidelijke verbetering vertoont ten opzichte van type A, en zelfs weinig verschilt met de typen G en B, terwijl H zich toch slechts van A onderscheidt doordat een contractie heeft plaatsgevonden van de paalschermen (dubbele paalschermen op 10 m afstand in plaats van enkele schermen op 5 m afstand); H bevat dus slechts de helft van het materiaal dat in B is verwerkt. Op de mogelijke oorzaak van dit gunstige contractie-effect wordt nader teruggekomen in hoofdstuk 5.

Bij de lange paalschermen heeft de variatie in geometrie juist in andere zin plaatsgevonden: in de volgorde F, C, E heeft zich een contractie in twee stappen voltrokken zonder de hoeveelheid materiaal per eenheid van kustlengte te wijzigen, waarna van E naar D de hoeveelheid materiaal in de ondiepe zone (0 - 3,5 m) verdubbeld is. Ook hierbij blijkt de contractie een uitgesproken gunstig effect te hebben op de snelheidsreductie; de toevoeging in de vorm van dubbele, korte paalschermen (E $\rightarrow$ D) heeft weliswaar in geringe mate een gunstig effect op de snelheid in de desbetreffende zone,

maar daartegenover staat een toename van de snelheid in de strook van 3,5 - 5,0 m; zeewaarts van 5,0 m verandert er zeer weinig. Type C onderscheidt zich in gunstige zin van de overige lange schermen doordat zeewaarts 5,0 m minder snelheidstoename optreedt.

Een interessante vergelijking is ook te maken tussen sommige korte paalschermtypen en hun verlengde versies: $A \rightarrow F$, $H \rightarrow E$ en $B \rightarrow D$. In het laatstgenoemde geval geldt de verlenging slechts voor de helft van het aantal korte paalschermen. De bijbehorende relatieve snelheden zijn paarsgewijs uitgezet in de figuren 29, 30 en 31. In alle drie gevallen van (gedeeltelijke) verlenging openbaart zich eenzelfde verschijnsel als in paragraaf 3.3.2 werd vermeld bij een solitair paalscherm dat stapsgewijs werd verlengd: bij verlenging van een paalscherm van 3,5 tot 5,0 m gaat een markante snelheidsreductie in datzelfde gebied gedeeltelijk ten koste van de snelheidsreductie in het aansluitende kustgebied van 0 - 3,5 m. Voor het resterende gedeelte wordt het debiet-deficit kennelijk gecompenseerd in het stroomprofiel zeewaarts van de paalschermen. Een onzekere factor bij de interpretatie van dit verschijnsel wordt gevormd door het feit dat in het model in alle bovengenoemde gevallen een constant debiet was ingesteld: een verlaging van de snelheid op de ene plaats moet zich dus wel openbaren als een snelheidsverhoging op een naburige plaats. Of dit zich in het prototype ook zal manifesteren is afhankelijk van de vraag of het totale getijdebet door de aanwezige geul vrijwel onafhankelijk is van de aangebrachte paalschermen. In het algemeen zal deze vraag bevestigend moeten worden beantwoord, zodat in dit opzicht niet van een modeffect kan worden gesproken.

4.2.2 H.W. conditie; vergelijking van snelheidsgradiënten

De aanwezigheid van sterke snelheidsgradiënten kan weliswaar niet zonder meer in kwantitatieve zin geïnterpreteerd worden als een erosie-bevorderende omstandigheid, maar de signalering ervan lijkt in het kader van dit onderzoek toch relevant. Er wordt onderscheid gemaakt tussen gradiënten in dwars- en in langsrichting.

De maximale gradiënt in dwarsrichting kan opgevat worden als een maat voor de kans op uitwisseling tussen het (sedimentrijke) water nabij het strand en het (sedimentarme) water op grotere diepte, en kan daardoor vooral bij aanwezigheid van golven worden aangemerkt als een nadelige factor. Deze maximale dwarsgradiënt, uitgedrukt als cm/s.cm , is voor alle paalschermsituaties en voor de basissnelheid afgeleid uit tabel 29. Het resultaat is samengevat in tabel 30. Ten opzichte van de basistoestand veroorzaken alle paalschermen een sterke toename van de dwarsgradiënt, welk nadeel bij de korte paalschermen in het algemeen geprononceerder is dan bij de lange. Daartegenover staat echter het feit dat door toedoen van de paalschermen deze grotere gradiënt zich voordoet op een grotere afstand uit de kust dan bij de basissnelheid het geval is. Ook in dit opzicht zijn de korte paalschermen ongunstiger dan de lange, want de plaats van de maximale dwarsgradiënt varieert bij de korte schermen tussen 3,0 en 4,5 m, tegenover 4,5 - 6,0 m bij de lange schermen. Type H geldt in beide opzichten als een voorbeeld van ongunstige eigenschappen (kort scherm, grote gradiënt dicht bij de kust); type D daarentegen vertoont van alle schermen de minst ongunstige eigenschappen: lang scherm met een zwakke gradiënt op grote afstand uit de kust.

Aan de hand van de stippelfoto's is getracht om enig inzicht te verkrijgen in de grootte van de snelheidsgradiënten in langsrichting, zoals die optreden nabij de zeewaartse kopeinden van de paalschermen onder invloed van de stroomcontractie. Om een indruk te krijgen van het stroombeeld zijn in fig. 32 en 33 enige drijverbanen overgenomen van de stippelfoto's van de paalschermsconfiguraties C en E-b-1. Vooral bij type E treden vrij sterk fluctuerende, drie-dimensionale effecten op, en wel voornamelijk in het gebied van de grootste snelheidsgradiënt in dwarsrichting, op een afstand van omstreeks 5,0 m uit de H.W.-lijn. In datzelfde gebied treden ook de gezochte snelheidsgradiënten in langsrichting op, en de indruk bestaat dan ook dat er, door de culminatie van gradiënten en fluctuaties, per situatie veel meer dan de beschikbare twee à vier foto's nodig zouden zijn om de gevraagde details van de optredende snelheden in voldoende mate vast te leggen. Het is daarom met het nodige voorbehoud dat, bij wijze van illustratie, het resultaat van de typen C en E hier vermeld wordt. In beide gevallen is, voor verschillende afstanden uit de H.W.-lijn, de verhouding

bepaald van de stroomsnelheid voor de kop en de gemiddelde stroomsnelheid over het hele vak. Zowel bij C als bij E werd de grootste waarde gevonden op een afstand van omstreeks 5,5 m uit de H.W.-lijn ter grootte van respectievelijk omstreeks 110 % en 125 %. Een meer definitieve uitspraak over de mate van de stroomcontractie nabij de kop zou wellicht verkregen kunnen worden door omvangrijker metingen met een micromolen.

4.2.3 H.W.conditie, vergelijking van relatieve debieten

Naast de meer gedetailleerde vergelijking van de gemeten stroomsnelheden, zoals die in de vorige paragrafen is gemaakt, lijkt het nuttig een globaal overzicht te hebben van de werking van de onderzochte paalschermconfiguraties op de waterbeweging. Daartoe zijn voor de verschillende situaties de debieten door de profielgedeelten begrensd door de afstand van 1,5 m en 3,5 m uit de H.W.-lijn en van 3,5 m en 5,0 m uit de H.W.-lijn berekend. Deze debieten zijn daarna gerelateerd aan die in de situatie zonder paalschermen. De resultaten zijn samengevat in tabel 31, waarin ook de relatieve totale debieten door het profielgedeelte tussen 1,5 m en 5,0 m uit de H.W.-lijn zijn weergegeven. In fig. 34 zijn de waarden van de relatieve debieten in een overzicht samengevat, met daarbij schematisch aangegeven hoe de verschillende paalschermconfiguraties in elkaar zijn overgegaan, namelijk door samenvoeging van enkele tot dubbele rijen, door toevoeging van meer rijen, of door verlenging van rijen. Uit de figuur blijkt nogmaals, dat samenvoeging van rijen onverdeeld gunstig werkt en leidt tot verkleining van de stroomsnelheden, terwijl toevoeging van rijen gunstig werkt in het profielgedeelte dichtbij de kust en verder zeewaarts een wisselend effect heeft; door verlenging van rijen wordt de gemiddelde stroomsnelheid in het zeewaartse deel van het profiel kleiner, maar dicht onder de kust neemt deze toe. .

4.2.4 L.W.conditie

Uit een beschouwing van fig. 23 blijkt dat ook voor de L.W.conditie het samenvoegen van paalrijen (F → C, D, E) een gunstige invloed heeft op de snelheden nabij de kust, waartegenover een toename staat van de snelheden in het aansluitende diepe gedeelte. De relatieve snelheden bereiken geen

hogere waarde dan 112 ‰, op een afstand van 5,5 m uit de H.W.-lijn ofwel 2,0 m uit de L.W.-lijn. De relatieve snelheid blijft tussen de paalschermen vrij hoog, maar de absolute snelheden zijn slechts klein. Een vergelijking met de H.W.conditie kan niet regelrecht gemaakt worden omdat de omstandigheden sterk verschillen: de paalschermen steken bij L.W. geheel boven het wateroppervlak uit, de bodemhelling bij de waterlijn is steiler en mede daardoor is er een sterkere snelheidsgradiënt in dwarsrichting in de ijktoestand. De gegevens over de dwarsgradiënt zijn samengevat in tabel 30; daaruit blijkt dat de plaats waar de maximale gradiënt optreedt niet wijzigt door het installeren van de paalschermen, maar dat de grootte ervan wel toeneemt. Tevens blijkt dat de paalschermtypen C, D, E met de gunstigste snelheidsreductie (een dubbele kop op onderlinge afstanden van 10 m) het ongunstigst zijn uit het oogpunt van de dwarsgradiënt.

4.3 Vergelijking van paalschermen voor golven en stroom

Voor de hydraulische conditie 4, met getijstroom en brandingsstroom in dezelfde richting, zijn stroomsnelheden gemeten bij de paalschermtypen B, C en E. De resultaten hiervan zijn weergegeven in fig. 28. Het blijkt dat situatie E in het algemeen iets betere resultaten geeft dan situatie C, al zijn de verschillen minder uitgesproken dan met alleen stroom. Een markante uitzondering ten opzichte van de resultaten met alleen stroom wordt evenwel gevormd door het dichtst bij de kust gelegen deel van de brandingszone; daar werkt een samenvoeging van de enkele paalrijen tot dubbele kennelijk juist een vermindering van de snelheidsreductie in de hand. Het korte paalscherm van het type B bevat ten opzichte van de beide langere typen C en E een dubbele hoeveelheid paalrijen in de kustzone tot 3,5 m uit de H.W.-lijn, waarmee de betere snelheidsreductie in dat gebied en de minder goede reductie zeewaarts van 3,5 m verklaard worden.

Door de reductie van de snelheid van de brandingsstroom worden ook de snelheidsgradiënten in het desbetreffende gebied voor alle onderzochte paalschermconfiguraties iets kleiner dan in de ijktoestand. Zeewaarts van het gebied tussen 2,5 m en 3,5 m uit de H.W.-lijn waar de snelheidsreductie het grootste is, zijn de snelheidsgradiënten echter groter dan in de situatie zonder paalschermen. Dit geldt met name voor de situatie B met korte dubbele

paalschermen. De onderlinge verschillen tussen C en E zijn in dit opzicht niet significant.

Zoals blijkt uit fig. 35, 36 en 37 onderscheiden de relatieve snelheidsverdelingen met stroom en golven zich duidelijk van die met uitsluitend stroom. Landwaarts van circa 2,25 m uit de H.W.-lijn is in alle onderzochte situaties de brandingsstroomreductie aanzienlijk kleiner dan de getijstroomreductie; zeewaarts van 2,25 m, waar de brandingsstroom blijkens fig. 10 en 11 bijna geen directe invloed meer heeft, is de snelheidsreductie bij aanwezigheid van golven juist groter dan met alleen getijstroom. Laatstgenoemd verschijnsel is wellicht ten dele te verklaren door de grotere effectieve weerstand die een paalscherm vormt voor een toestand met golven (zie paragraaf 5.3). Het feit dat de krachtige brandingsstroom ook duidelijk waarneembaar is in de hoge relatieve snelheden vormt een aanleiding om wat nader in te gaan op het kenmerkende verschil tussen een getijstroom en een brandingsstroom. Essentieel is hierbij het verschil in de wijze van opwekken van de stromingen; zie ook [3] .

Bij een getijstroom wordt de stroomsnelheid langs het strand opgewekt onder invloed van een gegeven verhang in de diepe geul voor de kust. Indien de stroming langs het strand geheel (dicht strandhoofd) of gedeeltelijk (open paalscherm) geblokkeerd wordt, dan stelt zich benedenstrooms van het obstakel een stroombeeld in dat waarschijnlijk goed beschreven kan worden als een grenslaagverschijnsel. Door middel van turbulente diffusie van massa en impuls vindt benedenstrooms een geleidelijk herstel plaats van de oorspronkelijke snelheidsverdeling, waarbij de analogie met straaldiffusie zich opdringt, al gaat het daarbij juist om een teveel aan snelheid vergeleken met de ongestoorde toestand. De afstand, die nodig is om de oorspronkelijke snelheidsverdeling weer op te bouwen, en die mede afhankelijk is van een eventueel zeewaarts uitgeworpen stroom langs de bovenstroomse zijde van het obstakel, zou men de relaxatie-lengte kunnen noemen. Blijkens de snelheidsmetingen op een afstand van 5 m benedenstrooms van een solitair paalscherm (paragraaf 3.3.2) kan de relaxatie-lengte ettelijke paalscherm-lengten bedragen; een onderzoek naar de relaxatie-lengten van verschillende typen solitaire paalschermen zou wellicht een aanwijzing kunnen geven omtrent de meest geschikte onderlinge afstand tussen de paalschermen.

Een belangrijk verschil waardoor een brandingsstroom zich onderscheidt van een getij-gedreven kuststroom is dat, door middel van de zich voortplantende en brekende golven zelf, de aandrijfkraft van de brandingsstroom onmiddellijk ter plaatse aanwezig is, zelfs vrijwel onmiddellijk achter een volledig dicht strandhoofd. In dit geval vindt de aandrijving dus niet plaats via het geleidelijke diffusieproces in een richting vrijwel evenwijdig aan de kustlijn, maar gekoppeld aan de lopende golven, die praktisch loodrecht op de kust afkomen. Alleen een "schaduweffect" van een obstakel of een ingrijpende golfrefractie zou de brandingsstroom kunnen beletten om onmiddellijk te ontstaan, maar deze omstandigheden zijn bij de hier onderzochte paalschermen niet van toepassing, en evenmin is er bij open paalschermen sprake van een duidelijk golfdempend effect [4]. Het komt er dus op neer dat er, in geval van scheefinvallende golven, ook in de kustvakken tussen de paalschermen een brandingsstroom wordt opgewekt, waardoor het effect van een paalscherm slechts zeer plaatselijk merkbaar is. Bij een getijstroom is dit effect over een veel grotere afstand in benedenstroomse richting van invloed. Hieruit volgt onmiddellijk dat de bundeling van paalschermen en de daarmee gepaard gaande verlenging van de "kale" kustvakken, die bij de stroomtoestanden een duidelijk gunstig effect op de snelheidsreductie heeft (vergelijk fig. 34), slechts met de grootste voorzichtigheid moet worden gehanteerd in gevallen waarbij ook scheefinvallende golven van belang zijn. Het aan het begin van deze paragraaf gesignaleerde verschil tussen de paalschermtypen C en E vormt hiervan een voorbeeld.

4.4 Samenvatting

Hydraulische conditie 1: H.W., alleen getijstroom

- 1 De onderzochte paalschermen veroorzaken een snelheidsreductie die nabij de kust het grootst is, en die ongeveer 50 % kan bedragen. Verder zeewaarts neemt de reductie af en verandert zelfs in een snelheidstoename in een beperkt gebied zeewaarts van de koppenlijn.
- 2 Vergroting van het aantal paalschermen veroorzaakt een grotere snelheidsreductie, die echter minder dan evenredig toeneemt met het extra materiaal.
- 3 Dubbele paalschermen hebben een grotere snelheidsreductie tot gevolg dan enkele paalschermen op onderling halve afstand.

- 4 Verlengen van paalschermen veroorzaakt een snelheidsreductie ter plaatse, die gedeeltelijk ten koste gaat van de snelheidsreductie zoals die bij korte schermen optreedt.
- 5 De in 1 beschreven snelheidsveranderingen brengen een vergroting van de snelheidsgradiënt in dwarsrichting met zich mee. De maximale dwarsgradiënt neemt met 50 à 100 % toe, waartegenover staat dat de plaats van optreden in zeewaartse richting verschuift. Korte schermen zijn in dit opzicht ongunstiger dan lange.
- 6 Juist zeewaarts van de kopeinden kan een snelheidstoename met omstreeks 25 % optreden ten opzichte van de gemiddelde snelheid op die diepte; bij gebrek aan voldoende gegevens is dit bedrag uitsluitend indicatief.

Hydraulische conditie 6: L.W., alleen getijstroom

- 7 Evenals bij H.W. treedt door een concentratie van de paalschermen een grotere snelheidsreductie op; dit gaat gepaard met een sterke vergroting van de maximale snelheidsgradiënt in dwarsrichting.

Hydraulische conditie 4: H.W., getijstroom en brandingsstroom in dezelfde richting

- 8 Korte, dicht opeen geplaatste paalschermen veroorzaken een grotere snelheidsreductie maar tevens grotere dwarsgradiënten dan lange, verder uiteengeplaatste paalschermen.
- 9 In vergelijking met hydraulische conditie 1 treden belangrijke verschillen op, waarbij een onderscheid moet worden gemaakt tussen de gebieden in en buiten de brandingszone.
- 10 Het samenvoegen van paalschermen resulteert buiten de brandingszone ook bij hydraulische conditie 4 in een vergroting van de snelheidsreductie; in de brandingszone resulteert echter een verkleining van de snelheidsreductie.
- 11 Buiten de brandingszone resulteert een grotere snelheidsreductie dan bij hydraulische conditie 1; dit wordt veroorzaakt door een grotere effectieve weerstand van de paalschermen bij aanwezigheid van golven (zie hoofdstuk 5).
- 12 In de brandingszone resulteert een kleinere snelheidsreductie dan bij hydraulische conditie 1; dit wordt veroorzaakt door een verschil in de

wijze van opwekken van een getijstroom en een brandingsstroom:

- een getijstroom herstelt zich na een onderbreking door middel van het geleidelijk verlopende proces van impuls-diffusie
- een brandingsstroom ontstaat na een onderbreking veel sneller doordat de benodigde impuls onmiddellijk ter plaatse aanwezig is als onderdeel van de brekende golven. Dit vormt tevens een verklaring voor de verkleining van de snelheidsreductie in de brandingszone (zie 10).

5 Berekening van de invloed van paalschermen op een getijstroom

5.1 Eerste benadering: gelijkmatig verspreide palen

Voor een eenparige stroom die zijn aandrijfkraft uitsluitend ontleent aan de zwaartekracht geeft de formule van Chézy het verband tussen de gemiddelde stroomsnelheid in de verticaal v , een maat voor de bodemruwheid k , de bodemweerstandscoefficiënt C_b , de waterdiepte d en het verhang van de waterspiegel l_b als volgt:

$$v = C_b \sqrt{dl_b} \quad (1)$$

$$\text{waarin } C_b = 18 \log \frac{12d}{k} \quad (2)$$

Hierbij geeft de index b aan dat de uitwendige weerstand uitsluitend door de bodemwrijving wordt geleverd. De bodemschuifspanning τ_b is als volgt te schrijven:

$$\tau_b = \rho g d l_b = \rho g \frac{v^2}{C_b^2} \quad (3)$$

waarin:

ρ = dichtheid van water

g = versnelling van de zwaartekracht

Indien actieve uitwendige weerstanden, zoals bijvoorbeeld windinvloed, buiten beschouwing worden gelaten dan vormt de aanwezigheid van obstakels in de stroom de enige mogelijkheid om een extra uitwendige weerstand aan te

brengen. Deze obstakels kunnen zich op de bodem, aan het oppervlak of ergens halverwege de diepte bevinden; in het onderhavige geval worden uitsluitend palen beschouwd die verticaal uit de bodem steken en die al of niet tot boven het wateroppervlak reiken. De door de paal ondervonden kracht F_p tengevolge van het langsstromende water bedraagt:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho v^2 h D C_w \quad (4)$$

waarin:

v = ongestoorde stroomsnelheid, die constant over de diepte wordt verondersteld

h = hoogte van de paal ($h \leq d$)

D = diameter van de paal

C_w = weerstandscoefficiënt

In fig. 3 is de C_w -waarde als functie van Re weergegeven voor een aantal verschillend gevormde voorwerpen; hierbij moet worden opgemerkt dat de gegeven C_w -waarden gelden voor een vrijwel turbulentievrije stromingstoestand zonder storende invloeden van nabijge randen. Bij aanwezigheid van n elkaar niet beïnvloedende palen per eenheid van oppervlak, bedraagt de totale door de palen ondervonden weerstandskracht, en dus ook de door het water ondervonden weerstandskracht, per eenheid van oppervlak:

$$nF_p = n \frac{1}{2} \rho v^2 h D C_w = \rho g d l_p \quad (5)$$

$$\text{waarin } l_p = \frac{n v^2 h D C_w}{2 g d} \quad (6)$$

Door optellen van (3) en (5) wordt de totale weerstandskracht per eenheid van oppervlak:

$$W = \tau_b + nF_p = \rho g d (l_b + l_p) \quad (7)$$

ofwel

$$l_{\text{tot}} = l_b + l_p = \frac{\tau_b + nF_p}{\rho g d} \quad (8)$$

Substitutie van (3) en (5) in (8) levert

$$I_{\text{tot}} = \frac{v^2}{C_b^2 d} + \frac{nv^2 h DC_w}{2gd} = \frac{v^2}{C_b^2 d} + \frac{v^2}{C_p^2 d} = \frac{v^2}{d} \cdot \frac{1}{C_{\text{tot}}^2}, \quad (9)$$

$$\text{waarin } C_p^2 = \frac{2g}{nhDC_w} \quad (10)$$

$$\text{en } \frac{1}{C_{\text{tot}}^2} = \frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_p^2} \quad (11)$$

Uit (9) kan worden berekend welk verhang optreedt na het plaatsen van een zekere hoeveelheid palen per eenheid van oppervlak, indien de gewijzigde stroomsnelheid bekend is. In het onderhavige geval worden slechts in een zeer klein gedeelte van het totaal beschikbare stroomprofiel, waardoor nog geen 10 % van het totale debiet wordt afgevoerd, palen geplaatst. Daardoor is het in dit geval geoorloofd om te stellen dat het verhang bij benadering gelijk blijft, dus $I_{\text{tot}} = I_b$, en dat alleen de stroomsnelheid in het beschouwde gebied verandert. Onder deze omstandigheden mag dus uit (9) worden afgeleid

$$v_1^2 = \frac{I_{\text{tot}} d}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_p^2}} = \frac{I_b d}{\frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_p^2}}, \quad (12)$$

waarin v_1 = gereduceerde stroomsnelheid.

In de oorspronkelijke situatie zonder palen geldt op grond van (1):

$$v_o^2 = C_b^2 d I_b \quad (13)$$

zodat voor de relatieve stroomsnelheid geschreven kan worden

$$v_1/v_o = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{C_b^2} + \frac{1}{C_p^2}\right)} \cdot \frac{1}{C_b^2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + C_b^2/C_p^2}} \quad (14)$$

De grootte van de relatieve snelheid kan nu uit (14) berekend worden met behulp van (2) en (10).

Allereerst moet daartoe de waarde van k bepaald worden voor de betonbodem van het model, en voorts volgt uit de configuratie van de paalschermen de grootte van n , D en h .

De bodemruwheid k is uit de snelheidsmetingen bij hydraulische conditie 1 bepaald op grond van de volgende veronderstellingen:

- a De k -waarde is in het hele model constant (betonruwheid).
- b Tijdens de ijking zijn de stroombanen recht en evenwijdig aan de dieptelijnen; de met een ottmolen op halve waterdiepte gemeten snelheden komen overeen met de respectieve gemiddelde snelheden v_{gem} in de verticaal.

Op grond van veronderstelling b mag worden verwacht dat het verhang $l_b = v_{\text{gem}}^2 / C_b^2 d$ een constante waarde heeft in het gehele dwarsprofiel. Daarom is die waarde aan k toegekend waarmee de berekende waarde van l_b een minimum aan variatie vertoont over de breedte van het model tussen de afstanden 2,0 m en 5,0 m uit de H.W.-lijn. Uit fig. 38 blijkt dat voor $k = 1$ mm de minste variatie van l_b optreedt, waarbij een verhang $l_b = 3,1 \times 10^{-5}$ hoort als gemiddelde waarde. Het bijbehorende verval over de totale lengte van het model bedraagt ongeveer 1 mm. Vervolgens kan de waarde van C_b volgens (2) bepaald worden. In tabel 33 zijn de berekende C_b -waarden voor het gebied van 0,5 tot 5,0 m uit de H.W.-lijn samengevat.

De waarde van C_p wordt uit (10) berekend als functie van h ($h \leq d$) en n , waarbij $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $D = 6 \text{ mm}$ en $C_w = 1,0$ (zie figuur 3). In (10) stelt n .D.h het totale aangestroomde paaloppervlak per m^2 voor; als dit gelijkgesteld wordt aan A dan wordt (10) herschreven als

$$C_p^2 = \frac{19,62}{A} \text{ m/s}^2 \quad (15)$$

In tabel 32 is de grootte van A als functie van de afstand uit de H.W.-lijn gegeven voor enkelvoudige paalrijen met verschillende onderlinge afstanden, geldig voor de H.W.-conditie (zie fig. 4), waarna in tabel 33 de

verschillende waarden van C_p^2 zijn opgenomen volgens (15). Tenslotte zijn in tabel 34 de volgens (14) berekende gereduceerde snelheden weergegeven, welke in fig. 39 grafisch zijn uitgezet. Daarbij is voor de afstand van 3,5 m uit de H.W.-lijn het gemiddelde genomen van de snelheden zoals berekend juist landwaarts respectievelijk zeewaarts van 3,5 m; de dichtheid van de paalschermen vertoont hier een discontinuïteit.

Bij vergelijking van dit berekende resultaat met de gemeten snelheidsreductie (fig. 21 en 22) zijn zowel verschillen als overeenkomsten te constateren. De belangrijkste overeenkomsten zijn de orde van grootte van de relatieve snelheid op een afstand van omstreeks 3,5 m uit de H.W.-lijn, namelijk circa 70 %, terwijl bovendien de gemeenschappelijke tendens aanwezig is van een verbetering van de snelheidsreductie naarmate het aantal rijen per eenheid van kustlengte toeneemt. Een in het oog springend verschil betreft het gedrag van de relatieve snelheid met toenemende afstand uit de H.W.-lijn: de berekeningen laten een afname van v_{rel} zien terwijl de meetresultaten een toename vertonen. Het afnemen van de relatieve snelheid wordt veroorzaakt doordat C_b in zeewaartse richting groter wordt terwijl C_p daarentegen juist afneemt volgens tabel 33 en formule (10); hierdoor doet de paalweerstand zich in dieper water relatief sterker voelen. Uit (14) blijkt dat de C_b -waarde van de oorspronkelijke bodem mede bepalend is voor de berekende snelheidsreductie: op een gladde bodem (C_b groot) veroorzaakt een gegeven paalschermsysteem een grotere snelheidsreductie dan op een ruwe bodem, en omgekeerd. Zo zouden bij een bodemruwheid k van 5 mm in plaats van 1 mm, circa 60 % meer paalrijen geplaatst moeten worden om tot dezelfde snelheidsreductie te komen. Overigens komt de aanwezige bodemruwheid in het model (zie tabel 33) vermoedelijk vrij goed overeen met die in het prototype.

Informatie over de te verwachten stroomsnelheden nabij de koppen van de paalschermen, en met name over de manier waarop de aansluiting plaatsvindt tussen de gereduceerde snelheid en de ongestoorde (of zelfs vergrote) snelheid zeewaarts van de kopeinden, kan met deze zeer ruwe benaderingsmethode uiteraard niet verkregen worden. Evenmin kunnen op deze manier andere stroombeelddetails worden belicht, zoals bijvoorbeeld het aangeven van de omstandigheden (in termen van de mate van verdichting van de paalschermen)

waaronder neervorming zal gaan optreden. Wat betreft de aanname dat de palen elkaar onderling niet beïnvloeden wordt in paragraaf 5.2 een reëlere voorstelling van zaken gegeven, naar aanleiding waarvan meer conclusies kunnen worden getrokken.

5.2 Tweede benadering: palen in rijen gegroepeerd

De in paragraaf 5.1 in eerste benadering veronderstelde afwezigheid van enige interactie tussen de palen gaat bepaald niet op wanneer de palen in rijen gegroepeerd zijn, welke rijen bovendien nog betrekkelijk dicht achter elkaar geplaatst kunnen zijn. In het volgende zal blijken dat de onderlinge beïnvloeding zowel aanleiding kan geven tot een grotere als tot een kleinere totale weerstand, afhankelijk van de geometrische opstelling en van de stromingstoestand.

De weerstand, opgewekt door een aantal palen die tot een rooster gecombineerd zijn, wordt normaliter uitgedrukt als een verlaging van de waterstand benedenstrooms van het rooster:

$$\Delta H_r = \eta \cdot \frac{v_1^2}{2g} , \quad (16)$$

waarin:

ΔH_r = waterstandsverval over het rooster

η = een empirisch vast te stellen verliescoëfficiënt

v_1 = gemiddelde stroomsnelheid

Evenals dat eerder werd gesteld wordt ook nu aangenomen dat in de nieuwe situatie met paalschermen het gemiddelde verhang geen verandering ondergaat ten opzichte van de oorspronkelijke situatie, en dat l_b derhalve gelijk blijft aan $3,1 \times 10^{-5}$. In formulevorm:

$$l_b \cdot L = \Delta H_r + l_r \cdot L , \quad (17)$$

waarin:

L = onderlinge afstand van de paalrijen

l_r = $v_1^2 / C_b^2 d$ = verhang van de waterspiegel in het kustvak tussen de paalschermen

In fig. 40 wordt het veronderstelde verloop van de waterspiegel schematisch weergegeven. Door substitutie van (16) in (17) volgt nu

$$l_b \cdot L = v_1^2 \left(\frac{\eta}{2g} + \frac{L}{C_b^2 d} \right) \quad (18)$$

$$\text{ofwel} \quad v_1^2 = \frac{l_b \cdot L}{\left(\frac{\eta}{2g} + \frac{L}{C_b^2 d} \right)}, \quad (19)$$

waarin v_1 de gezochte gereduceerde snelheid is. Met gebruikmaking van (13) volgt nu voor de relatieve snelheid:

$$v_1/v_o = \sqrt{\frac{L}{\frac{C_b^2 d \eta}{2g} + L}} \quad (20)$$

Als enige nog onbekende factor moet η nu worden bepaald, waarbij kan worden gerefereerd aan bestaande literatuur. In [5] wordt Kirschmer's formule gegeven, die voor η in (16) geeft

$$\eta = 1,79 \cdot \left(\frac{D}{B} \right)^{4/3}, \quad (21)$$

waarin:

D = diameter van de ronde paal

B = dagwijdte tussen de palen

Deze waarde van η geldt voor roosters die tot boven de waterspiegel reiken, met verticale staven $\emptyset$ 10 mm. Voor $D = B$ geldt dus $\eta = 1,79$. Aan de hand van [6] wordt echter, via een reeks empirisch verkregen tabellen, een waarde van $\eta = 1,63$ berekend voor het geval $D = B$. Vanwege de eenvoud wordt nu verder gebruik gemaakt van een gemodificeerde Kirschmer-waarde voor η :

$$\eta = 1,7 \left(\frac{D}{B} \right)^{4/3} \quad (22)$$

welke nog moet worden gereduceerd voor die gevallen waarbij de paalroosters niet tot aan het oppervlak reiken. Evenals in paragraaf 5.1 wordt daarvoor een lineair verband aangenomen:

$$\eta = \frac{h}{d} \cdot 1,7 \left(\frac{D}{B} \right)^{4/3} \quad (23)$$

met $h \leq d$. In tabel 35 zijn voor de respectieve afstanden de waarden van η berekend volgens (23). Vervolgens is de relatieve snelheid berekend volgens (20); de gegevens zijn vermeld in tabel 36 en grafisch weergegeven in fig. 41. Vergeleken met fig. 39 wordt nu een aanzienlijk grotere snelheidsreductie verkregen dankzij het feit dat de onderlinge beïnvloeding van de palen in één rij in rekening is gebracht. Overigens gelden voor de weer-gave van de snelheid nabij de waterlijn en de koppenlijn dezelfde beperkingen als genoemd in paragraaf 5.1.

In verband met het in hoofdstuk 4 gesignaleerde feit dat het concentreren van paalrijen een gunstig effect heeft op de snelheidsreductie, is het nuttig om na te gaan in hoeverre er sprake is van onderlinge beïnvloeding van palen die niet naast elkaar maar achter elkaar staan, gezien in de stroomrichting. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de publikaties [7], [8], [9] en [10]. Uit [7] blijkt, dat voor $1350 < Re < 8000$ de turbulentie van de hoofdstroom een belangrijke invloed kan hebben op de weerstandscoefficiënt van cilinders; hierbij blijkt de turbulentie-intensiteit van veel meer belang te zijn dan de turbulentieschaal of het Reynoldsgetal. In een windtunnel werd achtereenvolgens de C_w -waarde bepaald van twee cilinders met een doorsnede van 6,35 mm en 12,7 mm. Deze bevonden zich 30 cm stroomafwaarts van een aantal roosters van variërende geometrie, samengesteld uit staven van dezelfde doorsneden als de cilinders, waarmee een verschillende mate van turbulentie-intensiteit werd verkregen. In fig. 42 is de gemeten C_w -waarde uitgezet als functie van de turbulentie-intensiteit u' die varieerde tussen 1,2 % en 21 %. Kennelijk wordt onder de gegeven omstandigheden een minimale waarde van C_w bereikt indien $u' \approx 4$ %, waarna met verder toenemende u' de C_w -waarde een toename vertoont met ruim 50 %. De grootte van u' hangt uiteraard af van de afstand benedenstrooms van de roosters; hoe dit verband is wordt in [7] echter niet vermeld. Het verloop van u' is wel van belang voor een beoordeling van het hier besproken effect als mogelijke oorzaak voor het bij

het huidige onderzoek gevonden "concentratie-effect".

Enige informatie over de grootte van u' als functie van de afstand benedenstrooms van staafroosters in een overigens eenparige waterstroom is ontleend aan [8]. De daar gebruikte opstelling, die uiteindelijk ten doel had om het effect van roosters op het bezinken van polystyreenkorrels te onderzoeken, vertoont in de dimensies een grote overeenkomst met de omstandigheden in het model van het paalschermonderzoek. In een stroomgoot werd een snelheid van omstreeks 10 cm/s ingesteld met een waterdiepte van 9 cm; staafjes met diameters van 2, 4 en 8 mm werden tot verschillende roosters gecombineerd, met openingspercentages variërend tussen 22 % en 88 %. Op verschillende afstanden stroomafwaarts van het rooster werd u' bepaald; van de in [8] gegeven resultaten zijn de gemiddelde waarden per staafdikte berekend en uitgezet in fig. 43. Uit deze figuur blijkt een zeer duidelijke relatie te bestaan tussen de staafdiameter en de grootte en de invloedssfeer van de turbulentie-intensiteit. Indien in het model de waarde van u' op 4 % gesteld wordt voor een alleenstaande of bovenstrooms gelegen paalrij, en op 7 % voor een 8,75 cm stroomafwaarts gesitueerde rij, dan is daarmee aan de hand van fig. 42 en 43 een semikwantitatieve verklaring gegeven voor het waargenomen "concentratie-effect": de aanwezigheid van de bovenstroomse paalrij veroorzaakt een grotere turbulentie-intensiteit ter plaatse van de tweede paalrij, welke laatste daardoor een grotere weerstand vormt voor het langsstromende water. Wel is enige voorzichtigheid geboden bij het hanteren van de bovenstaande verklaring, omdat het Reynoldsgetal in het model kleiner, en in het prototype veel groter is dan in [7] werd ingesteld.

Ook in een ander opzicht is er een verschil tussen [7] en [8] enerzijds en de paalschermen anderzijds, en wel doordat bij achter elkaar geplaatste palen, naast een turbulentie-effect, ook een "schaduweffect" kan optreden, waardoor de effectieve weerstand van de stroomafwaartse paal juist kan verminderen ten opzichte van een alleenstaande paal. Het schaduweffect treedt bij een goede geleiding van de stroom uiteraard sterker naar voren dan in het model of het prototype, waar de palen niet exact achter elkaar staan en waar de stroombanen niet precies recht zijn, zeker bij aanwezigheid van golven en een niet geheel vlakke bodem. Mede doordat bij de dubbele paalschermen de afstand tussen de rijen het veertienvoudige is van de paaldiameter, zal het schaduweffect slechts van geringe betekenis zijn.

Tenslotte is er nog een derde factor van belang. Zoals in fig. 3 is aangegeven

daalt de C_w -waarde bij gladde cilinders abrupt voor $Re = 3 \times 10^5$ als gevolg van het turbulent worden van de grenslaag en het verschuiven van het loslaatpunt. Dit kritieke Reynoldsgetal kan nu volgens [9] en [10] aanzienlijk verlaagd worden door een vergrote turbulentie-intensiteit en doordat de paal ruw is en enigszins trilt. Fig. 44 toont een aan [6] ontleende grafiek waarin de verlaging van de C_w -waarde veroorzaakt wordt door een combinatie van het schaduweffect en het verlagen van het kritieke Reynoldsgetal. Het is niet uitgesloten dat in het prototype een dergelijke situatie zich kan voordoen, zodat wellicht reeds bij $Re = 10^5$ de C_w -waarde van de benedenstroomse palen daalt van ruim 1,0 tot 0,3.

5.3 Invloed van golven op het effect van paalschermen

In paragraaf 4.3 werd reeds aangestipt dat er, bij aanwezigheid van golven, in het gebied zeewaarts van de brandingszone een duidelijk grotere paalschermweerstand werd geconstateerd dan met alleen stroom. Dit effect kan in kwalitatieve zin verklaard worden door erop te wijzen dat de snelheidsvector, samengesteld uit de stroomsnelheid en de orbitaalsnelheid, gedurende een groot gedeelte van de tijd niet loodrecht maar scheef op het paalscherm staat; uit de literatuur [5],[6] is bekend dat bij scheve aanstroming de roosterweerstand toeneemt bij een permanente stroom. Bij aanwezigheid van golven wisselt de aanstroming voortdurend van richting; bij een waterdiepte van 2 m, een golfperiode van 6 s en een golfhoogte van 0,5 m zijn de maximale orbitaalsnelheden 0,5 tot 0,6 m/s, welke in combinatie met een getijstroomsnelheid van 0,5 m/s dus tijdelijk een aanstroomhoek van circa 45° veroorzaken. Voor dergelijke hoeken ondergaat het openingspercentage van de paalrij een gevoelige vermindering, wat in fig. 45 is weergegeven voor verschillende paalopstellingen. Daarin komt onder meer tot uiting dat een vierkante paal met zijde D bij aanwezigheid van golven een grotere weerstand moet opleveren dan een ronde paal met diameter D , nog afgezien van het in paragraaf 5.2 gesignaleerde verschijnsel van de abrupte C_w -verlaging bij ronde palen. Bovendien blijkt dat de vierkante palen, indien diagonaal geplaatst, bij rechte aanstroming veel minder opening vertonen dan de recht geplaatste vierkante palen of de ronde palen.

Naast de overweging van de kleinere effectieve doorstroombopening is er nog een andere oorzaak aan te wijzen voor de grotere weerstand van een paalscherm bij

aanwezigheid van golven. Doordat de paalweerstand evenredig is aan het kwadraat van de stroomsnelheid, veroorzaakt de toegevoegde orbitaalsnelheid niet alleen een vergroting van de momentane snelheid, maar tevens een vergroting van de gemiddelde wrijvingskracht evenwijdig aan de kust. Deze laatste invloed treedt op onafhankelijk van de vraag of de palen gelijkmatig verspreid staan dan wel tot rijen gegroepeerd zijn.

5.4 Samenvatting

- 1 Met een sterk geschematiseerde berekeningsmethode, opgezet voor hydraulische conditie 1, kan de snelheidsreductie in orde van grootte worden berekend. Bij aanname van gelijkmatig verspreide palen wordt een reductie van omstreeks 30 % verkregen; indien het roostereffect in rekening wordt gebracht resulteert dit in circa 50 % reductie.
- 2 De berekeningen zijn echter te zeer geschematiseerd van opzet om in kwantitatieve zin betrouwbare informatie te verschaffen over diverse belangrijke bijzonderheden betreffende het stroombeeld, zoals kopeffect, neervorming, invloed van het samenvoegen van paalschermen en invloed van golven. Over de beide laatste invloeden en over het effect van het toevoegen van paalschermen zijn wel kwalitatieve uitspraken mogelijk, die in overeenstemming zijn met de modelresultaten.
- 3 Op grond van de literatuur is het niet zeker dat de belangrijke positieve invloed van het concentreren van paalschermen, zoals die uit de meetresultaten volgt, ook in het prototype geldt. Mogelijk is de grootte van dit concentratie-effect afhankelijk van het Reynoldsgetal.
- 4 In het prototype verdient de toepassing van vierkante palen de voorkeur boven ronde, doordat bij ronde palen een aanzienlijke verlaging kan optreden van de weerstandcoëfficiënt voor $Re > 10^5$.
- 5 Door het diagonaal plaatsen van de vierkante palen kan, bij een rechte aanstroming, een vergroting van de snelheidsreductie worden bereikt, of, bij een gelijke snelheidsreductie, een vermindering van het aantal palen per paalscherm.

6 Berekening van de invloed van paalschermen op het zandtransport

6.1 Beperkingen

Zoals reeds in paragraaf 1.3 werd gesteld is de nauwkeurigheid van de beschikbare zandtransportformules van een lagere orde dan die van de hydraulische formules. Daar komt bij dat voor het dwarstransport in het geheel geen berekeningswijze bestaat, terwijl deze vorm van zandtransport in werkelijkheid wellicht een vrij grote rol speelt. Verder vormen ook de bij het onderzoek gehanteerde geometrische en hydraulische schematiseringen een beperking van de hierna te presenteren zandtransportberekeningen. Een zeer vergaande relativering van de resultaten is dus onvermijdelijk. Elke prototypesituatie zal op zijn specifieke eigenaardigheden moeten worden beoordeeld alvorens met enige zekerheid een uitspraak te kunnen doen over het effect van paalschermen op de bodemligging, en over de optimale vormgeving van de paalschermen.

Uit het bovenstaande volgt dat de berekeningen uitsluitend betrekking hebben op het langstransport van zand. De toegepaste zandtransportformule is zodanig van opzet dat de gezamenlijke werking van golven en stroom van invloed is op de grootte en de verdeling van de zandconcentratie in de verticaal, waarna de stroom voor het eigenlijke transport zorgt. De formule gaat uit van een eenparige stroom, zodat hij strikt genomen alleen geldig is bij afwezigheid van gradiënten in de stroomrichting. Voor de details wordt verwezen naar [1]. Ter illustratie is het berekende zandtransport voor een diepte van 3 m weergegeven in fig. 47, als functie van de stroomsnelheid en de golfhoogte. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een golfperiode $T = 6$ s, een maat voor de bodemruwheid $k = 40$ mm, en voor zand met $D_{50} = 0,20$ mm en een valsnelheid $w = 25$ mm/s. Uit fig. 47 blijkt voor relatief hoge golven een vrijwel lineair verband te bestaan tussen de stroomsnelheid en het zandtransport; onder die omstandigheden overheerst immers de orbitaalsnelheid zozeer ten opzichte van de stroomsnelheid dat de zandconcentratieverdeling vrijwel uitsluitend wordt bepaald door de orbitaalbeweging. Bij afwezigheid van golven is er vrijwel geen zandtransport voor $v < 0,5$ m/s; voor grotere snelheden neemt het transport progressief toe. Dit verschijnsel is van belang voor een goed begrip van de te presenteren resultaten. Deze worden gegeven voor twee gevallen, te weten getijstroom langs de kust gecombineerd met loodrecht op de kust invallende golven, en scheefinvallende golven die een brandingsstroom opwekken, bij afwezigheid van een getijstroom.

6.2 Berekening met getijstroom en loodrechte golfval

Hoewel de combinatie van getijstroom en loodrechte golfval niet in het model is onderzocht kan een dergelijke situatie toch heel goed als voorbeeld dienen om het karakteristieke gedrag van het zandtransport aan te tonen. De hier bedoelde hydraulische condities gaan gepaard met de veronderstelling dat de loodrecht invallende golven geen enkele invloed hebben op het stroombeeld dat ontstaat met uitsluitend getijstroom (hydraulische conditie 1). Ook wordt aangenomen dat de effectieve weerstand van de paalschermen ongewijzigd blijft. Deze-ongünstige-aanname wordt gedaan, omdat de in het voorgaande geconstateerde vergroting van de effectieve weerstand niet met voldoende zekerheid gekwantificeerd kan worden. Tenslotte wordt eenvoudshalve de golfhoogte constant verondersteld in het hele kustgebied. Wegens de reeds genoemde geringe nauwkeurigheid van de zandtransportformule zijn niet alle paalschermvormen afzonderlijk doorgerekend. Er is onderscheid gemaakt tussen twee hoofdgroepen met onderling duidelijke verschillen, namelijk korte en lange paalschermen. Uit tabel 29, hydraulische conditie 1, zijn hiertoe de gemiddelde stroomsnelheden bepaald van de groep A, B, G, H en van de groep C, D, E, F. In tabel 37 zijn deze waarden vermeld, evenals de overeenkomstige prototypesnelheden die verkregen zijn door vermenigvuldiging met de snelheidsschaal 6,32 (volgens Froude); ook de relatieve snelheden zijn vermeld. In fig. 46 zijn de absolute en relatieve prototypesnelheden grafisch weergegeven. Duidelijk is hier te zien dat snelheidsreductie op de ene plaats gepaard gaat met snelheidstoename in het aangrenzende gebied.

Voor de beide groepen korte en lange paalschermen is nu de zandtransportverdeling berekend voor de golfhoogten 0 m; 0,5 m; 1,0 m en 2,0 m; de uitkomsten zijn vermeld in tabel 38 en grafisch weergegeven in fig. 48. De relatieve zandtransporten, waarbij het zandtransport bij de basissnelheidsverdeling als maatstaf geldt, zijn in tabel 39 en fig. 49 gegeven. Bij vergelijking van fig. 49 en fig. 46 valt op dat de relatieve transportverdeling steeds beter overeenkomt met de relatieve snelheidsverdeling naarmate een hogere golf aanwezig is. Dit is te verklaren door te wijzen op het hierboven gesignaleerde vrijwel lineaire verband tussen zandtransport en stroomsnelheid voor hoge golven. Bij afwezigheid van golven (fig. 48a en 49a) komt de niet-lineariteit van het zandtransport tot

uiting in de relatief hoge waarden van het transport zeewaarts van de koppenlijn, en het geheel wegvallen van het transport nabij de waterlijn. Bij nadere beschouwing van fig. 48a lijkt de transportreductie, althans bij de korte paalschermen, niet op te wegen tegen de toename van het transport in het gebied zeewaarts van de koppenlijn. Dit is een belangrijke constatering, omdat hieruit blijkt, dat korte paalschermen in dit geval per saldo een toename van het langstransport zouden veroorzaken, in plaats van de gewenste afname. De situatie is in feite nog ongunstiger dan blijkt uit fig. 48, omdat ook voor afstanden groter dan 300 m uit de H.W.-lijn de snelheid, en dus het transport, nog een duidelijk hogere waarde heeft dan bij de situatie zonder paalschermen. Anderzijds moet echter worden gesteld dat voor afstanden kleiner dan 60 m uit de H.W.-lijn de omgekeerde situatie zich voordoet. Teneinde enig overzicht te verkrijgen van het totale netto-transport bij de verschillende golfhoogten en paalschermlengten zijn de berekende zandtransporten uit tabel 38 gesommeerd over de afstanden 50 m - 170 m, 170 m - 310 m en 50 m - 310 m voor de korte paalschermen, en over de afstanden 50 m - 230 m, 230 m - 310 m en 50 m - 310 m voor de lange paalschermen. Deze gesommeerde zandtransporten zijn, als percentage van de overeenkomstige transporten zonder paalschermen, weergegeven als de relatieve gesommeerde zandtransporten in tabel 40 en fig. 50.

Met inachtneming van de bovenomschreven onzekerheid omtrent de zandtransporten vlak langs de waterlijn en op grotere afstand dan 300 m, kunnen uit fig. 50 toch enige belangrijke gevolgtrekkingen worden gemaakt. In de eerste plaats vertoont het langstransport, zowel bij de korte als bij de lange paalschermen, een reductie tot 45 % à 70 % van de oorspronkelijke waarde, wanneer uitsluitend die strook in aanmerking genomen wordt waar snelheidsreductie optreedt. Zeewaarts van deze strook, waar een toename van de snelheid werd geconstateerd, loopt het zandtransport op tot 110 % à 130 % van de oorspronkelijke waarde. In beide stroken vertonen de korte paalschermen een iets gunstiger beeld dan de lange (zie fig. 50). Wordt echter het totaal van beide stroken bekeken, dan zijn de korte paalschermen duidelijk in het nadeel vergeleken bij de lange. Deze paradoxale uitkomst is te verklaren door het feit dat de "zeestroom" bij de korte paalschermen relatief zwaarder telt dan bij de lange paalschermen. Deze constatering houdt intussen wel in dat, bij voortzetting van de snelheidsmetingen in zee- waartse richting, voor de lange paalschermen ongetwijfeld een ongunstiger

beeld zou ontstaan wat betreft het relatieve gesommeerde zandtransport; dit geldt vooral bij lage golven omdat onder die omstandigheden het niet-lineaire verband tussen het zandtransport en de stroomsnelheid het sterkst tot uiting komt.

Het betrekkelijk ongunstige resultaat dat hierboven werd verkregen bij aanwezigheid van een getijstroom en loodrecht invallende, lage golven is een regelrecht gevolg van het feit dat het zandtransport progressief toeneemt met de stroomsnelheid. Door de aanwezigheid van de paalschermen blijft het totale debiet langs de kust weliswaar ongewijzigd, maar de snelheidsverdeling verandert wel, en daardoor wijzigt het totale zandtransport zich in het algemeen ook. Of het totale zandtransport toe- dan wel afneemt is afhankelijk van de vorm van het kustprofiel. Bij een monotoon dalend profiel met paalschermen in het ondiepe gedeelte zal het totale transport van zand in het algemeen toenemen. Is er echter sprake van een geultje waarin hogere stroomsnelheden voorkomen dan boven de aansluitende zandbank, dan kan het plaatsen van paalschermen in het profiel van de geul een verlaging veroorzaken van het totale zandtransport. In elk geval is het van belang om de spreiding van het geblokkeerde en dus uitgeworpen debiet zo gelijkmatig mogelijk te doen zijn teneinde het totale zandtransport te minimaliseren. In dit opzicht ontlopen de korte paalschermen elkaar niet veel (fig. 21), maar bij de lange schermen blijkt type C de gunstigste eigenschap te vertonen (fig. 22).

Terzijde kan worden opgemerkt dat de gesignaleerde toename van de stroomsnelheid zeewaarts van de koppenlijn, en van het totale zandtransport ongetwijfeld minder ernstig is dan bij massieve constructies het geval zou zijn. Dat neemt niet weg dat ook bij open paalschermen in een strook zeewaarts van de koppenlijn steeds een vergroting van het zandtransport optreedt, tegenover een verlaging in de kuststrook. Wanneer de gradiënten van deze zandtransportveranderingen, die zich aanvankelijk voornamelijk aan de bovenstroomse zijde van een reeks paalschermen voordoen, worden vertaald in bodemhoogteveranderingen, dan volgt uit de continuïteitsregel in de kuststrook een aanzanding en in de zeestrook een verdieping. Hierdoor zal het kustprofiel als geheel de neiging vertonen om steiler te worden. Aan de lijszijde van een door paalschermen verdedigd kustvlak doet zich precies het omgekeerde verschijnsel voor, zoals reeds in paragraaf 1.3 werd gesteld. Bij dit alles moeten de eerder genoemde beperkingen niet uit het oog worden verloren.

6.3 Berekening zonder getijstroom, met scheve golfinval

Een stromingstoestand waarbij uitsluitend een brandingsstroom optreedt onder invloed van scheefinvalende golven kan zich voordoen omstreeks de kentering van het getij. Indien de paalschermen tot buiten de brandingszone reiken wordt de stroomsnelheid daarbinnen gereduceerd, zonder dat de gemiddelde langsstroomsnelheid buiten de brandingszone hierdoor wordt beïnvloed. Onder deze omstandigheden neemt het zandtransport in de kustzone dus af, zonder dat daartegenover een toename staat in een zeewaarts gelegen strook. Onder de reeds in paragraaf 6.1 en 6.2 genoemde beperkingen wordt nu voor een dergelijke toestand het zandtransport met en zonder paalschermen berekend.

De snelheidsverdeling zonder paalschermen wordt ontleend aan de ijking van hydraulische conditie 5 (tabel 13, fig. 11). De stroomsnelheid in het prototype, verkregen door vermenigvuldiging met de snelheidsschaal 6,32 (volgens Froude) is weergegeven in fig. 51a. Omdat geen modelresultaten beschikbaar zijn voor de snelheidsreductie ten gevolge van paalschermen bij hydraulische conditie 5, is gebruik gemaakt van de gegevens, verkregen bij hydraulische conditie 4. Het gemiddelde van de relatieve snelheid van de schermen B, C en E (tabel 29 en fig. 28) is weergegeven in fig. 51b, waarbij echter voor afstanden van 4,0 m (160 m) en meer het percentage op 40 is gesteld; bij hydraulische conditie 4 speelt de getijstroom daar namelijk al een overheersende rol. Met behulp van de relatieve snelheid werd nu de -fictieve- gereduceerde stroomsnelheid berekend en uitgezet in fig. 51a. Het vervolgens berekende zandtransport, voor een constante golfhoogte van 1,0 m, is uitgezet in fig. 51c voor de situaties zonder en met paalschermen. In fig. 51d staat tenslotte het relatieve zandtransport. Het zandtransport neemt, zoals te verwachten was, iets meer af dan de stroomsnelheid (zie fig. 47, $H = 1,0$ m). Onder de aangenomen omstandigheden ontstaat dus een onverdeeld gunstige werking van de paalschermen, die leidt tot aanzanding in de brandingszone.

6.4 Samenvatting

- 1 Uitspraken over het zandtransport en de morfologische veranderingen zijn in dit kader niet anders bedoeld dan als een ruwe indicatie. Zij kunnen dan ook niet zonder meer de basis vormen voor te nemen maatregelen in het prototype.

- 2 Het dwarstransport van zand wordt geheel buiten beschouwing gelaten.
- 3 Ten aanzien van het langstransport kunnen de volgende uitspraken worden gedaan.
 - a Vooral bij lage golven neemt de grootte van het zandtransport progressief toe met de stroomsnelheid.
 - b De aanwezigheid van paalschermen veroorzaakt altijd aanzanding in de kuststrook.
 - c Indien een brandingsstroom wordt verzwakt door voldoende lange paalschermen, dan neemt het zandtransport in de kuststrook af; buiten de koppenlijn neemt het niet toe.
 - d Indien een getijstroom wordt afgeremd door paalschermen, dan neemt het zandtransport in de kuststrook af; buiten de koppenlijn neemt het echter toe.
 - e Bij een door paalschermen plaatselijk afgeremde getijstroom kan de totale grootte van het zandtransport toe- dan wel afnemen, afhankelijk van de hoogte van de golf en de vorm van het kustprofiel.
 - f Het toenemende zandtransport buiten de koppenlijn kan beperkt worden door zorg te dragen voor een zo gelijkmatig mogelijke spreiding van het uitgeworpen debiet; in dit opzicht lijkt paalscherm type C het meest gunstig.

7 Conclusies en aanbevelingen

Uit de resultaten van het modelonderzoek en de daarop gevolgde analyse, waarvan een samenvatting is gegeven in paragraaf 3.5, 4.4, 5.4 en 6.4, kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- 1 De onderzochte paalschermen veroorzaken een herverdeling van de stroomsnelheid: tussen de paalschermen wordt de stroomsnelheid met enkele tientallen procenten gereduceerd, terwijl zeewaarts van de koppenlijn de stroomsnelheid circa 10 % oploopt.
- 2 Het maakt een groot verschil of er al dan niet golven aanwezig zijn. Loodrecht invallende golven vergroten de snelheidsreductie van de paalschermen. Scheef invallende golven wekken een brandingsstroom op, die juist in geringere mate door de paalschermen wordt gereduceerd.

- 3 Van de onderzochte lange paalschermen lijkt type C het beste compromis tussen een positief te beoordelen snelheidsreductie nabij de kust en een negatief te beoordelen vergroting van de stroomsnelheid zeewaarts van de koppenlijn.
- 4 Uit een oogpunt van snelheidsreductie zijn diagonaal geplaatste vierkante palen waarschijnlijk te prefereren boven recht geplaatste vierkante palen of ronde palen.
- 5 De berekening van het langstransport van zand mag uitsluitend als een zeer ruwe indicatie worden opgevat. Er kan worden afgeleid dat, bij de bovenstroomse zijde van een met paalschermen verdedigd kustvak, in het gebied met gereduceerde snelheid aanzanding zal optreden; voor zover een gebied met toegenomen snelheid ontstaat zal daar een verdieping optreden, welke de verondieping in volume kan overtreffen. Het profiel zal als geheel steiler worden. Aan de lijzijde speelt zich het omgekeerde proces af. De mogelijke invloed van het dwarstransport is hier buiten beschouwing gelaten.

De volgende punten komen eventueel in aanmerking voor een nader onderzoek.

- 1 De omvang van het "schaduwgebied" benedenstrooms van een solitair paalscherm, als aanwijzing voor een keuze van de meest geschikte onderlinge afstand van de paalschermen; te onderzoeken zowel met als zonder brandingsstroom.
- 2 De invloed van de paalvorm, -opstelling en -afstand bij enkele en meervoudige paalschermen op de mate van snelheidsreductie.
- 3 De invloed van het Reynoldsgetal op de snelheidsreductie bij meervoudige schermen bestaande uit ronde palen.
- 4 De invloed van golven op de effectieve weerstand van paalschermen.
- 5 De invloed van de paalschermgeometrie, gericht op het verkrijgen van een zo gelijkmatig mogelijke spreiding van het uitgeworpen debiet, ten-einde plaatselijke verdieping zoveel mogelijk te beperken.
- 6 De zeewaarts gerichte stroming aan de bovenstroomse zijde van een reeks paalschermen.
- 7 Snelheidsgradiënten en turbulentiekenarakteristieken nabij de kopeinden van paalschermen.
- 8 De algehele interpretatie van de waterbeweging in termen van zandtransport, met name voor het geval van niet-stationair langstransport en de verschillende wijzen van dwarstransport.

LITERATUUR

- 1 Bijker, E.W., Longshore transport computations, Proc. A.S.C.E., vol. 97, WW. 4, pp 687-701, Nov. 1971
- 2 Waterloopkundig Laboratorium, Waterbeweging in en nabij de brandingszone. Verslag M 1077, april 1971
- 3 Bakker, W.T. en Opdam, H.J., Over de invloed van golven en getij op het zandtransport in de brandingszone. Rijkswaterstaat, Rapport W.W.K. 70-9, 1970
- 4 Wiegel, R.L., Closely spaced piles as a breakwater. Dock and Harbour Authority, vol. 42, no 491, p 150, 1961
- 5 Ludin, A., Wasserkraftanlagen II: Anordnung und Ausbildung der Hauptbauwerke, pp. 41-42, Berlin 1958
- 6 Idel'cik, I.E., Memento des pertes de charge. Collection du Centre de recherches et d'essais de Chatou
- 7 Ko, S.C. and Graf, W.H., Drag coefficient of cylinders in turbulent flow. Proc. A.S.C.E., vol. 98 HY5, pp. 897-912, May 1972
- 8 Lindh, G. and Niemczynowicz, J., Effect of grid turbulence on sedimentation, Bulletin Series A no 8, Lund, Sweden, 1972
- 9 Moret, G.E., C_D en C_M van ronde palen met relatief kleine diameter. Waterloopkundig Laboratorium, speurwerkrapport S 118, informatie 6
- 10 Graf, W.H., Hydraulics of sediment transport, pp. 57-62 McGraw-Hill. Inc. 1971

type paalscherm	onderlinge afstand paalschermen (m)		aantal rijen per paalscherm	
	afstand uit H.W.-lijn		afstand uit H.W.-lijn	
	0 - 3,5 m	3,5 - 5,0 m	0 - 3,5 m	3,5 - 5,0 m
A	5	-	1	-
B	5	-	2	-
C	5	10	1	2
D	5	10	2	2
E	10	10	2	2
F	5	5	1	1
G	3,75	-	1	-
H	10	-	2	-

Tabel 1 Onderzochte paalschermconfiguraties

codering hydr. conditie	waterstand	debiet (l/s)	golfperiode (s)	golfhoogte (cm)	golfrichting	stroomrichting
						raai 26 zee raai 1 kust
1	H.W.	450	golven niet aanwezig			
2	H.W.	450	golven niet aanwezig			
3	H.W.	450	1,04	3,0	15°	
4	H.W.	450	1,04	3,0	15°	
5	H.W.	0	1,04	3,0	15°	
6	L.W.	250	golven niet aanwezig			

Tabel 2 Hydraulische condities

meetmethode	type paalscherm											
	geen paalscherm (tijkning)	één paalscherm	A	B	C	D-a	D-b	E-a	E-b	F	G	H
fluoresceïne, visueel	3, 4		3,4	3,4	3,4	4	3	4	3	3,4	3,4	3,4
fluoresceïne, fotografisch			1	1	1	1			1	1	1	
drijvers, visueel	1, 2, 3, 4, 5			4	4				4			
drijvers, fotografisch (stippelfoto's)	1, 2, 6		1	1	1	1	1	1	1,6	1,6	1*)	1
ottmolen	1, 2											
micromolen		**)										
golfrichting, fotografisch	3, 4, 5											
golfhoopte	3, 4, 5											
verwijzing naar paragraaf	3.2	3.3	3.4									

Opmerkingen.

1. De cijfers verwijzen naar de hydraulische condities, zoals vermeld in tabel 2
2. *) Afzonderlijke metingen G-a en G-b
3. **) Afwijkende hydraulische condities, zie tabel 15

Tabel 3 Overzicht van de verrichte metingen

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.															
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5
2,0	6,6	7,0	7,6	6,9	6,7	6,6	6,4	6,2	6,4	6,8	6,7	6,8	7,5	7,2	6,5	7,2
2,5	8,1	7,6	7,7	7,4	7,7	7,3	7,4	7,4	7,6	7,7	7,2	7,6	8,0	7,7	7,7	7,7
3,0	9,2	9,3	9,1	8,9	8,7	8,6	9,1	8,4	8,4	8,8	8,9	8,7	8,8	8,2	8,5	8,8
3,5	10,5	10,6	10,0	10,3	10,1	10,0	10,1	10,2	10,2	10,5	9,4	10,2	10,0	10,0	9,4	10,1
4,0	11,5	11,5	11,1	11,3	11,5	11,0	10,9	11,0	12,0	11,0	11,1	11,0	11,0	10,9	11,3	11,3
4,5	12,5	12,3	12,2	12,2	13,0	13,1	12,1	12,1	12,4	12,4	12,6	12,2	12,1	12,0	11,9	12,9
5,0	14,1	14,3	14,8	13,8	14,4	13,6	14,5	14,3	14,2	13,4	13,6	13,6	13,6	13,0	12,9	13,5
5,5	15,4	15,1	15,4	15,5	15,7	16,2	14,7	14,5	15,1	15,6	15,1	15,0	14,7	14,0	15,1	14,5
6,0	15,6	16,2	15,8	16,2	15,8	16,1	15,7	15,9	16,2	16,1	15,8	15,8	15,5	16,0	15,8	15,8
6,5	16,9	16,5	16,6	16,1	16,4	16,4	16,3	15,6	15,9	16,5	15,6	15,8	16,0	15,9	15,9	15,3
7,0	17,0	17,6	16,7	16,8	16,6	16,2	16,0	16,4	16,5	16,1	16,1	15,9	15,6	15,9	14,9	15,0
7,5	16,8	16,7	16,9	17,9	16,4	16,7	16,4	16,4	16,8	15,7	16,6	16,6	16,6	15,6	15,9	15,7
8,0	16,1	16,6	16,9	17,0	17,6	17,0	16,8	17,5	17,1	16,8	16,7	16,8	16,7	16,2	16,3	16,1

Tabel 4
 ijking; hydraulische conditie 1
 meting met ottmolen
 snelheid in cm/s

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.															
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5
2,0	5,0	3,9	7,7	7,3	7,4	6,2	6,3	6,2	6,6	6,9	7,0	7,3	7,9	6,8	6,6	6,9
2,5	5,7	6,0	8,3	7,9	7,7	7,1	7,3	7,5	8,0	8,2	8,3	8,2	9,0	8,5	7,7	7,7
3,0	7,7	8,2	8,4	8,9	8,4	8,2	8,5	8,5	9,2	9,0	9,0	9,5	10,1	10,0	9,1	9,1
3,5	8,3	8,6	9,6	9,4	9,2	9,9	10,0	10,4	10,7	10,7	10,3	10,6	10,7	10,7	10,5	10,4
4,0	10,3	9,9	11,5	11,5	11,2	11,6	11,3	11,5	11,8	11,6	11,8	12,1	12,1	12,0	11,2	11,9
4,5	11,0	10,4	11,6	12,0	11,8	12,5	11,7	12,3	12,3	12,7	13,0	12,5	13,6	13,0	12,1	12,3
5,0	10,7	9,7	11,5	12,0	12,2	12,7	12,1	12,9	14,2	12,5	14,3	14,3	13,0	13,5	12,9	13,1
5,5	12,0	11,6	12,6	13,4	12,6	13,5	13,6	13,9	15,0	14,4	15,0	13,8	14,6	15,0	13,9	13,6
6,0	13,1	13,0	14,3	14,2	14,5	14,4	14,3	14,7	15,5	15,8	15,1	15,1	15,6	15,6	15,3	15,1
6,5	14,0	14,0	15,7	15,1	15,7	15,2	15,7	16,0	16,7	17,1	16,0	16,4	17,0	16,1	17,0	16,1
7,0	15,4	15,3	16,3	16,4	16,3	17,2	16,9	17,3	18,0	18,6	18,2	17,5	18,2	17,2	16,9	18,1
7,5	15,8	16,2	17,7	17,7	17,9	17,8	16,9	17,3	18,6	18,0	18,4	17,9	17,7	16,8	17,0	16,7
8,0	15,1	15,8	16,6	17,3	17,4	17,6	16,4	16,9	17,9	17,6	17,6	17,1	16,9	16,4	16,5	15,9

Tabel 5
 ijking; hydraulische conditie 2
 meting met ottmolen
 snelheid in cm/s

afstand uit H.W.-lijn (m)	hydraulische conditie 1			hydraulische conditie 2		
	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (°/o)	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (°/o)
2,0	6,8	0,4	6	6,6	1,0	15
2,5	7,6	0,2	3	7,7	0,8	10
3,0	8,8	0,3	3	8,9	0,6	7
3,5	10,1	0,3	3	10,0	0,7	7
4,0	11,2	0,3	3	11,4	0,6	5
4,5	12,4	0,3	2	12,1	0,8	7
5,0	13,8	0,5	4	12,6	1,2	10
5,5	15,1	0,5	3	13,6	1,0	7
6,0	15,9	0,2	1	14,6	0,8	5
6,5	16,1	0,4	2	15,8	0,9	6
7,0	16,2	0,7	4	17,1	1,0	6
7,5	16,5	0,6	4	17,3	0,8	5
8,0	16,8	0,4	2	16,8	0,7	4
gemiddelde waarde:			3	7		

Tabel 6

iĳking; hydraulische conditie 1 en 2

meting met ottmolen

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 5,5 ... 20,5

S = standaardafwijking snelheden raai 5,5 ... 20,5

$S/\bar{v}$ = variatiecoëfficiënt

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.															
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5
1,0	6,2	6,3	6,6	6,6	5,4	6,6	6,0	6,3	5,3	6,1	5,7	6,7	7,5	5,3	6,5	6,7
1,5	6,6	7,8	8,7	8,3	7,1	7,6	7,6	7,0	6,9	6,6	7,4	8,5	8,7	7,5	7,8	7,3
2,0	8,4	8,2	8,9	8,5	9,2	8,8	8,6	8,3	8,6	9,3	8,8	9,2	9,6	9,8	8,6	9,2
2,5	9,7	9,2	10,2	10,1	9,8	9,9	10,2	9,2	9,6	9,9	9,5	10,2	11,1	10,6	11,4	11,6
3,0	11,3	10,5	10,7	12,8	11,9	10,5	12,1	10,8	11,8	11,2	10,6	10,6	12,2	11,7	11,2	10,2
3,5	11,8	11,9	12,1	12,5	12,2	12,0	12,6	12,1	11,1	11,9	12,2	12,1	14,7	13,3	13,3	12,0
4,0	14,5	13,9	14,7	13,9	13,4	14,6	13,6	13,4	13,8	12,4	12,6	13,1	15,3	14,9	14,2	14,0
4,5	14,3	14,9	15,6	15,1	13,9	15,6	15,6	14,7	13,9	15,3	14,6	14,2	15,3	14,0	15,1	14,0
5,0	16,2	16,0	13,6	16,2	16,9	16,2	14,9	16,0	15,1	17,4	16,4	16,9	16,4	16,0	16,2	15,6
5,5	17,9	17,4	18,6	18,4	18,1	19,0	18,4	17,9	17,6	16,9	17,1	17,6	17,6	16,7	17,9	17,4
6,0	19,2	19,8	19,8	20,8	19,8	19,0	18,1	19,0	18,6	19,8	18,4	18,4	17,9	19,0	18,1	19,0
6,5	20,8	19,8	19,2	19,5	21,6	19,2	18,6	18,1	20,5	18,4	17,9	19,5	17,4	19,0	18,4	17,6
7,0	19,2	19,2	19,8	19,8	20,2	18,6	18,1	19,5	20,8	19,8	19,5	19,8	17,4	18,4	18,1	17,4
7,5	19,2	19,0	19,5	21,6	19,0	20,2	19,0	17,9	18,6	19,0	20,2	18,6	19,2	19,2	16,4	18,1
8,0	18,1	17,9	19,2	18,6	18,6	18,1	17,9	17,9	18,4	17,1	18,4	18,6	19,2	18,6	18,1	16,9

Tabel 7
 ijking; hydraulische conditie 1
 meting met drijvers
 snelheid in cm/s

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.															
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5
1,0	6,4	4,9	6,4	5,3	5,9	5,8	4,7	5,4	4,8	6,0	6,7	6,9	6,4	5,7	5,1	5,6
1,5	8,5	8,0	7,9	7,7	8,2	7,6	7,3	6,9	6,9	8,1	7,5	7,9	8,5	8,9	8,2	8,0
2,0	9,2	9,9	9,7	9,1	8,9	8,0	9,1	8,5	8,4	8,6	8,6	8,6	9,1	8,5	8,6	8,6
2,5	10,4	10,6	9,7	9,3	10,2	9,8	10,9	9,4	9,3	9,3	10,4	9,2	9,9	10,0	10,0	9,7
3,0	9,4	11,3	11,1	11,8	11,4	10,4	10,4	10,6	10,8	11,4	9,8	9,9	10,4	10,9	10,5	10,4
3,5	10,4	12,9	11,9	12,8	13,9	12,5	12,5	12,8	12,5	12,4	13,0	12,6	12,9	12,2	11,9	12,5
4,0	12,5	13,8	13,2	14,6	14,8	13,9	13,9	14,0	15,2	13,8	14,7	14,4	14,4	14,9	13,4	14,9
4,5	12,5	14,4	14,9	14,9	14,8	14,7	15,6	13,4	15,2	15,8	14,7	13,9	15,6	15,8	13,9	15,4
5,0	12,2	13,8	13,4	13,2	13,0	15,6	14,4	13,8	15,6	14,7	14,4	14,9	14,9	15,6	15,8	15,6
5,5	16,2	15,1	14,7	15,5	17,9	16,7	17,1	14,9	17,1	17,1	16,9	16,9	17,1	17,4	16,4	16,7
6,0	16,0	16,7	15,6	17,1	19,2	17,9	17,9	16,2	18,1	17,1	18,6	16,9	18,6	18,4	17,1	18,1
6,5	16,9	16,9	17,4	17,4	17,9	19,0	19,2	18,1	18,4	20,5	19,5	18,6	19,2	19,8	19,0	19,5
7,0	18,0	17,4	16,7	19,0	24,2	20,8	19,2	19,8	21,6	21,2	19,0	20,5	19,8	20,2	19,5	20,2
7,5	19,2	20,2	19,8	22,0	20,5	21,2	20,8	19,5	22,0	21,6	21,2	20,8	21,6	20,2	19,0	20,8
8,0	19,0	19,0	19,8	18,6	20,5	19,5	19,2	19,8	20,8	20,8	20,8	19,5	20,2	20,2	20,2	18,1

Tabel 8
 ijking; hydraulische conditie 2
 meting met drijvers
 snelheid in cm/s

afstand uit H.W.-lijn (m)	hydraulische conditie 1			hydraulische conditie 2		
	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (‰)	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (‰)
1,0	6,2	0,6	10	5,7	0,7	12
1,5	7,6	0,7	9	7,9	0,5	6
2,0	8,9	0,4	5	8,8	0,5	6
2,5	10,1	0,7	7	9,7	0,5	5
3,0	11,3	0,7	6	10,7	0,6	6
3,5	12,4	0,8	6	12,5	0,7	6
4,0	13,9	0,8	6	14,1	0,7	5
4,5	14,7	0,6	4	14,7	0,9	6
5,0	16,0	0,9	6	14,4	1,1	8
5,5	17,8	0,6	3	16,5	0,9	5
6,0	19,0	0,8	4	17,5	1,0	6
6,5	19,1	1,1	6	18,6	1,0	5
7,0	19,1	1,0	5	19,8	1,7	9
7,5	19,0	0,9	5	20,6	0,9	4
8,0	18,2	0,6	3	19,7	0,8	4
gemiddelde waarde			6	6		

Tabel 9

ijking; hydraulische conditie 1 en 2

meting met drijvers

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 5,5 ... 20,5

S = standaardafwijking snelheden raai 5,5 ... 20,5

$S/\bar{v}$ = variatiecoëfficiënt

afstand uit H.W.-lijn (m)	hydraulische conditie		
	1	2	6
0,5	2,6	2,6	-
1,0	4,9	4,5	-
1,5	7,3	7,9	-
2,0	8,0	8,9	-
2,5	8,8	10,9	-
3,0	11,0	12,0	-
3,5	12,0	13,0	-
4,0	13,4	14,7	-
4,5	14,9	15,8	7,0
5,0	16,9	16,2	9,9
5,5	18,4	18,2	13,1
6,0	18,8	18,7	15,6
6,5	18,4	19,8	18,7
7,0	19,6	19,7	18,9
7,5	19,9	20,9	19,5
8,0	19,1	19,8	-

Tabel 10

ijking; hydraulische conditie 1, 2 en 6

meting met stippelfoto's in raai 7 ... 18

snelheid in cm/s

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.																$\bar{v}$
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	
0,5	- 12,5	0	0	- 12,8	- 9,7	- 13,9	- 12,3	- 14,2	- 13,6	- 16,0	- 8,0	- 7,0	- 7,5	- 8,5	- 14,9	- 10,7	- 10,1
1,0	- 15,6	- 8,5	- 4,3	- 10,7	- 18,3	- 16,0	- 16,4	- 14,5	- 14,9	- 9,7	- 11,4	- 10,7	- 9,4	- 10,2	- 13,3	- 12,3	- 12,3
1,5	- 9,1	- 16,0	- 7,5	- 10,7	- 6,5	- 13,1	- 12,8	- 13,6	- 10,6	- 9,7	- 12,1	- 12,5	- 4,4	- 13,0	- 14,5	- 14,2	- 11,3
2,0	- 9,9	- 10,2	0	0	0	0	- 22,1	- 10,6	- 6,7	- 8,0	- 6,0	- 8,9	- 6,3	- 7,6	- 13,9	- 9,9	- 7,5
2,5	0	0	0	0	0	+ 3,6	0	0	0	0	- 2,9	- 4,3	- 3,3	0	- 6,8	- 9,2	- 1,4
3,0	0	0	+ 8,5	+ 6,5	+ 8,5	+ 8,5	+ 5,8	+ 7,5	+ 7,4	+ 2,0	+ 5,0	0	0	- 5,1	0	- 5,4	+ 3,1
3,5	+ 9,1	+ 9,9	+ 8,1	+ 10,7	+ 12,8	+ 13,9	+ 12,1	+ 13,3	+ 12,8	+ 11,8	+ 9,1	+ 8,9	+ 8,8	+ 5,1	+ 4,7	0	+ 9,4
4,0	+ 14,2	+ 16,8	+ 15,6	+ 14,2	+ 17,8	+ 15,2	+ 12,8	+ 13,9	+ 14,9	+ 14,5	+ 14,5	+ 14,5	+ 13,3	+ 10,5	+ 11,8	+ 4,3	+ 13,7
4,5	+ 16,4	+ 18,3	+ 17,8	+ 18,3	+ 17,8	+ 17,3	+ 17,3	+ 16,4	+ 18,3	+ 20,6	+ 18,8	+ 11,6	+ 10,0	+ 20,6	+ 13,9	+ 13,0	+ 16,7
5,0	+ 18,3	+ 17,8	+ 18,8	+ 18,3	+ 20,6	+ 17,8	+ 18,3	+ 17,8	+ 17,3	+ 20,6	+ 17,7	+ 16,8	+ 15,6	+ 18,8	+ 21,3	+ 21,3	+ 18,6
5,5	+ 17,8	+ 19,4	+ 19,4	+ 20,0	+ 21,3	+ 21,3	+ 18,3	+ 18,8	+ 19,4	+ 20,0	+ 20,6	+ 18,3	+ 21,3	+ 22,1	+ 17,7	+ 22,1	+ 19,9
6,0	+ 16,0	+ 19,4	+ 17,8	+ 18,8	+ 21,3	+ 16,8	+ 18,3	+ 18,8	+ 18,3	+ 16,8	+ 17,3	+ 17,7	+ 18,8	+ 17,7	+ 16,4	+ 21,3	+ 18,2
6,5	+ 18,8	+ 18,8	+ 20,0	+ 20,0	+ 19,4	+ 18,3	+ 18,8	+ 17,8	+ 20,0	+ 16,8	+ 16,0	+ 17,3	+ 18,8	+ 13,6	+ 17,7	+ 18,3	+ 18,2
7,0	+ 17,8	+ 19,4	+ 19,4	+ 22,1	+ 21,3	+ 18,3	+ 18,3	+ 20,0	+ 18,3	+ 18,3	+ 19,4	+ 17,7	+ 16,4	+ 18,8	+ 16,8	+ 18,8	+ 18,8
7,5	+ 20,0	+ 20,0	+ 21,3	+ 22,8	+ 20,6	+ 20,6	+ 18,3	+ 18,3	+ 21,3	+ 18,3	+ 21,3	+ 18,8	+ 16,8	+ 18,8	+ 21,3	+ 18,8	+ 19,8
8,0	+ 17,8	+ 18,3	+ 18,3	+ 20,0	+ 20,0	+ 17,3	+ 17,8	+ 18,8	+ 21,3	+ 17,7	+ 18,8	+ 13,9	+ 18,8	+ 21,3	+ 17,7	+ 18,8	+ 18,5

Tabel 11
 ijking; hydraulische conditie 3
 meting met drijvers
 snelheid in cm/s
 $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 5,5...20,5

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.																$\bar{v}$
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	
0,5	0	5,1	6,4	5,8	5,3	5,1	11,6	17,3	11,8	13,1	12,5	11,9	11,6	4,0	4,6	11,2	8,6
1,0	11,8	7,5	11,6	16,0	16,4	18,8	18,3	16,0	19,4	17,3	17,8	16,0	18,3	13,9	8,6	8,9	14,8
1,5	22,1	6,7	18,3	17,3	21,3	12,8	16,0	19,4	16,0	21,3	13,1	17,3	20,6	15,3	21,3	14,5	17,1
2,0	11,2	10,7	12,8	17,3	10,0	11,2	10,6	11,4	9,9	14,5	11,4	13,6	13,1	8,8	12,5	11,9	11,9
2,5	12,3	13,3	13,3	10,7	11,6	11,8	13,0	11,6	12,1	11,2	9,7	11,6	12,3	10,7	9,4	7,7	11,4
3,0	12,3	16,0	10,0	12,8	10,7	12,3	11,8	11,8	12,8	12,8	10,0	11,6	11,4	10,5	10,7	10,7	11,8
3,5	13,9	14,2	12,1	13,3	14,9	13,0	13,0	13,3	14,5	13,8	14,2	13,9	12,6	13,6	13,1	13,1	13,5
4,0	14,9	12,3	17,3	12,3	14,2	14,5	12,5	13,6	13,3	13,9	14,2	14,2	14,2	14,9	14,2	14,5	14,1
4,5	14,2	14,2	14,2	12,3	13,3	12,5	13,6	13,6	14,5	14,9	13,9	16,8	15,6	13,9	11,9	14,9	14,0
5,0	12,8	13,6	14,2	14,9	16,0	16,4	14,9	14,5	12,8	17,3	14,2	16,0	16,0	15,2	15,6	14,9	15,0
5,5	14,9	16,0	13,9	14,5	16,4	18,3	16,8	20,0	17,3	18,3	16,0	16,8	16,0	14,5	16,9	16,4	16,4
6,0	16,4	16,4	17,3	14,2	17,8	17,3	17,8	16,0	18,3	18,8	18,8	21,3	18,3	17,8	16,0	21,3	17,7
6,5	16,8	18,3	18,3	16,0	16,4	18,3	16,4	18,3	18,3	17,8	17,8	18,8	20,6	17,3	18,3	18,3	17,9
7,0	16,4	21,3	16,0	18,3	18,3	20,0	16,0	18,3	19,4	18,3	18,8	22,1	20,6	20,0	20,6	16,4	18,8
7,5	17,8	16,4	16,4	18,3	19,4	18,8	16,8	20,0	18,3	18,8	18,3	22,1	20,6	19,4	20,6	20,6	18,9
8,0	17,8	18,8	16,0	16,4	14,5	18,8	17,3	16,0	17,3	18,8	15,6	17,8	17,8	17,8	18,3	16,0	17,2

Tabel 12
 ijking; hydraulische conditie 4
 meting met drijvers
 snelheid in cm/s
 $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 5,5...20,5

afstand uit H.W.-lijn (m)	raai no.																$\bar{v}$
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	
0,5	20,0	11,0	9,8	5,9	5,9	12,3	11,4	9,7	8,7	14,9	15,3	10,5	11,4	13,9	7,6	8,5	11,1
1,0	16,4	12,5	13,9	7,5	13,1	16,4	16,4	19,4	21,4	16,5	13,1	14,2	11,9	13,3	6,7	13,3	14,1
1,5	18,3	11,0	12,1	13,1	18,3	13,9	15,3	14,6	13,3	15,6	12,1	13,6	10,3	14,9	18,3	12,8	14,2
2,0	7,5	4,1	14,2	9,3	8,9	10,7	9,2	7,0	3,8	5,3	8,9	9,4	9,2	6,3	8,5	9,1	8,2
2,5	0	0	6,9	8,3	4,6	2,3	3,3	1,8	1,8	1,5	2,5	4,5	6,3	5,6	6,7	7,4	4,0
3,0	-	-	2,8	3,2	1,6	0	1,2	0,9	1,0	0	1,2	1,9	3,8	5,1	3,6	4,1	1,9
3,5	-	-	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	2,4	2,6	2,7	2,7	0,7
4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	2,0	1,7	0,2
4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	1,8	0,2
5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5	0,2

Tabel 13
 ijking; hydraulische conditie 5
 meting met drijvers
 snelheid in cm/s
 $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 5,5...20,5

afstand uit H.W. lijn (m)	hydraulische conditie								
	3			4			5		
	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (%)	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (%)	$\bar{v}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}$ (%)
0,5	-10,1	5,0	49	8,6	4,6	53	11,1	3,8	34
1,0	-12,3	3,6	29	14,8	3,5	24	14,1	3,8	27
1,5	-11,3	3,1	27	17,1	4,1	24	14,2	2,5	18
2,0	- 7,5	5,9	78	11,9	2,2	18	8,2	2,5	30
2,5	- 1,4	3,1	222	11,4	1,7	15	4,0	2,7	67
3,0	3,1	4,9	158	11,8	1,5	13	1,9	1,7	89
3,5	9,4	3,7	39	13,5	0,7	5	0,7	1,1	157
4,0	13,7	3,0	22	14,1	1,2	8	0,2	0,6	300
4,5	16,7	3,0	18	14,0	1,2	9	0,2	0,6	300
5,0	18,6	1,6	9	15,0	1,2	8	0,2	0,6	300
5,5	19,9	1,5	7	16,4	1,6	10			
6,0	18,2	1,5	8	17,7	1,8	10			
6,5	18,2	1,9	10	17,9	1,1	6			
7,0	18,8	1,5	8	18,8	1,9	10			
7,5	19,8	1,5	8	18,9	1,6	8			
8,0	18,5	1,7	9	17,2	1,3	8			

Tabel 14

ijking: hydraulische conditie 3,4 en 5

meting met drijvers

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van rooi 5,5...20,5

S = standaardafwijking snelheden rooi 5,5...20,5

$S/\bar{v}$ = variatiecoëfficiënt

situatie	M1	M2	M3	M4
plaats paalscherf	raai 13	raai 13	raai 13	raai 13
type paalscherf	dubbel	enkel	dubbel	enkel
lengte paalscherf	5 m	5 m	5 m	5 m
afstand tussen meetraai en H.W.lijn	4,0 m	4,0 m	4,5 m	4,5 m
waterstand	HW	HW	NAP	NAP
waterdiepte t.p.v. meetraai	12,5 cm	12,5 cm	10 cm	10 cm
hoogte paalscherf t.p.v. meetraai	8,75 cm	8,75 cm	11,25 cm	11,25 cm

Tabel 15 Situaties micromolenmeting bij solitair paalscherf

hoogte boven bodem (cm)	afstand stroomafwaarts van as paalscherm (cm)							
	-100	-20	0	+20	+50	+100	+150	+250
situatie M1								
10	13,7	12,9	15,0	15,7	14,8	13,8	12,6	10,5
8	13,9	12,9	14,2	14,5	13,9	13,0	11,9	10,4
6	13,6	12,2	8,8	10,4	11,4	11,4	10,9	10,1
4	12,7	11,6	9,8	9,3	9,6	10,1	9,8	10,0
2	11,9	10,8	10,3	9,1	8,8	8,5	8,7	9,4
gemiddeld	13,2	12,1	11,6	11,8	11,7	11,4	10,8	10,1
situatie M2								
10	14,2	13,5	-	15,3	14,7	14,1	13,3	12,3
8	13,9	13,4	-	14,9	14,4	13,4	13,0	12,6
6	13,7	12,9	-	12,3	12,6	12,3	12,3	11,8
4	12,7	12,1	-	11,0	10,2	11,2	11,5	11,5
2	12,1	10,2	-	10,6	10,5	9,8	10,1	10,9
gemiddeld	13,3	12,4	-	12,8	12,8	12,2	12,0	11,8
situatie M3								
7	9,3	8,2	6,5	6,5	6,4	6,2	6,3	6,4
6	9,6	8,4	7,5	6,6	6,1	6,2	6,3	6,3
4	9,1	8,0	7,6	6,7	6,1	6,0	6,1	5,9
2	8,6	7,4	7,2	6,2	5,9	5,6	5,7	5,6
gemiddeld	9,1	8,0	7,2	6,5	6,1	6,0	6,1	6,0
situatie M4								
7	9,9	9,6	-	6,9	7,4	7,6	7,5	7,4
6	10,1	9,3	-	7,3	7,8	7,5	7,0	7,5
4	9,4	8,7	-	7,3	7,6	7,5	7,1	6,8
2	8,6	8,3	-	7,1	6,9	6,9	6,5	6,5
gemiddeld	9,5	9,0	-	7,1	7,4	7,4	7,0	7,0

Tabel 16

snelheidsverticalen bij solitair paalscherm

situaties M1...M4: zie tabel 15

meting met micromolen

snelheid in cm/s

hoogte boven bodem (cm)	afstand stroomafwaarts van as paalscherp (cm)							
	-100	-20	0	+20	+50	+100	+150	+250
situatie M1								
10	100	94	110	115	108	101	92	77
8	100	93	102	104	100	94	96	75
6	100	90	65	76	84	84	80	74
4	100	91	77	73	76	79	77	79
2	100	91	86	76	74	71	73	79
gemiddeld	100	92	88	89	88	86	84	77
situatie M2								
10	100	95	-	107	104	99	94	87
8	100	96	-	107	104	96	93	91
6	100	94	-	90	92	90	90	86
4	100	95	-	87	80	88	91	91
2	100	84	-	88	87	81	83	90
gemiddeld	100	93	-	96	93	91	90	89
situatie M3								
7	100	88	69	70	68	67	67	68
6	100	86	78	68	64	65	65	65
4	100	88	84	74	67	66	67	65
2	100	87	84	72	69	65	66	65
gemiddeld	100	87	79	71	67	66	66	66
situatie M4								
7	100	97	-	69	74	77	75	75
6	100	92	-	72	77	74	70	75
4	100	93	-	77	81	79	76	72
2	100	96	-	82	80	80	76	75
gemiddeld	100	94	-	75	78	77	74	74

Tabel 17

snelheidsverticalen bij solitair paalscherp

situaties M1...M4: zie tabel 15

meting met micromolen

relatieve snelheid in % ten opzichte van bovenstrooms punt

tabel 17

uitbouw- lengte paalrij uit H.W.lijn (m)	afstand tussen meetpunt en H.W.lijn (m)													
	1,5		2,0		2,5		3,0		3,5		4,0	4,5	5,0	5,5
	v	v _{rel}	v	v _{rel}	v	v _{rel}	v	v _{rel}	v	v _{rel}	v	v	v	v
0,0	5,9	100	7,0	100	7,5	100	8,9	100	10,0	100				
0,5	6,1	103	7,2	103	8,0	107	8,9	100	9,7	97				
1,0	5,9	100	6,8	97	7,8	104	8,6	97	9,8	98				
1,5	5,6	95	7,0	100	8,2	109	8,7	98	9,4	94				
2,0	5,0	85	5,6	80	7,9	105	9,0	101	9,4	94				
2,5	4,8	81	5,4	77	6,7	89	8,4	94	9,4	94				
3,0	4,9	83	5,8	83	6,6	88	7,4	83	10,0	100				
3,5	4,5	76	5,7	81	6,7	89	7,4	83	7,7	77	11,1	13,0	13,6	15,3
4,0	4,9	83	5,7	81	6,6	88	7,6	85	7,0	70	9,8	12,9	13,6	15,1
4,5	5,0	85	5,9	84	6,8	91	7,5	84	8,2	82	9,2	9,9	13,1	14,6
5,0	5,0	85	5,9	84	7,1	95	7,6	85	7,9	79	9,7	9,8	11,0	14,8

Tabel 18
 snelheden 5 m stroomafwaarts van stapsgewijs uitgebouwd solitair paalscherm
 meting met micromolen
 v = snelheid in cm/s
 v_{rel} = relatieve snelheid in % ten opzichte van uitbouw lengte = 0 m

raai nr.	hydraulische conditie 1													hydr. cond. 6	
	A	B	C	D a	D b	E a-1	E a-2	E b-1	E b-2	F	G a	G b	H	E b-2	F
1					-			-	-				•	-	
2															
3															
4															
5	•	•	-	-	•	-	-			-	•	•			-
6					---		---				---				---
7					---		---				•	•			---
8					---		---								---
9	•	•	•	•	-			-	-	-			•	-	-
10	---	---	---	---				---		---	•	•			---
11								---							
12								---							
13	•	•	-	-	•	-	-			-	•	•			-
14															
15															
16											•	•			---
17	•	•	•	•	-			-	-	-			•	-	-
18															
19											•	•			
20															
21	•	•	-	-	•	-	-			-					-
22											•	•			
23															
24															
25					-			-	-				•	-	

Tabel 19 Situaties paalschermen en meetvakken

N.B.

stroomrichting van raai 25 naar raai 1

- kort paalscherm
- lang paalscherm
- meetvak

afstand uit H.W.lijn (m)	aantal paalschermvakken bovenstrooms van de meetsectie					
	0	1	2	3	4	5
1,0	-	2,6	-	-	-	-
1,5	4,5	3,3	3,1	3,3	3,3	2,5
2,0	6,0	4,3	3,6	3,6	3,6	4,3
2,5	7,9	5,9	5,5	4,8	5,7	5,2
3,0	9,6	6,8	6,6	6,4	6,1	5,9
3,5	10,7	8,7	7,9	8,7	8,8	8,3
4,0	14,2	14,4	12,5	13,4	15,0	11,6
4,5	17,2	17,0	15,8	15,9	17,1	13,6
5,0	17,2	17,6	17,9	16,4	18,4	15,8
5,5	18,3	19,1	19,2	19,2	20,2	19,4
6,0	19,2	19,8	19,1	19,8	20,4	20,0
6,5	20,1	20,8	19,8	20,7	21,1	20,6
7,0	21,5	20,6	21,5	20,9	21,7	20,3
7,5	21,7	21,6	21,9	21,1	23,1	21,0
8,0	19,2	-	20,6	-	22,1	-

Tabel 20

paalscherm type G-a

hydraulische conditie 1

snelheidsverdeling als functie van het aantal bovenstrooms aanwezige paalschermvakken

snelheid in cm/s

meting met stippelfoto's

afstand uit H. W. lijn (m)	foto no							$\bar{v}_{1-7}$ (cm/s)	S (cm/s)	$S/\bar{v}_{1-7}$ (%)	S/v_{ijking} (%)	v_{rel} (%)
	1	2	3	4	5	6	7					
2,0	4,8	3,7	4,4	3,8	3,1	3,6	3,3	3,8	0,5	13	6	47
2,5	5,7	5,1	6,0	6,0	5,1	4,7	4,6	5,3	0,6	11	7	61
3,0	6,0	5,6	6,9	6,0	6,3	5,7	6,3	6,1	0,4	7	4	55
3,5	6,4	7,1	9,5	6,1	6,8	9,1	8,2	7,6	1,3	17	11	63
4,0	11,1	8,2	11,4	11,8	9,3	13,8	11,5	11,0	1,8	16	13	82
4,5	16,0	16,6	12,9	16,7	17,4	16,9	16,9	16,2	1,5	9	10	109
5,0	18,0	18,0	14,2	18,0	19,4	18,7	18,2	17,8	1,6	9	9	105
5,5	19,8	19,2	19,2	19,2	20,4	19,2	19,0	19,4	0,5	3	3	105
6,0	20,1	19,6	21,0	19,8	20,5	19,3	19,6	20,0	0,6	3	3	106

Tabel 21

paalscherm type G-b

hydraulische conditie 1

snelheidsverdeling van 7 stippelfoto's

snelheid in cm/s

$\bar{v}_{1-7}$ = gemiddelde snelheid van foto 1...7

S = standaardafwijking snelheden foto 1...7

$S/\bar{v}$ = variatiecoëfficiënt

$v_{\text{rel}} = \bar{v}_{1-7} / v_{\text{ijking}}$

afstand uit H.W.lijn (m)	paalscherm situatie		$\bar{v}$	$v_{rel.}$ (%)
	D - a	D - b		
1,5	2,8	3,7	3,2	44
2,0	3,5	4,4	3,9	49
2,5	4,9	5,9	5,4	62
3,0	6,1	6,8	6,4	58
3,5	7,8	8,0	7,9	66
4,0	9,2	9,5	9,3	69
4,5	10,7	11,5	11,1	75
5,0	12,7	14,4	13,5	80
5,5	14,8	17,5	16,1	87
6,0	19,4	20,4	19,9	106
6,5	20,5	20,7	20,6	112
7,0	21,8	21,1	21,4	109
7,5	22,9	21,5	22,2	112

Tabel 22
 paalscherm type D
 hydraulische conditie 1
 meting met stippelfoto's
 snelheid in cm/s
 $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van D-a en D-b

afstand uit H. W. lijn (m)	paalscherp situatie				$\bar{v}$	v_{rel} (%)
	E-a-1	E-a-2	E-b-1	E-b-2		
1,5	3,8	4,2	2,0	3,2	3,3	45
2,0	4,1	5,5	3,4	4,0	4,2	53
2,5	6,3	6,1	4,5	6,1	5,7	65
3,0	8,9	7,0	5,9	7,2	7,2	66
3,5	9,8	7,0	6,6	8,2	7,9	66
4,0	11,2	8,3	7,3	9,1	9,0	67
4,5	12,6	9,4	8,9	9,7	10,1	68
5,0	15,2	12,0	11,8	11,8	12,7	75
5,5	17,9	17,9	17,6	16,4	17,4	95
6,0	17,5	20,8	21,0	19,6	19,7	105
6,5	19,0	21,7	21,9	20,8	20,8	113
7,0	20,0	21,3	22,0	21,3	21,1	108
7,5	22,5	21,8	22,5	22,2	22,2	112
8,0	22,0	21,4	21,8	-	21,7	114

Tabel 23
 paalscherp type E
 hydraulische conditie I
 meting met stippelfoto's
 snelheid in cm/s
 $\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van E-a-1 ... E-b-2

afstand uit H.W. lijn (m)	snelheid in cm/s					relatieve snelheid in ‰				
	paalscherm type					paalscherm type				
	A	B	C	F	H	A	B	C	F	H
1,0	2,7	-	2,4	2,9	-	55	-	49	59	-
1,5	4,1	2,2	4,0	4,2	3,1	56	30	55	58	42
2,0	5,3	3,3	4,8	5,5	3,5	66	41	60	69	44
2,5	6,6	4,5	6,3	7,0	4,7	75	51	72	80	53
3,0	8,2	5,4	7,7	7,7	7,1	75	49	70	70	65
3,5	10,5	9,5	9,5	8,5	8,8	87	79	79	71	73
4,0	14,3	13,6	10,3	11,3	14,0	107	101	77	84	104
4,5	16,0	16,1	10,9	12,3	16,3	107	108	73	82	109
5,0	17,4	18,0	14,8	17,0	16,7	103	106	88	101	99
5,5	18,7	19,0	16,6	19,1	19,0	102	103	90	104	103
6,0	19,6	19,9	18,4	19,7	19,7	104	106	98	105	105
6,5	20,1	20,0	19,2	20,2	19,9	109	109	104	110	109
7,0	20,1	20,9	19,7	20,5	20,0	102	107	100	105	102
7,5	20,0	22,0	20,8	20,9	20,6	100	111	104	105	104
8,0	19,7	21,6	20,6	20,6	-	103	113	108	108	-

Tabel 24

paalscherm type A,B,C,F,H

hydraulische conditie 1

meting met stippelfoto's

absolute en relatieve snelheden

afstand uit H.W. lijn (m)	snelheid in cm/s		relatieve snelheid in %	
	paalscherp type		paalscherp type	
	C,D,E	F	C,D,E	F
4,5	5,0	6,1	71	87
5,0	8,9	9,7	90	99
5,5	14,6	14,0	112	107
6,0	17,0	16,7	109	107
6,5	19,1	18,4	102	98
7,0	20,5	19,7	108	104
7,5	20,4	20,1	105	103

Tabel 25

paalscherp type C,D,E,F

hydraulische conditie 6

meting met stippelfoto's

absolute en relatieve snelheden

afstand uit H.W.lijn (m)	raai no				$\bar{v}$	$v_{rel.}$ (%)
	13,5	14,5	15,5	16,5		
0,5	7,0	-	6,5	-	6,7	55
1,0	7,1	8,9	11,2	7,2	8,6	49
1,5	9,3	15,1	9,2	11,2	11,2	66
2,0	6,0	5,3	8,7	9,3	7,3	59
2,5	6,5	2,6	5,6	2,2	4,2	39
3,0	5,2	2,6	6,1	3,1	4,2	36
3,5	6,7	5,0	4,2	6,1	5,5	39
4,0	14,4	12,0	8,1	5,3	10,0	69
4,5	21,6	11,8	11,4	11,8	14,1	94
5,0	16,2	13,3	14,8	13,8	14,8	96
5,5	16,2	17,1	15,5	16,2	16,2	95
6,0	18,6	18,6	15,1	17,6	17,5	90
6,5	20,3	23,2	19,1	19,1	20,4	113
7,0	22,4	20,3	21,6	20,3	21,1	108
7,5	21,6	19,1	17,1	20,9	19,7	101
8,0	19,1	18,6	18,6	19,1	18,9	95

Tabel 26

paalscherm type B

hydraulische conditie 4

meting met drijvers

snelheid in cm/s

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 13,5 ... 16,5

afstand uit H.W. lijn (m)	raai no								$\bar{v}$	$v_{rel.}$ (%)
	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5		
0,5	4,3	7,8	6,4	4,6	9,1	3,8	5,6	-	6,0	54
1,0	8,3	10,1	12,0	14,2	15,5	6,1	9,3	10,8	10,9	62
1,5	10,1	16,2	15,5	9,3	17,1	11,6	9,1	9,1	12,3	72
2,0	13,0	3,6	10,0	8,8	6,3	11,2	12,0	8,8	9,2	79
2,5	6,5	3,9	3,8	7,3	5,2	5,9	7,0	5,9	5,7	49
3,0	5,3	6,7	4,6	6,0	9,3	6,8	6,5	6,4	6,4	55
3,5	7,8	6,2	4,4	5,9	8,5	7,2	6,6	6,4	6,7	48
4,0	8,5	9,8	7,1	8,3	10,3	6,8	8,9	7,7	8,5	61
4,5	5,9	9,3	6,9	10,3	9,8	9,6	7,8	8,1	8,5	60
5,0	8,7	10,0	10,3	10,6	10,8	11,6	9,7	10,3	10,3	67
5,5	13,5	13,0	14,1	15,5	13,0	15,5	13,0	17,1	14,3	82
6,0	15,5	15,1	15,5	14,8	17,6	16,2	14,1	17,6	15,8	87
6,5	16,2	16,2	19,1	15,8	18,6	21,7	15,8	19,1	17,8	100
7,0	16,2	15,8	17,1	15,8	18,6	19,7	20,3	21,0	18,1	96
7,5	16,2	17,1	16,2	21,0	21,7	19,7	22,4	25,0	19,9	105
8,0	18,0	16,2	15,8	19,7	18,6	18,6	17,6	18,6	17,9	105

Tabel 27

paalscherm type C

hydraulische conditie 4

meting met drijvers

snelheid in cm/s

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 9,5 ... 16,5

afstand uit H.W. lijn (m)	raai no								$\bar{v}$	$v_{rel.}$ (%)
	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5		
0,5	-	-	-	-	6,8	18,0	3,7	3,3	8,0	72
1,0	12,2	10,8	11,4	15,5	11,8	13,8	9,7	10,0	11,9	68
1,5	6,9	11,6	11,4	11,8	11,0	15,8	13,5	15,8	12,2	71
2,0	8,0	7,1	8,7	6,6	11,6	6,9	9,7	8,6	8,4	68
2,5	6,5	7,7	5,8	2,4	4,3	6,9	5,7	5,0	5,5	51
3,0	3,7	8,3	7,3	3,6	3,0	3,6	4,1	4,4	4,8	40
3,5	3,8	7,1	7,1	7,0	5,0	7,8	5,2	6,0	6,1	43
4,0	7,6	13,5	5,3	7,1	5,4	7,7	6,5	8,0	7,6	55
4,5	10,0	12,2	6,4	8,6	8,8	8,6	7,1	8,6	8,8	62
5,0	8,3	9,8	14,8	9,6	12,5	12,7	12,2	8,7	11,1	73
5,5	11,2	12,0	14,4	15,1	16,2	12,5	9,8	11,0	12,8	73
6,0	15,5	15,5	16,6	15,5	19,1	16,3	18,0	14,8	16,4	90
6,5	17,6	20,3	14,4	15,1	19,1	15,1	14,8	15,8	16,5	93
7,0	21,0	14,1	18,0	19,7	18,0	18,6	19,1	17,1	18,2	96
7,5	19,7	13,5	17,1	15,1	21,0	18,6	22,4	16,2	18,0	94
8,0	18,9	15,5	20,3	16,2	18,0	18,0	18,0	19,7	18,1	106

Tabel 28

paalscherm type E

hydraulische conditie 4

meting met drijvers

snelheid in cm/s

$\bar{v}$ = gemiddelde snelheid van raai 9,5 ... 16,5

afstand uit H.W. lijn (m)	absolute snelheid in cm/s																	
	hydraulische conditie 1									hydraulische conditie 6			hydraulische conditie 4					
	ijkijng	paalschem type								ijkijng	paalschem type		ijkijng raai	paalschem type		ijkijng raai	paalschem type	
		A	B	C	D	E	F	G	H		C,D,E	F		13,5-16,5	B		9,5-16,5	C
0,5	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,3	6,7	11,1	6,0	8,0	
1,0	4,9	2,7	-	2,4	-	-	2,9	-	-	-	-	-	17,6	8,6	17,5	10,9	11,9	
1,5	7,3	4,1	2,2	4,0	3,2	3,3	4,2	3,1	3,1	-	-	-	16,9	11,2	17,1	12,3	12,2	
2,0	8,0	5,3	3,3	4,8	3,9	4,2	5,5	3,8	3,5	-	-	-	12,3	7,3	11,6	9,2	8,4	
2,5	8,8	6,6	4,5	6,3	5,4	5,7	7,0	5,3	4,7	-	-	-	10,9	4,2	11,6	5,7	5,5	
3,0	11,0	8,2	5,4	7,7	6,4	7,2	7,7	6,1	7,1	-	-	-	11,8	4,2	11,7	6,4	4,8	
3,5	12,0	10,5	9,5	9,5	7,9	7,9	8,5	7,6	8,8	-	-	-	14,1	5,5	13,8	6,7	6,1	
4,0	13,4	14,3	13,6	10,3	9,3	9,0	11,3	11,0	14,0	-	-	-	14,4	10,0	13,8	8,5	7,6	
4,5	14,9	16,0	16,1	10,9	11,1	10,1	12,3	16,2	16,3	7,0	5,0	6,1	15,0	14,1	14,1	8,5	8,8	
5,0	16,9	17,4	18,0	14,8	13,5	12,7	17,0	17,8	16,7	9,9	8,9	9,7	15,1	14,8	15,3	10,3	11,1	
5,5	18,4	18,7	19,0	16,6	16,1	17,4	19,1	19,4	19,0	13,1	14,6	14,0	17,1	16,2	17,5	14,3	12,8	
6,0	18,8	19,6	19,9	18,4	19,9	19,7	19,7	20,0	19,7	15,6	17,0	16,7	19,3	17,5	18,3	15,8	16,4	
6,5	18,4	20,1	20,0	19,2	20,6	20,8	20,2	19,8	19,9	18,7	19,1	18,4	18,2	20,4	17,8	17,8	16,5	
7,0	19,6	20,1	20,9	19,7	21,4	21,1	20,5	21,5	20,0	18,9	20,5	19,7	19,6	21,1	18,9	18,1	18,2	
7,5	19,9	20,0	22,0	20,8	22,2	22,2	20,9	21,9	20,6	19,5	20,4	20,1	19,4	19,7	19,1	19,9	18,0	
8,0	19,1	19,7	21,6	20,6	-	21,7	20,6	20,6	-	-	-	-	19,9	18,9	17,0	17,9	18,1	

afstand uit H.W. lijn (m)		relatieve snelheid in ‰															
		hydraulische conditie 1								hydraulische conditie 6		hydraulische conditie 4					
		paalschem type								paalschem type		paalschem type		paalschem type			
		A	B	C	D	E	F	G	H	C,D,E F		B		C E			
0,5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55		54	72	
1,0		55	-	49	-	-	59	-	-	-	-	-	49		62	68	
1,5		56	30	55	44	45	58	43	42	-	-	-	66		72	71	
2,0		66	41	60	49	53	69	47	44	-	-	-	59		79	68	
2,5		75	51	72	62	65	80	61	53	-	-	-	39		49	51	
3,0		75	49	70	58	66	70	55	65	-	-	-	36		55	40	
3,5		87	79	79	66	66	71	63	73	-	-	-	39		48	43	
4,0		107	101	77	69	67	84	82	104	-	-	-	69		61	55	
4,5		107	108	73	75	68	82	109	109	71	87		94		60	62	
5,0		103	106	88	80	75	101	105	99	90	99		96		67	73	
5,5		102	103	90	87	95	104	105	103	112	107		95		82	73	
6,0		104	106	98	106	105	105	106	105	109	107		90		87	90	
6,5		109	109	104	112	113	110	108	109	102	98		113		100	93	
7,0		102	107	100	109	108	105	110	102	108	104		108		96	96	
7,5		100	111	104	112	112	105	110	104	105	103		101		105	94	
8,0		103	113	108	-	114	108	108	-	-	-		95		105	106	

Tabel 29
paalschem type A,B,C,D,E,F,G,H
hydraulische conditie 1,4 en 6
meting met stippelfoto's (h.c. 1 en 6) en drijvers (h.c. 4)
absolute en relatieve snelheden

type paalscherm (kort) (lang)		hydraulische conditie 1		
		maximale snelh.grad. (s ⁻¹)	volgorde	plaats van optreden afstand uit H.W. lijn
	ijking	0,048	1	1,0 - 1,5 m
A		0,076	2	3,5 - 4,0 m
B		0,084	5	3,0 - 4,0 m
	C	0,078	4	4,5 - 5,0 m
	D	0,076	2	5,5 - 6,0 m
	E	0,094	6	5,0 - 5,5 m
	F	0,094	6	4,5 - 5,0 m
G		0,104	8	4,0 - 4,5 m
H		0,104	8	3,5 - 4,0 m

type paalscherm		hydraulische conditie 6		
		maximale snelh.grad. (s ⁻¹)	volgorde	plaats van optreden afstand uit H.W. lijn
	ijking	0,064	1	5,0 - 5,5 m
	C,D,E	0,114	3	5,0 - 5,5 m
	F	0,086	2	5,0 - 5,5 m

Tabel 30 Maximale snelheidsgradiënt in dwarsrichting
hydraulische conditie 1 en 6

type paalscherm (kort) (lang)		relatieve debieten in ‰		
		1,5 - 3,5 m	3,5 - 5,0 m	1,5 - 5,0 m
	ijking	100	100	100
A		73	104	91
B		50	102	80
	C	68	78	74
	D	57	71	65
	E	61	68	65
	F	71	85	79
G		55	94	78
H		56	102	82

Tabel 31 Relatieve debieten ; hydraulische conditie 1

afstand uit H. W. -lijn (m)	d (cm)	h (h ≤ d) (cm)	D (cm)	aantal palen/m ¹ in één enkel paalscherm	A = h x D x n (10 ⁻⁴ m ²)			
					onderlinge afstand van de enkelvoudige paalrijen			
					10m	5m	3,75m	2,5m
0,5	1,4	1,4	0,6	83	7,0	14	18,7	28
1,0	2,8	2,8	0,6	83	14,0	28	37,4	56
1,5	4,3	4,25	0,6	83	21,2	42,4	56,5	84,8
2,0	5,7	4,25	0,6	83	21,2	42,4	56,5	84,8
2,5	7,1	4,25	0,6	83	21,2	42,4	56,5	84,8
3,0	8,6	4,80	0,6	83	23,9	47,8	63,7	95,6
3,5	10,0	6,25	0,6	{ 83 57	{ 31,1 21,4	{ 62,2 42,8	{ 83 57	{ 124,4 85,6
4,0	12,5	8,75	0,6	57	30,0	60	80	120
4,5	15,0	11,25	0,6	57	38,5	77	103	154
5,0	17,5	13,75	0,6	40	33,0	66	88	132

Tabel 32

berekening paalschermffect

waarden van A, het totale aangestroomde paaloppervlak per m² model

afstand uit H.W.-lijn (m)	d (cm)	$C_b = 18 \log \frac{12d}{k}$ $k = 1 \text{ mm}$ $(\text{m}^1 \text{ s}^{-1})$	C_b^2 (m/s^{-2})	$C_p^2 = \frac{19,62}{A} (\text{m s}^{-2})$			
				onderlinge afstand van de enkelvoudige paalrijen			
				10m	5m	3,75m	2,5 m
0,5	1,4	40,0	1600	28000	14000	10500	7000
1,0	2,8	45,5	2070	14000	7000	5250	3500
1,5	4,3	48,8	2380	9250	4625	3480	2312
2,0	5,7	51,0	2600	9250	4625	3480	2312
2,5	7,1	52,7	2780	9250	4625	3480	2312
3,0	8,6	54,2	2940	8200	4100	3080	2050
3,5	10,0	55,6	3090	{ 6300 9150	{ 3150 4575	{ 2360 3440	{ 1575 2287
4,0	12,5	57,2	3270	6550	3275	2450	1637
4,5	15,0	58,5	3420	5100	2550	1900	1275
5,0	17,5	59,8	3580	5950	2975	2230	1487

Tabel 33
 berekening paalschermeffect
 waarden van C_b^2 en C_p^2

afstand uit H. W. -lijn (m)	d (cm)	C_b^2/C_p^2				$v_{rel} = \sqrt{\frac{1}{1+(C_b/C_p)^2}} \times 100 \%$			
		onderlinge afstand van de enkelvoudige paalrijen				onderlinge afstand van de enkelvoudige paalrijen			
		10m	5m	3,75m	2,5m	10m	5m	3,75m	2,5m
0,5	1,4	0,06	0,11	0,15	0,23	97	95	93	90
1,0	2,8	0,15	0,30	0,39	0,59	93	88	85	80
1,5	4,3	0,26	0,51	0,68	1,03	89	81	77	70
2,0	5,7	0,28	0,56	0,75	1,13	88	80	76	69
2,5	7,1	0,30	0,60	0,80	1,20	88	79	75	67
3,0	8,6	0,36	0,72	0,95	1,43	86	76	72	64
3,5	10,0	{ 0,49 0,34	{ 0,98 0,68	{ 1,31 0,90	{ 1,96 1,35	{ 82 88	{ 71 77	{ 66 62	{ 58 65
4,0	12,5	0,50	1,00	1,33	2,00	82	71	66	58
4,5	15,0	0,67	1,34	1,80	2,68	77	65	60	52
5,0	17,5	0,60	1,20	1,60	2,41	79	67	62	54

Tabel 34
 berekening paalschermeffect
 relatieve snelheid met gelijkmatig verspreide palen

afstand uit H. W. -lijn (m)	d (cm)	h (cm)	D (cm)	B (cm)	$\eta = \frac{h}{d} \cdot 1,7 \left(\frac{D}{B} \right)^{4/3}$ (h ≤ d)
0,5	1,4	4,25	0,6	0,6	1,70
1,0	2,8	4,25	0,6	0,6	1,70
1,5	4,3	4,25	0,6	0,6	1,68
2,0	5,7	4,25	0,6	0,6	1,27
2,5	7,1	4,25	0,6	0,6	1,02
3,0	8,6	4,80	0,6	0,6	0,95
3,5	10,0	6,25	0,6	$\begin{cases} 0,6 \\ 1,15 \end{cases}$	$\begin{cases} 1,06 \\ 0,45 \end{cases}$
4,0	12,5	8,75	0,6	1,15	0,50
4,5	15,0	11,25	0,6	1,15	0,54
5,0	17,5	13,75	0,6	1,9	0,29

Tabel 35
 berekening paalschermeffect
 bepaling van η volgens (23)

afstand uit H. W. -lijn	d	$\frac{C_b^2 d \eta}{2g}$	$v_{rel} = \sqrt{\frac{L}{\frac{C_b^2 d \eta}{2g} + L}} \times 100 \%$			
			onderlinge afstand van de enkelvoudige paalrijen			
			10m	5m	3,75m	2,5m
0,5	1,4	1,94	91	85	81	71
1,0	2,8	5,0	82	71	66	58
1,5	4,3	8,74	73	60	55	47
2,0	5,7	9,59	71	58	53	45
2,5	7,1	10,25	70	57	52	44
3,0	8,6	12,22	67	54	48	41
3,5	10,0	$\begin{Bmatrix} 16,70 \\ 7,08 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 61 \\ 76 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 48 \\ 64 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 43 \\ 59 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} 36 \\ 51 \end{Bmatrix}$
4,0	12,5	10,40	70	57	51	44
4,5	15,0	14,10	64	51	46	39
5,0	17,5	9,25	72	59	54	46

Tabel 36
 berekening paalschermeffect
 relatieve snelheid met palen verenigd tot schermen

model					prototype						
afstand uit H. W. -lijn (m)	waterdiepte (cm)	stroomsnelheid (cm/s)			afstand uit H. W. -lijn (m)	waterdiepte (m)	stroomsnelheid (cm/s)			v_{rel} (%)	
		ijking	korte schermen	lange schermen			ijking	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen
1,5	4,3	7,3	3,1	3,7	60	1,7	46	20	23	43	50
2,0	5,7	8,0	4,0	4,6	80	2,3	51	25	29	49	57
2,5	7,1	8,8	5,3	6,1	100	2,9	56	33	39	59	70
3,0	8,6	11,0	6,7	7,2	120	3,4	70	42	46	60	66
3,5	10,0	12,0	9,1	8,4	140	4,0	76	58	53	76	70
4,0	12,5	13,4	13,2	10,0	160	5,0	85	83	63	98	74
4,5	15,0	14,9	16,1	11,1	180	6,0	94	102	70	109	75
5,0	17,5	16,9	17,5	14,5	200	7,0	107	111	92	104	86
5,5	20,0	18,4	19,0	17,5	220	8,0	116	120	111	103	96
6,0	22,5	18,8	19,8	19,4	240	9,0	119	125	123	105	103
6,5	25,0	18,4	19,9	20,2	260	10,0	116	126	128	109	110
7,0	27,5	19,6	20,6	20,7	280	11,0	124	130	131	105	106
7,5	30,0	19,9	21,1	21,5	300	12,0	126	133	136	106	108

Tabel 37
 stroomsnelheden in model en prototype
 korte en lange paalschermen
 absolute en relatieve snelheden

afstand uit H. W. -lijn (m)	zandtransport S (m ³ /m ¹ .uur)											
	H = 0 m			H = 0,5 m			H = 1,0 m			H = 2,0 m		
	ijking	korte schermen	lange schermen	ijking	korte schermen	lange schermen	ijking	korte schermen	lange schermen	ijking	korte schermen	lange schermen
60	0,03	-	-	0,75	0,30	0,35	2,25	1,00	1,10	4,7	2,0	2,3
80	0,04	-	-	0,65	0,30	0,30	2,40	1,15	1,30	5,7	2,8	3,3
100	0,06	-	-	0,60	0,25	0,30	2,35	1,25	1,60	6,5	3,8	4,5
120	0,16	-	0,01	0,75	0,30	0,35	2,80	1,50	1,65	8,1	4,8	5,3
140	0,23	0,05	0,03	0,75	0,40	0,30	3,20	1,80	1,65	8,7	6,5	5,9
160	0,35	0,32	0,08	0,80	0,75	0,35	2,55	2,40	1,55	8,9	8,7	6,4
180	0,54	0,76	0,12	1,00	1,25	0,35	2,50	2,95	1,40	8,9	9,9	6,2
200	0,91	1,08	0,45	1,40	1,60	0,80	2,80	3,10	1,95	9,1	9,7	7,3
220	1,28	1,50	1,04	1,70	1,95	1,45	3,00	3,30	2,60	8,8	9,3	8,2
240	1,40	1,75	1,62	1,80	2,10	2,00	2,85	3,30	3,20	8,0	8,7	8,4
260	1,17	1,74	1,86	1,50	2,10	2,20	2,30	3,00	3,20	6,6	7,7	7,9
280	1,58	1,92	2,00	1,85	2,20	2,25	2,65	3,05	3,15	6,3	7,0	6,6
300	1,67	2,06	2,24	1,90	2,30	2,50	2,50	3,00	3,30	5,6	6,4	6,8

Tabel 38
 zandtransport in het prototype
 korte en lange paalschermen
 golfhoogte 0 m, 0,5 m, 1,0 m en 2,0 m

afstand uit H.W.-lijn (m)	relatief zandtransport (‰)							
	H = 0 m		H = 0,5 m		H = 1,0 m		H = 2,0 m	
	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen
60	0	0	40	47	44	49	43	49
80	0	0	46	46	48	54	49	58
100	0	0	42	50	53	68	58	71
120	0	6	40	47	54	59	59	65
140	22	13	53	40	56	52	75	68
160	91	23	94	44	94	61	98	72
180	141	22	125	35	118	56	111	70
200	109	49	114	57	111	70	107	80
220	107	81	115	85	110	87	106	93
240	125	116	117	111	116	112	109	105
260	149	159	140	147	130	139	122	126
280	122	127	119	122	115	119	111	105
300	123	134	121	132	120	132	113	120

Tabel 39

relatief zandtransport in het prototype

korte en lange paalschermen

golfhoogte 0 m, 0,5 m, 1,0 m en 2,0 m

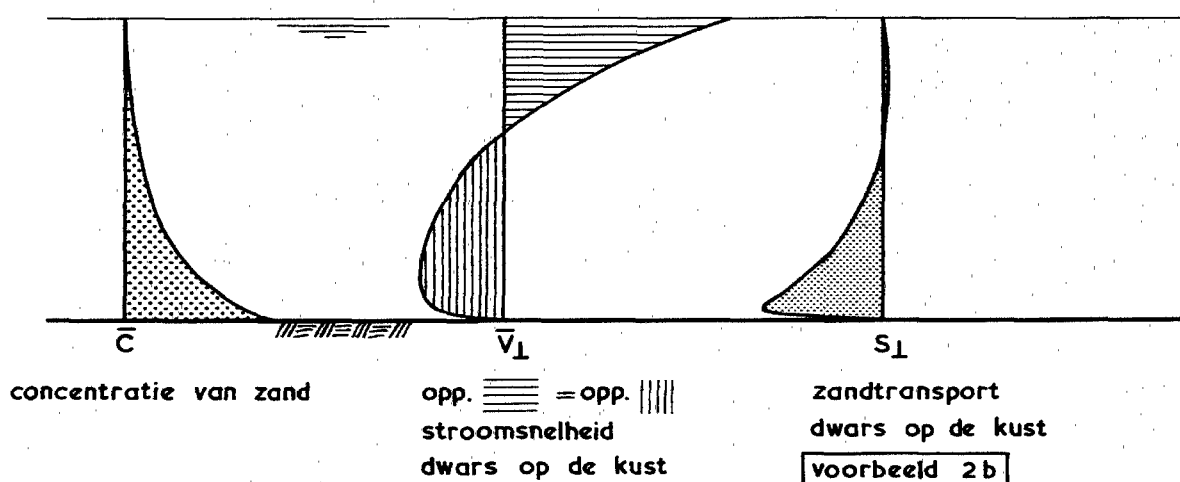
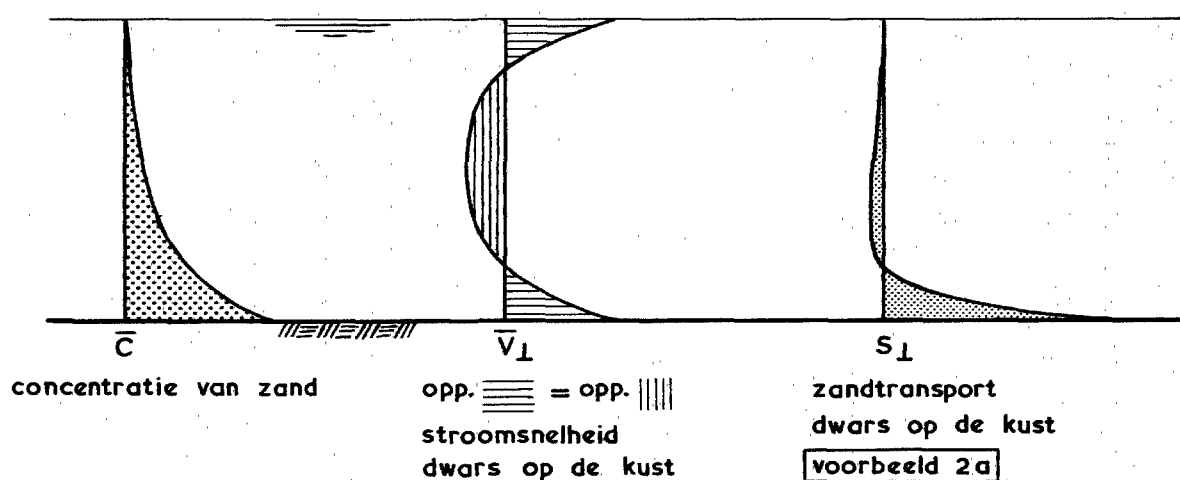
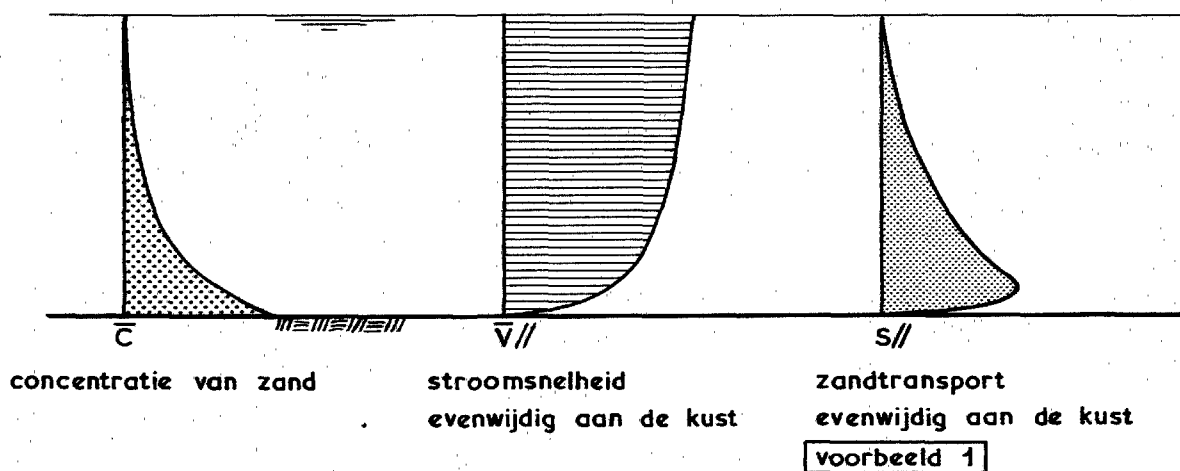
afstand uit H.W.-lijn (m)	relatief gesommeerd zandtransport (‰)							
	H = 0 m		H = 0,5 m		H = 1,0 m		H = 2,0 m	
	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen	korte schermen	lange schermen
50-170	43		53		59		67	
50-230		48		54		62		71
170-310	127		121		117		106	
230-310		133		127		115		111
50-310	119	99	102	87	90	78	89	83

Tabel 40

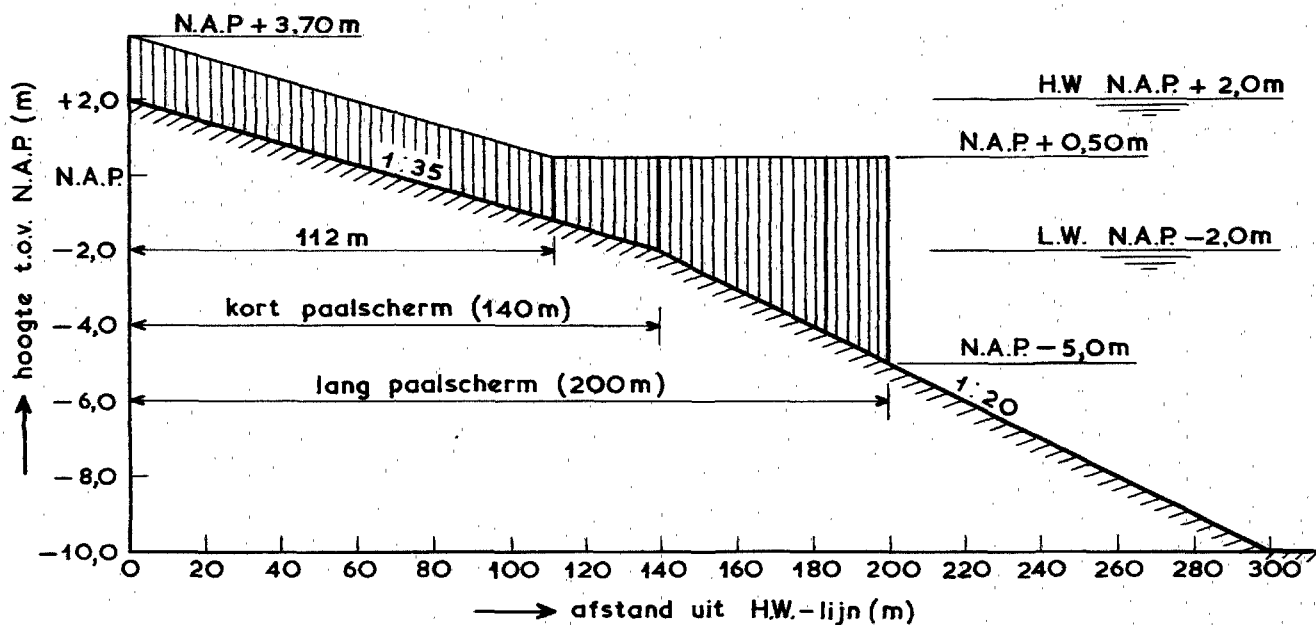
relatief gesommeerd zandtransport in het prototype

korte en lange paalschermen

golfhoogte 0 m, 0,5 m, 1,0 m en 2,0 m

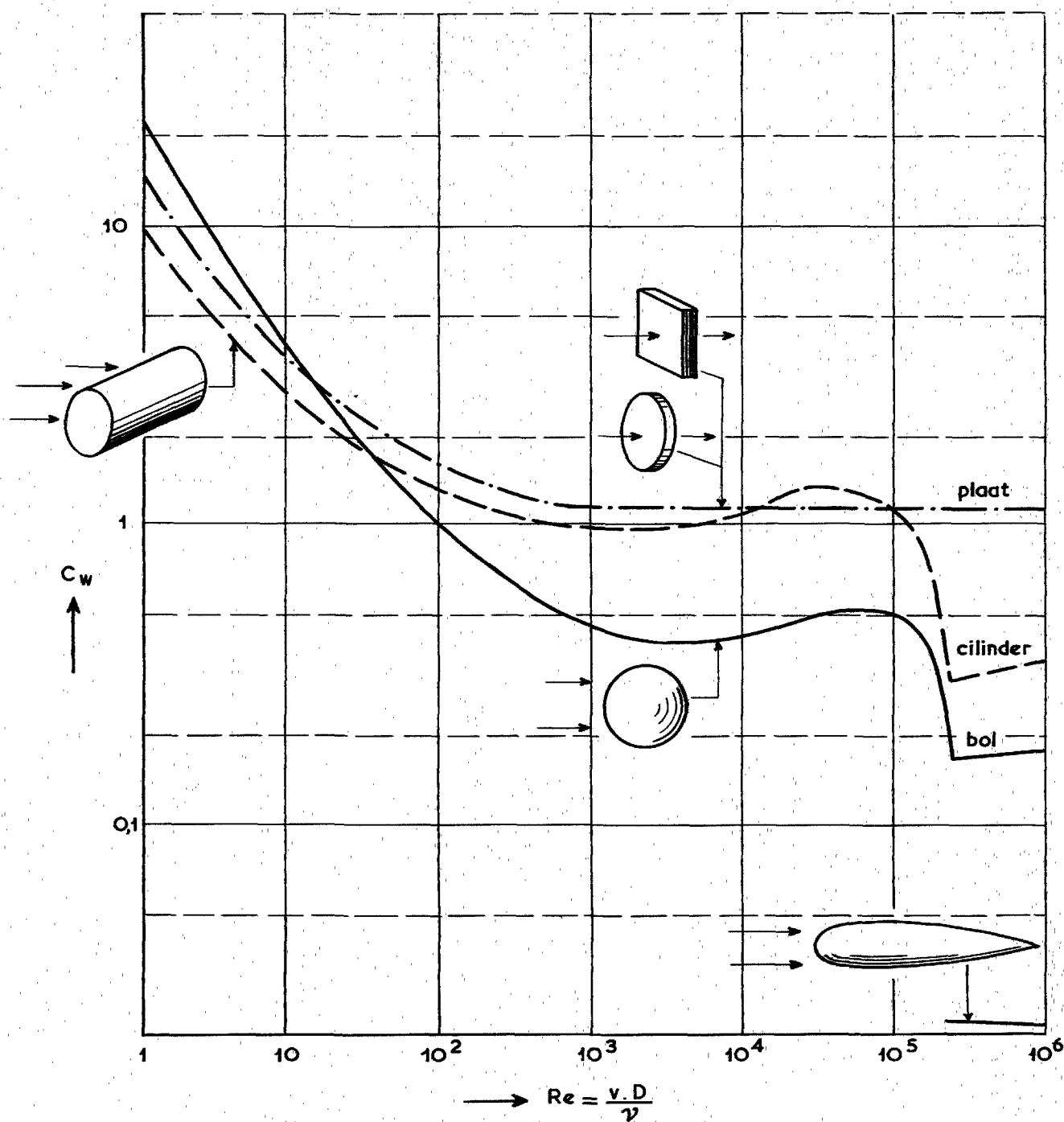


VOORBEELDEN LANGS- EN DWARSTRANSPOORT

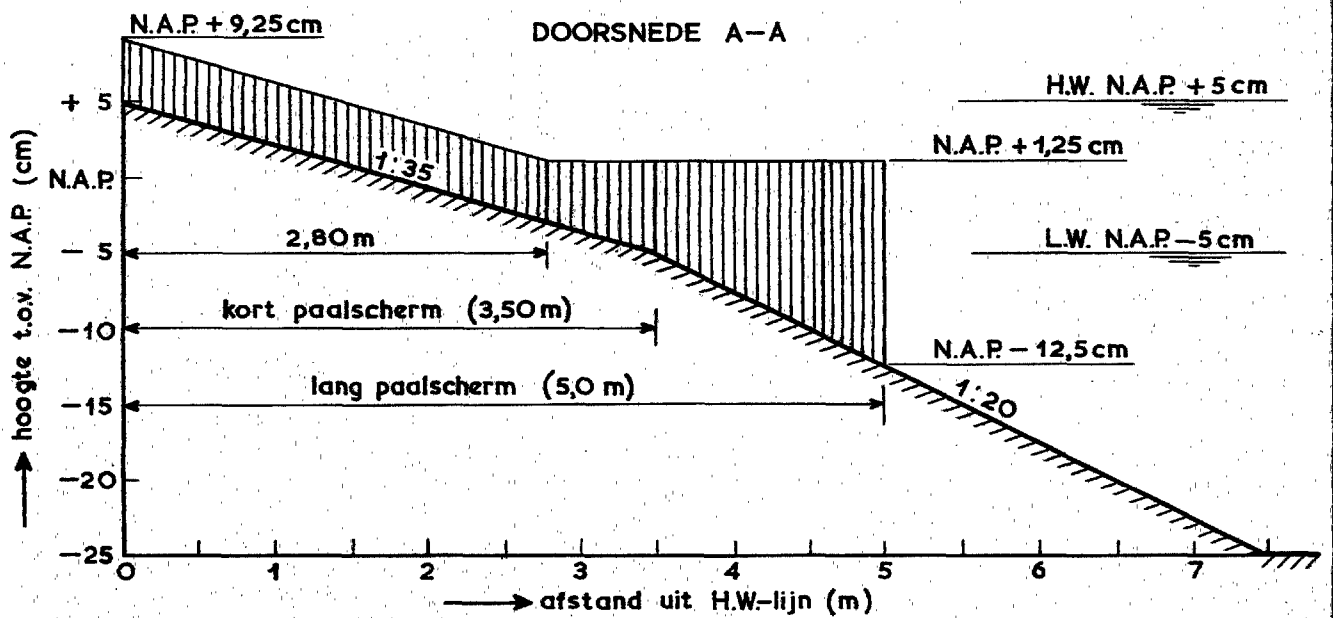
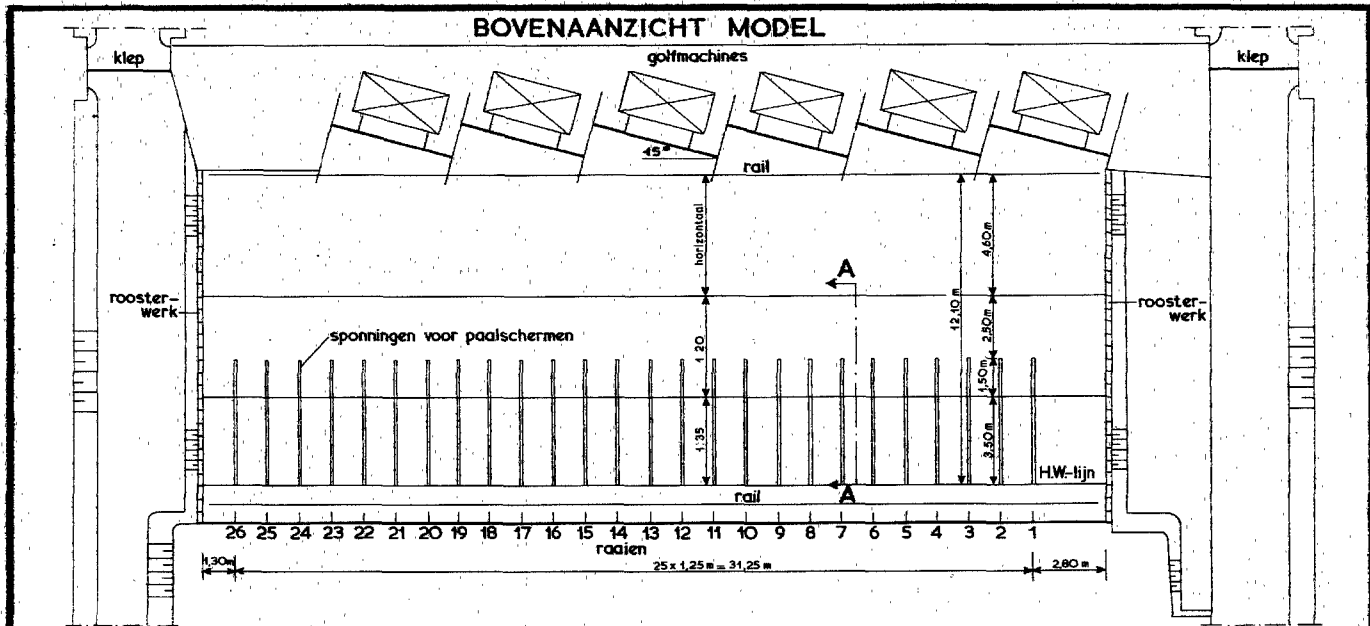


	afstand vanaf H.W.-lijn (m)				
	0	112	140	184	200
hoogte van de bodem t.o.v. N.A.P. (m)	+2,00	-1,20	-2,00	-4,20	-5,00
bodemhelling	1:35		1:20		
afstand palen h.o.h.(m)	0,50		0,70	0,70-1,00	
diameter palen (m)	0,25				

**GESCHEMATISEERD KUSTPROFIEL
MET PAALSCHERM**

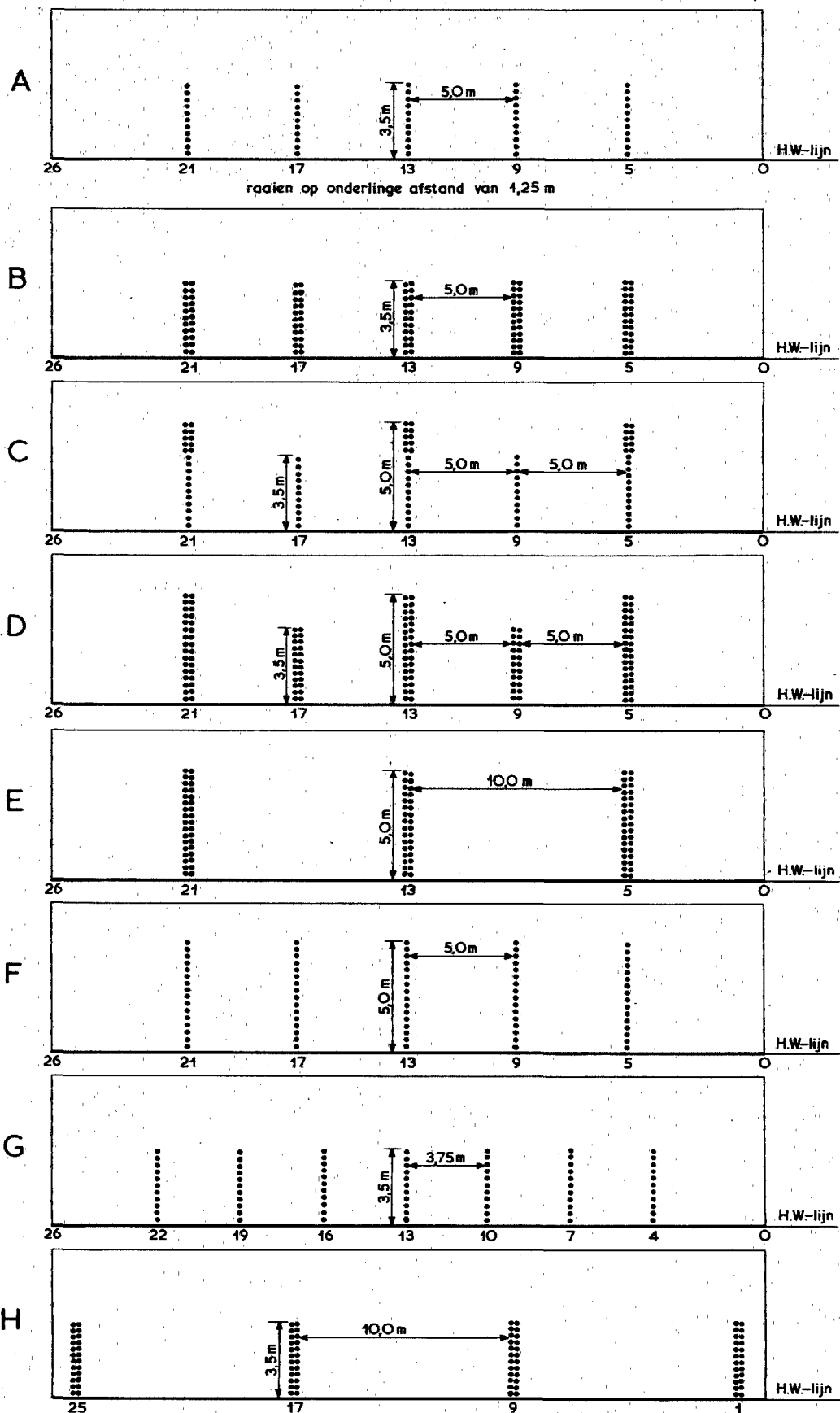


WEERSTANDSCOËFFICIËNT C_w VOOR
VERSCHILLENDE VOORWERPEN

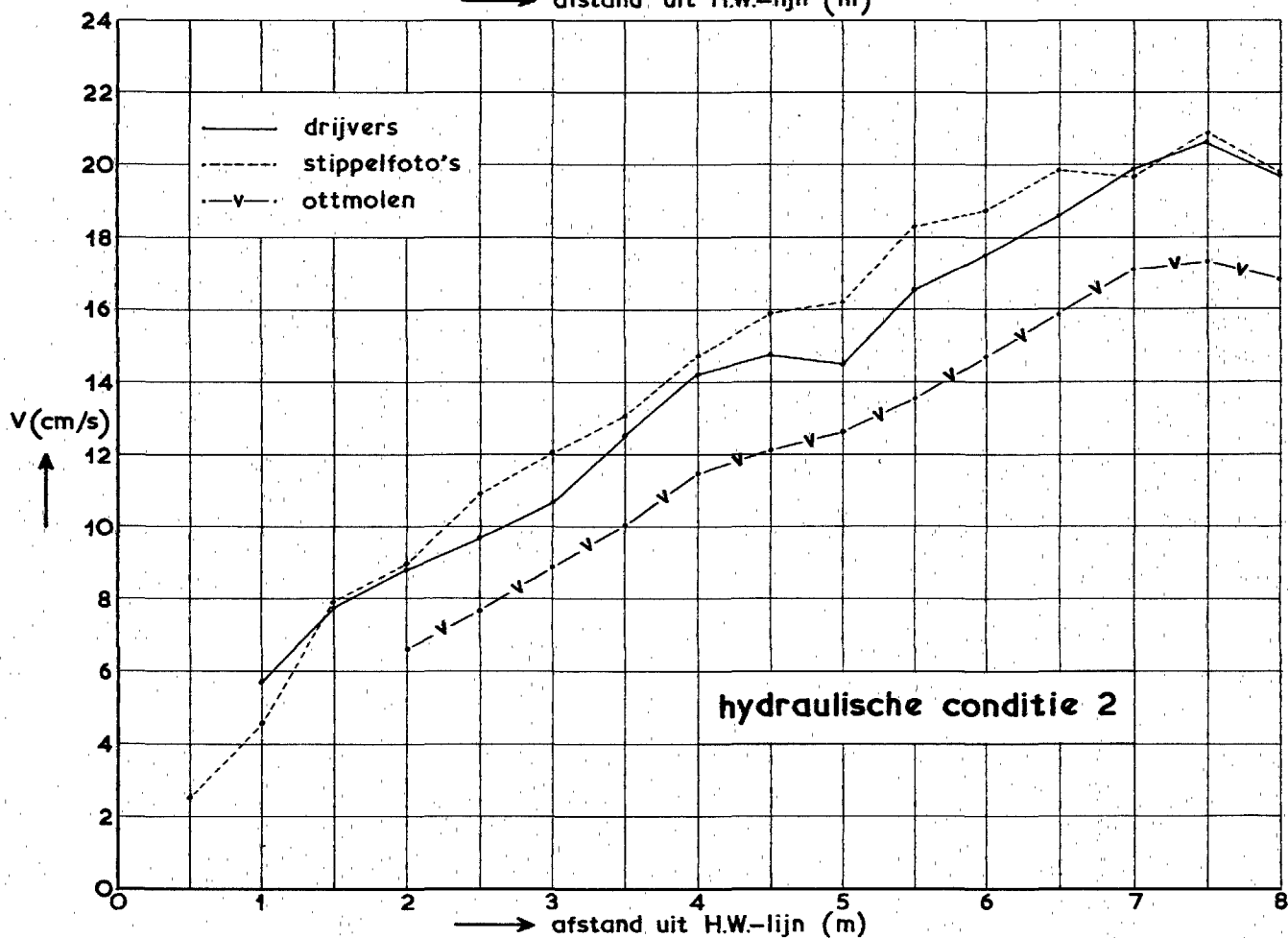
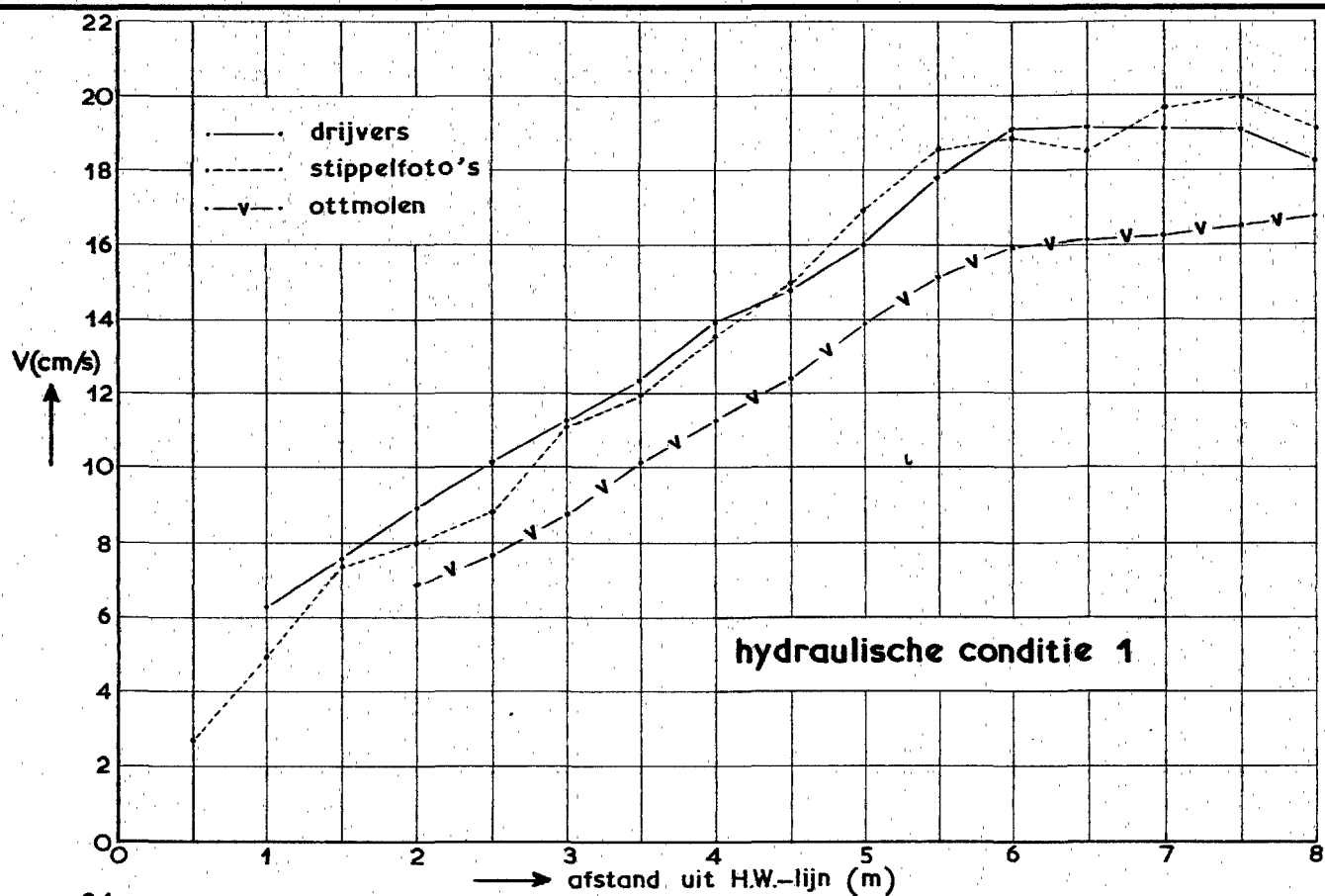


	afstand vanaf H.W.-lijn (m)					
	0	1,50	2,80	3,50	4,60	5,0
waterdiepte bij H.W. (cm)	0	4,3	8,0	10,0	15,5	17,5
bodemhelling	1:35		1:20			
afstand palen h.o.h. (cm)	1,2		1,75		1,75-2,5	
aantal palen/m	83		57		57-40	
openingspercentage tussen de palen	50		66		66-76	
hoogte van de palen boven de bodem (cm)	4,25		4,25-6,25		6,25-13,75	
paalhoogte (H.W.) waterdiepte	>1		1-0,53		0,625-0,785	

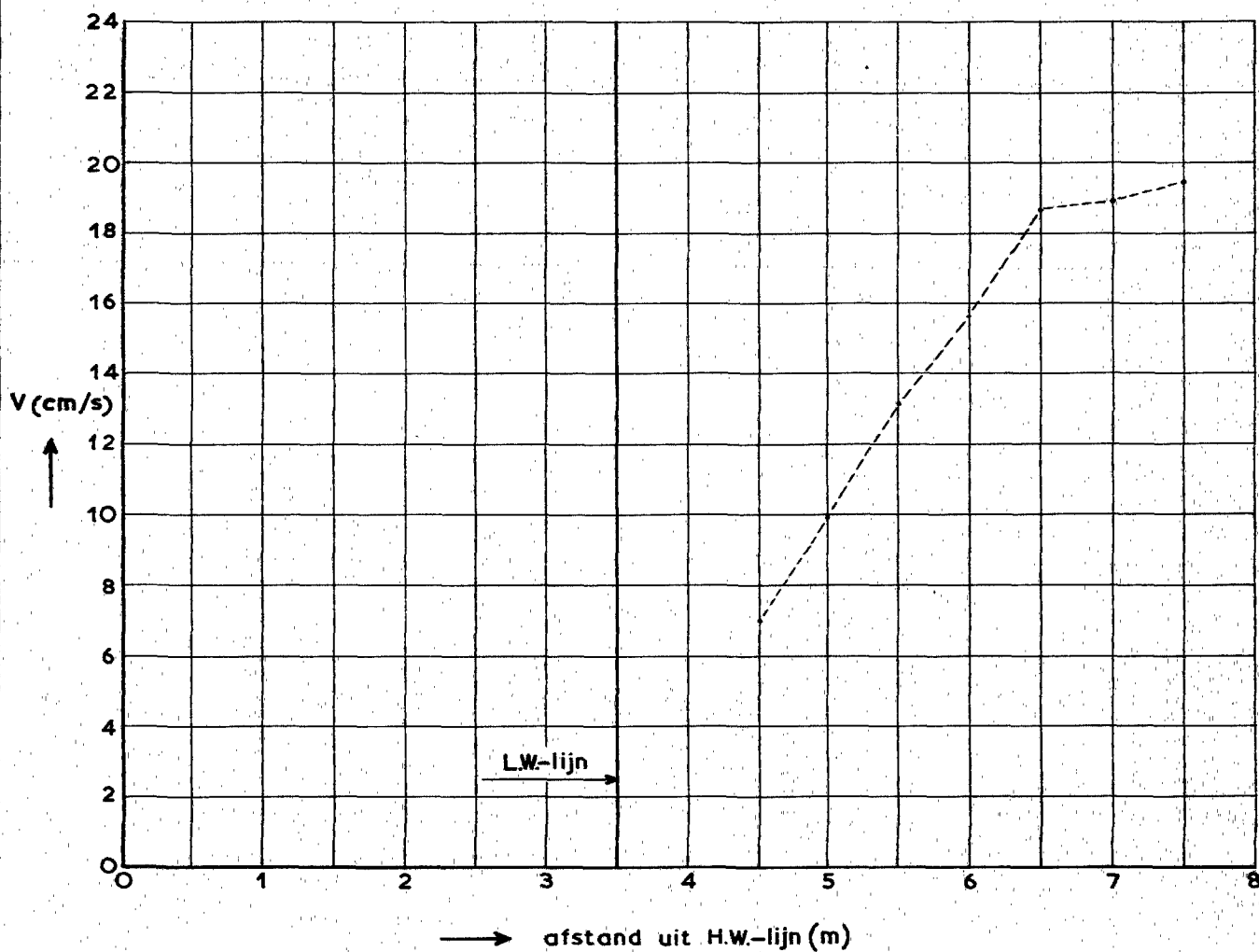
**OVERZICHT MODEL MET KUSTPROFIEL
EN PAALSCHERM**



ONDERZOCHE PAALSCHERMCONFIGURATIES



IJ KING; SNELHEIDSVERDELING
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIES 1 EN 2



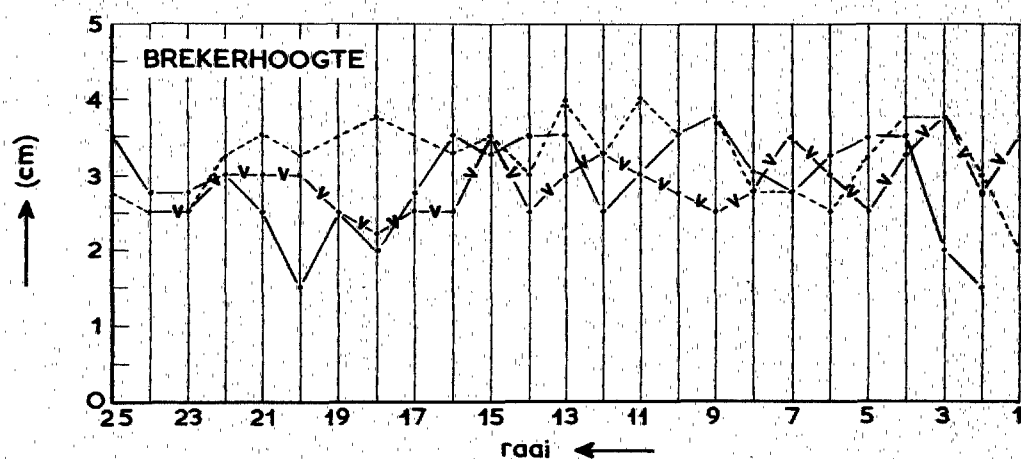
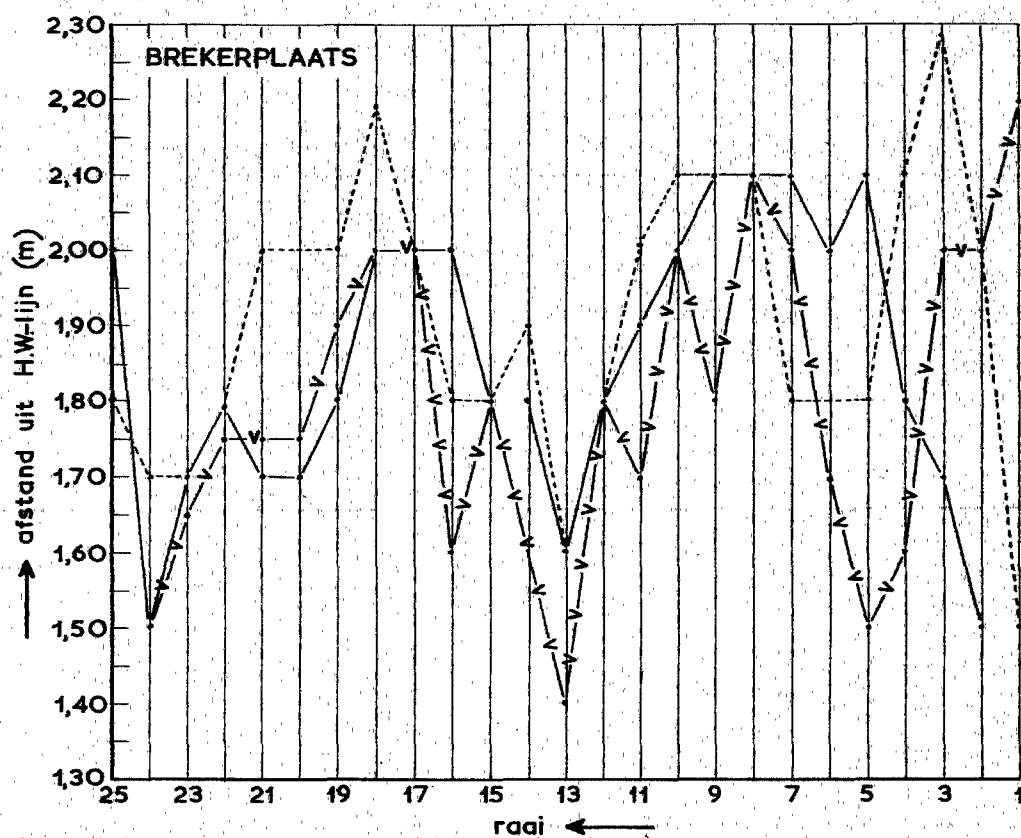
meting met stippelfoto's

UKING; SNELHEIDSVERDELING BIJ
HYDRAULISCHE CONDITIE 6

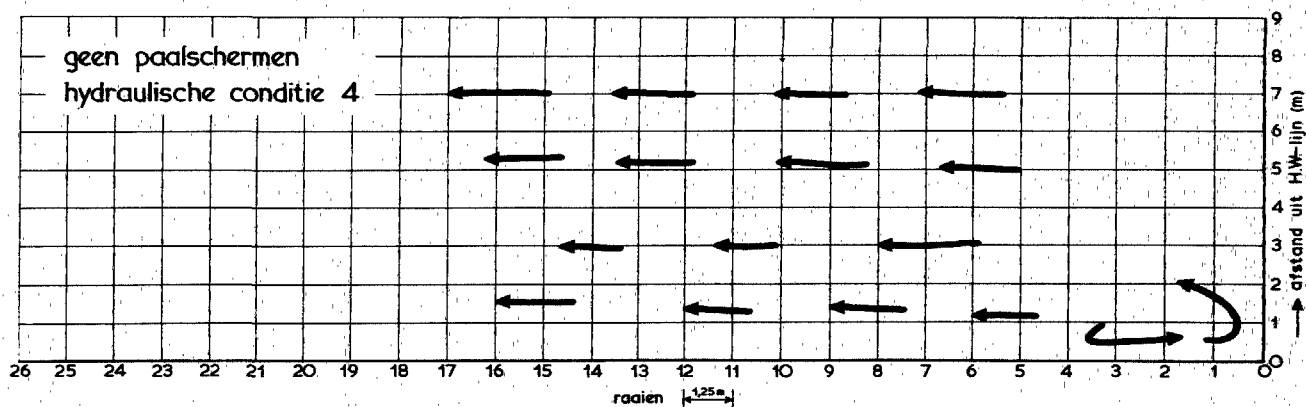
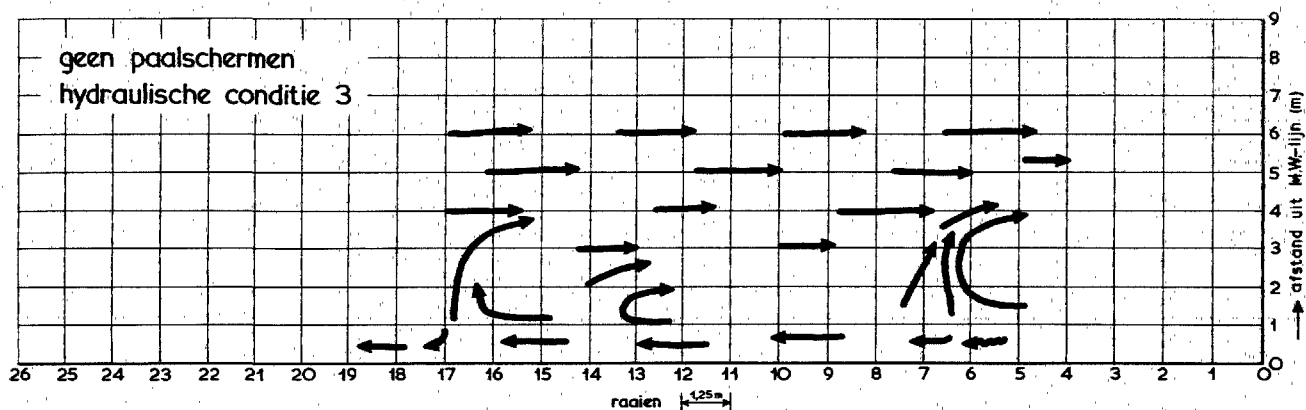
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 7



IJKING; BREKERPLAATS EN BREKERHOOGTE
 BIJ HYDRAULISCHE CONDITIES 3, 4 EN 5



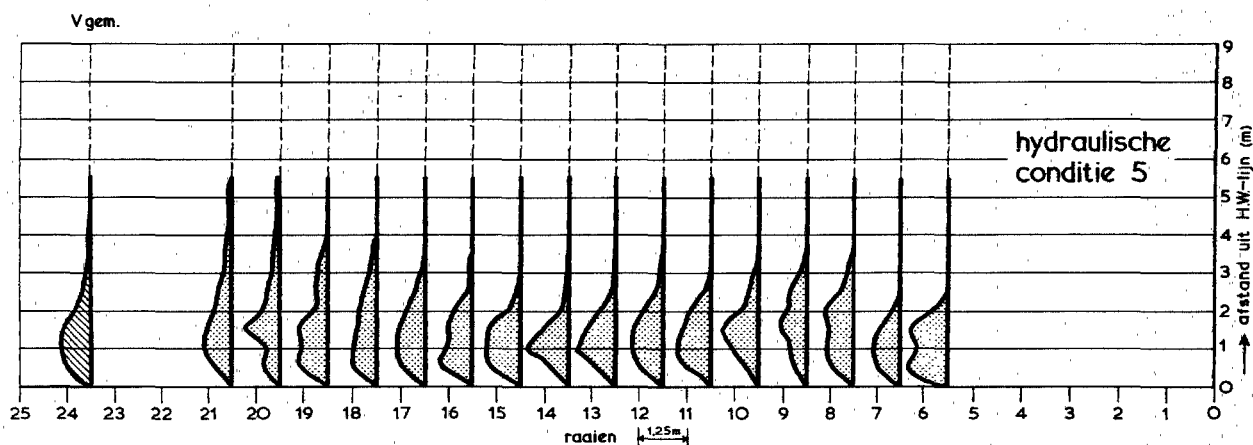
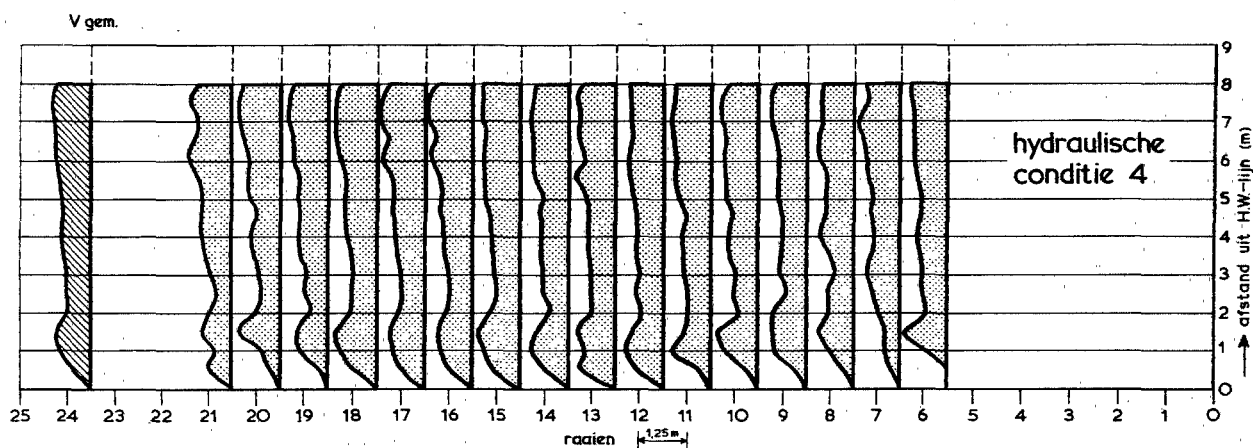
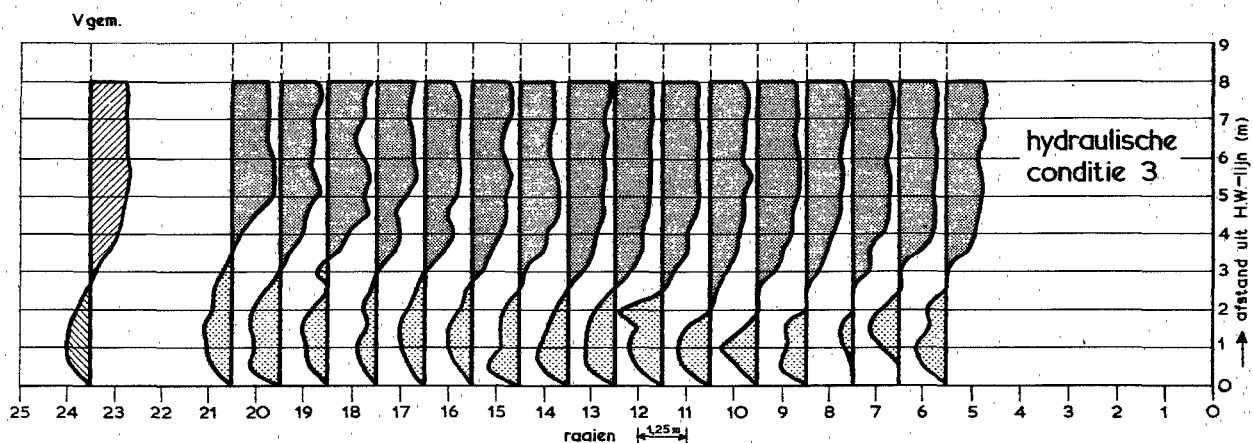
meting met kleurstof

UKING; STROOMBEELDSCHETSEN BIJ
HYDRAULISCHE CONDITIES 3 EN 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 9



— 20 cm/s

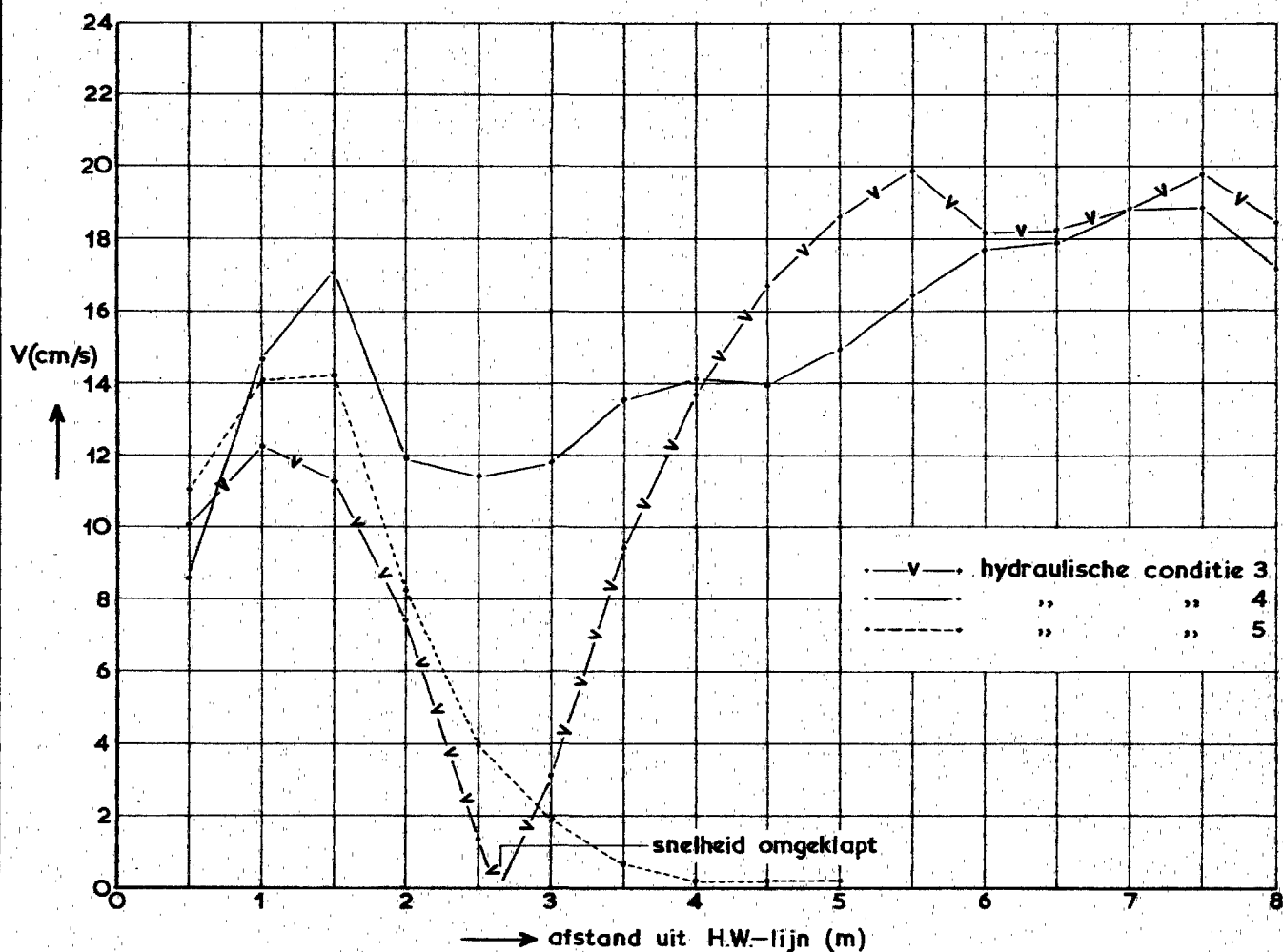
meting met drijvers

UKING; SNELHEIDSPROFIELEN BIJ
HYDRAULISCHE CONDITIES 3,4 EN 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

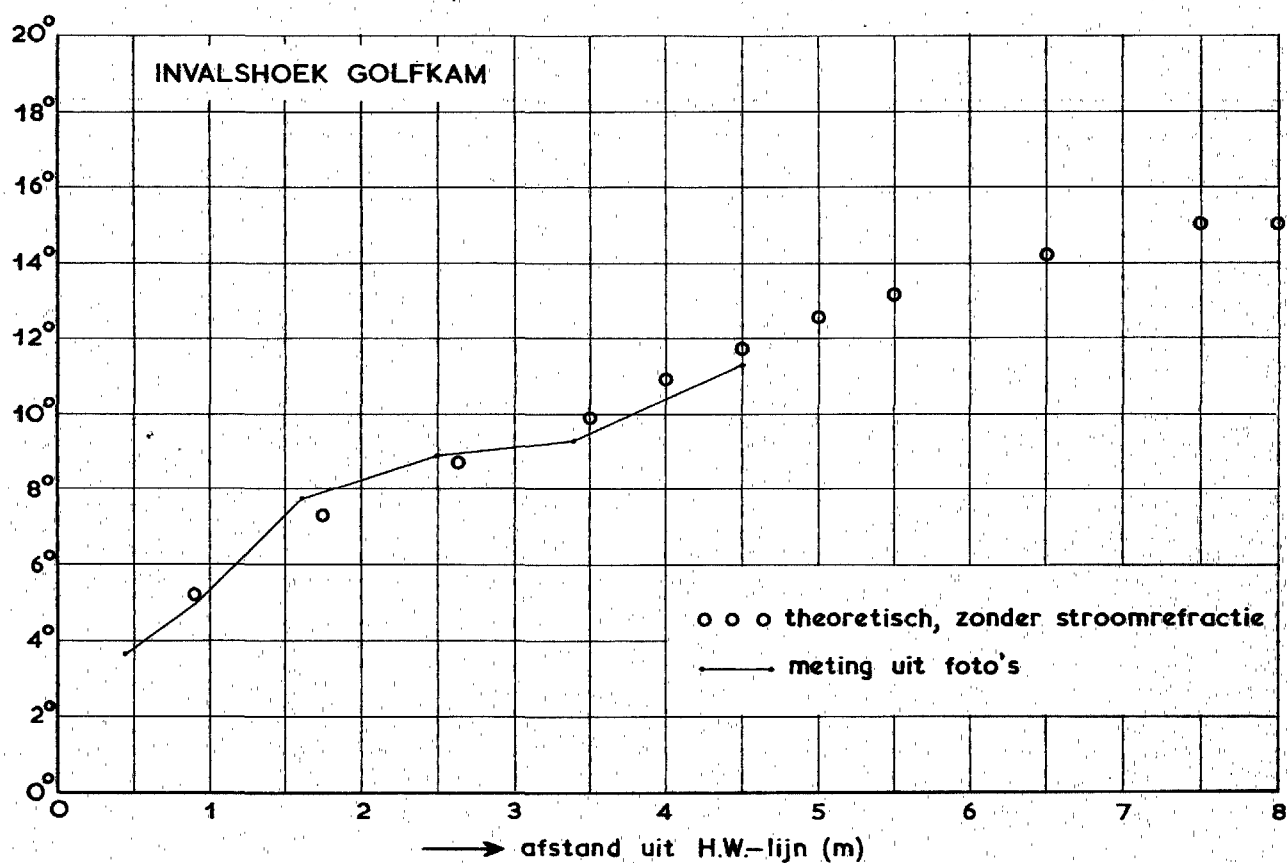
M. 1148

FIG. 10

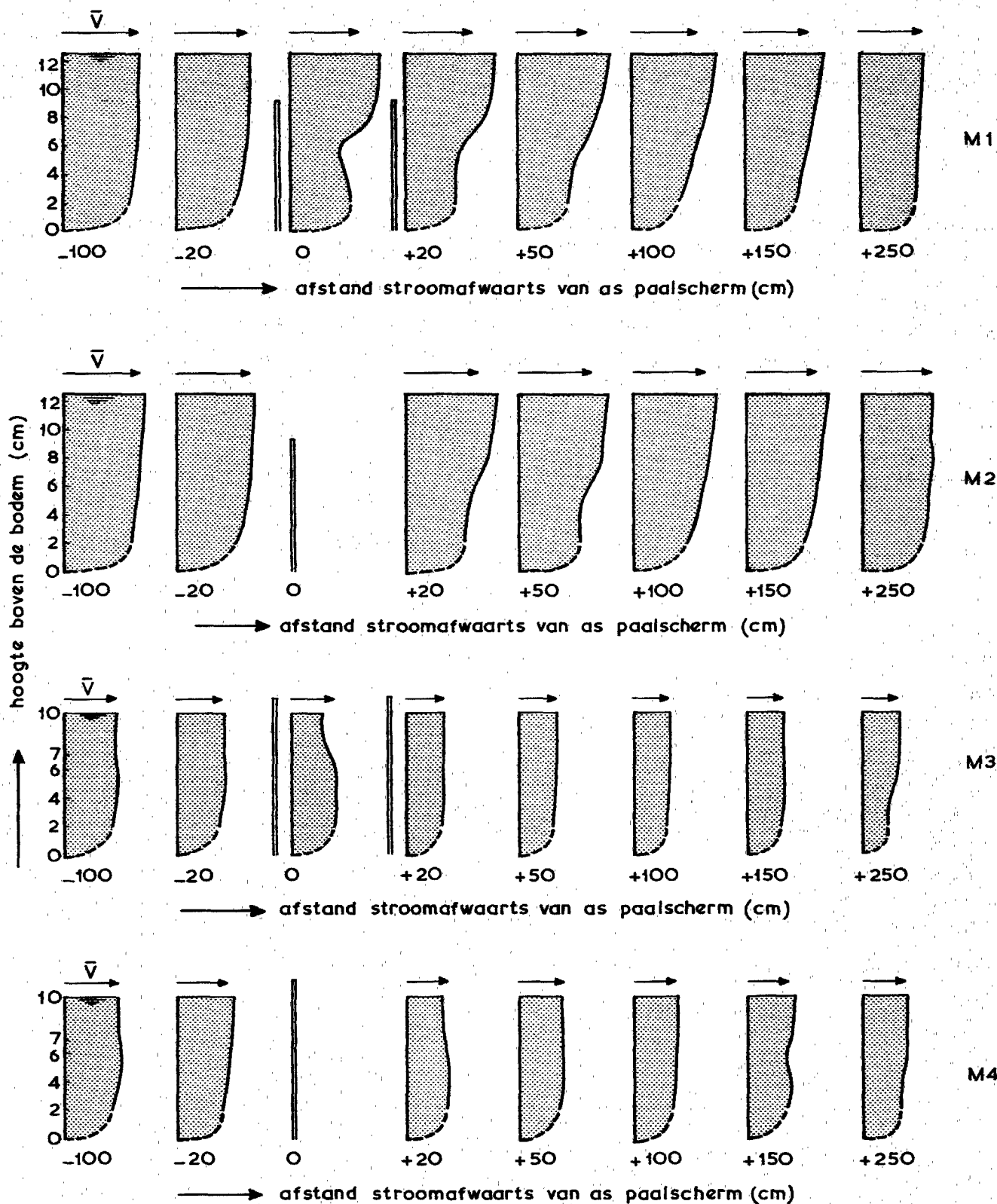


meting met drijvers

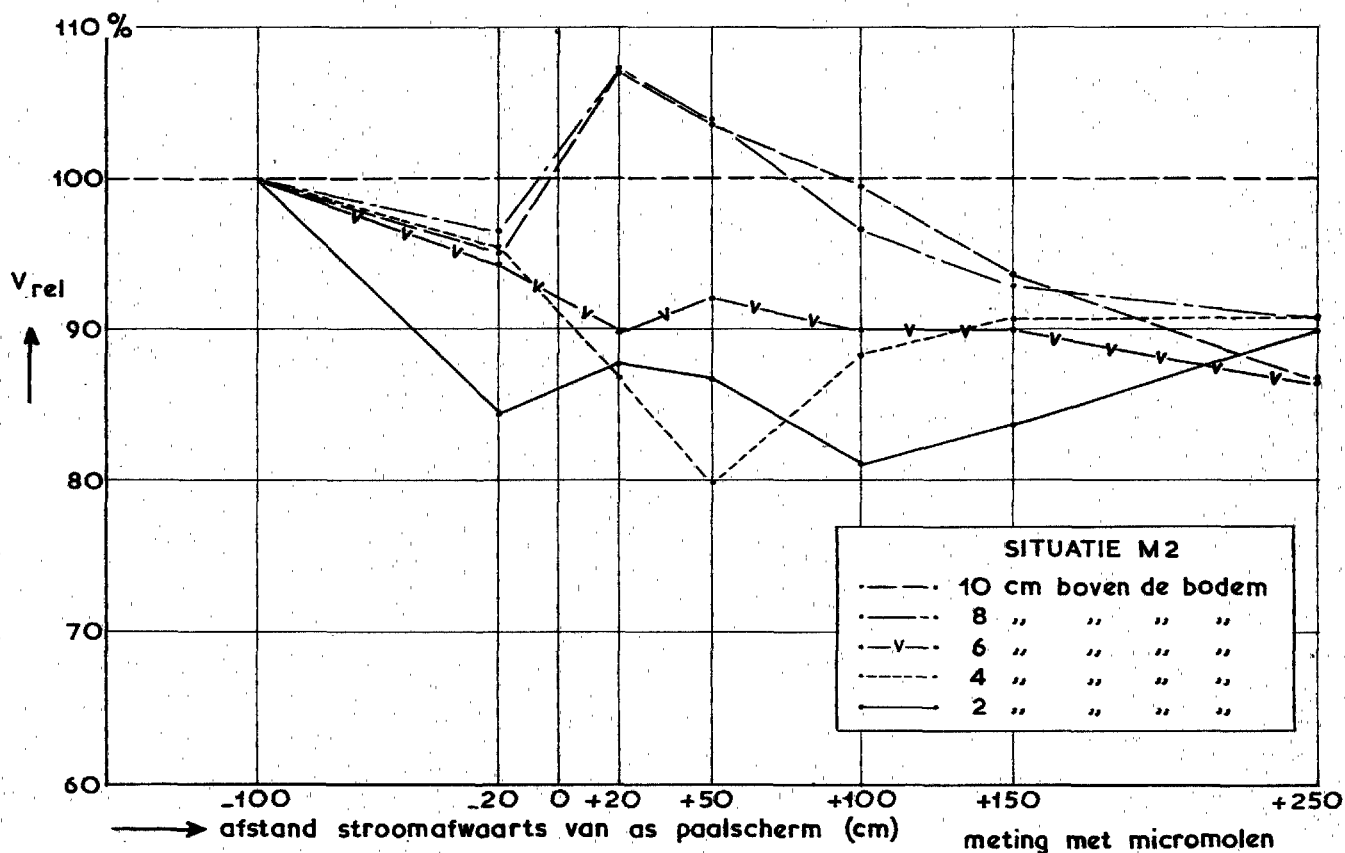
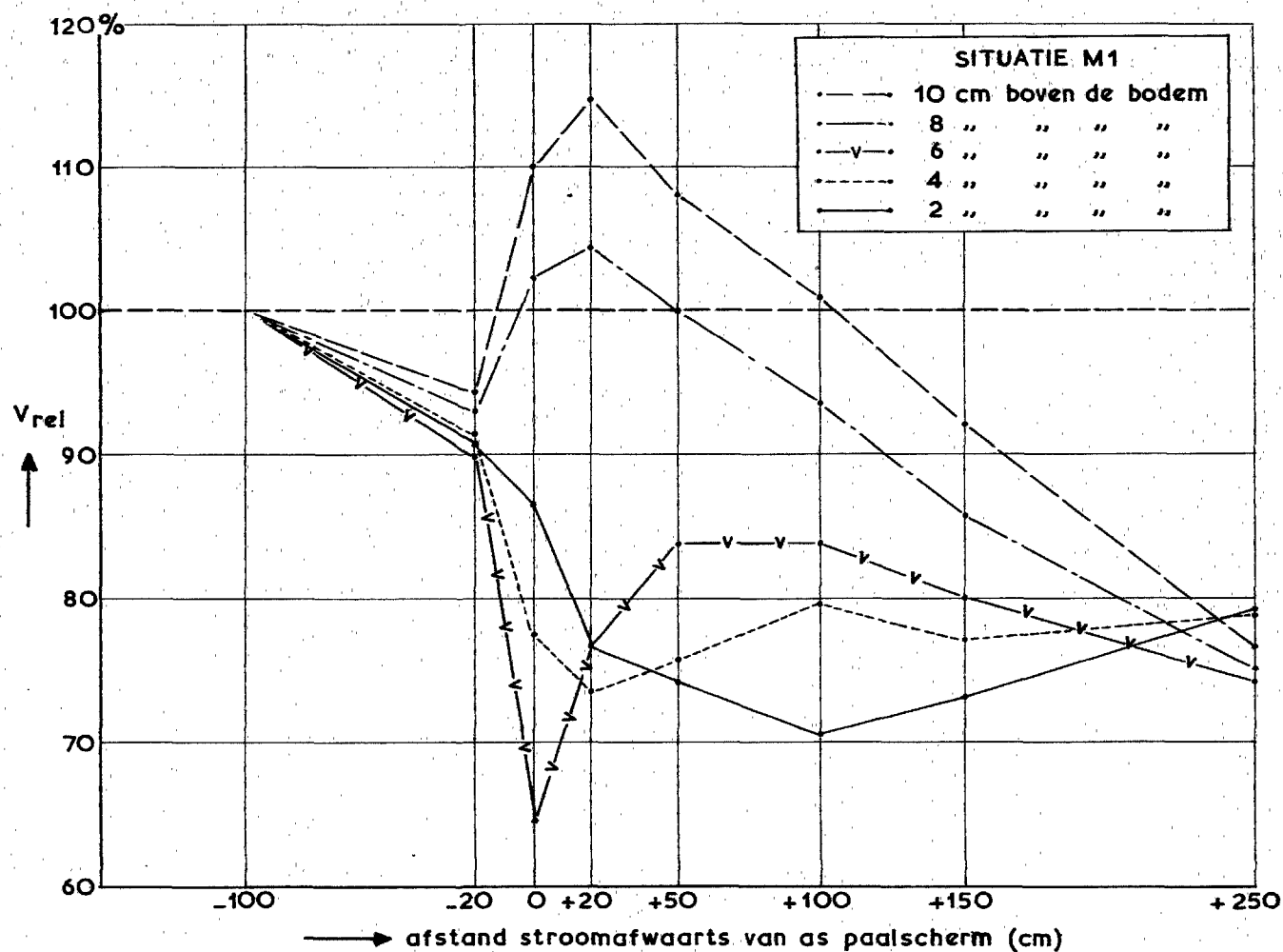
UKING; SNELHEIDSVERDELING BIJ
HYDRAULISCHE CONDITIES 3, 4 EN 5



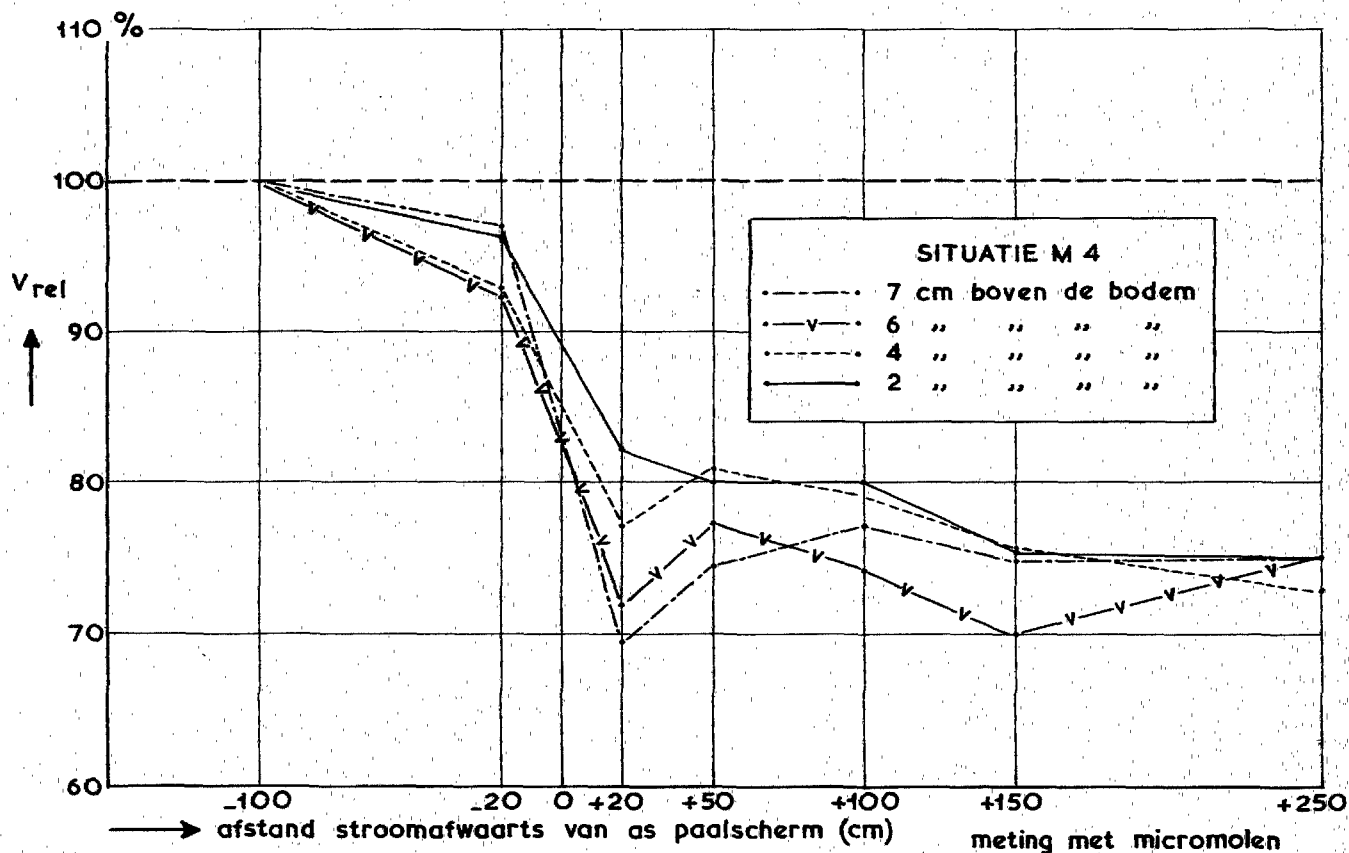
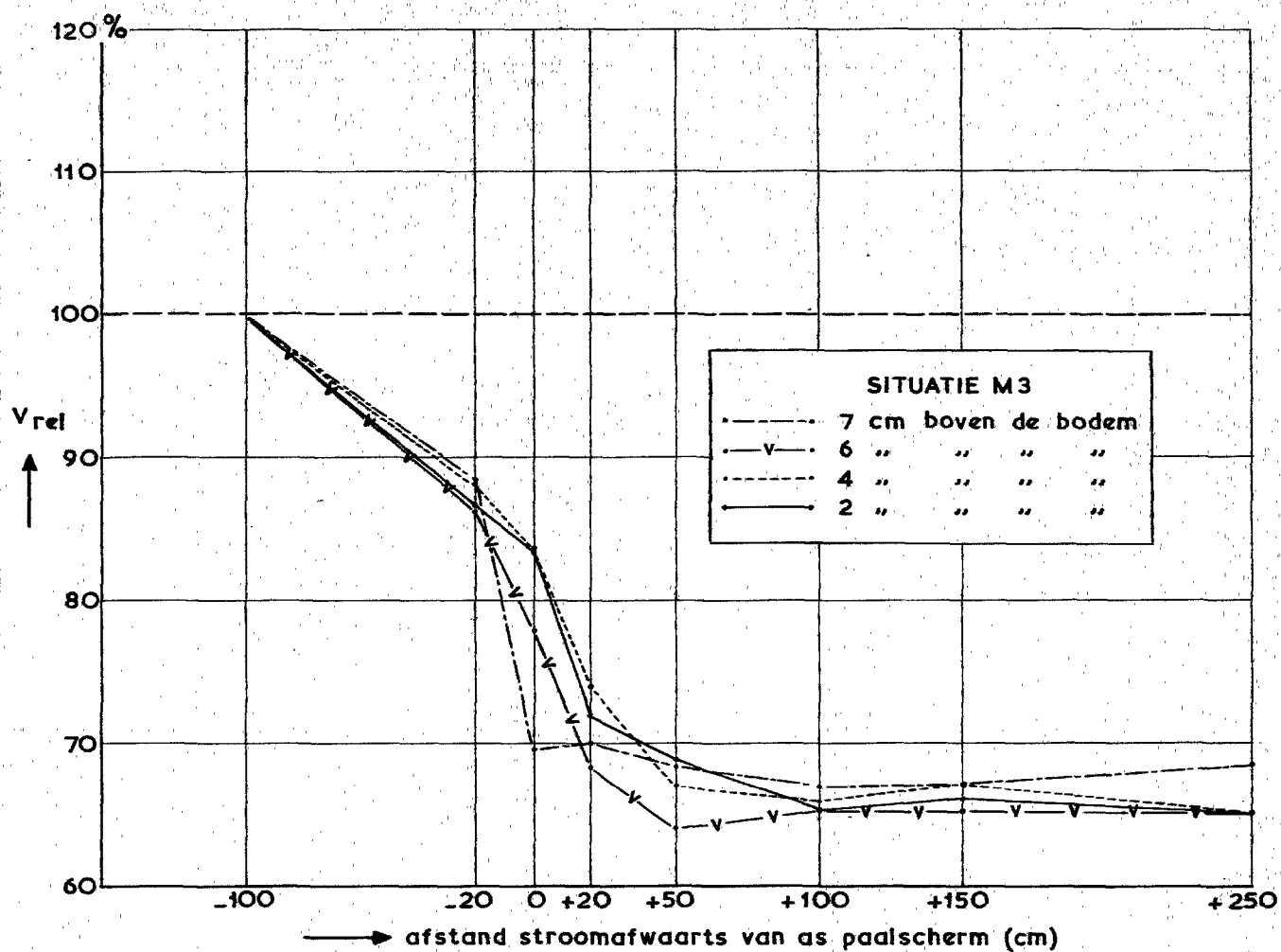
**UKING: INVALSHOEK GOLFKAM
 BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 5**



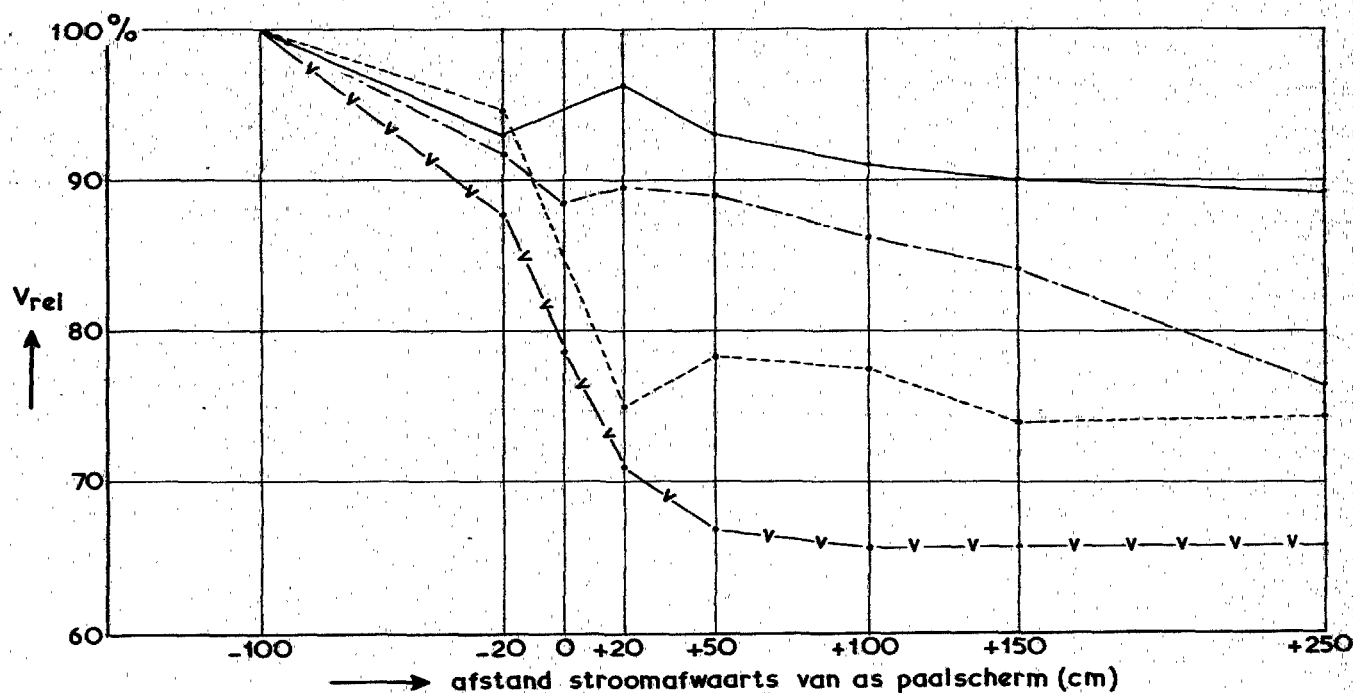
SNELHEIDSVERTICALIEN BIJ SOLITAIR PAALSCHERM



RELATIEVE SNELHEDEN BIJ SOLITAIR
PAALSCHERM, M1 EN M2



**RELATIEVE SNELHEDEN BIJ SOLITAIR
PAALSCHERM, M3 EN M4**

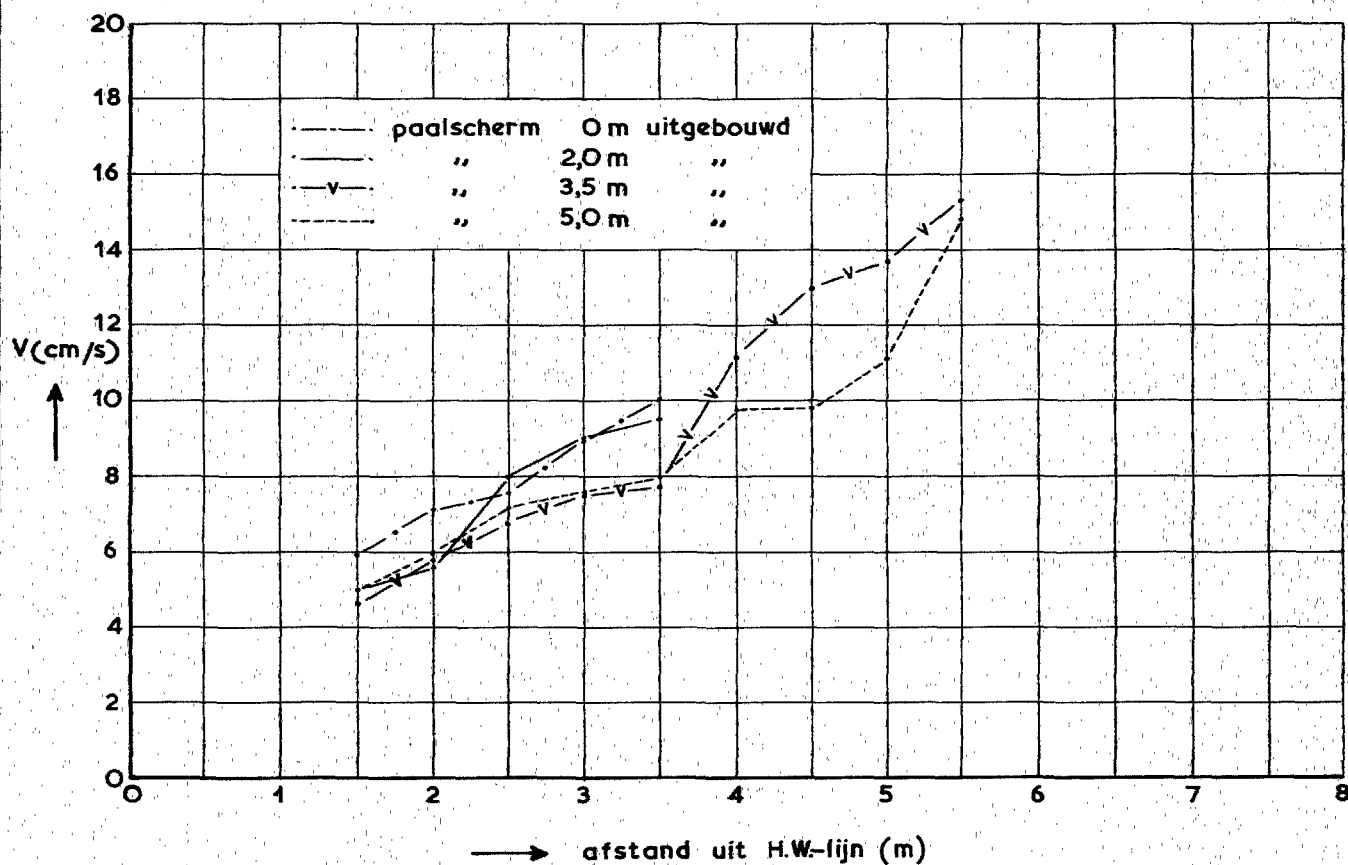
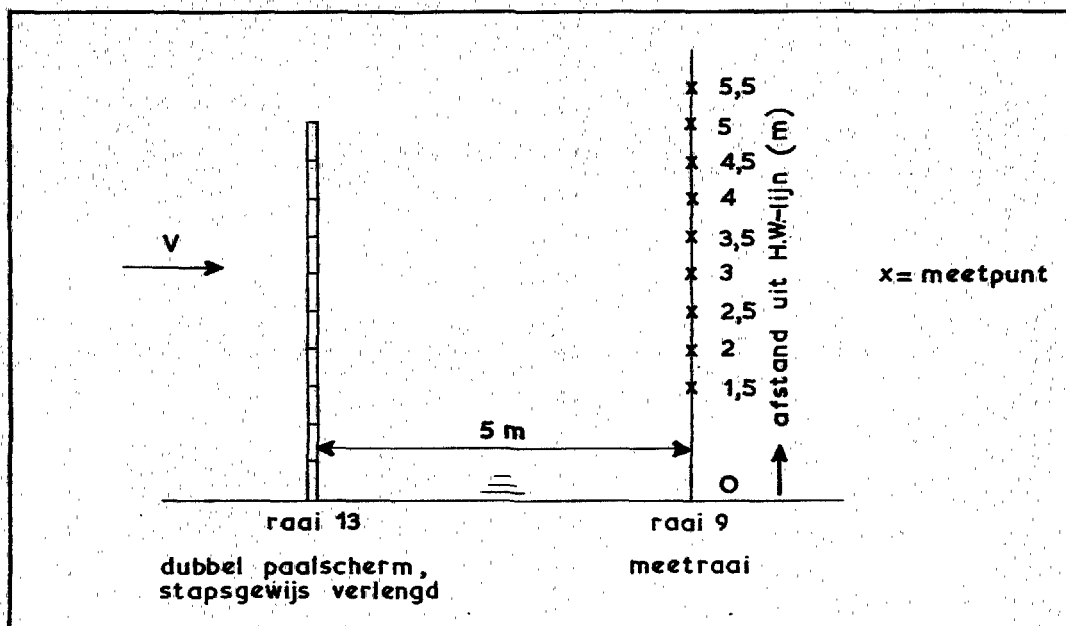


- M1 Dubbel paalscherm, overstroomd
- M2 Enkel paalscherm, overstroomd
- v-v- M3 Dubbel paalscherm, niet overstroomd
- x-x- M4 Enkel paalscherm, niet overstroomd

meting met micromolen

RELATIEVE GEMIDDELDE SNELHEDEN
BIJ SOLITAIR PAALSCHERM

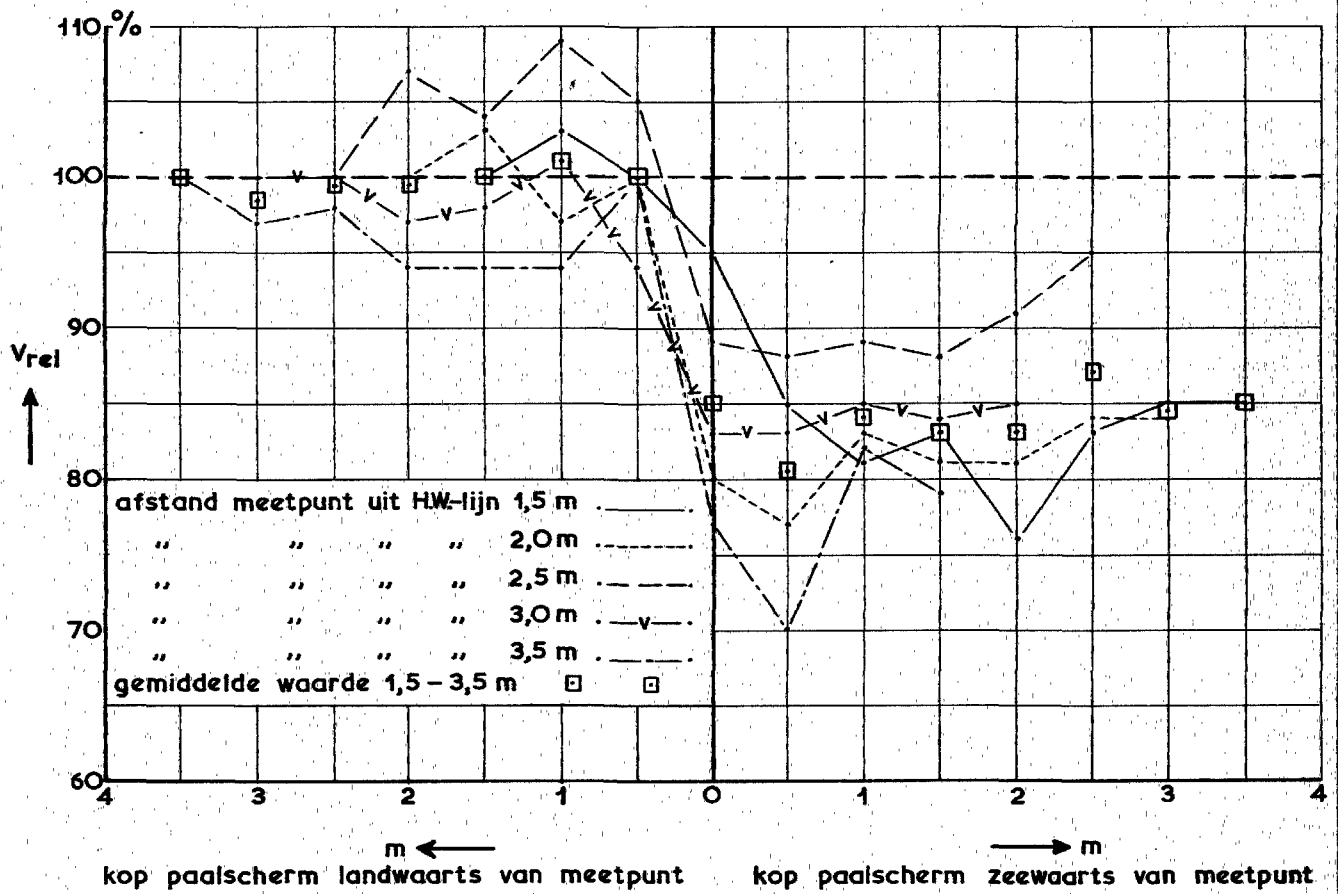
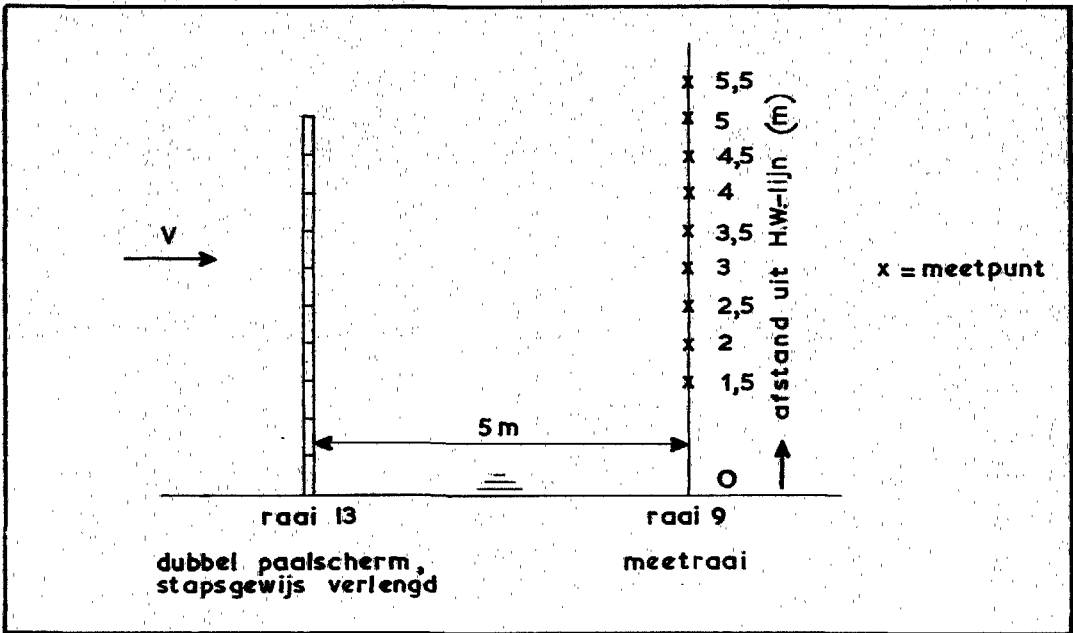
OVERZICHT SITUATIE



meting met micromolen

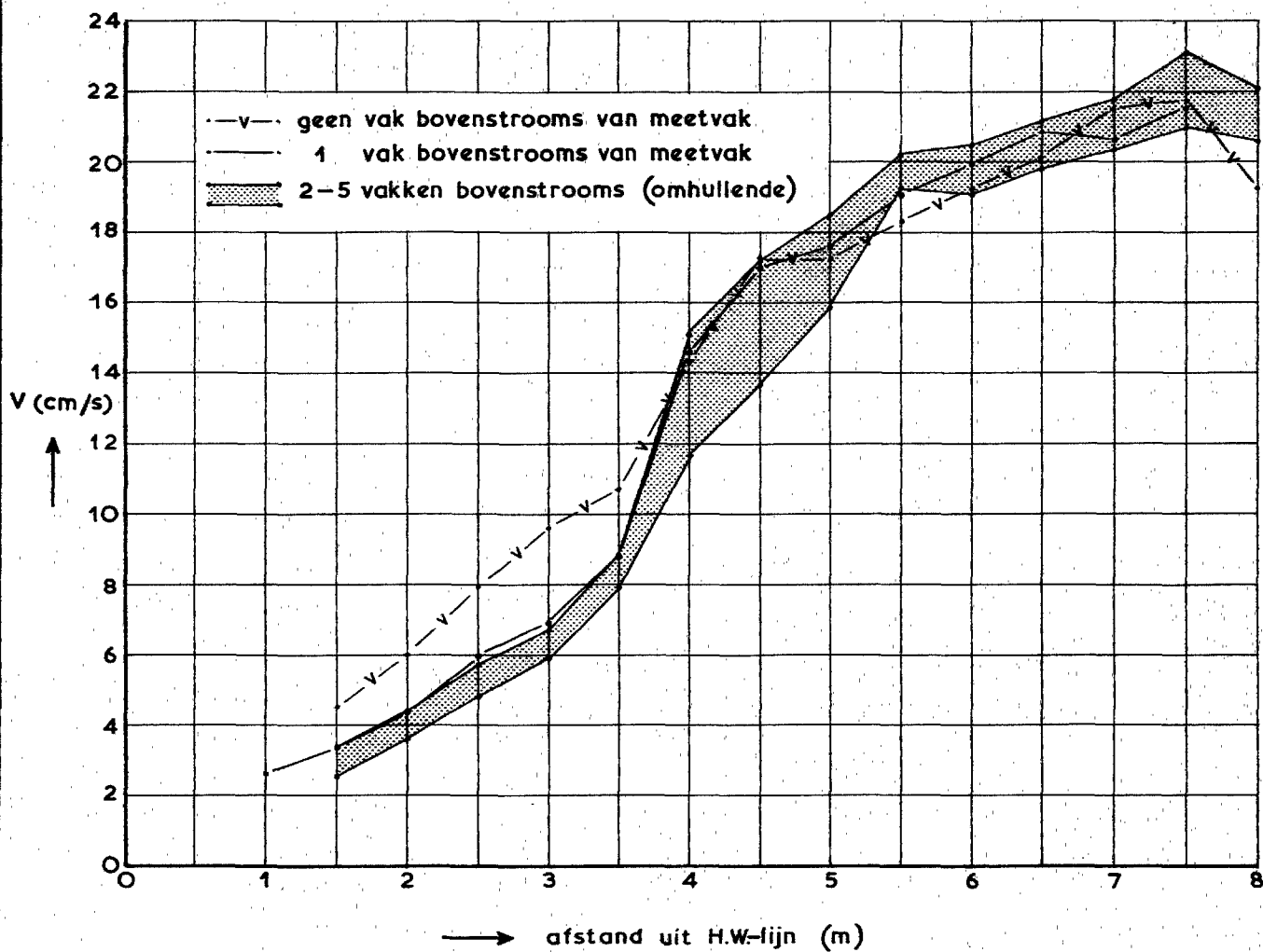
SNELHEIDSVERDELING BIJ VERSCHILLENDE
PAALSCHERMLENGTEN

OVERZICHT SITUATIE



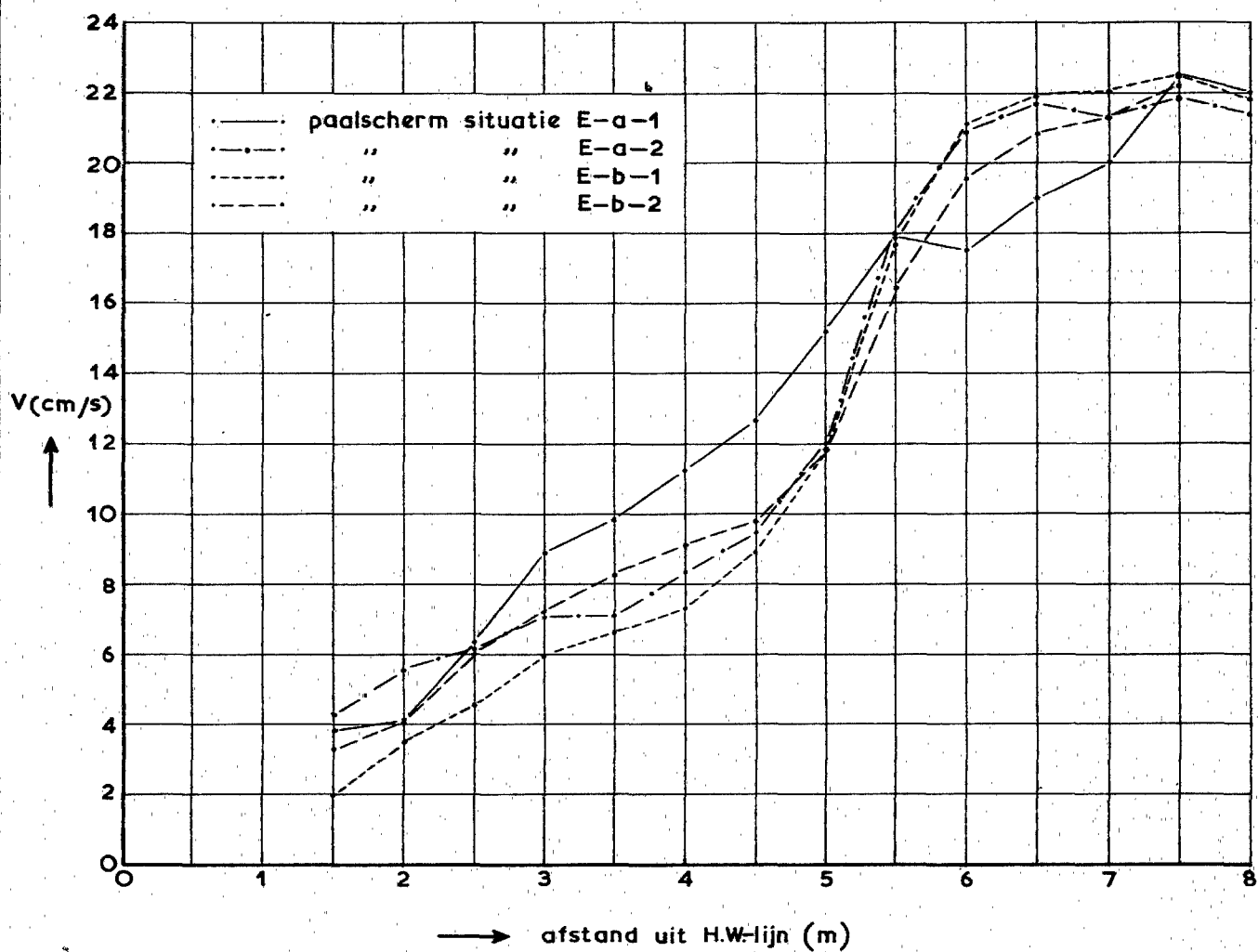
meting met micromolen

RELATIEVE SNELHEIDSVERDELING BIJ
VERSCHILLENDE PAALSCHERMLENGTEN



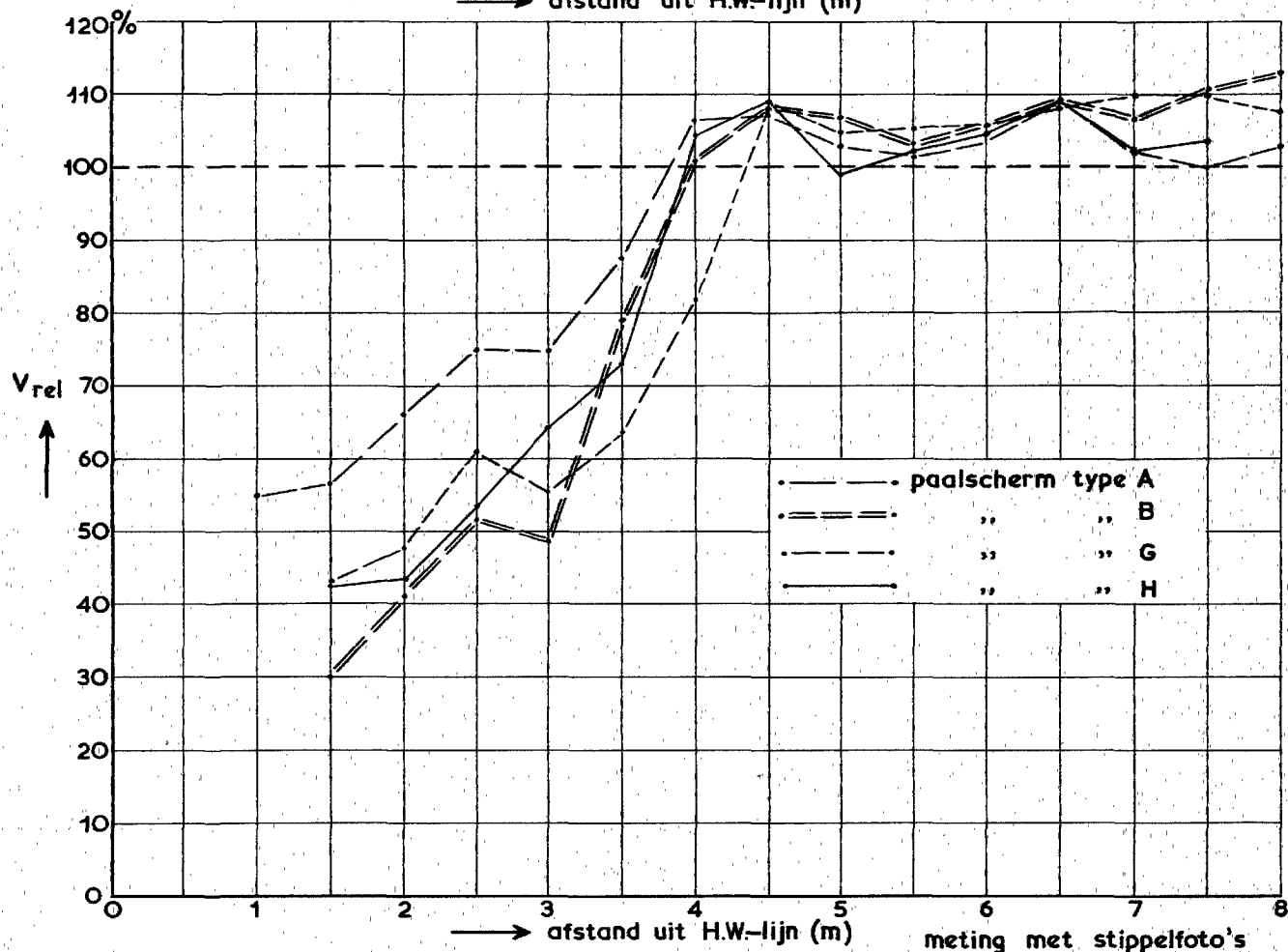
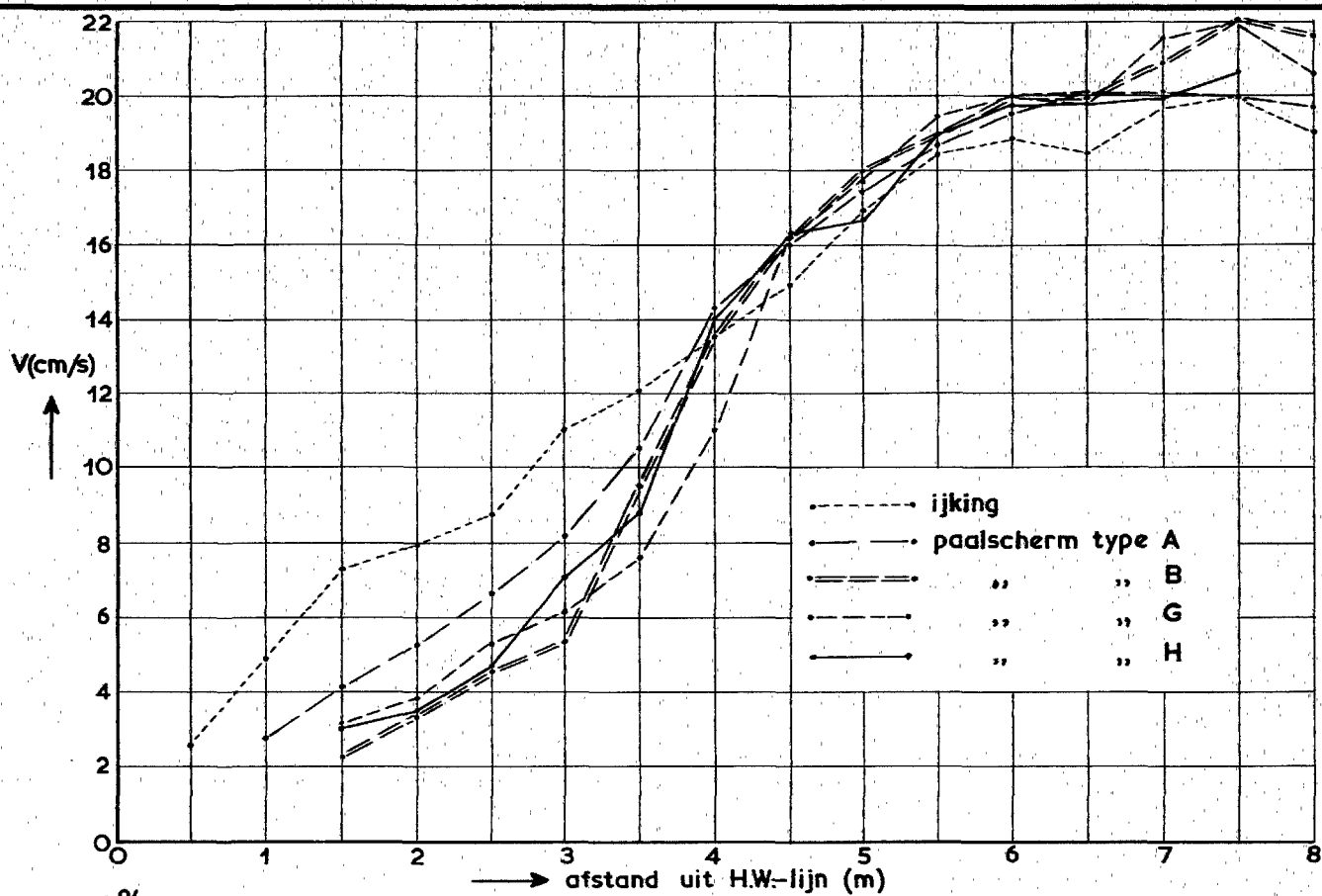
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE G-a; SNELHEIDVERDELING
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1

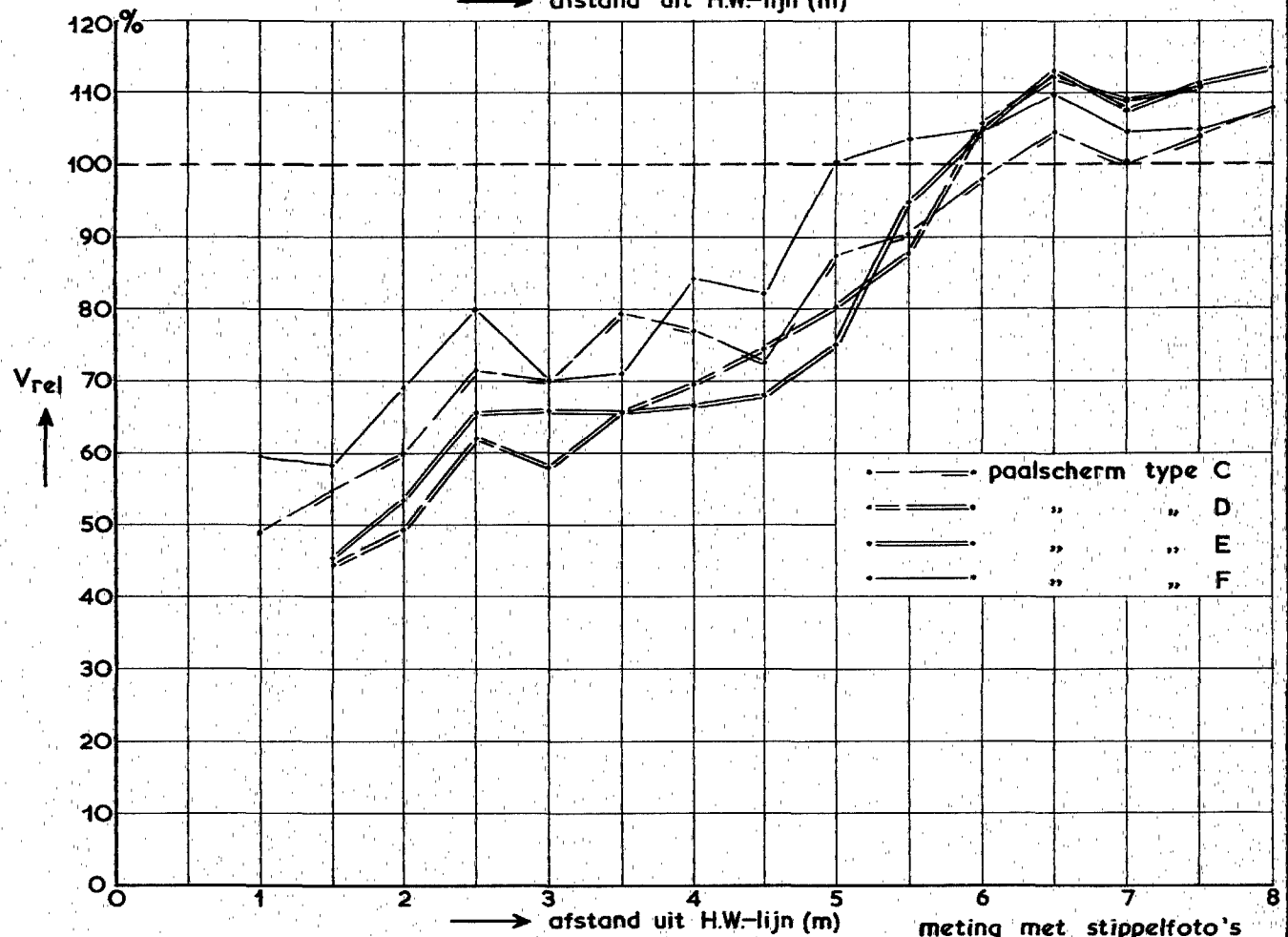
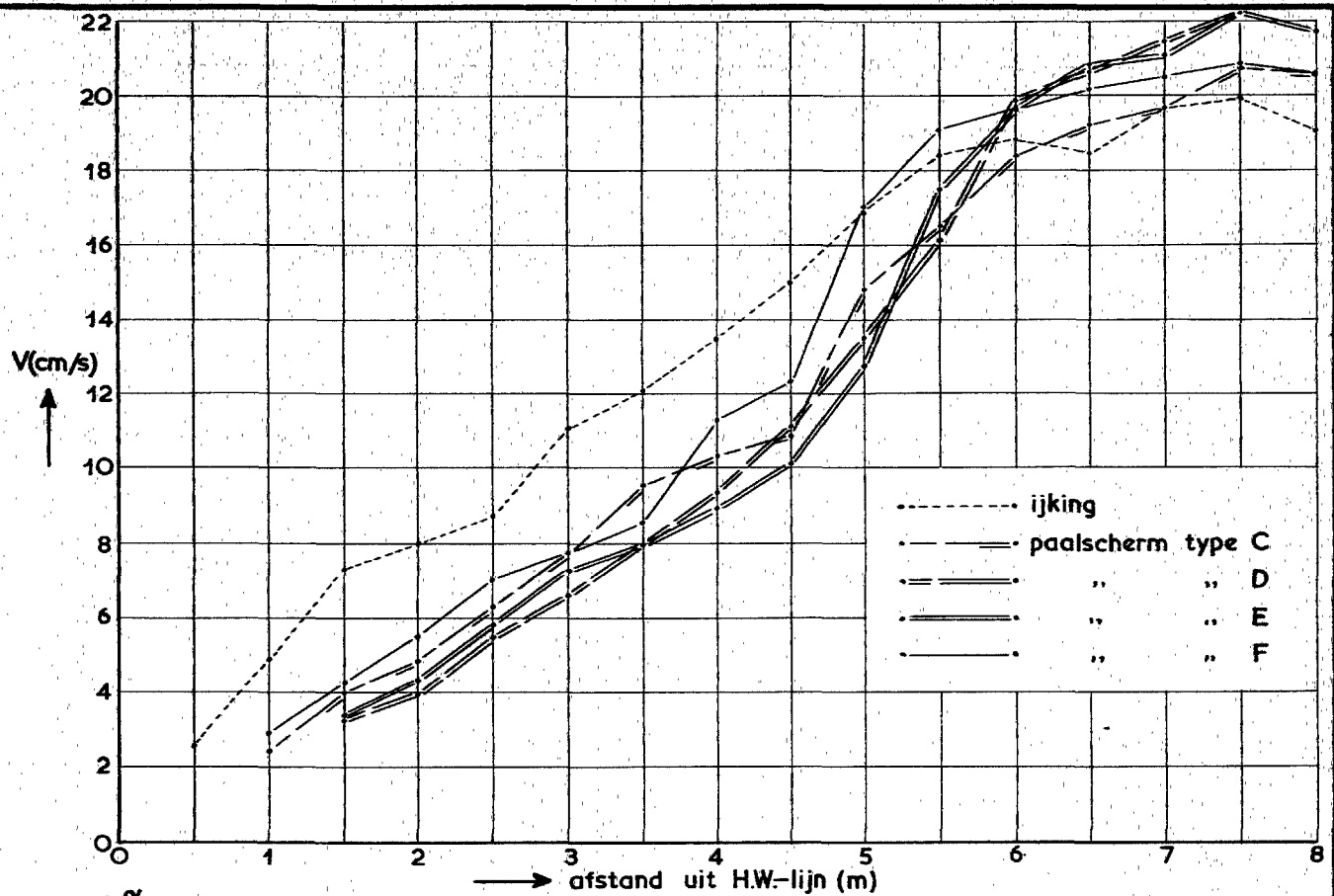


meting met stippelfoto's

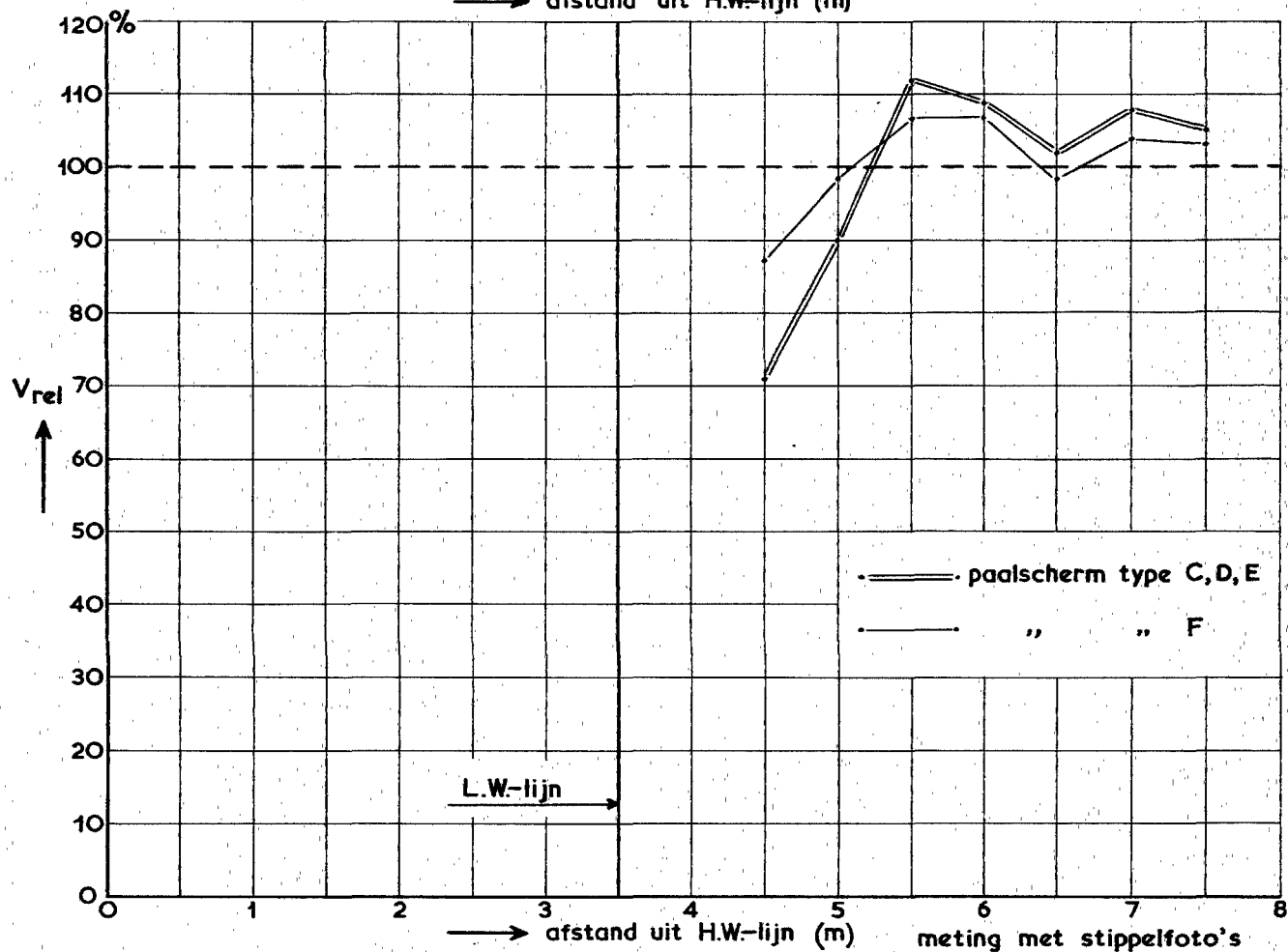
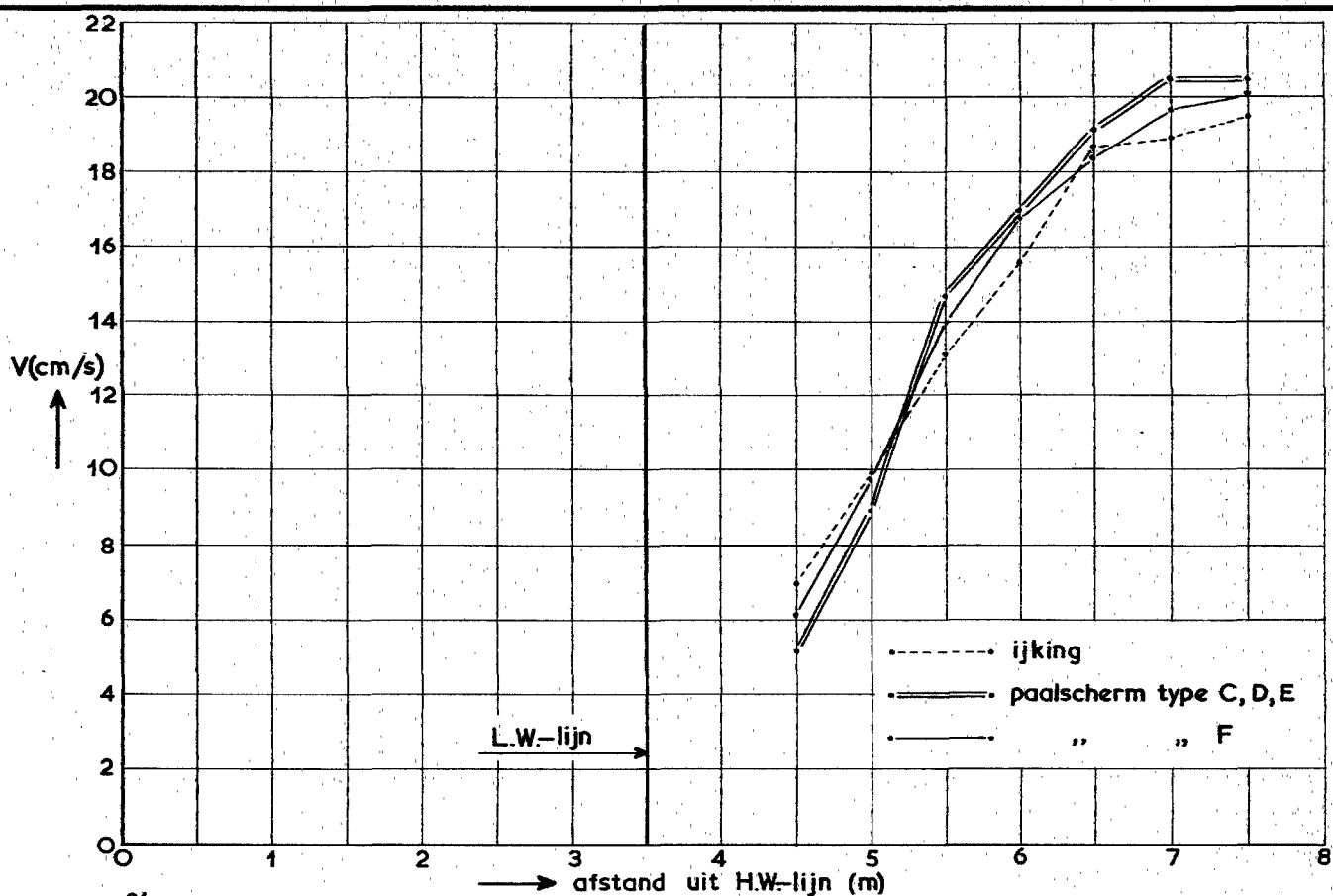
PAALSCHERM TYPE E; SNELHEIDSVERDELING
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1



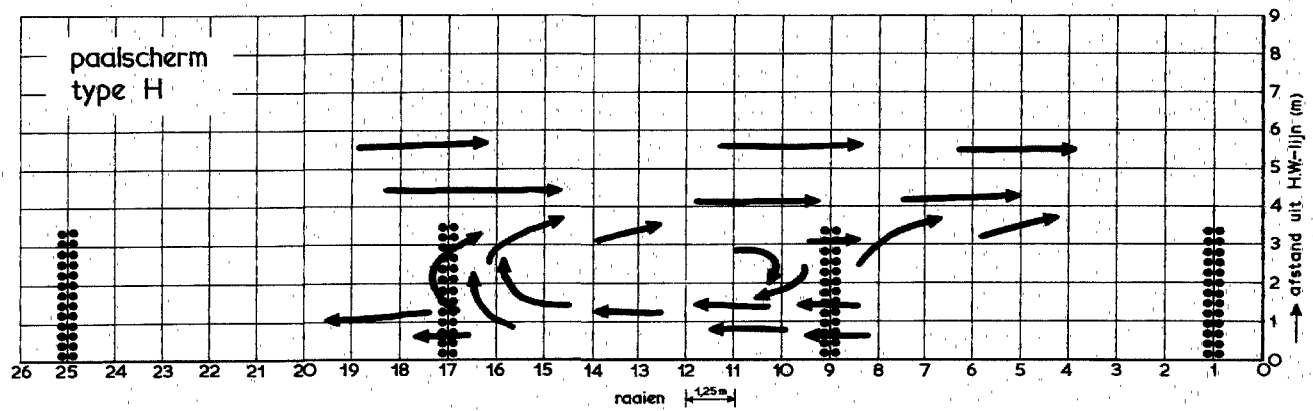
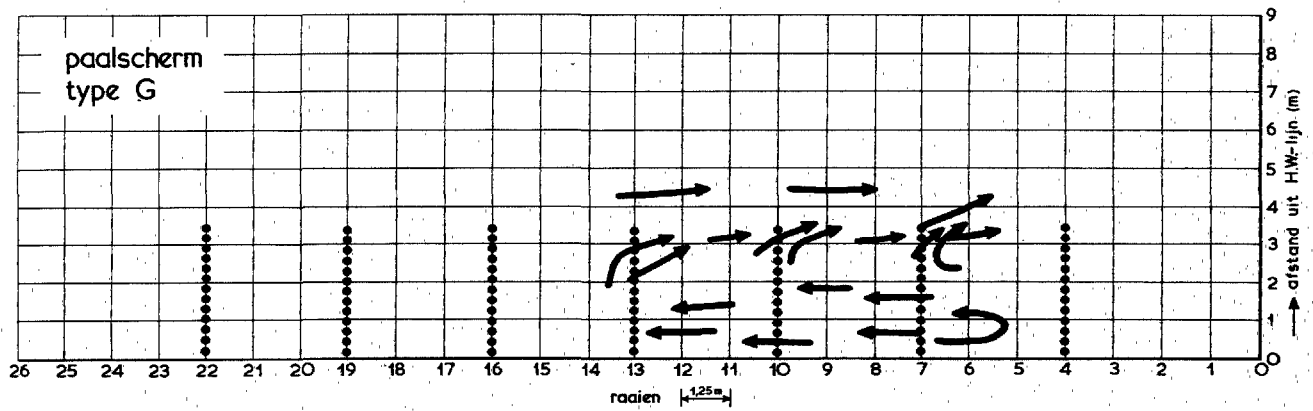
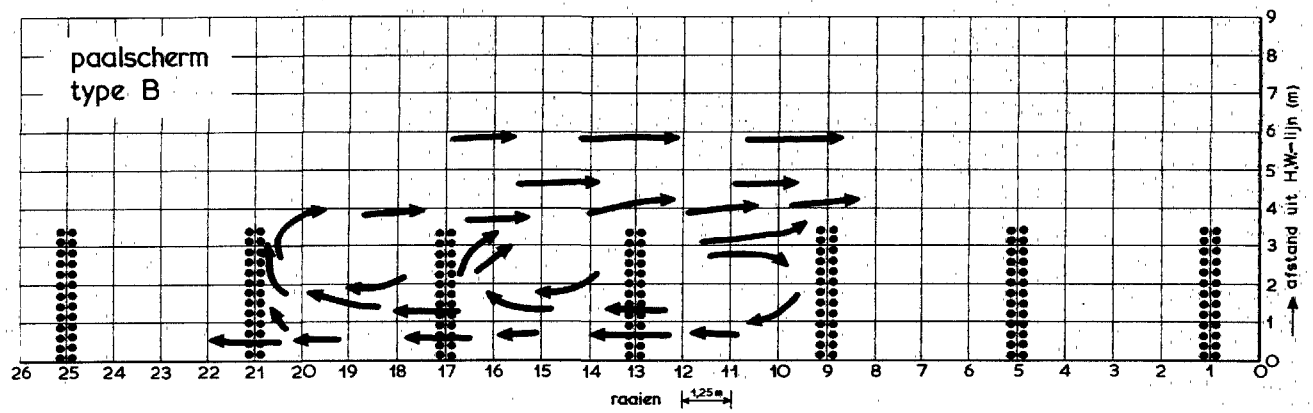
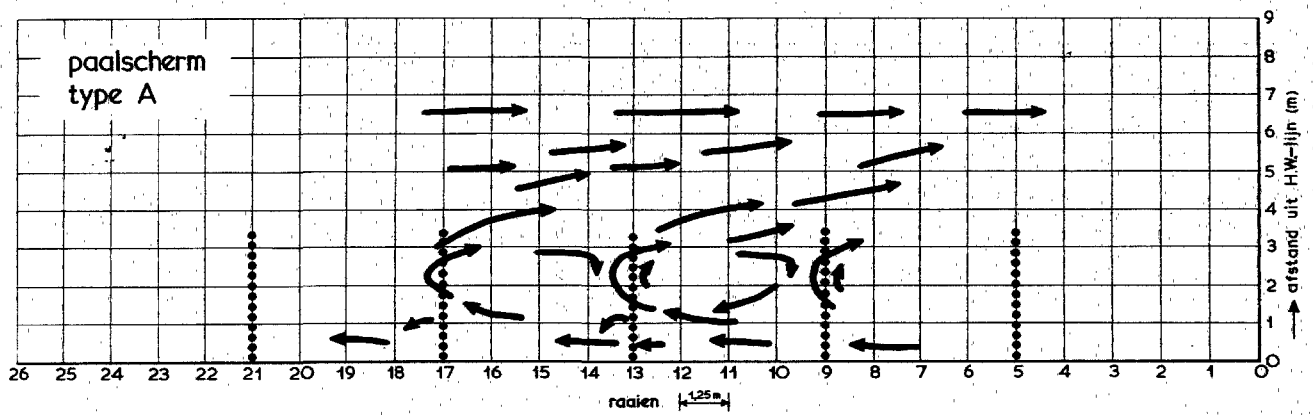
PAALSCHERM TYPE A,B,G,H; SNELHEIDSVERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1



PAALSCHEM TYPE C, D, E, F; SNELHEIDS-
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1

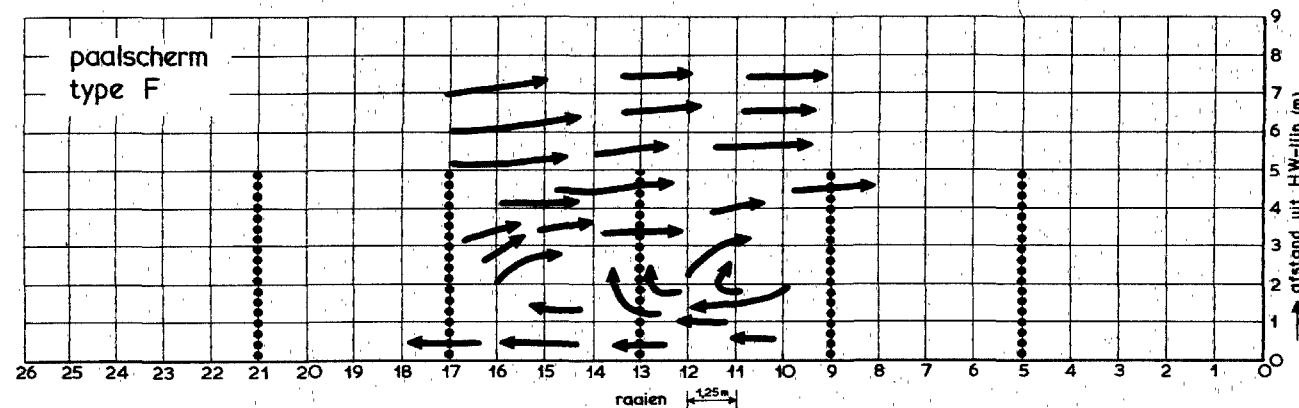
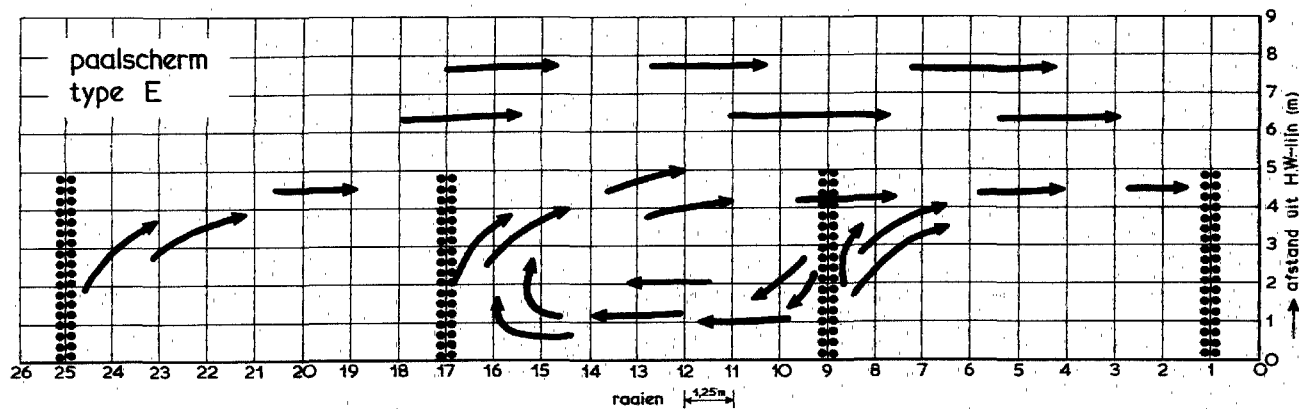
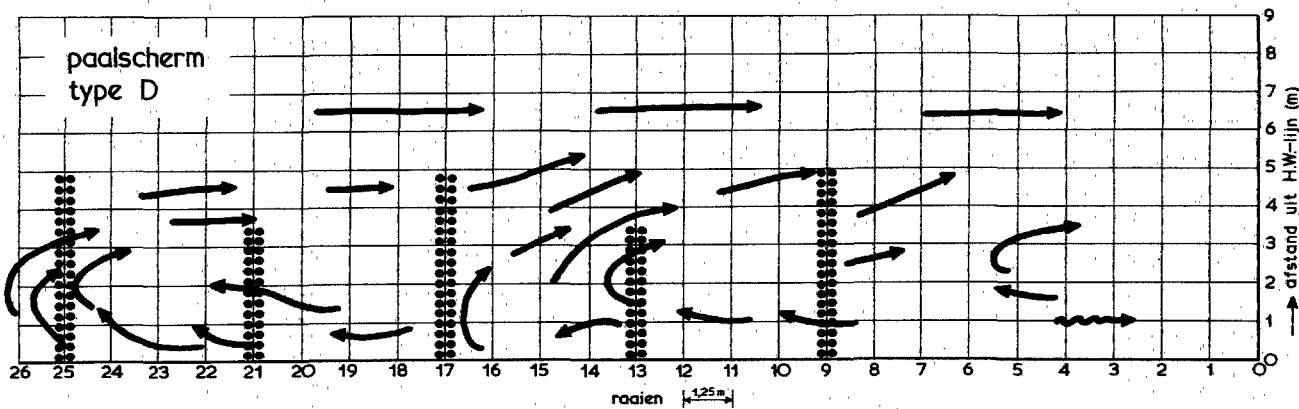
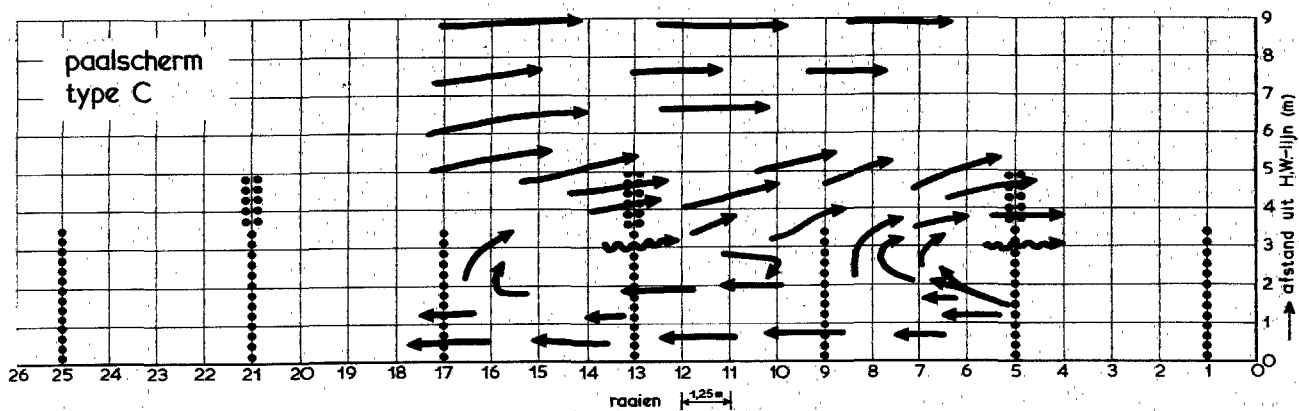


PAALSCHEM TYPE C, D, E, F; SNELHEIDS-
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 6



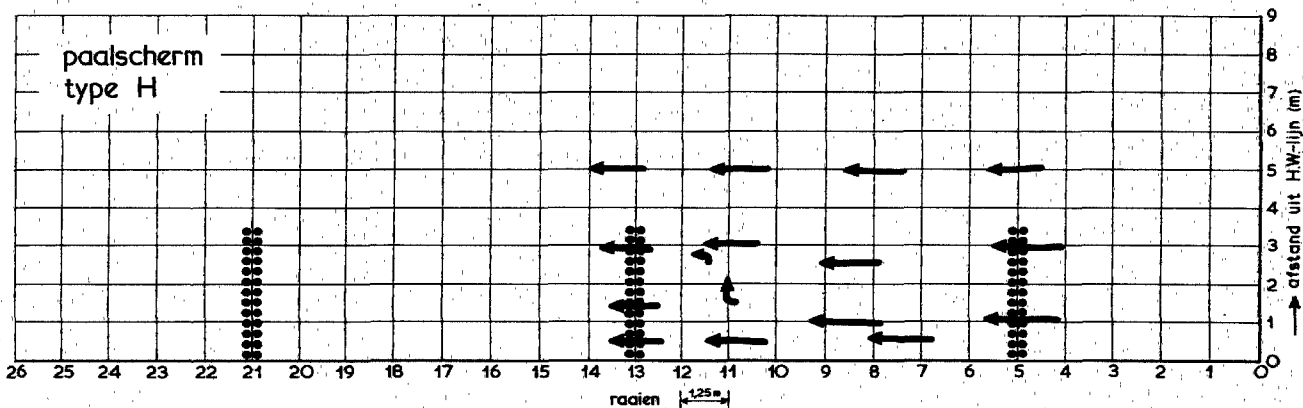
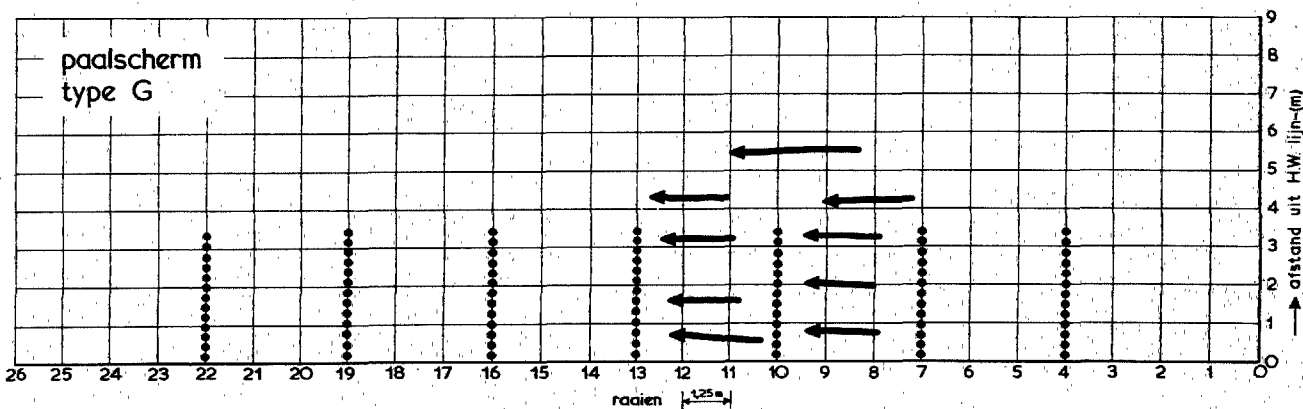
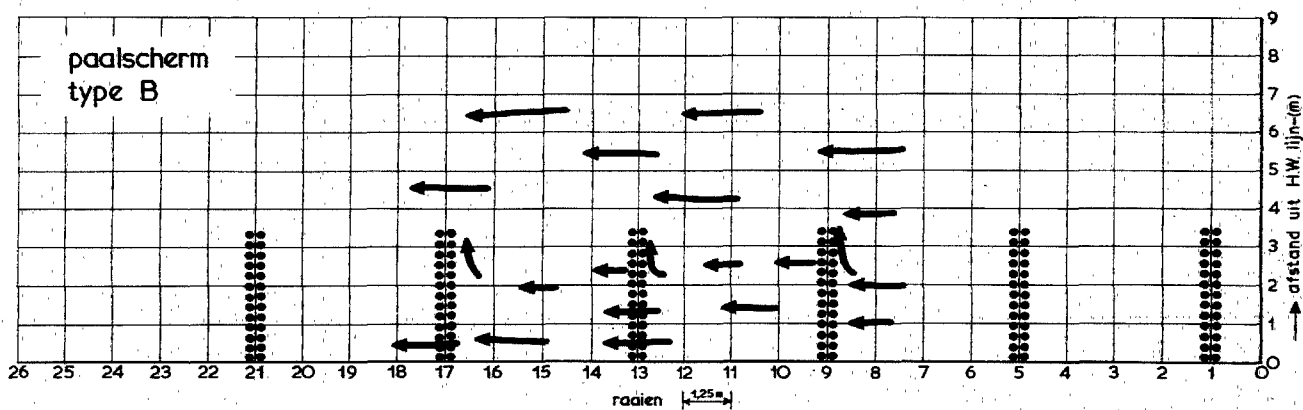
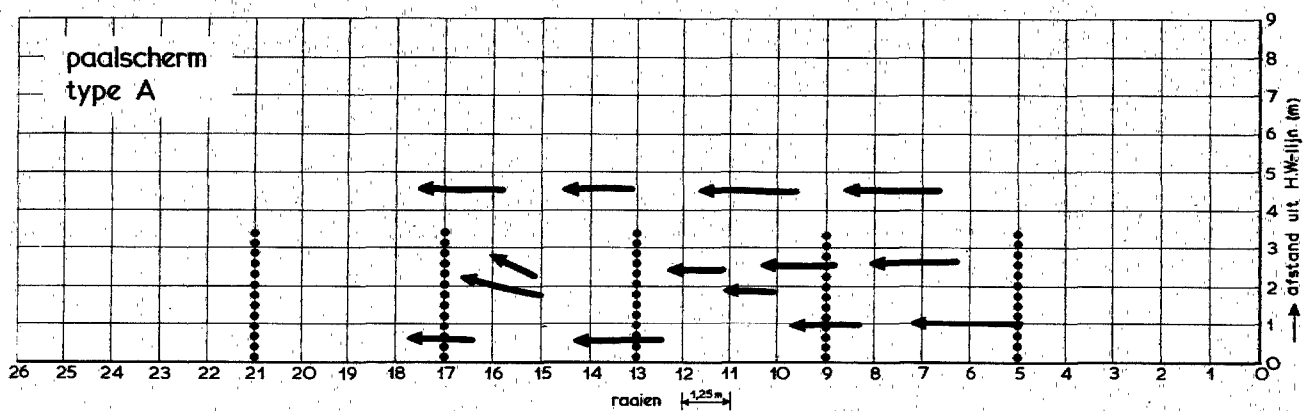
meting met kleurstof

PAALSCHERM TYPE A, B, G, H; STROOMBEELD-
SCHETSEN BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 3



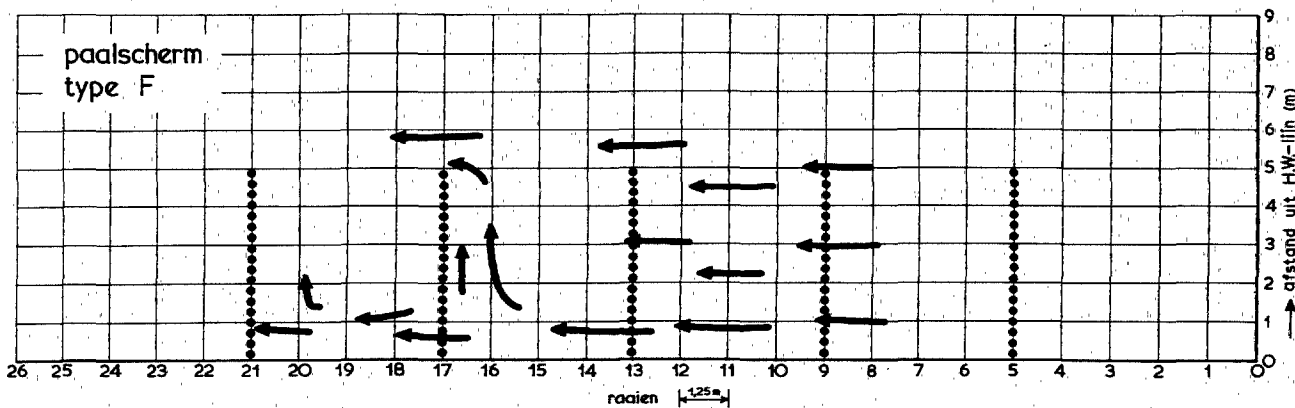
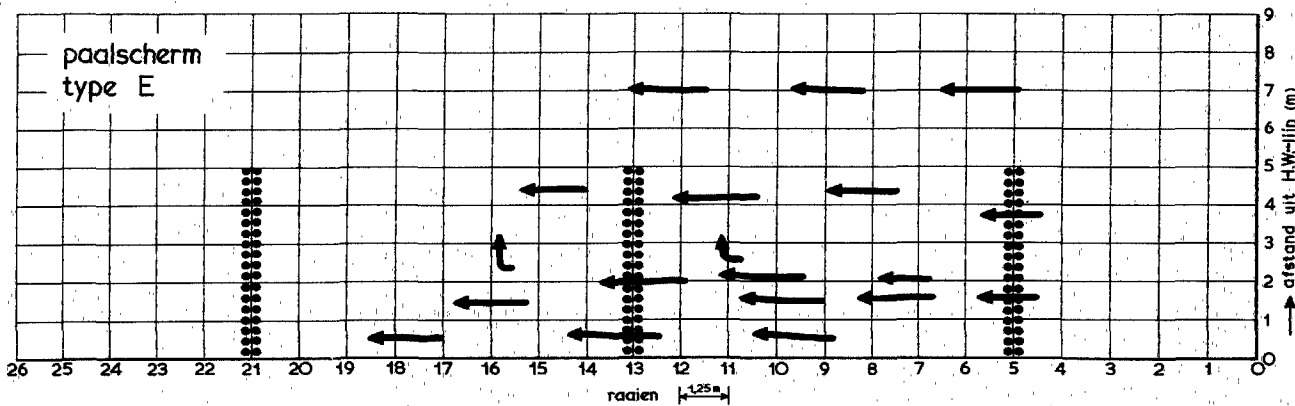
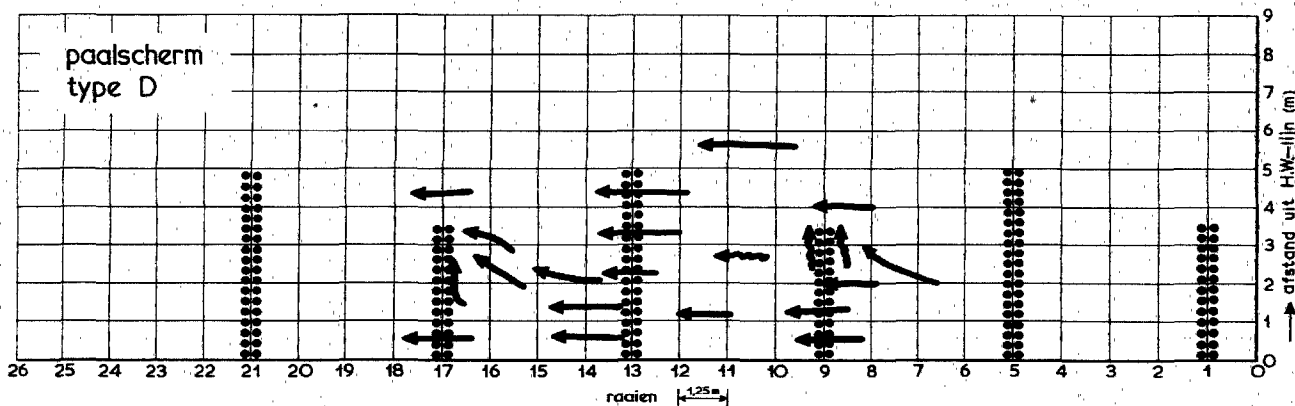
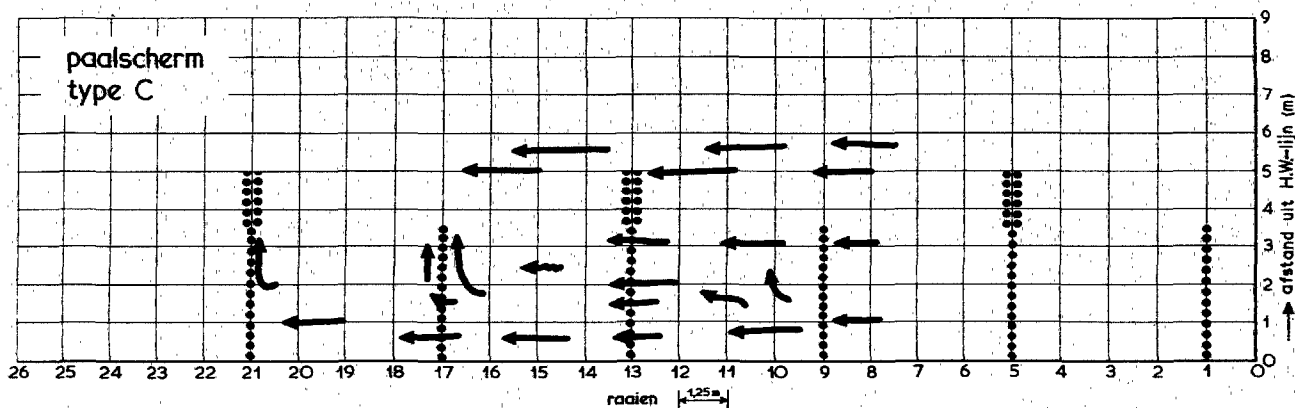
meting met kleurstof

PAALSCHERM TYPE C, D, E, F; STROOMBEELD-
SCHETSEN BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 3



meting met kleurstof

PAALSCHERM TYPE A, B, G, H; STROOMBEELD-
SCHETSEN BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 4



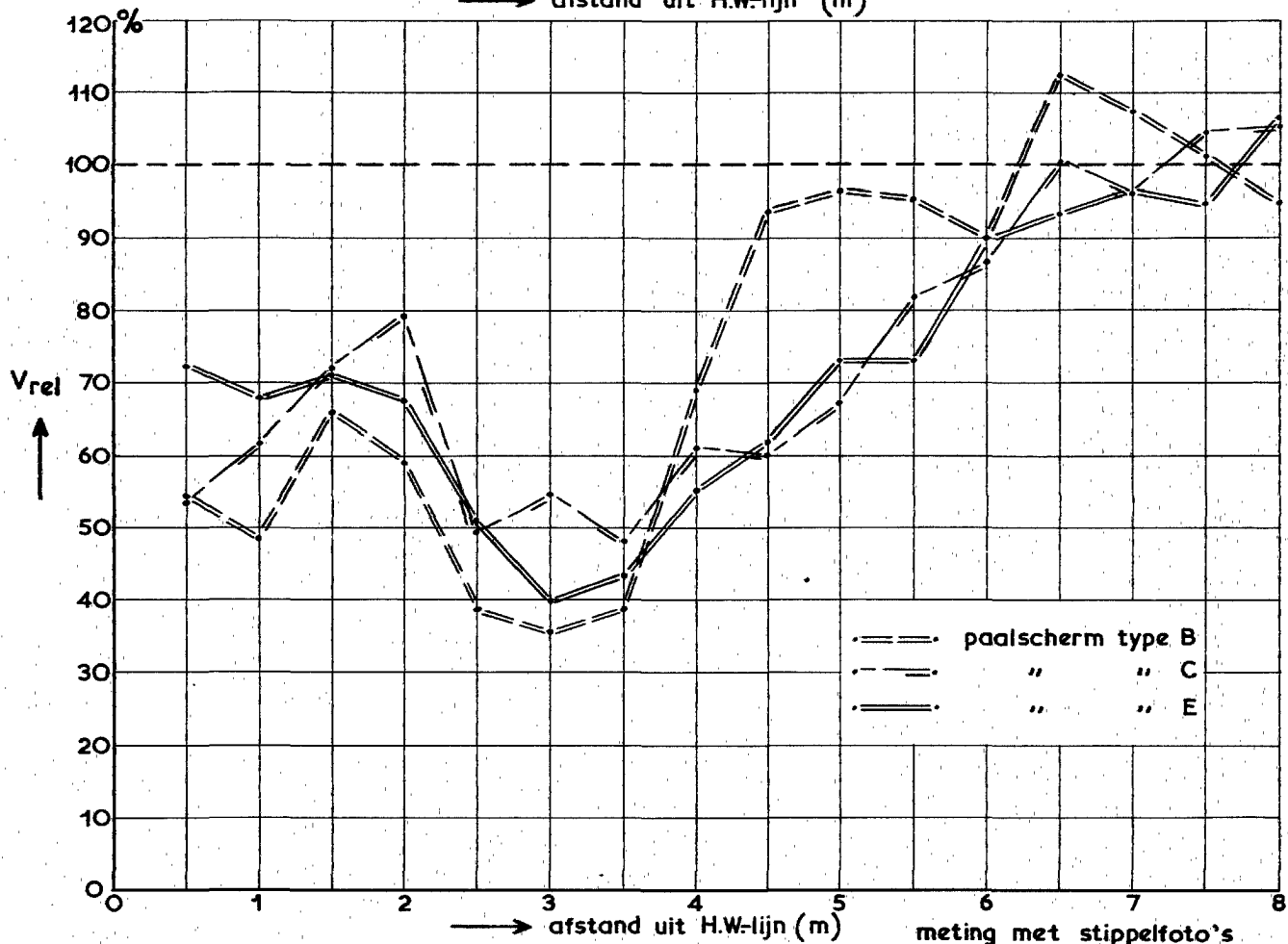
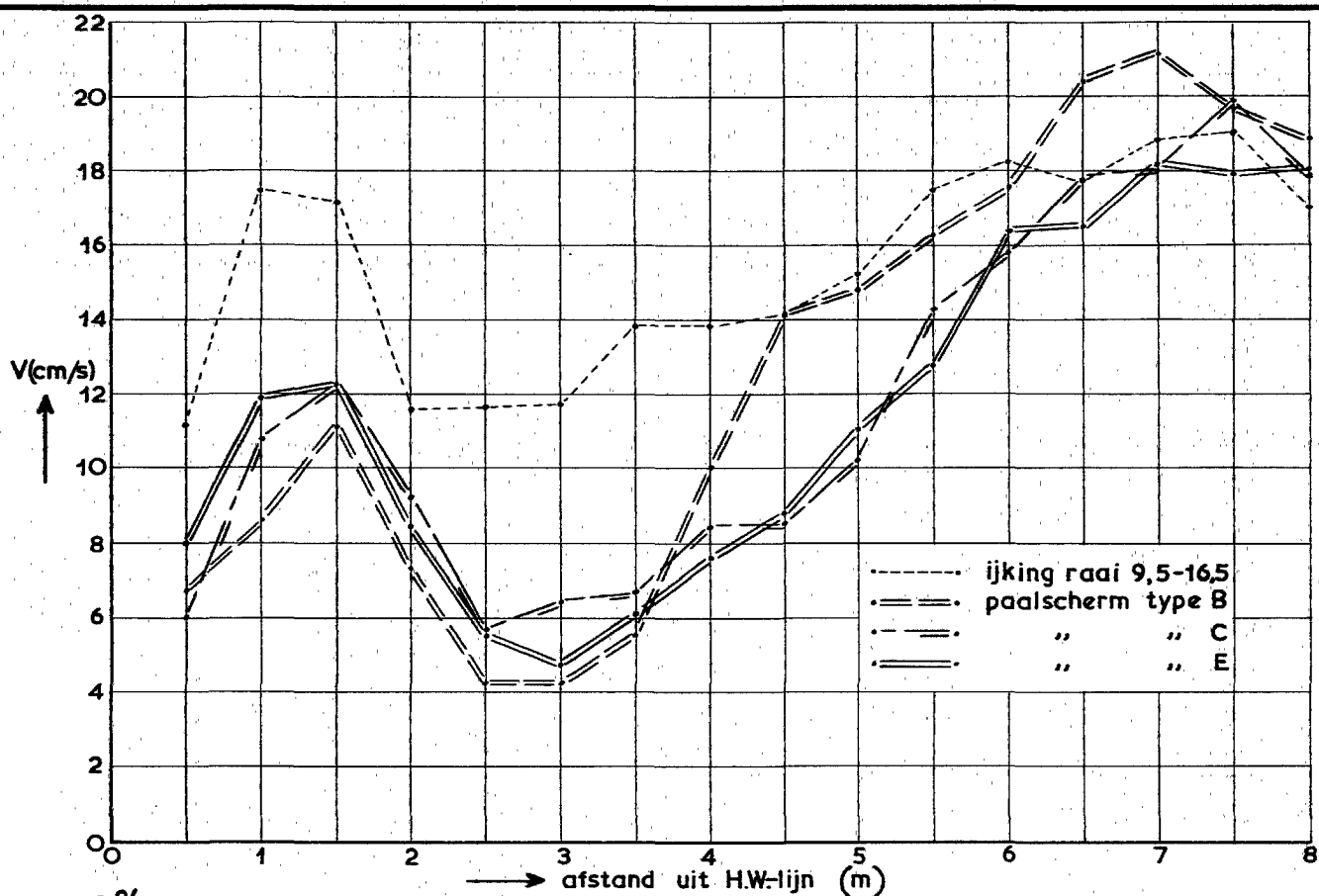
meting met kleurstof

PAALSCHERM TYPE C,D,E,F; STROOMBEELD-
SCHETSEN BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 4

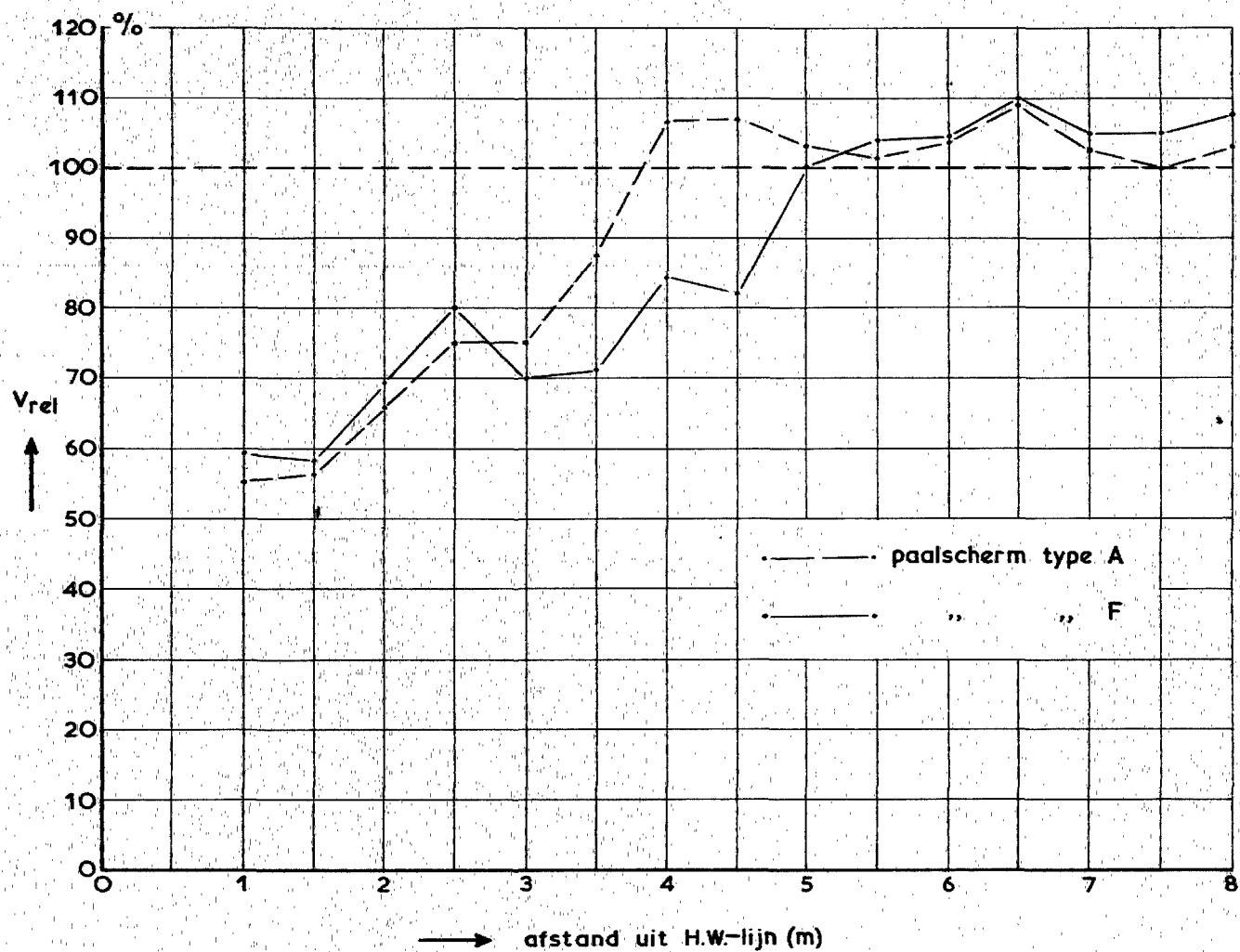
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 27

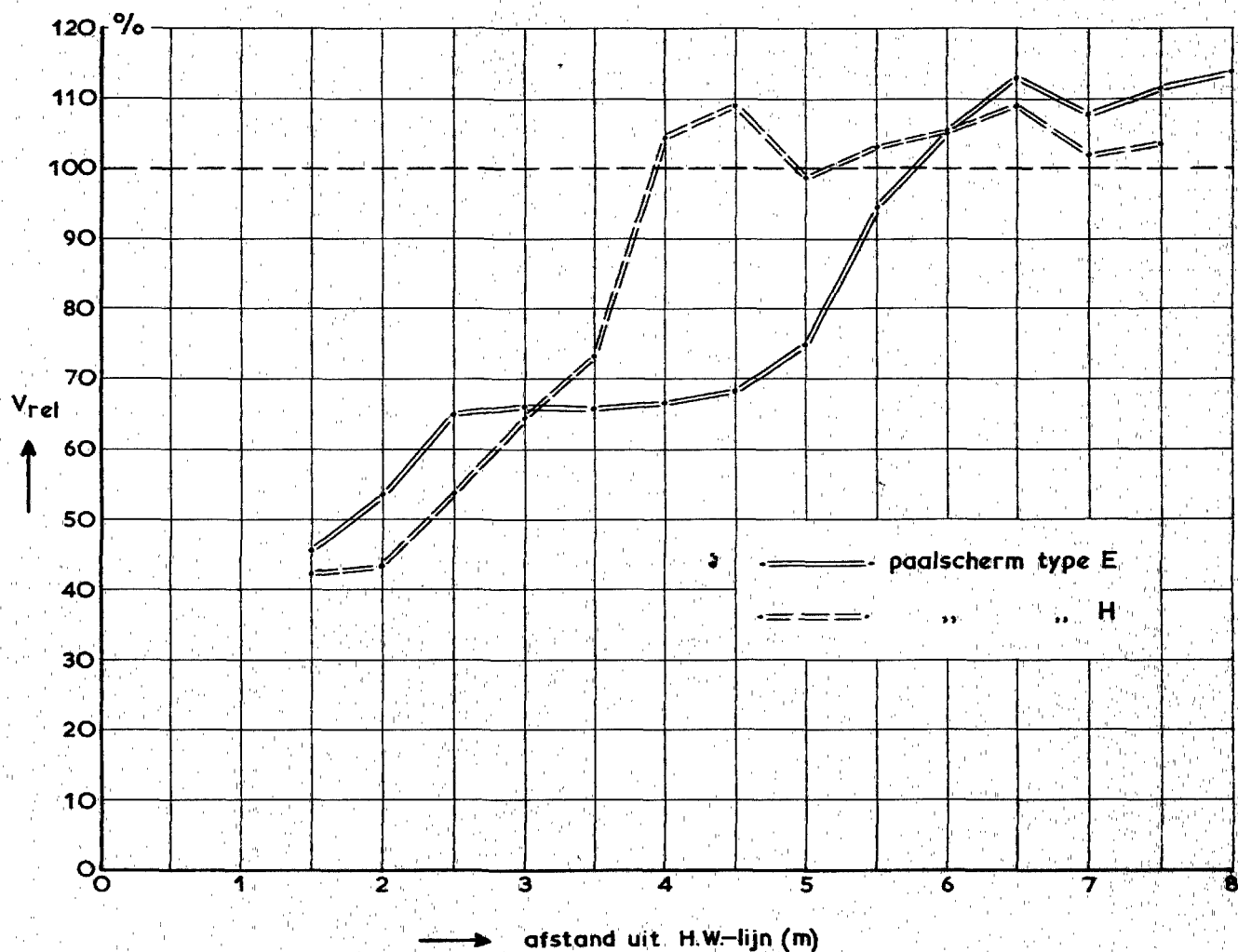


PAALSCHERM TYPE B, C, E; SNELHEIDS-
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 4



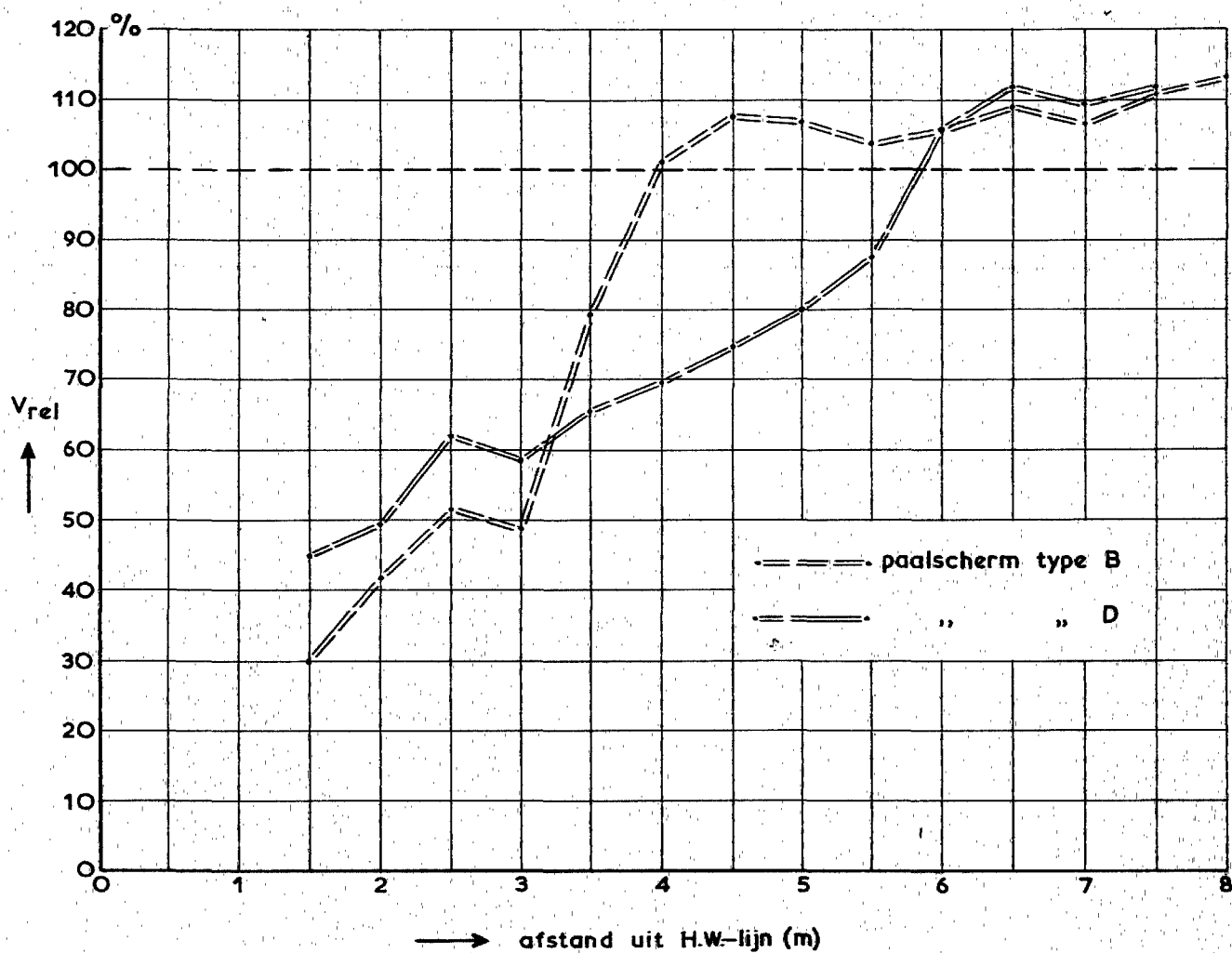
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE A, F; SNELHEIDS-
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1



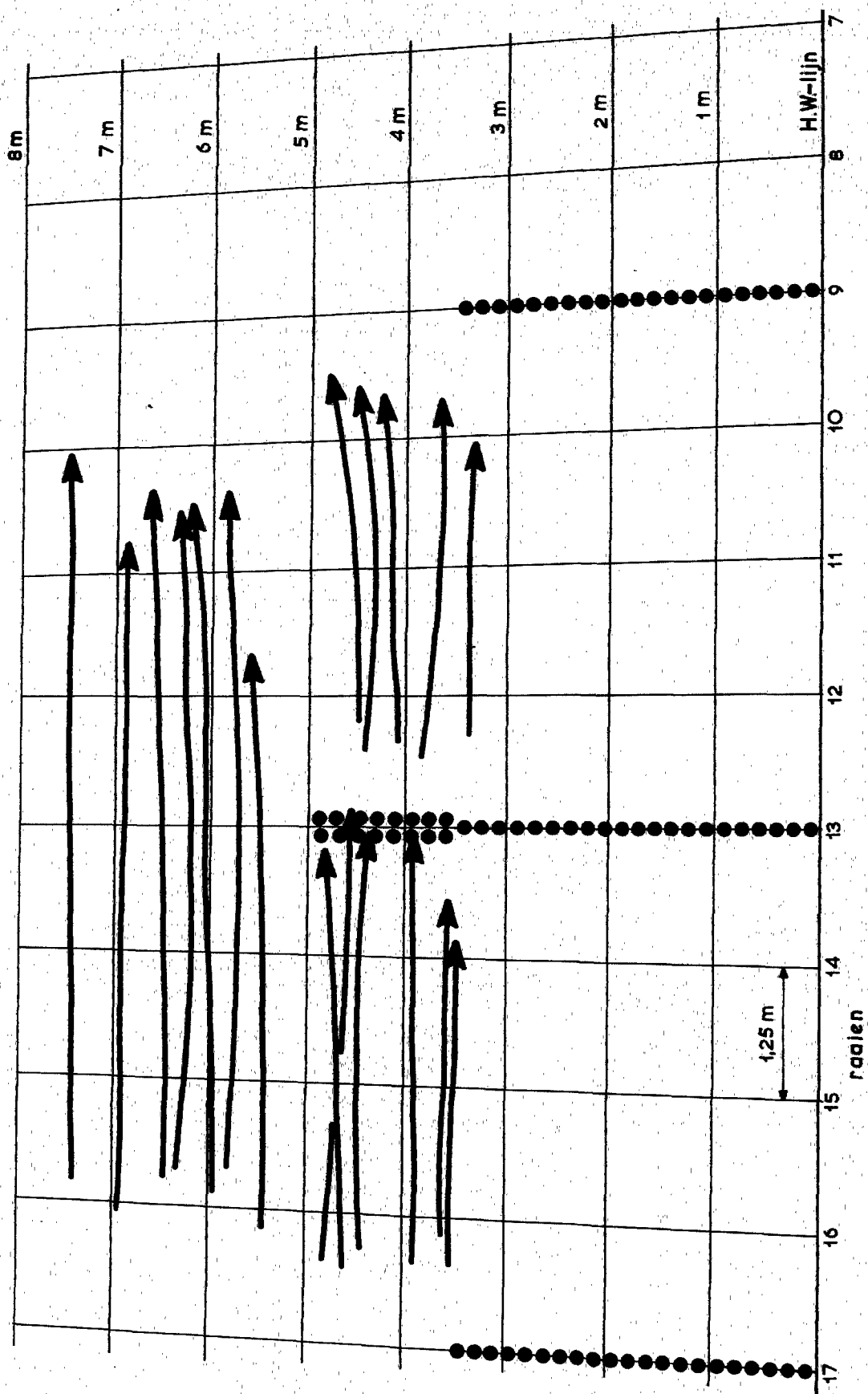
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE E,H; SNELHEIDS—
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1



meting met stippelfoto's

PAALSCHEM TYPE B, D; SNELHEIDS-
VERDELING BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1



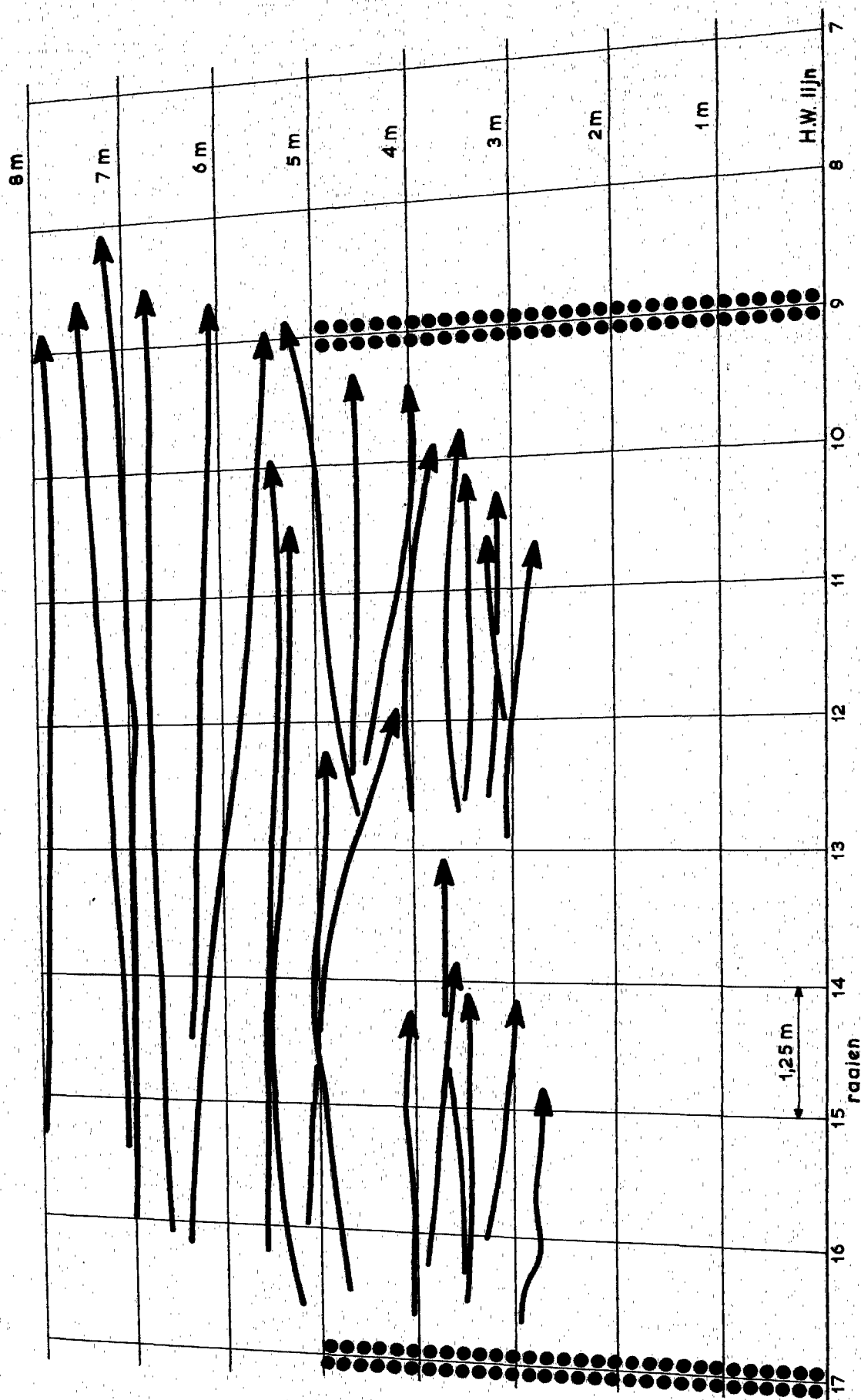
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE C; DRIJVERBANEN
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 32



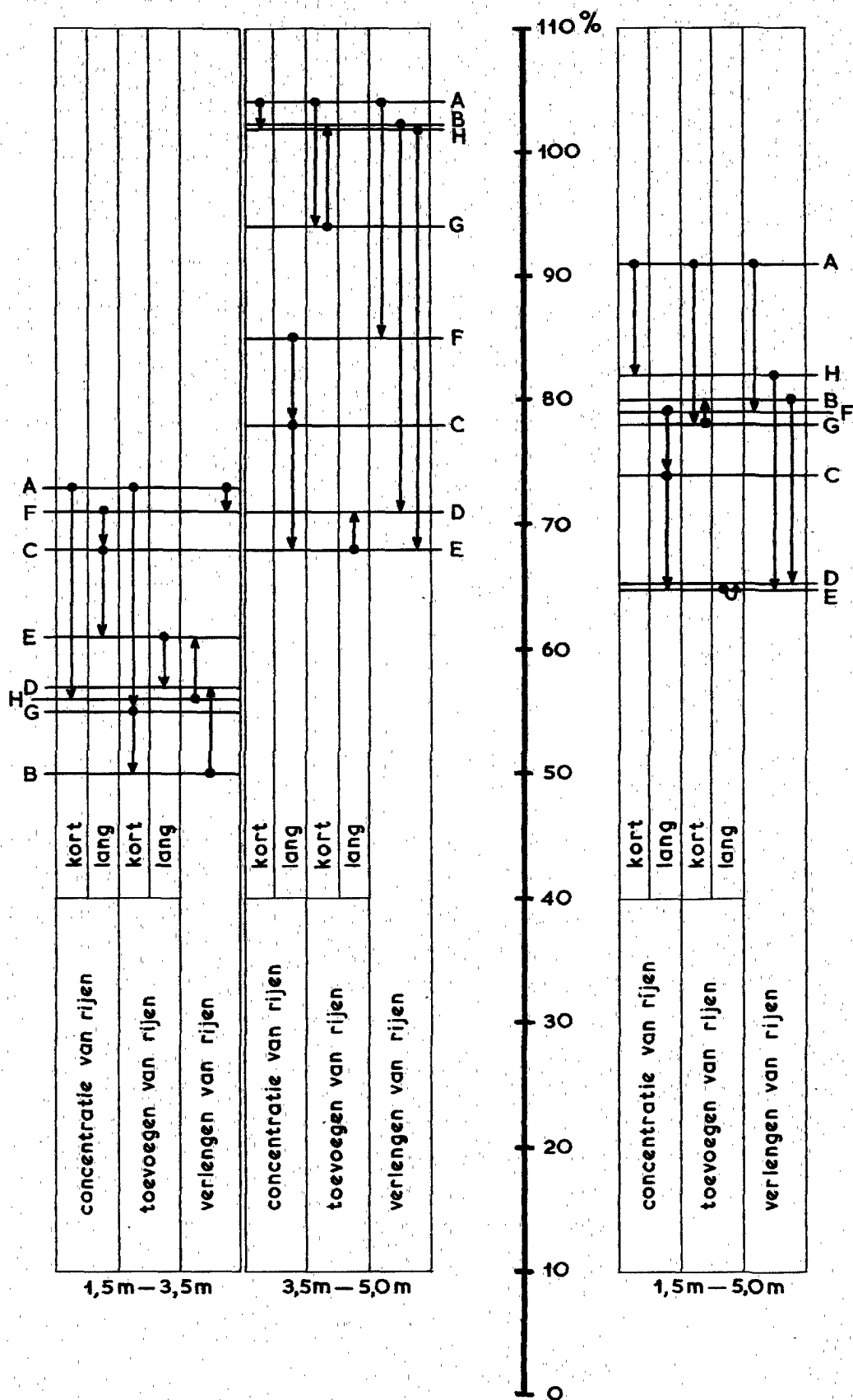
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE E; DRIJVERBANEN
 BIJ HYDRAULISCHE CONDITIE 1

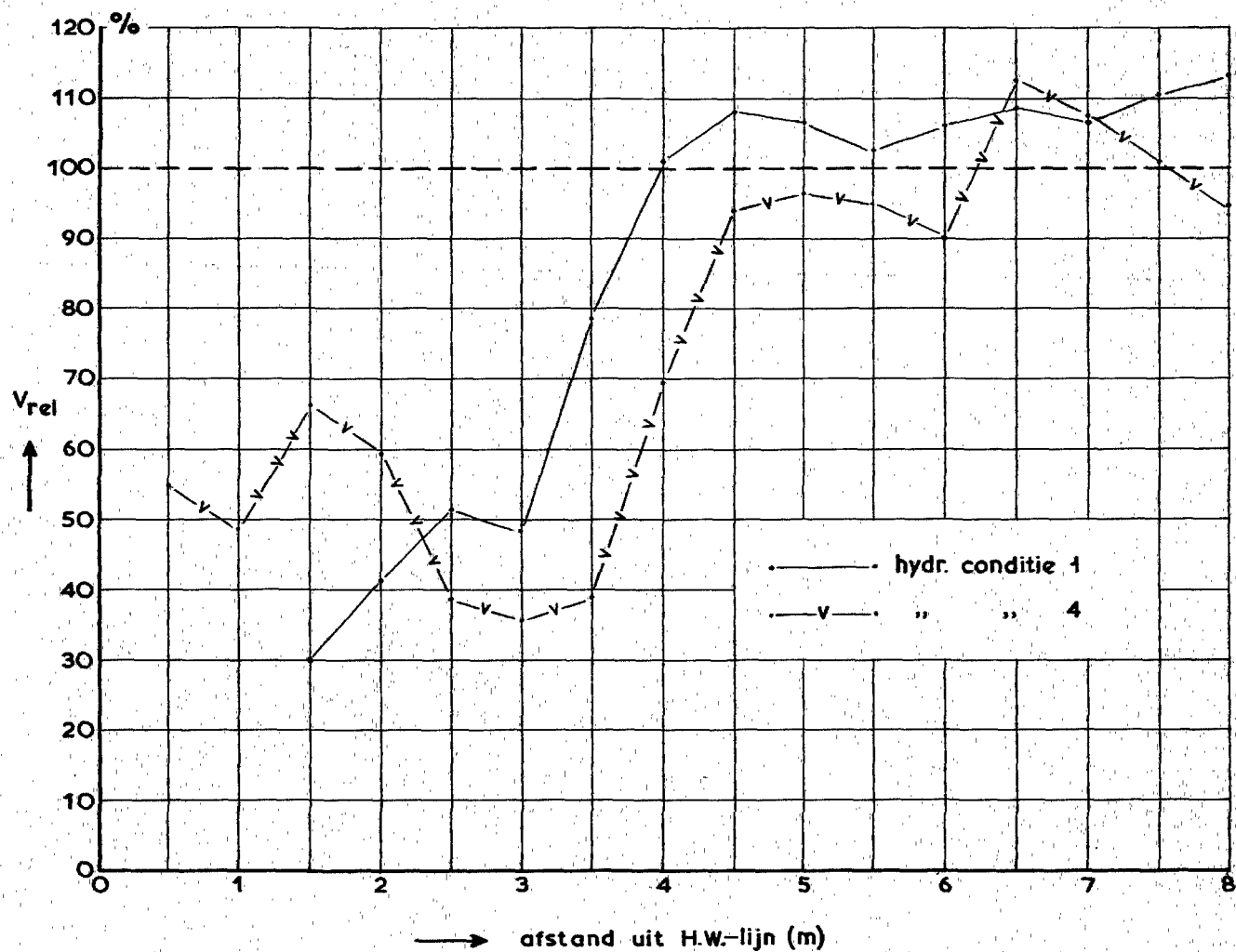
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 33

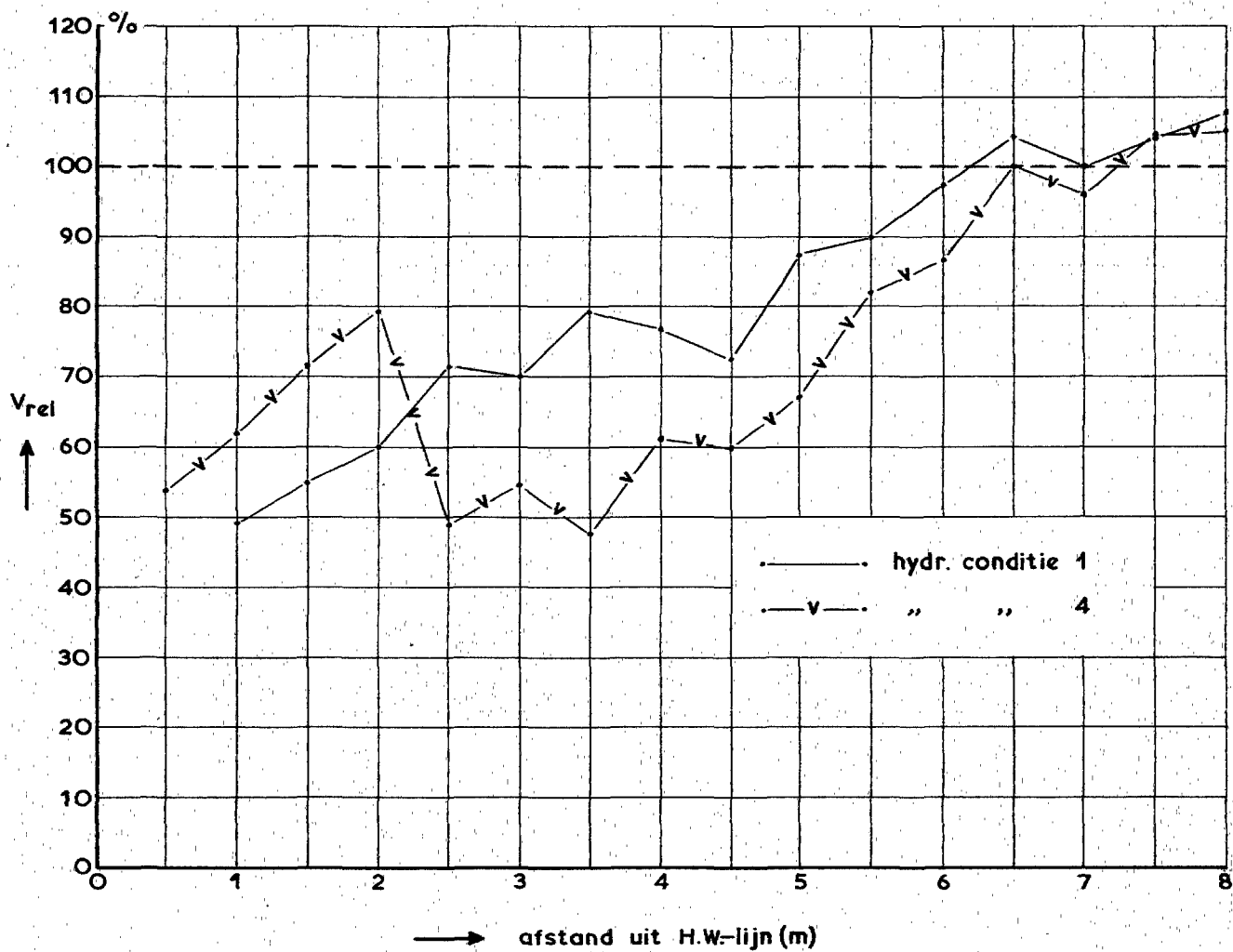


RELATIEVE DEBIETEN VAN ALLE TYPEN
PAALSCHERMEN; HYDRAULISCHE CONDITIE 1



meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE B; SNELHEIDSVERDELING
 BIJ HYDRAULISCHE CONDITIES 1 EN 4



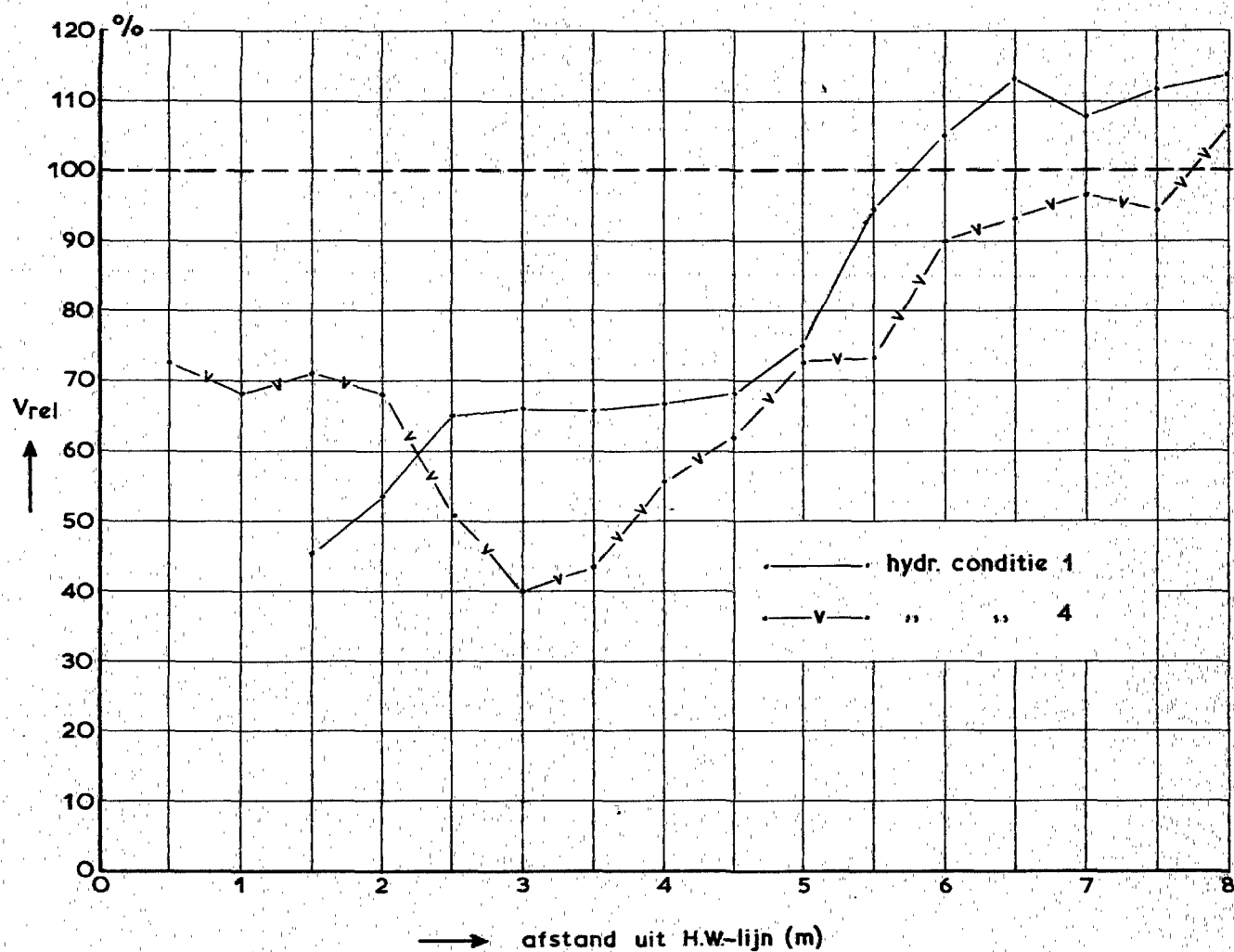
meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE C; SNELHEIDSVERDELING
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIES 1 EN 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 36



meting met stippelfoto's

PAALSCHERM TYPE E; SNELHEIDSVERDELING
BIJ HYDRAULISCHE CONDITIES 1 EN 4

$$I_b = \frac{v^2}{C_b^2 d}$$

6×10^{-5}

5×10^{-5}

4×10^{-5}

3×10^{-5}

2×10^{-5}

1×10^{-5}

0

1

2

3

4

5

6

7

8

afstand uit H.W.-lijn (m)

$k = 5 \text{ mm}$

$k = 2 \text{ mm}$

$k = 1 \text{ mm}$

$k = 0,5 \text{ mm}$

$k = 0,1 \text{ mm}$

$I_{b \text{ min.}} / I_{b \text{ max.}}$

1,0

0,9

0,8

0,7

0,6

0,5

0,1

0,2

0,3

0,4

0,5

0,6

0,8

1,0

2

3

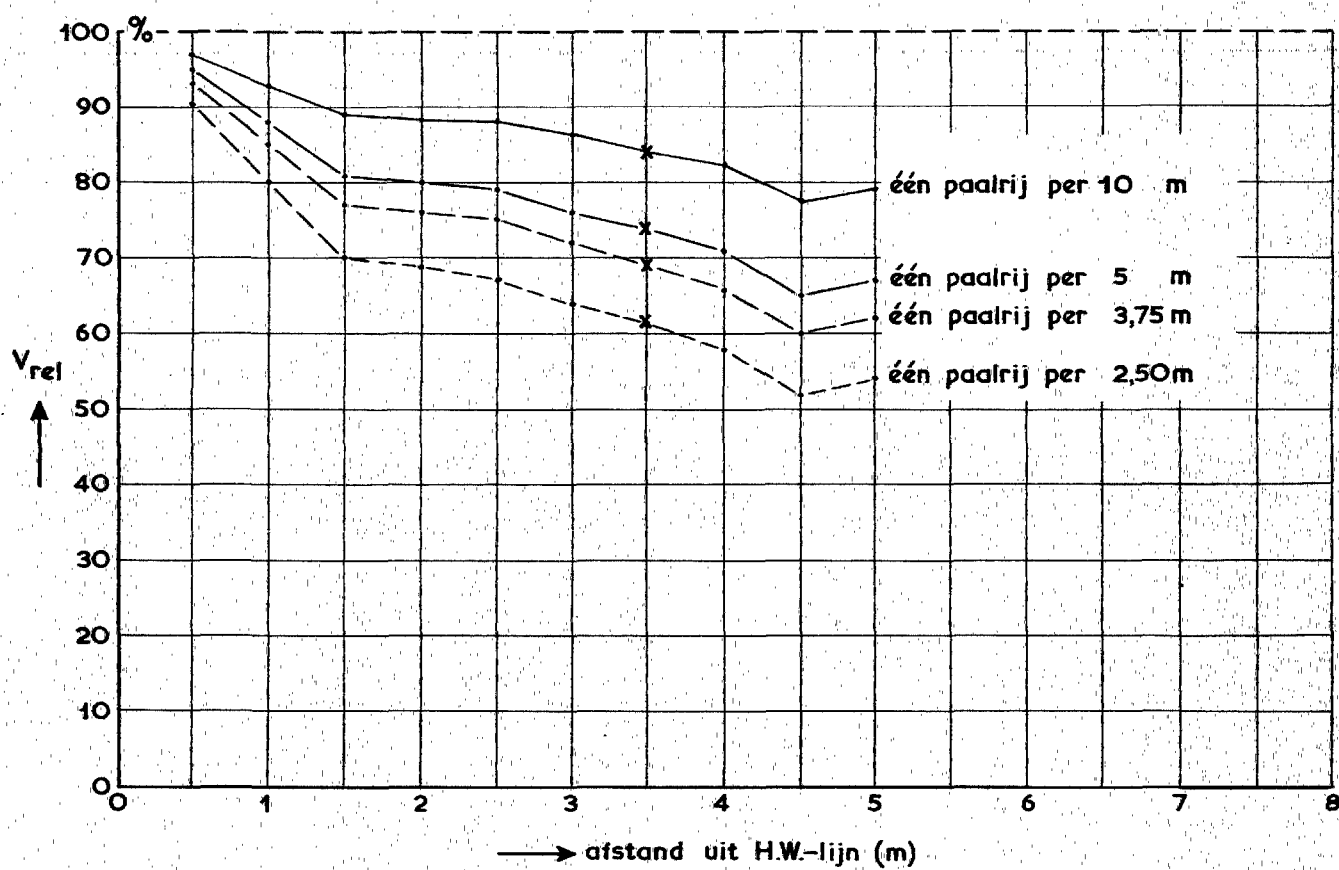
4

5

6

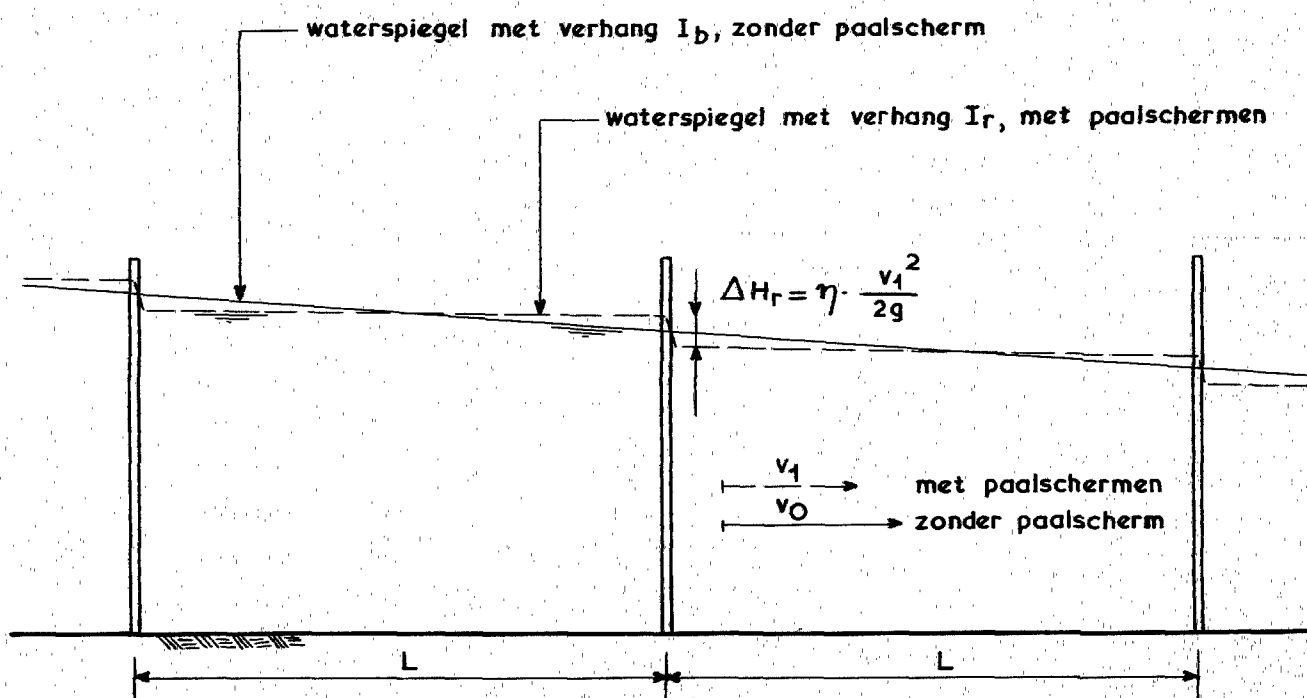
$k \text{ (mm)}$

VARIATIE IN HET BEREKENDE VERHANG I_b
ALS FUNCTIE VAN k



x = gemiddelde van de twee waarden landwaarts en zeewaarts van 3,5 m

BEREKENDE RELATIEVE SNELHEID MET
GELUKMATIG VERSPREIDE PALEN



aanname:

gemiddeld verhang met paalschermen = verhang zonder paalschermen

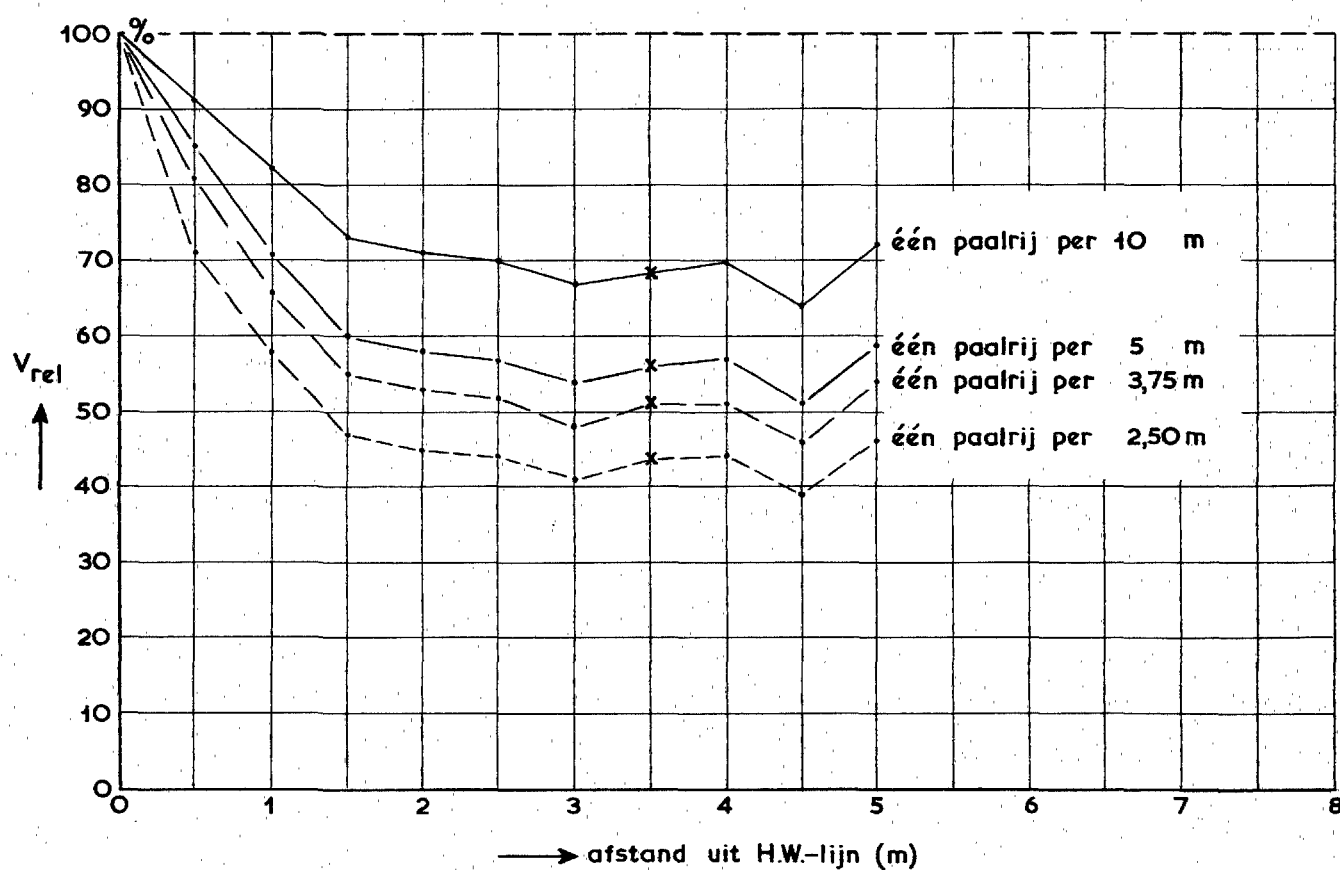
ofwel: $I_b \cdot L = \Delta H_r + I_r \cdot L$

GESCHEMATISEERD WATERSTANDSVERLOOP

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

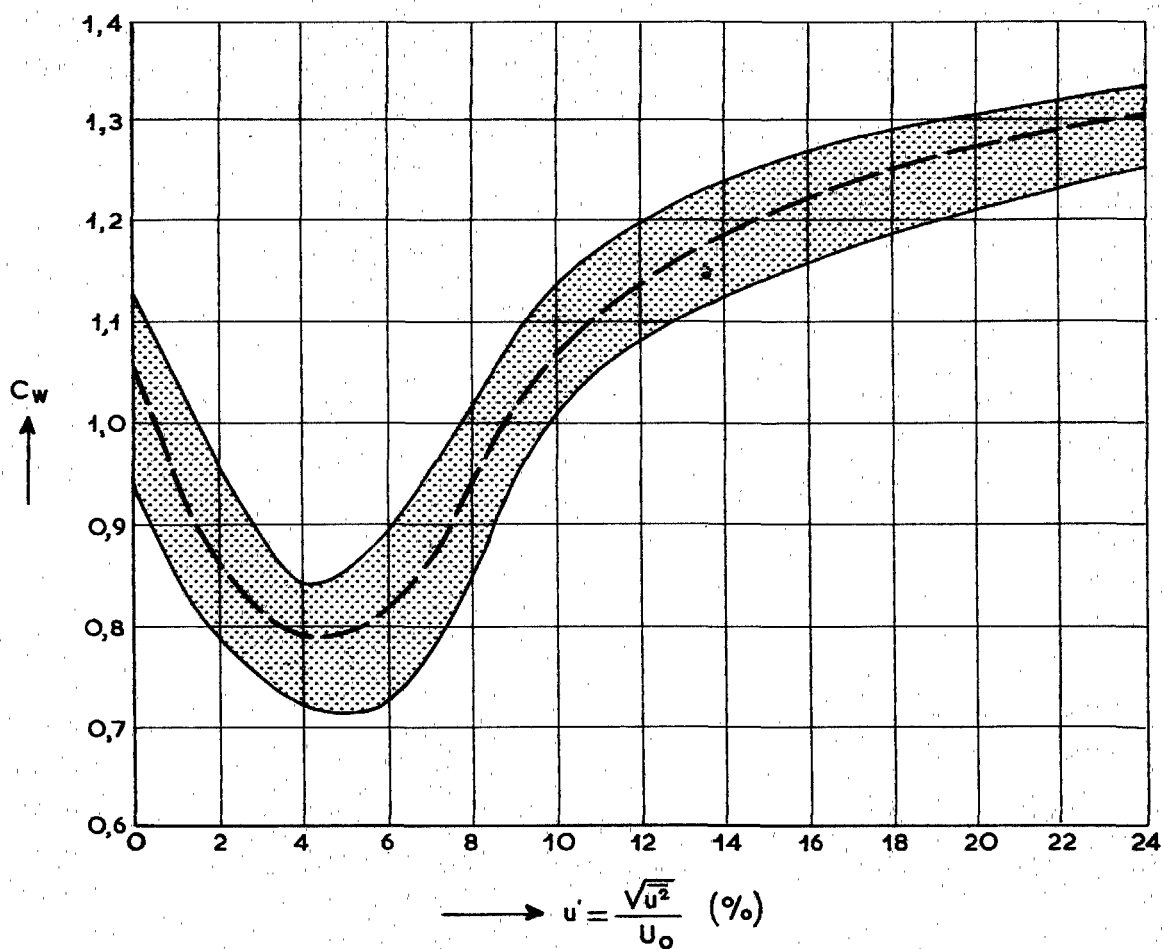
M. 1148

FIG. 40



x = gemiddelde van de twee waarden landwaarts en zeewaarts van 3,5 m

BEREKENDE RELATIEVE SNELHEID MET
PALEN VERENIGD TOT SCHERMEN



1350 < Re < 8000

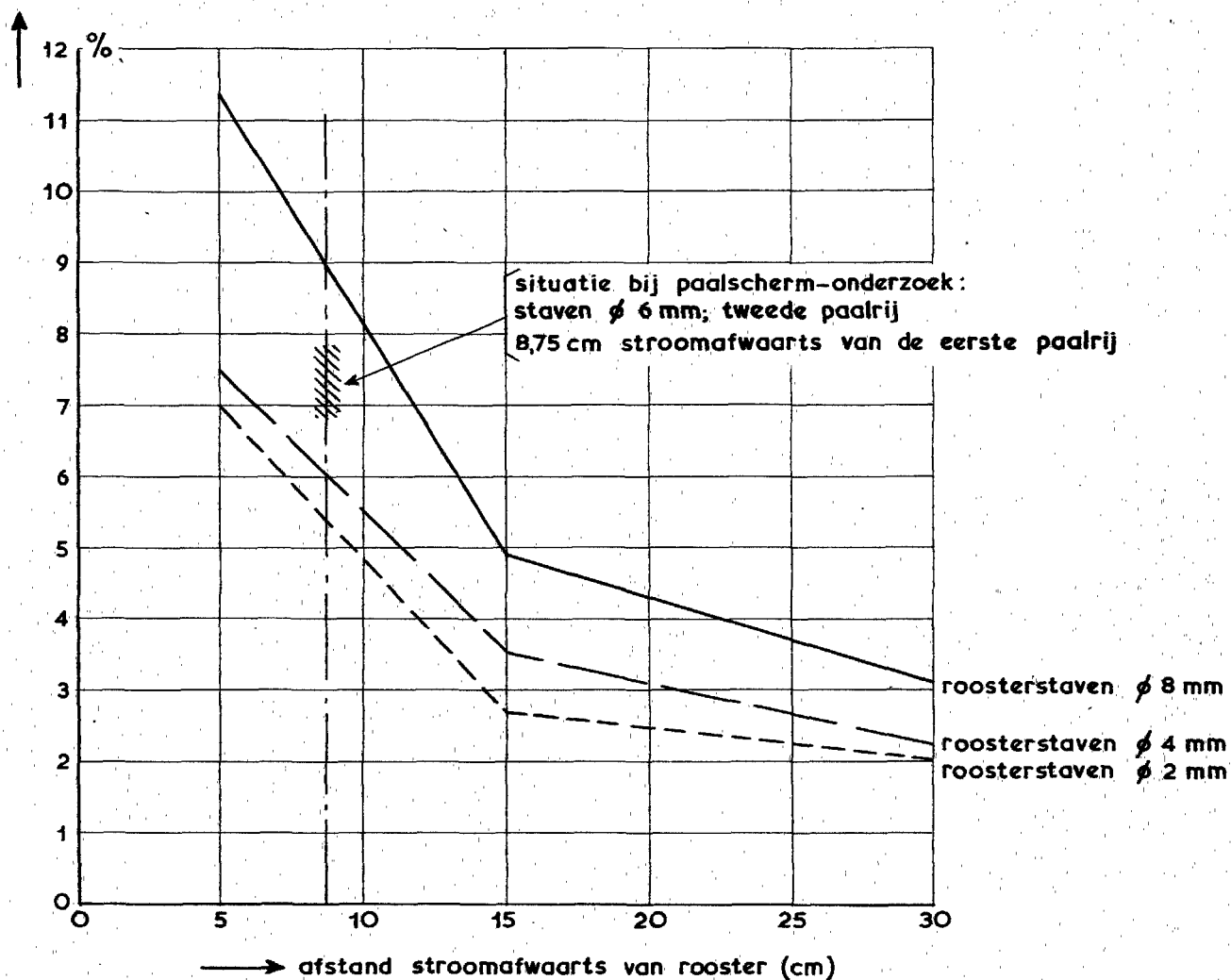
u' = turbulentieintensiteit

u = snelheidfluctuatie

U_0 = gemiddelde snelheid

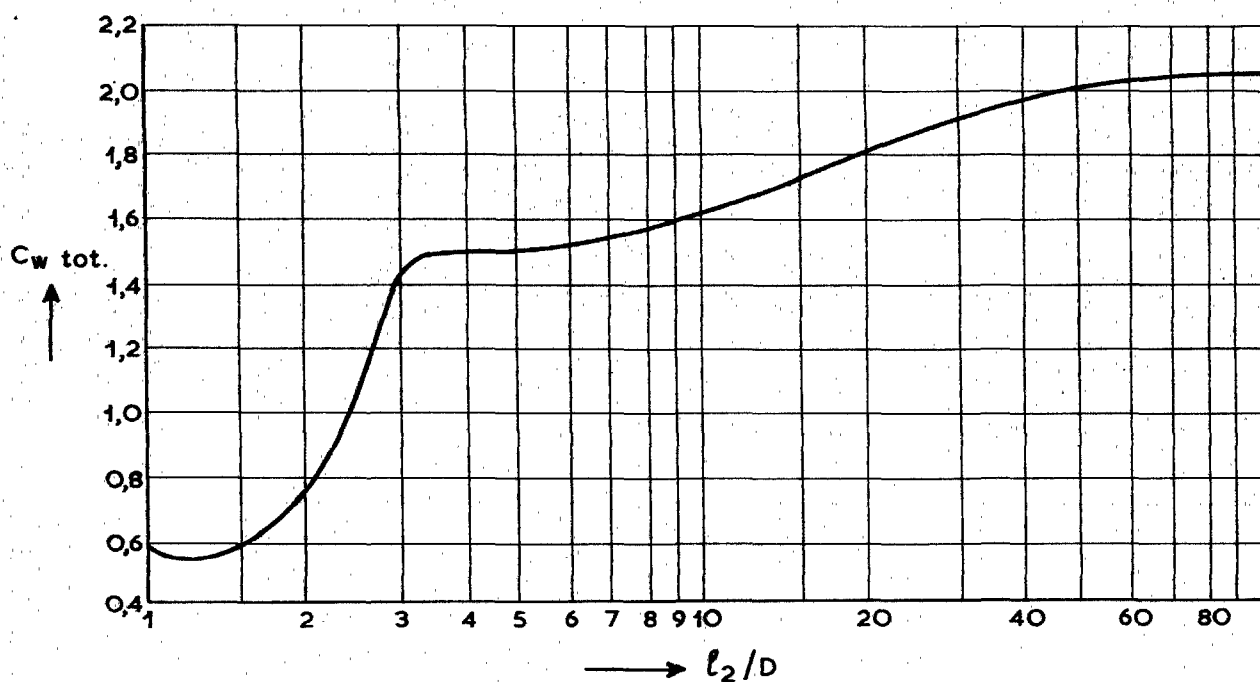
C_w ALS FUNCTIE VAN DE TURBULENTIE-
INTENSITEIT VOLGENS KO EN GRAF [7]

u' = turbulentieintensiteit

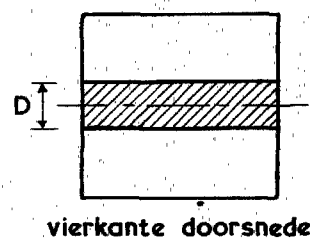
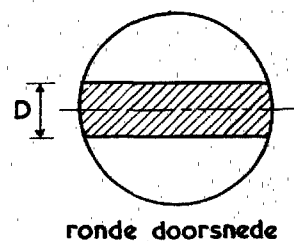
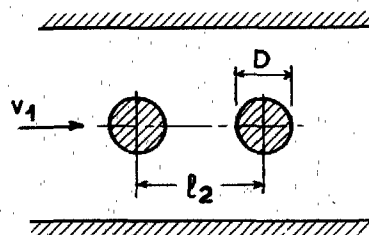


N.B. u' zonder rooster $\approx 3\%$

TURBULENTIEINTENSITEIT STROOMAFWAARTS
VAN STAAFROOSTERS VOLGENS LINDH E.A. [8]



l_2/D	C_w totaal
1,0	0,60
1,5	0,60
2,0	0,76
2,5	1,10
3,0	1,44
4,0	1,50
5,0	1,52
10	1,62
20	1,82
30	1,92
50	2,00
100	2,06

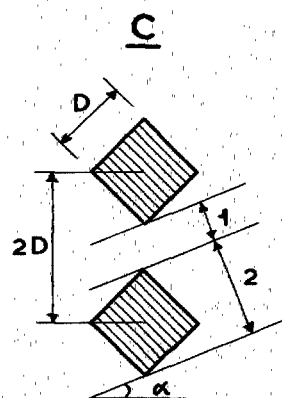
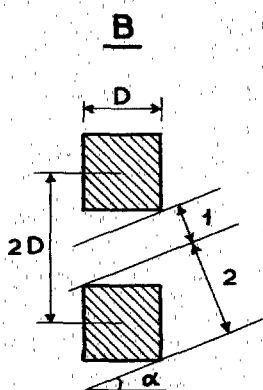
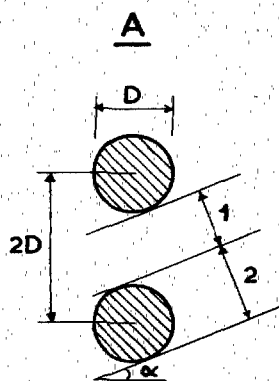
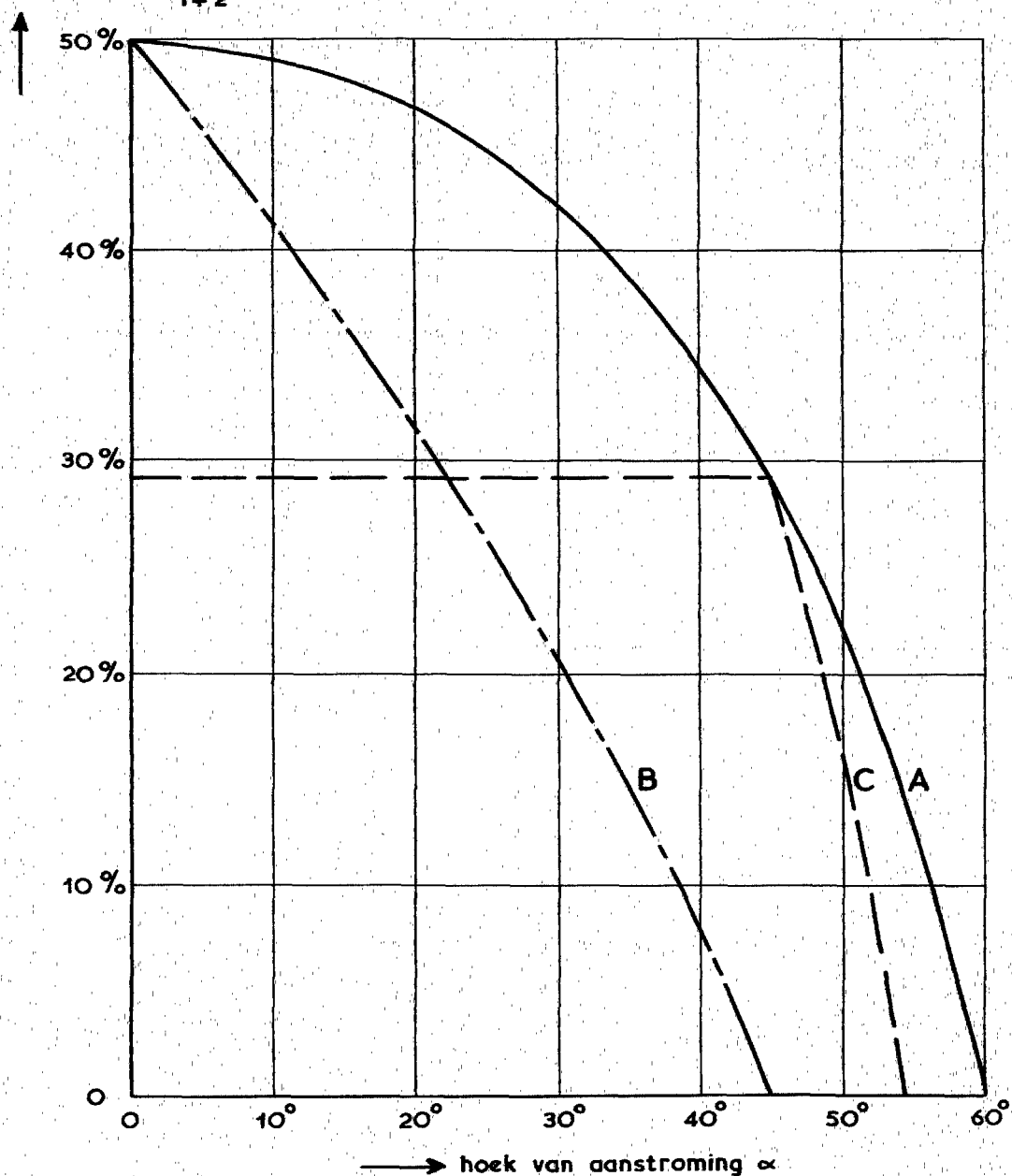


N.B. $Re > 10^5$

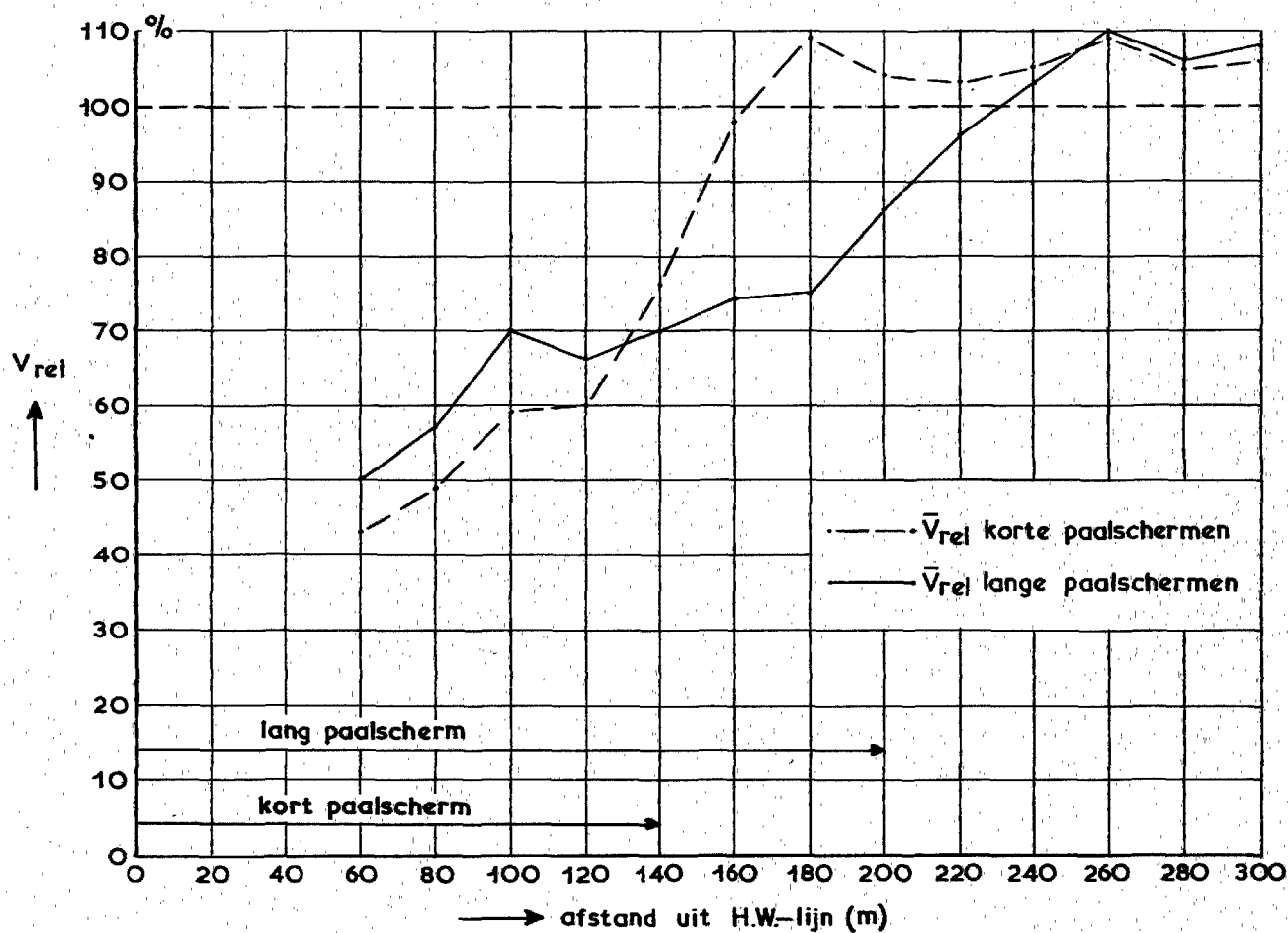
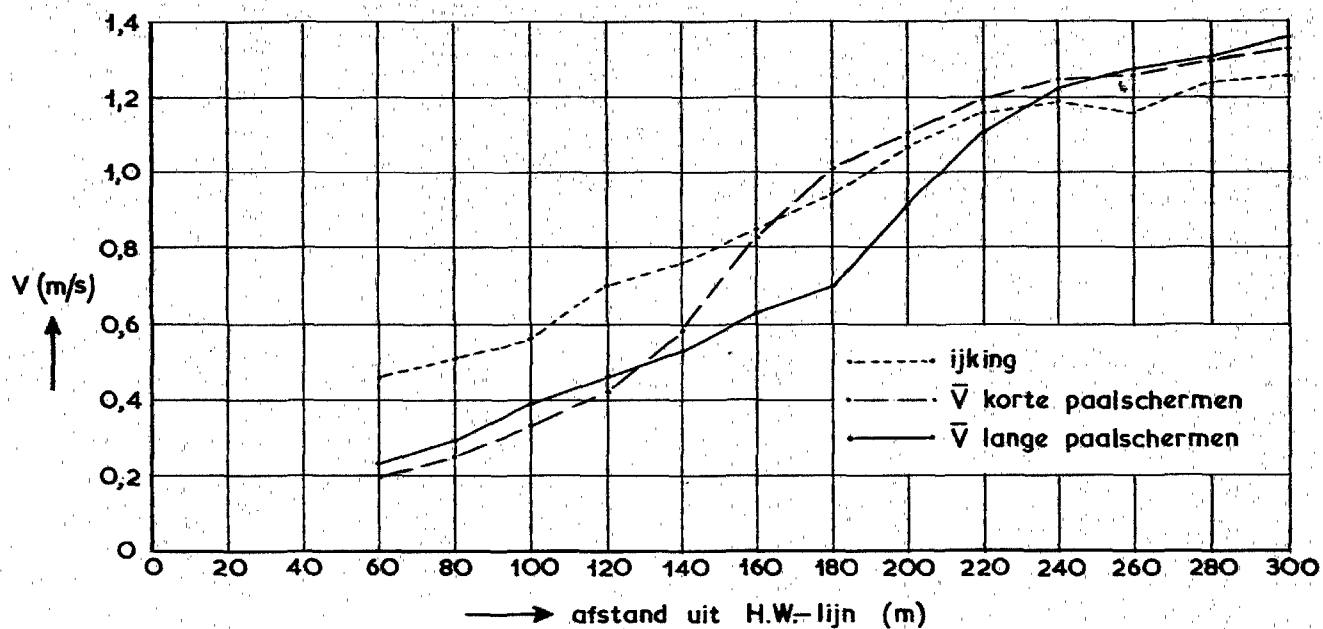
C_w van één cilinder = 1,25 voor $Re = 10^5$

**C_w totaal VAN TWEE CILINDERS
VOLGENS IDEL'CIK [6]**

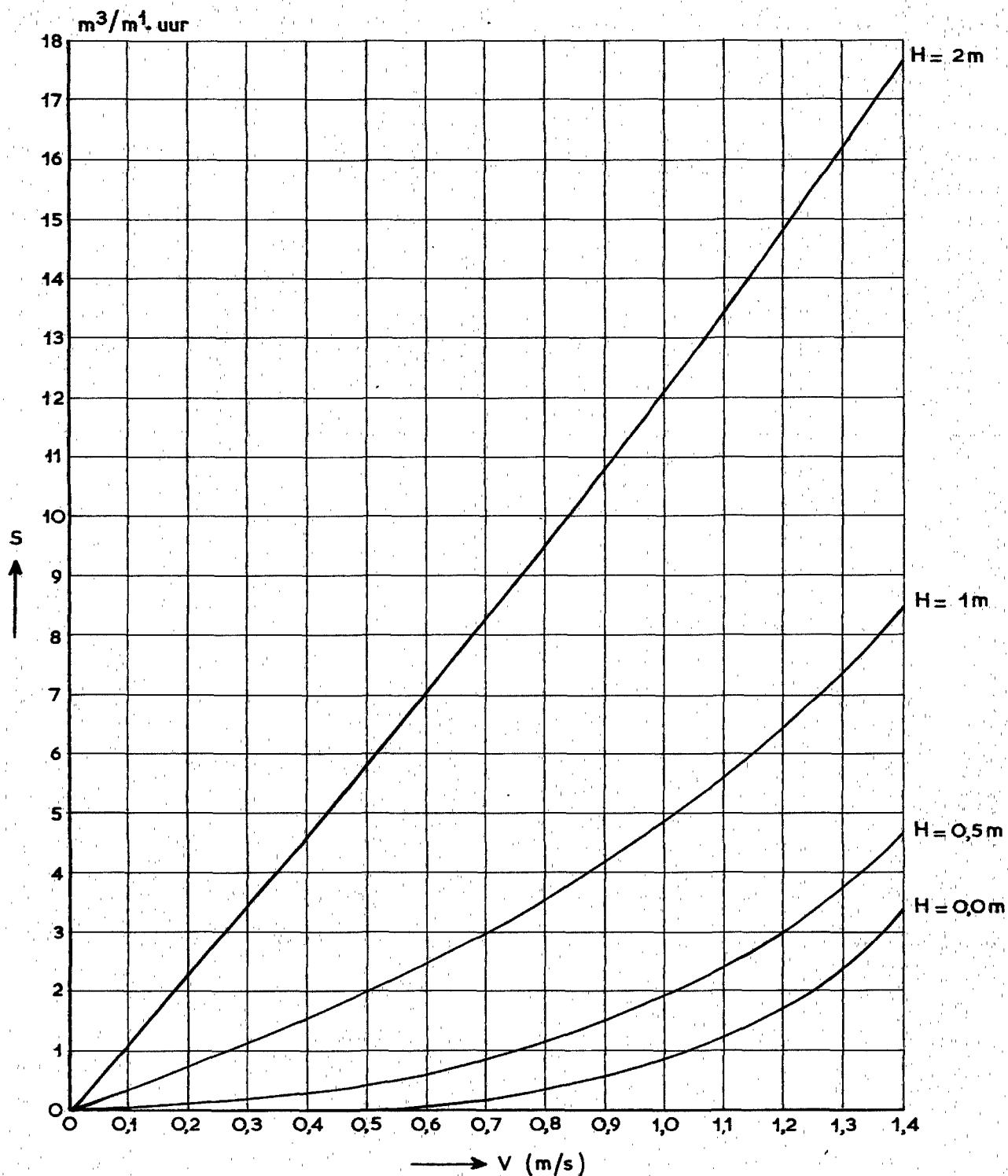
openingspercentage $\frac{1}{1+2} \times 100$



OPENINGSPERCENTAGE ALS FUNCTIE
VAN DE AANSTROOMHOEK

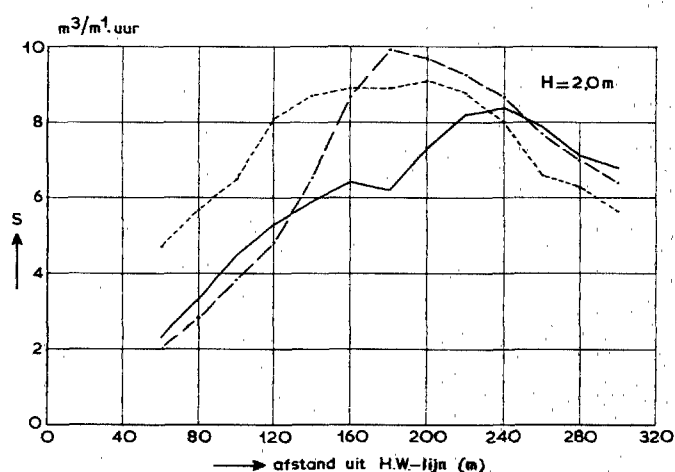
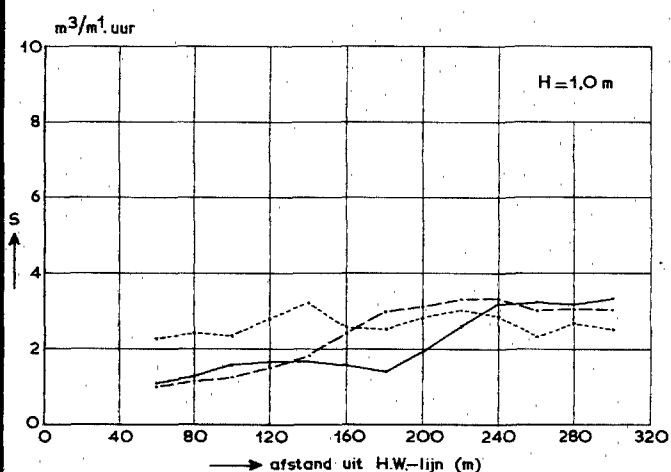
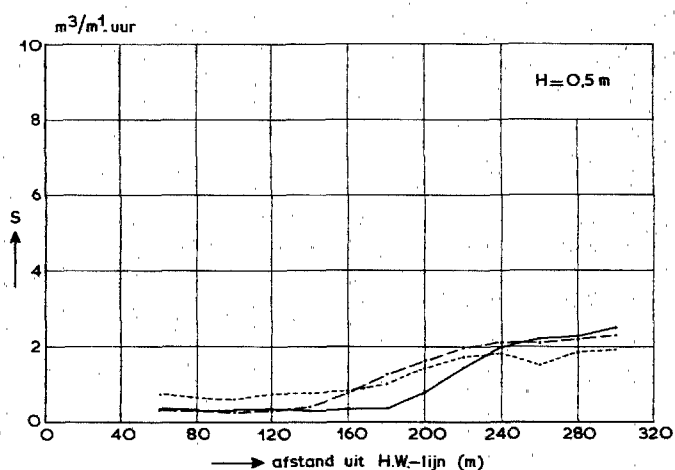
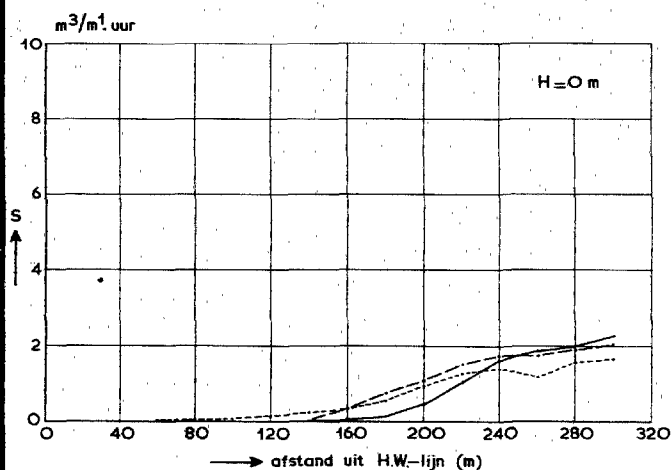


GEMIDDELTE SNELHEID BIJ KORTE
EN LANGE PAALSCHERMEN



N.B. $d = 3\text{m}$, $k = 0,04\text{m}$, $D_{50} = 0,20\text{mm}$
 $T = 6\text{s}$, $H = 0\text{m}, 0,5\text{m}, 1,0\text{m}$ en $2,0\text{m}$

ZANDTRANSPORT BEREKEND VOLGENS BIJKER [1]



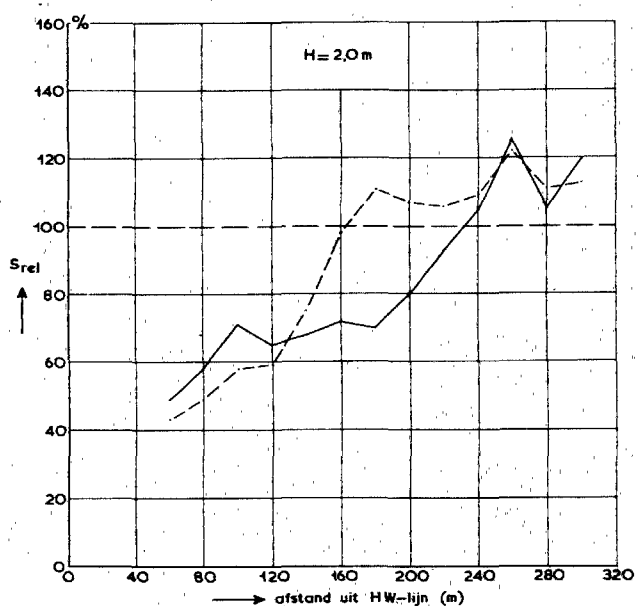
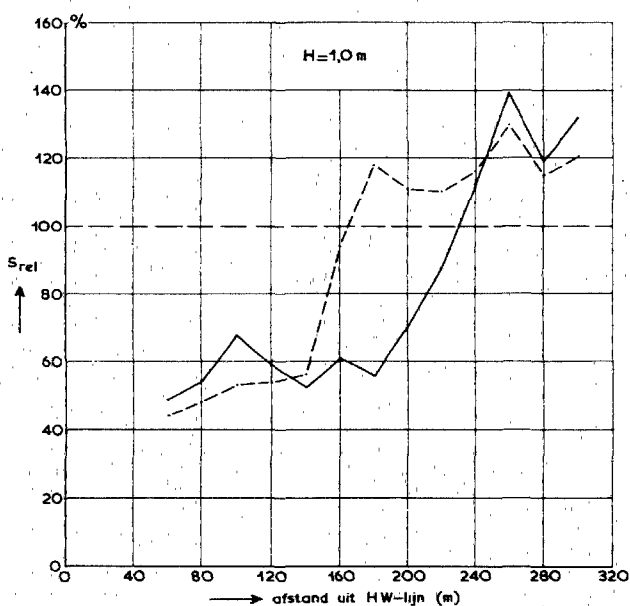
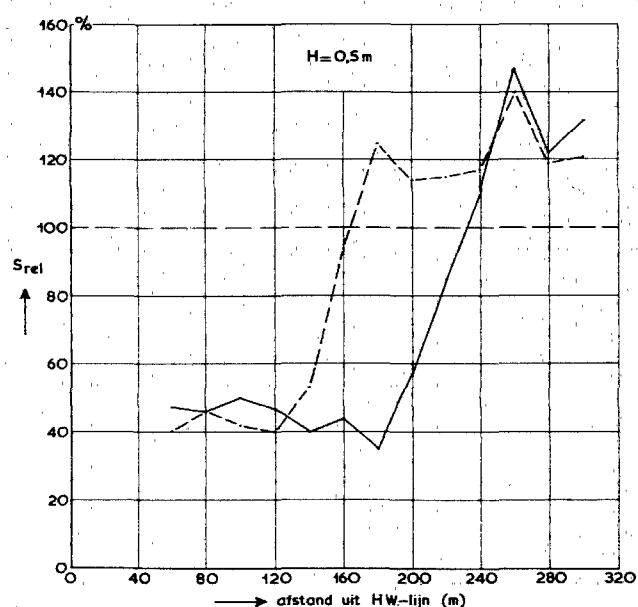
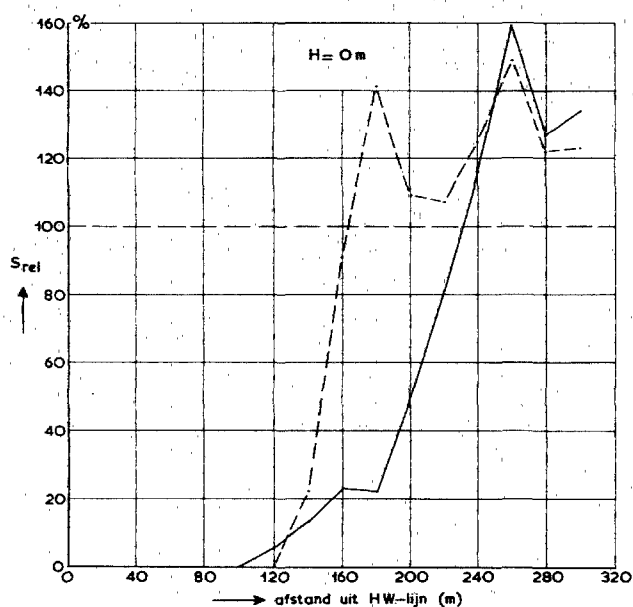
----- geen paalschermen
 -.-.-.- korte paalschermen
 ——— lange paalschermen

ZANDTRANSPORT BIJ KORTE EN LANGE PAALSCHERMEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 48



----- korte paalschermen
 ————— lange paalschermen

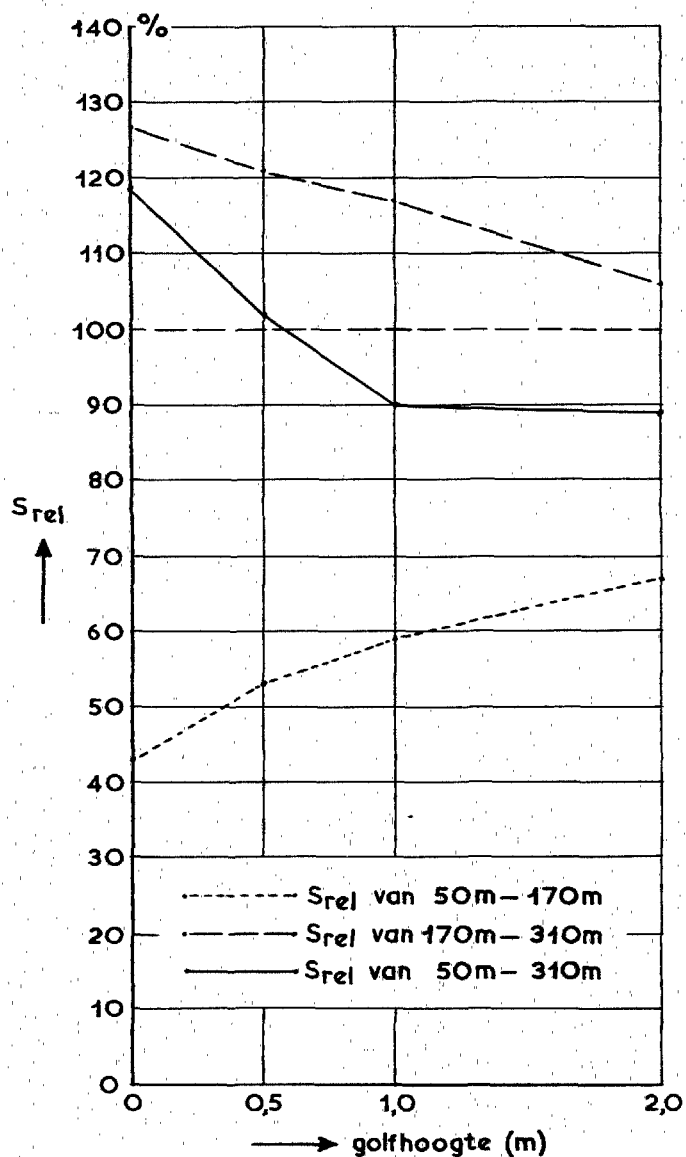
**RELATIEF ZANDTRANSPORT BIJ KORTE
 EN LANGE PAALSCHERMEN**

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

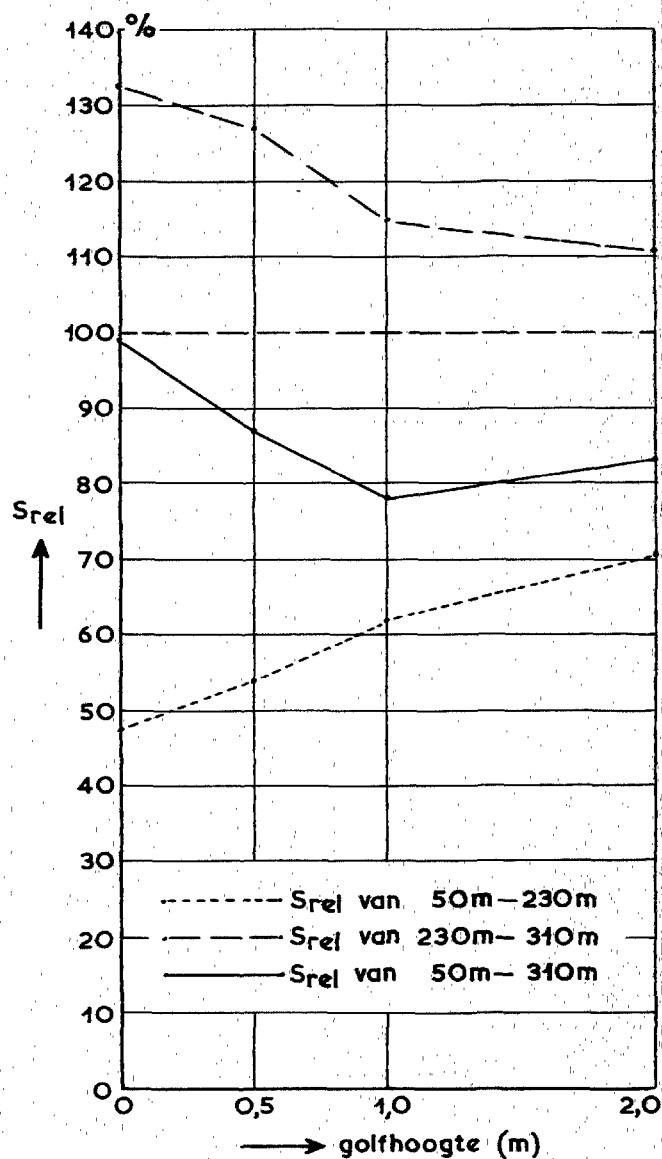
M. 1148

FIG. 49

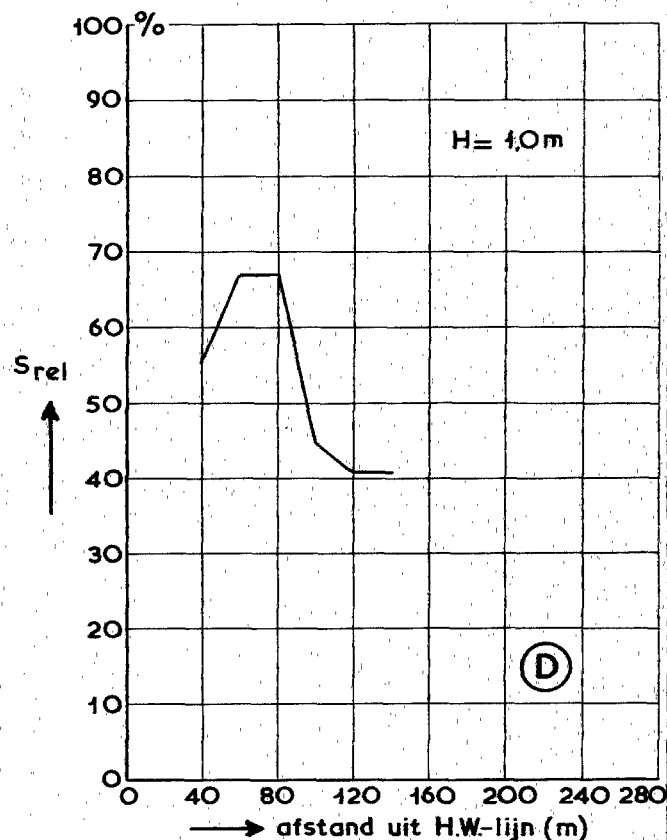
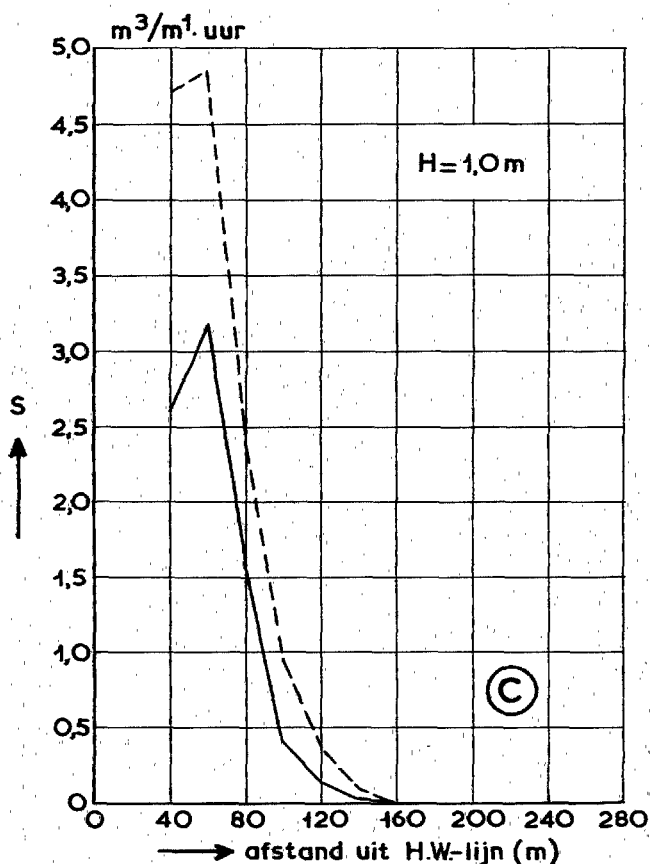
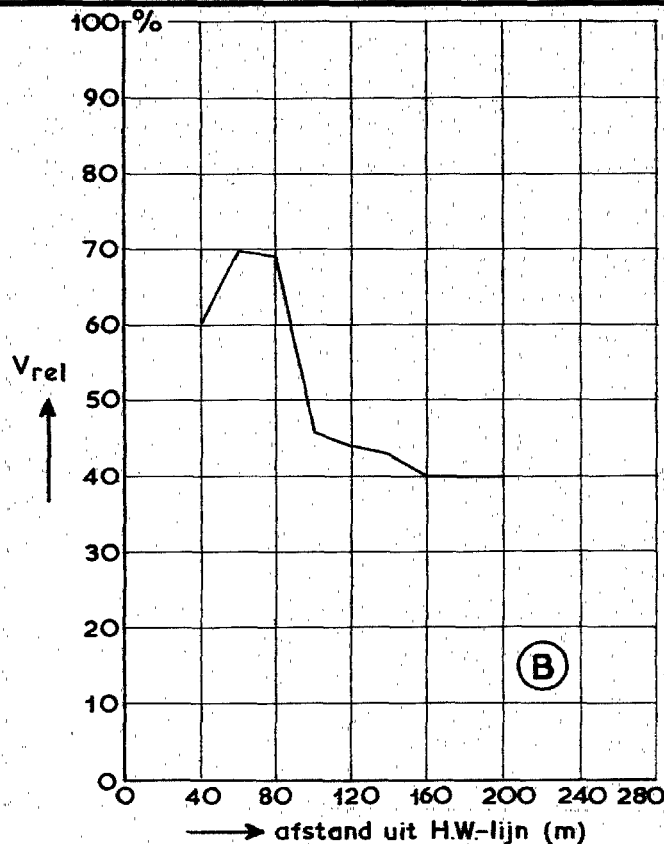
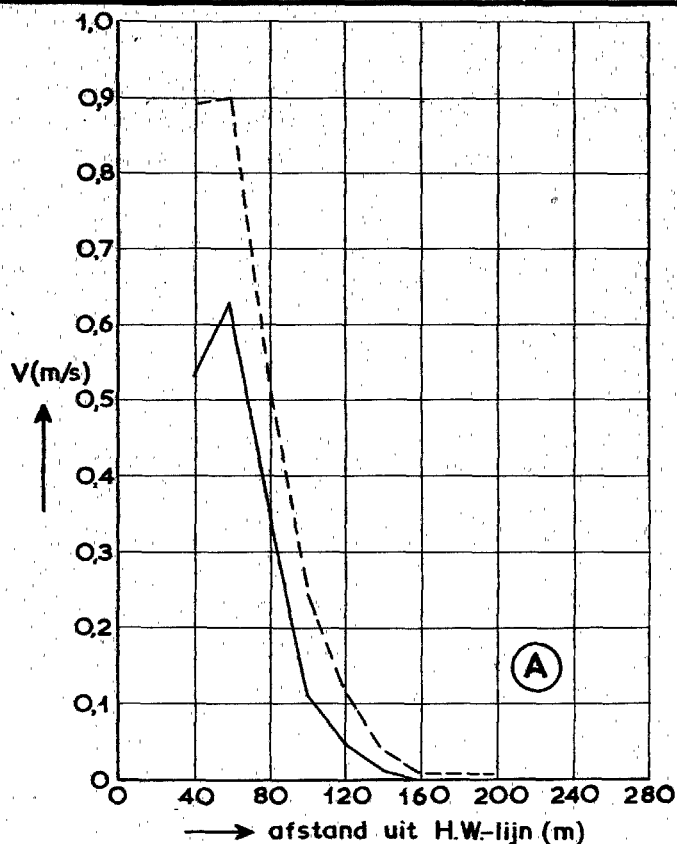
KORTE PAALSCHERMEN



LANGE PAALSCHERMEN



RELATIEF GESOMMEERD ZANDTRANSPORT



----- geen paalschermen
 ————— met paalschermen

STROOMSNELHEID EN ZANDTRANSPORT
 BIJ GEREDUCEERDE BRANDINGSSTROOM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 1148

FIG. 51

afstand uit H.W. lijn

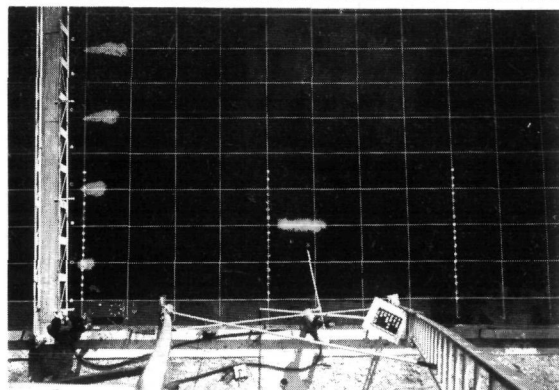
in m

r.17

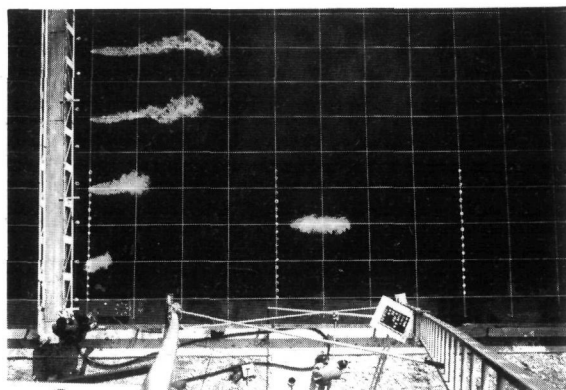
raaien 1,25 m

r.7

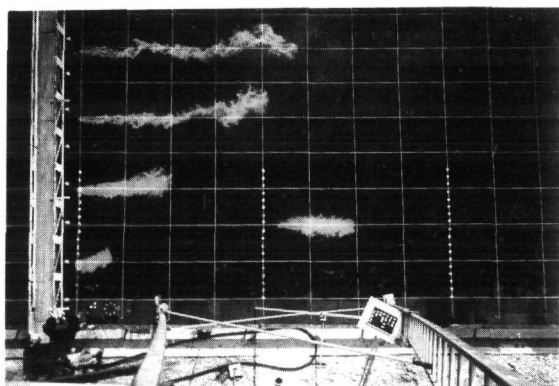
8
7
6
5
4
3
2
1
0



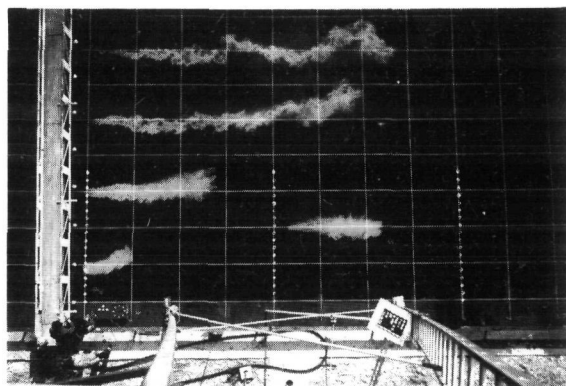
I



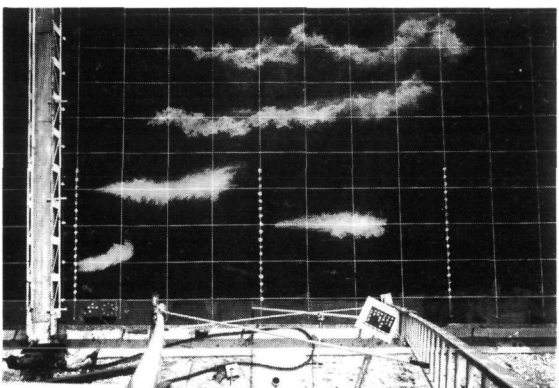
II



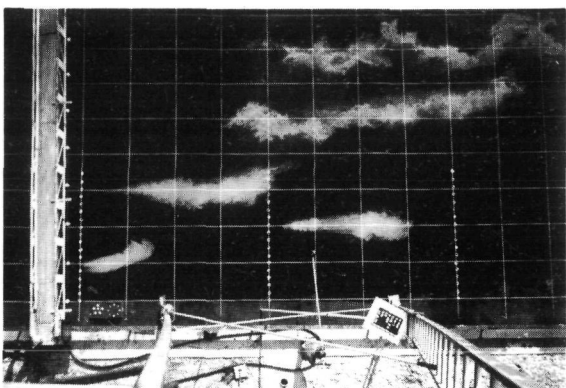
III



IV



V



VI

Paalscherm type A.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

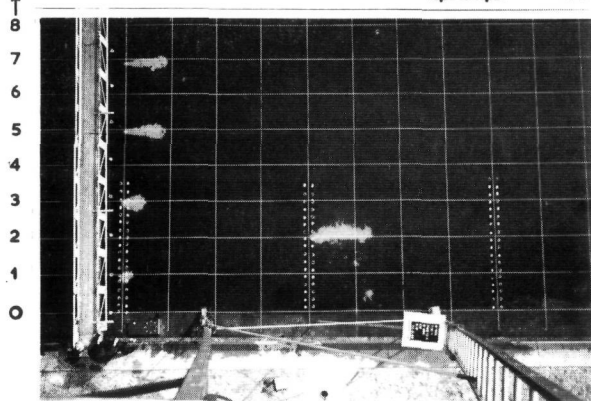
Opnamen 12 s na elkaar.

afstand tot H.W. lijn
in m

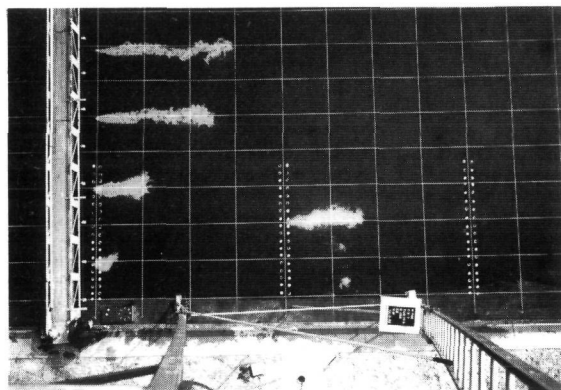
r.17

raaien 1,25 m

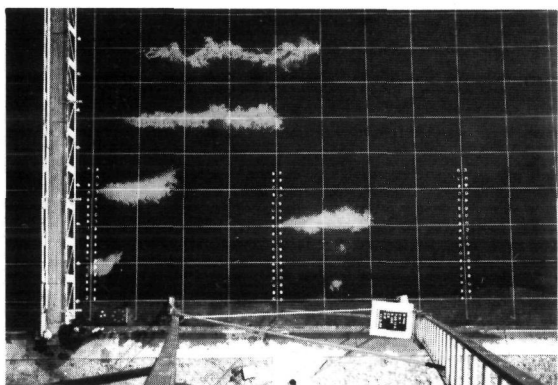
r.7



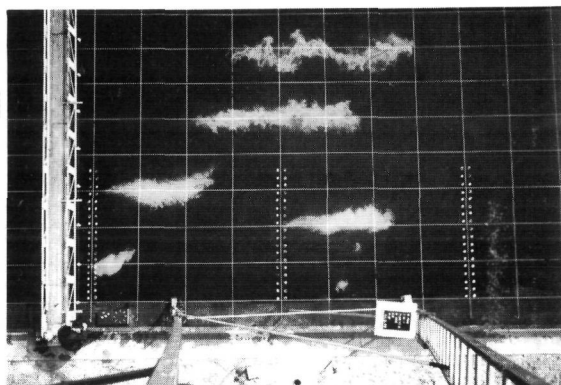
I



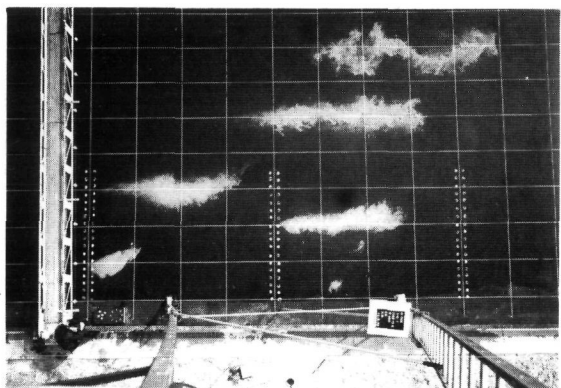
II



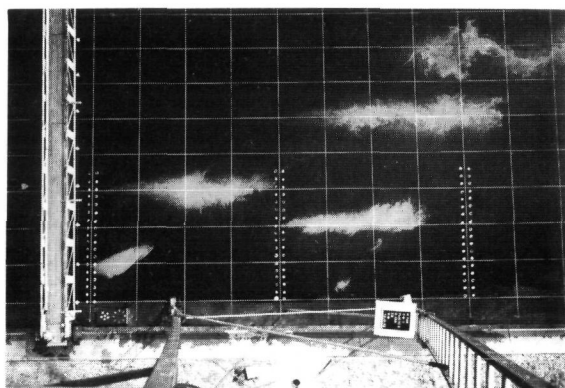
III



IV



V



VI

Paalscherm type B.

Hydraulische conditie 1.

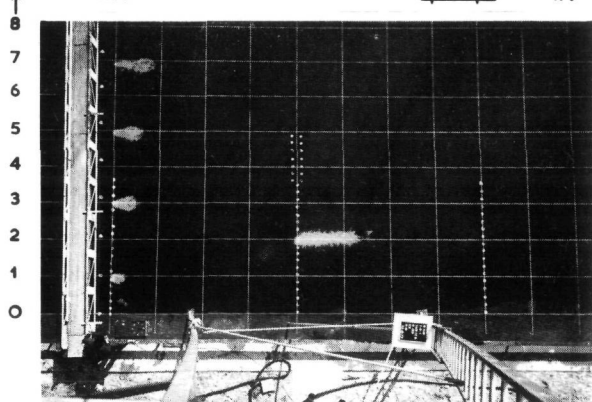
Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

Opnamen 12 s na elkaar.

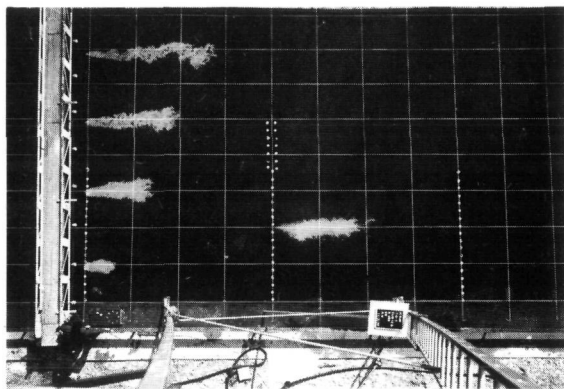
afstand uit H.W. lijn
in m

r.17

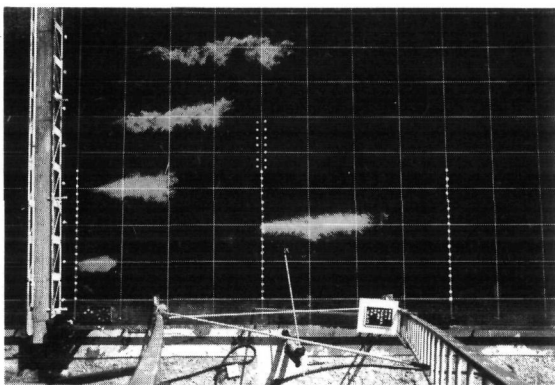
radien 1,25 m r.7



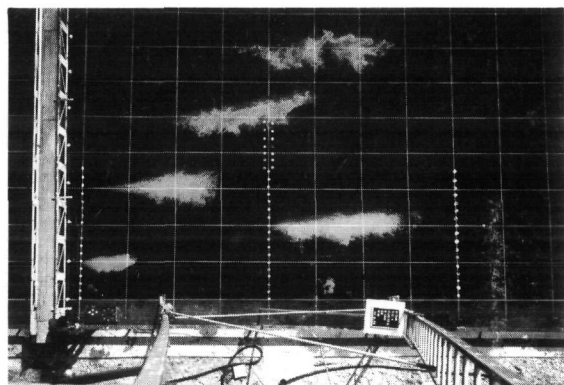
I



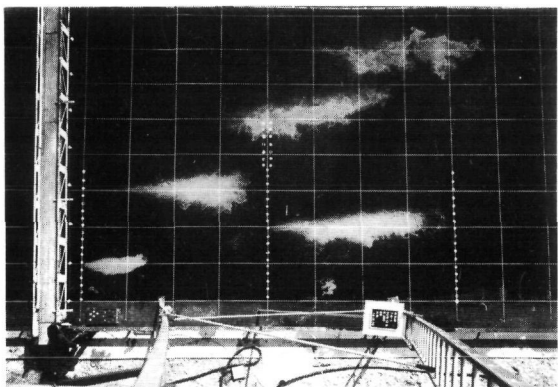
II



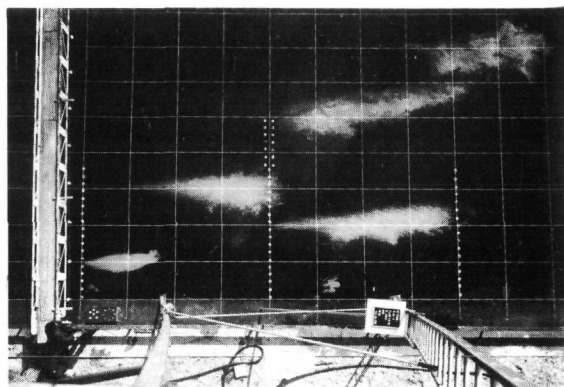
III



IV



V



VI

Paalscherm type C.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

Opgnamen 12 s na elkaar.

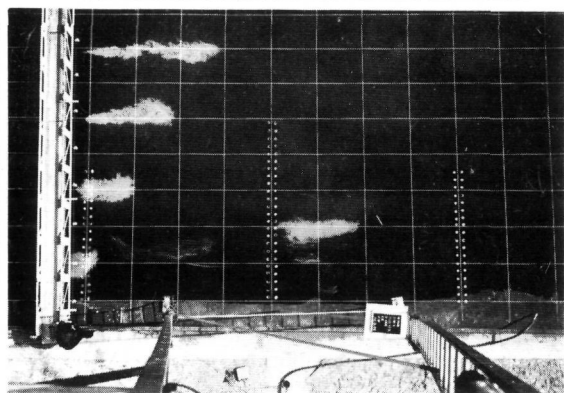
afstand uit H.W. lijn
in m

8
7
6
5
4
3
2
1
0

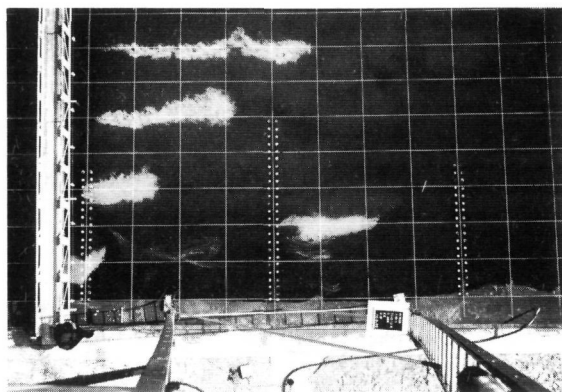
r.17

raaien 1,25 m

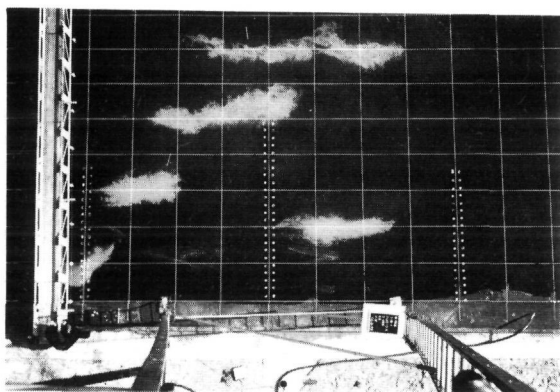
r.7



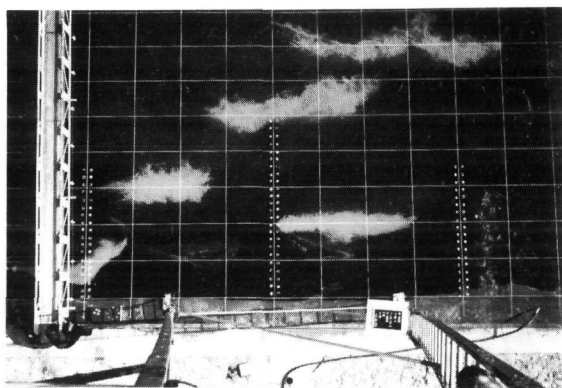
I



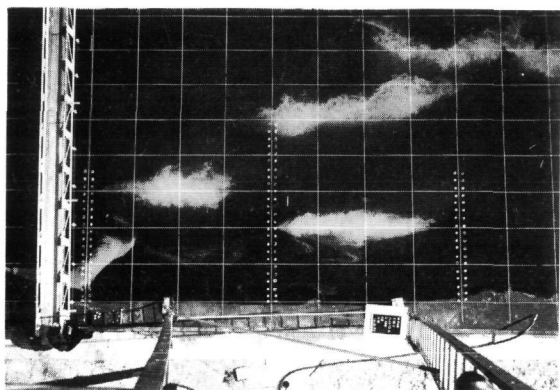
II



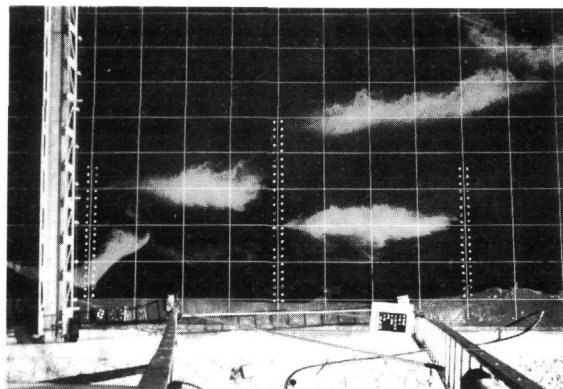
III



IV



V



VI

Paalscherm type D.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

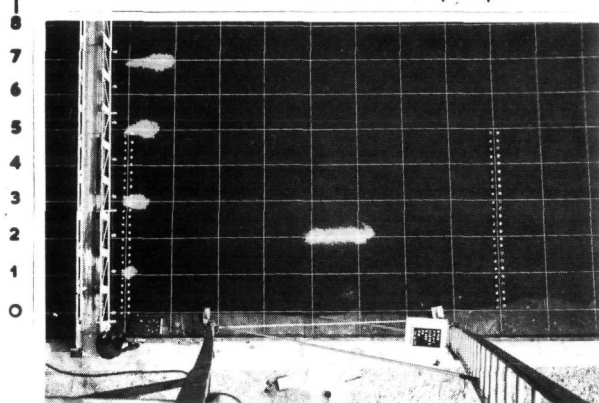
Opnamen 12 s na elkaar.

afstand uit H.W. lijn
in m

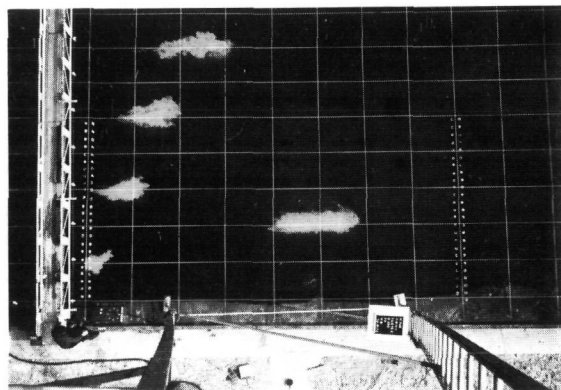
r.17

raden 1,25 m

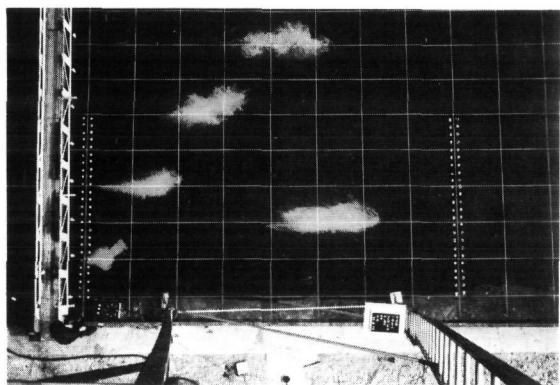
r.7



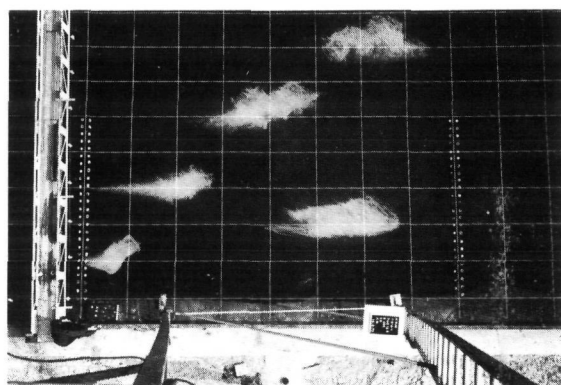
I



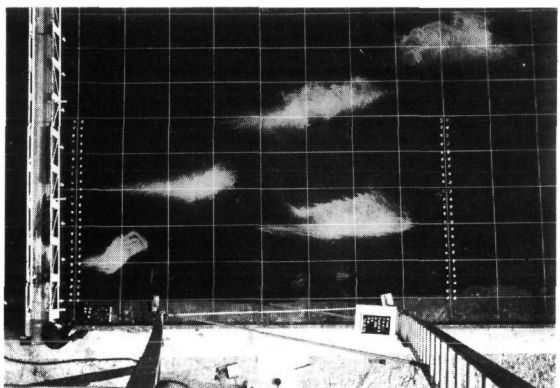
II



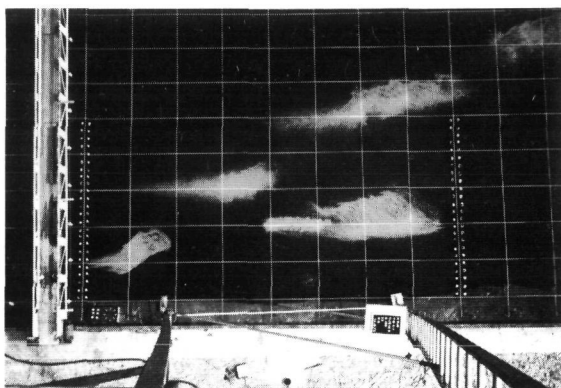
III



IV



V



VI

Paalscherm type E.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

Opnamen 12 s na elkaar.

afstand uit H.W. lijn

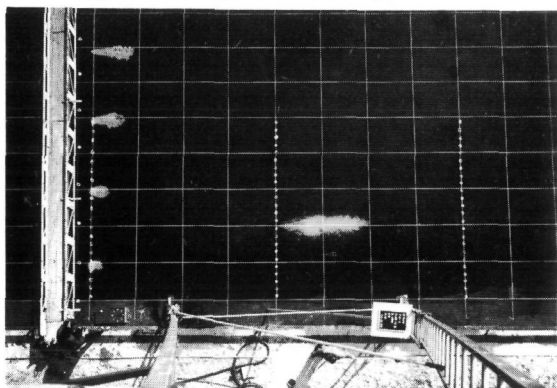
in m

r.17

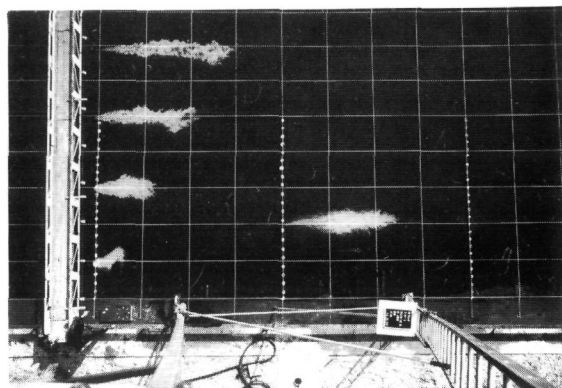
raden 1,25 m

r.7

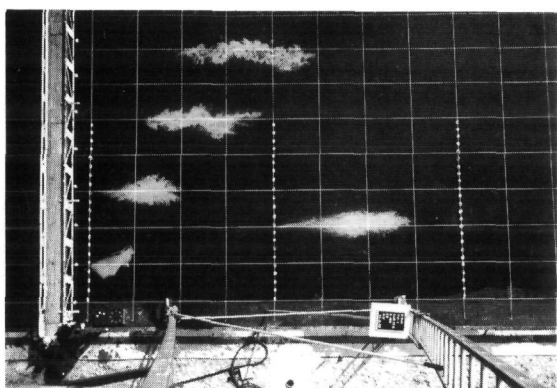
8
7
6
5
4
3
2
1
0



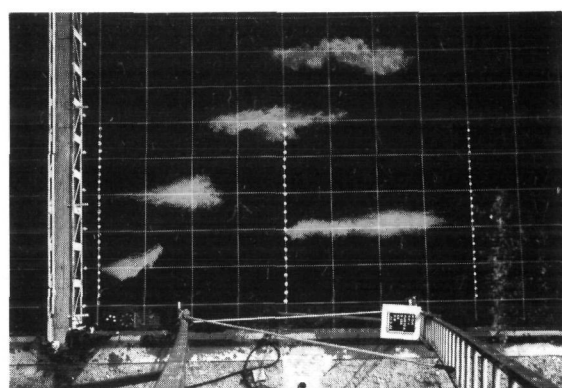
I



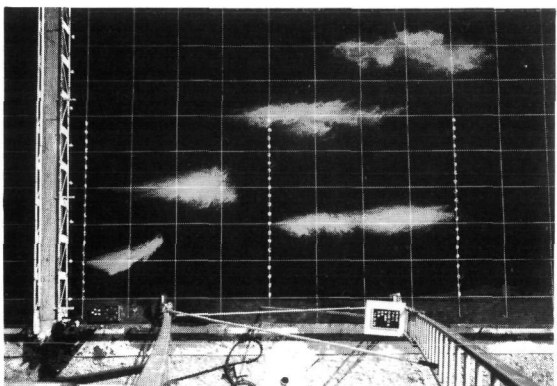
II



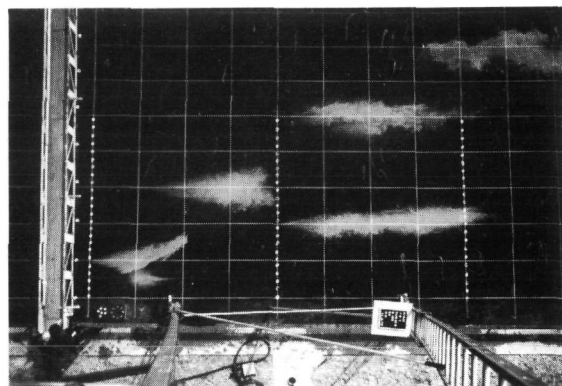
III



IV



V



VI

Paalscherm type F.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

Opgnamen 12 s na elkaar.

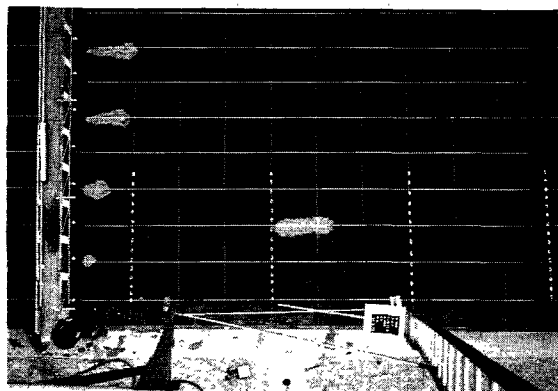
afstand uit H.W. lijn
in m

r.17

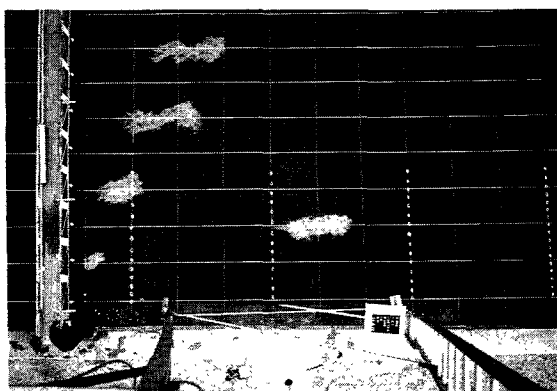
raaien 1,25 m

r.7

8
7
6
5
4
3
2
1
0



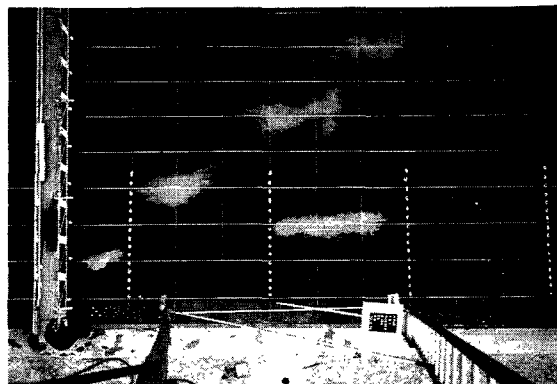
I



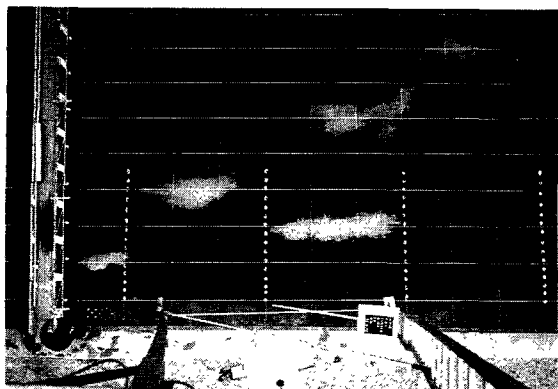
II



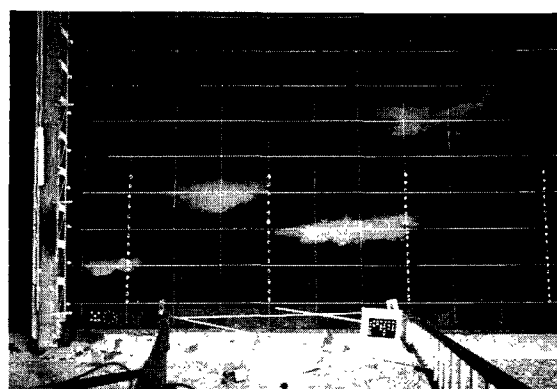
III



IV



V



VI

Paalscherm type G.

Hydraulische conditie 1.

Stroombeeld gevisualiseerd met kleurstof.

Opnamen 12 s na elkaar.

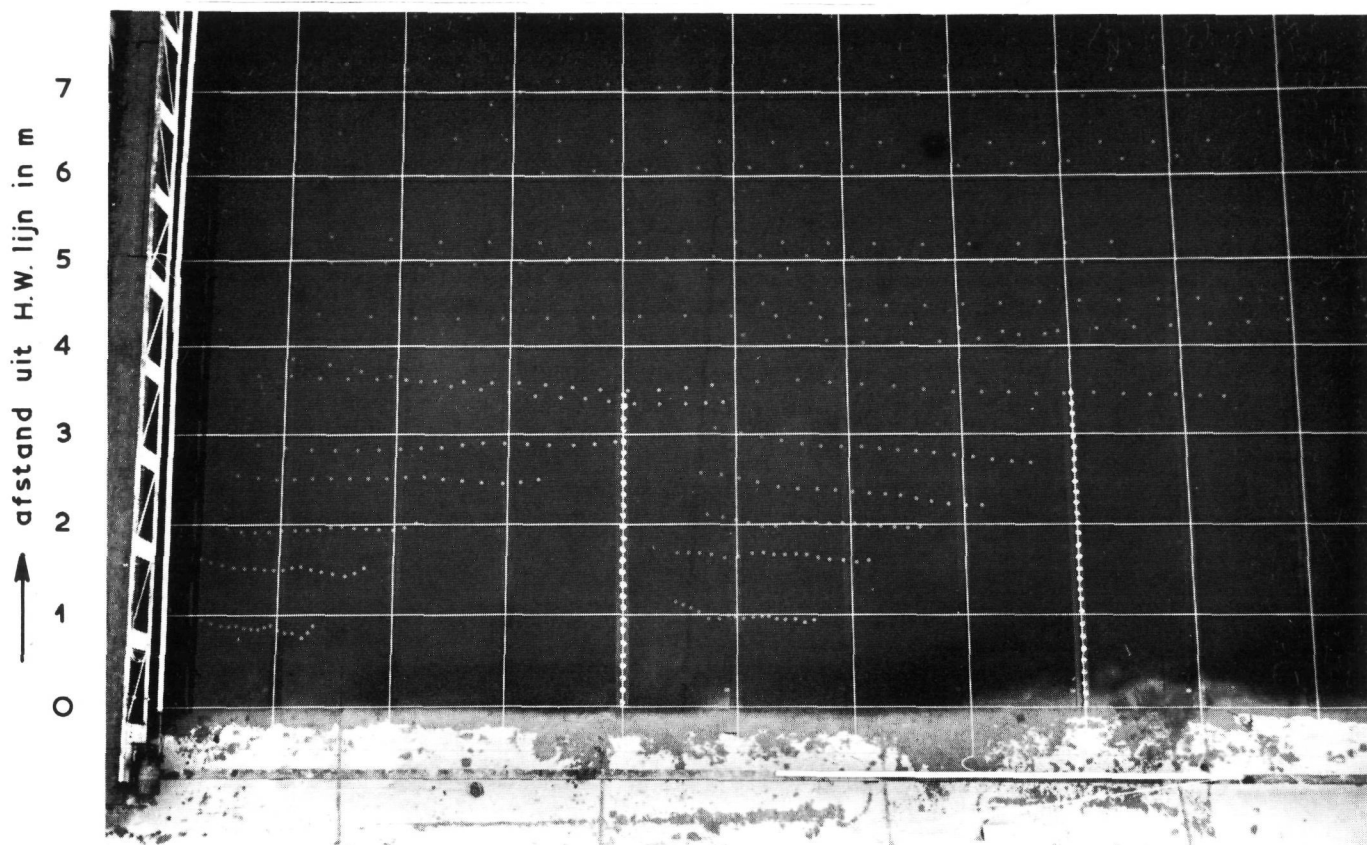


Foto 8. Paalscherm type A, hydraulische conditie 1.
"stippelfoto", opnamen 3 s na elkaar.

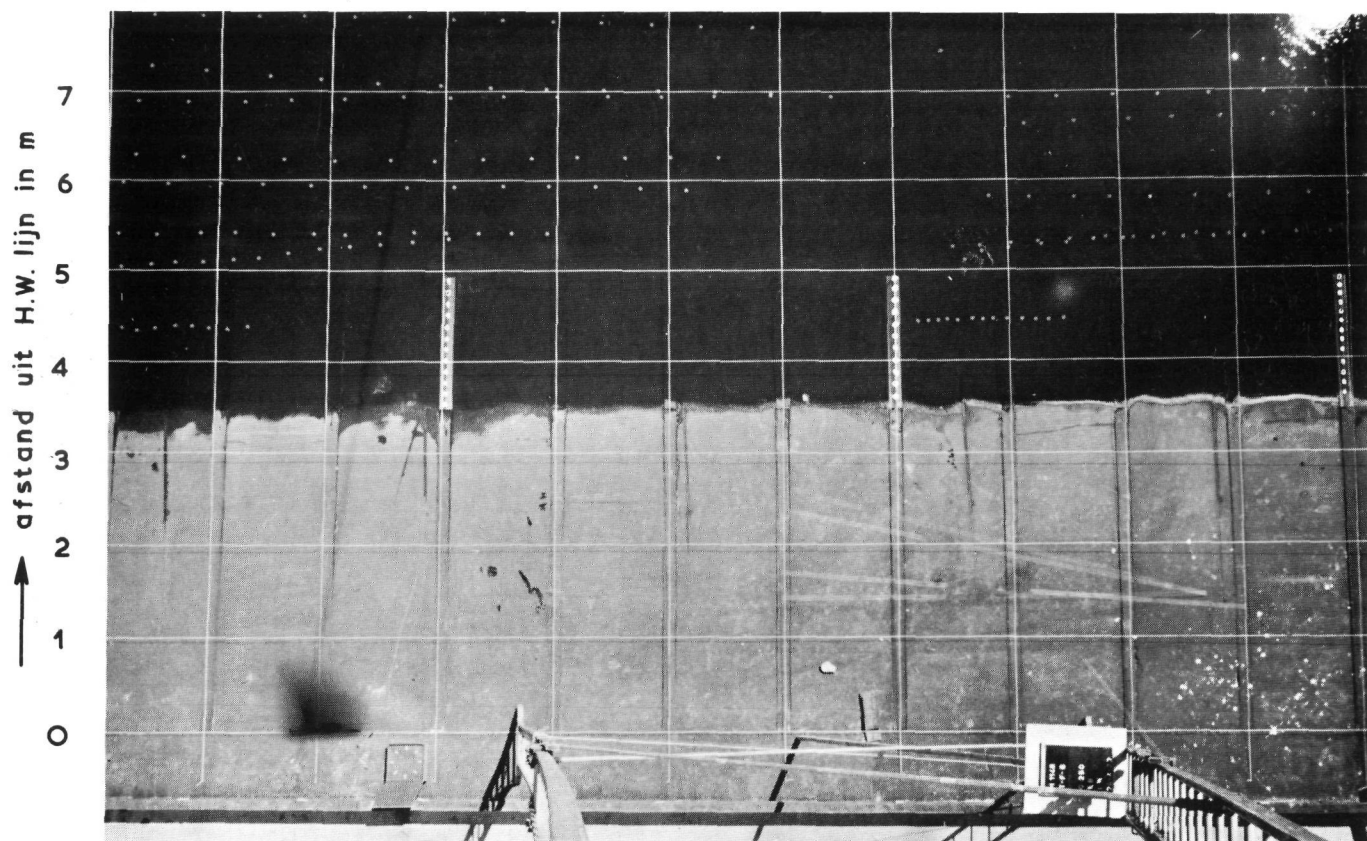
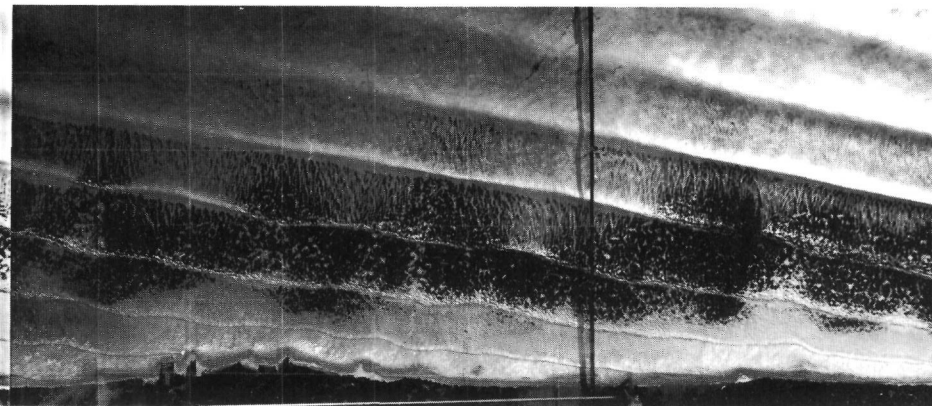


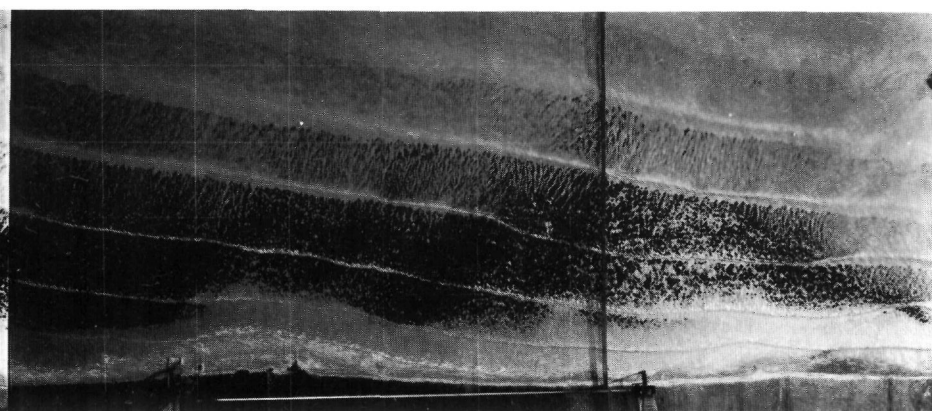
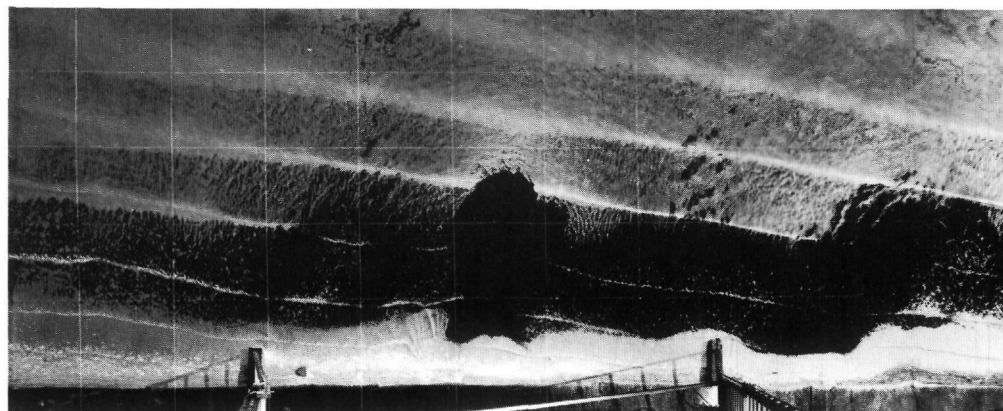
Foto 9. Paalscherm type F, hydraulische conditie 6.
"stippelfoto", opnamen 3 s na elkaar.



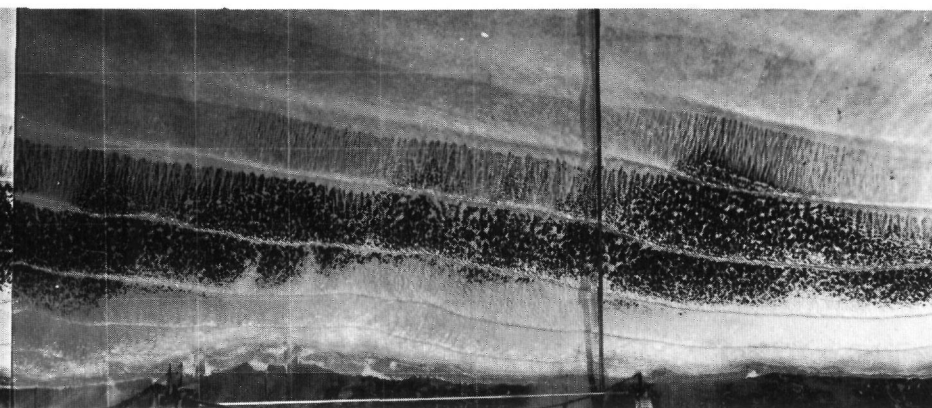
r. 5



Hydraulische conditie 3; getijstroom en brandingsstroom tegengesteld gericht.



Hydraulische conditie 4; getijstroom en brandingsstroom gelijk gericht.



Hydraulische conditie 5; alleen brandingsstroom.