

waterloopkundig laboratorium  
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

bouwfase stabiliteit breukstenen dammen,  
invloed golfwerking

AFGEHANDELD

verslag modelonderzoek

---

M 2028 deel II  
M 2057

juni 1985



---

stormvloedkering Oosterschelde

bouwfase stabiliteit breukstenen dammen,  
invloed golfwerking

verslag modelonderzoek

---

M 2028 deel II  
M 2057

juni 1985



## INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding en konklusies</u> .....	1
2. <u>Inrichting van het onderzoek</u> .....	7
2.1 Onderzoek onderbouw (Pentagoot).....	7
2.2 Onderzoek omkegeling (Pentagoot).....	11
2.3 Onderzoek bovenbouw (Scheldegoot).....	13
3. <u>Resultaten onderzoek onderbouw</u> .....	16
3.1 Overzicht en presentatie.....	16
3.2 Analyse.....	17
3.2.1 Schadecalibratie.....	17
3.2.2 Schadegedrag en invloedsfaktor voor golfwerking.....	18
3.2.3 Berekening invloedsfaktor golfwerking.....	21
3.2.4 Stroom- en golfmetingen.....	22
4. <u>Resultaten onderzoek omkegeling</u> .....	26
5. <u>Resultaten onderzoek bovenbouw</u> .....	30

## REFERENTIES

## TABELLEN

## FIGUREN

## FOTO'S

## APPENDIX:

Bouwfase stabiliteit breukstenen dammen, invloed additionale golfwerking,  
notitie verkennende studie

## TABELLEN

- 1 Onderbouw, overzicht proeven
- 2 Omkegeling, overzicht proeven
- 3 Bovenbouw, overzicht proeven
- 4 Meting golfhoogte
- 5 Meting schade (ook omkegeling T1, T2)
- 6 T1 meting stroomsnelheden
- 7 T2 meting stroomsnelheden
- 8 Meting orbitaalsnelheden (golven zonder stroming)
- 9 Calibratie schade bij stroomaanval: Pentagoot/M 1001 (ook omkegeling T1, T2)
- 10 Invloedsfaktor  $k_k$  voor de kruin
- 11 Invloedsfaktor  $k_d$  voor de damuitbouw
- 12 Invloedsfactoren  $k'$  en  $k''$  voor de kruin (uit berekende orbitaalsnelheden)
- 13 Invloedsfaktor  $k'''$  voor de kruin (uit gemeten orbitaalsnelheden bij stroom en golven, op halve waterdiepte)
- 14 Variatie  $\bar{u}_{as}$  door de golfbeweging
- 15 Berekende orbitaalsnelheden in de as voor golven zonder stroming
- 16 Omkegeling (T3...T5), meting schade
- 17 Omkegeling, invloedsfaktor  $k_0$

## FIGUREN

- 1 Proefopstelling onderbouw en omkegeling (Pentagoot)
- 2 Lokatie meetpunten stroomsnelheden
- 3 Proefopstelling bovenbouw (Scheldegoot)
- 4 Massaverdeling breuksteen, proeven onderbouw (Pentagoot)
- 5 Massaverdeling breuksteen, proeven omkegeling (Pentagoot)
- 6 Massaverdeling breuksteen, proeven bovenbouw (Scheldegoot)
  
- 7...29 Proeven onderbouw
- 7 T1, T2 Controle vervalinstelling
- 8 Calibratie schade kruin Pentagoot/M 1001
- 9 Calibratie schade talud Pentagoot/M 1001
- 10 Calibratie schade damuitbouw Pentagoot/M 1001
- 11 T1 Schade kruin als functie van de golfhoogte
- 12 T2 Schade kruin als functie van de golfhoogte
- 13 T1 Schade kruin als functie van de stroomsnelheid in as dam
- 14 T2 Schade kruin als functie van de stroomsnelheid in as dam
- 15 T2 Schade damuitbouw als functie van de stroomsnelheid in as dam
- 16 Stabiliteitsvoorspelling kruin met theoretische orbitaalsnelheid as dam op halve waterdiepte
- 17 Stabiliteitsvoorspelling kruin met theoretische orbitaalsnelheid as dam aan de bodem
- 18 Stabiliteitsvoorspelling kruin met gemeten orbitaalsnelheid as dam op halve waterdiepte
- 19 T1 Afwijking inkomende golfhoogte van  $H_0$
- 20 T1 Reduktie golfhoogte boven de kruin
- 21 T1 Asymmetrie gemeten orbitaalsnelheden boven de kruin, golven zonder stroming
- 22 T1 Gemeten en berekende orbitaalsnelheden (uit bovenstroomse golfhoogte), golven zonder stroming
- 23 T1 Gemeten en berekende orbitaalsnelheden (uit lokale golfhoogte), golven zonder stroming
- 24 T1 Invloed stroming op gemeten orbitaalsnelheden
- 25 T2 Invloed stroming op gemeten orbitaalsnelheden
- 26 T1 Detailmeting stroomsnelheden bij een verval van 1,6 m
- 27 T1 Detailmeting orbitaalsnelheden bij een verval van 1,6 m

FIGUREN (vervolg)

- 28 T1 Detailmeting stroomsnelheden bij een verval van 2,2 m  
29 T1 Detailmeting orbitaalsnelheden bij een verval van 2,2 m

30...39 Proeven omkegeling

- 30 Calibratie schade omkegeling Pentagoot/M 1001  
31 - T1 Schade omkegeling als functie van de golfhoogte  
32 T2 Schade omkegeling als functie van de golfhoogte  
33 T3, T4, T5 Schade omkegeling als functie van de golfhoogte  
34 T1 Schade omkegeling als functie van de stroomsnelheid in as dam  
35 T2 Schade omkegeling als functie van de stroomsnelheid in as dam  
36 Bepaling vergelijkende stroomsnelheid  $\bar{u}$   
37 T3, T4, T5 Schade omkegeling als functie van  $\bar{u}$   
38 T3, T5 Vergelijking schade omkegeling, bouwfase en eindfase profiel  
39 T5E1 Dwarsprofielen bezwijkproef

40...46 Proeven bovenbouw - dwarsprofielen -

- 40 I 1  
41 I 2  
42 II 1  
43 II 2  
44 III 1  
45 III 2  
46 IV 2

## FOTO'S

- 1 Pentagoot, overzicht proefopstelling onderbouw-situatie (T2)
- 2 Overzicht stroombeeld vanaf bovenstrooms (T2)
- 3 Detail van het stroombeeld rond de pijlers vanaf bovenstrooms (T2)
- 4 Pentagoot, overzicht proefopstelling bovenbouw-situatie (T3)
- 5 Overzicht stroombeeld vanaf bovenstrooms (T3)
- 6 Overzicht stroombeeld vanaf benedenstrooms (T3)
- 7 Detail stroombeeld bij extreme omstandigheden, bovenbouw-situatie, vanaf benedenstrooms (T5)
- 8 Schade omkegeling bij extreme omstandigheden, bovenbouw-situatie, vanaf benedenstrooms (T5)



## SYMBOLLEN

D	nominale diameter breuksteen = $(M_{50}/\rho_s)^{1/3}$	(m)
H	golfhoogte (regelmatig)	(m)
H <sub>o</sub>	instelgolfhoogte (regelmatig, bij afwezigheid stroming)	(m)
H <sub>si</sub>	significante inkomende golfhoogte	(m)
k	invloedsfaktor golfwerking	
	kruin en damuitbouw:	
	$= \frac{\bar{u}_{as}(0) \text{ bij } n=10 \text{ bij afwezigheid van golven}}{\bar{u}_{as}(0) \text{ bij } n=10 \text{ bij de maatgevende golfkondities}}$	(-)
	omkegeling (T3, T4, T5):	
	$= \frac{\bar{u}(0) \text{ bij } n^*=10 \text{ bij afwezigheid van golven}}{\bar{u}(0) \text{ bij } n^*=10 \text{ bij de maatgevende golfkondities}}$	(-)
k <sub>d</sub>	invloedsfaktor golfwerking voor schade aan de damuitbouw	(-)
k <sub>k</sub>	invloedsfaktor golfwerking voor de kruin	(-)
k <sub>0</sub>	invloedsfaktor golfwerking voor de (benedenstroomse) omkegeling	(-)
k', k''	berekende invloedsfaktor golfwerking =	
	$\frac{\bar{u}_{as}(0) \text{ bij } n = 10 \text{ bij afwezigheid van golven} + \hat{u}_{\text{theor.}}}{\bar{u}_{as}(0) \text{ bij } n = 10 \text{ bij afwezigheid van golven}}$	(-)
	index ' refereert aan punt as dam op halve waterdiepte	
	index '' refereert aan punt as dam aan de kruinbodem	
k'''	als k' en k'' echter met $\hat{u}_{\text{meting}}$ in plaats van $\hat{u}_{\text{theor.}}$	(-)
M <sub>50</sub>	gemiddelde massa van de breuksteen	(kg)
n	totaal aantal, per konstruktieonderdeel (zie definitie k-factoren), uit de aangegeven stroken verplaatste stenen	(-)
n*	genormeerde schade bij omkegeling (genormeerd naar strokenindeling bij T1, T2)	(-)
n <sub>1</sub>	lengteschaal	(-)
T	golfperiode (regelmatig)	(s)
T <sub>p</sub>	piek-golfperiode(n) van het golfspectrum	(s)
u	stroomsnelheid	(m/s)
$\bar{u}$	verticaalgemiddelde stroomsnelheid (rekenkundige middeling van punten, overeenkomstig de procedure voor onderzoek in M 1001)	(m/s)

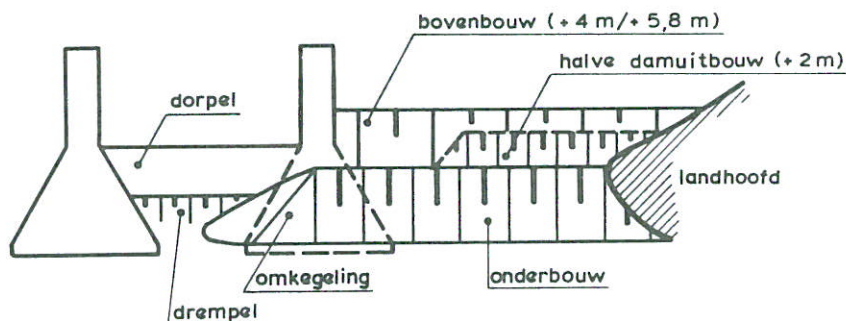
SYMBOLLEN (vervolg)

$\bar{u}$	(vergelijkende) gemiddelde stroomsnelheid in as dorpel (tenzij anders aangegeven)	(m/s)
$\bar{u}_{as}$	als $\bar{u}$ , echter in de as SVKO boven de onderbouw van de omkegeling (22,5 m uit het hart van de aangrenzende pijler)	(m/s)
$\bar{u}_{as}(0)$	als $\bar{u}_{as}$ , echter refererende aan de toestand van stroming zonder golven	(m/s)
$u_{max}$	gemiddelde maximale stroomsnelheid bij regelmatige golven	(m/s)
$u_{min}$	gemiddelde minimale stroomsnelheid bij regelmatige golven	(m/s)
$\hat{u}$	orbitaalcomponent	(m/s)
$\hat{u}_{>}$	orbitaalcomponent in golfrichting = $u_{max} - \bar{u}$	(m/s)
$\hat{u}_{<}$	orbitaalcomponent tegen de golfrichting in = $\bar{u} - u_{min}$	(m/s)
$\hat{u}_{theor.}$	berekende orbitaalcomponent volgens de lineaire golftheorie	(m/s)
$\hat{u}_{meting}$	gemeten orbitaalcomponent (in golfrichting, tenzij anders vermeld)	(m/s)
$\Delta$	relatieve dichtheid breuksteen = $(\rho_s - \rho) / \rho$	(-)
$\rho$	dichtheid (zee)water	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	dichtheid breuksteen	(kg/m <sup>3</sup> )

Definities:

- 1/jr = stroomomstandigheid met kans op voorkomen van 1/jr  
 1,2xl/jr = stroomomstandigheid, bij een debiet optreedt dat 1,2 maal zo groot  
 is als het debiet behorende bij 1/jr

KONSTRUKTIE ONDERDELEN BREUKSTENEN DAM:



## STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

### BOUWFASE STABILITEIT BREUKSTENEN DAMMEN, INVLOED GOLFWERKING

#### 1. Inleiding en konklusies

Het voorliggende verslag behandelt modelonderzoek naar de invloed van golfwerking op de bouwphase stabiliteit van de breukstenen dammen van de stormvloedkering Oosterschelde voor diverse bouwstadia. Het onderzoek is een vervolg van het modelonderzoek dat in het Roompot-model van M 1001 werd uitgevoerd naar de stabiliteit van de breukstenen dammen in aanbouw bij uitsluitend stroomaanval (M 2028, deel I [1]).

Lopende dit voorafgaande onderzoek, werd een verkennende bureaustudie naar de mogelijke invloed van additionele golfwerking uitgevoerd door ir. G.J. Akkerman. Deze bureaustudie, welke als appendix bij het voorliggende verslag is opgenomen, leidde tot de konklusie, dat de invloed van de golfwerking op voorhand niet als verwaarloosbaar mocht worden beschouwd. Met name een recentelijk uitgevoerd onderzoek naar de stabiliteit van onderwaterbermen (M 2006 [4]), hoewel in sterke mate geëxtrapoleerd, gaf aanleiding tot deze konklusie. Nadat aldus de wenselijkheid tot het verrichten van nader modelonderzoek was komen vast te staan, werd het onderzoek opgezet, uitgaande van de notities 31 DREM-M-84034 en 31 DREM-M-84087 door ir. J. Wouters ([2] en [3]).

De invloed van de golfwerking voor de verschillende bouwstadia van de breukstenen dam werd onderzocht voor een drietal toestanden:

- Stabiliteit van de onderbouw (dit is het damlichaam opgebouwd tot NAP -6 m), zonder en met halve damuitbouw tot NAP +2 m, over de onderbouw heen (proeven T1 en T2).
- Stabiliteit van de omkegeling rond de aangrenzende pijler voor een drietal bouwphase-situaties:
  - Onderbouw tot NAP -6 m, zonder en met half uitgebouwde dam (proeven T1 en T2) met de omkegeling volgens het eindfase-profiel
  - Bovenbouw gereed tot NAP +4 m, met de omkegeling volgens het bouwphase-profiel, met en zonder schuif in het aangrenzende poortje (proeven T3 en T4)
  - Bovenbouw gereed tot NAP +4 m of hoger, met de omkegeling volgens het eindfase-profiel (proef T5).

- Stabiliteit van de bovenbouw, opgebouwd tot NAP +4 m (proeven I 1...IV 2). De proeven T1...T5 werden in de Pentagoot (grote stroom- en golfgoot) uitgevoerd op lengteschaal 1:30 en de proeven I 1...IV 2 in de Scheldegoot (golfgoot) op lengteschaal 1:25.

Het onderzoek werd, conform de aanbidding met kenmerk V7191/LV2041/Akk/gve van 26 juni 1984, in eerste instantie mondeling opgedragen door ir. J. Wouters namens de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat. De schriftelijke bevestiging van de opdracht werd in september 1984 ontvangen, middels brief WT 1081. Het onderzoek vond plaats in de maanden juni en juli 1984; specifieke proeven voor de omkegeling (proeven T3...T5) werden in oktober verricht. De begeleiding namens Rijkswaterstaat werd door ir. J. Wouters verzorgd. De uitvoering van het onderzoek stond onder leiding van ir. G.J. Akkerman, die tevens het voorliggende verslag samenstelde.

Aan de hand van de in hoofdstukken 3, 4 en 5 vermelde resultaten kunnen de volgende, samenvattende konklusies worden opgemaakt:

#### Konklusies onderbouw (inklusief halve damuitbouw)

- De reproductie van de schade, bij uitsluitend stroomaanval, op de kruin, de damuitbouw en de omkegeling, is goed blijkens een vergelijking tussen de onderhavige proefopstelling ( $n_1 = 1:30$ ) en het Roompot-onderzoek [1] ( $n_1 = 1:80$ ) (tabel 9). Dit bevestigt de juiste reproductie van de relevante verschijnselen in beide modellen voor deze onderdelen van de breukstenen dam. De aantasting van het (benedenstroomse) drempeltalud, waar in het kleinschalige model [1] een spiraalstroom werd gekonstateerd, wordt echter niet in de grootschalige proefopstelling gereproduceerd. De beperkte breedte van de proefopstelling (toch nog 150 m prototype!) is hier debet aan. Gelukkigwijze bleek dat, alhoewel de stroming blijkbaar niet goed werd gereproduceerd voor het talud van de onderbouw, de golfwerking niet sterk was.
- Een eerste totaalindruk is dat de invloed van de golfwerking op de bouwphase stabiliteit van de breukstenen dam beperkt is. Het gevreesde "onderwaterberm-effekt" (onderzoek M 2006 [4], zie ook de bijgevoegde appendix) trad niet op. Achteraf bezien is de extrapolatie van M 2006 naar de onderhavige situatie te pessimistisch geweest, waarschijnlijk vooral door de extrapolatie van brekende naar niet-brekende golven).

De beperkte stabiliteits-beïnvloeding wordt veroorzaakt door de relatief kleine orbitaalsnelheden boven de onderbouw, waardoor de verstoring van de aanval ten opzichte van de zware overtrekkende stroom beperkt bleef.

- Aan de hand van de schademetingen is voor de kruin en de halve damuitbouw, de invloedsfaktor voor de golfwerking bepaald (figuren 13...15 en tabellen 10 en 11. Voor zowel de kruin als de halve damuitbouw blijkt de invloedsfaktor, bij de maatgevende golfcondities, globaal circa 1,2 te bedragen. Voor de onderbouw is deze namelijk 1,13 tot 1,18 afhankelijk van de golfperiode (respektievelijk 5 s en 10 s). Voor de halve damuitbouw wordt respektievelijk 1,26 en 1,18 gevonden; de waarde 1,26 is mogelijk een "uitschieter" geweest.

Bij de halve damuitbouw is rekening gehouden met een grotere deformatiecapaciteit ( $n = 100$  stenen ten opzichte van  $n = 10$  stenen bij de kruin). Tegen het licht van de grote vervormingsreserve en de vermelde onzekerheid ten aanzien van de waarde 1,26 lijkt een waarde van 1,2 acceptabel.

Overigens wordt bij halve damuitbouw de onderbouw, qua golfwerking, niet zwaarder belast dan bij afwezigheid van de damuitbouw.

- De complexiteit van het feitelijke stroombeeld boven de onderbouw bij stroom- en golfwerking wordt geïllustreerd aan de hand van de resultaten van een tweetal detailmetingen (figuren 26...29); naast verschijnselen als knopen en buiken in de golfhoogteverdeling over de onderbouw, blijkt de grenslaagturbulentie vlak boven de kruin de orbitaalbeweging te vertroebelen. Bij vergelijking van berekende en gemeten waarden van de orbitaalcomponent in stroomrichting, is daarom tevens een punt halverwege de waterdiepte in beschouwing genomen. De complexiteit staat een meer gedifferentieerde benadering van de invloedsfaktor, zoals voorafgaande aan het onderzoek was voorzien ([3]), in de weg.
- Niettemin blijkt, na analyse van gemeten en berekende orbitaalsnelheden (zie paragrafen 3.2.3 en 3.2.4), het mogelijk te zijn om een eerste benadering voor de invloed van de golfwerking voor de kruin van de onderbouw te verkrijgen door de orbitaalsnelheid aan de bodem uit te rekenen en deze te superponeren op de stroomsnelheid  $\bar{u}_{as}$ . Voor de berekening van deze orbitaalsnelheid blijkt als praktische benadering te kunnen worden volstaan met het toepassen van de lineaire golftheorie, uitgaande van de inkomende golfhoogte.

### Konklusies omkegeling

- Het bouwfase-profiel (T3, T4) is orde 1 steenklasse gunstiger in stabiliteit bij stroom- en golfaanval dan het eindfase-profiel (T1, T2, T5); dit is bij benadering juist de extra stabiliteit die in het prototype benodigd was (notitie 311 KWO-M-84333 [8]), zie ook figuur 38.
- Overschrijding van de toestand van begin van steenverplaatsing zal bij de omkegeling hooguit leiden tot een profiel dat, aan de aangestroomde zijde, nog ietwat compacter is dan het bouwfase-profiel (vooral door uitzakken van de bovenstroomse teen van de omkegeling); een bezwijktoestand, in termen van een explosieve schadetoename, zal echter niet plaatsvinden (figuur 39).
- Voor de omkegeling volgens het bouwfaseprofiel met de breukstenen dam gereed tot NAP -6 m (onderbouw-situatie), proef T1, ligt  $k_0$  in de orde van 1,20 of minder, uitgezonderd voor de zwaarste golfkonditie met  $T = 10$  s, waarbij  $k_0 = 1,36$  bedraagt (tabel 17). Inklusief de halve damuitbouw, proef T2, is  $k_0$  ten hoogste 1,15 voor de (bouwfase) omkegeling.

Voor de verdere opbouw van de breukstenen dam, met de bovenbouw tot NAP +4 m: proef T3, is de  $k_0$  voor de zwaarste golfkonditie 1,32; bedacht moet worden dat de omkegeling hierbij volgens het bouwfase-profiel was aangebracht. Voor de overeenkomstige situatie, echter wel met de omkegeling volgens het eindfase-profiel, proef T5, was  $k_0$  1,23.

Resumerend kan worden gesteld dat voor de omkegeling de golfinvloed ten hoogste 1,3 à 1,4 zal bedragen.

Hoewel de golfwerking voor de omkegeling bij verschillende bouwfasen van de breukstenen dam vergelijkbaar is, is de absolute stabiliteit bij de bovenbouw-situatie gunstiger: Men vergelijk hiertoe de kritieke  $Q/A$  voor de onderbouw-situatie = 5,7 m/s ( $\Delta D = 0,92$  m); omgerekend naar het aangrenzende poortje (faktor 1,2) en  $\Delta D = 1,05$  m geldt als kritieke snelheid  $\bar{u} = 7,26$  m/s. Voor de bovenbouw-situatie werd gevonden  $\bar{u} = 8,3$  m/s (figuur 37); Het gunstige verschil (14%) komt bij benadering overeen met het verschil in overgang van steen 300-1000 kg naar steen 1-3 ton, hetgeen vergelijkbaar is met de verbetering in kritieke stroomsnelheid als gevolg van het bouwfase-profiel ten opzichte van het eindfase-profiel.

- De invloed van de schuif in het aangrenzende poortje is niet aantoonbaar binnen het onderzochte gebied tot  $\Delta h = 3$  m (figuur 37); hoewel niet onderzocht, kan daarboven wel een toenemend gunstig effect door de aanwezigheid van de schuif worden verwacht.

Konklusies bovenbouw

- De weerstand tegen lijzijde-erosie, benedenstrooms van de afdeklaag 6/10 ton, blijkt bij de bovenbouw groot te zijn. Van een mogelijk verhevigde golfoverslag door de aanwezigheid van de boven de kern uitstekende afdeklaag is geen sprake, waarschijnlijk als gevolg van de grote doorlatendheid van deze afdeklaag.

Voor alle onderzochte randvoorwaarden, te weten zeewaterstanden NAP +3 m, NAP +3,7 m en NAP +4,3 m met steeds een tweetal golfhoogten ( $H_{si} \approx 2,25$  m en 2,75 m), blijkt de aantasting beperkt te blijven tot een niet doorgaande, beperkte deformatie van kruin en binnenbeloop van de bovenbouw (figuur 40...45) Het verder optrekken van de afdeklaag, bijvoorbeeld tot NAP +5 m dan wel het verder afdekken van de damkruin, is derhalve niet nodig (een veiligheidsmarge buiten beschouwing latende).

- Plaatselijke onvolkomenheden in de kruin van de afdeklaag, zoals het ontbreken van enkele stenen boven het niveau van de damkern op NAP +2 m, blijken eveneens niet tot een explosieve schade te leiden (figuur 46).
- Als redenen van de goede stabiliteit kunnen, naast de reeds vermelde, worden aangegeven:
  - het fungeren van de afdeklaag als stroom- en golfbreker
  - het mobiliseren van een grote stabiliteitsreserve door de vorming van een tweede, min of meer geprononceerde kruin op het benedenstroomse kruingedeelte, de taludverflauwing van het binnenbeloop en het ruwer worden van het oppervlak door lokale steenophopingen.

De observaties betreffende de bovenbouw stabiliteit bij de detailproeven (T3...T5) voor de omkegeling in de Pentagoot moeten als zeer indicatief worden gezien als gevolg van het niet representatief zijn van de bovenbouwmodellering (en mogelijk ook van de golfinstelling: regelmatige golven in plaats van onregelmatige golven).

Wèl blijkt de aantasting van de achter de afdeklaag liggende damkern van grote invloed op de stabiliteit van de 6-10 tons afdeklaag te zijn, getuige het verschil in stabiliteit van de steen 6-10 ton bij een (te zwakke) damkern en een gefixeerde kern (zie hoofdstuk 5). In het laatste geval trad het begin van steenverplaatsing globaal op bij een overeenkomstige situatie als in de Scheldegoot, namelijk bij een zeewaterstand welke rond het kruinniveau (NAP +4 m) was gelegen. Bij die situatie in de Scheldegoot was de deformatie van de

damkern, vanwege de zwaardere stenen dan in het onderhavige onderzoek, ook zeer beperkt.

Vermeldenswaardig is het optreden van drie-dimensionale effecten in het zog van de dam aanzet en de aangrenzende pijler, in die zin dat aldaar enige schadeconcentratie optrad. Het lijkt wenselijk dergelijke effecten op te vangen in een ruimere steendimensionering, dan wel voor enige stroomlijning te zorgen door de pijler en dam aanzet (ten dele) in te pakken met steen.



## 2. Inrichting van het onderzoek

### 2.1 Onderzoek onderbouw (Pentagoot)

De stabiliteit van de onderbouw onder invloed van uitsluitend stroomaanval in relatie tot verschillende, alternatieve bouwstadia van de Stormvloedkering, is in het Roompot-model (M 2028, deel I) onderzocht. Hierbij werd gevarieerd:

- Het aantal geplaatste dorpels: géén, bijna alle en alle dorpels geplaatst.
- De mate van uitbouw van de droog uitgereden dam tot NAP +2 m: geen uitbouw, tot halverwege het breukstenen dampoortje en tot aan de pijlerflank.

Daarnaast werd een toestand onderzocht waarbij de schuif in het aangrenzende poortje was gesloten ten behoeve van uitvoeringshandelingen. Ook werd de bestortingszwaarte gevarieerd.

Voor de proefresultaten van dit onderzoek, wordt verwezen naar het betreffende verslag [1].

Voor het vaststellen van de invloed van de additionele (= op de stroomaanval gesuperponeerde) golfwerking, was het niet nodig bovenstaande situaties - zo dit al mogelijk zou zijn - allemaal te reproduceren. Volstaan kon worden met uit te gaan van de maatgevende toestand uit het stroomonderzoek, namelijk die van alle dorpels geplaatst, hierbij werd wel de damuitbouw gevarieerd (geen damuitbouw en uitbouw tot halverwege het breukstenen dampoortje).

Uitgangspunt bij het ten behoeve van het golfonderzoek te reproduceren deel van de Stormvloedkering was, dat minimaal een deel van het landhoofd, de sectie met de breukstenen dam en de aangrenzende doorstroomopening zouden moeten kunnen worden gemodelleerd. Bij deze inschatting werd ervan uitgegaan dat het lokale stroom- en golfbeeld dan voldoende goed zou worden weergegeven. Dit geldt zeker niet voor het grootschalig golfbeeld, zoals de scheve golfval en golfrefractie en -diffractie ter plaatse van de vooroever. Het is echter waarschijnlijk dat voor het lokale stroombeeld dergelijke grootschalige verschijnselen zullen worden "overruled" door de lokale verschijnselen. Na zorgvuldige afweging werd de Pentagoot geselecteerd als de meest geschikte faciliteit, in hoofdzaak vanwege de voldoende grote breedte en diepte (respektievelijk 5 m en 1,5 m), in combinatie met een toereikend stroomdebiet. Dit maakte het mogelijk de proefopstelling op een lengteschaal 1:30 uit te voeren, waarbij van reeds aanwezige pijlers (uit het M 1451-onderzoek) gebruik kon worden gemaakt.

Een nadeel van de Pentagoot is dat slechts regelmatige golven kunnen worden toegepast. Dit nadeel werd ondervangen door van de volgende werkwijze uit te gaan:

Bij de interpretatie van de proefresultaten wordt in eerste instantie uitgegaan van de aanname dat de verhoudingsfactor voor golfaanval tussen de regelmatige golfhoogte ( $H_r$ ) en de onregelmatige significante golfhoogte ( $H_g$ ) 1,5 bedraagt (zie ook [7]). Een dergelijke, vermoedelijk conservatieve, aanname lijkt gerechtvaardigd tegen de achtergrond van onzekerheden in het totale ontwerp.

Slechts indien de golfwerking van een doorslaggevende betekenis voor de bouw-fase stabiliteit zou zijn, zou een nadere toetsing van de factor 1,5 wenselijk kunnen zijn; dit zou dan alsnog kunnen plaatsvinden met behulp van specifiek hierop gericht, twee-dimensionaal modelonderzoek in de Scheldegoot met regelmatige en onregelmatige golven. Op voorhand kon echter worden gesteld dat een dergelijke toetsing vermoedelijk wel buiten beschouwing zou kunnen blijven.

Het werd verantwoord geacht de diepte van het voorland te handhaven op NAP -13 m omwille van tijd- en kostenbesparing, met het oog op de in de Pentagoot nog aanwezige pijlers uit een voorgaand onderzoek. Aldus konden twee van de vier pijlers blijven staan en kon het voorland, inclusief een lokale verdieping bij de pijlers van 10 m (cunet), ongewijzigd blijven. De aan de breukstenen dam grenzende pijler werd enigermate aangepast, conform de prototype-randpijler. Hierbij is abusievelijk de uitkraging ten behoeve van de dorpelbalkoplegging gehandhaafd. Het effect hiervan mag echter als verwaarloosbaar worden beschouwd, doordat deze vrijwel volledig in het steenpakket van de onderbouw was ingepakt. De tweede pijler, grenzend aan de wand van de goot (figuur 1), werd niet gewijzigd en bleef derhalve aan de gootwand-zijde sterk geschematiseerd om de aanwezigheid van de gootwand te compenseren (M 1451-onderzoek).

Overeenkomstig het stroomonderzoek [1] werd (bij benadering) 300-1000 kg als steensortering verkozen, zowel voor de onderbouw als voor de damuitbouw. Daarbij werd het hoge soortelijke gewicht van het prototype materiaal verdisconteerd door de steenafmetingen van de modelsteentjes evenredig te vergroten met het verschil in  $\Delta$ . In later stadium, voorafgaande aan de proevenserie met de half uitgebouwde dam (T2), werd op de benedenstroomse omkegeling zwaarder materiaal aangebracht, bij benadering 1-3 ton (zie onderzoek omkegeling). Voor

een gewichtsanalyse van de bestortingen wordt verwezen naar figuur 3. De modelbreuksteen kan, in prototypematen, als volgt worden gekarakteriseerd:

	prototype		model (prototypematen)		$\frac{\Delta D_{\text{model}}}{\Delta D_{\text{prototype}}}$
	$\Delta$	D(m)	$\Delta$	D(m)	
300-1000 kg	1,94*	0,59	1,64	0,75	1,07

\*  $\Delta = 1,94$ , wanneer uitgegaan wordt van  $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho$  (zeewater) =  $1020 \text{ kg/m}^3$

Uit de hydraulische steenzwaarte-parameter  $\Delta D$  blijkt dat de modelsortering 300-1000 kg iets aan de zware kant is. De afwijking is echter klein, in tegenstelling tot de grote afwijking in  $M_{50}$  (1125 kg in model, tegenover 615 kg in het prototype!).

De stroken indeling kwam, qua afmetingen, overeen met die uit het stroomonderzoek [1] (tabel 5).

Het oorspronkelijk voorziene programma werd bijgesteld tijdens het verloop van de proefnemingen; met name enkele proeven met variatie van de golfkenmerken werden in het verloop van het programma "ingeruild" voor proeven met een groter verval.

Het uiteindelijk uitgevoerde programma is in tabel 1 weergegeven. De schade werd tussen de achtereenvolgende proeven steeds hersteld.

De randvoorwaarden voor het in te stellen verval, waren gebaseerd op de volgende getijkondities:

- 1/jr
- 1,2 x 1/jr (dit is een debiet van 1,2 maal het 1 maal per jaar optredende debiet)
- 1,5 x 1/jr (etcetera).

De corresponderende vervallen werden geschat aan de hand van het stroomonderzoek in de Roompot tabel 12 in [1]. Daarbij is geëxtrapoleerd naar de toestand alle dorpels geplaatst; voorts is rekening gehouden met op stroom gemeten vervallen (in [1] met  $\Delta h'$  aangeduid) en wel zodanig dat het grootste verval is aangehouden. Aldus werden de volgende globale, in te stellen vervallen verkregen:

1/jr : 1,6 m  
1,2 x 1/jr : 2,2 m  
1,5 x 1/jr : 3,0 m

De benedenwaterstand werd steeds, overeenkomstig [1], op NAP +1 m gehouden. Het aantal golven tijdens de proefduur was circa 1000. Dit hield in dat de proefduur bij golven van 5 s (prototype) 15 minuten modeltijd in beslag nam en bij 10 s 30 minuten.

De metingen omvatten per proefneming de volgende activiteiten:

- Meting golfhoogte in een referentiepunt 150 m bovenstrooms van de as van de dam in een langsraai op 22,5 m uit de as van de pijler. De golfhoogteinstelling vond om praktische redenen op stil water plaats; de hierbij nagestreefde golfhoogte  $H_0$  kan derhalve nogal afwijken van de tijdens het stromen in het bovenstroomse referentiepunt gemeten golfhoogte (figuur 19).
- Meting golfhoogte in de as van de dam in dezelfde langsraai.
- Stroomsnelheidsmetingen met een micromolen gedurende voldoende lange tijd om daaruit  $\bar{u}$  (stroomopwaarts en -afwaarts, vanaf de schrijverregistraties) te kunnen bepalen, in de volgende punten (zie figuur 2):
  - verticaalmeting in de as van de drempel op NAP, NAP -2 m en NAP -4 m
  - idem boven de dorpel in het aangrenzende poortje op NAP en NAP -2 m (beide verticaalmetingen overeenkomstig [1]).
  - eenpuntsmeting in de as van de dam zo dicht mogelijk boven de kruin (iets boven NAP -6 m)
  - eenpuntsmeting in de aanstroming ter hoogte van de drempelkruin op NAP -6 m.
- Schademeting via het tellen van uit de stroken verplaatste stenen en het fotografisch en op papier vastleggen van het shadebeeld.

Ter ondersteuning van de interpretatie werden voorts de volgende metingen verricht:

- Detailmeting van het golfhoogteverloop en het stroomsnelheidsverloop boven de onderbouw voor de situatie zonder uitgebouwde dam, bij vervallen van 1,6 m en 2,2 m en een instelgolfhoogte van 3,0 m bij  $T = 10$  s (figuren 26 en 28).
- Meting orbitaalsnelheden boven de drempel (NAP -6 m en NAP -2 m) en in het bovenstroomse referentiepunt (NAP -6 m en NAP -2 m) bij afwezigheid van stroming, ter vergelijking met de theoretische orbitaalsnelheden (tabel 8).

## 2.2 Onderzoek omkegeling (Pentagoot)

De stabiliteit van de omkegeling, voor de onderbouw-situatie van de breukstenen dam, werd in het Roompot-model (M 2028, deel I) globaal vastgesteld. Hierbij was echter uitsluitend sprake van stroomaanval.

Gekonstateerd werd een explosieve toename van de aantasting, die overigens (bij overeenkomstige steenzwaarte) ongeveer tezelfdertijd optrad als een ernstige aantasting van de onderbouw zelf, in termen van het weg eroderen van een groter deel van de afdeklaag op de betonnen kegel. Bij de half uitgebouwde dam werd deze aantasting in ongunstige zin beïnvloed.

Na deze onverwachte, kritische stabiliteit van de omkegeling bij stroomaanval, kwam de vraag naar voren in hoeverre de golfwerking van invloed zou zijn. Aan de hand van de hierbij als appendix opgenomen notitie omtrent de mogelijke golfwerking, werd besloten tot het uitvoeren van het onderhavige onderzoek in de Pentagoot (M 2028 deel II).

In eerste instantie werden alleen proeven T1 en T2 uitgevoerd voor de onderbouw-situatie zonder en met half uitgebouwde dam (tot NAP +2 m) (zie par. 2.1). De omkegeling was daarbij, overeenkomstig het Roompot-model, geschematiseerd als afdeklaag, over een betonnen kegel heen, volgens het eindfase-profiel. De invloedsfaktor voor de golfwerking bleek echter dusdanig groot te zijn (1,3 à 1,4 reductie op de stroomsnelheid in as dam) dat de prototype-stabiliteit erg kritisch was [8].

Specifiek voor de omkegeling bleven echter nog enkele vragen over, te weten: wat is de invloed van het feitelijk veel krappere bouwfase-profiel, wat is de invloed van de (geheven) schuif in het naastliggende poortje (die tot dusverre niet aanwezig was geweest in de proefopstelling en hoe groot is de vervormingscapaciteit van de omkegeling (deze is feitelijk volledig uit steen opgebouwd). In oktober 1984 werd naar deze specifieke vragen een aanvullend onderzoek gedaan in de Pentagoot (proeven T3, T4 en T5). Daarbij werd voor de breukstenen dam de bovenbouw-situatie ingebouwd, dat wil zeggen de bovenbouw gereed tot NAP + 4,0 m (of daaromtrent, zie tabel 2).

Bij proef T 3 was de, volledig uit steen opgebouwde, omkegeling volgens het bouwfase-profiel aangebracht (hiervoor werd een gemiddelde aangehouden van de inmiddels uitgevoerde prototype-storten 300/1000 kg), waarbij tevens de schuif in het naastliggende poortje aanwezig was.

Bij proef T4 werden enkele stabiliteitsmetingen verricht bij afwezigheid van de schuif.

Proef T5 diende vervolgens om na te gaan in hoeverre er verschillen waren tussen het bouwfase- en het eindfaseprofiel; zodoende was de omkegeling volgens het laatstgenoemde profiel ingebouwd. De steenzwaarte was hierbij 1/3 ton, waarmee de bouwfase-omkegeling was uitgevuld tot het eindfase-profiel. Voorts waren de aanstortingen tegen de dorpel aangebracht. Tevens werd een extreem verval (5,5 m) ingesteld, overeenkomstig de weigerende schuiftoestand, om na te gaan hoe het bezwijkgedrag zou zijn. Een overzicht van de proeven is weergegeven in tabel 2.

Voor een verdere beschrijving van de inrichting van de proeven wordt verwezen naar par. 2.1. In afwijking daarvan, en in aanvulling daarop, worden de navolgende gegevens aangeduid.

Steenzwaartekarakteristieken:

		prototype		model (prototypematen)		$\frac{\Delta D_{\text{model}}}{\Delta D_{\text{prototype}}}$
		$\Delta$	D (m)	$\Delta$	D (m)	
T1	300-1000 kg	1,94*	0,59	1,64	0,75	1,07
T2	1-3 ton	1,94*	0,84	1,70	0,90	0,94
T3, T4	300-1000 kg	1,94*	0,59	1,70	0,62	0,92
T5	1-3 ton	1,94*	0,84	1,72	0,95	1,00

\*  $\Delta = 1,94$ ; wanneer uitgegaan wordt van  $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho(\text{zeewater}) = 1020 \text{ kg/m}^3$

De stroomsnelheidsmetingen beperkten zich bij de proeven T3...T5 tot metingen in de verticaal in de as van het naastliggende poortje, op hoogten van NAP -1 m en NAP -2 m; via middeling werd de gemiddelde snelheid in het naastliggende poortje verkregen.

### 2.3 Onderzoek bovenbouw (Scheldegoot)

Na de uitbouw van de damopbouw vanuit het landhoofd tot de aangrenzende pijler met de relatief lichte steen 300-1000 kg (echter wel met  $\Delta \approx 2,0$ ), wordt daarop aansluitend een afdeklaag van 6-10 tons steen aangebracht aan de zeezijde, als onderdeel van de definitieve bekleding van de breukstenen dam. Op de kruin en het binnenbeloop van deze bovenbouw wordt de afdeklaag echter pas in een later stadium aangebracht. Gedurende langere tijd is derhalve het onafgedekte gedeelte van de dam blootgesteld aan golfaanval (golfoverslag). Bovendien kan het gevaar van de lijzijde-erosie die hieruit voort kan vloeien nog verder worden versterkt door de overspoeling van de onafgedekte kruin en het binnenbeloop bij enigermate extreme zeewaterstanden. Met name dit laatste blijkt in zijn algemeenheid voor de lijzijde-aantasting van dammen een dominerende factor te zijn (M 1741-II [5]). In de totaliteit van het ontwerp van de breukstenen dammen, werd het daarom wenselijk gevonden dit punt middels enkele modelproeven te toetsen.

Omdat onregelmatige golven bij de aanval op de damopbouw op juiste wijze moeten kunnen worden gesimuleerd (dominerende golfinvloed), werden de proeven in de Scheldegoot uitgevoerd.

Volstaan kon worden met het weergeven van een twee-dimensionale sectie van de bovenbouw op een lengteschaal van 1:25 (figuur 32). De schaalkeuze werd in hoofdzaak bepaald door de benodigde waterdiepte in de goot voor de golfopwekking en het nog kunnen reproduceren van het hoogfrequentie deel van het (twee-topfige) spectrum. Het op de goot aanwezige rondpompsysteem was na enige aanpassing geschikt om het, bij het in te stellen verval, optredende debiet rond te pompen. De steenafmetingen in het model bedroegen minimaal enkele centimeters zodat niet voor schaalafwijkingen bij de doorstroming van het steenpakket behoefde te worden gevreesd.

De benodigde breuksteen 1-3 ton (afdeklaag van de onderbouw), 300-1000 kg (kern van de bovenbouw) en 6-10 ton (afdeklaag zeezijde) werden, overeenkomstig het prototype, van materiaal met een hoog soortelijk gewicht samengesteld, namelijk basaltsteen met  $\Delta \approx 2,0$ . De massaverdelingen zijn in figuur 33 weergegeven.

De verkregen sortering 300-1000 kg bleek na analyse van de, achteraf bepaalde, massaverdeling uitgedrukt in  $\Delta D$  circa 10% te licht; het afdek materiaal 6-10 ton bleek circa 5% te zwaar, overeenkomstig de onderstaande specificaties.

	prototype		model (prototypematen)			$\frac{\Delta D_{\text{model}}}{\Delta D_{\text{prototype}}}$
	$\Delta$	D (m)	$M_{50}$ (kg)	$\Delta$	D (m)	
300-1000 kg	1,94*	0,59	400	2,03	0,51	0,90
6-10 ton	1,94*	1,36	7800	2,02	1,37	1,05

\*  $\Delta \approx 1,94$ , wanneer uitgegaan wordt van  $\rho_s = 3000 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho(\text{zeewater}) = 1020 \text{ kg/m}^3$

Dit betekent dat er, naar het prototype toe geredeneerd nog enige marge in de stabiliteit is. De ietwat te zware afdeklaag mag worden genegeerd, gezien het surplus aan stabiliteit van deze laag (zie hoofdstuk 5).

Het in te stellen spectrum had een tweetoppig karakter, met een konstante deïningskomponent (onafhankelijk van de windsnelheid) met een piekperiode van circa 11 s en een zeegangskomponent met een piekperiode rond 5 s, overeenkomstig door RWS verstrekte gegevens.

De instelling van de vervallen week af van het overige onderzoek naar de stabiliteit van de breukstenen dam, waarbij van een vaste benedenwaterstand op NAP +1 m werd uitgegaan en de bovenwaterstand zichzelf instelde als functie van het ingestelde debiet (debietafregeling); deze mogelijk wat conservatieve werkwijze was ingegeven door het domineren van de stroomsnelheid voor de onderbouw van de breukstenen dam. Bij de onderhavige, lijzijde erosie, zijn echter de extreme zeewaterstanden en corresponderende golven maatgevend voor de stabiliteit, met andere woorden: niet de stroomsnelheid maar de overspoelingshoogte domineert; daarom is hier van deze, maximum zeewaterstanden uitgegaan. Een onderlinge vergelijking van deze situaties met die uit het overige onderzoek is derhalve niet goed mogelijk. Overigens werd de benedenwaterstand in het onderhavige geval veiligheidshalve eveneens op NAP +1 m gehouden, zodat het verval mogelijk wat te groot is geweest; de invloed daarvan is naar verwachting slechts secundair.

Ingesteld zijn zeewaterstanden met een kans van voorkomen van  $10^0/\text{jr}$ ,  $10^{-1}/\text{jr}$  en  $10^{-2}/\text{jr}$ , respectievelijk NAP +3,0 m, NAP +3,7 m en NAP +4,3 m. Daarbij zijn 2 golfstappen toegepast:  $H_{si} \approx 2,25 \text{ m}$  en  $\approx 2,75 \text{ m}$ , welke voor de 1/jr omstandigheden rond de meest waarschijnlijke golfhoogte binnen de verdeling (2,50 m)



liggen. De ingestelde tijdsduur bedroeg circa 5 uur prototype. Deze randvoorwaarden zijn toegepast bij de uitgangssituatie, met een afdeklaag tot NAP +4 m (proevenseries I, II en III). In één geval werden uit de afdeklaag enkele stenen weggenomen om een gat in de top van de afdeklaag te simuleren (tot NAP +2 m): proef IV 2.

Er werden een klein aantal proeven uitgevoerd (tabel 3). De keuze van de onderzochte toestanden werd mede bepaald door de proefresultaten van de voorafgaande proeven. In overleg met de opdrachtgever werd aldus besloten een optie voor een afdeklaag tot NAP +5 m en een optie met een gedeeltelijke kruinafdekking (op NAP +4 m) niet te onderzoeken, ten gunste van de situatie dat enkele boven de damkruin uitstekende stenen van de afdeklaag waren verdwenen ("gat" in afdeklaag) en een situatie met een verder opgevoerde bovenwaterstand (tot NAP +4,3 m) bij de uitgangstoestand met een kruin op NAP +4,0 m.

De metingen bestonden uit het vaststellen van de schade bij de ingestelde golfkonditie. Naast visuele waarneming werd hiertoe gebruik gemaakt van het op de Scheldegoot aanwezige profiel-peilsysteem, waarmee in een 9-tal raaien de eventuele vervorming van de afdeklaag en het achterliggend damlichaam kon worden vastgesteld.

### 3. Resultaten onderzoek onderbouw

#### 3.1 Overzicht en presentatie

De proefresultaten zijn als volgt gepresenteerd:

- Schademetingen: tabel 5. Hieruit blijkt de toename van de schade bij de verschillende golfkondities ten opzichte van de uitgangstoestand van alleen stroming.

In figuren 11 en 12 is de schade aan de kruin uitgezet tegen de golfhoogte voor respectievelijk proeven T1 en T2.

In figuren 13 en 14 is voor dezelfde proeven de schade gepresenteerd als functie van de gemiddelde stroomsnelheid in de as boven de kruin bij afwezigheid van de golfwerking  $\bar{u}_{as}(0)$ , boven de kruin (de gemiddelde stroomsnelheid werd enigermate beïnvloed door de golfbeweging).

Het benedenstroomse talud is verder buiten beschouwing gebleven, omdat de proefopstelling in de Pentagoot de typische spiraalstroming, die in het Roompot-onderzoek [1] werd waargenomen, niet reproduceerde.

- Invloedsfactoren. Uit figuren 13...15 is bij een schade van 10 stenen op de kruin de verhouding tussen  $\bar{u}_{as}$  en  $\bar{u}_{as}(0)$  bepaald voor respectievelijk de toestand met een zekere golfkonditie en die zonder golven, bij een overeenkomstig verval. De (reciproke) verhouding tussen die twee waarden kan als invloedsfactor voor die betreffende golfkonditie worden gedefinieerd (zie tabel 10, met waarden van  $k_k$  voor de kruin).

Op overeenkomstige wijze is tabel 11, met de invloedsfactor voor de damuitbouw  $k_d$  tot stand gekomen.

Deze feitelijke, experimenteel bepaalde stabiliteitsbeïnvloeding kan worden vergeleken met een voorspelling aan de hand van de berekende stroomsnelheidstoename door de golfbeweging. Dit laatste is gedaan voor een punt op halve waterdiepte ( $k'$ ) en aan de "bodem" ( $k''$ ) boven de drempelkruin (tabel 12) voor proef T1.

De vergelijking van gemeten en aldus berekende invloedsfactoren is in figuren 16 (halve waterdiepte) en 17 (aan de bodem) weergegeven.

Figuur 19 illustreert de rechtvaardiging van het superponeren van de gemiddelde stroomsnelheid (zowel over de verticaal als over de tijd gemiddeld) en de feitelijke orbitaalsnelheid voor de stabiliteit van de stenen. In verband met de sterke grenslaagturbulentie is hierbij (noodgedwongen) van de gemeten orbitaalsnelheden op halve waterdiepte gebruik gemaakt (zie tabel 6).

- Detailmeting stroombeeld. Bij een tweetal vervallen is een detailmeting uitgevoerd van het stroombeeld boven de onderbouw, teneinde enig inzicht in de achterliggende verschijnselen te krijgen. De golfkonditie hierbij was in beide gevallen  $H_0 = 3,0$  m en  $T = 10$  s (figuren 26...29).
- Meting golfbeweging zonder stroming. Ook deze, extra, meting is uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in het feitelijke gedrag van de orbitaalsnelheden boven de drempel ten opzichte van de, via verregaande aannamen, te berekenen snelheden (respectievelijk tabellen 8 en 15). In figuren 22 en 23 is deze vergelijking grafisch gepresenteerd. De invloed van stroming op de orbitaalbeweging, bij gelijkblijvende golfkonditie, is geïllustreerd in figuren 24 en 25.

### 3.2 Analyse

#### 3.2.1 Schadecalibratie

De vervalinstelling in de Pentagoot is afgeleid uit de metingen van de vervallen over de werkhavens in het Roompot-model [1] bij de volgende debietinstellingen:  $1/jr$ ,  $1,2x1/jr$  en  $1,5x1/jr$ . Tevens zijn de vervalmetingen "op stroom" in [1] in beschouwing genomen, in die zin dat het grootste verval werd aangehouden. Hieruit resulteerde een keuze van respectievelijk 1,6 m, 2,2 m en 3 m als in te stellen vervallen. Een controle van deze ingestelde vervallen is in figuur 7 weergegeven waarbij als vergelijkingsgrootte tussen het detailmodel [1] en het onderhavige grootschalige model, de gemiddelde stroomsnelheid in de as van de dam is genomen. De overeenkomst is goed te noemen (afwijking kleiner dan orde 5%).

De beide proefopstellingen zijn ook met elkaar vergeleken voor wat betreft de reproductie van schade aan de breukstenen dam in aanbouw. Dit is, afzonderlijk voor de kruin en damuitbouw, weergegeven in figuren 8...10. Bij deze figuren moet bedacht worden dat de modelbreuksteen in de Pentagoot, omgeschaald naar het prototype, aanzienlijk zwaarder was dan die in het detailmodel van de Roompot, respectievelijk  $\Delta D = 1,23$  m tegenover  $\Delta D = 0,92$  m.

Alhoewel de schadelijnen in figuren 8...10 slechts globaal zijn in verband met het geringe aantal meetpunten (dit geldt vooral voor het onderhavige onderzoek), kan hieruit desondanks ruwweg een verhouding van kritieke stroomsnelheden, bij een overeenkomstige schadeniveau, worden bepaald. Aldus is tabel 9

tot stand gekomen, waarbij als schade een steenverplaatsing van 10 stenen ( $n = 10$ ) is aangehouden. De verhoudingsfaktor tussen de betreffende kritieke stroomsnelheden kan nu worden vergeleken met de wortel uit de corresponderende verhouding in steenzwaarte.

De spreiding in kritieke stroomsnelheden voor het detailmodel van de Roompot, komt voort uit verschillen tussen de lokaties bij Noord-Beveland, dan wel bij Noordland, als wel door afwijkende fasen in de bouw van de kering (alle dorpels dan wel bijna alle dorpels geplaatst).

De spreiding in laatstgenoemde stroomsnelheden overziende, blijkt uit de figuren 8...10 en tabel 9 dat er voor de kruin en de damuitbouw van een redelijke overeenkomst sprake is.

Grote afwijkingen treden echter op bij de reproductie van de schade op het (benedenstroomse) talud van de onderbouw; in de Pentagoot blijkt hoegenaamd geen schade aan dit talud plaats te vinden. Alhoewel de proefopstelling in het Roompot-model veel kleinschaliger was, moet de afwijking desondanks worden toegeschreven aan het niet juist reproduceren van het hiervoor verantwoordelijke stroombeeld in de grootschalige opstelling in de Pentagoot. De spiraalstroming, met de bijbehorende naar het midden van het sluitgat gerichte, dwarsstroming langs de teen van het talud, kon namelijk in de Pentagoot niet worden aangetoond (geen dwarsgerichte steenafzetting, geen afslijping van de rand van het talud). Kennelijk moet het aandrijvend mechanisme voor een dergelijke stroming worden gezocht in een grootschalig dwarsverhang dat vele doorstroomopeningen omvat. In het voorliggende verslag kan het benedenstroomse talud van de drempel derhalve niet in beschouwing worden genomen.

### 3.2.2 Schadegedrag en invloedsfaktor voor golfwerking

In de, in de appendix opgenomen, verkennende bureaustudie is de golfaanval op een onderwaterberm van een dijktalud (M 2006 [4]), vertaald naar de drempel van de breukstenen dam. In vergelijking met de stabiliteitsbenadering volgens oscillerende stroming (Komar and Miller [6]) geeft dit een aanzienlijk ongunstiger aantastingsbeeld, leidend tot veel grotere ontwerp-steendiameters. In beide benaderingen echter is sprake van uitsluitend golfaanval, hetgeen sterk afwijkt van de onderhavige situatie. Niettemin kon een "onderwaterberm-effekt" bij aanvang van het onderzoek niet op voorhand worden uitgesloten.

Volgens de verkenning wordt dit effect mogelijk veroorzaakt door het verschil in regelmatige en onregelmatige golven, verhoogde orbitaalsnelheden in de golfrichting en de aanwezigheid van de taluds. Belangrijk is verder dat in het onderzoek M 2006 de keuze van steensorteringen dusdanig was, dat in alle gevallen brekende dan wel bijna brekende golven optraden; een extrapolatie naar lagere, niet-brekende golven, is onzeker.

Overigens vervalt in het voorliggende onderzoek de mogelijkheid om het punt van de onregelmatige versus regelmatige golven op te helderen, omdat slechts regelmatige golven konden worden ingesteld.

Het mogelijk ongunstig effect van de onregelmatige golven kan in rekening worden gebracht door de ingestelde (regelmatige) golfhoogten te delen door een zekere (ervarings-)faktor en de aldus verkregen golfhoogte als significante onregelmatige golfhoogte op te vatten. De waarde van een dergelijke faktor zal echter afhankelijk zijn van de konstruktie en de golfkondities en dient feitelijk in voorkomende gevallen steeds opnieuw te worden bepaald aan de hand van vergelijkend modelonderzoek. Zo'n vergelijkend onderzoek kan hier in eerste instantie worden omzeild door de faktor op basis van ervaring te schatten en na te gaan of een realistische aanpassing hiervan al dan niet van doorslaggevende betekenis zou zijn op de uiteindelijke steendimensionering (de kans is groot dat dit namelijk niet het geval zou zijn, zodat een nader onderzoek achterwege kan blijven). Theoretisch is een bovengrens voor de faktor circa 1,85 (maximum golfhoogte gedeeld door significante golfhoogte). Praktisch is voor, overigens niet vergelijkbare konstrukties, wel een waarde gevonden van 1,0 à 1,5 ([7] en [9]). Een waarde van 1,5 lijkt hier derhalve een veilige benadering. De (bij benadering) ingestelde regelmatige golfhoogten  $H_r$  van 2,25, 3,00 en 3,75 m corresponderen bij deze aanname dus met de significante golfhoogten  $H_s$  van respectievelijk 1,50, 2,00 en 2,50 m.

De schaderesultaten in figuren 11...15 geven aan dat het gevreesde "onderwaterberm-effekt" niet optreedt; de schadetoename door de golfwerking blijkt sterk mee te vallen. Achteraf bezien is de extrapolatie van brekende naar niet-brekende golven hier waarschijnlijk in hoofdzaak debet aan.

Opvallend is ook de afwezigheid van een "kopeffect" voor de golfinvloed door de half uitgebouwde dam bij proef T2.

Uit figuren 11 en 12, waarin voor de situatie zonder damuitbouw (T1) de schade voor de drempelkruin is uitgezet tegen de golfhoogte, blijkt dat de schade-toename weinig consistent is met de golfhoogte. De toename is zelfs marginaal bij de lagere vervallen van 1,6 en 2,2 m; alleen bij het hoogste verval van 3 m is een vrij sterke toename te constateren bij de zwaarste golfaanval ( $H_0 = 3,75$  m,  $T = 10$  s).

Voor de situatie met een half uitgebouwde dam (T2) is dit beeld overeenkomstig, zij het wat minder "springerig".

De geringe consistentie van de schade met de golfhoogte (lees hiervoor: de complexiteit van het verschijnsel), sluit een verfijnde analyse, aan de hand van direkt uit de golfhoogte afgeleide grootheden (orbitaalsnelheid etcetera), uit.

Dit is ook terug te vinden in figuren 13...15, waarin de schade tegen de referentie-stroomsnelheid in de as van de drempel is uitgezet. Als referentie-stroomsnelheid geldt hier de verticaalgemiddelde stroomsnelheid bij uitsluitend stroomaanval. Deze definitie is nodig omdat door de golfwerking de tijd-gemiddelde stroomsnelheid over het algemeen afnam (dit geldt vooral bij  $T = 10$  s: tabel 14). Bij de stabiliteitsbenadering met invloedsfactoren dient een dergelijke afname echter buiten beschouwing te blijven omdat gerefereerd wordt aan debieten ( $Q/A$ -stroomsnelheden) of vervallen.

Uit de verschuiving van de schadelijnen kan de invloedsfactor voor de golfwerking, althans voor zover uitsluitend werd verkregen, worden geschat.

De volgende definitie wordt gehanteerd:

De invloedsfactor ( $k_k$  en  $k_d$ ) is de referentie-stroomsnelheid in de as van de onderbouw zonder golfwerking waarbij een schade van 10 stenen ( $n = 10$ ) optreedt, gedeeld door de stroomsnelheid in de as van de onderbouw bij de betreffende golfwerking waarbij dezelfde schade-grootte optreedt. De betreffende waarden van de stroomsnelheden zijn uit figuren 13...15 verkregen door inter- of extrapolatie. De stroomsnelheid in de as bij golfwerking werd bepaald door deze, voorafgaande aan de proef bij het ingestelde verval (dus zonder golven) te meten.

De schade van 10 stenen is gekozen op basis van een zo groot mogelijk aantal beschikbare meetpunten, terwijl dan sprake is van een enigszins ontwikkelde schade.

In tabellen 10 en 11 zijn voor de kruin en de damuitbouw de invloedsfactoren weergegeven voor de onderbouw-situatie.

De spreiding in de waarden van de invloedsfactoren is groot. Lichte tendenzen zijn dat een grotere periode, zowel als een grotere golfhoogte de invloedsfactor vergroten, alhoewel dat niet in alle gevallen opgaat. Anderszijds liggen alle waarden tussen 1,0 en 1,4 wat betekent dat bij de gehanteerde golfbelasting de beïnvloeding in elk geval niet extreem groot is. De tabellen overziende, zou voor zowel de kruin als de damuitbouw globaal 1,2 kunnen worden aangehouden als ontwerpwaarde; hierbij zijn de uitschieters (in beide gevallen bij  $H_0 = 3,75$  m en  $T = 10$  s) niet in beschouwing genomen, omdat deze naar verwachting "opgevangen" kunnen worden door enige reserve in de toelaatbare steenverplaatsing (ten opzichte van het wel heel scherpe criterium van 10 stenen voor de kruin en 100 stenen voor de damuitbouw).

### 3.2.3 Berekening invloedsfactor golfwerking

Voor de kruin is het denkbaar dat een berekening van de relatieve verhoging van de stroomsnelheid door de golfwerking tot een redelijke schatting van de invloedsfactor zou leiden. De moeilijkheid is echter de orbitaalsnelheid nauwkeurig te berekenen. In het navolgende zal worden nagegaan in hoeverre met een zeer eenvoudige berekening van de orbitaalsnelheid via de lineaire golftheorie al dan niet een redelijke overeenstemming van de berekende en gemeten invloedsfactor kan worden verkregen.

Vooreerst is in figuur 18 nagegaan in hoeverre het superponeren van de gemeten orbitaalcomponent (in golfrichting) en de verticaalgemiddelde stroomsnelheid ook inderdaad bepalend is voor de stabiliteit. Hierbij is de gemeten orbitaalcomponent of halve waterdiepte in de as van de drempel aangehouden, omdat dicht aan de "bodem" de orbitaalbeweging werd overheerst door de excessieve grenslaagturbulentie (overigens is zo'n versterkte grenslaagturbulentie - via een schijnbaar sterk vergrote bodemruwheid - een bekend verschijnsel bij metingen van stroming in een golfveld).

De overeenstemming is, zeker gezien de spreiding in gemeten waarden van  $k_k$ , als goed te kwalificeren. Dit houdt in dat de momentane stroomsnelheidstoename als quasi-permanent mag worden opgevat en dat de grenslaagontwikkeling volledig door de stroming wordt gedomineerd.

Berekening van de orbitaalsnelheid in hetzelfde punt (op halve waterdiepte), waarbij gerelateerd is aan de (nagestreefde) instelgolfhoogte  $H_0$ , leidt tot een wat te grote invloedsfactor (dus conservatief resultaat), getuige figuur 16. Wordt daarentegen de orbitaalsnelheid aan de kruinbodem berekend, dan is de overeenkomst beter: figuur 17. Hierbij blijft de voorspelde factor iets te hoog, vooral ingeval van de situatie met de damuitbouw (die op geen enkele wijze in de berekening in beschouwing is genomen). Deze, wat veilige benadering is praktisch gezien echter alleszins acceptabel.

Een verklaring van deze overeenstemming, moet vooral gevonden worden in de redelijke overeenkomst tussen gemeten en berekende orbitaalsnelheden. Hierop wordt in het navolgende, aan de hand van de stroom- en golfmetingen, nader ingegaan.

#### 3.2.4 Stroom- en golfmetingen

Enige aanvullende metingen naar het stroom- en golfbeeld boven de onderbouw werden uitgevoerd teneinde meer inzicht in deze verschijnselen te verkrijgen. Deze omvatten het uitvoeren van een detailmeting van stroom- en orbitaalsnelheden boven de kruin bij een verval van 1,6 m en 2,2 m en golven met  $H_0 = 3,0$  m en  $T = 10$  s (T1A4 en T1B4) en een serie metingen van orbitaalsnelheden ingeval van alleen golven (tabel 8, proeven a t/m m).

Daarnaast werd informatie verkregen uit de standaardmeting van stroom- en orbitaalsnelheden en golfhoogten bij de schademetingen (tabellen 4, 6 en 7).

#### Golfhoogteverloop

Opmerkelijk is dat voor golven zonder stroming geen golfversteiling optreedt boven de onderbouw; daarentegen zijn de golfhoogten in de as lager dan de inkomende golfhoogte (figuur 20), met name voor de grote periode van 10 s. Met stroming is er een groot verschil tussen beide golfperiodes; bij 10 s vormt de golf (schijnbaar) niet, terwijl bij 5 s een sterke uitdoving boven de drempel plaatsvindt (figuur 20) althans voor de as van de drempel. Dit complexe beeld wordt geïllustreerd aan de hand van figuren 26 en 28, waarin het golfhoogteverloop boven de onderbouw is uitgezet.

Te onderscheiden zijn grote insnoeringen en uitdijingen boven de kruin, met andere woorden, er treden buiken en knopen op, kennelijk als gevolg van stroomreflectie en -refractie en golfreflectie ter plaatse van de kering. Dit verklaart de verschillen in uitdovingsgedrag tussen beide periodes; de



plaatsafhankelijkheid is groot en er kan dus niet gesproken worden over één zekere golfhoogte boven de kruin. De golfhoogte-*vervorming* boven de kruin was wel redelijk stabiel in de tijd.

Opgemerkt moet worden dat golfreflectie tegen het golfschot naar verwachting niet van belang is geweest doordat golfdempende, roterende gazen achter het golfschot waren aangebracht.

In figuur 19 is uitgezet in hoeverre de nagestreefde instelgolfdiepte ook daadwerkelijk bovenstrooms werd gemeten. Voor de situatie zonder stroming was dit goed (daar was de instelling ook op afgeregeld). Met stroming bleef de bovenstroomse golfhoogte soms nogal achter bij de instelwaarde (op stil water), waarbij de grote periode het meest achterbleef.

Résumerend kan worden gesteld dat de hiervoor gepresenteerde metingen een goede verklaring geven van de meevallende stabiliteit bij golfwerking, omdat de golfhoogte door de over de onderbouw trekkende stroming eerder de neiging vertoonde te worden uitgedoofd te worden versterkt. Of een en ander wordt hierna nog verder ingegaan.

#### Orbitaalsnelheden zonder stroming

Het beeld van de orbitaalsnelheden boven de kruin is duidelijk asymmetrisch (figuur 21), vooral bij de golven van 10 s. Dit geldt zowel voor de kruinbodem als op halve waterdiepte.

De relatief grotere component in de golfrichting deed vrezen dat de berekende orbitaalsnelheden (volgende lineaire theorie) relatief te lage voorspellingen zouden geven. Dit is echter niet zo (figuur 22). Zowel aan de bodem als op halve waterdiepte blijkt de in de golfrichting gemeten component aanzienlijk kleiner te zijn dan op grond van de berekeningen te verwachten is. Het eerder geconstateerde uitdovingsverschijnsel voor de golfhoogte blijkt dus ook in de orbitaalsnelheden door te werken.

Dit wordt nog eens bevestigd door figuur 23, waarbij de gemeten, lokale golfhoogte is gebruikt bij de berekening van de orbitaalsnelheden. De overeenstemming met de gemeten orbitaalcomponent is nu redelijk goed, vooral voor het punt op halve waterdiepte.

### Orbitaalsnelheden bij stroming (component in golfrichting)

Een vergelijking van de orbitaalsnelheden bij stroming en golven ten opzichte van een golfveld zonder stroming, bij eenzelfde golfinstelling op stil water, is in figuur 24 weergegeven. Aan de bodem is sprake van een grote spreiding, die wordt veroorzaakt door de vertroebeling van de orbitaalbeweging door de grote grenslaagturbulentie bij golven met stroming.

Op halve waterdiepte echter, blijkt een redelijk consistent verband te bestaan: voor golven van 5 s is de overeenkomst redelijk, voor de meer maatgevende golven van 10 s wordt de orbitaalbeweging gereduceerd door de over de drempel trekkende stroming.

Ook bij halve damuitbouw (T2) is de overeenkomst (wederom op halve waterdiepte) redelijk; de reductie voor golven van 10 s is nu wat kleiner (figuur 25). Overigens is deze reductie relatief klein tegen de achtergrond van de, ten opzichte van de orbitaalbeweging, enorm zware overtrekkende stroom. Voor meer normale omstandigheden, met een stroomaanval in de orde van, of kleiner dan de golfaanval, zal de beïnvloeding door de stroming van het ongestoorde orbitaalveld (bij afwezigheid van stroming) vanuit praktisch oogpunt doorgaans te verwaarlozen zijn.

Konkluderend kan worden gesteld dat in het voorliggende geval geen sprake is van versterking maar eerder van enige reductie van de (maatgevende) golfwerking, in dit geval door de invloed van de stroming.

### Detailmeting bij stroom en golven

Het bij de detailmeting geregistreerde golfhoogteverloop over de drempel is hiervoor reeds vermeld. Bij vergelijking van beide verval-situaties (1,6 m en 2,2 m) blijkt het verloop redelijk overeenkomstig te zijn, met een afvlakking ter plaatse van de kruinlijnen en een vergroting ter plaatse van het midden van de kruin (figuren 26 en 28).

De registraties van de stroomsnelheden, in meerdere verticalen boven de kruin, zijn eveneens in figuren 26 en 28 weergegeven.

Als gevolg van het waterspiegelverhang blijkt de  $\bar{u}_{as}$  in benedenstroomse richting toe te nemen. Deze, vooral bij het grote verval, sterke toename verklaart de schade concentratie op het benedenstroomse deel van de kruin. Uit figuur 26 blijkt van een merkbare invloed door het golfhoogteverloop op de snelheidsverticalen sprake te zijn, gezien de van plaats tot plaats wisselende afwijkingen met het snelheidsprofiel voor eenparige stroming.

Opgemerkt moet worden dat de hier gepresenteerde snelheidsverticalen, inclusief de minima en maxima, tevens interessant kunnen zijn als meetgegevens ter calibratie van een toekomstig voorspellingsmodel voor een stroom- en golfveld; hierop wordt op deze plaats niet verder ingegaan.

Opvallend is het verloop van de orbitaalcomponent in stroomrichting, figuren 27 en 29. De bijbehorende verdelingen over de verticaal vertonen een omgekeerd profiel, met de grootste orbitaalsnelheden aan de bodem en de laagste bovenin de verticaal. Gezien het vrijwel volledig ondiepwater-karakter van de golven van 10 s boven de onderbouw, zou een vrijwel recht profiel te verwachten zijn geweest. De excessieve orbitaalsnelheden vanaf de bodem tot aan halverwege de waterdiepte moeten worden toegeschreven aan de, door de zware overtrekkende stroom, geïndiceerde grenslaagturbulentie, die het periodieke orbitaalsnelheidsbeeld vertroebelt. Dit is de reden dat in dit hoofdstuk ook een meetpunt op halve waterdiepte in de beschouwing is betrokken. Nog duidelijker dan bij de (tijdgemiddelde) snelheidsverticalen het geval is, is in het verloop van de orbitaalcomponent (boven in de verticaal) de doorwerking te zien van het buiken- en knopenpatroon.

Opmerkelijk is het ongedempte verloop van de orbitaalcomponent over de kruin, zodat de golfbelasting, afgezien van afwijkingen door golfhoogtevariatiën boven de kruin, globaal in gelijke mate op het benedenstroomse als op het bovenstroomse deel van de kruin inwerkt.

#### 4. Resultaten onderzoek omkegeling

##### Resultaten

In figuren 31, 32 en 33 is de schade aan de omkegeling als functie van de golfhoogte uitgezet, analoog aan figuren 11 en 12 voor de kruin van de onderbouw.

Hieruit blijkt dat de tendenzen voor de omkegeling voor de onderbouw-situatie, zonder of met damuitbouw, grofweg overeenkomstig zijn aan die voor de kruin, bij overeenkomstige vervallen. Dit geldt voor zowel de situatie met als zonder halve damuitbouw (zie ook figuren 11 en 12).

In de situatie met bovenbouw gereed tot NAP + 4 m (of daaromtrent) is blijkens figuur 33 voor de omkegeling een uitgesproken golfinvloed te zien voor de onderzochte vervallen van 2,2 m tot 4 m; de beïnvloeding blijkt voor alle 3 proevenseries onderling (bouwphase met en zonder schuif: T3 en T4 en eindfase: T5) van dezelfde orde van grootte zijn.

##### Afleiding invloedsfaktor

Op dezelfde wijze als voor de kruin en de damuitbouw is gedaan voor de onderbouw-situatie is de schade voor de omkegeling voor de onderbouw-situatie (T1, T2) eveneens als functie van de snelheid in de as van de dam ( $\bar{u}_{as}$ ) uitgezet (figuren 34 en 35).

Bij de proeven met de bovenbouw gereed tot NAP +4 m (T3, T4 en T5) is dit vanzelfsprekend niet zonder meer mogelijk. Het lijkt logisch om de schade dan te koppelen aan de stroomsnelheid in het naastliggende poortje, welke wel kon worden gemeten. Hierbij moet worden opgemerkt dat de invloedsfaktor feitelijk aan een stroomsnelheid moet worden gerelateerd en niet zonder meer aan het verval (wat hier meer voor de hand zou liggen), omdat aangesloten moet worden bij de voorgaande onderzoeken.

Uit figuur 36, waarin de gemeten gemiddelde stroomsnelheden boven de dorpel in het naastliggende poortje zijn uitgezet tegen het verval, blijkt echter dat deze voor de bovenbouw-situatie (T3, T5) sterk afwijken van die bij de onderbouw-situatie in het Roompot-model [1]. Als oorzaken kunnen worden genoemd: Afwijkende stroomverdeling door het aanwezig zijn van de bovenbouw; bij de onderbouw-situatie trok de damsektie bij hoge vervallen namelijk veel stroom door de grotere diepte boven de drempelkruin dan boven de naastliggende

dorpel. Voorts zal de aanwezigheid van de schuif door stroomkontractie bij toenemende vervallen een versterkende invloed hebben gehad op de stroomsnelheid boven de dorpel.

Het afwijkende verloop van de stroomsnelheid boven de dorpel maakt het niet mogelijk de schade zonder meer aan de gemeten stroomsnelheden te relateren; gekozen is daarom voor een "vergelijkende stroomsnelheid  $\bar{u}$ ", volgens het (geëxtrapoleerde) verloop van de Roompot-metingen. Voor het vaststellen van het verband tussen het verval en  $\bar{u}$  is ook gebruik gemaakt van het meer consistente verloop van de  $\bar{u}_{as}$ -snelheden uit het Roompot-model, in die zin dat de richting van het verband tussen  $\bar{u}$  en het verval mede daaraan is ontleend.

In figuur 37 zijn aldus de schaderesultaten van T3, T4 en T5 uitgezet tegen  $\bar{u}$ . Hierbij zijn ook de schade-grootten vergelijkend gemaakt ten opzichte van proeven T1 en T2. Dit laatste was nodig door de afwijkende indeling van de gekleurde stroken (méér stroken bij T3...T5, dus meer schade waarneembaar); bovendien was de stroken-indeling bij T5 afwijkend van die bij T3, hetgeen ook een normering noodzakelijk maakte. Overigens moet een dergelijke normering wel als globaal worden gezien omdat zij op basis van arbitraire aannamen is uitgevoerd. Beide schade-grootten, de feitelijke en de genormeerde, met T1 en T2 vergelijkbare schade, zijn weergegeven in tabel 16. Dankzij de vermelde kunstgrepen is de uit figuur 37 af te leiden invloedsfactor voor de golfwerking in overeenstemming met de definitie bij de overige proeven. Uit figuur 37 blijkt duidelijk de grote invloed van de golfwerking ( $H_T \approx 3,75$  m,  $T = 10$  s) voor zowel de bouwphase als de eindfase. De invloedsfactor volgt uit de doorsnijding van de schadelijnen met een genormerd schade-aantal  $n^* = 10$  (overeenkomstige de eerdere definitie bij T1 en T2).

Voor de bouwphase van de omkegeling (T3) blijkt de golfinvloedsfactor voor de omkegeling  $k_0$  circa 1,3 (1,32) te bedragen en voor de eindfase van de omkegeling ruim 1,2 (1,23).

De invloed van de schuif lijkt klein te zijn (zie T4 ten opzichte van T3). Bij de onderbouw-situatie (T1 en T2), in figuren 34 en 35, is de invloedsfactor minder goed af te leiden als gevolg van het "springerige" beeld; indicatieve grootten van  $k_0$  zijn 1,3 à 1,4 voor de onderbouw-situatie zonder uitgebouwde dam en 1,1 à 1,2 voor de onderbouw-situatie met halve damuitbouw. Résumerend kunnen de volgende waarden van  $k_0$  worden onderkend:

- onderbouw-situatie en omkegeling volgens het eindfase-profiel (T1) 1,3 à 1,4
- onderbouw-situatie, met halve damuitbouw en omkegeling volgens het eindfase-profiel (T2) 1,1 à 1,2
- bovenbouw-situatie en omkegeling volgens het bouwphase-profiel (T3, T4) 1,3
- bovenbouw-situatie en omkegeling volgens het bouwphase-profiel (T5) 1,2

### Feitelijke stabiliteit

Naast de bepaling van  $k_0$ -waarden is ook de absolute grootte van de stroombestendigheid voor de bovenbouw-situatie van belang, met name voor het eindfase-profiel met als toplaag 1/3 ton ten opzichte van het bouwphase-profiel, opgebouwd uit 300-1000 kg. Beide proeven, respectievelijk T5 en T3, zijn in figuur 38 in één grafiek uitgezet voor zowel de vergelijkende schade  $n^*$  als de feitelijke schade. Het resultaat is opvallend; de stroombestendigheid, zowel als de beïnvloeding door de golfwerking blijkt voor beide proeven volkomen gelijkwaardig te zijn, met andere woorden: de lichtere steenklasse bij het bouwphase-profiel wordt juist gecompenseerd door het minder aan stroom- en golfaanval blootgesteld zijn van dat profiel.

Het is niet bekend of een dergelijke verbetering ook bij de onderbouw-situatie op zal treden aangezien een bouwphase-proef voor de omkegeling in die situatie niet is uitgevoerd.

Relatief bezien is de stabiliteit van de omkegeling voor de situatie met de bovenbouw gereed tot NAP +4 m (of daaromtrent) gunstiger dan voor de onderbouw-situatie; weliswaar was de golfinvloed van eenzelfde orde van grootte ( $k_0 \approx 1,3$ ), echter de absolute stroombestendigheid bij afwezigheid van golven was gunstiger. Dit laatste is in te zien door de volgende vergelijking te maken:

- Bij de onderbouw-situatie was de  $Q/A$  kritiek boven de onderbouw circa 5,7 m/s voor een bestorting met  $\Delta D = 0,92$  m; omgerekend naar het naastliggende poortje (faktor 1,2) en naar  $\Delta D = 1,05$  m (bij de bovenbouw-proeven) komt dit neer op circa  $\bar{u} = 7,26$  m/s.
- Bij de bovenbouw-situatie blijkt nu  $\bar{u} = 8,3$  m/s (figuur 37). Zonder golfwerking blijkt de stabiliteit door de aanwezigheid van de bovenbouw dus

met circa 14% toe te nemen, uitgedrukt in stroomsnelheid boven de dorpel van het naastliggende poortje; hiermee ligt de  $\bar{u}$  zelfs boven de  $\bar{u}$  kritiek ongestoord van circa 7,6 m/s. Dit betekent een verbetering in kritiek verval van ruim 3 m tot 5,5 m! (figuur 36).

Voor het eindfase-profiel van de omkegeling in de bovenbouw-situatie neemt ook de golfinvloed af:  $k_0 = 1,23$  (T5, tabel 17).

De aanwezigheid van een schuif in het naastliggende poortje heeft geen merkbare invloed op de stabiliteit van de omkegeling (de bovenbouw-situatie) binnen de onderzochte range van vervallen tot 3 m (T4 ten opzichte van T3 in figuur 37).

Een overschrijding van de kritieke condities, zal leiden tot enige deformatie van de omkegeling totdat een compacter profiel is ontstaan dat opnieuw stabiel is, figuur 39. Van een explosief bezwijkgedrag is geenszins sprake.

## 5. Resultaten onderzoek bovenbouw

### 5.1 Algemeen

Het onderzoek naar de stabiliteit van de bovenbouw onder invloed van golfaanval, waarbij tevens een verval over de damopbouw was ingesteld, was erg beperkt van omvang en nam, inclusief de bouw van de proefopstelling, 1 week in beslag. De proefresultaten gaven bovendien een dusdanig gunstige stabiliteit te zien, dat een beschrijving ervan beperkt kan blijven tot een korte vermelding van de bevindingen.

Bij de stabiliteitsbeproeving ging het primair om de "lijzijde erosie", dat wil zeggen de mogelijke aantasting van de relatief lichte steen 300-1000 kg van de bovenbouw-kern ( $\Delta = 2,0$ ) achter de afdeklaag 6-10 ton aan zeezijde.

De resultaten, in termen van aantasting van dwarsdoorsneden van het damprofiel, zijn in figuren 40...46 gepresenteerd. De "filterpeiling" geeft in deze figuren de begrenzing van het kernmateriaal 300-1000 kg aan in de uitgangstoestand. Het verschil tussen nulpeiling en eindpeiling geeft het gedeformeerde profiel van de kern aan.

Bij de zeewaterstand van NAP +3,0 m en de laagste golfhoogte treedt nog hoegenaamd geen schade op (proef I 1, figuur 40); bij de hogere golven is enige lichte vervorming van het benedenstrooms talud te zien (proef I 2, figuur 41). Bij een zeewaterstand van NAP +3,7 m is naast enige aantasting van het binnenbeloop, ook het benedenstroomse deel van de kruin en de top van de afdeklaag aan enige vervorming onderworpen (proef II 1, figuur 42 en proef II 2, figuur 43). Uit observaties tijdens de proeven bleek dat incidenteel een enkele steen van de afdeklaag 6-10 ton werd verplaatst en zich vervolgens stabiliseerde op de brede kruin van de bovenbouw; in één enkel geval werd een steen van de afdeklaag tot buiten de benedenstroomse kruinlijn verplaatst.

Bij een nog hogere zeewaterstand van NAP +4,3 m wordt het binnenbeloop nog wat sterker vervormd; een verdere zetting van de top van de afdeklaag blijft echter ook nu nog uit (proef III 1, figuur 44 en proef III 2, figuur 45).

Een plaatselijke aanwezigheid van een gat in de afdeklaag (proef IV 2, figuur 43) blijkt verrassenderwijs weinig invloed uit te oefenen op de stabiliteit van de direkt daarachter liggende kruin. Daarentegen wordt het benedenstrooms talud wel wat sterker vervormd.



De invloed van de zeewaterstand blijkt, bij onderlinge vergelijking van de figuren, wat meer overheersend op de aantasting dan de golfhoogte (binnen de onderzochte range).

Desondanks is in alle gevallen sprake van een gelijkmatig aantastingsverloop. Het meest opmerkelijke daarbij is dat de gevreesde aantasting van de kruin vlak achter de afdeklaag, door de gecombineerde stroom- en golfwerking, nauwelijks bleek op te treden, terwijl juist het binnenbeloop meer werd aangevallen. Overeenkomstig eerdere bevindingen bij onderzoek naar de stabiliteit van het binnenbeloop van stortsteendammen (M 1741-II [5]) blijkt echter daar ter plaatse juist een grote vervormingsreserve aanwezig te zijn door de vorming van lokale steenophoppingen waardoor extra energievernietiging plaatsvindt. Bovendien treedt enige taludverflauwing op, hetgeen ook de stabiliteit ten goede komt. Een voorwaarde hiervoor is wel dat een voldoende brede kruin aanwezig moet zijn; in het onderhavige geval wordt hieraan zonder meer voldaan.

Zonder de 6-10 tons afdeklaag aan zeezijde zou de damkern zeker niet stabiel zijn geweest, althans niet bij de zeewaterstanden van NAP +3,7 m en 4,3 m met bijbehorende golven. Het gunstige effect van de afdeklaag aan zeezijde kan op grond van de observaties aan de volgende oorzaken worden toegeschreven.

- De 6-10 tons afdeklaag is poreus genoeg om een dusdanig grote afzuiging van de golven te bewerkstelligen, dat het overstorten van de golven sterk wordt gereduceerd.
- Anderszijds fungeert de top van de afdeklaag, die 2 m boven de damkern uitsteekt, wèl als stroom- en golfbreker voor de aanval op de kruin.
- Bij vervorming van de achterliggende damkern vormt zich een tweede kruin, iets bovenstrooms van de oorspronkelijke benedenstroomse kruinlijn, in combinatie met enige taludverflauwing van het binnenbeloop. Bovendien wordt het oppervlak, door lokale steenophoppingen, hydraulisch ruwer. Al deze verschijnselen dragen bij tot het mobiliseren van een belangrijk stuk extra stabiliteit van de damopbouw.

#### Waarnemingen van schade aan de bovenbouw bij de omkegelingsproeven (T3, T4, T5) in de Pentagoot

Bij de proeven naar de stabiliteit van de omkegeling, met de bovenbouw gereed tot (circa) NAP +4 m (T3, T4, T5), was deze laatste min of meer provisorisch ingebouwd (het ging primair om de omkegeling). Er werd echter in een aantal gevallen een dusdanig forse schade geconstateerd dat het zinvol leek hieruit

enige gevolgtrekkingen te destilleren, van belang voor het als veel representatiever te beschouwen onderzoek in de Scheldegoot.

Bij proef T3 (vanaf T3B1 tot en met T3D0) was de bovenbouw ietwat te hoog opgebouwd, tot circa NAP +5 m in plaats van NAP +4 m. De achterliggende damkern was voor wat betreft de benedenstroomse helft met te lichte 300-1000 kg gemiddeld, als gevolg van tekort aan "goede" 300-1000 kg. Bij proef T3D1 werd de gehele kruin voorzien van een afdeklaag (dikte circa 2 m prototype) met goede 300-1000 kg ( $\Delta = 1,7$ ,  $D = 0,62$  m;  $\Delta D = 1,05$  m).

Bij T4 werd de kruin verlaagd tot de feitelijke 4 m; tegelijkertijd echter werd in verband met forse schade bij T3D1 de kruin achter de afdeklaag gefixeerd (ingewassen met cementpoeder).

Bij proef T5C0 tot T5D1 werd deze opstelling gehandhaafd, zij het dat de kruinbreedte van de afdeklaag iets ruimer werd gemaakt. In verband met mogelijk bezwijken van de bovenbouw bij het verval van 5,5 m, werd op voorhand het profiel op NAP +5,8 m gebracht bij T5E.

Van de hiervoor weergegeven modelleringen is alleen T3D1, voor kleine schades (in verband met doorbreken van de afdeklaag op de kruin), vergelijkbaar met de Scheldegoot-opstelling. De schade was echter dusdanig groot dat de afdeklaag wèl werd doorbroken bij T3D1 en de te lichte 300-1000 kg werd aangetast; dit verklaart de relatief grote aantasting van het binnenbeloop. Voorts zal hierdoor de schade aan de zeewaartse afdeklaag 6-10 ton te groot zijn geweest. De invloed van de stabiliteit van de achterliggende kruin is namelijk van grote invloed, getuige de verschillen tussen T3C1 (zeewaterstand ten opzichte van kruin -1 m) en T4B1 (zeewaterstand ten opzichte van kruin -0,8 m); was in het eerste geval sprake van forse verplaatsingen van de 6-10 tons stenen, 46 stuks, in het laatste geval, met de gefixeerde achterliggende kruin, bleven allen stabiel.

Bij T4C1 trad een begin van verplaatsing op aan de 6-10 tons stenen; hierbij was de zeewaterstand gelijk met de kruin, bij benadering overeenkomstig de initiële schadetoestand bij de Scheldegoot-proeven, waarbij de zeewaterstand iets (0,3 m) onder de kruin was gelegen.

Een meer directe vergelijking is niet mogelijk. Konkluderend kan worden gesteld dat de ogenschijnlijk forse aantasting die bij de Pentagoot-proeven werd ondervonden vooral een gevolg is geweest van de niet representatieve modellering van de kruin van de achterliggende damkern, waardoor zowel de kruin, het

binnenbeloop en de afdeklaag, een te kleine stroom- en golfbestendigheid hebben gehad. In hoeverre de afwijkende golfkonditie  $H_0 \approx 3,75$  m,  $T = 10$  s) ten opzichte van het feitelijke onregelmatige golfbeeld uit de Scheldegoot hier ook aan heeft bijgedragen is niet na te gaan door te weinig vergelijkbare gegevens; enige bijdrage hiervan in de aantasting is echter wel aannemelijk, gezien de als conservatief veronderstelde vertaling van onregelmatige naar regelmatige golven (paragraaf 2.1).

Tot slotte moet worden opgemerkt dat enige driedimensionale verschijnselen werden gekonstateerd die mogelijk relevant kunnen zijn voor het prototype; de schade bleek namelijk enigermate gekoncentreerd te zijn in het zog van de bovenstroomse pijlerkop en de damaanzet. Een dergelijk concentratie kan vermoedelijk worden voorkomen door het (ten dele) inpakken van deze elementen met de steen 6-10 ton, zodat lokaal voor enige stroomlijning wordt gezorgd.

## REFERENTIES

- 1 AKKERMAN, G.J.  
SVKO, Bouwfase stabiliteit breukstenen dammen bij stroomaanval  
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek M 2028 deel I, 1984
- 2 WOUTERS, J.  
SVKO, Hydraulische stabiliteit breukstenen dam bij alternatieve werkvolg-  
orde  
Rijkswaterstaat, Deltadienst, Notitie 31-DREM-M-84034, 1984
- 3 WOUTERS, J.  
SVKO, Proevenprogramma onderzoek "Invloed stroom en golven op de stabili-  
teit van de breukstenen dam in de bouwfase"  
Rijkswaterstaat, Deltadienst, Notitie 31-DREM-M-84123, 1984
- 4 VERMEER, A.C.M.  
Stabiliteit van stortstenen bermen en teenkonstrukties  
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek M 2006
- 5 AKKERMAN, G.J.  
Compartimenteringswerken Oesterdam, Stabiliteit Markiezaatskade met aan-  
sluitende damvakken en stabiliteit van breukstenen dammen in het algemeen  
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek M 1741 deel II, banden  
1, 2 en 3, 1984
- 6 KOMAR, P.D., MILLER, M.C.  
Sediment threshold under oscillatory waves  
Coastal Engineering 1974, Chapter 44
- 7 DEN BOER, K.  
Taludbekleding van gezette steen, stabiliteit van enkele typen taludbekle-  
ding bij diverse golfomstandigheden, Verslag kleinschalig modelonderzoek  
M 1795/M 1881-XIV,
- 8 WOUTERS, J.  
SVKO, Bouwfase stabiliteit van de omkegeling  
Rijkswaterstaat, Deltadienst, Notitie 311 KWO-M-84333, 1984

REFERENTIES (vervolg)

9 WOUTERS, J.

SVKO, Driedimensionaal onderzoek stabiliteit overgangskonstruktie,  
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag modelonderzoek M 1631 deel I, 1980

proef	verval	golfinstelling		opmerking
	(m)	H(m)	T(s)	
T1A0	1,6	-	-	zonder damuitbouw
T1A1		2,25	5	
T1A2		3,00	5	
T1A3		3,75	5	
T1A4		2,25	10	
T1A5		3,00	10	
T1A6		3,75	10	
T1B0	2,2	-	-	
T1B1		2,25	5	
T1B2		3,00	5	
T1B3		3,75	5	
T1B4		2,25	10	
T1B5		3,00	10	
T1B6		3,75	10	
T1C0	3,0	-	-	
T1C1		3,75	10	
T2A0	1,6	-	-	met halve damuitbouw
T2A1		2,25	10	
T2A2		3,00	10	
T2A3		3,75	5	
T2A4		3,75	10	
T2B0	2,2	-	-	
T2B1		2,25	10	
T2B2		3,00	10	
T2B3		3,75	5	
T2B4		3,75	10	
T2C0	3,0	-	-	
T2C1		3,75	5	
T2C2		3,75	10	

debieten T1A, T2A 1,0 x 1/jr  
T1B, T2B 1,2 x 1/jr  
T1C, T2C 1,5 x 1/jr

T1 = zonder damuitbouw  
T2 = met halve damuitbouw

Tabel 1 Onderbouw, overzicht proeven

proef	verval	golfinstelling		toestand			
				schuif aanwezig		profiel	
		geen golf	$H_0 = 3,75 \text{ m}$ $T = 10 \text{ s}$	ja	nee	bouwfase- profiel	eindfase- profiel
T3A0 T3A1	1,6	x		x		x	
T3B0 T3B1	2,2	x	x	x		x	
T3C0 T3C1	3,0	x	x	x		x	
T3D0 T3D1	4,0	x	x	x		x	
T4B0 T4B1	2,2	x			x	x	
T4C1	3,0		x		x	x	
T5C0 T5C1	3,0	x		x			x
T5D0 T5D1	4,0	x	x	x			x
T5E0 T5E1	5,5	x	x	x			x

T3 : bovenbouw tot NAP +5,0 m;

T4, T5C0...T5D1: bovenbouw tot NAP +4,0 m

T5E0, T5E1 : bovenbouw tot NAP +5,8 m

prototypematen

Tabel 2 Omkegeling, overzicht proeven

proef	boven waterstand t.o.v. NAP	$H_{si}$	Opmerkingen
	(m)	(m)	
I 1	+3.00	2.25	
I 2	+3.00	2.73	
II 1	+3.70	2.30	
II 2	+3.70	2.81	
III 1	+4.30	2.27	
III 2	+4.30	2.84	
IV 2	+3.70	2.83	

$T_p$  deining = 11,0 sec

$T_p$  zeegang = 5,3 sec

prototypematen

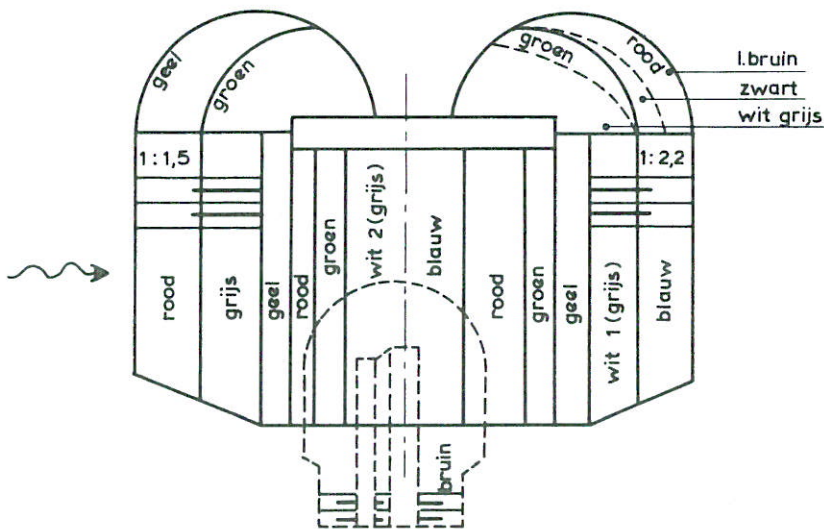
Tabel 3 Bovenbouw, overzicht proeven



proef	verval	golfinstelling		gemeten	
	(m)	H(m)	T(s)	H (m) bovenstrooms	H <sub>as</sub> (m)
T1A0		-	-	-	-
T1A1		2,25	5	1,14	0,30
T1A2	1,6	3,00	5	3,30	0,84
T1A3		3,75	5	3,24	0,90
T1A4		2,25	10	1,20	1,50
T1A5		3,00	10	2,25	2,40
T1A6		3,75	10	3,48	3,24
T1B0		-	-	-	-
T1B1		2,25	5	2,10	0,75
T1B2	2,2	3,00	5	3,12	0,96
T1B3		3,75	5	3,00	1,05
T1B4		2,25	10	1,50	1,62
T1B5		3,00	10	2,25	2,40
T1B6		3,75	10	3,54	3,00
T1C0	3,0	-	-	-	-
T1C1		3,75	10	1,95	1,38
T2A0		-	-	-	-
T2A1		2,25	10	1,65	1,56
T2A2	1,6	3,00	10	2,40	2,58
T2A3		3,75	5	3,90	1,20
T2A4		3,75	10	2,88	3,00
T2B0		-	-	-	-
T2B1		2,25	10	1,68	1,43
T2B2	2,2	3,00	10	2,40	2,10
T2B3		3,75	5	3,53	1,20
T2B4		3,75	10	3,00	2,64
T2C0		-	-	-	-
T2C1	3,0	3,75	5	3,42	1,05
T2C2		3,75	10	3,12	2,22

Tabel 4 Onderbouw, meting golfhoogte

proef	omkegeling			talud			kruin							talud			omkegeling			dam- uitbouw		
	ge	gro	∑	ro	gr	∑	ge	ro	gro	wi	bl	ro	gro	ge	∑	wi	bl	∑	ro	gro	∑	br
T1A0								1	1	2					4					4	4	
T1A1																						
T1A2									1					1	2					11	11	
T1A3									3					3					1	5	6	
T1A4									1				1	2	4			2		16	16	
T1A5																			3	18	21	
T1A6		1	1		4	4	2	1	2	2		1	1	3	12				1	23	24	
T1B0									1	1				1	3					5	5	
T1B1							1		1	6	3	1		1	13					6	6	
T1B2								2	1	7	5	2		1	18		1	2	2	6	8	
T1B3							1			3				5		1	1			24	24	
T1B4								1			3	2		6		1	1	2	1	3	4	
T1B5							2			1		2	1	9	15	1	1	2	1	17	18	
T1B6					1	1		1	2	7	5	5	1	20	41	6		6		55	55	
T1C0									1	2	7	2		2	14					12	12	
T1C1					3	3	3	1	1	16	27	17	13	16	94		1	1	1	42	43	
T2A0													3	1	4		1					7
T2A1																						3
T2A2												1	2	3						6	6	2
T2A3					1	1							1	1				1		8	9	17
T2A4												3	1	1	5	3	2	5		1	1	6
T2B0									1	2	1			3	7			1	4	5		2
T2B1									2	3	3	2	4	11	3	2	5		1	1		7
T2B2									2	2	3		7	14	1	2	3	1	4	5		3
T2B3									1	3	2		9	15	4	4			2	2		60
T2B4								1	1	3	3	2	8	18	2		2		17	17		42
T2C0									3	2	5		2	12	1	5	6		7	7		59
T2C1									4	2	4	3	4	17	2	4	6	1	20	21		97
T2C2								1	6	4	4	2	18	35	2	34	36		38	38		176



aangegeven zijn:  
het totale aantal uit de  
aangegeven stroken verplaatse  
stenen

Tabel 5 Onderbouw en omkegeling (T1, T2), meting schade

proef	stroomsnelheid as SVKO (m/s)							orbitaalsnelheid boven damkruin (m/s)						orbitaalsnelheid bovenstrooms op NAP -6 m (punt 7)		
	boven damkruin				boven dorpel			bodem (punt 4)			halve waterdiepte (punt 2)					
	1	2	3	$\bar{u}_{as}$	5	6	$\bar{u}_{as}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$
T1A0	5,66	5,68	5,36	5,57	5,51	6,31	5,91									
T1A1	5,82	5,72	5,19	5,58				3,86	2,96	0,90	6,06	5,72	0,34	1,72	1,23	0,49
T1A2	5,88	6,00	5,96	5,95				4,08	3,09	0,99	6,83	6,00	0,83	2,53	1,15	1,38
T1A3	6,11	6,12	5,88	6,04				4,96	3,45	1,51	7,05	6,12	0,93	2,20	1,33	0,87
T1A4	5,52	5,60	5,10	5,41				3,64	3,03	0,61	6,06	5,60	0,46	1,90	1,42	0,48
T1A5	5,40	5,20	4,95	5,18				3,50	2,30	1,20	6,05	5,20	0,85	2,20	1,20	1,00
T1A6	5,60	5,62	5,32	5,51				4,63	3,00	1,63	6,61	5,62	0,99	2,42	1,21	1,21
T1B0	6,70	6,66	6,30	6,55	6,62	6,81	6,72									
T1B1	6,60	6,59	6,27	6,49				5,07	3,83	1,24	7,16	6,59	0,57	2,20	1,61	0,59
T1B2	6,38	6,22	-	6,30				3,97	2,40	1,57	6,94	6,22	0,72	2,31	1,41	0,90
T1B3	6,58	6,66	6,40	6,55				4,63	3,77	0,86	7,50	6,66	0,84	2,31	1,57	0,74
T1B4	6,41	6,61	6,40	6,47				4,08	3,20	0,88	7,16	6,61	0,55	2,20	1,57	0,63
T1B5	6,30	6,50	6,20	6,33				4,20	2,50	1,70	7,30	6,50	0,80	2,50	1,60	0,90
T1B6	6,48	6,78	6,48	6,58				5,51	3,70	1,81	7,83	6,78	1,05	2,87	1,61	1,26
T1C0	7,16	7,22	7,02	7,13	7,37	7,70	7,54									
T1C1	6,94	7,22	7,03	7,06				8,38	4,91	3,47	-	7,22	-	3,31	1,76	1,55

1 = NAP  
 2 = NAP -2,0 m  
 3 = NAP -4,0 m  
 $\bar{u}_{as}$  = rekenkundig gemiddelde van 1...3  
 5 = NAP  
 6 = NAP -2,0 m  
 $\bar{u}_{as}$  = rekenkundig gemiddelde van 5 en 6

Tabel 6 T1, meting stroomsnelheden

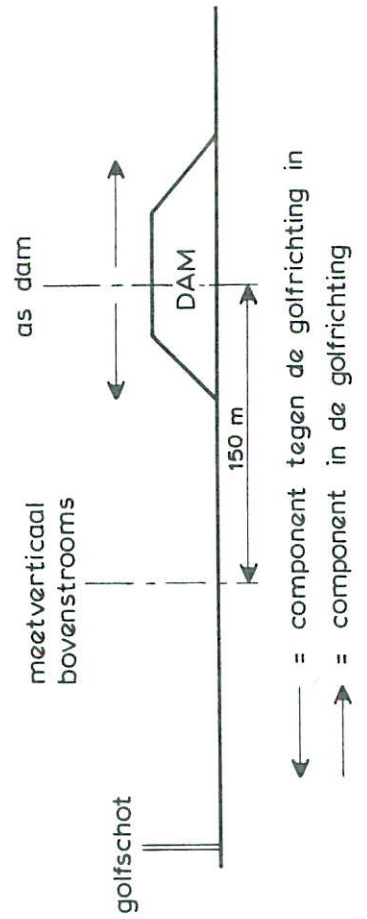
proef	stroomsnelheid as SVKO (m/s)							orbitaalsnelheid boven damkruin (m/s)						orbitaalsnelheid bovenstrooms op NAP -6 m (punt 7)		
	boven damkruin				boven dorpel			bodem (punt 4)			halve waterdiepte (punt 2)					
	1	2	3	$\bar{u}_{as}$	5	6	$\bar{u}_{as}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$	$u_{max}$	$\bar{u}$	$\hat{u} = \frac{\bar{u}}{u_{max}}$
T2A0	4,88	5,07	5,27	5,07	5,86	6,80	6,33									
T2A1	4,65	4,73	5,01	4,80				4,19	3,14	1,05	5,29	4,73	0,56	1,65	0,91	0,74
T2A2	4,51	4,71	4,96	4,73				4,41	2,98	1,43	5,73	4,71	1,02	1,87	0,85	1,02
T2A3	4,74	4,87	4,73	4,78				4,19	2,70	1,49	6,17	4,87	1,30	1,65	0,77	0,88
T2A4	4,30	4,48	4,56	4,45				5,62	3,81	1,81	6,06	4,48	1,58	2,31	0,86	1,45
T2B0	6,16	6,29	5,79	6,08	6,67	7,70	7,19									
T2B1	6,13	6,22	6,30	6,22				6,39	5,47	0,92	6,94	6,22	0,72	2,43	1,13	1,30
T2B2	5,80	5,80	5,76	5,79				5,73	4,67	1,06	6,72	5,80	0,92	2,09	1,05	1,04
T2B3	5,89	5,96	5,95	5,93				5,51	4,42	1,09	7,28	5,96	1,32	1,98	0,98	1,00
T2B4	5,40	5,38	5,38	5,39				2,87	1,92	0,95	6,72	5,38	1,34	2,43	1,03	1,40
T2C0	6,80	6,83	6,75	6,79	6,69	7,72	7,21									
T2C1	6,75	6,89	7,00	6,88				6,83	5,86	0,97	7,72	6,89	0,83	1,76	1,03	0,73
T2C2	6,45	6,43	6,23	6,37				5,29	5,10	0,19	7,50	6,43	1,07	2,53	1,23	1,30

1 = NAP                      5 = NAP  
 2 = NAP -2,0 m            6 = NAP -2,0 m  
 3 = NAP -4,0 m             $\bar{u}_{as}$  = rekenkundig  
 $\bar{u}_{as}$  = rekenkundig            gemiddelde  
    van 5 en 6  
    van 1..3

Tabel 7 T2, meting stroomsnelheden

proef	waterstand t.o.v. NAP [m]	in stel- golfhoogte $H_0$ [m]	periode T [s]	bovenstroomse gemeten golf- hoogte [m]	gemeten golfhoogte as drempel [m]	as dam				bovenstrooms			
						û op NAP -6 m		û op NAP -2 m		û op NAP -6 m		û op NAP -2 m	
						$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$	$\hat{u}$
a	2,60	2,25	10	2,28	1,95	0,40	0,66	0,49	0,84	0,42	0,42	0,42	0,42
b	2,60	3,00	10	3,12	2,40	0,55	1,33	0,78	1,23	0,62	0,62	0,73	0,73
c	2,60	3,75	10	4,08	2,76	0,90	1,37	0,97	1,40	0,86	0,99	1,03	1,10
d	2,60	2,25	5	1,95	2,01	0,31	0,35	0,49	0,50	0,22	0,19	0,51	0,42
e	2,60	3,00	5	3,42	3,18	0,49	0,63	0,80	1,06	0,49	0,36	0,88	0,66
f	2,60	3,75	5	3,84	3,18	0,63	0,60	0,80	0,88	0,53	0,40	0,99	0,77
g	3,20	2,25	10	2,25	1,95	0,57	0,79	0,49	0,93	0,50	0,49	0,52	0,59
h	3,20	3,00	10	3,30	1,95	0,82	1,06	0,67	1,17	0,77	0,77	0,90	0,88
i	3,20	3,75	10	4,20	2,70	0,88	1,36	0,66	1,30	0,86	1,14	1,10	1,32
j	3,20	2,25	5	2,25	2,10	0,26	0,29	0,35	0,40	0,20	0,15	0,40	0,33
k	3,20	3,00	5	3,60	3,18	0,33	0,44	0,66	0,77	0,44	0,35	0,77	0,60
l	3,20	3,75	5	3,96	3,24	0,44	0,44	0,55	0,88	0,48	0,33	0,88	0,66
m	4,10	3,75	10	3,36	3,18	1,06	1,43	1,10	1,54	0,68	0,75	0,86	1,01

Tabel 8 Onderbouw, meting orbitaalsnelheden (golven zonder stroming)



lokatie	toestand	$u_1$ (m/s) M 2028-I	$u_2$ (m/s) M 2028-II	$\frac{u_2}{u_1}$	$\sqrt{\frac{\Delta D_2}{\Delta D_1}}$
drempelkruin	T1	5,25 - 5,85	6,95	1,19 - 1,32	1,16
	T2	5,40 - 5,95	6,50	1,09 - 1,20	1,16
drempeltalud	T1	5,15 - 6,25	-	-	1,16
	T2	~4	~7	~1,8	1,16
omkegeling	T1	5,20 - 5,70	7,00	1,23 - 1,35	1,16
	T2	6,75	6,20	0,92	0,94
damuitbouw	T1	-	-	-	-
	T2	4,95 - ~6	6,2	1,03 - 1,25	1,16

M 2028-I : alle lokaties  $\Delta D = 0,92$  m, uitgezonderd omkegeling bij T4: 1,38 m

M 2028-II : alle lokaties  $\Delta D = 1,23$  m, uitgezonderd omkegeling bij T2: 1,53 m

Tabel 9 Onderbouw en omkegeling (T1, T2), calibratie schade bij stroomaanval:  
Pentagoot/M 1001

proef	golfhoogte $H_o$ [m]	periode T [sec]	$\bar{u}_{as} (o)$ [m/s]	$\bar{u}_{as}$ [m/s]	$k_*$
T1	2,25	5	6,95	6,30	1,103
	3,00			6,05	1,149
	3,75			-	-
	2,25	10		-	-
	3,00			6,20	1,120
	3,75			5,48	1,268
T2	2,25	5	6,50	-	-
	3,00			-	-
	3,75			5,75	1,130
	2,25	10		6,00	1,083
	3,00			5,75	1,130
	3,75			5,50	1,182

T1 = zonder damuitbouw ( $\Delta D = 1,23$  m)

T2 = met halve damuitbouw ( $\Delta D = 1,23$  m)

$$k_* = \frac{\bar{u}_{as} (o)}{\bar{u}_{as}}$$

$\bar{u}_{as} (o)$  =  $\bar{u}_{as}$  bij situatie stroom zonder golven, bij  $n = 10$  stenen op de drempelkruin

$\bar{u}_{as}$  =  $\bar{u}_{as}$  bij situatie stroom en golven, bij  $n = 10$  stenen op de drempelkruin.

Tabel 10 Onderbouw, invloedsfaktor  $k_k$  voor de kruin

proef	golfhoogte periode		$\bar{u}_{as} (o)$	$\bar{u}_{as}$	$k_{***}$
	$H_o$ [m]	T [s]	[m/s]	[m/s]	
T2	2,25	5	6,15	-	1,26
	3,00	5		-	
	3,75	5		4,90	
	2,25	10	6,15	-	1,18
	3,00	10		-	
	3,75	10		5,20	

T2 = met halve damuitbouw ( $\Delta D = 1,23$  m)

$$k_d = \frac{\bar{u}_{as} (o)}{\bar{u}_{as}}$$

$\bar{u}_{as} (o) = \bar{u}_{as}$  bij situatie stroom zonder golven,  $n = 100$  stenen aan damuitbouw  
 $\bar{u}_{as} = \bar{u}_{as}$  bij situatie stroom en golven,  $n = 100$  stenen aan damuitbouw

Tabel 11 Onderbouw, invloedsfaktor  $k_d$  voor de damuitbouw



proef	golfhoogte $H_o$ [m]	periode T [sec]	op NAP -2,0 m			op NAP -6,0 m		
			$\bar{u}_{as}(0)$	$\hat{u}_{theor.}$	$k'$	$\bar{u}_{as}(0)$	$\hat{u}_{theor.}$	$k''$
T1	2,25	5	6,95	0,980	1,141	6,950	0,765	1,110
	3,00			1,307	1,188		1,020	1,147
	3,75			1,633	1,235		1,275	1,184
	2,25	10		1,212	1,174		1,157	1,167
	3,00			1,616	1,233		1,542	1,222
	3,75			2,020	1,291		1,928	1,277
T2	2,25	5	6,50	0,980	1,151	6,50	0,756	1,118
	3,00			1,307	1,201		1,020	1,157
	3,75			1,633	1,251		1,275	1,196
	2,25	10		1,212	1,187		1,157	1,178
	3,00			1,616	1,249		1,542	1,237
	3,75			2,020	1,311		1,928	1,297

T1 = zonder damuitbouw

T2 = met halve damuitbouw

$$k', k'' = \frac{\bar{u}_{as}(0) + \hat{u}_{theor.}}{\bar{u}_{as}(0)}$$

$\bar{u}_{as}(0)$  =  $\bar{u}_{as}$  bij situatie stroom zonder golven, bij  $n = 10$  stenen op de kruin

$$\hat{u}_{theor.} = \frac{H_o g T \cosh(2\pi x/L)}{2L \cosh(2\pi d/L)}, \quad d \approx 7,5 \text{ m}$$

Tabel 12 Onderbouw, invloedsfactoren  $k'$  en  $k''$  voor de kruin  
(uit berekende orbitaalsnelheden)

proef	golfhoogte $H_0$ [m]	periode $T$ [sec]	op NAP - 2,0 m		
			$\bar{u}_{as}(0)$	$\hat{u}_{meting}$	$k'''$
T1	2,25	5	6,950	0,455	1,066
	3,00			0,775	1,112
	3,75			0,885	1,127
	2,25	10		0,505	1,073
	3,00			0,825	1,119
	3,75			1,020	1,147
T2	2,25	5	6,500	-	-
	3,00			-	-
	3,75			1,310	1,202
	2,25	10		0,640	1,099
	3,00			0,970	1,149
	3,75			1,460	1,225

T1 = zonder damuitbouw

T2 = met halve damuitbouw

$$k''' = \frac{\bar{u}_{as}(0) + \hat{u}_{meting}}{\bar{u}_{as}(0)}$$

$\bar{u}_{as}(0)$  =  $\bar{u}_{as}$  bij situatie stroom zonder golven,  
bij  $n = 10$  stenen op de kruin

$\hat{u}_{meting}$  = gemeten orbitaalcomponent in golfrichting  
in de as op halve waterdiepte

\* op halve waterdiepte omdat aan de bodem geen goede meting mogelijk was  
(excessieve grenslaagturbulentie)

Tabel 13 Onderbouw, invloedsfaktor  $k'''$  voor de kruin (uit gemeten  
orbitaalsnelheden bij stroom en golven, op halve waterdiepte\*)

proef	$\bar{u}_{as}$	$\bar{u}_{as}/\bar{u}_{ref}$
T1A0	<u>5,57</u>	
T1A1	5,58	1,00
T1A2	5,95	1,07
T1A3	6,04	1,08
T1A4	5,41	0,79
T1A5	5,18	0,93
T1A6	5,51	0,99
T1B0	<u>6,55</u>	
T1B1	6,49	0,99
T1B2	6,30	0,96
T1B3	6,55	1,00
T1B4	6,47	0,99
T1B5	6,33	0,97
T1B6	6,58	1,00
T1C0	<u>7,13</u>	
T1C1	7,06	0,99

proef	$\bar{u}_{as}$	$\bar{u}_{as}/\bar{u}_{ref}$
T2A0	<u>5,07</u>	
T2A1	4,80	0,95
T2A2	4,73	0,93
T2A3	4,78	0,94
T2A4	4,45	0,88
T2B0	<u>6,08</u>	
T2B1	6,22	1,02
T2B2	5,79	0,95
T2B3	5,93	0,98
T2B4	5,39	0,89
T2C0	<u>6,79</u>	
T2C1	6,88	1,01
T2C2	6,37	0,94

\_\_\_\_\_ = referentie-stroomsnelheid ( $\bar{u}_{ref}$ ) voor het betreffende verval

Tabel 14 Onderbouw, variatie  $\bar{u}_{as}$  door de golfbeweging

proef	waterstand t.o.v. NAP [m]	in stel- golfhoogte $H_0$ [m]	periode T [s]	bovenstroomse gemeten golf- hoogte [m]	gemeten golfhoogte in asdrempel [m]	theoretische orbitaalsnelheden m/s			
						tov H in de as			
						tov H bovenstr.			
						NAP -6 m	NAP -2 m	NAP -6 m	
a	2,60	2,25	10	2,28	1,95	0,92	0,96	1,08	1,12
b	2,60	3,00	10	3,12	2,40	1,13	1,18	1,47	1,53
c	2,60	3,75	10	4,08	2,76	1,30	1,36	1,92	2,01
d	2,60	2,25	5	1,95	2,01	0,58	0,73	0,56	0,71
e	2,60	3,00	5	3,42	3,18	0,92	1,15	0,99	1,24
f	2,60	3,75	5	3,84	3,18	0,92	1,39	1,11	1,68
g	3,20	2,25	10	2,25	1,95	0,88	0,92	1,02	1,06
h	3,20	3,00	10	3,30	1,95	0,88	0,92	1,49	1,56
i	3,20	3,75	10	4,20	2,70	1,22	1,27	1,90	1,98
j	3,20	2,25	5	2,25	2,10	0,55	0,69	0,59	0,74
k	3,20	3,00	5	3,60	3,18	0,84	1,05	0,95	1,13
l	3,20	3,75	5	3,96	3,24	0,85	1,07	1,04	1,31
m	4,10	3,75	10	3,36	3,18	1,36	1,40	1,44	1,48

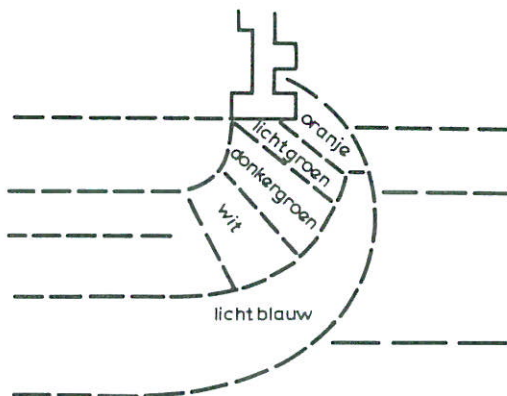
Tabel 15 Berekende orbitaalsnelheden in de as voor golven zonder stroming

proef	verval	oranje	lichtgroen	donkergroen	wit	$\Sigma$	rood	wit	donkerblauw	lichtblauw	$\Sigma$
T3A0 T3A1	1,6										
T3B0 T3B1	2,2	8 (8)	49 (10)	15 (5)	2 (0)	74 (23)					
T3C0 T3C1	3,0	35 (31)	79 (39)	49 (24)	10 (0)	173 (94)					
T3D0 T3D1	4,0	14 (14)	2 (0) 56 (34)	2 (2) 59 (34)	2 (0) 12 (0)	6 (2) 141 (82)					
T4B0 T4B1	2,2	15 (11)	68 (31)	34 (11)	3 (0)	120 (54)					
T4C1	3,0	17 (17)	78 (28)	74 (34)	5 (0)	174 (79)					
T5C0 T5C1	3,0						41 (41)	1 (1) 8 (1)	2 (0)		3 (1) 49 (42)
T5D0 T5D1	4,0						2 (2) 58 (58)	2 (2) 40 (19)	2 (0) 7 (4)	1 (1)	6 (4) 98 (82)
T5E0 T5E1	5,5						59 (59)	3 (3) 38 (22)	3 (2) 17 (9)	7 (7) 6 (6)	13 (12) 120 (96)

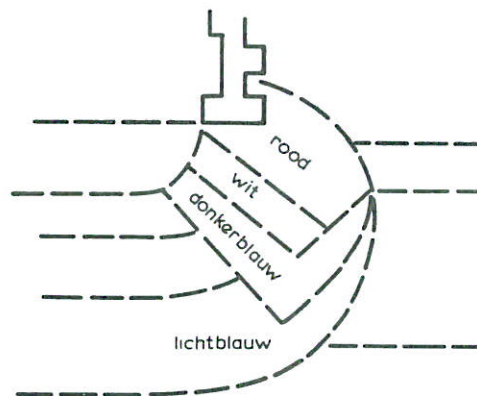
tussen haakjes aangegeven schade  $\hat{=}$  schade genormeerd naar strokenverdeling bij T1, T2

aangegeven zijn:

het totale aantal uit de  
aangegeven stroken verplaatse  
stenen



strokenverdeling bij T 3, T 4



strokenverdeling bij T 5

Tabel 16 Omkegeling (T3...T5), meting schade

proef	golfhoogte $H_0$ [m]	periode T [sec]	$\bar{u}_{as}(0)$ of $\bar{u}(0)$ [m/s]	$\bar{u}_{as}$ of $\bar{u}$ [m/s]	$k_0$	opmerking
T1	2,25	5	6,95	-	-	$\Delta D = 1,23$ m
	3,00			6,25	1,11	
	3,75			5,75	1,21	
	2,25	10		6,05	1,15	
	3,00			-	-	
	3,75			5,10	1,36	
T2	2,25	5	6,50	-	-	$\Delta D = 1,53$ m
	3,00			-	-	
	3,75			6,40	1,02	
	2,25	10		-	-	
	3,00			-	-	
	3,75			5,65	1,15	
T3	3,75	10	8,2	6,2	1,32	$\Delta D = 1,05$ m
T4	3,75	10	-	$\approx 6,2$	-	$\Delta D = 1,05$ m
T5	$\approx 3,4$	10	8,2	6,6	1,23	$\Delta D = 1,64$ m

$$k_0 = \frac{\bar{u}_{as}(0)}{\bar{u}_{as}} \text{ of } \frac{\bar{u}(0)}{\bar{u}}$$

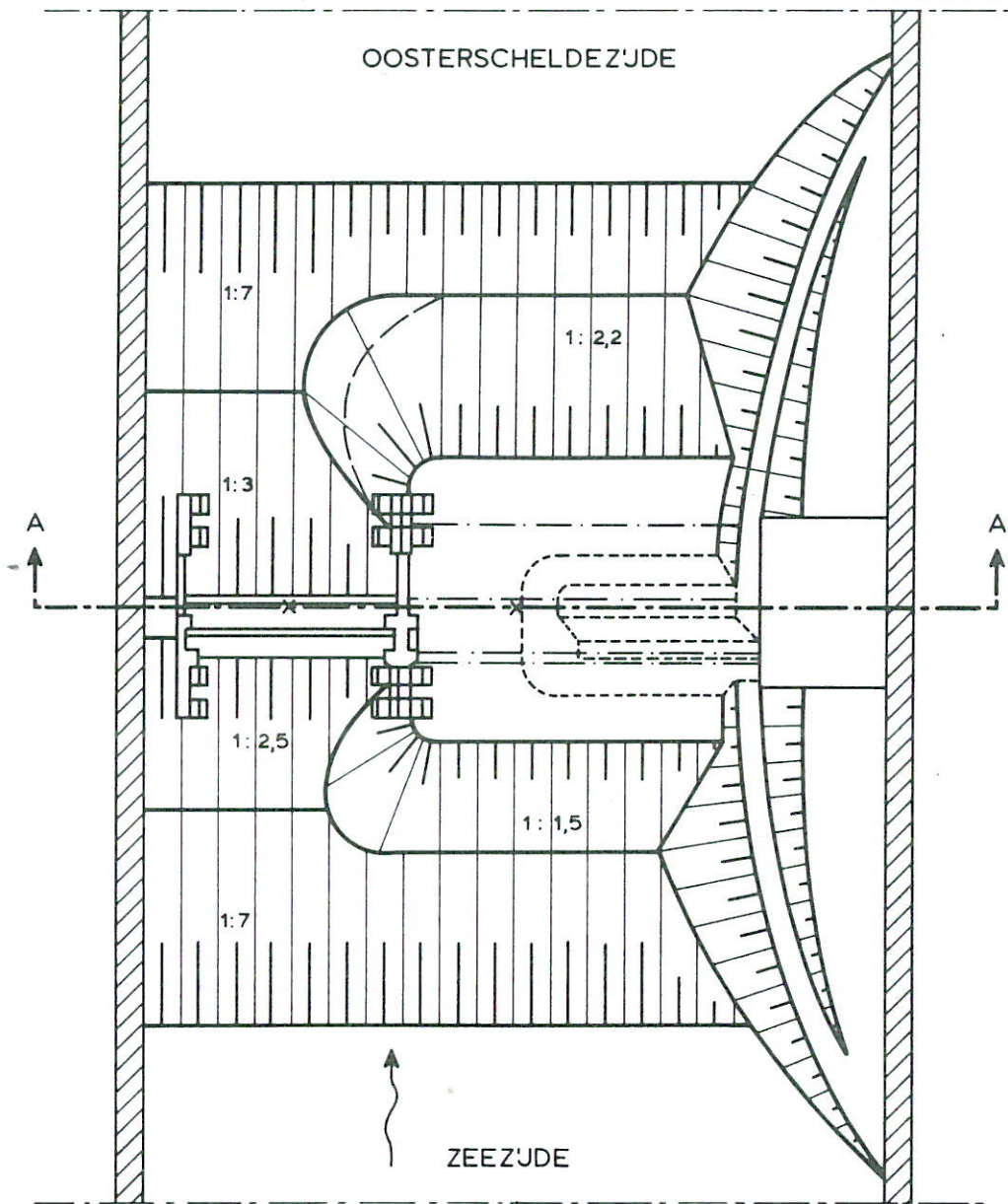
Index (0) = stroming zonder golven

referentieschade omkegeling  $n = 10$  stenen (T1, T2) of  $n^* = 10$  stenen (T3...T5)

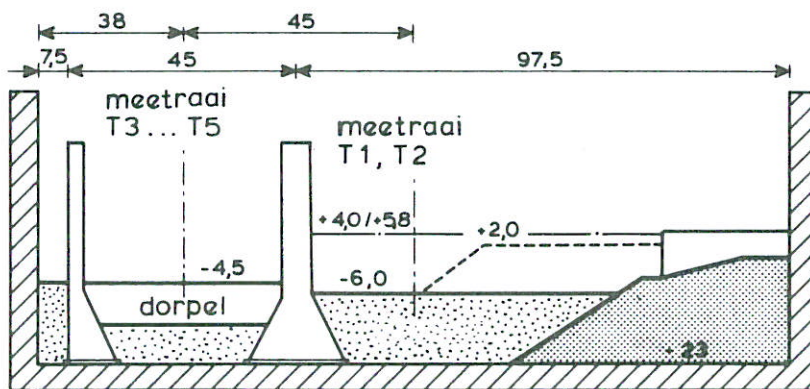
$\bar{u}_{as}$  = stroomsnelheid in as dam (T1, T2)

$\bar{u}$  = stroomsnelheid in aangrenzende poortje (T3, T4, T5)

Tabel 17 Omkegeling, invloedsfaktor  $k_0$



BOVENAANZICHT



DOORSNEDE A-A

- damuitbouw
- bovenbouw
- bouwfase - profiel omkegeling

maten in m prototype

PROEFOPSTELLING ONDERBOUW EN OMKEGELING

PENTAGOOT

SCHAAL 1:1500

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

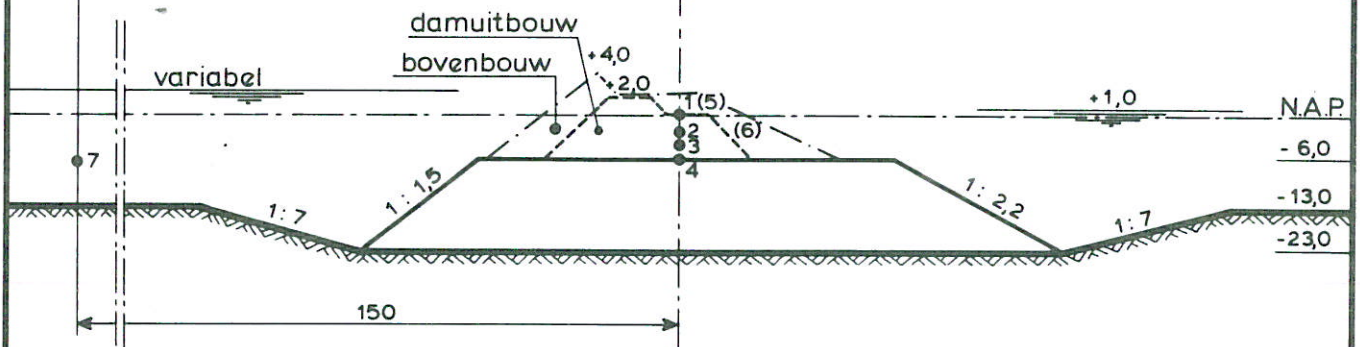
FIG. 1

ZEEZUDE

OOSTERSCHELDEZUDE

meetverticaal  
bovenstrooms

meetvertikaal  
as SVKO



$H_0$  = instel-golfhoogte op stil water

- o = meetpunt in as dam op : N.A.P. } middeling geeft  $\bar{u}_{as}$
- 2,0 }
- 4,0 }
- 6,0 }
- in as dorpel op : N.A.P. } middeling geeft  $\bar{u}$
- 2,0 }
- in aanstroming op : - 6,0

maten in m prototype

LOCATIE MEETPUNTEN STROOMSNELHEDEN

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

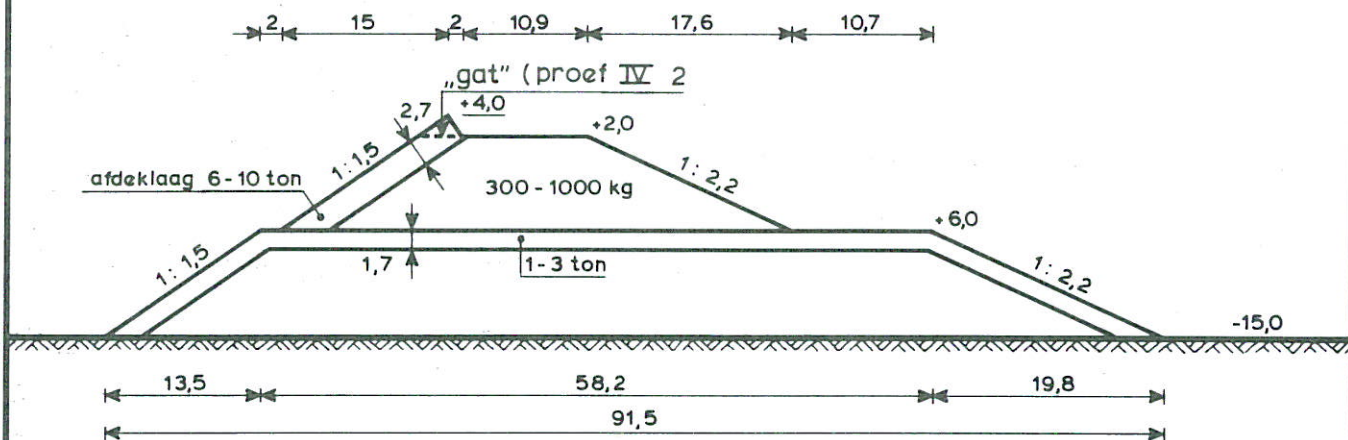
M 2028

FIG. 2



ZEEZUDE

OOSTERSCHELDEZUDE



maten in m prototype

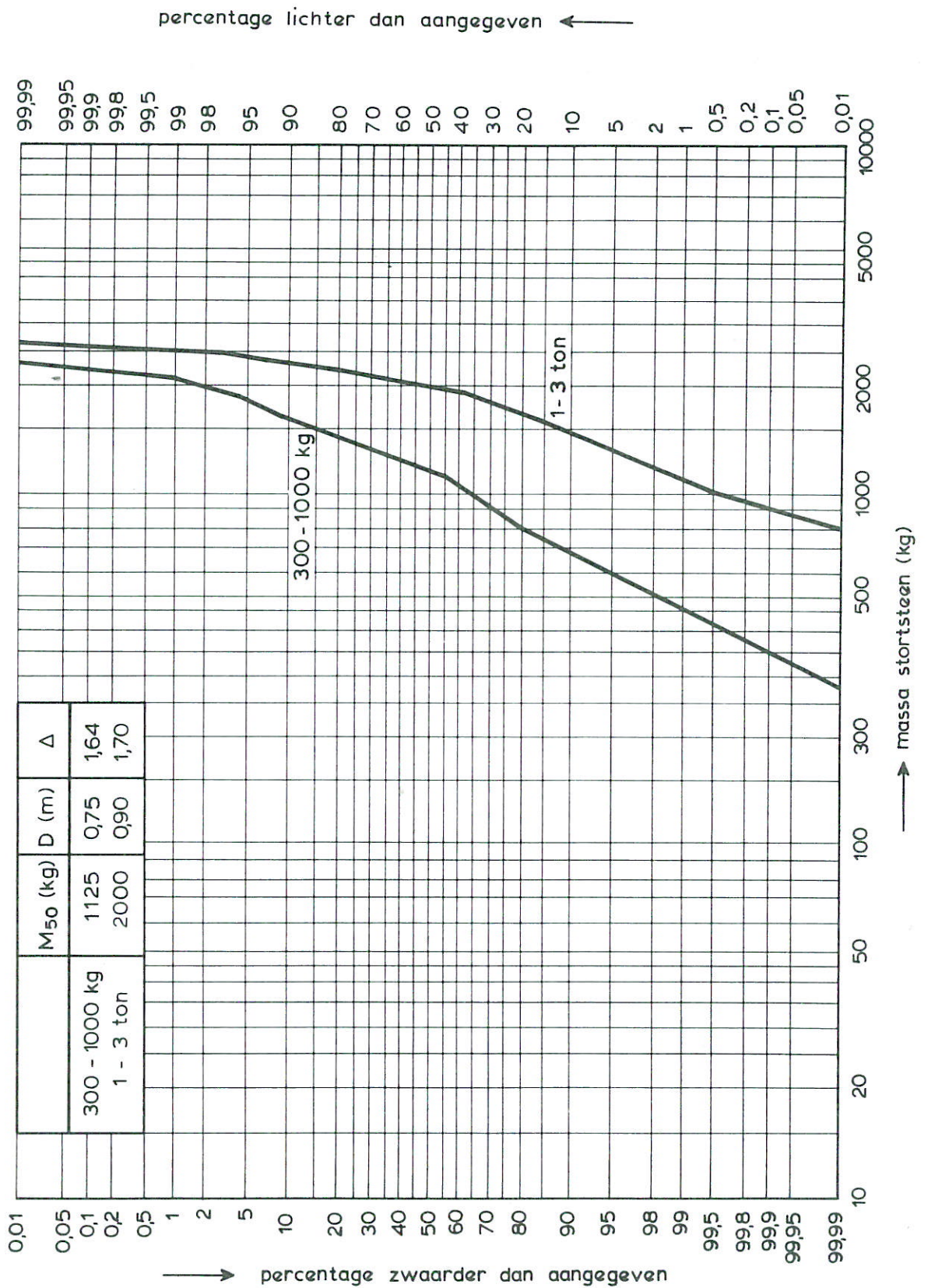
PROEFOPSTELLING BOVENBOUW (SCHELDEGOOT)

SCHAAL 1: 650

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 3



MASSAVERDELING BREUKSTEEN

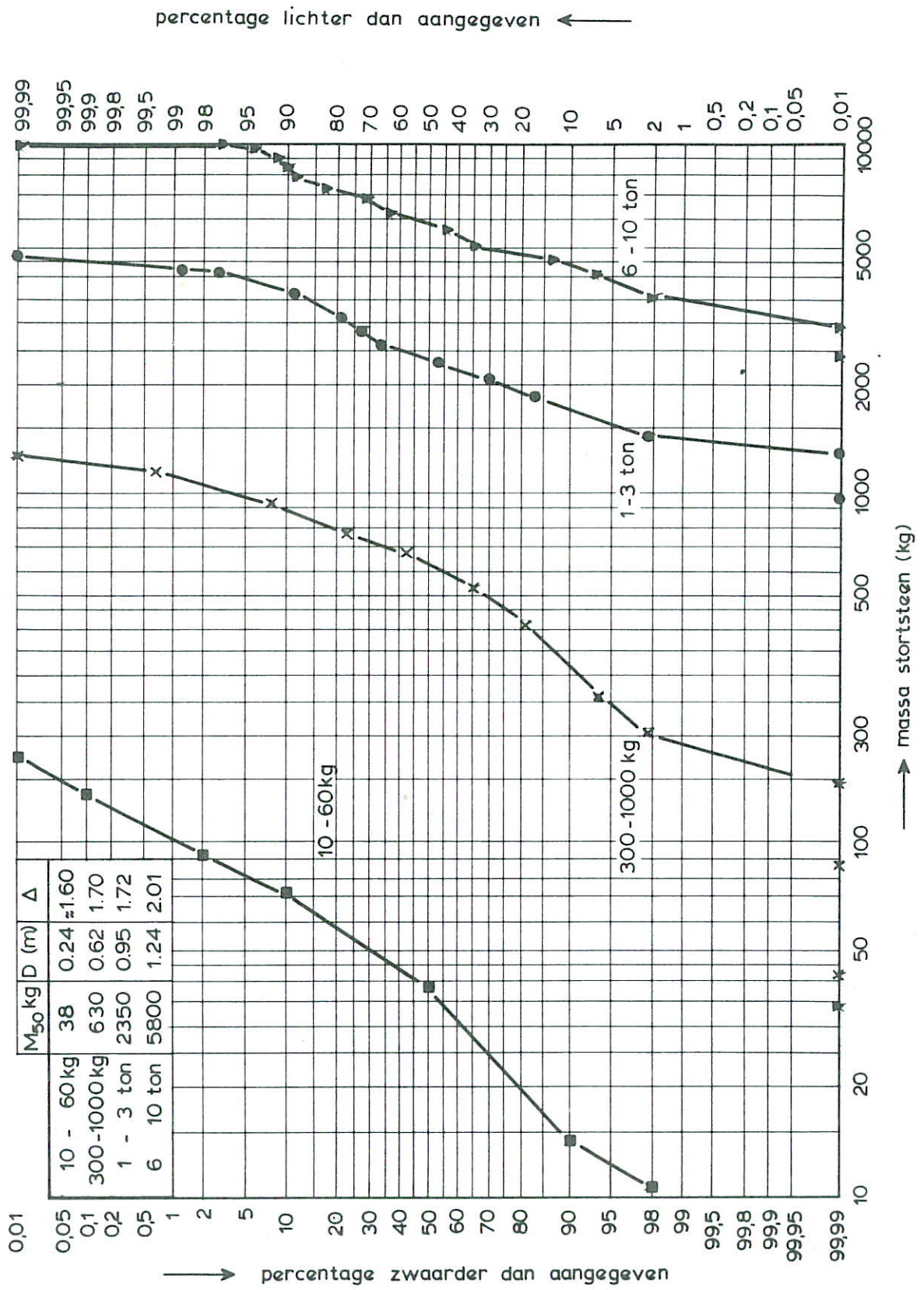
T1, T2

PROEVEN ONDERBOUW (PENTAGOOT)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 4



MASSA VERDELING BREUKSTEEN

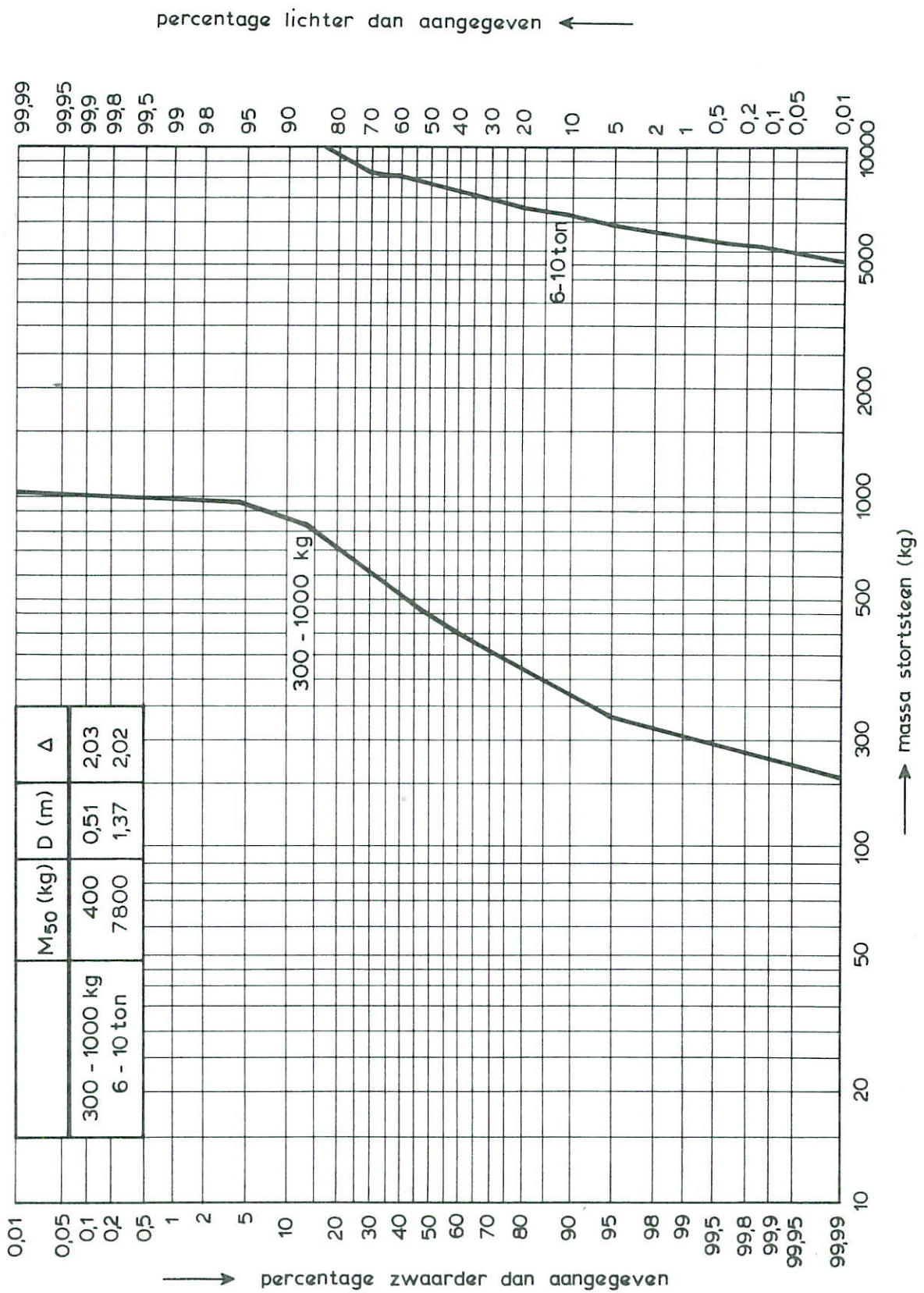
T3, T4, T5

PROEVEN OMKEGELING (PENTAGOOT)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 5



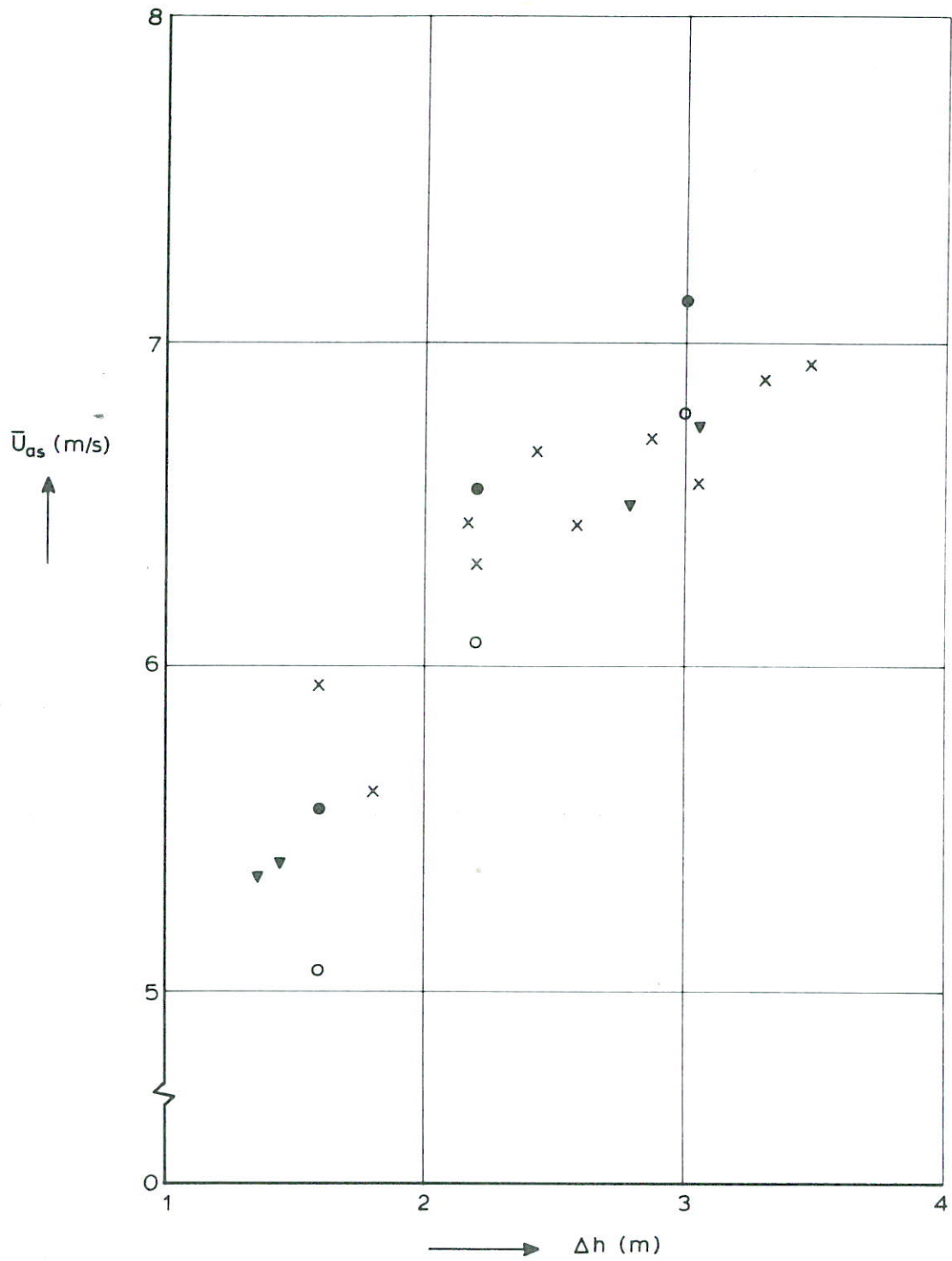
MASSAVERDELING BREUKSTEEN  
 PROEVEN BOVENBOUW (PENTAGOOT)

I1... IV2

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 6



M 2028 - I	M2028 - II
▼ T7	● T1
x T6	○ T2

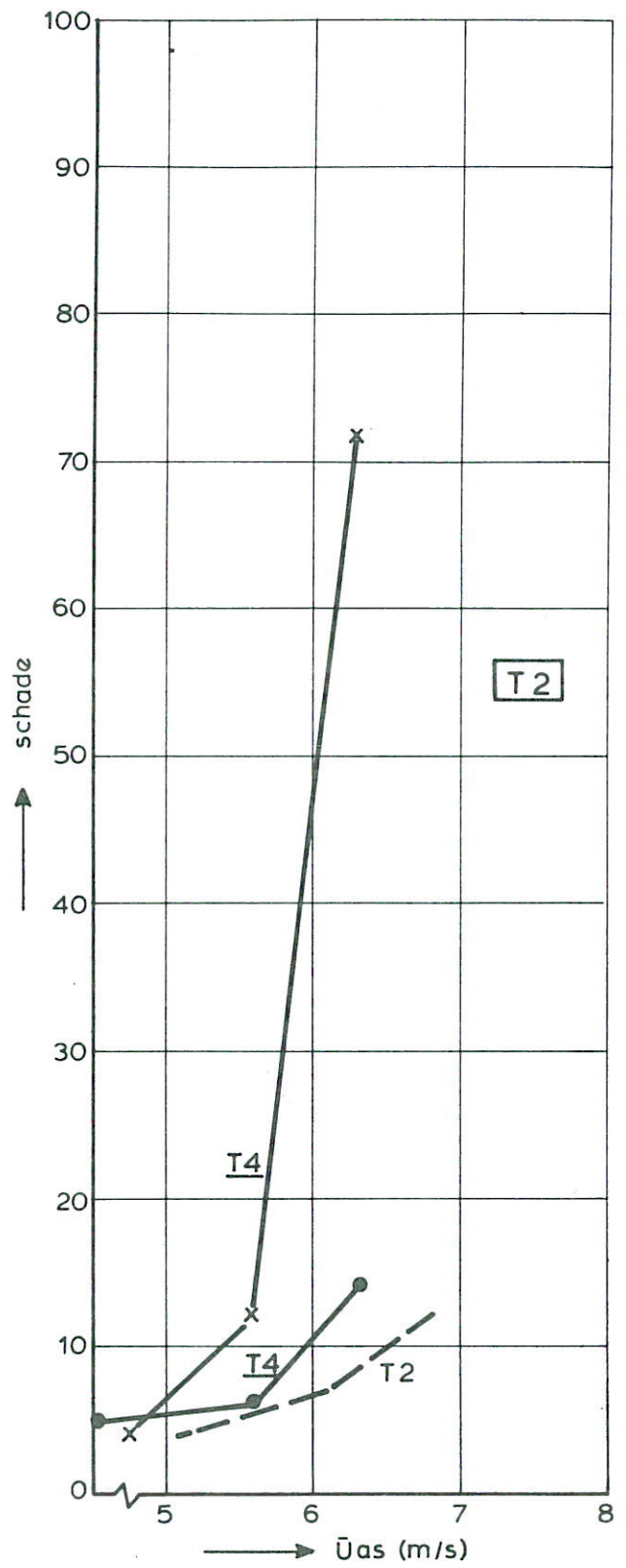
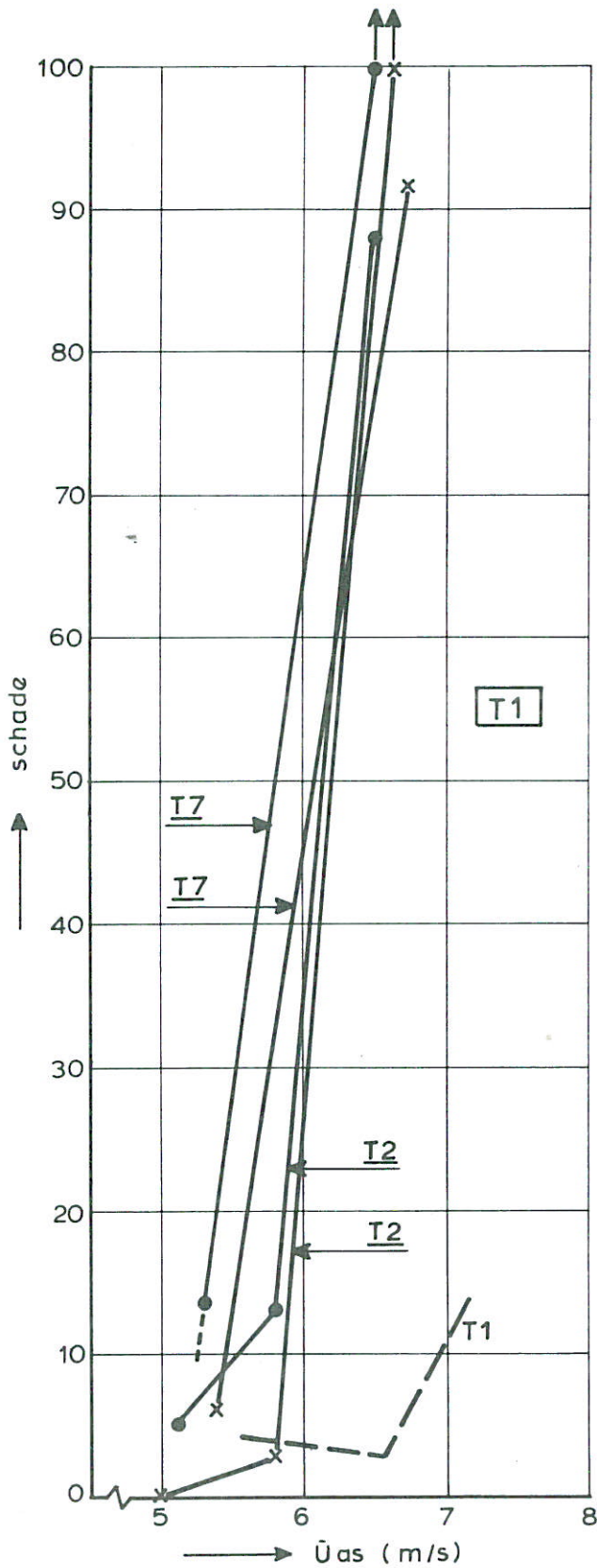
T1, T2 CONTROLE VERVALINSTELLING

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 7



T2, T4, T7 : proefnummers M 2028 - I  
 ● Noord - Beveland  
 x Noordland  
 B = bezwijktoestand

ΔD M 2028 - I : 0,92 m  
 ΔD M 2028 - II : 1,23m

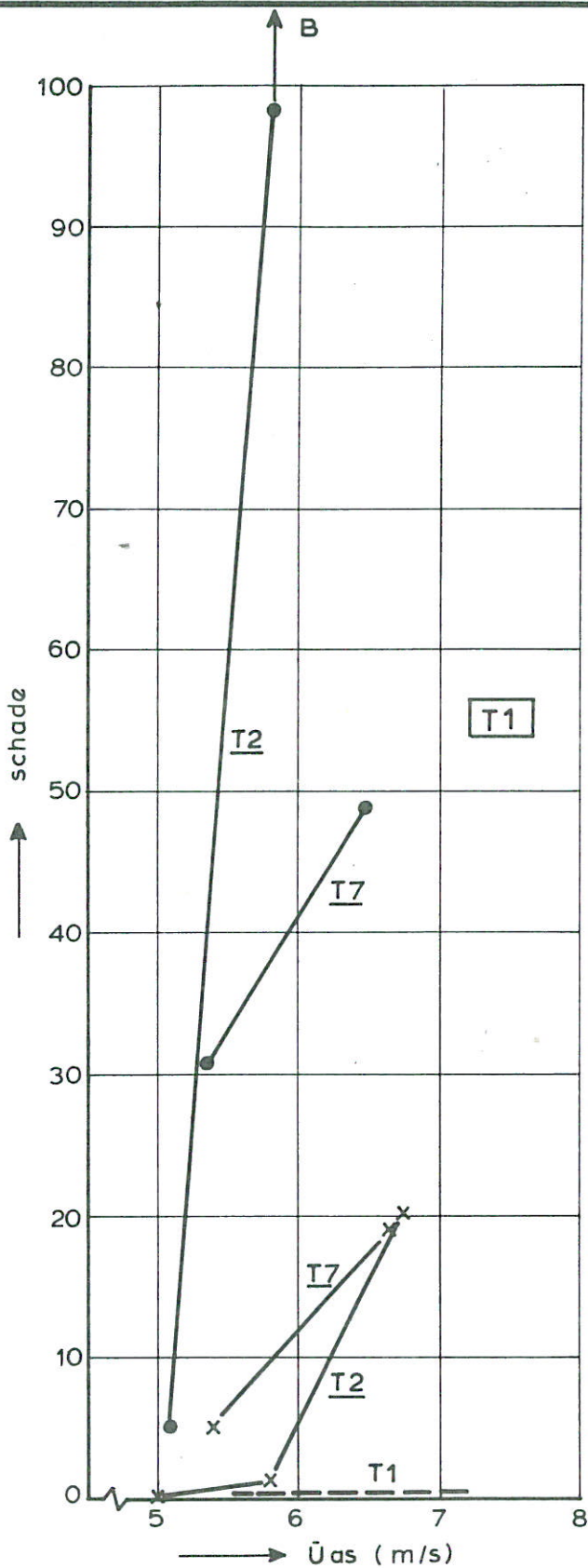
CALIBRATIE SCHADE KRUIJN PENTAGOOT / M 1001

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 8

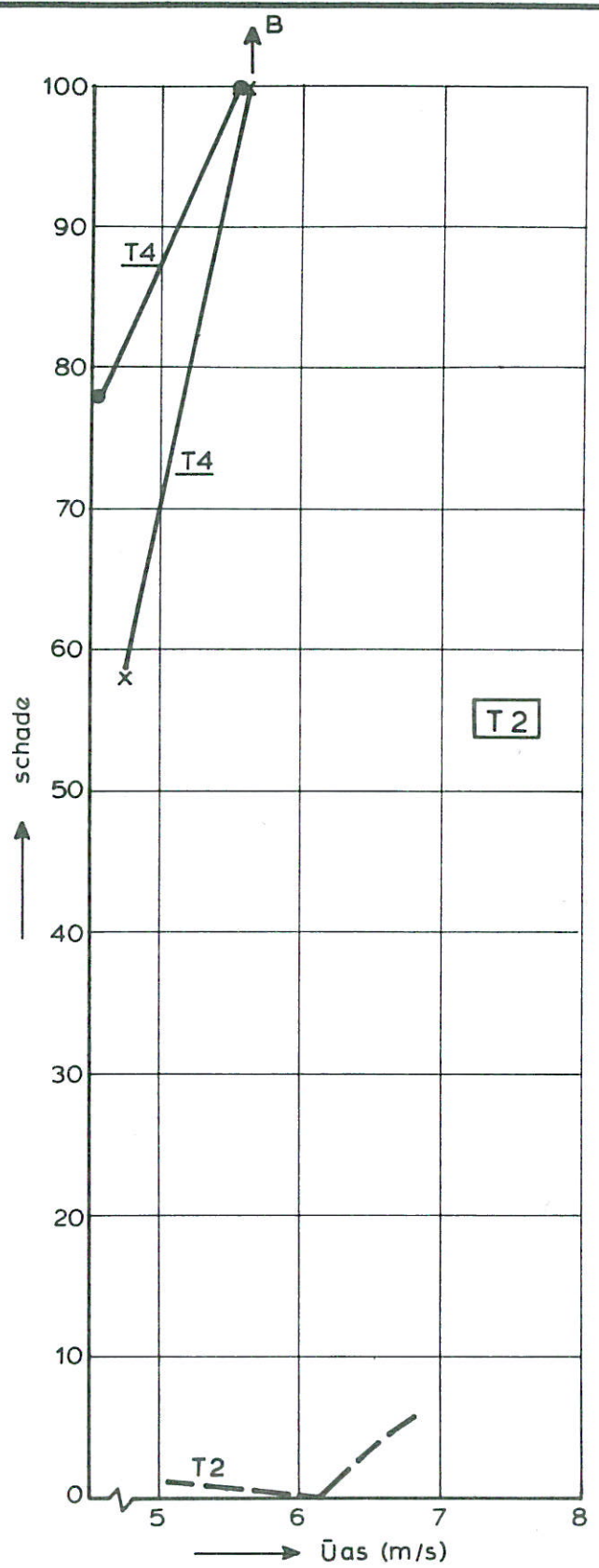


T2, T4, T7 : proefnummers M 2028 - I

● Noord - Beveland

x Noordland

B = bezwijktoestand



$\Delta D$  M 2028 - I = 0,92 m ( T6 : 1,38m)

$\Delta D$  M 2028 - II = 1,23m

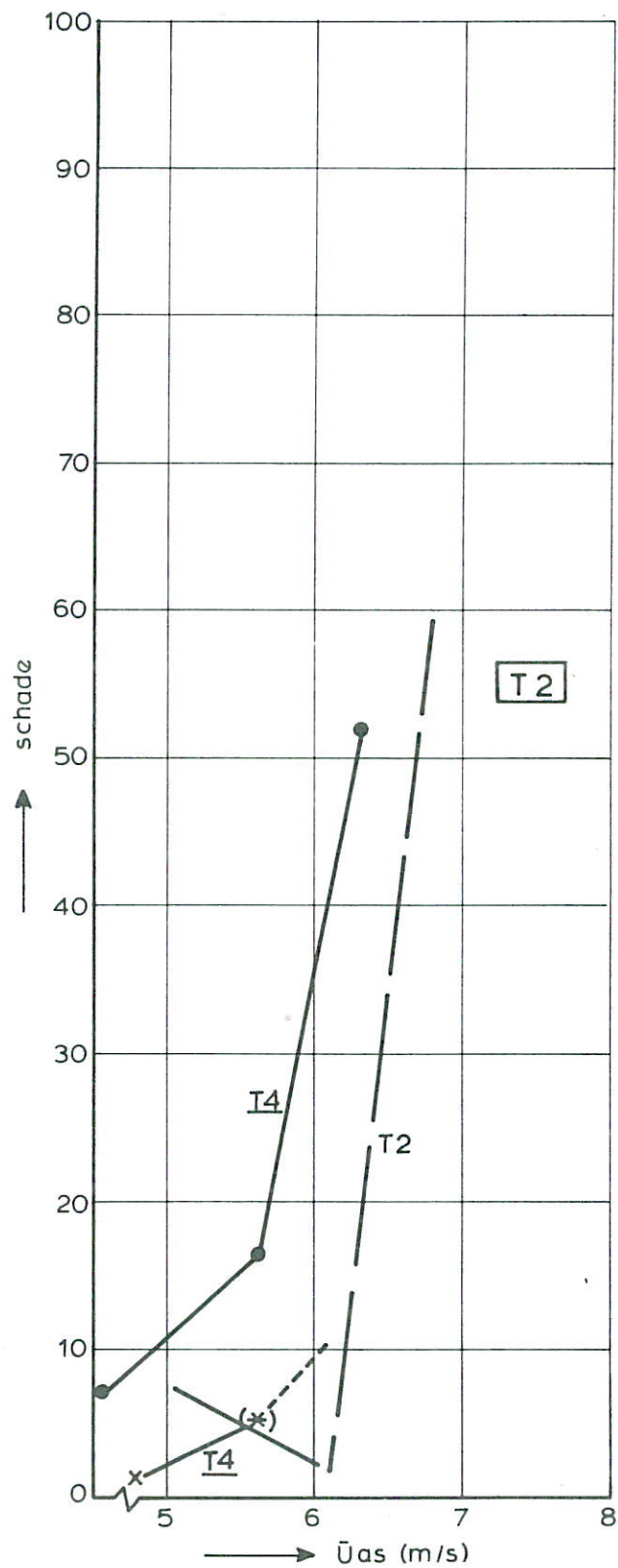
CALIBRATIE SCHADE TALUD PENTAGOOT / M 1001

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 9



T4 : proefnummers M 2028 - I

o Noord - Beveland

x Noordland ((\*) met  $\bar{U}_{as}$  van Noord - Beveland)

CALIBRATIE SCHADE DAMUITBOUW

PENTAGOOT / M1001

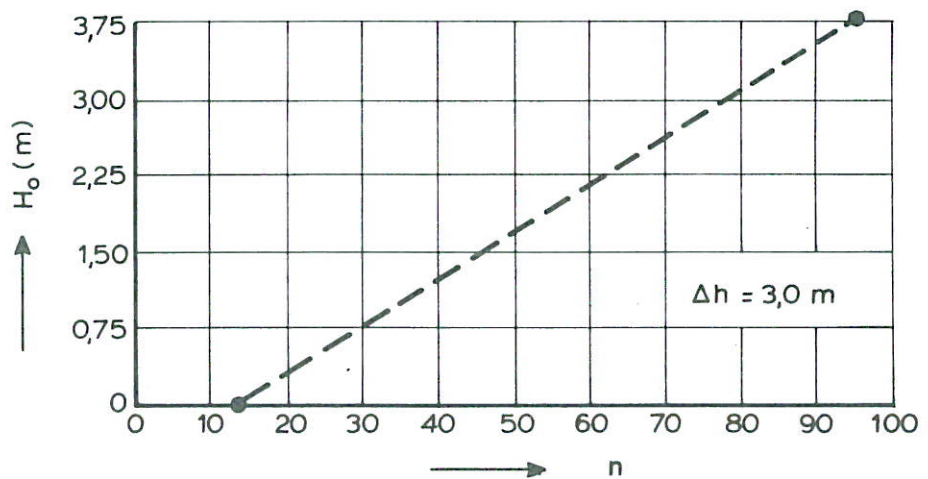
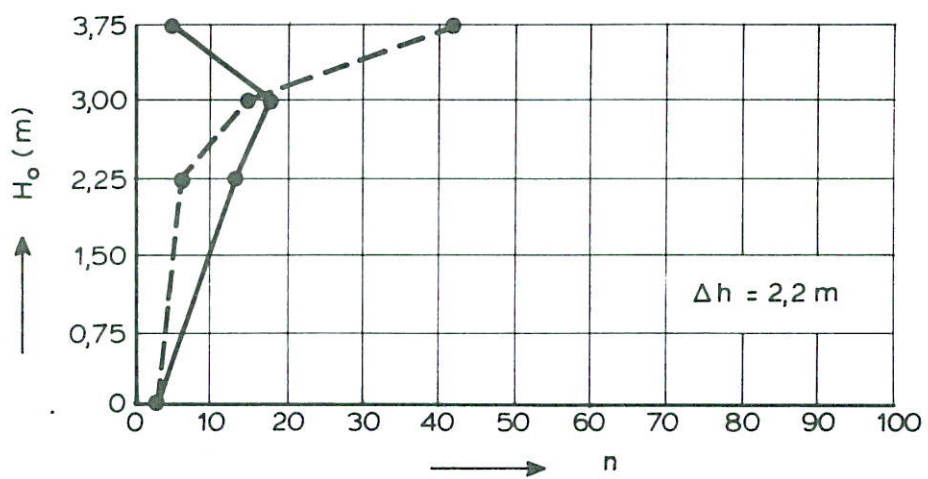
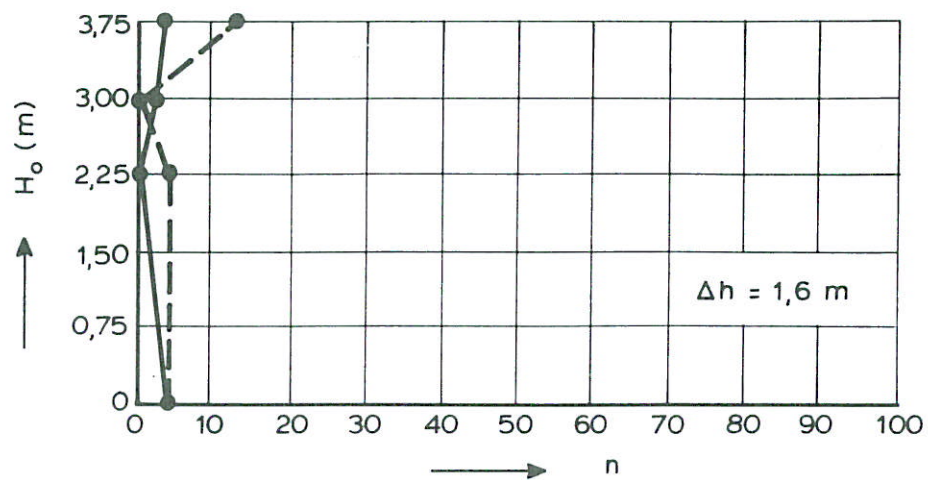
ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 10





——— T = 5 s  
 - - - T = 10 s  
 n = aantal verplaatste stenen  
 T1 = zonder damuitbouw  
 T2 = met damuitbouw

$M_{50} = 1125 \text{ kg}$

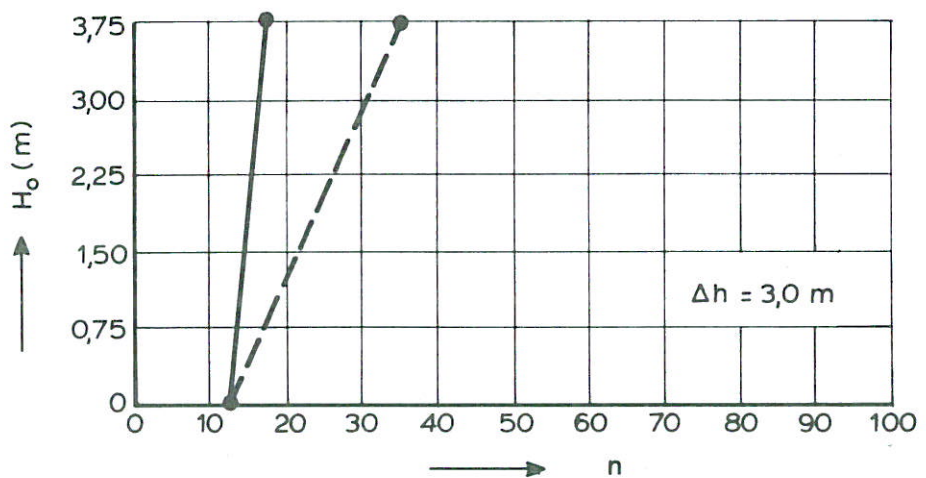
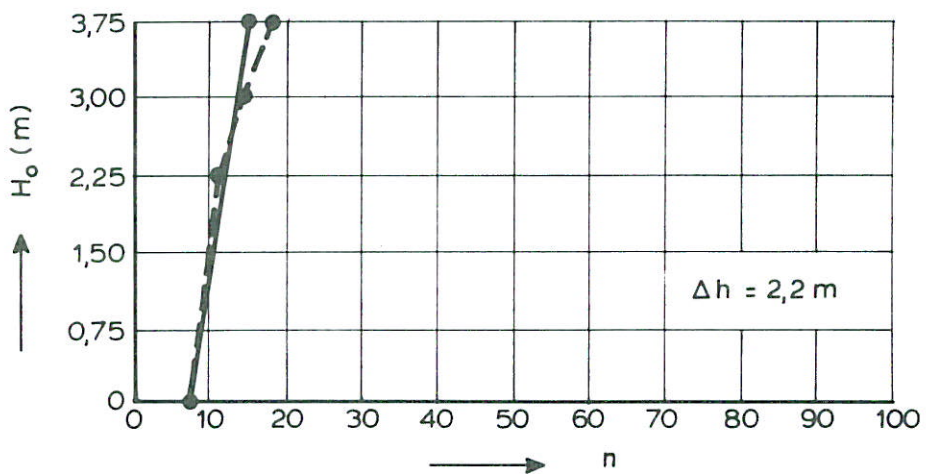
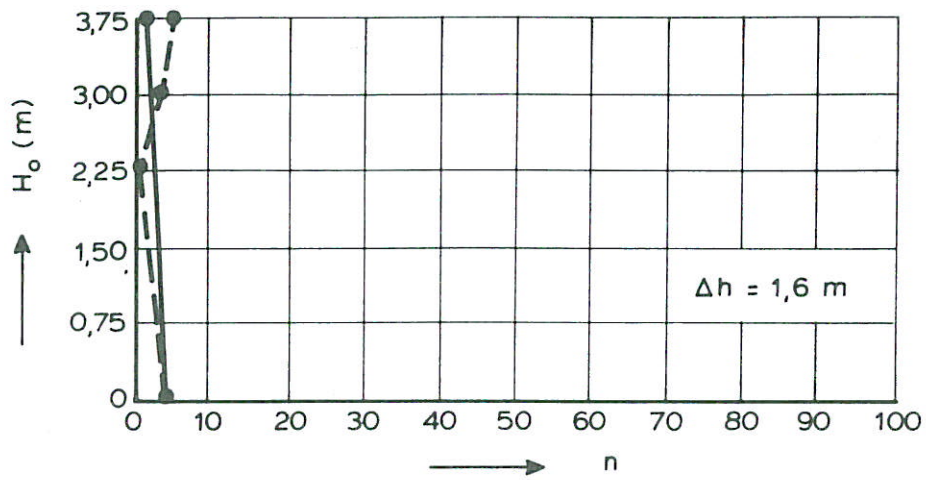
T1 SCHADE KRUIJN ALS FUNCTIE  
VAN DE GOLFHOOGTE

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 11



——— T = 5 s  
 - - - T = 10 s  
 n = aantal verplaatste stenen  
 T1 = zonder damuitbouw  
 T2 = met damuitbouw

$M_{50} = 1125$  kg

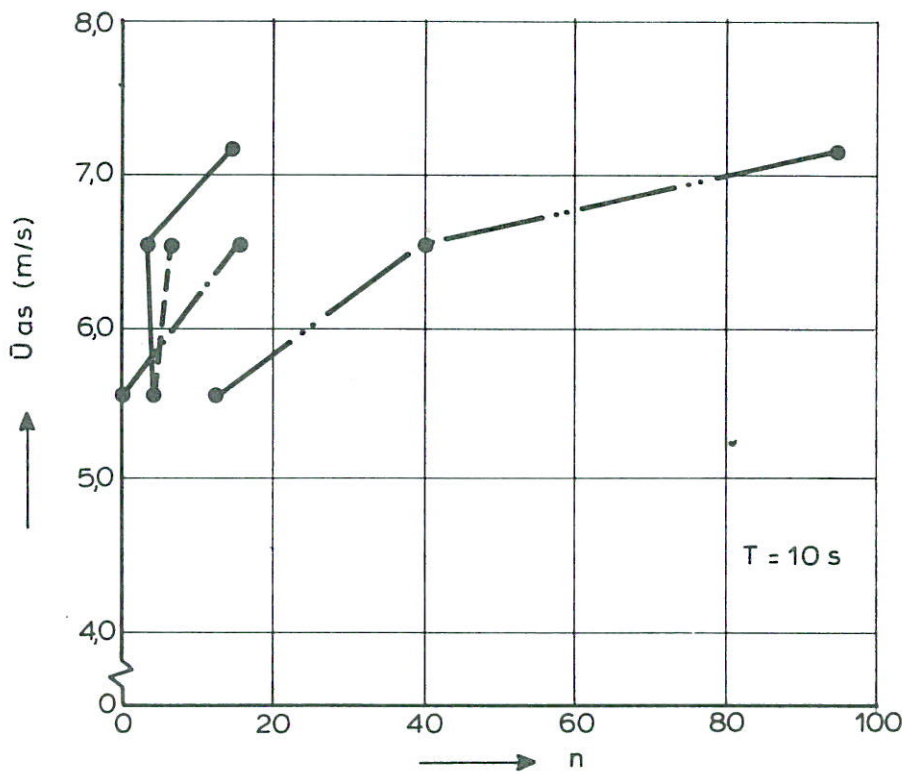
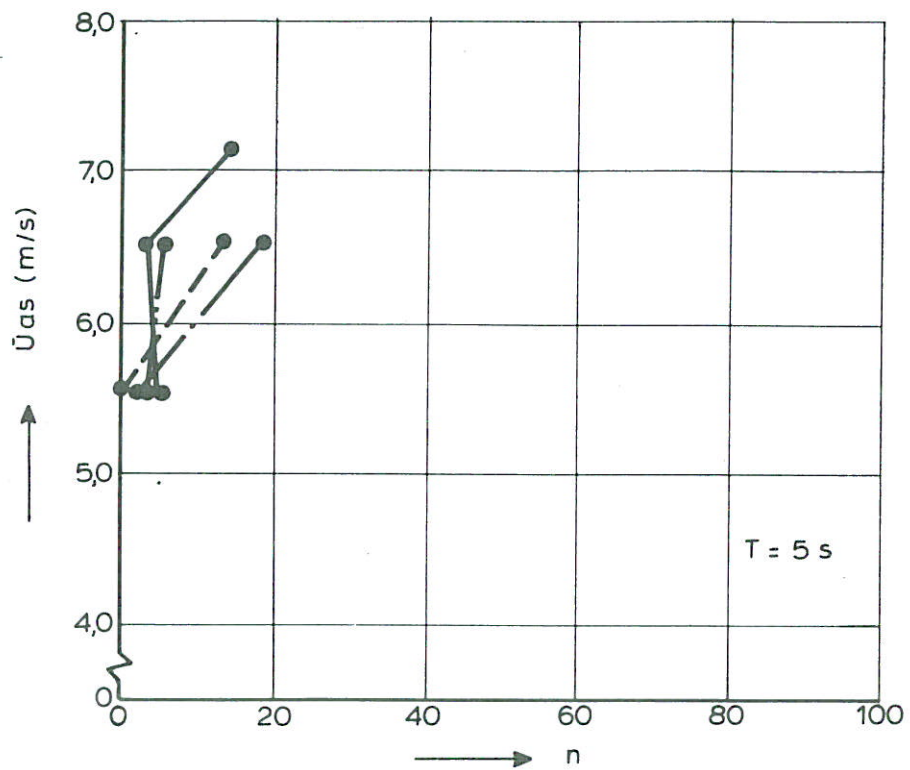
T2 SCHADE KRUIJN ALS FUNCTIE  
VAN DE GOLFHOOGTE

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 12



$n$  = aantal verplaatste stenen  
 T1 = zonder damuitbouw  
 T2 = met damuitbouw

— H = 0 , T = 0  
 - - - H = 2,25 m  
 - · - H = 3,00 m  
 - · · - H = 3,75 m  
 $M_{50} = 1125 \text{ kg}$

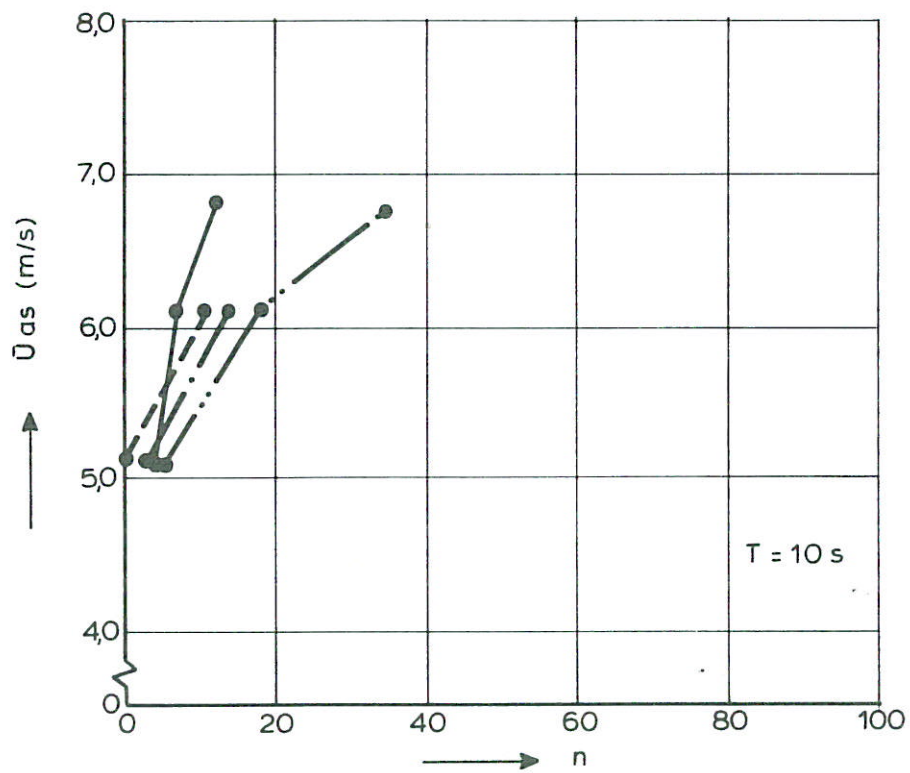
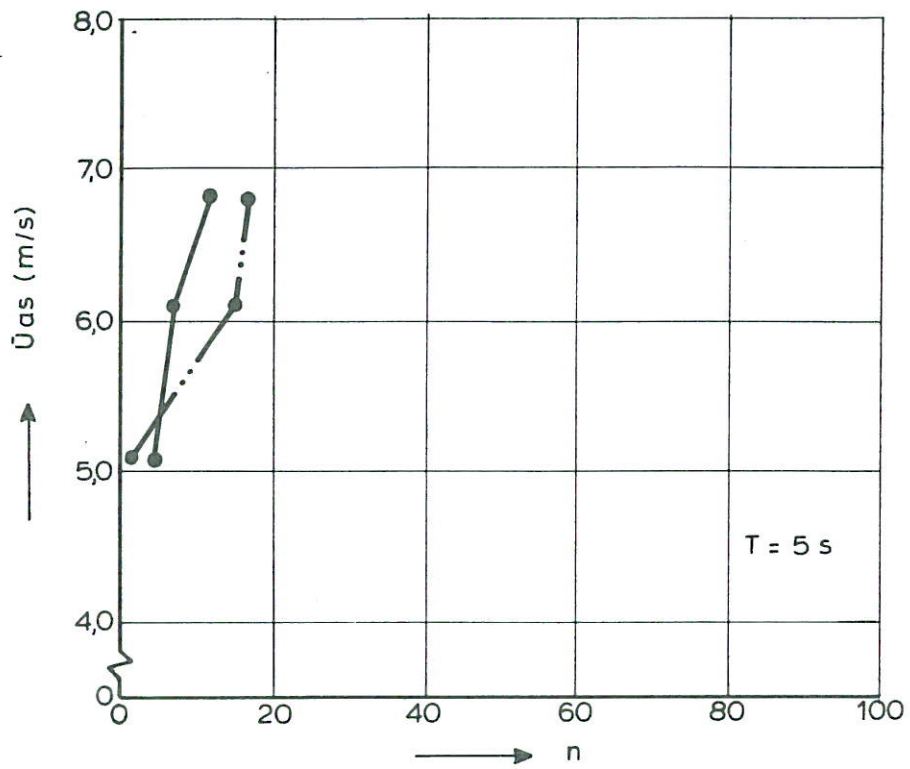
T1 SCHADE KRUIJN ALS FUNCTIE VAN  
 STROOMSNELHEID IN AS DAM

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 13



$n$  = aantal verplaatste stenen

$T_1$  = zonder damuitbouw

$T_2$  = met damuitbouw

—  $H = 0$  ,  $T = 0$

- - -  $H = 2,25 \text{ m}$

- · -  $H = 3,00 \text{ m}$

- · · -  $H = 3,75 \text{ m}$

$M_{50} = 1125 \text{ kg}$

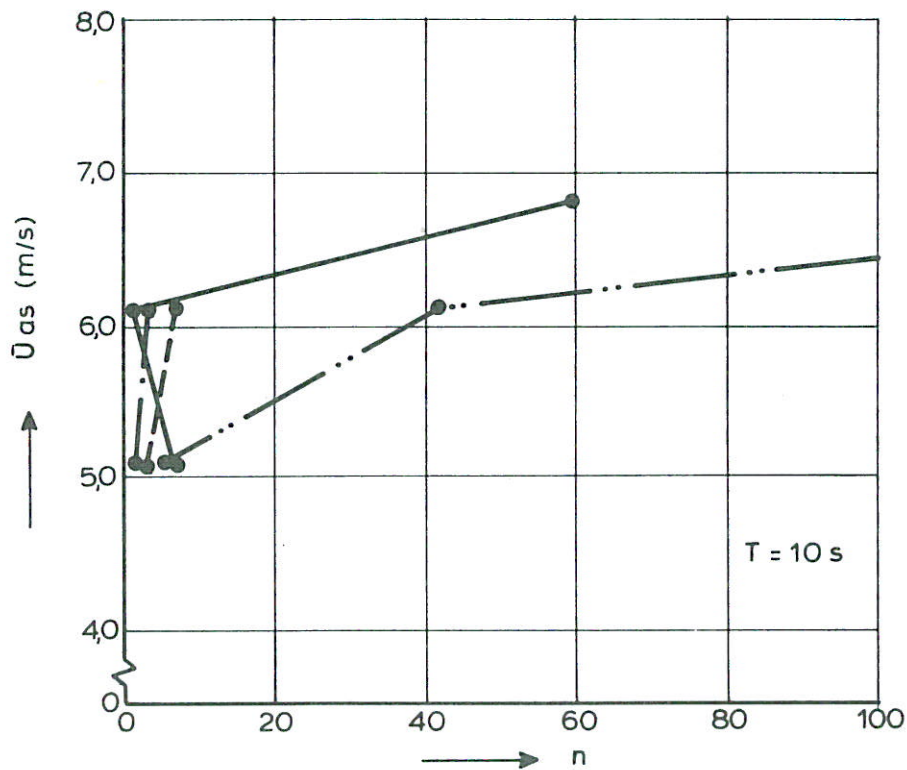
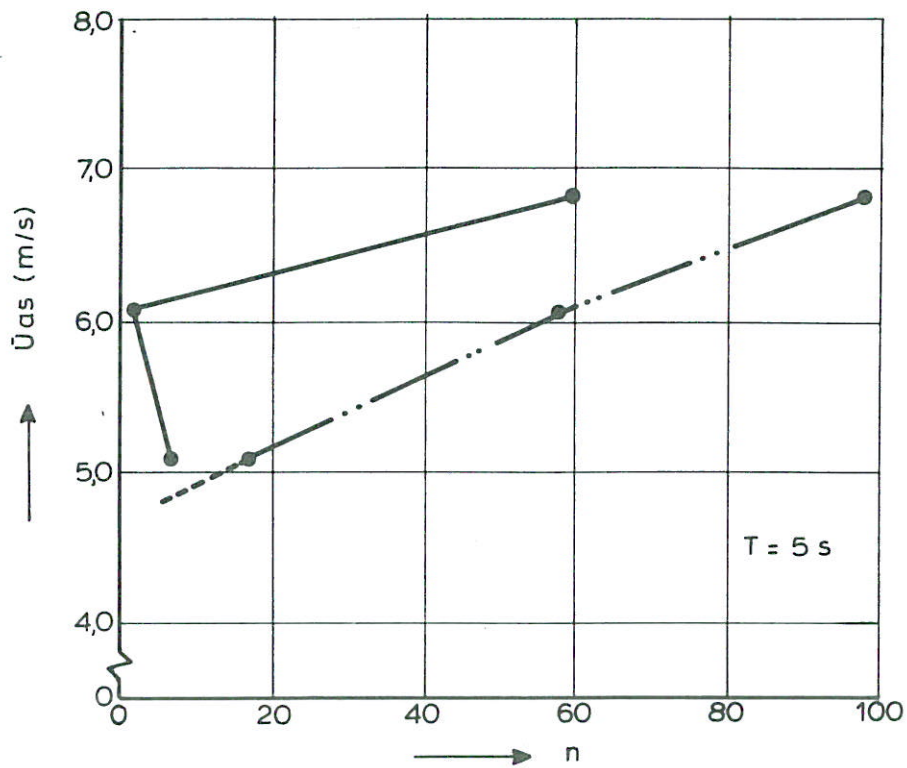
T2 SCHADE KRUIJN ALS FUNCTIE VAN  
DE STROOMSNELHEID IN AS DAM

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG 14



n = aantal verplaatste stenen  
 T1 = zonder damuitbouw  
 T2 = met damuitbouw

— H = 0 , T = 0  
 - - - H = 2,25 m  
 - · - H = 3,00 m  
 · · · H = 3,75 m  
 M<sub>50</sub> = 1125 kg

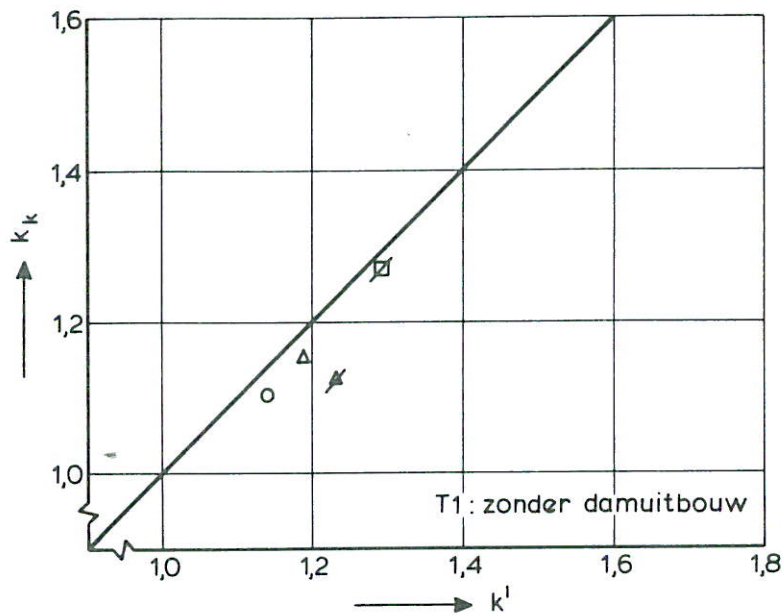
T2 SCHADE DAMUITBOUW ALS FUNCTIE  
 VAN DE STROOMSNELHEID IN AS DAM

ONDERBOUW

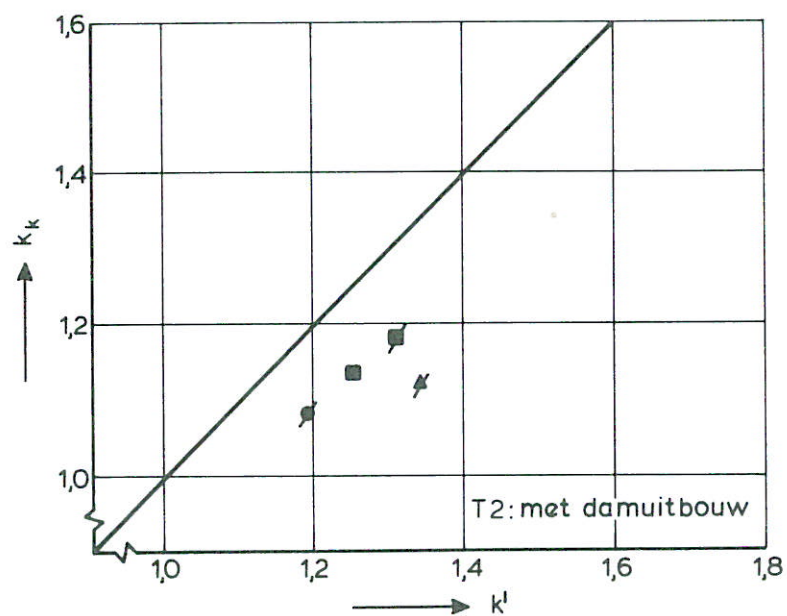
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 15



proeven-serie	H <sub>0</sub> (m)	T (s)	symbool
T1	2,25	5	○
	3,00		△
	3,75		□
	2,25	10	∅
	3,00		⋈
	3,75		⊠
T2	2,25	5	●
	3,00		▲
	3,75		■
	2,25	10	⊙
	3,00		⋈
	3,75		⊠



$k'$  is gerelateerd aan de berekende orbitaalsnelheid as dam op N.A.P. - 2 m ( $\hat{=}$  halve waterdiepte) : berekening orbitaalsnelheid met  $H_0$

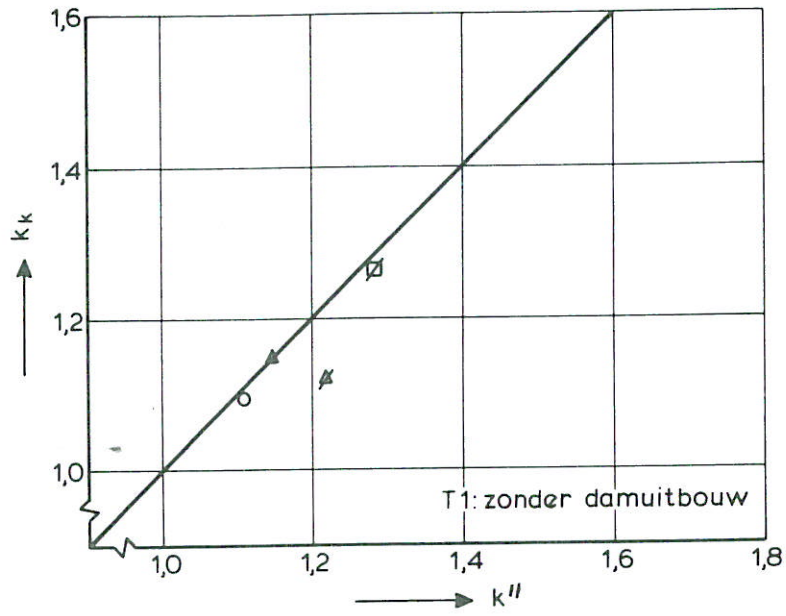
STABILITEITSVOORSPELLING KRUIJN MET  
THEORETISCHE ORBITAALSNELHEID AS DAM OP  
HALVE WATERDIEPTE

ONDERBOUW

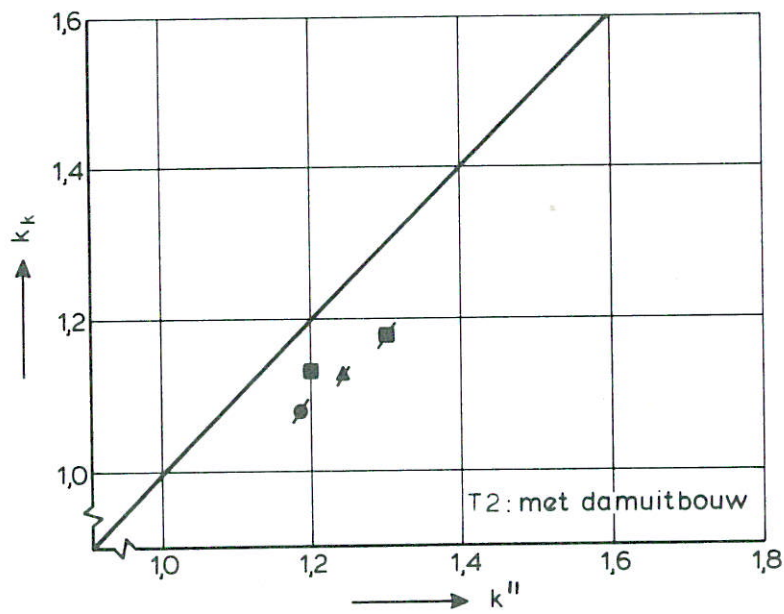
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 16



proeven-serie	H <sub>0</sub> (m)	T (s)	sym-bool
T1	2,25	5	o
	3,00		Δ
	3,75		□
	2,25	10	∅
	3,00		⊗
	3,75		⊘
T2	2,25	5	●
	3,00		▲
	3,75		■
	2,25	10	⊙
	3,00		⊗
	3,75		⊘



$k''$  is gerelateerd aan de berekende orbitaalsnelheid as dam aan de bodem (N.A.P. - 6 m); berekening orbitaalsnelheid met  $H_0$

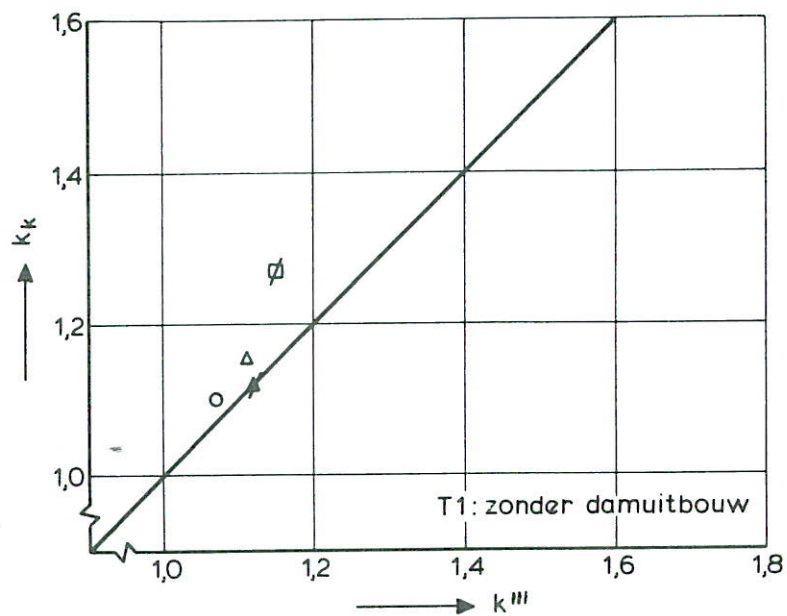
STABILITEITSVOORSPELLING KRUIN MET  
THEORETISCHE ORBITAALSNELHEID AS DAM AAN  
DE BODEM

ONDERBOUW

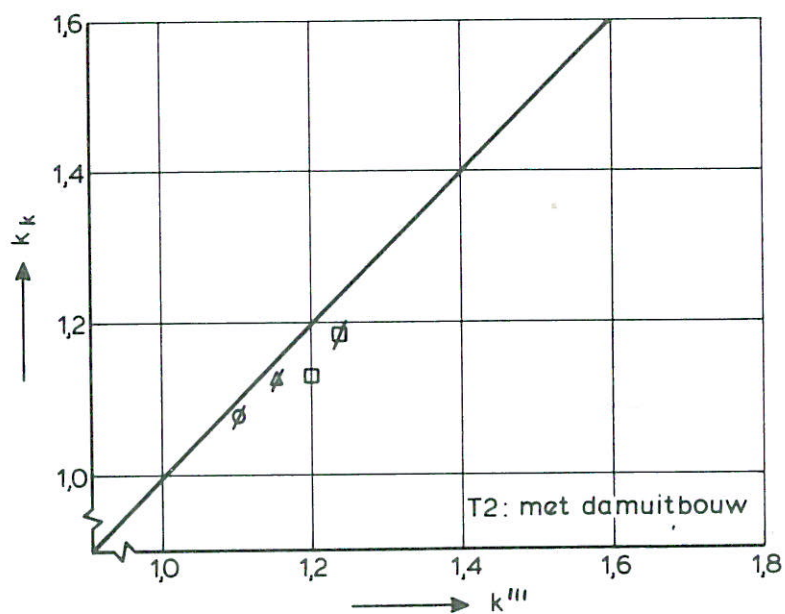
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 17



proeven-serie	H <sub>0</sub> (m)	T (s)	symbool
T1	2,25	5	o
	3,00		Δ
	3,75		□
	2,25	10	∅
	3,00		⚡
	3,75		⚡
T2	2,25	5	●
	3,00		▲
	3,75		■
	2,25	10	∅
	3,00		⚡
	3,75		⚡



$k'''$  is gelateerd aan de gemeten orbitaalsnelheid (=  $u_{max} - \bar{u}$ ) as dam op N.A.P. - 2 m ( $\hat{=}$  halve waterdiepte)

STABILITEITVOORSPELLING KRUIN MET  
GEMETEN ORBITAALSNELHEID AS DAM OP  
HALVE WATERDIEPTE

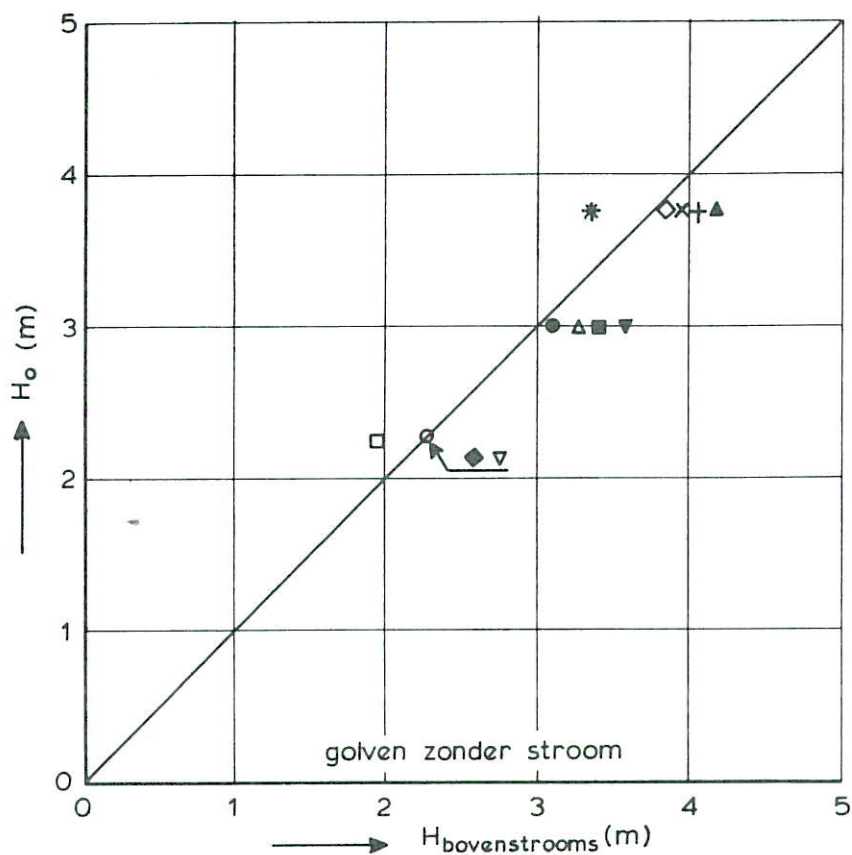
ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

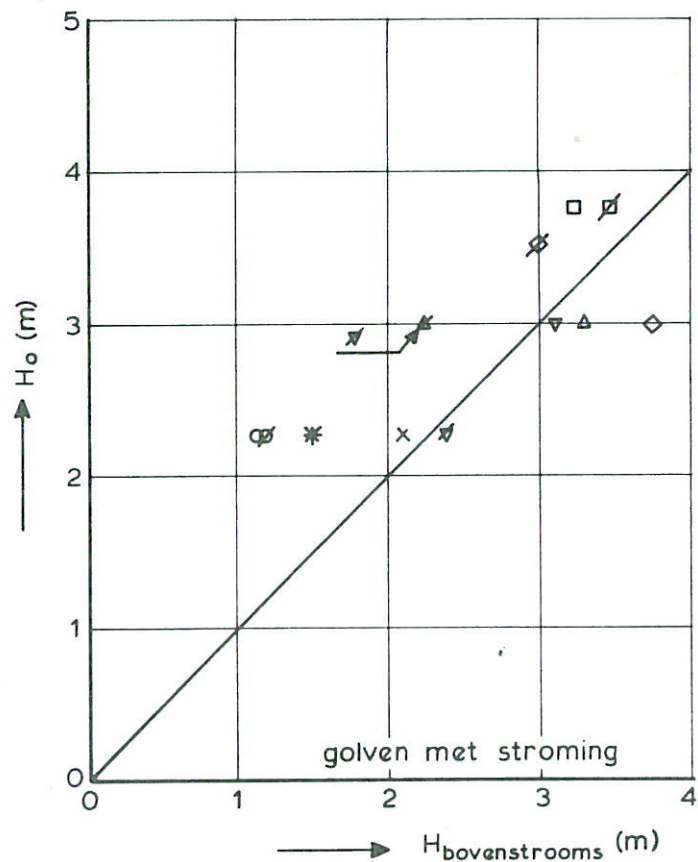
M 2028

FIG. 18





proef	symbool
a	o
b	●
c	+
d	□
e	■
f	◇
g	◆
h	△
i	▲
j	▽
k	▼
l	x
m	*



proef	verval (m)	golf		symbool
		H <sub>0</sub> (m)	T (s)	
A 1	1,6	2,25	5	o
A 2		3,00		△
A 3		3,75		□
A 4		2,25	10	∅
A 5		3,00		▲
A 6		3,75		∅
B 1	2,2	2,25	5	x
B 2		3,00		▽
B 3		3,75		◇
B 4		2,25	10	*
B 5		3,00		▲
B 6		3,75		∅

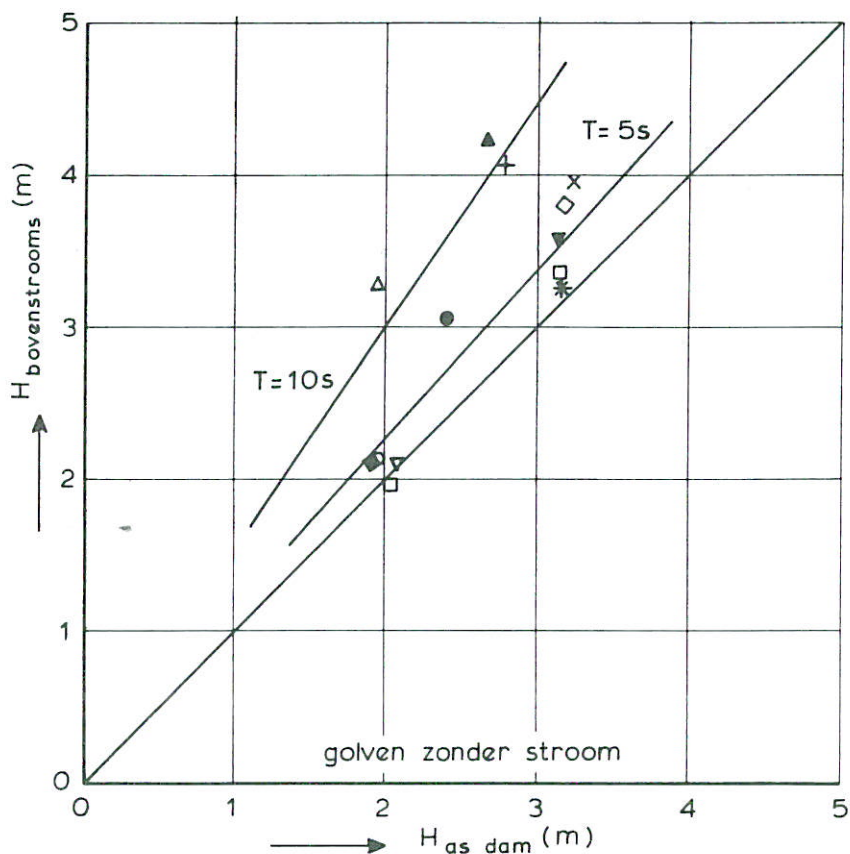
T1 AFW'JING INKOMENDE GOLFHOOGTE  
VAN H<sub>0</sub>

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

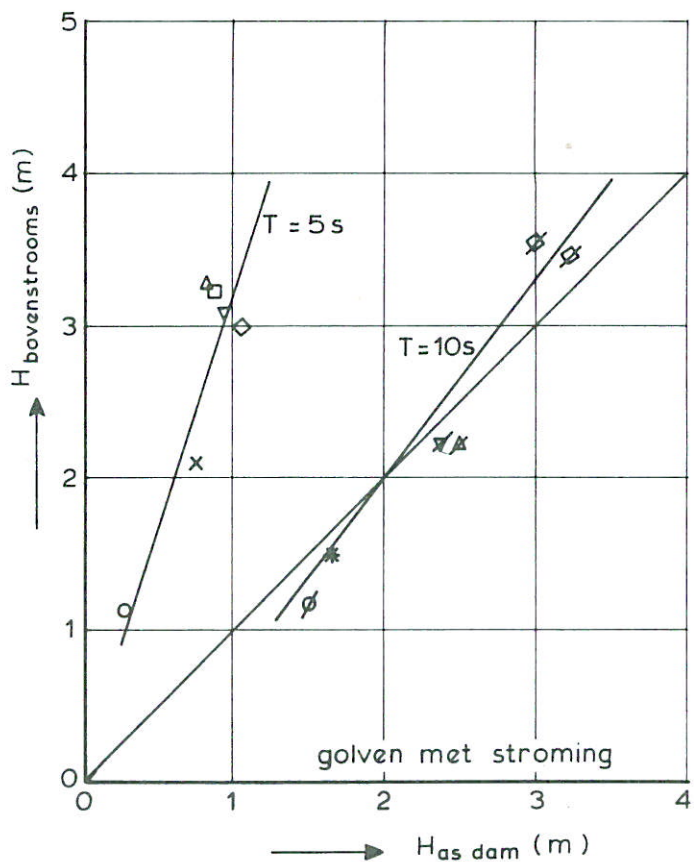
M 2028

FIG. 19



proef	symbool
a	o
b	●
c	+
d	□
e	■
f	◇
g	◆
h	△
i	▲
j	▽
k	▼
l	x
m	*

zie tabel



proef	veral (m)	golf		symbool
		H <sub>o</sub> (m)	T (s)	
A 1	1,6	2,25	5	o
A 2		3,00		△
A 3		3,75		□
A 4		2,25	10	∅
A 5		3,00		⊘
A 6		3,75		⊘
B 1	2,2	2,25	5	x
B 2		3,00		▽
B 3		3,75		◇
B 4		2,25	10	*
B 5		3,00		⊘
B 6		3,75		⊘

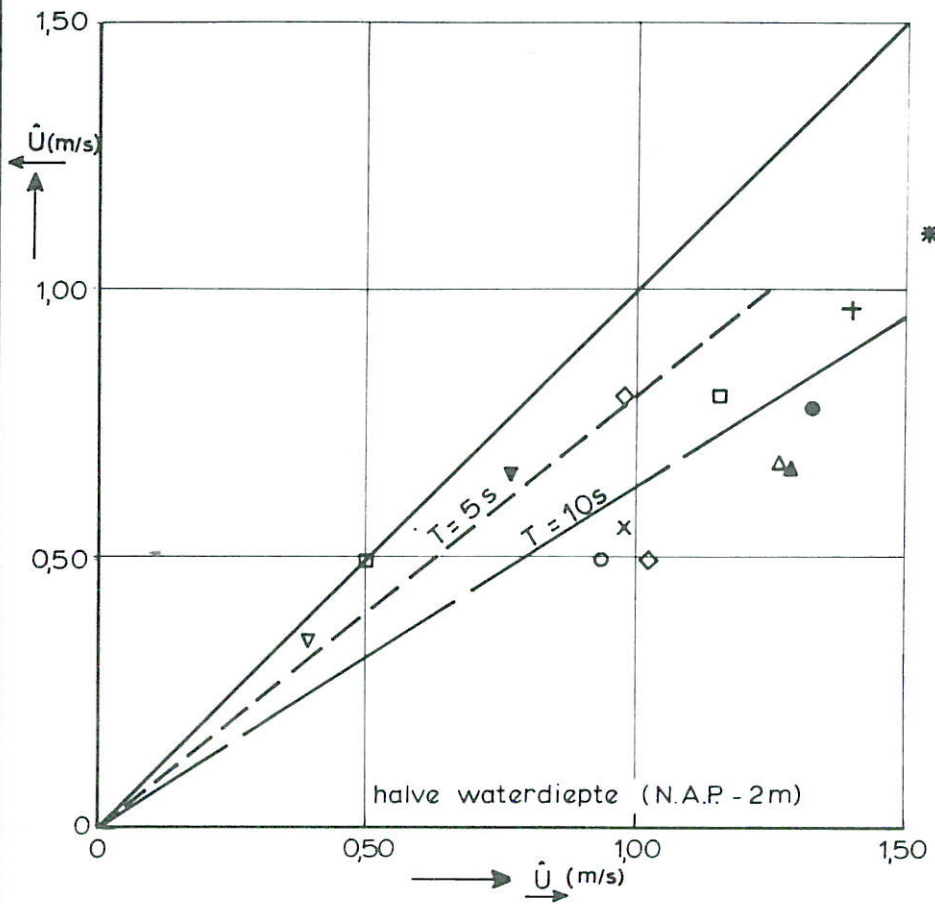
T1 REDUKTIE GOLFHOOGTE BOVEN DE KRUIJN

ONDERBOUW

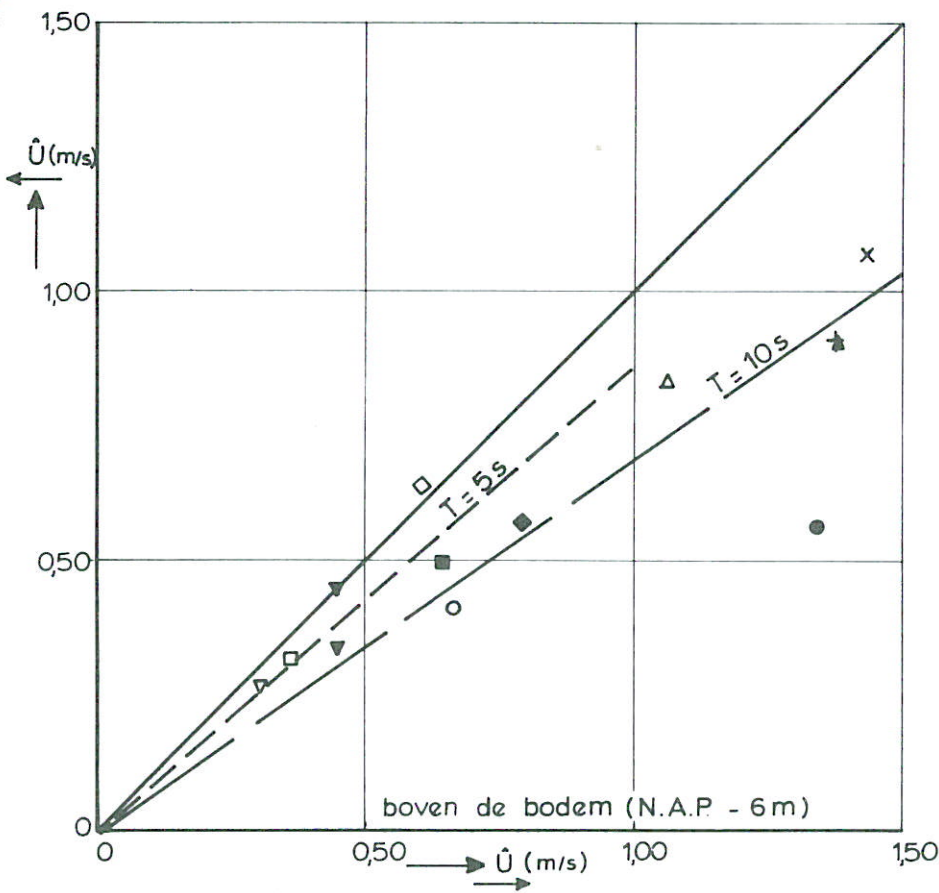
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 20



proef	symbool
a	o
b	●
c	+
d	□
e	■
f	◇
g	◆
h	△
i	▲
j	▽
k	▼
l	x
m	*



← tegen golfrichting in  
 → met golfrichting mee

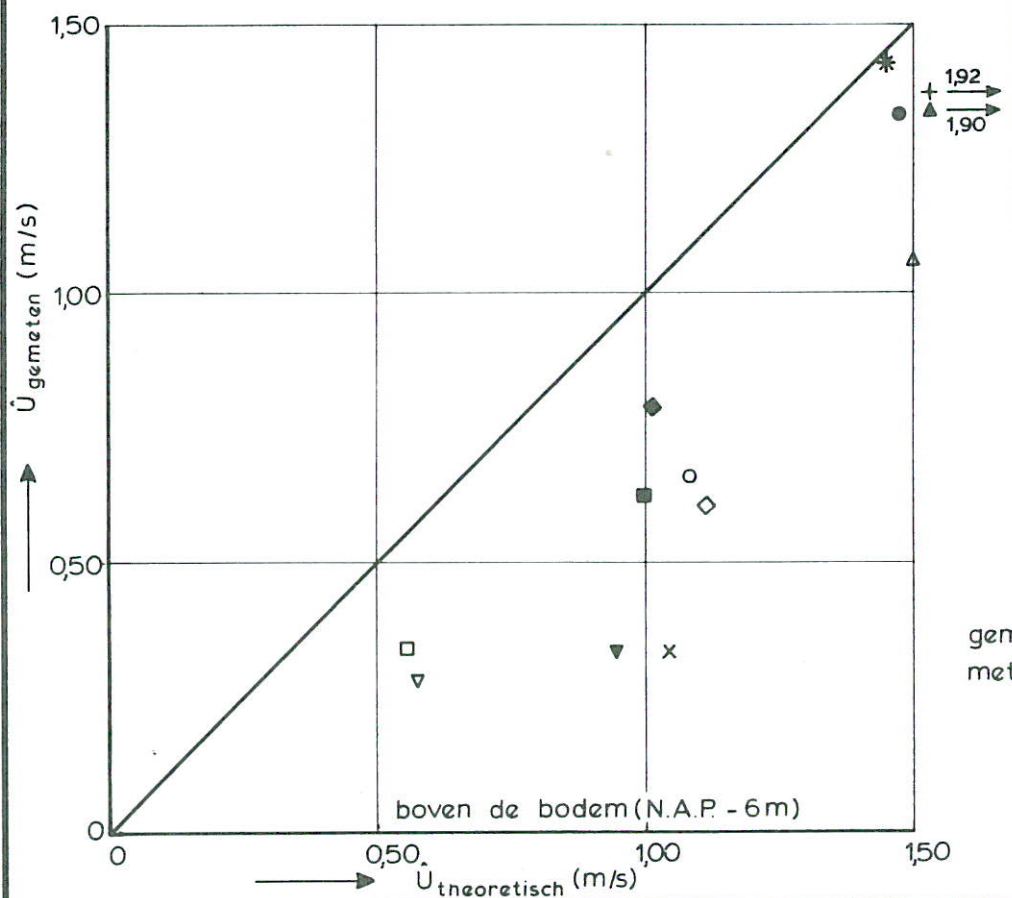
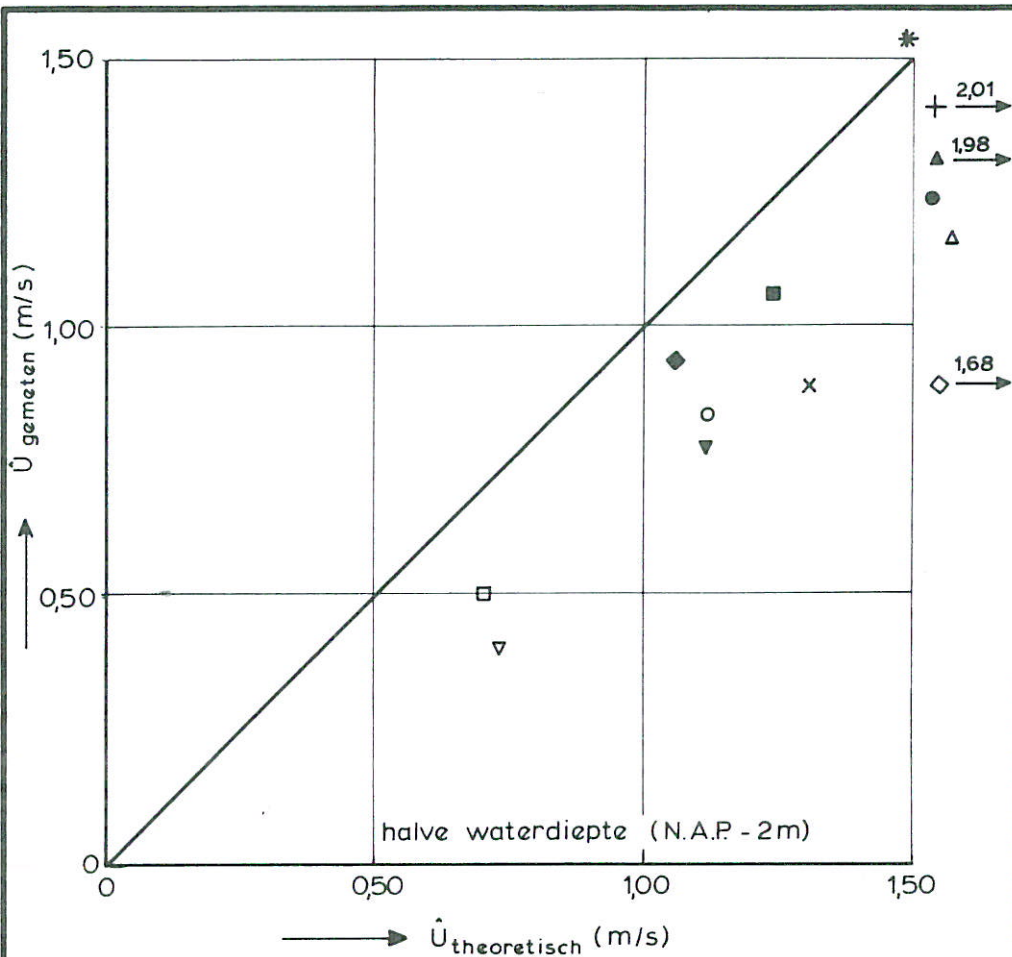
T1 ASYMMETRIE GEMETEN ORBITAALSNELHEDEN  
 BOVEN DE KRUIJN, GOLVEN ZONDER STROMING

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

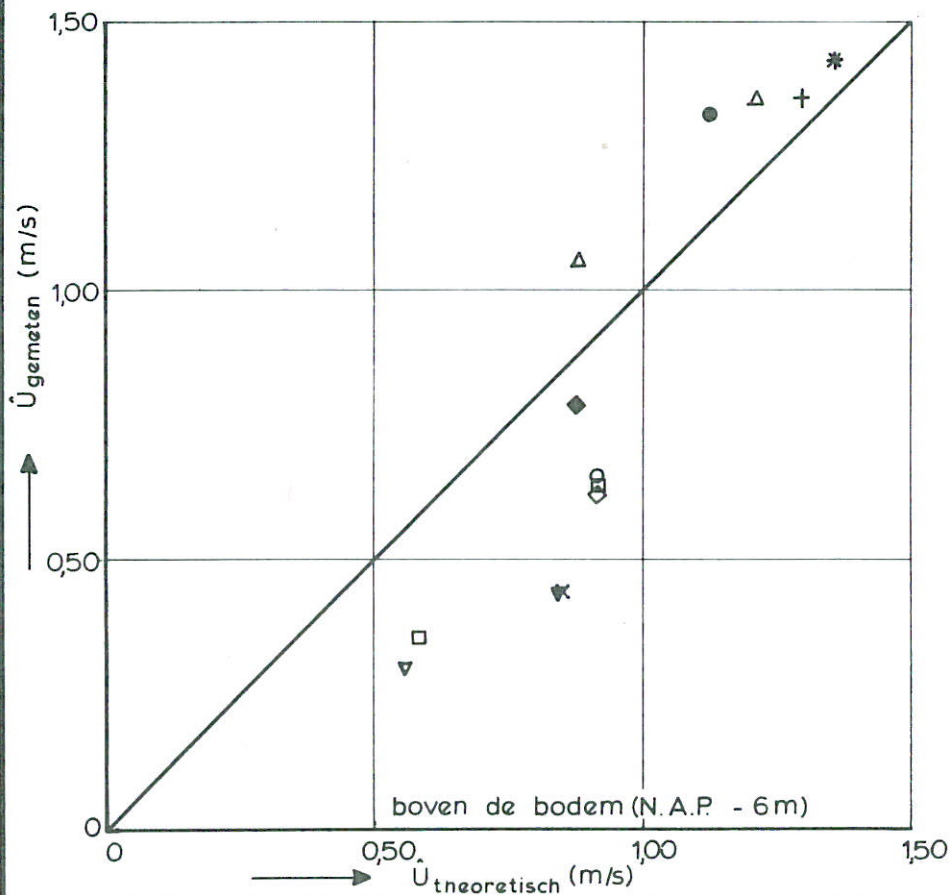
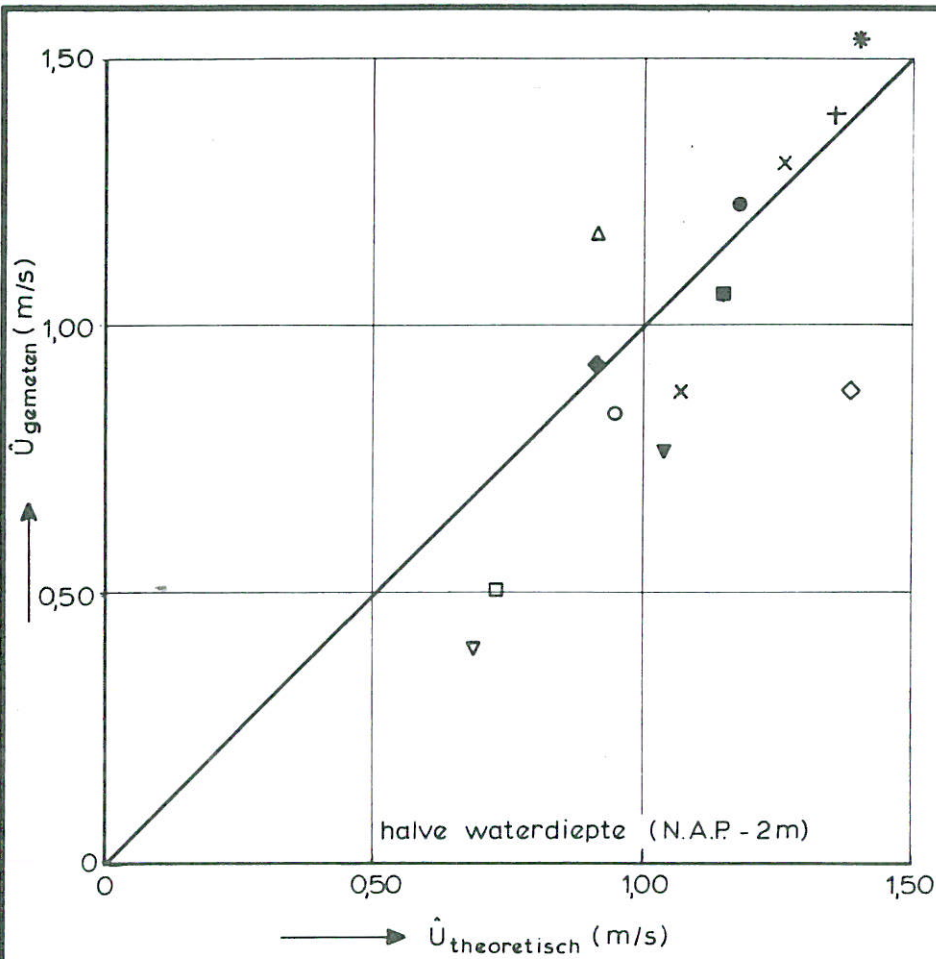
M 2028

FIG. 21



gemeten orbitaalsnelheden met golf richting mee

T1 GEMETEN EN BEREKENDE ORBITAALSNELHEDEN (UIT BOVENSTROOMSE GOLFHOOGTE) GOLVEN ZONDER STROMING		
	ONDERBOUW	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 2028	FIG. 22

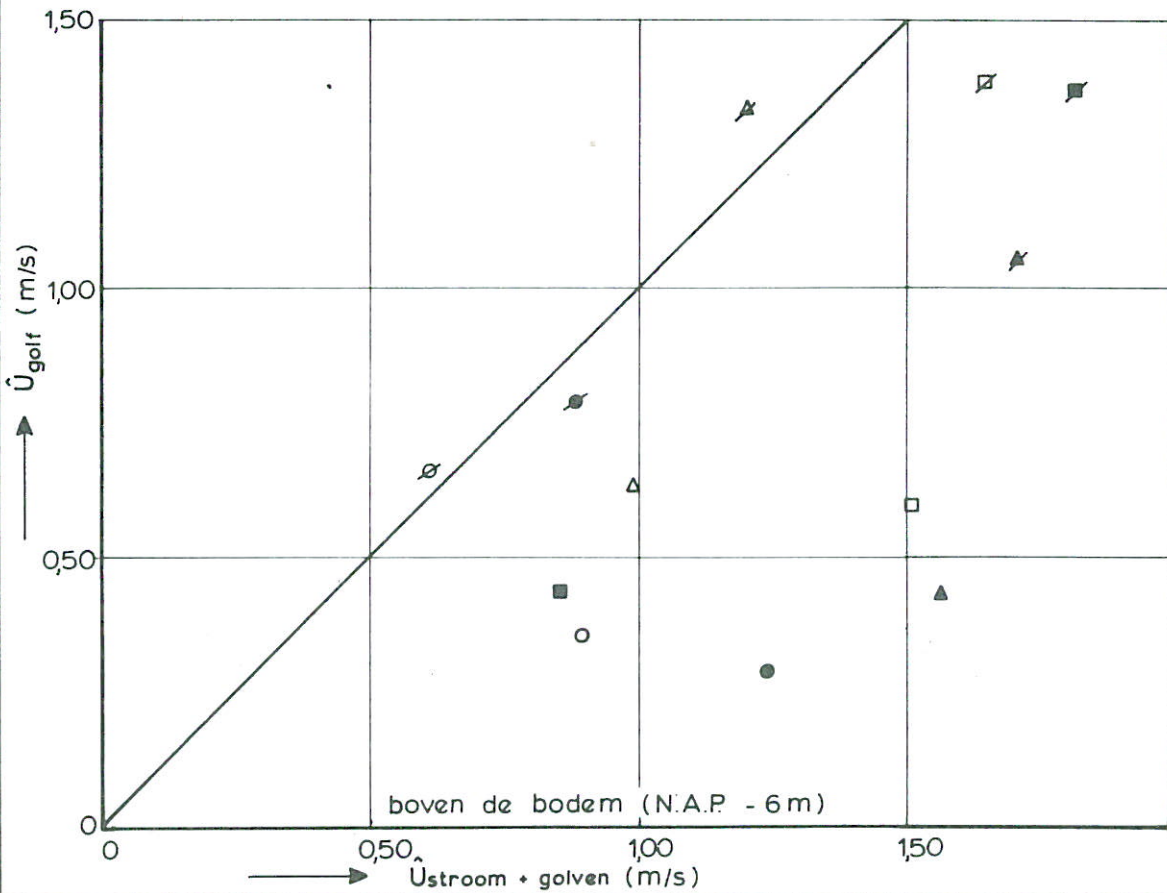
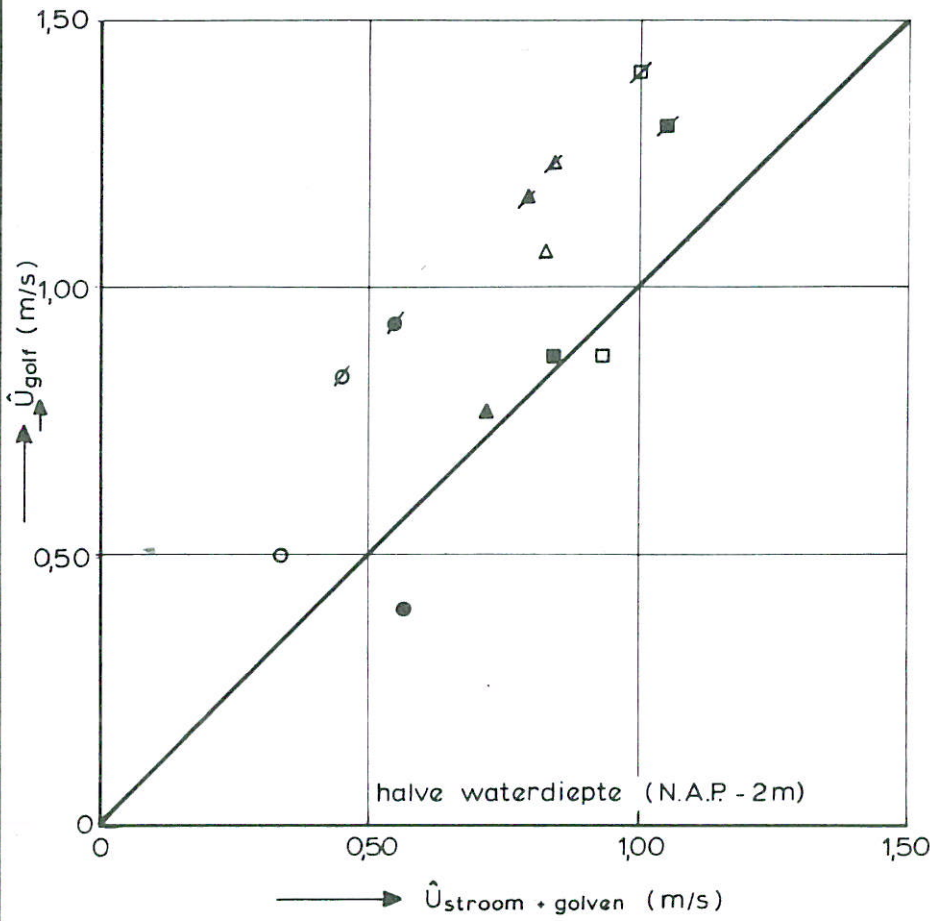


proef	symbool
a	○
b	●
c	+
d	□
e	■
f	◇
g	◆
h	△
i	▲
j	▽
k	▼
l	x
m	*

gemeten orbitaalsnelheden  
met golfrichting mee

T1 GEMETEN EN BEREKENDE ORBITAALSNELHEDEN  
(UIT LOKALE GOLFHOOGTE),  
GOLVEN ZONDER STROMING

ONDERBOUW



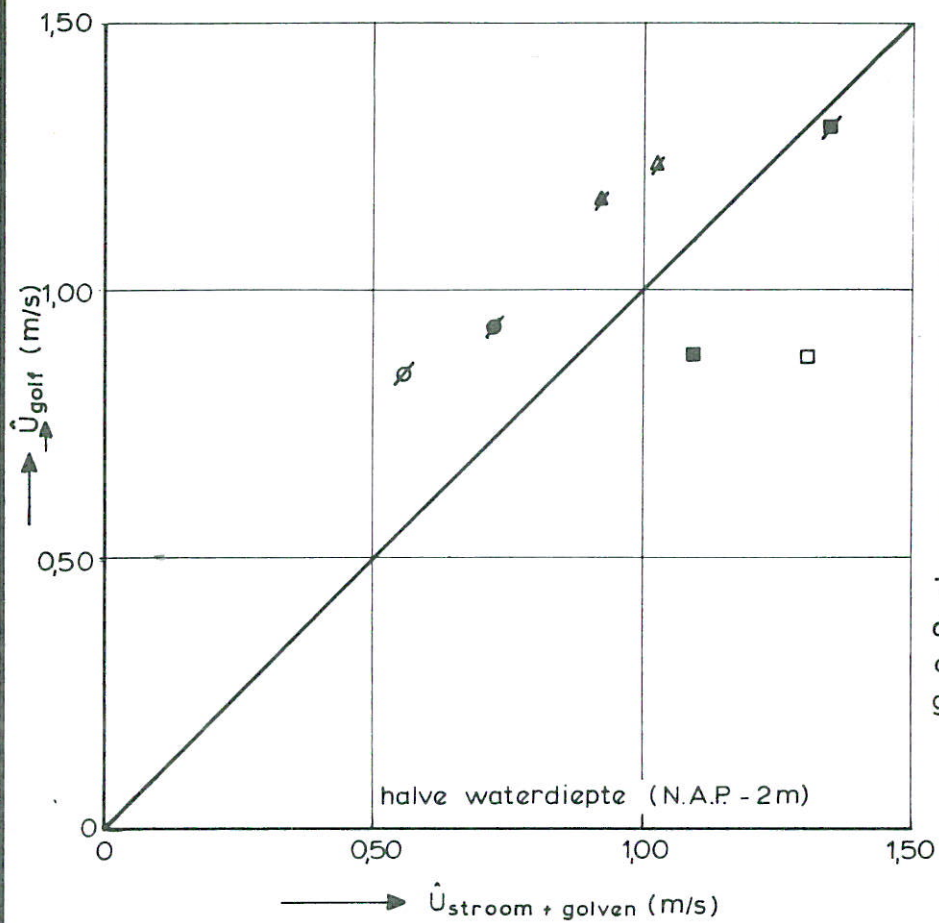
T1 INVLOED STROMING OP GEMETEN  
ORBITAALSNELHEDEN

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

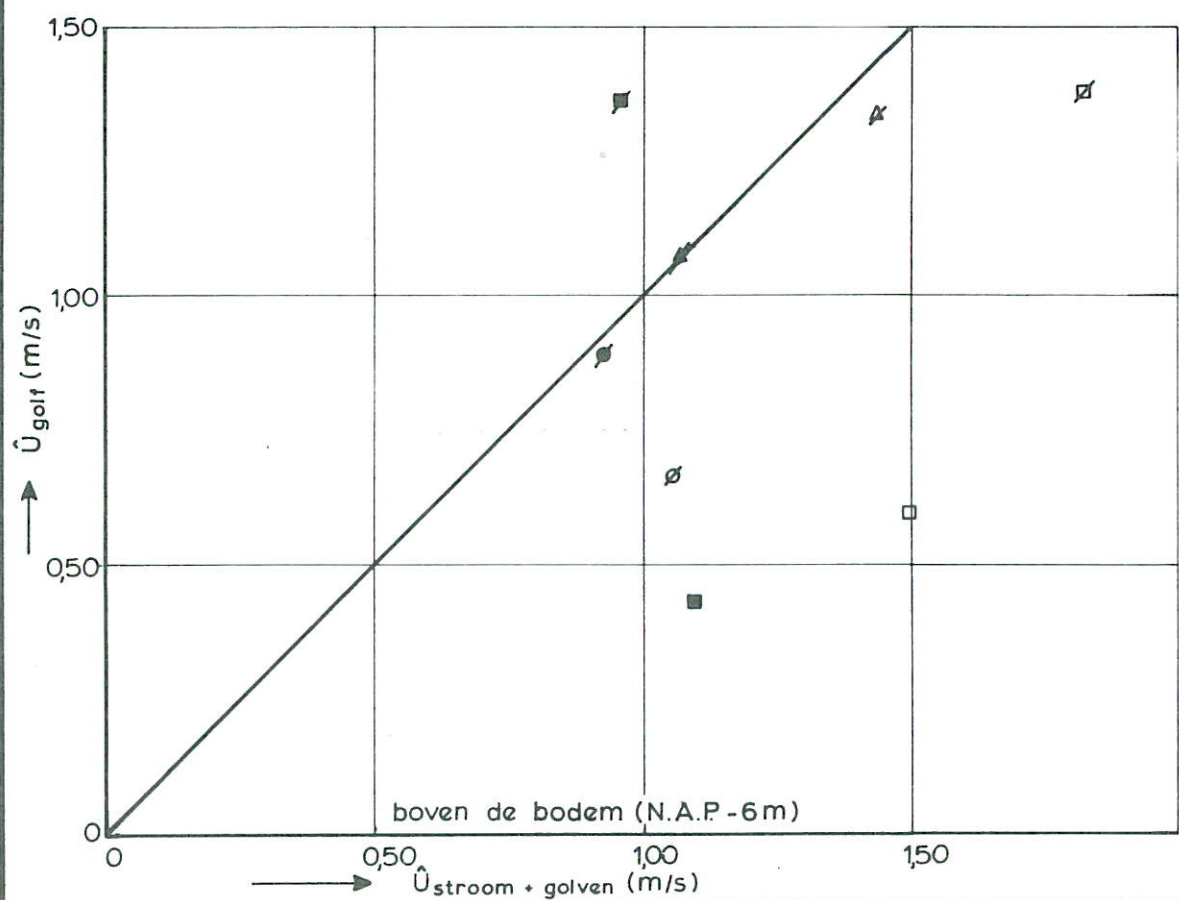
M 2028

FIG. 24



symbool	H (m)	T (s)	$\Delta h$ (m)
○	2,25	5	1,6
●	2,25	5	2,2
△	3,00	5	1,6
▲	3,00	5	2,2
□	3,75	5	1,6
■	3,75	5	2,2

T = 10 s idem, echter met diagonaalstreep gemeten component : met de golfrichting mee



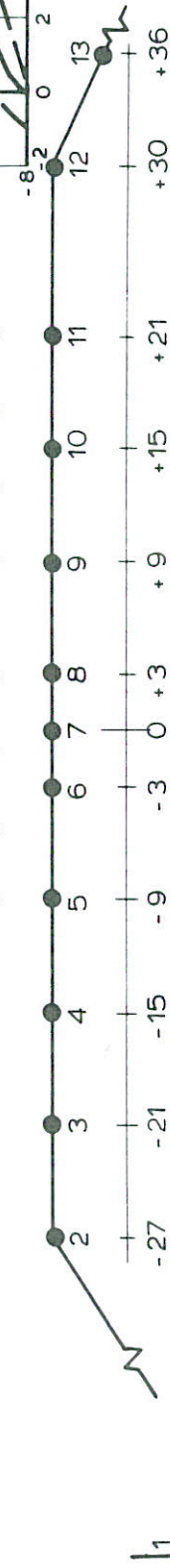
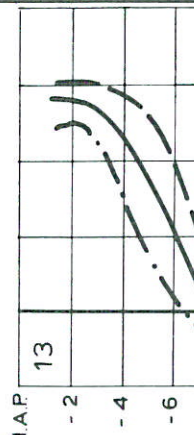
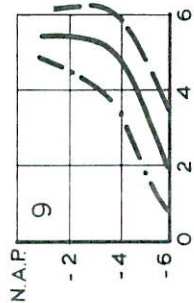
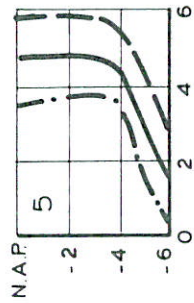
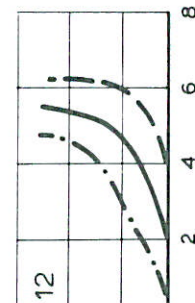
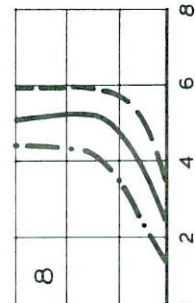
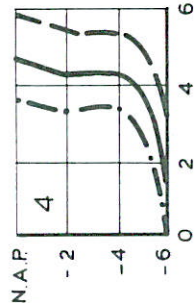
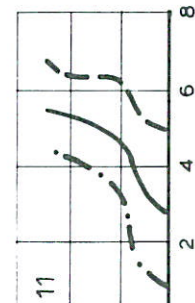
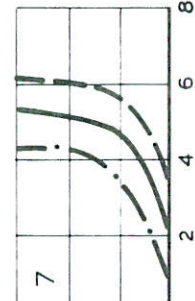
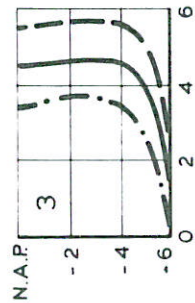
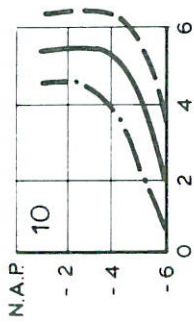
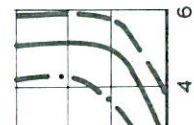
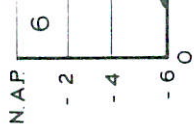
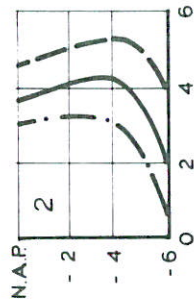
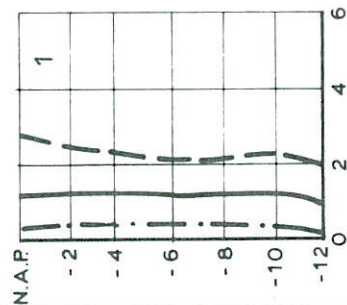
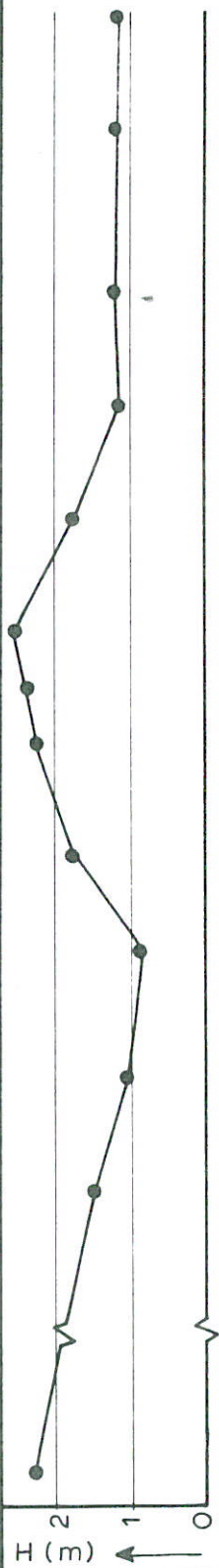
T2 INVLOED STROMING OP GEMETEN ORBITAALSNELHEDEN

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 25



- · -  $U_{min}$  (m/s)  
 - - -  $\bar{U}$  (m/s)  
 - - -  $U_{max}$  (m/s)

T1 DETAILMETING STROOMSNELHEDEN  
 BIJ EEN VERVAL VAN 1,6 m

$H_0 = 3\text{ m}$   
 $T = 10\text{ s}$

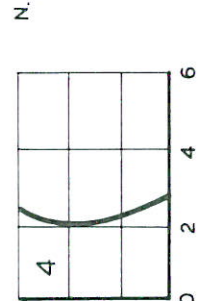
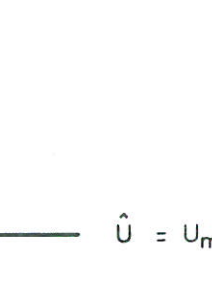
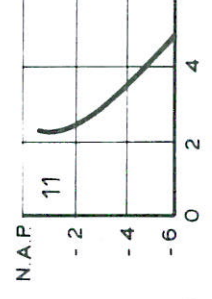
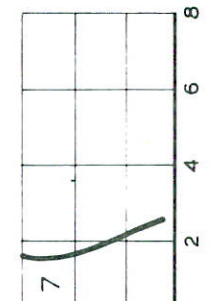
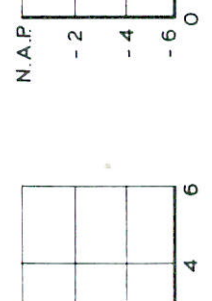
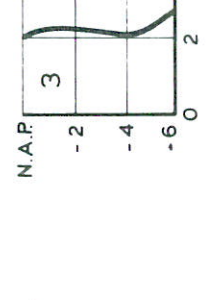
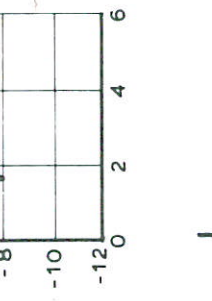
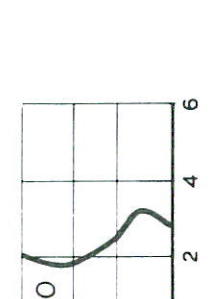
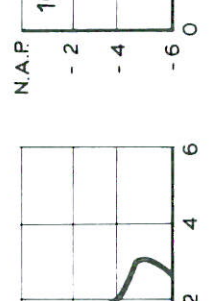
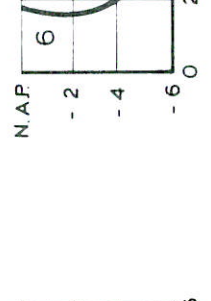
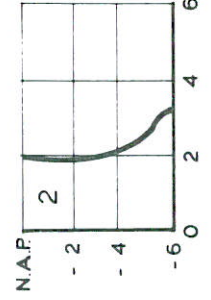
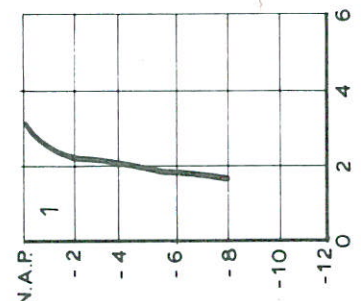
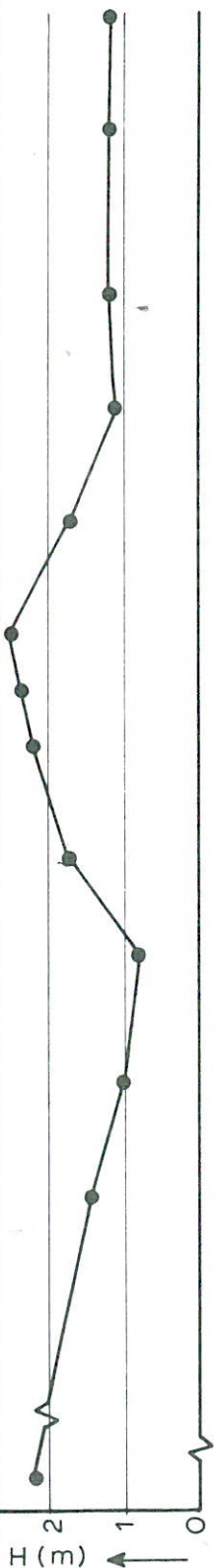
ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

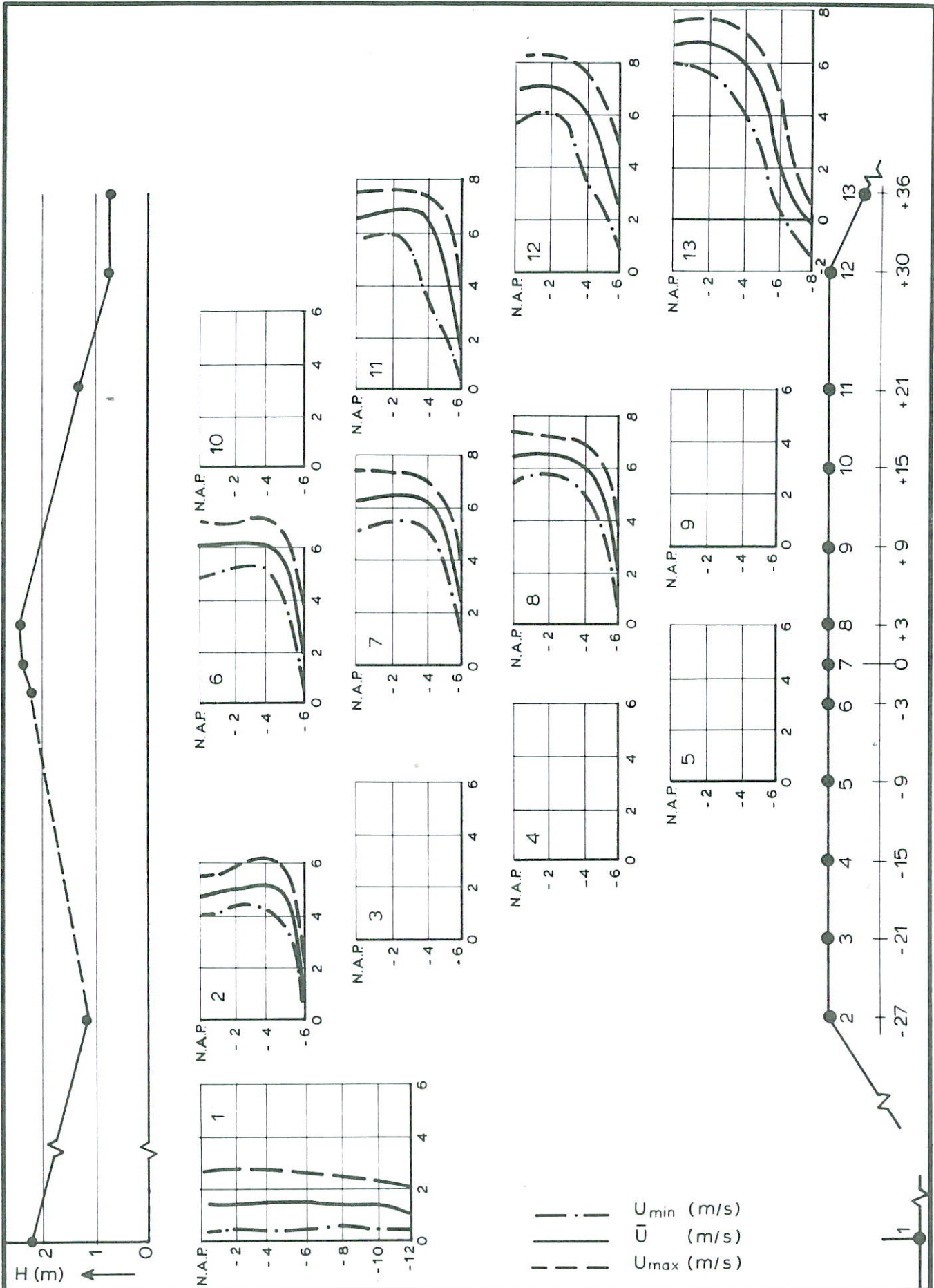
FIG. 26





$\hat{U} = U_{max} - \bar{U} \text{ (m/s)}$

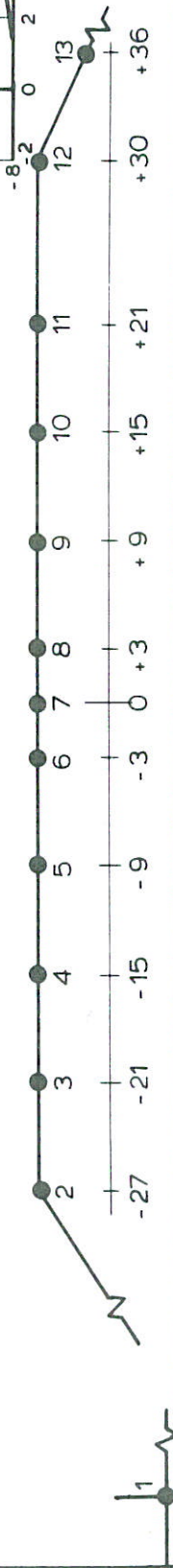
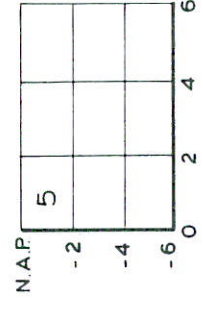
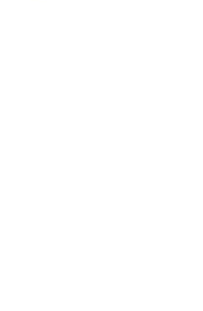
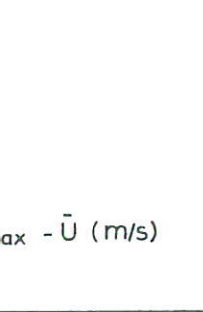
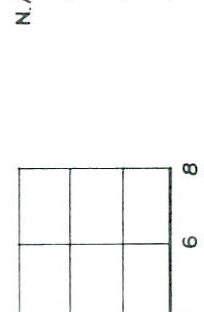
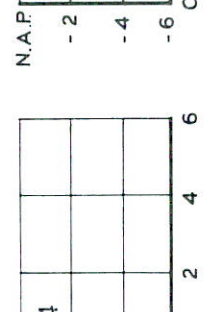
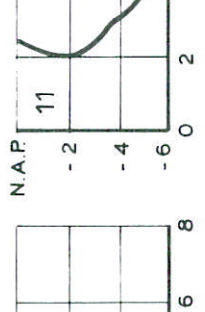
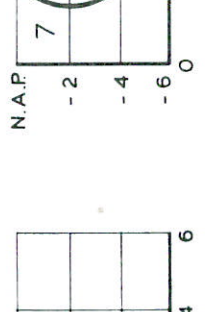
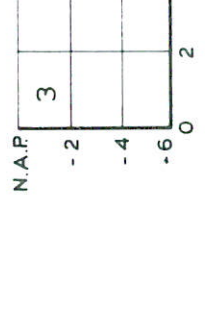
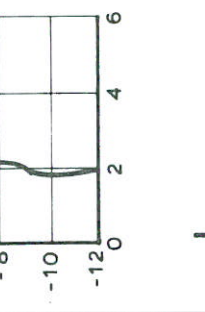
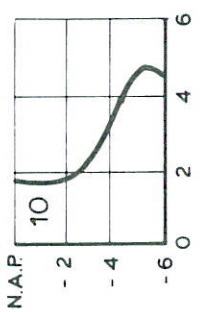
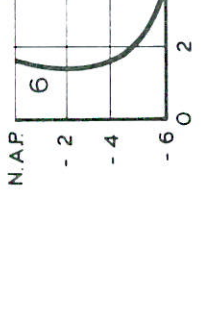
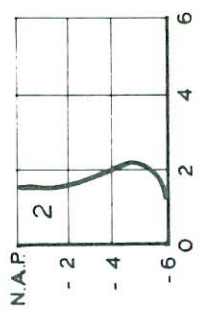
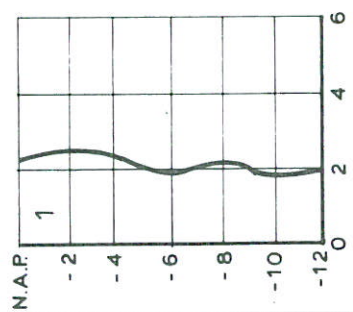
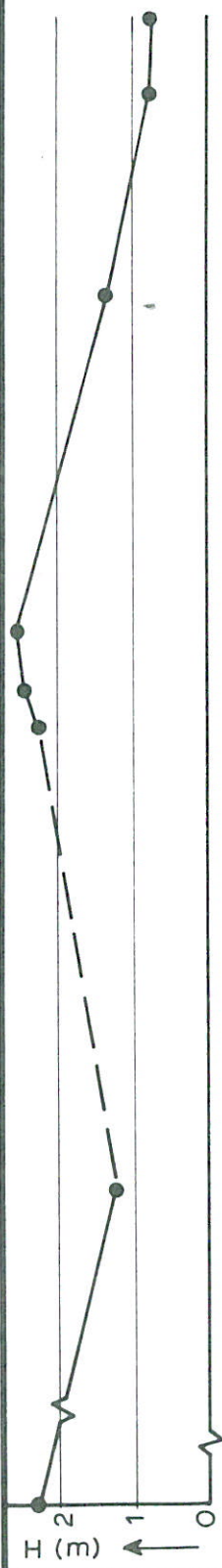
<p>T1 DETAILMETING ORBITAALSNELHEDEN          BIJ EEN VERVAL VAN 1,6m</p>	<p><math>H_o = 3m</math>  <math>T = 10s</math></p>	
	<p>ONDERBOUW</p>	
<p>WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM</p>	<p>M 2028</p>	<p>FIG. 27</p>



T1 DETAILMETING STROOMSNELHEDEN  
 BIJ EEN VERVAL VAN 2,2 m

$H_0 = 3$  m  
 $T = 10$  s

ONDERBOUW



$\hat{U} = U_{max} - \bar{U} \text{ (m/s)}$

T1 DETAILMETING ORBITAALSNELHEDEN  
 BIJ EEN VERVAL VAN 2,2m

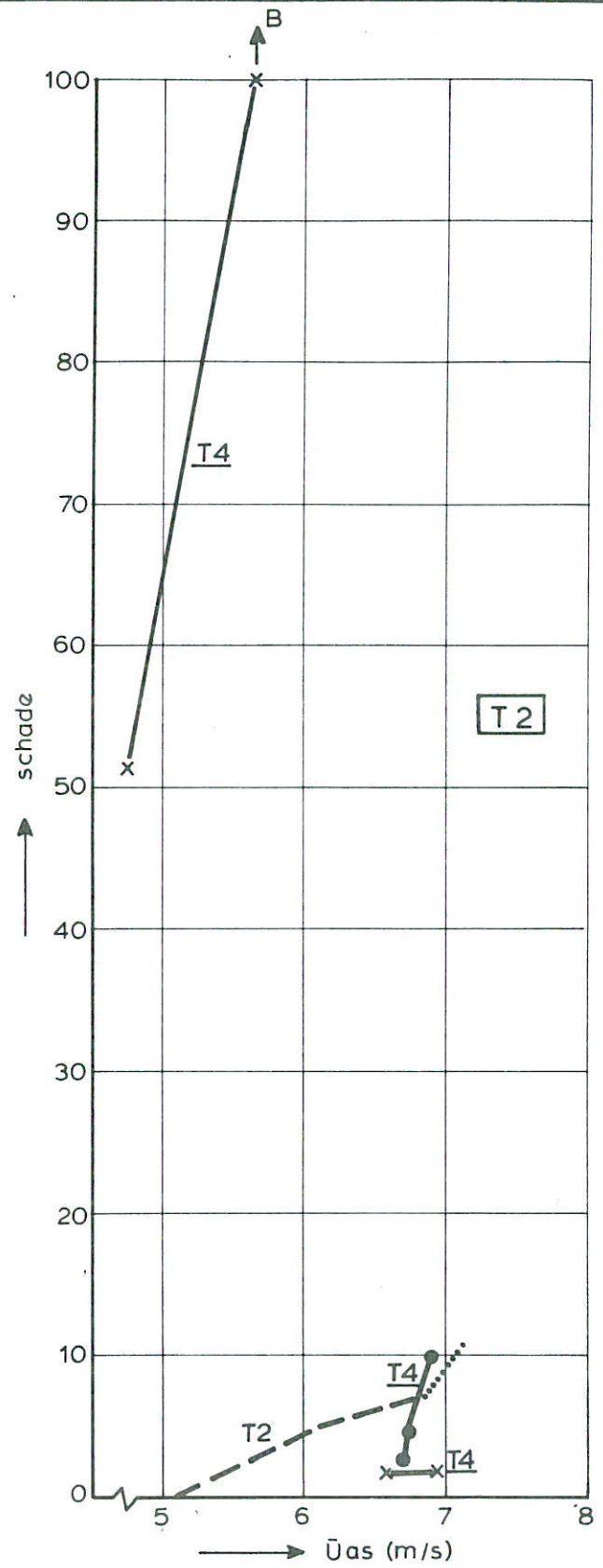
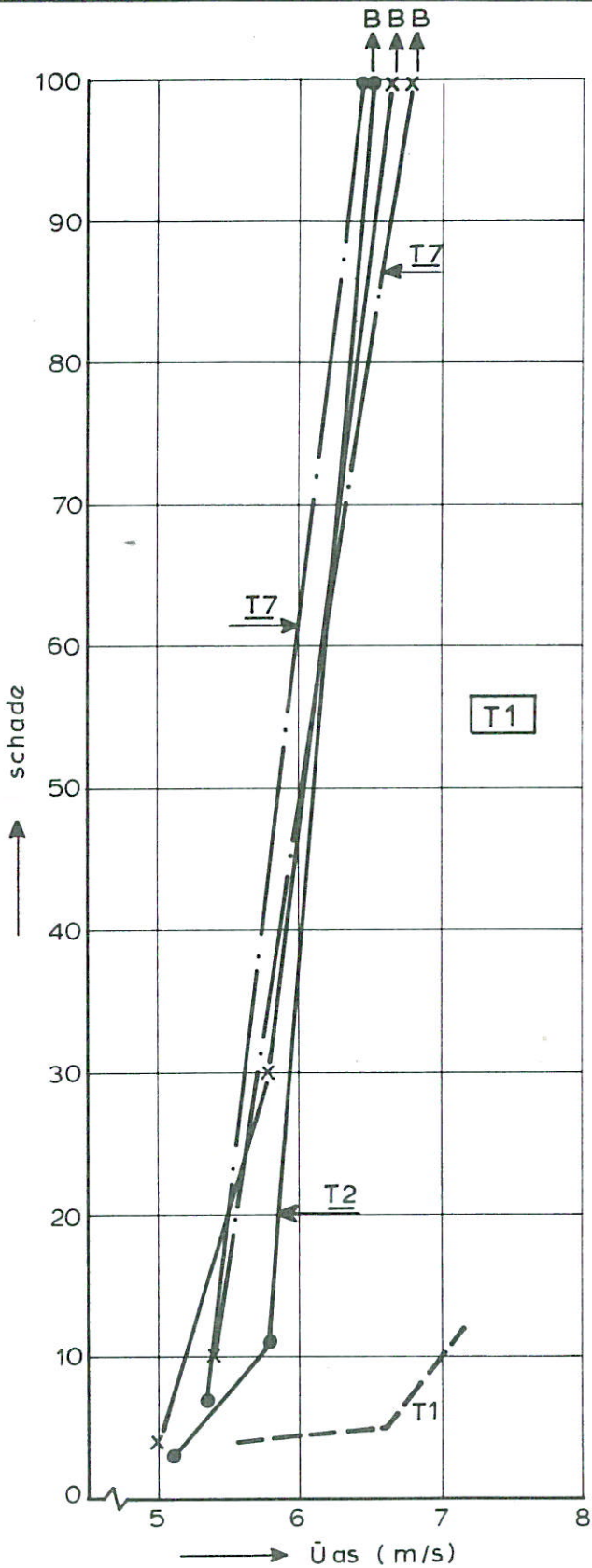
H = 3m  
 T = 10s

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG 29



T2, T4, T7 : proefnummers M 2028 -I

● Noord - Beveland

x Noordland

B = bezwijktoestand

	T1	T2
ΔD M2028 -I	0,92m	0,92m (T6:1,38m)
ΔD M2028 -II	1,23m	1,53m

CALIBRATIE SCHADE OMKEGELING

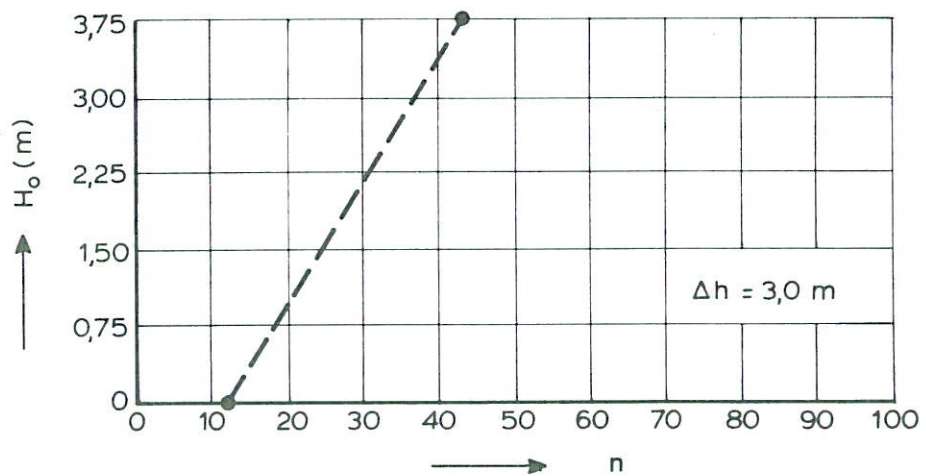
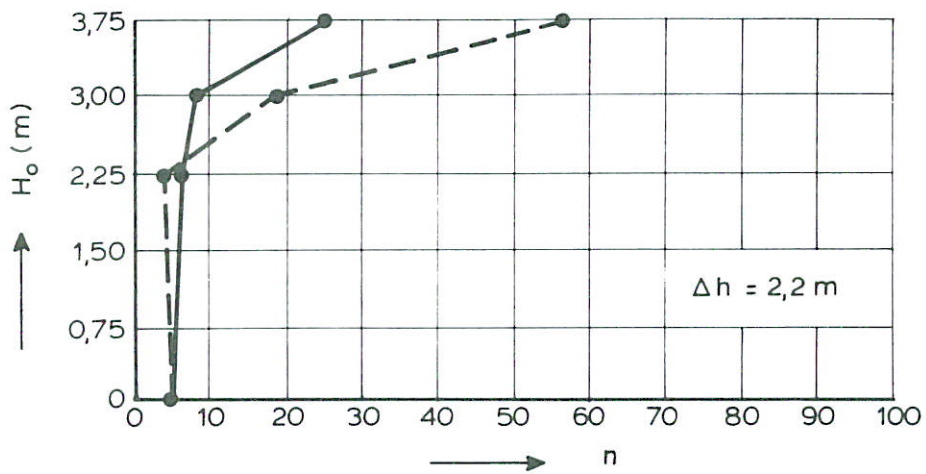
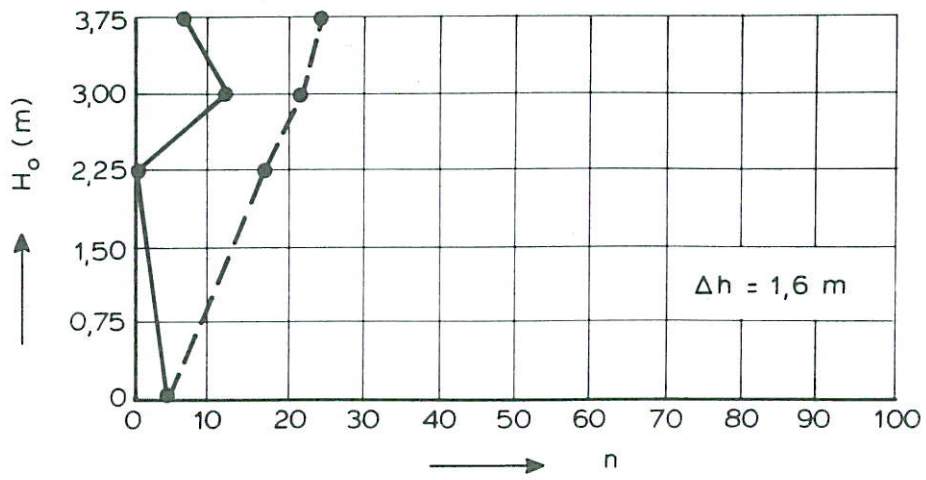
PENTAGOOT - M1001

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 30



- T = 5 s
- - - T = 10 s
- n = aantal verplaatste stenen
- T1 = zonder damuitbouw
- T2 = met damuitbouw

M<sub>50</sub> = 1125 kg

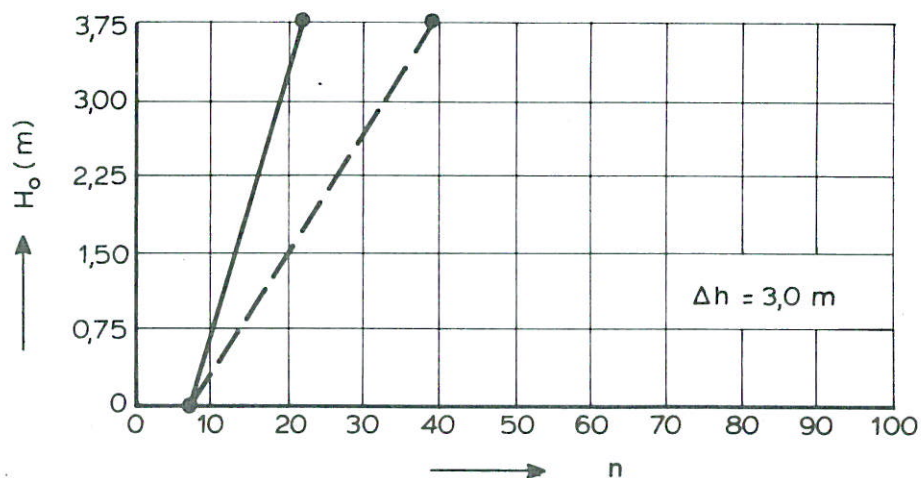
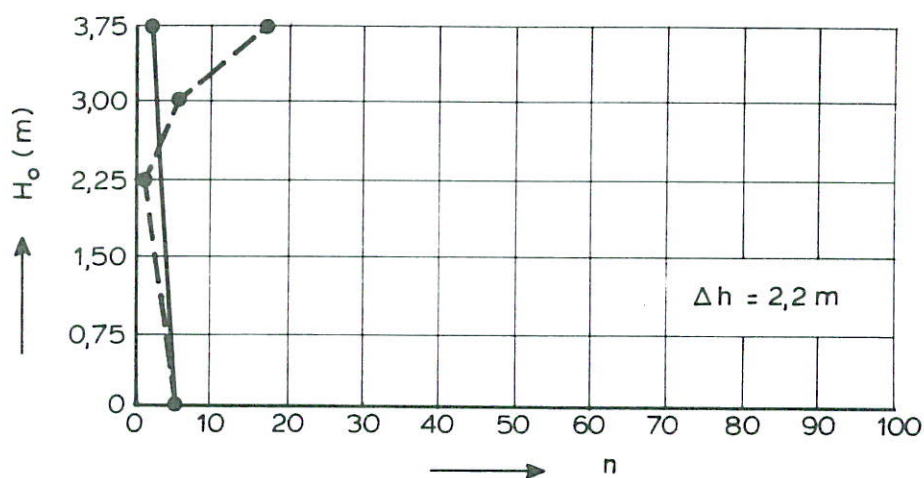
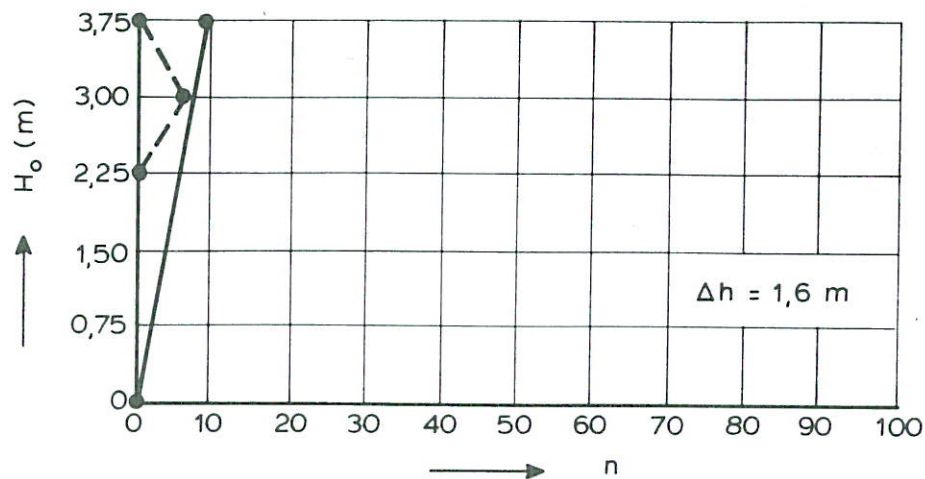
T1 SCHADE OMKEGELING ALS FUNCTIE  
VAN DE GOLFHOOGTE

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 31



- T = 5 s  
 - - - T = 10 s  
 n = aantal verplaatste stenen  
 T1 = zonder damuitbouw  
 T2 = met damuitbouw

$M_{50} = 2000 \text{ kg}$

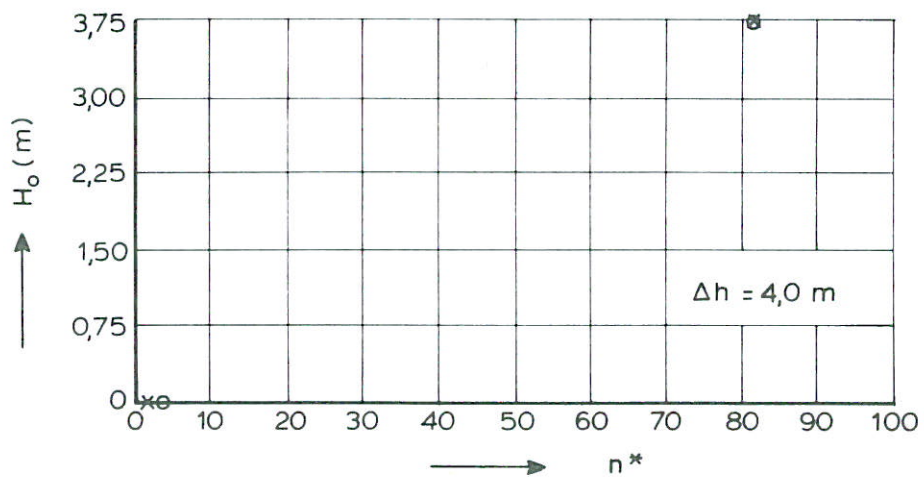
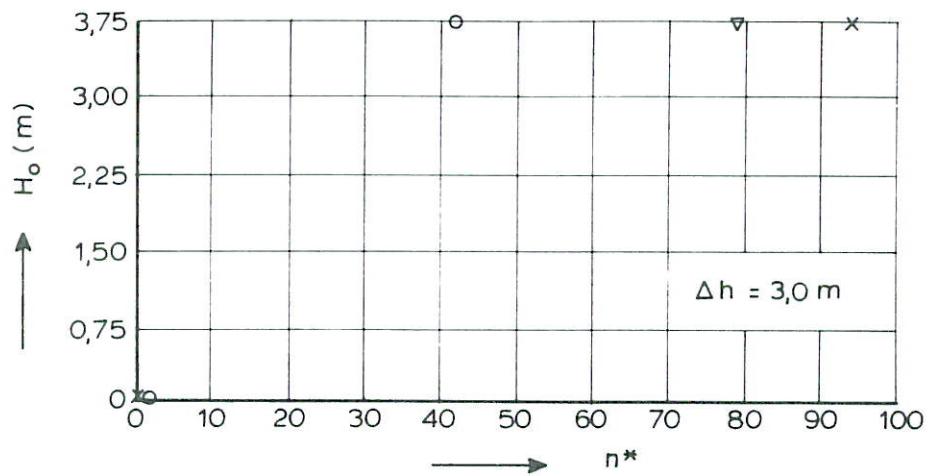
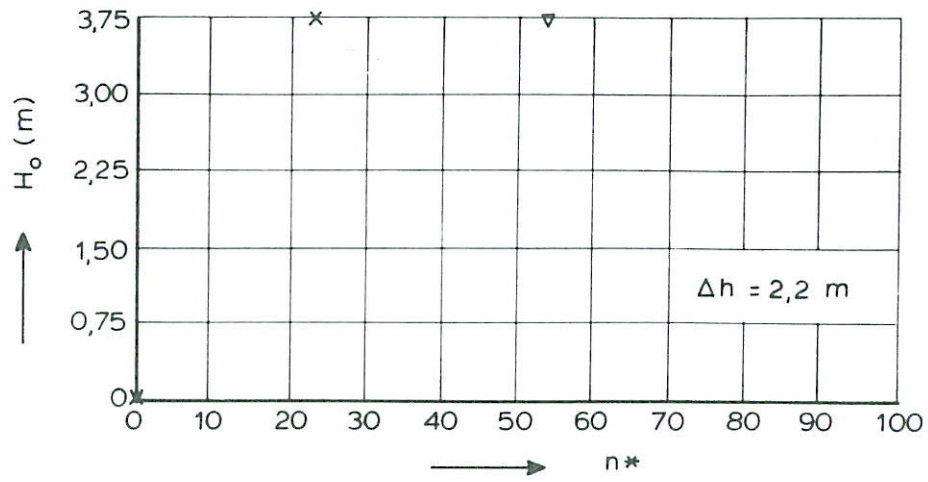
T2 SCHADE OMKEGELING ALS FUNCTIE  
VAN DE GOLFHOOGTE

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 32



$T = 10 \text{ s}$

$n^*$  = aantal verplaatste stenen (vergelijkende schade-grootte met T1,T2)

x = T 3

∇ = T 4

o = T 5

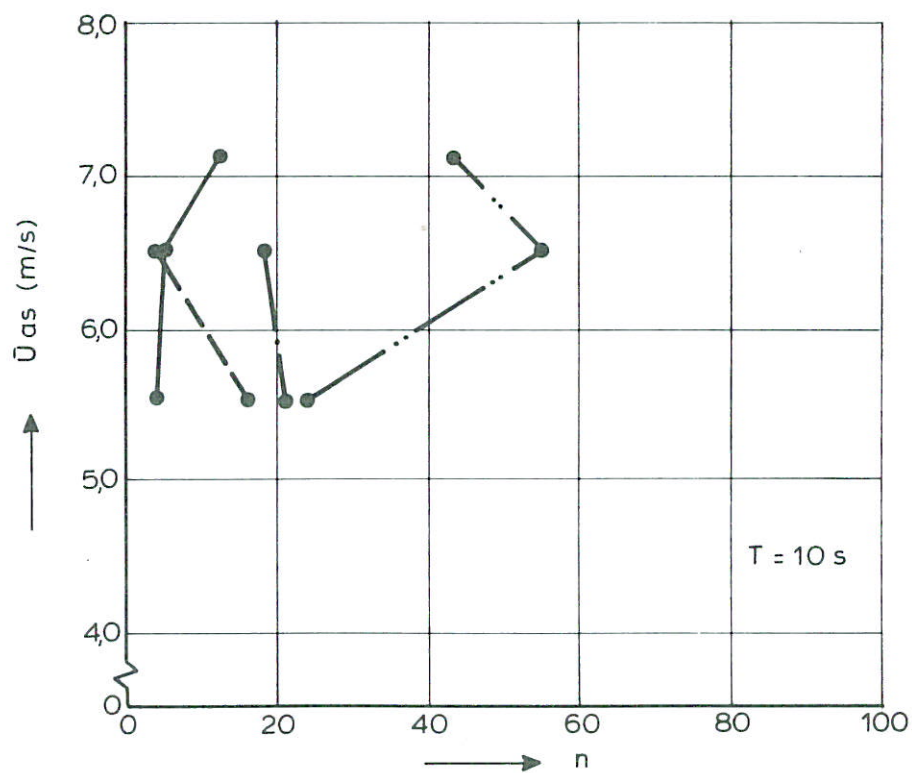
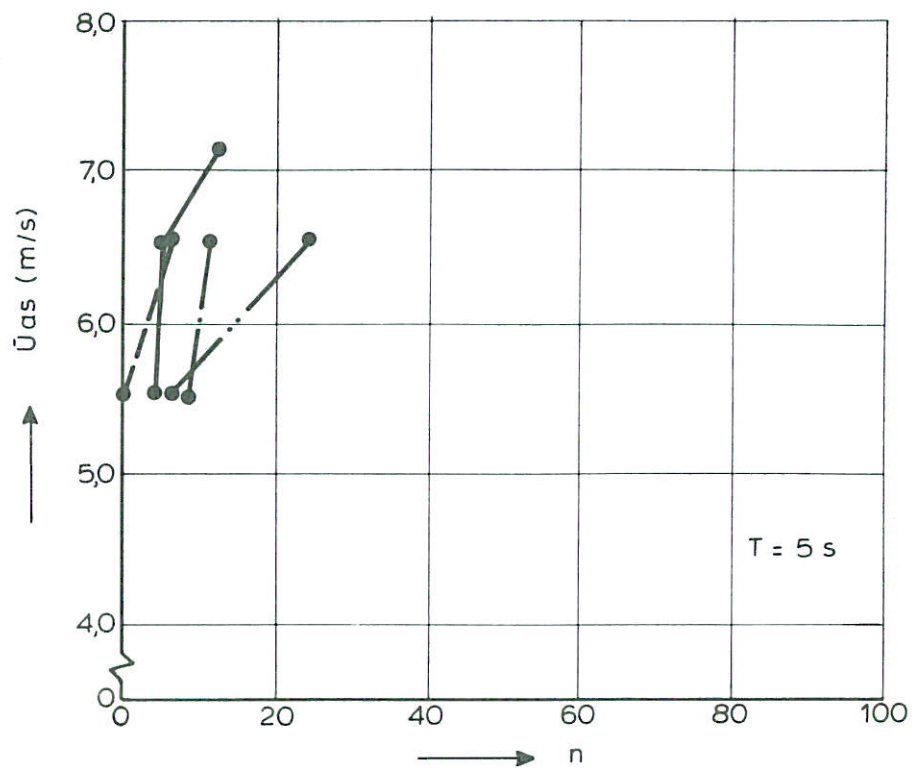
T3, T4, T5 SCHADE OMKEGELING ALS FUNKTIE  
VAN DE GOLFHOOGTE

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG 33



$n$  = aantal verplaatste stenen  
 $T_1$  = zonder damuitbouw  
 $T_2$  = met damuitbouw

—  $H = 0, T = 0$   
 - - -  $H = 2,25 \text{ m}$   
 - · -  $H = 3,00 \text{ m}$   
 - · · -  $H = 3,75 \text{ m}$   
 $M_{50} = 1125 \text{ kg}$

T1 SCHADE OMKEGELING ALS FUNCTIE  
 VAN STROOMSNELHEID IN AS DAM

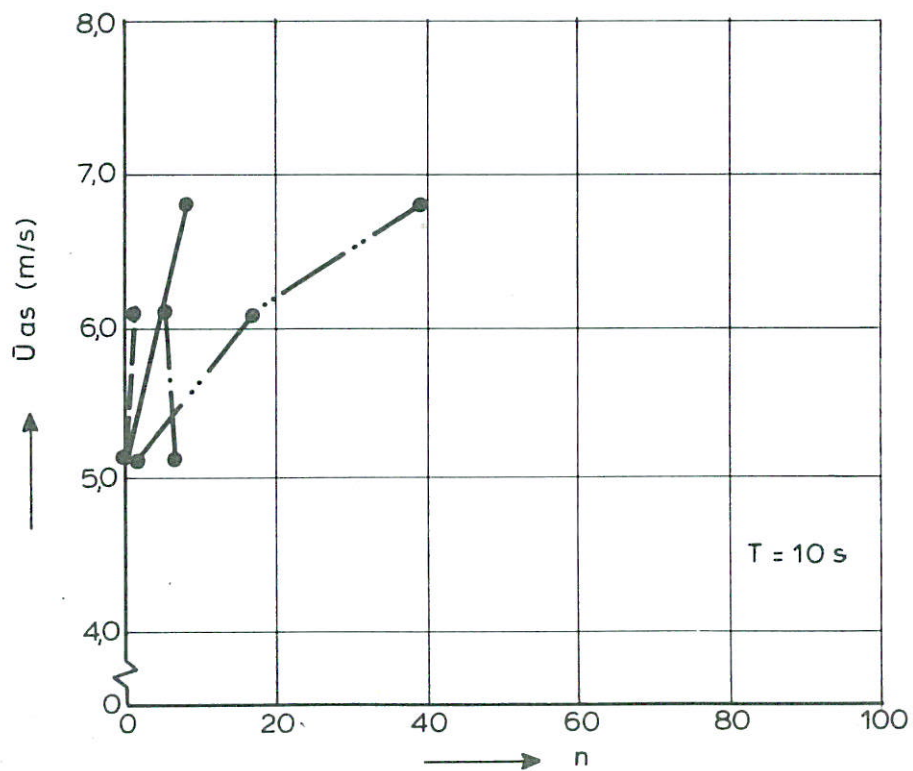
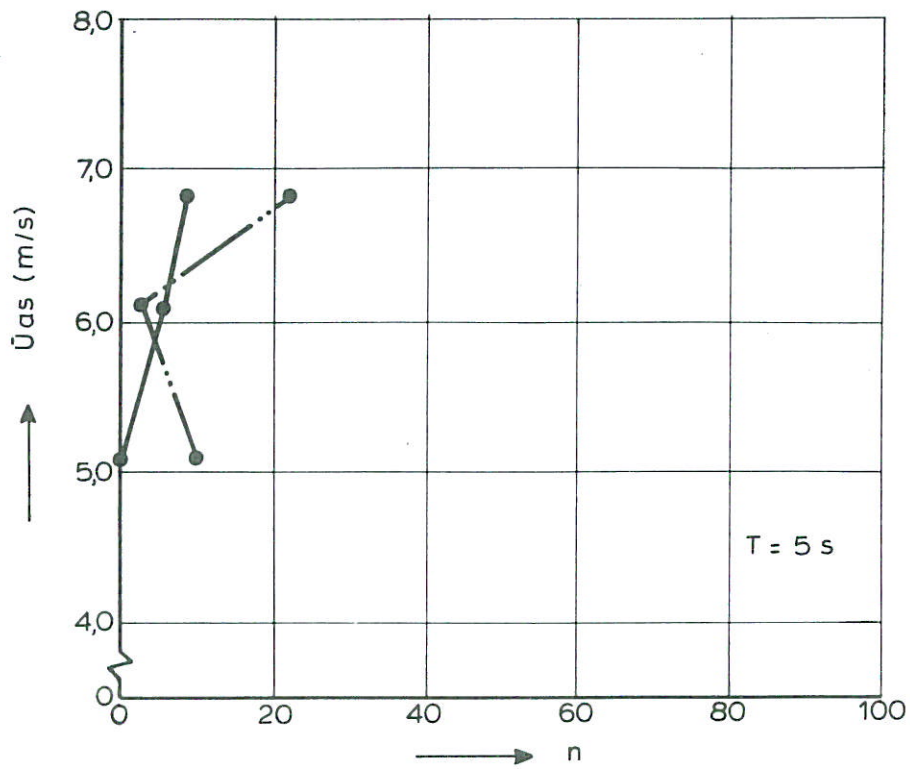
OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG 34





n = aantal verplaatste stenen  
 T<sub>1</sub> = zonder damuitbouw  
 T<sub>2</sub> = met damuitbouw

— H = 0 , T = 0  
 - - - H = 2,25 m  
 - · - H = 3,00 m  
 - · · - H = 3,75 m  
 M<sub>50</sub> = 2000 kg

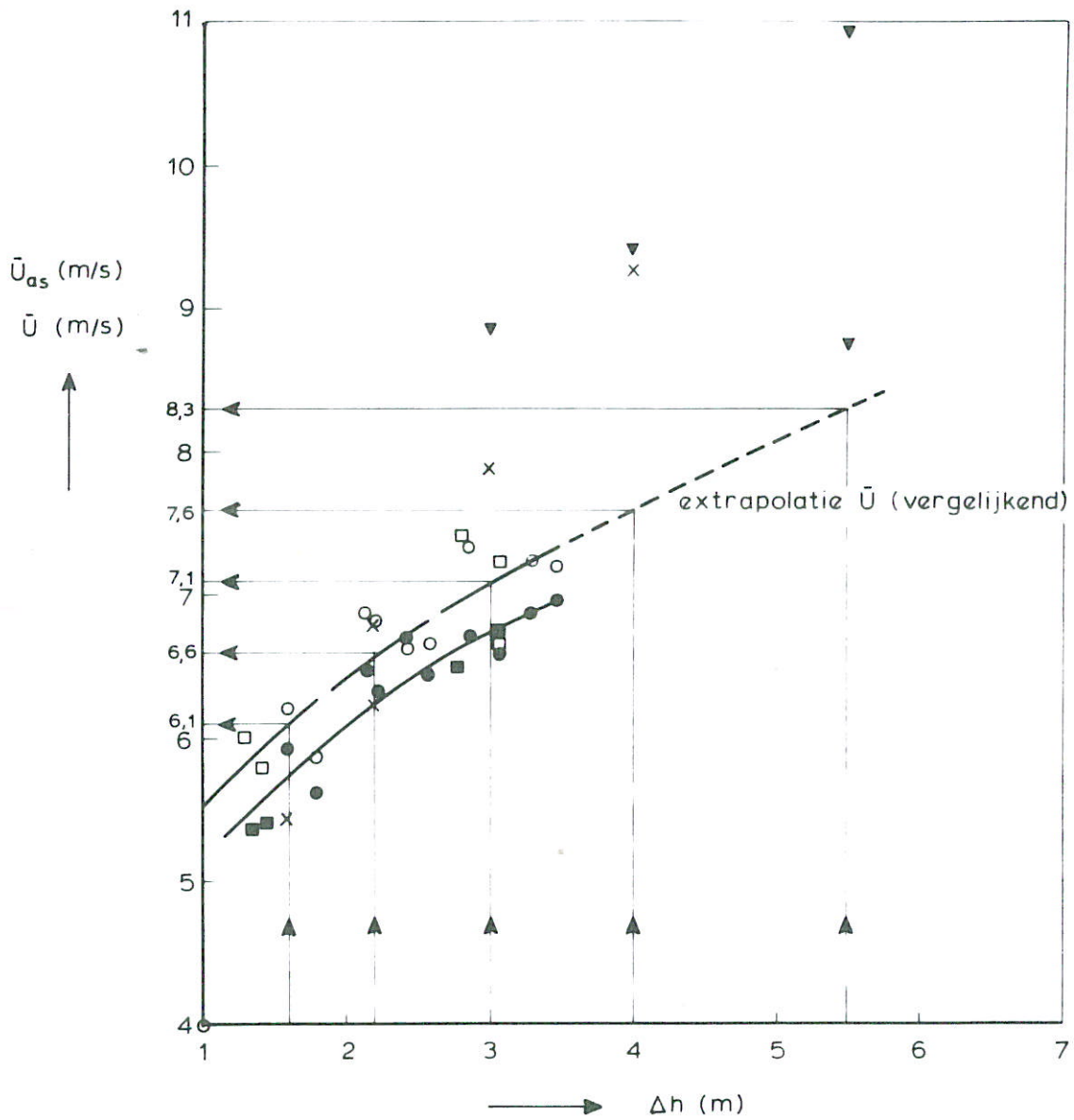
T2 SCHADE OMKEGELING ALS FUNCTIE VAN  
 STROOMSNELHEID IN AS-DAM

OMKEGELING

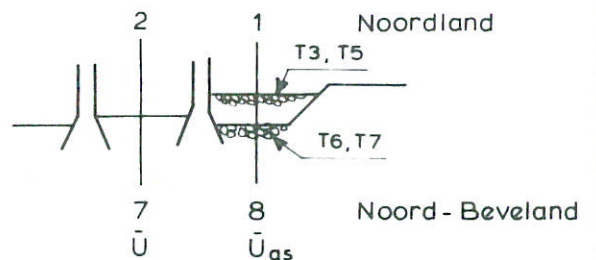
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 35



M 2028 - I	M 2028 - II
● T6 (1/8)	x T3 (2/7)
○ T6 (2/7)	▼ T5 (2/7)
■ T7 (1/8)	
□ T7 (2/7)	
$\bar{U}_{as}$	$\bar{U}$



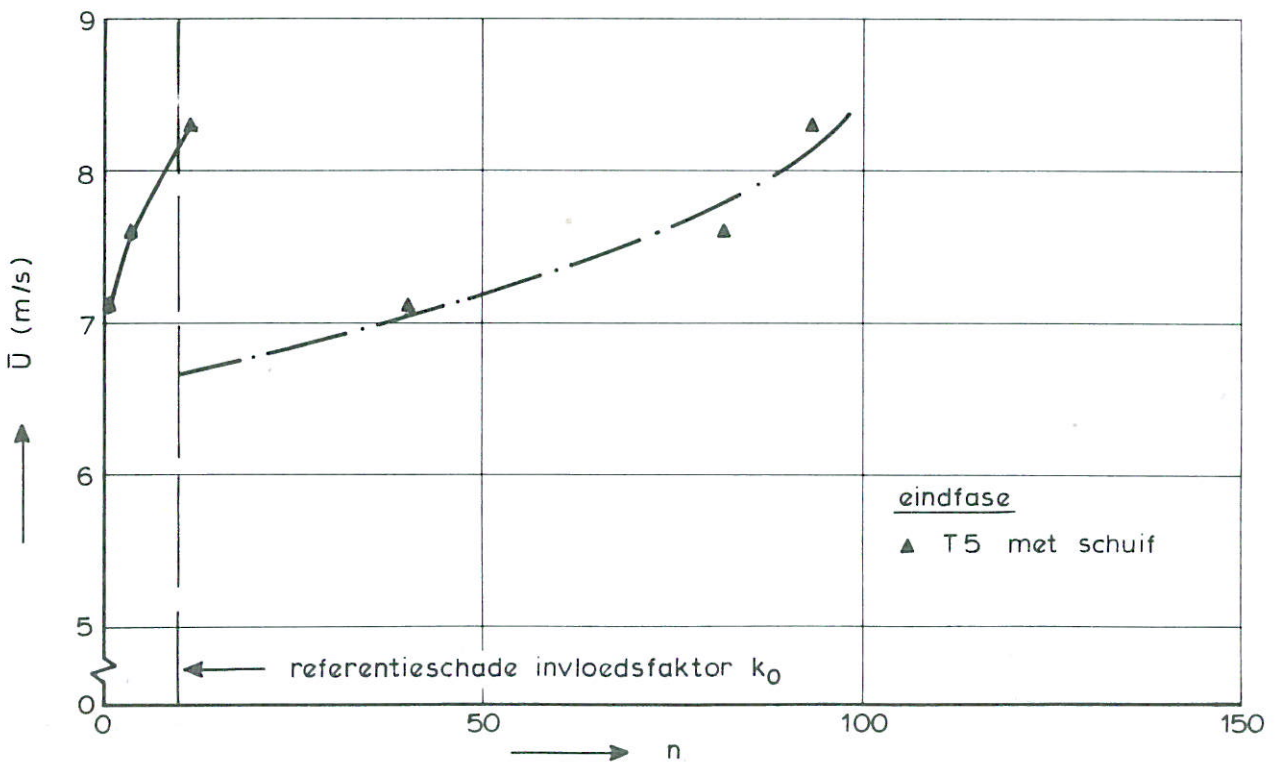
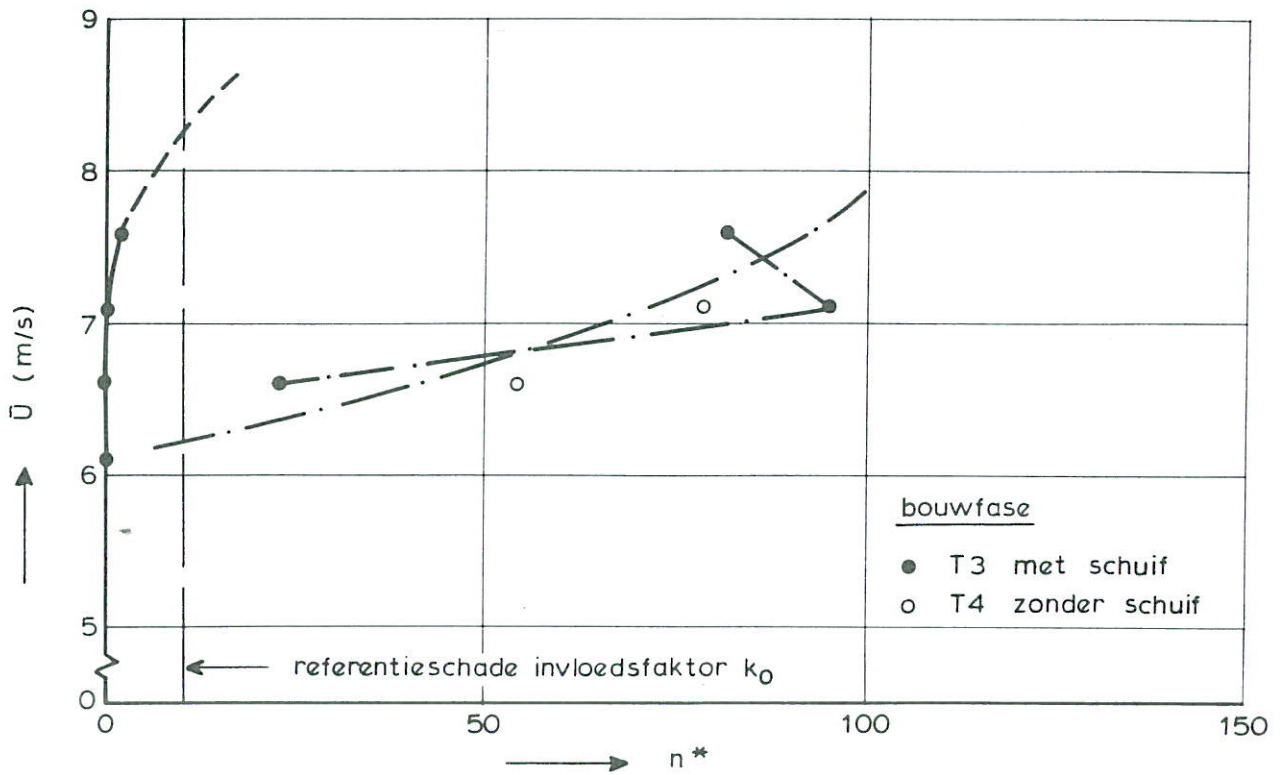
BEPALING VERGELIJKENDE STROOMSNELHEID  $\bar{U}$

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 36



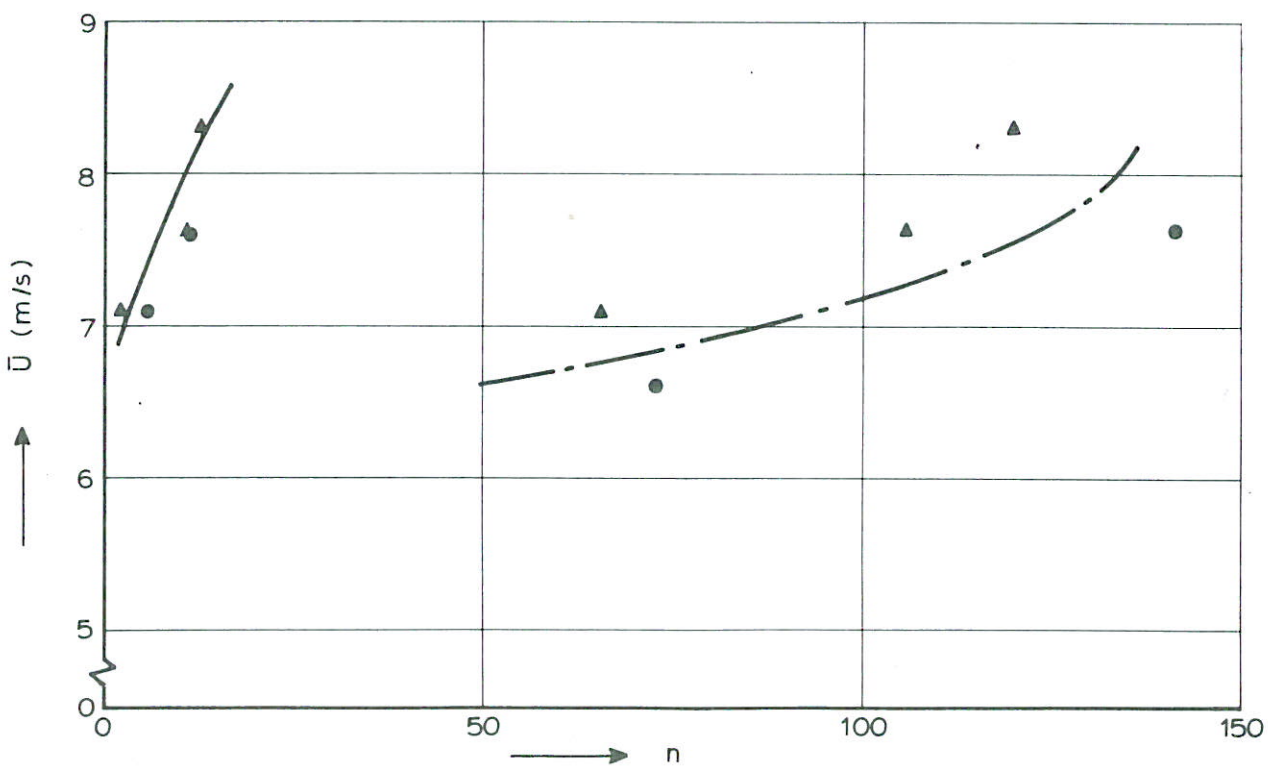
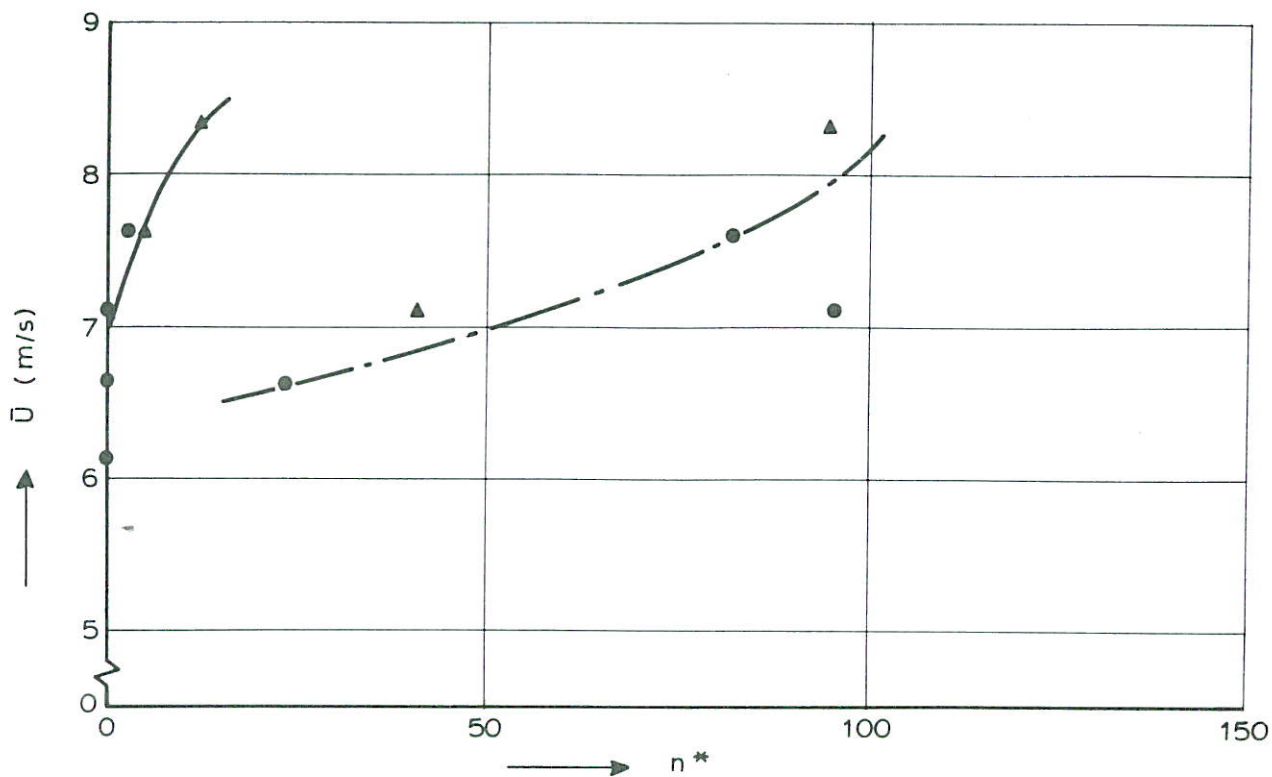
$n^*$  = aantal verplaatste stenen (vergelijkende schade-grootte met T1, T2)

— zonder golven

- - - met golven  $H \approx 3,5 \text{ m}$   $T = 10 \text{ s}$

T3, T4, T5 SCHADE OMKEGELING ALS FUNCTIE VAN  $\bar{U}$

OMKEGELING



$n^*$  = aantal verplaatste stenen (vergelijkend)

$n$  = aantal verplaatste stenen (feitelijk)

● = T3 (bouwfase ;  $\Delta D = 1,05$ )

▲ = T5 (eindfase ;  $\Delta D = 1,64$ )

— zonder golven

- · - met golven  $H \approx 3,5$  m,

$T = 10$  s

T3, T5 VERGELIJKING SCHADE OMKEGELING  
BOUWFASE EN EINDFASE PROFIEL

OMKEGELING

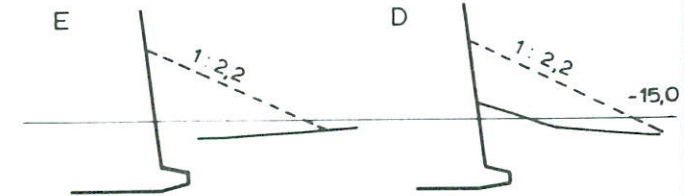
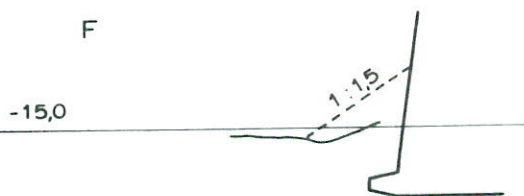
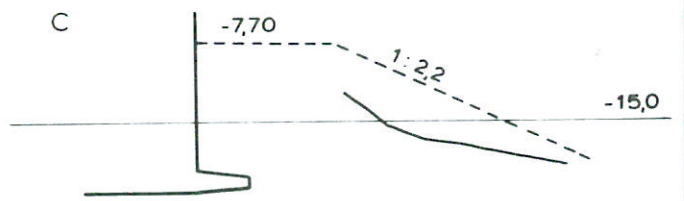
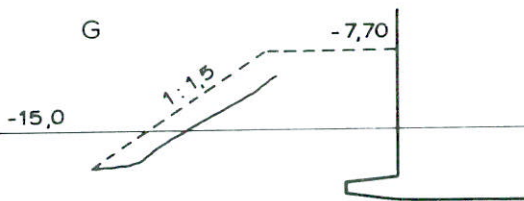
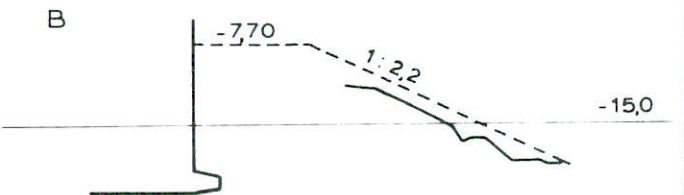
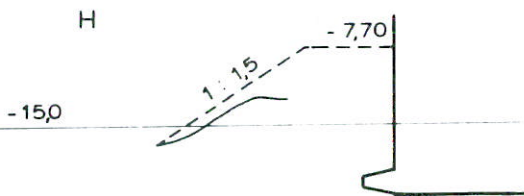
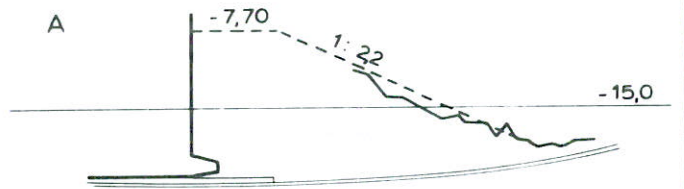
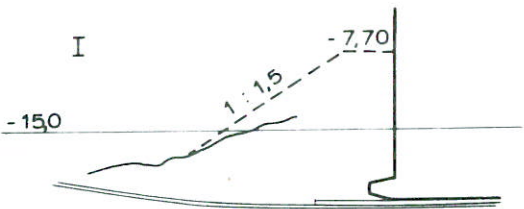
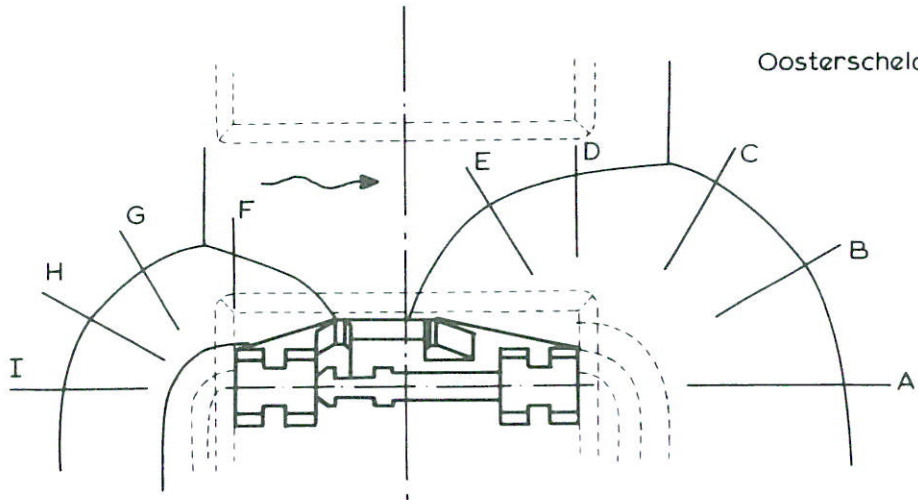
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG 38

Zee

Oosterschelde



maten in m. prototype

T5 E1 DWARSPROFIELEN OMKEGELING

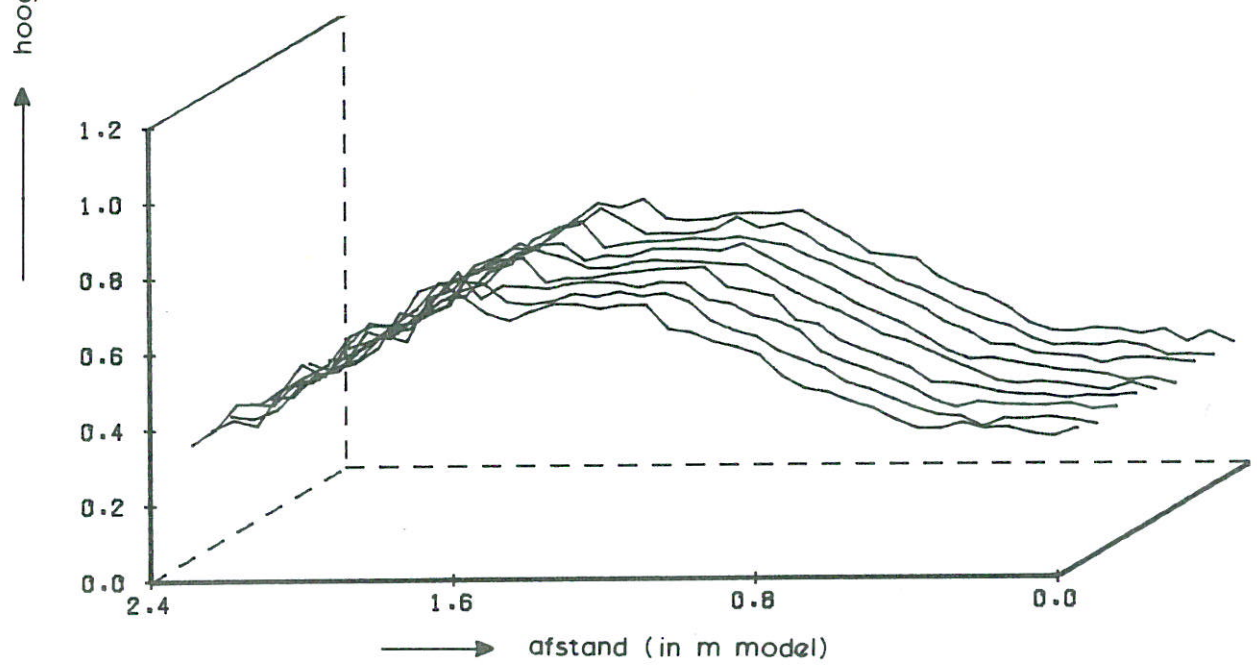
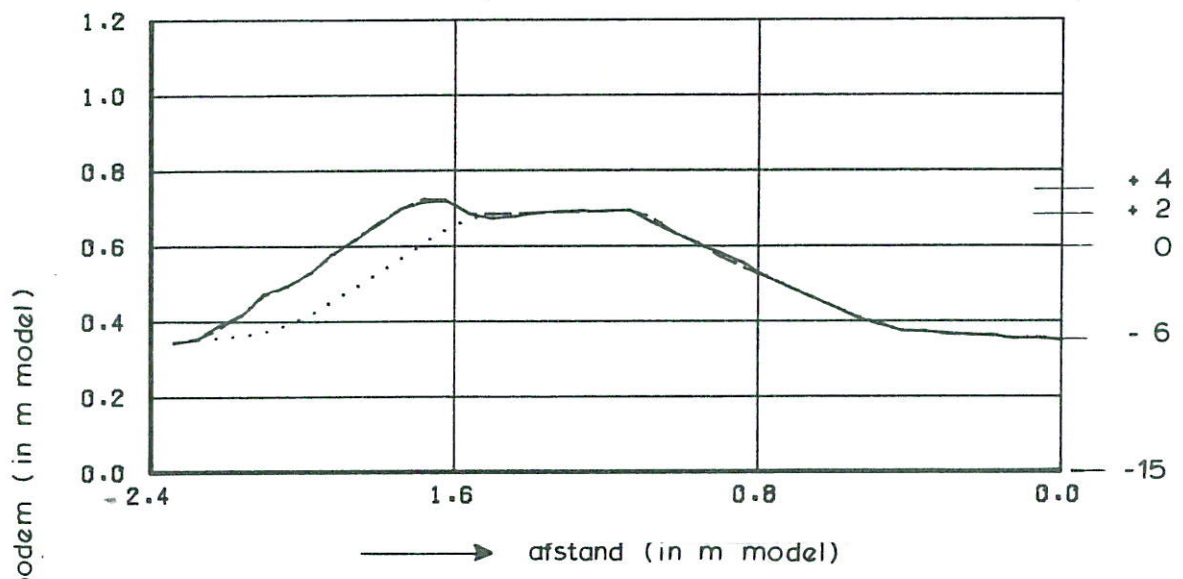
BEZW'JKPROEF

OMKEGELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

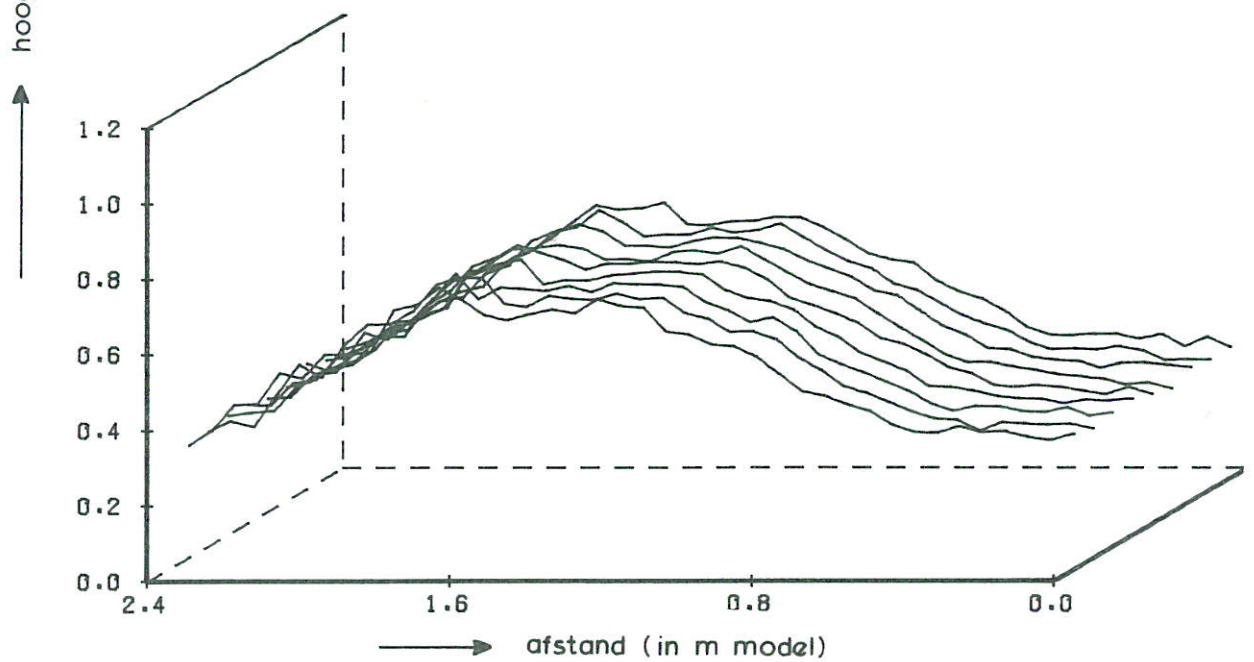
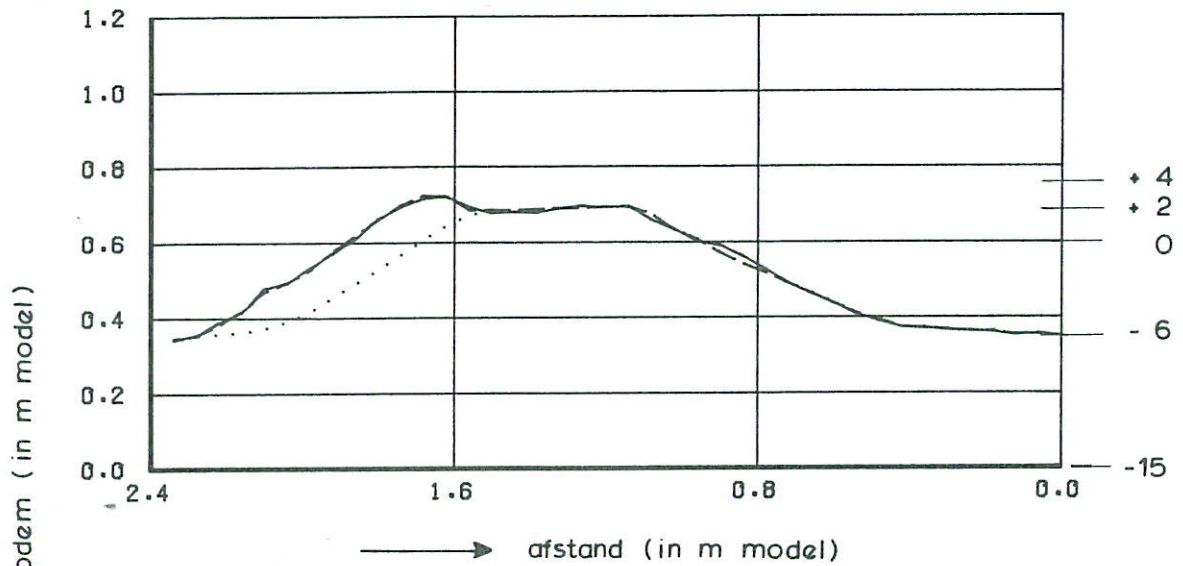
M 2028

FIG. 39



afzonderlijke profielen in perspectief  
 zeewaterstand : N.A.P. + 3,0 m  
 $H_s = 2,25$  m  
 $T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven



afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 3,0 m

$H_s = 2,73$  m

$T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven

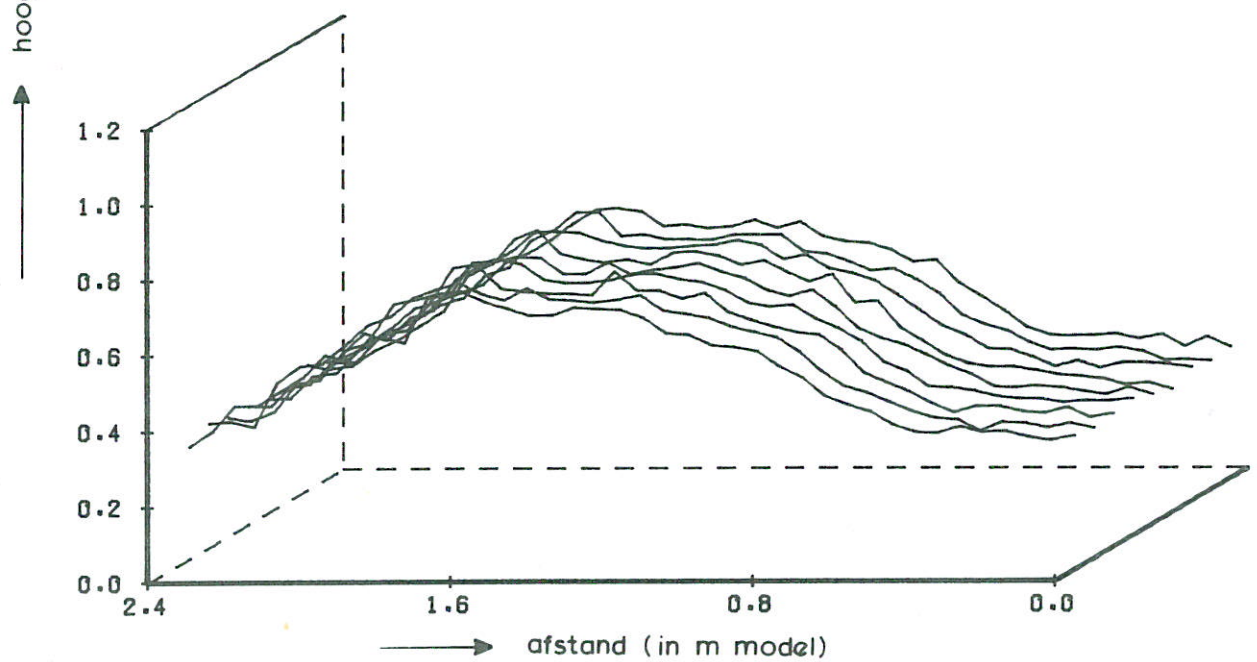
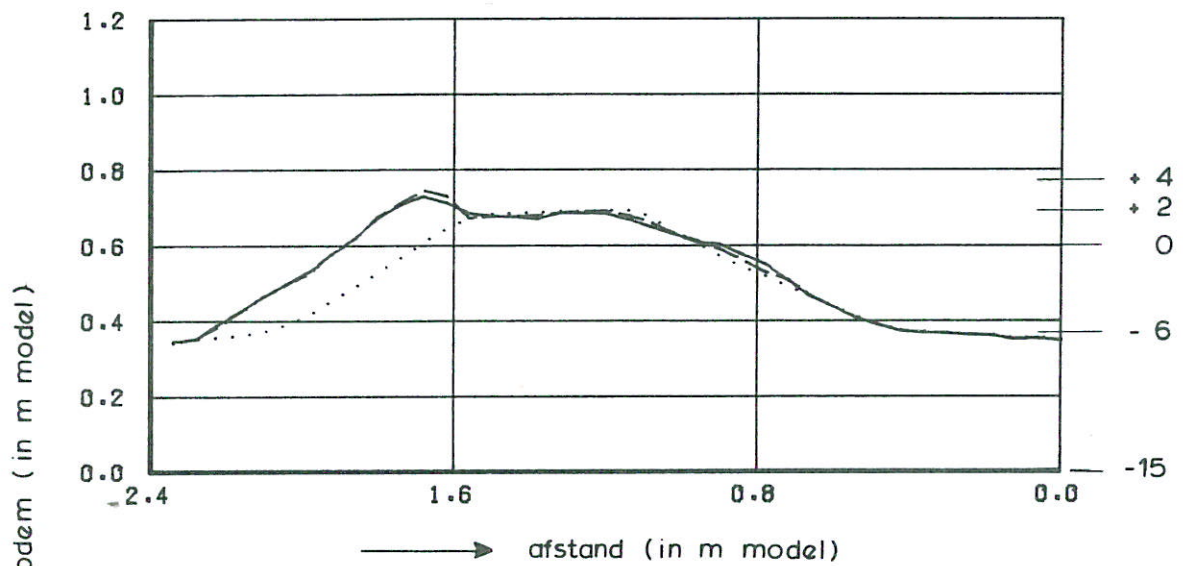
I 2 DWARSPROFIELEN BOVENBOUW

BOVENBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 41



afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 3,7 m

$H_s = 2,30$  m

$T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven

II 1 DWARSPROFIELEN BOVENBOUW

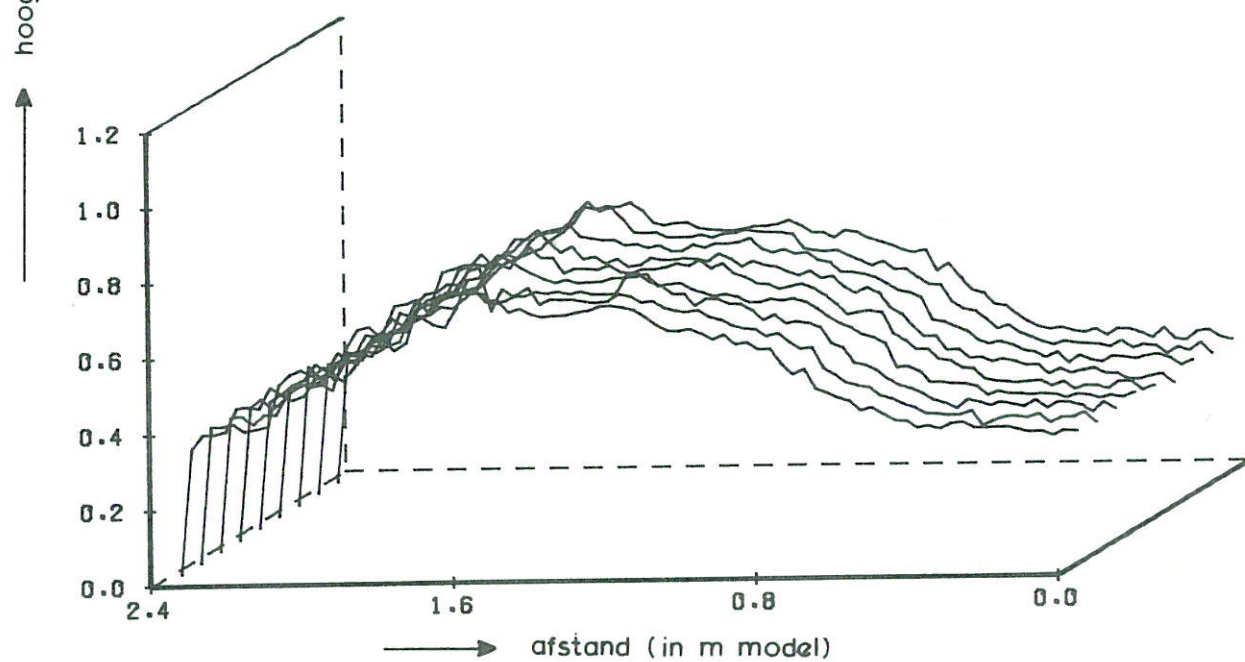
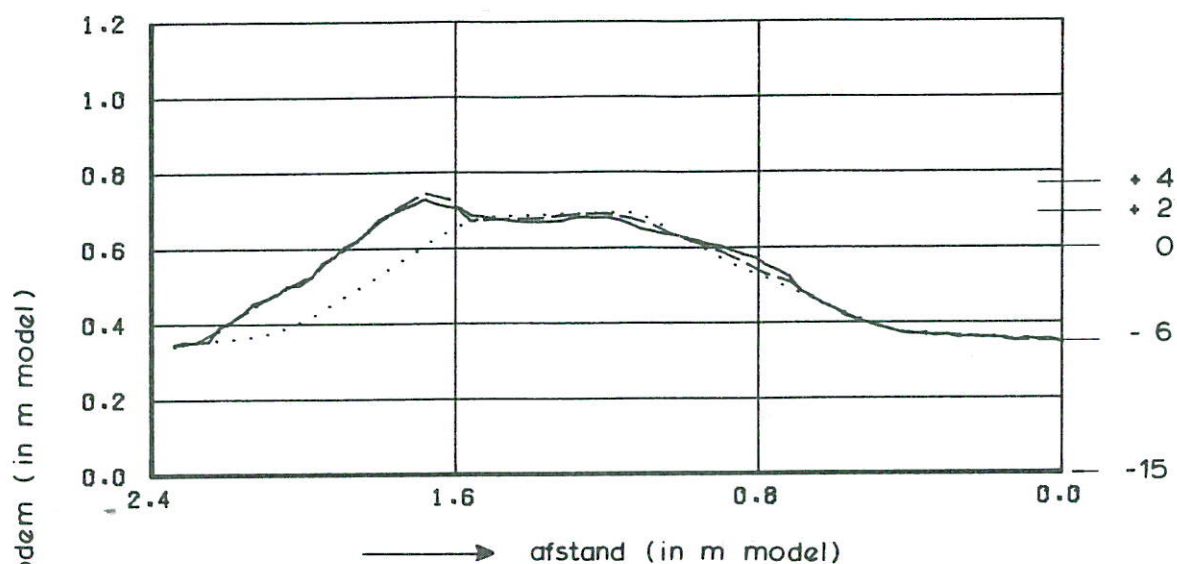
BOVENBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 42





afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 3,7 m

$H_s = 2,81$  m

$T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven

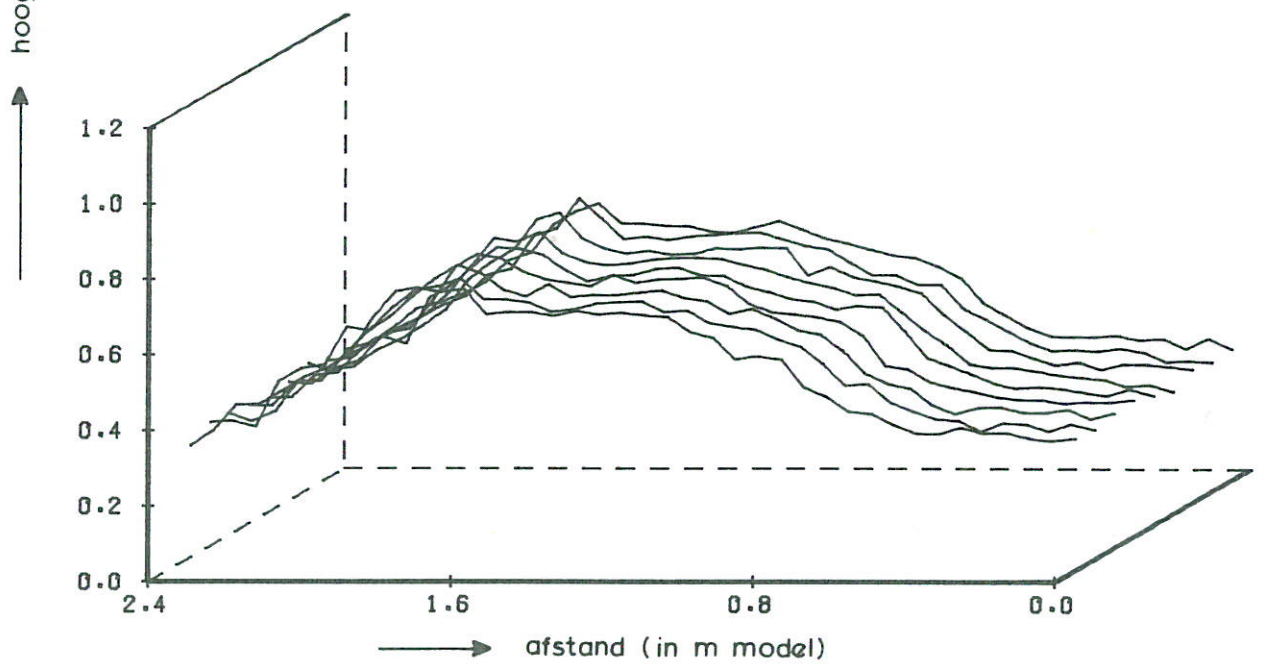
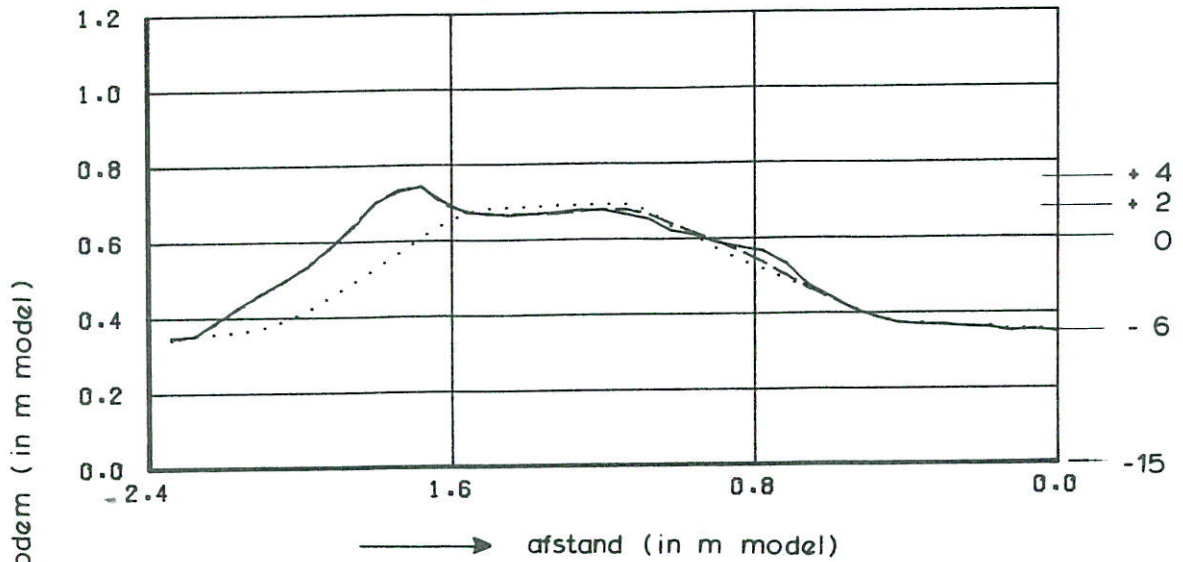
II 2 DWARSPROFIELEN BOVENBOUW

BOVENBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. 43



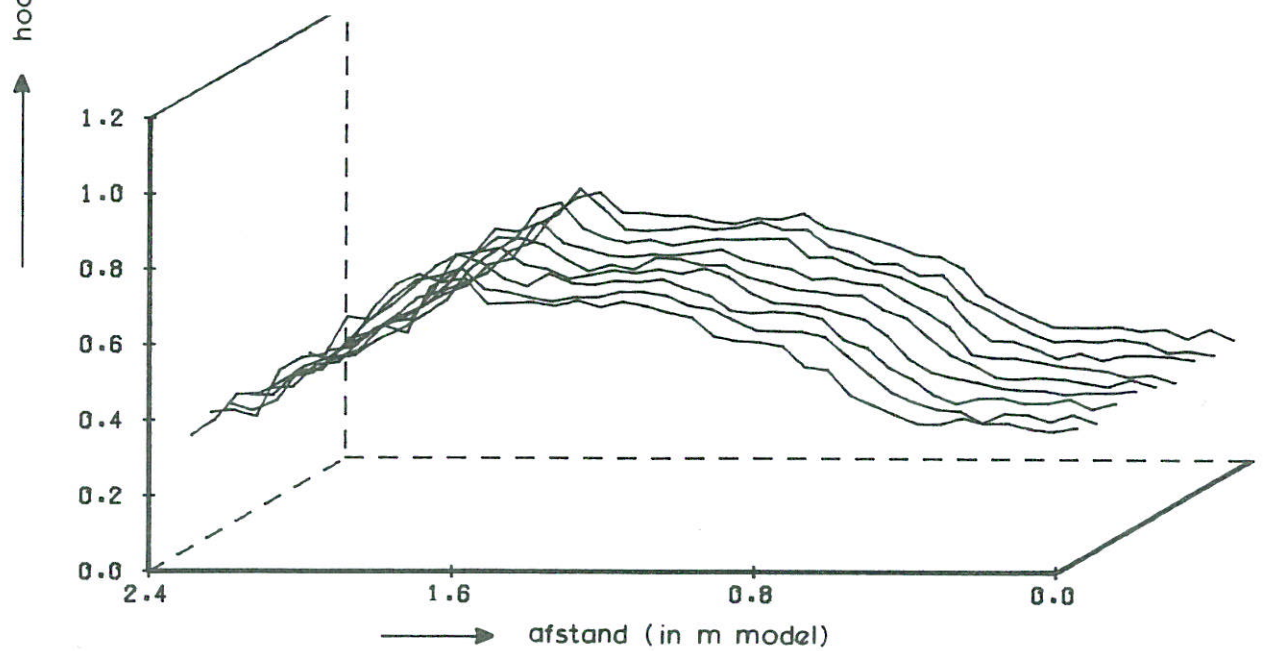
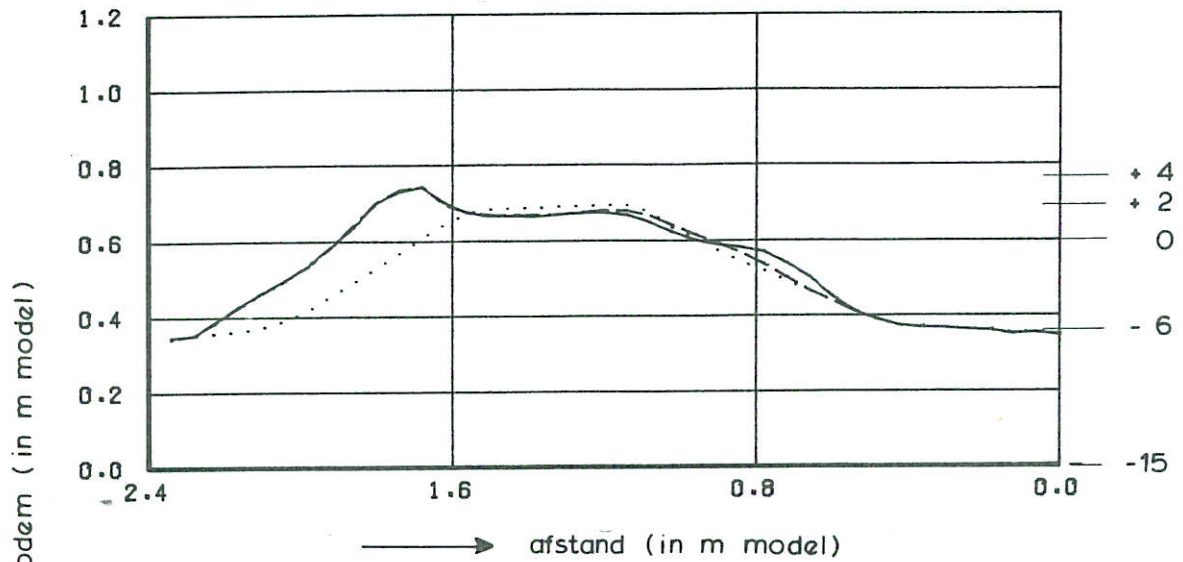
afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 4,3 m

$H_s = 2,27$  m

$T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven



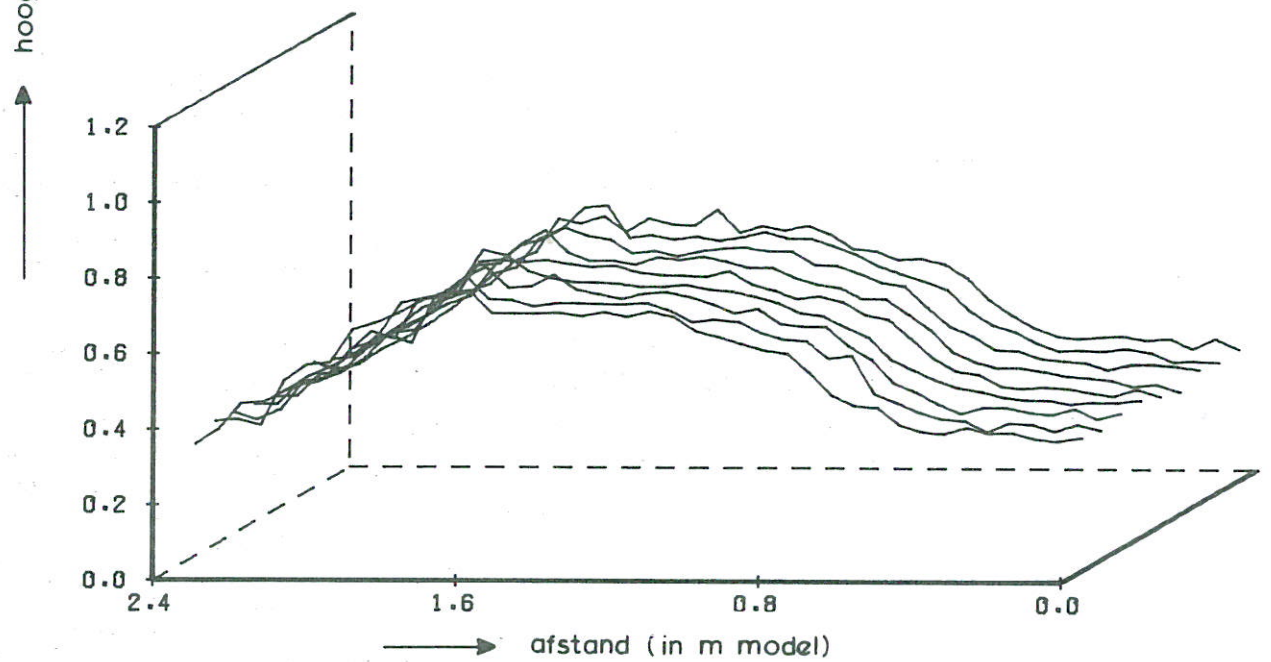
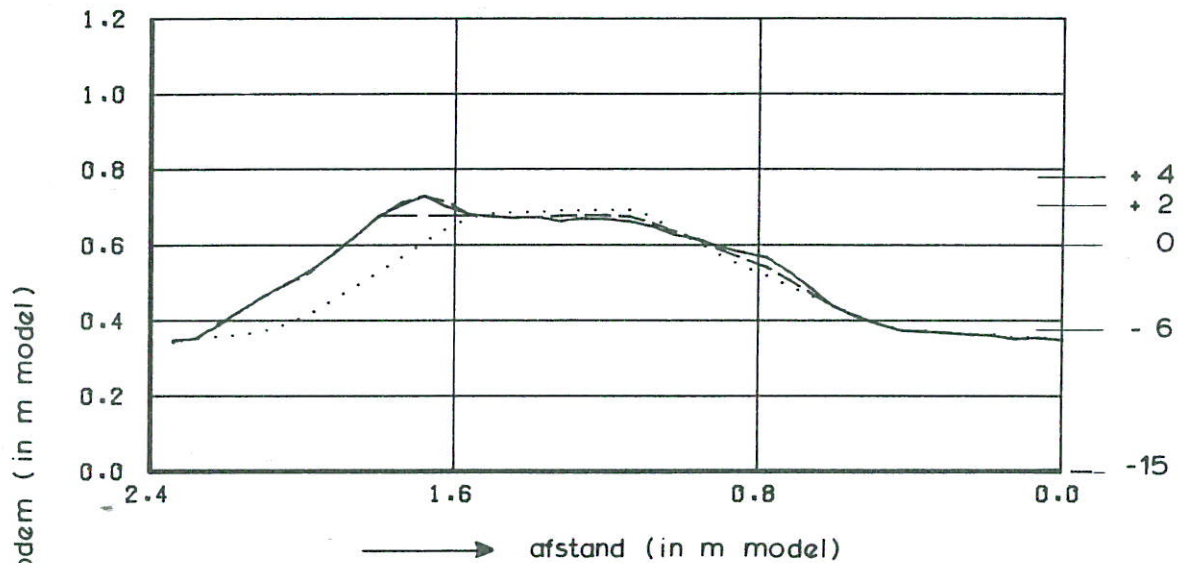
afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 4,3 m

$H_s = 2,84$  m

$T_p = 5,34$  m

prototypematen, tenzij anders aangegeven



afzonderlijke profielen in perspectief

zeewaterstand : N.A.P. + 3,7 m

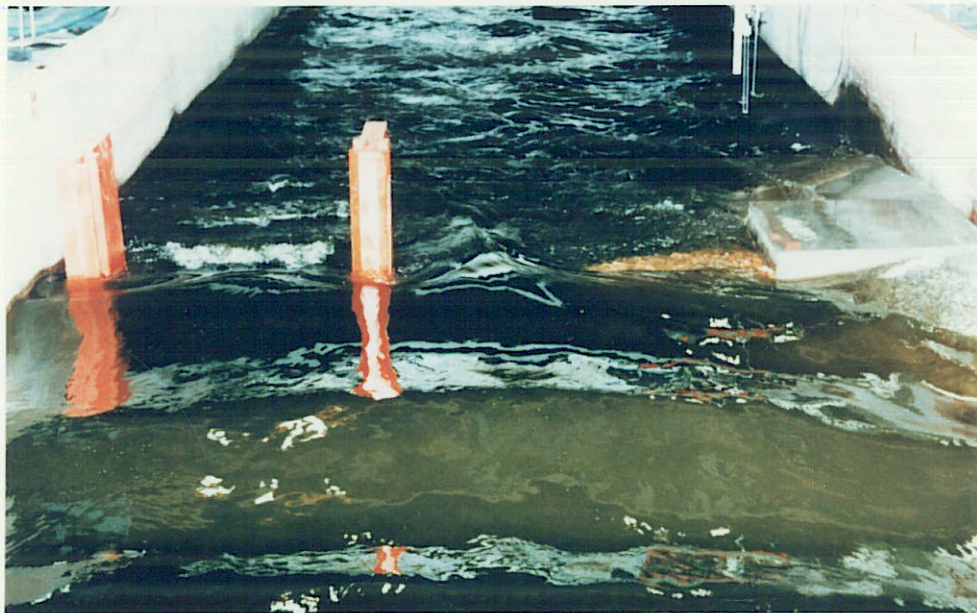
$H_s = 2,83$  m

$T_p = 5,34$  m

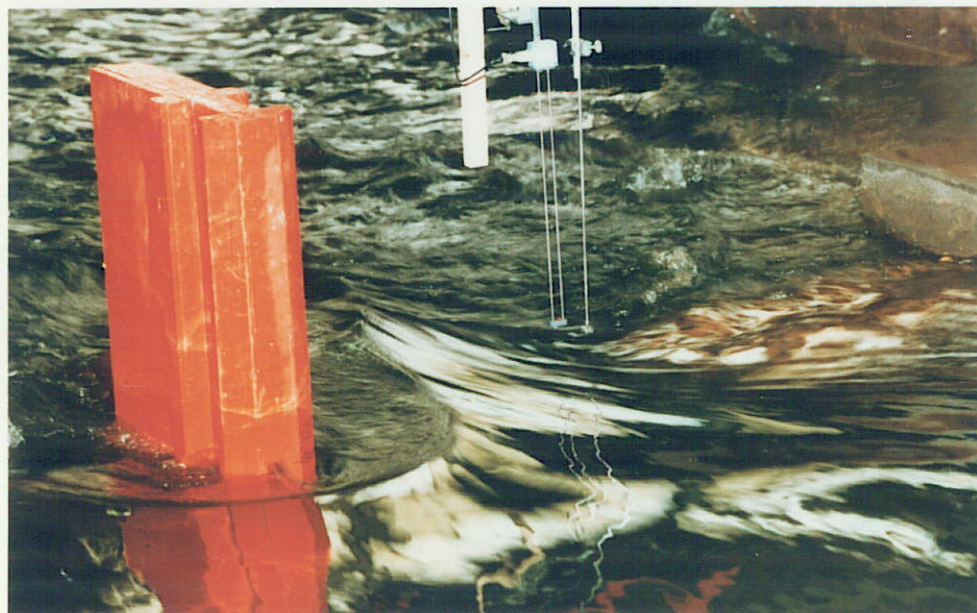
prototypematen, tenzij anders aangegeven



1 Pentagoot, overzicht proefopstelling onderbouw-situatie (T2)



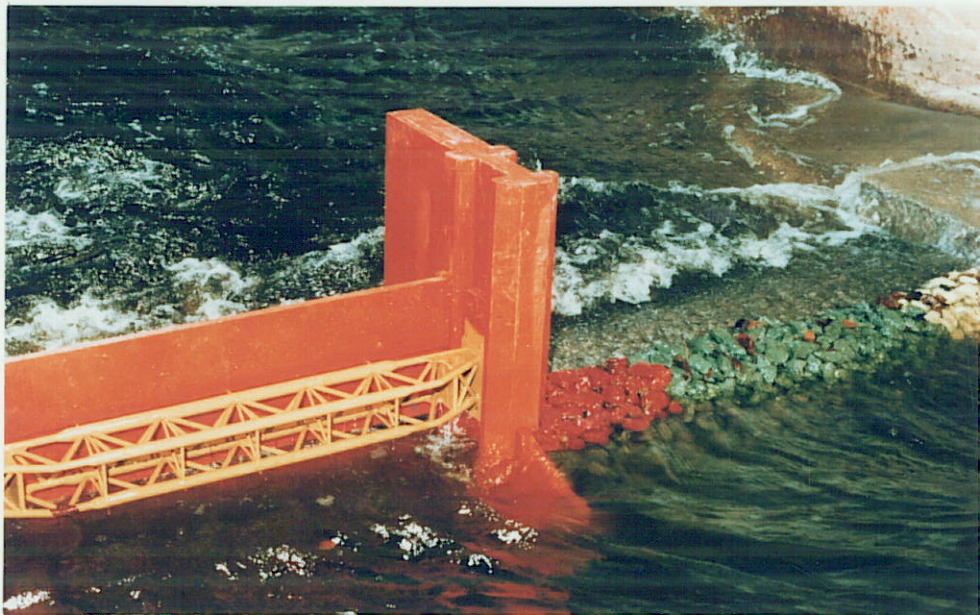
2 Overzicht stroombeeld vanaf bovenstreams (T2)



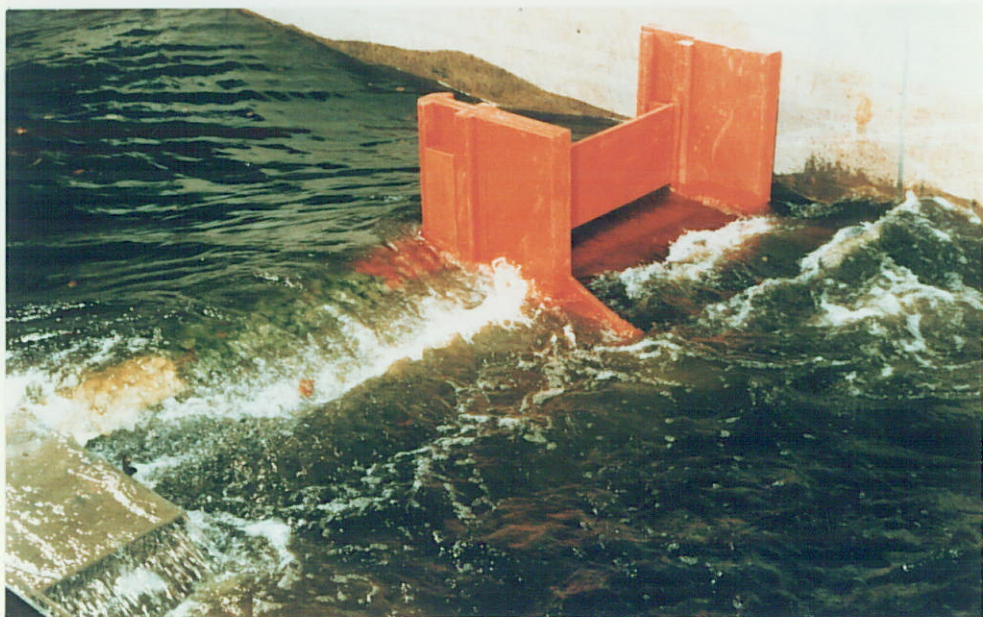
3 Detail van het stroombeeld rond de pijlers vanaf bovenstreams (T2)



4 Pentagoot, overzicht proefopstelling bovenbouw-situatie (T3)



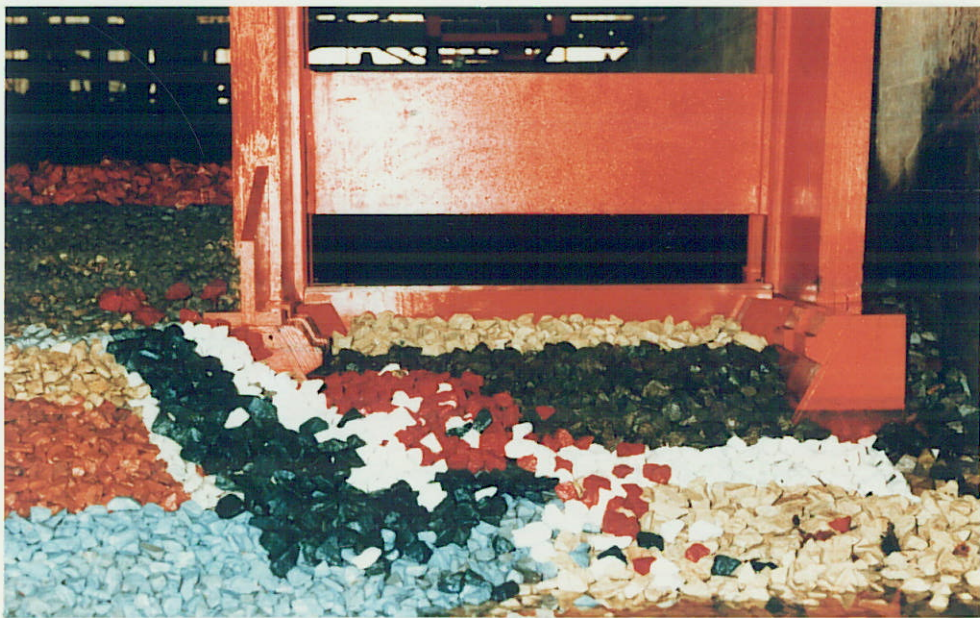
5 Overzicht stroombeeld vanaf bovenstrooms (T3)



6 Overzicht stroombeeld vanaf benedenstrooms (T3)



7 Detail stroombeeld bij extreme omstandigheden, bovenbouw-  
situatie, vanaf benedenstrooms (T5)



8 Schade omkegeling bij extreme omstandigheden, bovenbouw-  
situatie, vanaf benedenstrooms (T5)

APPENDIX

bouwfase stabiliteit breukstenen dammen, invloed  
additionele golfwerking

notitie verkennende studie



## INHOUD

	blz.
A1. <u>Inleiding en konklusies</u> .....	A1
A2. <u>Beschouwde situaties</u> .....	A3
A3. <u>Steenstabiliteit bij stroom- en golfaanval: bruikbare benaderingen</u> .....	A4
A3.1 Stroomaanval.....	A4
A3.2 Golfaanval.....	A5
A3.3 Stroom- en golfaanval.....	A8
A4. <u>Toepassing op de beschouwde lokaties</u> .....	A12
A4.1 Stabiliteit onderbouw (lokatie a).....	A12
A4.2 Stabiliteit onderbouw met damuitbouw (lokaties b.1 en b.2).....	A12
A4.3 Stabiliteit damuitbouw (lokaties b.3 en b.4).....	A13

## REFERENTIES

## FIGUUR

A1 Benodigde steenzwaarten voor de kruin van de onderbouw bij golfaanval

## APPENDIX

### INVLOED ADDITIONELE GOLFWERKING OP BOUWFASE STABILITEIT BREUKSTENEN DAMMEN NOTITIE VERKENNENDE BUREAUSTUDIE

#### Al. Inleiding en konklusies

In deze appendix is de verkennende bureaustudie vastgelegd, welke voorafgaande aan het onderhavige modelonderzoek werd verricht.

Voor wat betreft de bouwfasen wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen de met stortsteen op te bouwen onderbouw van de breukstenen dam met een kruin op NAP -6 m (steen 1/3 ton) en het in den droge uit te bouwen damgedeelte tussen NAP -6 m en NAP +2 m (steen 300/1000 kg), hierna respektievelijk kortweg met "onderbouw" en "damuitbouw" aangeduid.

#### Konklusies:

- De invloed van golfaanval op de steenstabiliteit van de breukstenen drempel 1/3 ton en de uit te bouwen dam 300/1000 kg lijkt dusdanig belangrijk te zijn dat deze niet buiten beschouwing mag worden gelaten. Opgemerkt moet worden dat bij de schatting van de grootte van de additionele golfinvloed is uitgegaan van  $H_{SI} = 3$  m en T variërend van 5 tot 10s.
- Diverse benaderingen voor het vaststellen van de golfinvloed zijn voor het onderhavige geval verder uitgewerkt (paragraaf A.3). De naar verwachting meest realistische zijn voor de in beschouwing genomen lokaties van onderbouw en damuitbouw toegepast (paragraaf A.4).
- Uitkomsten van de globale beschouwingen zijn:
  - Het aandeel van de golfwerking op de kruin van de onderbouw zou circa 20 à 30% kunnen bedragen van de totale aanval (gerelateerd aan het toelaatbare debiet of stroomsnelheid).
  - Tijdens uitbouwen van de dam wordt de onderbouw mogelijk extra hevig aangevallen (vgl. voor stroom alléén:  $k = 1,5$  i.p.v. 1,2 à 1,3).Het is in deze situatie onzeker in hoeverre de additionele golfwerking ter plaatse zal worden versterkt (dan wel verzwakt) in verband met de sterk drie-dimensionale verschijnselen nabij de damkop.

- De damstabiliteit wordt in hoge mate bepaald door de golfwerking, zowel de kruin op NAP +2 m, als de aangrenzende taluds. Voor de damkop geldt dit vermoedelijk ook.

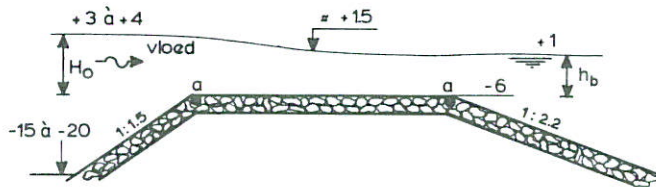
In totaliteit bezien zal de dam 300/1000 kg slechts stabiel zijn bij aanzienlijk minder extreme omstandigheden dan de onderzochte (in M 2028-I), wanneer de maatgevende golfwerking ( $H_{si} = 3$  m) in rekening wordt gebracht.

Het uitbouwen van de dam dient dan ook zoveel mogelijk tijdens gunstige stroom- en golfkondities plaats te vinden en de afdekking met zwaardere stenen moet onverwijld daarop aansluitend worden gerealiseerd.

- Met name de onzekerheden verbonden aan de combinatie van zware stroom met relatief minder zware golfaanval voor de onderbouw benadrukken het belang van een nadere toetsing van de gedane aannamen.

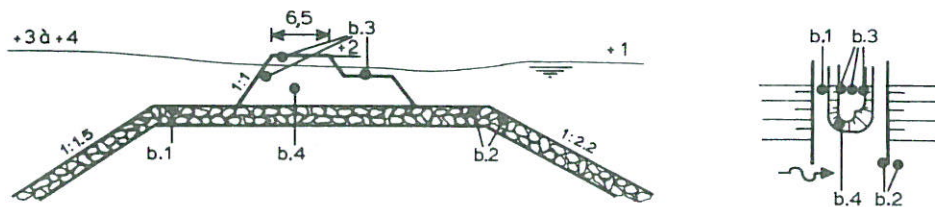
A2. Beschouwde situaties

- a. Onderbouw op NAP -6 m (afdeklaag steen 1/3 ton).
- b. Onderbouw op NAP -6 m en gedeeltelijke damuitbouw (steen 300/ 1000 kg).
  - b.1 Berm naast flank van uitgebouwde dam.
  - b.2 Kruin aangrenzend aan kop van uitgebouwde dam.
  - b.3 Kruin en taluds van de damuitbouw.
  - b.4 Damkop.



ad a. lokaties onderbouw

Opm. De golf wordt over de drempel naar verwachting nauwelijks gedempt, dus de volledige golfaanval dient ook ter plaatse van de benedenstroomse kruin in rekening te worden gebracht.



ad b. lokaties onderbouw met damuitbouw

### A3. Steenstabiliteit bij stroom- en golfaanval: bruikbare benaderingen

#### A3.1 Stroomaanval

Voor een vlak bed geldt Shields (eenparige stroming):

$$\frac{u_k}{\sqrt{\Delta g D}} = \text{coëff.} \times \log \left( \frac{6h}{D} \right) \quad (1)$$

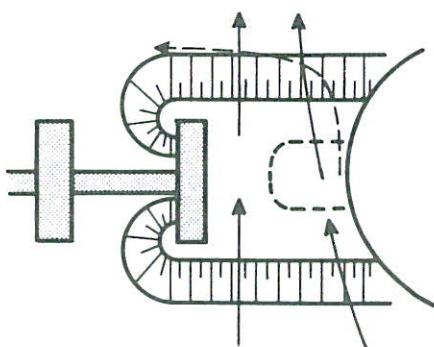
bijv. coëff. = 1,0 ( $\psi = 0,03$ ) voor begin verplaatsing  
= 1,15 ( $\psi = 0,04$ ) voor enig transport.

Voor een dam gaat bij onvolkomen afvoer (1) ook nog op, t.p.v. de benedenstroomse kruinlijn, met als coëfficiënt circa 1,15.

Overigens kunnen ook andere benaderingen worden toegepast (M 1741-VI [A1]) zoals een overspoelingshoogte - ( $H_o$ ) of (specifiek) debiet-kriterium, welke laatste ook toepasbaar zijn bij lager benedenwaterstanden.

Hier is:  $h_b / \Delta D \approx 7 / 1,63 = 4,3$  waarin  $h_b$  = de benedenstroomse waterdiepte ten opzichte van de kruin, dus (1) gaat nog op (M 1741-IV).

Voor de onderbouw, ook zonder damuitbouw, is sprake van 3-D effecten, welke in M 2028-I zijn onderzocht (zie schets).



—→ oppervlakte  
- - - → bodem

3-D effecten door:

- aanwezigheid pijler
- 3-D stroming
- aanwezigheid damaanzet
- (eventueel) aanwezigheid dam

Resultaat M 2028-I (de omkegeling buiten beschouwing latend):

Doordat de pijler vrijwel volledig is ingepakt in de onderbouw, gekombineerd met de zeer brede kruin (waar de stroom benedenstrooms is "opgelegd"), was de schade door de stroomaanval benedenstrooms gekoncentreerd: zowel op het

benedenstroomse kruingedeelte als op het talud, welke laatste door een sterke spiraalstroming vooral ter plaatse van de aansluiting op de damaanzet en het stortebed werd aangevallen. Dit 3-D effect viel bij afwezigheid van de damuitbouw mee:  $k \approx 1,2$  à  $1,3$  (betrokken op  $Q/A$  per poortje).

Mèt een tot halverwege uitgebouwde dam (halve damuitbouw) liep dit op tot  $k = 1,5$ .

De kop van de dam zelf (300/1000 kg) bleek wat gunstiger dan de onderbouw (1/3 ton) als gevolg van de grote vervormingscapaciteit.

### A3.2 Golfaanval

Het eenvoudigst is uit te gaan van een oscillerende stroming zonder stroomaanval. Om het één en ander te konkretiseren wordt hier van de volgende omstandigheden uitgegaan:

$$H_{Si} = 3 \text{ m}$$

$$T = 5 \text{ s}, 7,5 \text{ s en } 10 \text{ s}$$

$$d = \text{lokale waterdiepte} = 7,5 \text{ m (variëert feitelijk over de drempelkruin)}$$

$$\Delta D \text{ voor } 1/3 \text{ ton} = 1,63 \text{ m}$$

Methoden om de kritieke steenafmetingen te bepalen in een dergelijke oscillerende stroming zijn gepresenteerd door bijvoorbeeld Komar en Miller [A2] en Rance en Warren [A3].

Beide methodieken relateren de steenzwaarte aan de orbitaalsnelheid en de orbitale uitwijking aan de bodem.

Voor de bovenvermelde, voor de breukstenen dam reëel geachte, omstandigheden is de steenzwaarte als functie van  $H_{Si}$  uitgezet (Komar en Miller). Opgemerkt moet worden dat voor  $H_{Si}$  hier  $H_r$  (= regelmatige golfhoogte) is aangehouden. Zonder stroming, voor een vlakke bodem, resulteert dit in:

$$\Delta D \approx 2 \text{ à } 5 \text{ cm voor } T = 5 \text{ à } 10 \text{ s,}$$

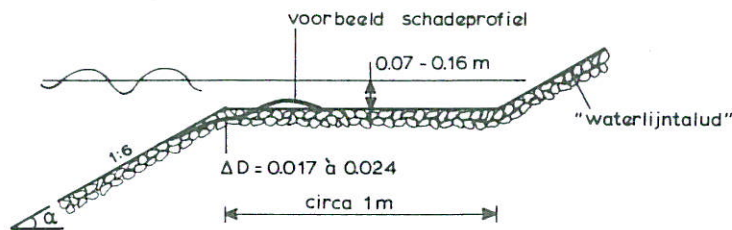
waaruit gekonkludeerd mag worden dat de golfinvloed marginaal zou zijn.

Afwijkingen hiervan voor de onderbouw, nog afgezien van 3-D effecten, zijn echter:

- Onregelmatige golven (bij  $H_{si} = 3$  m), wat betekent dat de maximale golfhoogte (bij  $N = 1000$ ) tot wel circa  $1,85 \cdot 3$  m  $\approx 5,6$  m kan oplopen, welke laatste meer bepalend zal zijn voor het optreden van schade.
- Bij de onderbouw neemt de waterdiepte plotseling af van orde NAP -15 tot NAP -6 m, waardoor het snelheidsveld op de kruin niet aangepast zal zijn.
- Rond de kruinlijn zal het materiaal instabieler liggen door de knik in het profiel en de helling van de aangrenzende taluds.

Het onderzoek M 2006 [A4]

geeft enige aanknoping voor het in rekening brengen van deze effecten. Bij dit onderzoek is ondermeer de stabiliteit van de onderwaterkruin van een dijktalud onderzocht.



Onder voorbijgaan aan de aanwezigheid van het "waterlijntalud" is deze situatie met een lengteschaal van 50 tot 100 te vertalen naar de onderbouw van de breukstenen dam, afgezien van de afwijking in taludhelling (1:1,5 tegen 1:6 in M 2006). Overigens is deze laatste wel verdisconteerd in de stabiliteitsrelatie die (voorlopig nog onder enig voorbehoud) uit M 2006 is verkregen, maar deze is slechts gebaseerd op enkele proeven met een helling 1:3.

Deze (voorlopige) relatie is als volgt:

$$\frac{H_{si}}{\Delta D} = a(\xi_2)^b (N_o)^c (N)^d \left(1 + \frac{B}{L_o}\right)^e \left(1 + \frac{H_{si}}{d}\right)^f \quad (2)$$

met

$$a = 3,53$$

$$\xi_2 = \text{tga} / \sqrt{H_{si} / L_o}$$

$L_o$  = golflengte op diep water

$$b = -0,54$$

$N_o$  = schadekriterium (stenen per m' damlengte verplaatst)  $\approx 3$  voor begin schade

c = 0,22  
N = aantal gekozen golven  $\approx$  1000  
d = -0,066  
B = bermbreedte  $\hat{=}$  kruinbreedte drempel  $\approx$  60 m  
e = 0,32  
f = 0,56  
d = waterdiepte boven de berm  $\approx$  7,5 m

Voor realistische waarden van  $H_{si}$  zijn de kritieke steenafmetingen uit (2) eveneens in de figuur weergegeven.

Hieruit blijkt dat de golfwerking voor  $H_{si} = 3$  m een steenafmeting  $\Delta D$  vereist van rond 1 m (300/1000 kg, met  $\Delta = 1,65$ )! Er is dus een verschil met de benaderingen via oscillerende stroming van circa een faktor 15.

Hiervan is maximaal een faktor 3,5 ( $= 1,85^2$ ) te verklaren door de toepassing van  $H_{si}$  in plaats van  $H_r$ . Verder bleek uit de metingen in M 2006 dat de orbitaalsnelheden circa 20% hoger waren dan die volgens de lineaire golftheorie, hetgeen een faktor 1,5 voor de steenzwaarte betekent.

Er resteert dan nog een faktor 2 à 3 welke (mogelijk) wordt veroorzaakt door de ongunstige stabiliteit rond de knik.

Onzeker in deze benaderingswijze is de extrapolatie vanuit M 2006 naar niet-brekende golven, dat wil zeggen  $H_{si} < \approx 0,55 \times 7,5 = 4,1$  m voor het voorliggende geval van een breukstenen drempel op NAP -6 m, omdat in M 2006 in alle gevallen van bijna brekende golven sprake was.

Daarnaast was de onderzochte range van golfperioden ietwat hoog, in die zin dat er nog wel redelijk aangesloten is bij  $T = 10$  s maar voor kleinere perioden M 2006 mogelijk te konservatief kan zijn (dit blijkt althans uit één proef waarbij de golfperiode aanzienlijk lager was: in model  $T = 0,92$  s, tegenover 1,51 ... 2,28 s bij de andere proeven).

Invulling van de relevante grootheden voor steen 1/3 ton in (2) levert een kritieke golfhoogte (zonder stroming)  $H_{si}$  op van circa 7,5 m ( $T = 5$  s) tot 4,2 m ( $T = 10$  s).

Résumerend kan worden gesteld dat de oscillerende stroom-benadering vermoedelijk veel te onveilig, maar de M 2006-benadering wellicht te konservatief zal zijn. In dit verband lijkt de kritieke golfhoogte bij afwezigheid van stroom voor de onderbouw tenminste 4 à 5 m te bedragen.



### A3.3 Stroom- en golfaanval

In het verleden zijn diverse onderzoeken uitgevoerd met de combinatie stroom en golven, bijvoorbeeld in het kader van de sluitingen voor Brouwershavense Gat en Oosterschelde (M 731 en M 995 onderzoeken).

Deze onderzoeken zijn echter afwijkend op de volgende punten:

- De sluitdammen zijn compact en homogeen van opbouw.
- De vervormingscapaciteit is groot (geen minimale afdekklagen), dus het schadekriterium is afwijkend.
- De kruinhoogte ligt rond de benedenwaterstand (meestal erboven, soms iets eronder).

Wel hebben de meeste experimenten betrekking op betonblokken van 2,5 ton, welke redelijk goed vergelijkbaar zijn met de "zware" 1/3 ton stortsteen voor de breukstenen dammen ( $\Delta D$  respektievelijk circa 1,5 t.o.v. 1,63). Ook de golfbelasting was doorgaans van een relevante grootte:  $T = 7,5$  s en  $H = 2$  à  $3$  m (echter alleen regelmatig).

Uit de proeven blijkt dat de geometrie een belangrijke stabiliteitsfaktor is, met name de kruinhoogte ten opzichte van de benedenwaterstand; de damhoogte (bodempligging) is minder belangrijk. Een en ander heeft tot gevolg dat de conclusies niet zonder meer overdraagbaar zijn naar de breukstenen drempel zonder een diepgaande studie en analyse van deze onderzoeken (zo dit al met de huidige kennis mogelijk zou zijn).

Andere, meer recente onderzoeken, hebben eveneens betrekking op dammen met relatief hoog gelegen kruinen (boven de benedenwaterstand, bijv. M 1631-deel I [A5] (breukstenen dammen SVKO-eindfase-) en M 1741-deel II [A6] (Markiezaatskade en aansluitende dammen tijdens bouw- en eindfase). Deze onderzoeken hanterden een kritieke overspoelingshoogte (voor stroom alleen). In geval van golven kon deze golfwerking globaal worden verdiskonteerd door bij de optredende overspoelingshoogte een deel van de significante golfhoogte op te tellen, en wel bij benadering:  $1/3 H_{si}$ .

Deze benadering is hier echter eveneens niet zonder meer toepasbaar, door de te lage kruinligging van de onderbouw, waardoor een afvoer- of stroomsnelheidskriterium wellicht meer reëel is (zie verder). Ook is de verhouding stroom- en golfaanval voor de breukstenen drempel afwijkend, en wel met meer nadruk op de stroomaanval. Het toepassen van deze vuistregel, wat in het navolgende is gedaan, moet derhalve slechts als zeer indicatief worden gezien.

In het voorliggende geval leidt deze aanpak tot de volgende indicatie:

Bij  $h_b/\Delta D$  ( $h_b$  = benedenwaterstand t.o.v. de kruin)  $\approx 7/1,63 = 4,3$ , geldt voor de kritieke overspoelingshoogte  $H$  ten opzichte van de kruin (M 1741-IV):

$$\frac{H}{\Delta D} \approx 6,3, \text{ dus } H \approx 10,3 \text{ m voor steen } 1/3 \text{ ton.}$$

Hierbij hoort dus een kritiek verval van circa  $(6,3 - 4,3)1,63 = 3,26$  m (voor de 2-D situatie).

De extra overspoelingshoogte t.g.v. golfwerking zou volgens M 1631-I en M 1741-II bij benadering  $1/3H_{si} = 1/3*3 \text{ m} = 1 \text{ m}$  bedragen, ofwel de extra bijdrage aan  $H/\Delta D$  is  $1/1,63 = 0,61$  m.

Dit betekent dat circa 30% van het kritieke verval aan de golfwerking moet worden toegekend, ofwel dat het resterende kritieke debiet voor stroom alleen met ruim 15% zou moeten worden gereduceerd als gevolg van de golfwerking.

De overheersende invloed van de stroming verhindert ook de toepassing van benaderingen voor oscillerende stroming, gesuperponeerd op een stroomkomponent, zoals volgens de methode van Bijker [A7]. Oriënterende berekeningen leverden een verwaarloosbare golfaanval op in vergelijking met de stroomaanval, hetgeen in strijd is met de toepasbaarheid van deze aanpak.

Voor de breukstenen drempel liggen relevante stroomsnelheden in de orde van 5 à 6 m/s, tegenover orbitaalsnelheden aan de bodem in de orde van hooguit 1 à 2 m/s. Het is derhalve waarschijnlijk dat niet van een normale grenslaagontwikkeling voor golven sprake is, maar dat deze meer aan die van een goed ontwikkelde, quasi-permanente, stroom zal zijn gerelateerd. Het lijkt dan ook reëel om voor de steenstabiliteit uit te gaan van het permanente stroomdebiet ( $q_s$ ) met daarop gesuperponeerd het momentane maximum orbitaal-debiet ( $\hat{q}_w$ ) en het totale debiet ( $q_t$ ) als semi-stationair op te vatten; nu kan het debietkriterium voor de damstabiliteit worden gehanteerd, met  $q_t$  = het totale specifieke debiet over en door de dam (M 1741-IV):

Bij  $h_b/\Delta D = 4,3$  geldt

$$q_t / (g^{0,5} (\Delta D)^{1,5}) \approx 8,5 \rightarrow q_t \approx 56 \text{ m}^2/\text{s}$$

Stel  $\hat{q}_w \approx h \hat{u}_b$ , met

$h$  = waterdiepte boven de dam  $\approx 7,5$  m

$\hat{u}_b$  = max. orbitaalsnelheid boven de bodem =

$$= \frac{HgT}{2L} \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

Voor  $H = 3$  m en  $T = 5, 7,5$  en  $10$  s, wordt aldus gevonden

	$T = 5$ s	$T = 7,5$ s	$T = 10$ s
$L$	35 m	61 m	84 m
$\hat{u}_b$	0,96 m/s	1,35 m/s	1,51 m/s
$\hat{q}_w$	7,2 m <sup>2</sup> /s	10,1 m <sup>2</sup> /s	11,3 m <sup>2</sup> /s

Dit betekent dat bij  $H = 3$  m en  $T = 7,5$  à  $10$  s voor circa 20% van het totale kritieke debiet wordt bijgedragen door de golfwerking. Een onzeker punt, evenals bij zuiver golfwerking, wordt wederom gevormd door de invloed van "uitschieters" in het golfspektrum ten opzichte van de regelmatige golfbenadering die hier is toegepast. In dit opzicht is deze benadering in elke geval onveilig. Een representatieve verhouding van  $H$  t.o.v.  $H_{si}$ , welke eenzelfde schade geeft kan niet zonder meer worden gegeven aangezien deze afhankelijk is van konstruktiegeometrie en golfaanval-parameters (en in dit geval ook nog stroominvloed). Bekend is dat deze kan variëren tussen circa 1,0 tot wel 1,8. Indien hier 1,5 wordt aangehouden, moet bijvoorbeeld met een regelmatige golf  $H = 4,5$  m worden gerekend; dan wordt (zuiver ter illustratie) de volgende invloed gevonden

	$T = 5$ s	$T = 7,5$ s	$T = 10$ s
$L$	35 m	61 m	84 m
$\hat{u}_b$	1,44 m/s	2,03 m/s	2,27 m/s
$q_w$	10,8 m <sup>2</sup> /s	15,2 m <sup>2</sup> /s	16,95 m <sup>2</sup> /s

Daarenboven blijkt een voorspelling van de orbitaalsnelheid volgens de lineaire golf-theorie voor dit type golven (dat tegen breken aanzit) gemiddeld circa 20% te laag te zijn voor een vergelijkbare situatie (metingen M 2006), zodat de  $\hat{q}_w$ 's met circa 20% zouden moeten worden verhoogd. Hiermee neemt het aandeel van  $\hat{q}_w$  in het totale toelaatbare debiet toe tot circa 1/3.

Het uitgangspunt, de volledig door de permanente stroom bepaalde grenslaagontwikkeling, blijft een onzeker punt en zal zonder meer getoetst dienen te worden.

Résumerend lijkt, onder het nodige voorbehoud, de golfinvloed op de steenstabiliteit dusdanig groot te kunnen zijn dat voor de breukstenen drempel op NAP -6 m met een reductie voor de kritieke stroom moet worden gerekend van circa  $1/5$ , maar mogelijk zelfs meer (uitgaande van een "ontwerp"-golfhoogte  $H_{si} = 3$  m).

#### A4. Toepassing op de beschouwde lokaties

##### A4.1 Stabiliteit onderbouw (lokatie a)

Hiervoor geldt de laatste aanpak; dit houdt in dat de invloedsfaktor  $k = 1,2$  à  $1,3$  (betrokken op  $Q/A$ ) met circa  $1,2$  à  $1,3$  vermenigvuldigd moet worden ten einde de toelaatbare  $Q/A$  voor stroom- en golfaanval te verkrijgen, dus de totale invloedsfaktor  $k \approx 1.4$  à  $1.7$ .

De golfwerking zal vooral op de bovenstroomse kruinlijn zijn gekoncentreerd, terwijl de stroomaanval in de 3-D situatie rond de benedenstroomse kruinlijn en aansluitend talud (spiraalstroming) het hevigst is. Anderszijds wordt de golf nauwelijks gedempt tijdens de voortplanting over de drempelkruin omdat geen breking optreedt en de wrijvingsdissipatie, over de relatief korte afstand van orde 1 maal de golflengte, gering zal zijn. De eerste aantasting bij de gekombineerde aanval zal daarom vermoedelijk op het benedenstroomse deel van de kruin van de onderbouw gekoncentreerd zijn.

##### A4.2 Stabiliteit onderbouw met damuitbouw (lokaties b.1 en b.2)

Voor de kruin van de onderbouw, aangrenzend aan de uitgebouwde damkop, geldt hetzelfde als hiervoor, namelijk een verhoging van de  $k$  van circa  $1,5$  met een faktor  $1,2$  à  $1,3$  tot circa  $1,8$  à  $2,0$ . De konsekventie is dat de lokale ( $Q/A$ ) stroomsnelheden de  $3,5$  à  $4,0$  m/s niet zullen mogen overschrijden tijdens de (kortstondige) uitbouw van de damkop. Als onzeker punt bij deze benadering, onzekerder dan bij lokatie a. het geval is, is de superpositie van de 2-D golfinvloed naar de sterk 3-D stroomsituatie.

Voor de drempel naast de flank van een al dan niet gereedgekomen uitgebouwde dam, lokatie b.1, kan met alleen 2-D golfwerking worden volstaan.

De in par. A3.2 vermelde relatie (2) is hier, inclusief de daar vermelde beperkingen, van toepassing. Ten opzichte van de volledige drempelkruinbreedte van ca. 60 m, die in par. A3.2 in beschouwing werd genomen moet de kritieke golfhoogte worden gereduceerd in verband met de kortere bermbreedte ( $\sim 9$  m). Deze reductie bedraagt [A4]:

$$\frac{(1 + 9/(39 \text{ à } 156))^{0,32}}{(1 + 60/(39 \text{ à } 156))^{0,32}} = 0,8 \text{ à } 0,9$$

Hierdoor reduceert  $H_{si}$  tot circa 3,5 à 4,5 m. Lokatie b.1 zal daarom ten alle tijde stabiel zijn.

#### A4.3 Stabiliteit damuitbouw (lokaties b.3 en b.4)

De kruin en aansluitende taluds van de dam (lokatie b.3) worden aangevallen door stroom en golven. De kruin bevindt zich daarbij rond of iets boven de benedenwaterstand, terwijl als gevolg van de relevante bovenstroomse waterstanden (+3 à +4 m) overspoeling over de kruin zal optreden.

Voor deze situatie is de ervaring uit M 1631-I en M 1741-II wel goed toepasbaar, dus voor  $h_b/\Delta D = -1/1,14 = -0,08$  geldt voor de kritieke toelaatbare overspoelingshoogte circa  $H/\Delta D \approx 1,0$  (M 1741-II) waarvan circa  $1/3 \cdot (3/\Delta D) = 0,9$  m door golfbelasting wordt ingenomen, zodat hierbij hoegenaamd geen stroomaanval als gevolg van overspoeling kan worden toegelaten. Bij de maatgevende golfbelasting dient de bovenwaterstand dus beperkt te blijven tot circa NAP +2 m. Hieraan is doorgaans niet voldaan.

Andersom geredeneerd zou bij uitsluitend stroomaanval een overspoelingshoogte van circa 1,1 m (bovenwaterstand NAP +3,1 m) mogen worden toegelaten. Uit de modelproeven bleek echter dat bij vervallen van orde 2,5 m of meer (bovenwaterstand NAP +3,5 m of hoger) weliswaar schade aan de kruin optrad, maar dat er sprake was van een grote bezwijkreserve (vervormingscapaciteit) tijdens uitvlakking van het benedenstroomse deel van de kruin. Bedacht moet worden dat enige additionele golfwerking in deze situatie een sterke reductie van de toelaatbare overspoelingshoogte zal geven (M 1741-II: bezwijken van in 300/1000 kg opgebouwde dammen bij een overspoelingshoogte van 1,2 m en golfhoogte (regelmatig!!) van 1,8 m en een periode van ruim 4 s!).

Ook het buitentalud kan ter plaatse van de waterlijn, indien deze omtrent of lager dan de kruin ligt, door alléén golfaanval onaanvaardbaar worden aangevallen.

Oriënterende berekeningen voor de stabiliteit van dit "waterlijntalud" aan de hand van een eveneens in M 2006 hiervoor afgeleide relatie, waarin ook de invloed van een bovenstroomse berm (hier 9 m) kan worden verwerkt, geven de volgende kritieke  $H_{si}$ -waarden voor steen 300/1000 kg:

$$H_{si} = 3,63 \text{ m voor } T = 5 \text{ s}$$

$$H_{si} = 2,82 \text{ m voor } T = 7,5 \text{ s}$$

$$H_{si} = 2,87 \text{ m voor } T = 10 \text{ s}$$

Het zal duidelijk zijn dat de stabiliteit van de damkruin en aansluitende taluds onvoldoende lijkt voor enigszins extreme condities, zodat met de (kortstondige) bouw van de dam gunstige condities moeten worden afgewacht en dat de afdekking met zwaardere breuksteen onverwijld daarna moet plaatsvinden.

Voor de damkop, lokatie b.4, geldt een andere benadering.

Zowel op grond van vroegere experimenten als ook uit de metingen van M 2028-I, bleek de stabiliteit van de damkop (300/1000 kg) gunstig te zijn bij uitsluitend stroomaanval. De invloedsfactor  $k$  (voor de  $Q/A$  snelheid) kan op circa 1,2 worden gesteld. De aantasting van de damkop vindt niet plaats aan de teen, maar op enige afstand uit de bodem (hier de drempelkruin), op circa de halve waterdiepte (benedenstrooms ten opzichte van de drempelkruin).

In navolging van par. A3.3 bedragen de maximale orbitaalsnelheden, hier berekend voor de halve waterdiepte, bij golfhoogte  $H = 3$  m:

	$T = 5$ s	$T = 7.5$ s	$T = 10$ s
$\hat{u}_{\frac{1}{2}h}$	1,19 m/s	1,46 m/s	1,57 m/s

Met inachtnaam van een faktor 1,5, zoals in het voorbeeld van par. 3.3 voor vervanging van  $H_{si} = 3$  m door  $H$ , wordt dus gevonden:

$\hat{u}_{\frac{1}{2}h}$	1,79 m/s	2,19 m/s	2,36 m/s
--------------------------	----------	----------	----------

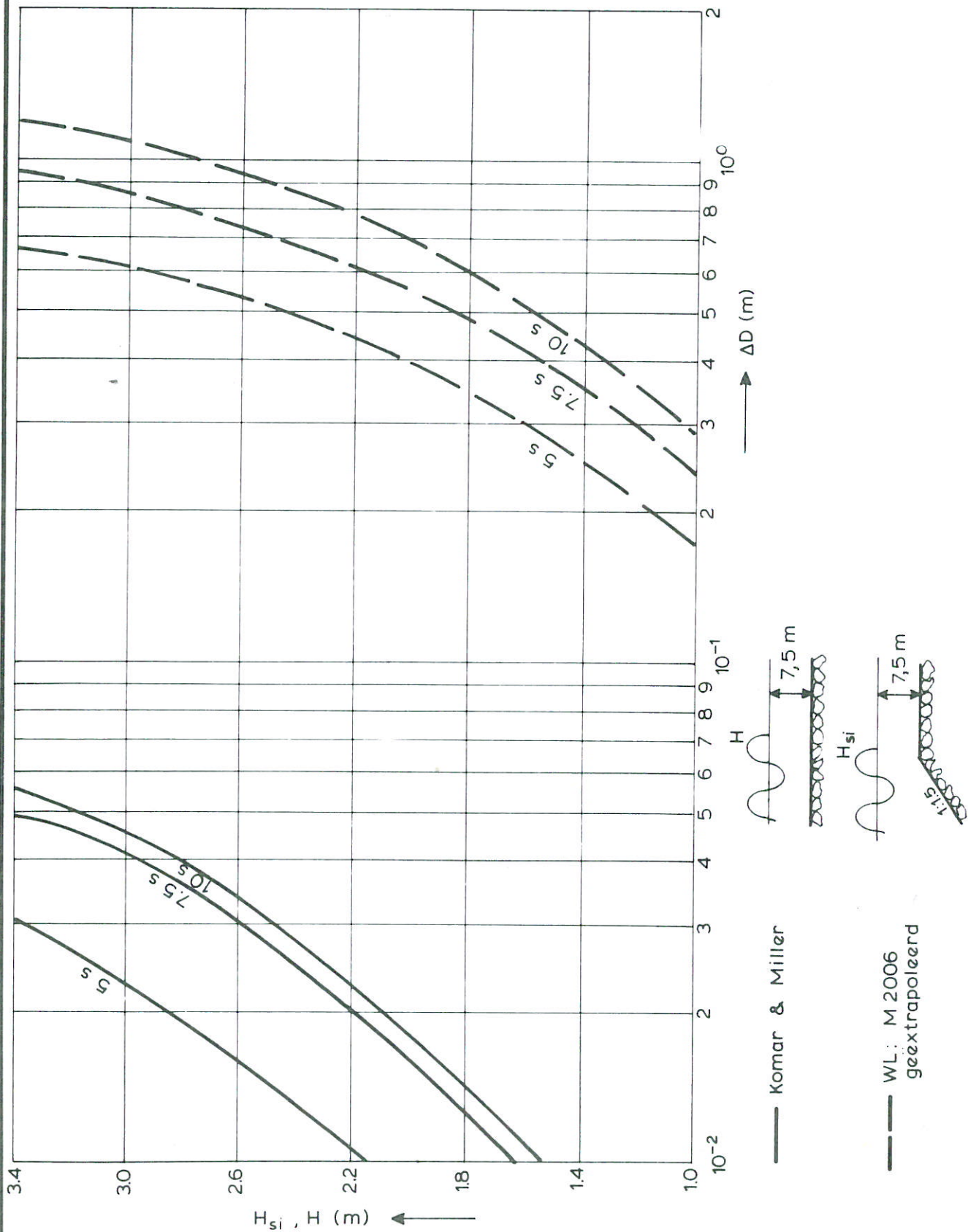
Tegenover de kritieke stroomsnelheid van circa 5,4 m/s (M 2028: T4) betekent dit een aandeel door de golven van circa 1/3 tot iets minder dan de helft, zodat de toelaatbare stroomsnelheid bij zware golfwerking sterk moet worden gereduceerd: de  $k$ -waarde loopt dan op tot 1,8 à 2,2!

Onder het nodige voorbehoud t.a.v. de nauwkeurigheid van bovenstaande benaderingen, kan worden gesteld, dat ook het uitbouwen van de damkop tot de aangrenzende pijler onder gunstige condities zal moeten plaatsvinden.

REFERENTIES

- A1. Akkerman, G.J., Konter, J.L.M.  
Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps, vertical closure method  
Waterloopkundig Laboratorium, M 1741-IV, 1983 (draft)
- A2. Komar, P.D., Miller, M.C.  
Sediment threshold under oscillatory waves  
Coastal Engineering 1974, Chapter 44
- A3. Rance, P.J., Warren, N.F.  
The threshold of movement of coarse material in oscillatory flow  
Coastal Engineering 1968, Vol. 1, Chapter 30
- A4. Vermeer, A.  
Stabiliteit van stortstenen bermen en teenkonstrukties  
Waterloopkundig Laboratorium, M 2006, 1984 (verslag n.n.v.)
- A5. Wouters, J.  
SVKO, Drie-dimensionaal onderzoek stabiliteit overgangskonstruktie  
Waterloopkundig Laboratorium, M 1631-I, 1980
- A6. Akkerman, G.J.  
Comp. Oesterdam, stabiliteit Markiezaatskade en aansluitende damvakken  
Waterloopkundig Laboratorium, M 1741-II, 1982
- A7. Bijker, E.W.  
Some considerations about scales for coastal models with movable bed  
Waterloopkundig Laboratorium, Publ. 50, 1967





BENODIGDE STEENZWAARTEN VOOR DE KRUIJN  
VAN DE ONDERBOUW BIJ GOLFAANVAL

ONDERBOUW

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 2028

FIG. A1

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands