

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

stormvloedkering Oosterschelde

stabiliteit toplaag drempelkruin in de
bouwfase

verslag modelonderzoek

M 1740

oktober 1980

stormvloedkering Oosterschelde

stabiliteit toplaag drempelkruin in de
bouwfase

verslag modelonderzoek

M 1740

oktober 1980

INHOUD

	blz.
1. <u>Inleiding</u>	1
2. <u>Conclusies</u>	2
3. <u>Proefopstelling en randvoorwaarden</u>	3
4. <u>Resultaten</u>	4
5. <u>Berekeningen van de stabiliteit van de toplaag</u>	5
5.1 Analyse.....	5
5.2 Stroomsnelheden in de spleet.....	5
5.3 Kritieke stroomsnelheid en verval voor het begin van bewegen.....	8

LITERATUUR

TABELLEN

- 1 Overzicht proefresultaten
- 2 Kritieke vervallen bij verschillende spleethoogten, schadecriteria en zwaarte van de bestortingen op de drempelkruin

FIGUREN

- 1 Relatie tussen schade en verval voor drie spleethoogten
- 2 Relatie stroomsnelheid en verval
- 3 Relatie stroomsnelheid en verval
- 4 Vergelijking tussen meting en berekening van kritieke stroomsnelheid en kritiek verval

STORMVLOEDKERING OOSTERSCHELDE

STABILITEIT TOPLAAG DREMPELKRUIN IN DE BOUWFASE

1. Inleiding

In de notitie 311 DRO - M - 80028 [4] is de stabiliteit van de toplaag van de drempelkruin van de stormvloedkering in de Oosterschelde tijdens en vlak na het plaatsen van de dorpelbalk geanalyseerd. De aanstortingen zijn in deze bouwphase nog niet aanwezig. Bij deze analyse werd uitgegaan van stroomsnelheden, gemeten bij onderzoeken naar de doorlatendheid van de spleet, en ten behoeve van het plaatsen van de dorpelbalk. Met behulp van een aantal stabiliteitsformules en de karakteristieke steenparameters werd bij deze stroomsnelheden de stabiliteit van de bestortingen berekend. Gezien de niet eenparige stroming en de geringe waterdiepte in de spleet onder de dorpelbalk moet aan de toepasbaarheid van de stabiliteitsformules echter worden getwijfeld. Dit was voor de Delta-dienst van de Rijkswaterstaat aanleiding om aan het Waterloopkundig Laboratorium opdracht te geven enkele verificatieproeven te verrichten naar de stabiliteit van de bestortingen onder de dorpel in de bouwphase.

Het onderzoek stond onder leiding van ir. J.L.M. Konter, die ook dit verslag samenstelde.

2. Conclusies

- 1 De stroomsnelheden in de spleet onder de dorpelbalk kunnen worden berekend met de relatie

$$\Delta H = 1,4 \frac{u^2}{2g}$$

- 2 De stabiliteitsformule volgens het verslag M 711-II, geldend voor de stabiliteit van stenen op een brede drempelkruin, geeft tezamen met de correctiefactor voor de waterdiepte volgens Ashida en Bayazit een goede overeenstemming met de metingen voor een spleethoogte van 2,0 m.
- 3 Bij kleinere spleethoogten dan 2,0 m is de stabiliteit van de bestortingen beter dan uit de stabiliteitsformules volgt.
- 4 De bestorting 300-1000 kg ($\Delta D_n = 1,07$ m) geeft bij een verval van 1,8 m (schadecriterium 10 stenen) begin van instabiliteit. De bestorting 1000-3000 kg ($\Delta D_n = 1.43$ m) geeft begin van instabiliteit bij een verval van 2,3 m. Het bezwijken van de toplaag treedt echter eerst op bij vervallen, die circa 1,5 maal zo groot zijn.

3. Proefopstelling en randvoorwaarden

Het onderzoek werd uitgevoerd (op lengteschaal 1:30) in de Pentagoot van het Laboratorium De Voorst met het model waarmee ook het onderzoek naar de stabiliteit van de toplaag van de drempel en de overgangsconstructie (M 1451) werd uitgevoerd. In de 5 m brede goot waren 3 compartimenten van de stormvloedkering ingebouwd, waardoor 3 spleethoogten (1,0 m, 1,5 m, en 2,0 m) tegelijkertijd beproefd konden worden. De bovenstroomse waterdiepte boven de drempelkruin bedroeg tijdens de proeven circa 8 m. Hierdoor was bij vervallen tot circa. 2,5 m de benedenstroomse waterdiepte dermate klein dat de eventuele schade visueel bepaald kon worden. Onder schade wordt verstaan dat één of meerdere stenen van de toplaag onder de dorpel worden verplaatst naar de Oosterscheldezijde van de dorpel. Bij de proeven werd over alle drie compartimenten het verval over de dorpel gelijktijdig ingesteld. Gedurende 1,5 uur prototype-tijd werd bij de 3 compartimenten gecontroleerd of er stenen werden verplaatst naar de benedenstroomse zijde van de dorpel. Hierbij werd het verval in stappen opgevoerd totdat bij één de compartimenten (plaatselijk) de toplaag volledig verdwenen was. Voor een overzicht van de ingestelde vervallen met bijbehorende schade wordt verwezen naar tabel 1. Ter vergelijking: het prototype-verval bij deze situatie bedraagt circa 1,0 m voor een gemiddeld getij en circa 1,75 m voor een verval dat gemiddeld 1 maal per jaar voorkomt.

Tijdens de proeven werd bovendien met een Ott-molen de stroomsnelheid direct achter de dorpel gemeten. Het ging hierbij slechts om een grove indicatie van de optredende stroomsnelheden. In verband met de relatief grote afmetingen van de propeller van de Ott-molen ($\emptyset = 0,05$ m) ten opzichte van de spleethoogte geven de snelheidsmetingen bij spleethoogten tot 1,5 m prototype (= 0,05 m model) te kleine waarden aan voor de stroomsnelheid. Het ging echter in eerste instantie slechts om een globale indicatie van de optredende stroomsnelheden gedurende de stabiliteitsproeven. Bij het onderzoek naar de waterdoorlatendheidswaarde van de spleet onder de dorpel (zie M 1451-8) werden de stroomsnelheden door toepassing van een kleinere schaalfactor ($n_1 = 10$) nauwkeuriger gemeten met behulp van een Ott-molen en tevens bepaald uit de debietmeting. In paragraaf 4.1 worden beide snelheidsmetingen met elkaar vergeleken en wordt hieruit een schatting gemaakt van de snelheid als functie van het verval voor diverse spleethoogten.

4. Resultaten

Stabiliteit

De resultaten van de proeven (stabiliteit en stroomsnelheden) zijn weergegeven in tabel 1. Uit figuur 1 volgt een relatie tussen de (cumulatieve) schade en het verval. Hieruit blijkt de tendens dat voor de drie onderzochte spleethoogten de schade toeneemt bij toenemende spleethoogte. Bij de bestorting 300 - 1000 kg zijn de verschillen in stabiliteit tussen spleethoogten van 1,5 m en 2,0 echter zeer klein. Wordt het kritieke verval gedefiniëerd als het verval waarbij 0 of 10 stenen worden verplaatst, dan blijkt bovendien dat dit verval nog aanzienlijk overschreden mag worden voordat de top laag bezwijkt. Ten opzichte van het verval volgens het schade-criterium van 0-stenen ligt het bezwijkverval een factor 1,8 à 2,0 maal hoger (zie tabel 2). De gemeten kritieke vervallen zijn bovendien groter dan die welke uit berekening volgen (zie figuur 4 en paragraaf 4.2).

Stroomsnelheid

De resultaten van de stroomsnelheidsmetingen zijn weergegeven in de figuren 2 en 3. Uit deze figuren blijkt dat de ruwheid van bestortingen niet van invloed is op de stroomsnelheden benedenstrooms van de dorpel. (Bij de bestorting 300 - 1000 kg ontstaat dezelfde stroomsnelheid als bij de bestorting 1000 - 3000 kg.) Uit figuur 2 blijkt tevens dat volgens de metingen van M 1451-8 de stroomsnelheden benedenstrooms van de spleet ook niet worden beïnvloed door de spleethoogte, bij spleethoogten tot 2,5 m. De stroomsnelheidsmetingen tijdens het hier beschreven onderzoek geven bij spleethoogten van 1,0 m en 1,5 m lagere stroomsnelheden te zien dan volgens het onderzoek M 1451-8. De stroomsnelheden van het huidige onderzoek bij een spleet van 2,0 m stemmen goed overeen met de stroomsnelheden volgens M 1451-8. Aangenomen mag worden dat de kleinere stroomsnelheden bij M 1451-8 kunnen worden toegeschreven aan de relatief te grote diameter van de propeller van de Ott-molen. Uit de stroomsnelheidsmetingen M 1451-8 volgt tevens dat de relatie tussen stroomsnelheid en verval goed kan worden weergegeven door: $\Delta h = 1,4 u^2 / 2g$. In paragraaf 4.1 wordt voor deze relatie een verklaring gegeven.

5. Berekeningen van de stabiliteit van de topplaag

5.1 Analyse

De stabiliteit van de topplaag onder de dorpelkruin hangt enerzijds af van de aanval op de topplaag en anderzijds van de stabiliteits-eigenschappen van de stenen. Met behulp van (empirische) relaties voor de stabiliteit van stortsteen kan veelal een verband worden gelegd tussen de belastingen (stroomsnelheden) en de bestortingen (massa en afmetingen).

De stabiliteitsformules werden echter bepaald bij een eenparige stroming en bij waterdiepten, die een orde groter zijn dan de afmetingen van de individuele stenen. In de situatie met een kleine spleethoogte is de waterdiepte van dezelfde orde als de steenafmetingen. Ook zal door de contractie bij de instroming geen eenparige stroming ontstaan en zal de snelheidsverdeling afwijken van een logaritmische snelheidsverdeling. Met de berekeningen zal dan ook slechts een globale indruk kunnen worden verkregen omtrent de stabiliteit. Naarmate de hoogte van de spleet echter groter wordt, zal de contractie bij de instroming minder zijn, het snelheidsprofiel minder afwijken van de logaritmische verdeling en derhalve zullen de stabiliteitsformules betrouwbaarder uitkomsten leveren.

Achtereenvolgens zal nu worden nagegaan:

- de orde van grootte van de stroomsnelheden in de spleet bij verschillende dorpelhoogten
- het effect van deze stroomsnelheden op de stabiliteit van de bestortingen

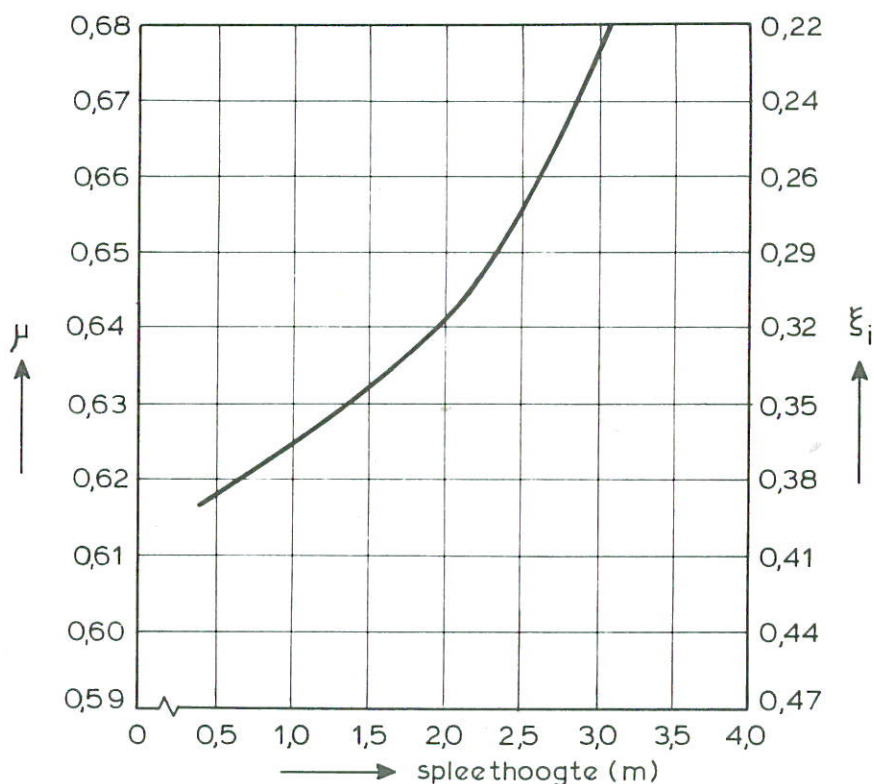
5.2 Stroomsnelheden in de spleet

Bij onderstroming van de dorpel treden een drietal energieverliezen op, het intreeverlies ΔH_i , het wrijvingsverlies ΔH_w en het uittreeverlies ΔH_u . Het intreeverlies wordt veroorzaakt door verwijding van het gekontraheerde doorstroomprofiel aan de instroomzijde onder de dorpel. Het wrijvingsproces treedt op ten gevolge van de extreme ruwheid van de topplaag van de drempel over de betrekkelijk korte afstand van de dorpelbalkbreedte. Het uittreeverlies wordt veroorzaakt door de verwijding benedenstrooms van de dorpel. Het is praktisch deze verliezen te relateren aan de snelheidshoogte aan de benedenstroomse zijde van de spleet: $u^2/2g$.

Het intreeverlies is afhankelijk van de contractie bij de instroming. Deze contractie kan worden gekarakteriseerd door de contractiecoëfficiënt μ . Bij een opening die zich geheel onder water bevindt is volgens [2] $\mu \approx 0,625$ voor een spleethoogte van 1,0 m en $\mu = 0,68$ voor een spleethoogte van ca. 3,0 m. Het intreeverlies, ΔH_i kan uit μ worden berekend met

$$\Delta H_i = \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 \frac{u^2}{2g} = \xi_i \frac{u^2}{2g} \quad (1)$$

De waarden van μ (volgens [2]) bij een waterdiepte van 13 m en ξ_i zijn in onderstaande figuur weergegeven:



Het intreeverlies neemt dus af met toenemende spleethoogte.

Een goede schatting van het wrijvingsverlies is moeilijk te geven, omdat dit sterk afhankelijk is van de definitie van de onderbegrenzing van de spleet. Met $u = C \sqrt{Ri}$ $i = \frac{\Delta H_w}{L}$ geldt als ruwe benadering voor het wrijvingsverlies in de spleet:

$$\Delta H_w = \frac{2g \cdot L}{C^2 \cdot R} \cdot \frac{u^2}{2g} = \xi_w \frac{u^2}{2g} \quad (2)$$

waarin:

L = lengte van de spleet (=8,0 m)

g = versnelling van de zwaartekracht (= 9.81 m/s²)

C²R = doorlatendheidswaarde van de spleet

Deze doorlatendheidswaarde van de spleet is moeilijk te bepalen.

In M 1451-8 worden C²R waarden gevonden variërend tussen 250 en 900.

(R is de afstand tussen de bovenkant van de stenen en de onderkant van de dorpel).

De verliescoëfficiënt tengevolge van de wrijving bedraagt volgens (2)

$$\xi_w = 0,17 \text{ à } 0,62$$

Voor het uittreeverlies geldt voor niet te grote spleethoogten:

$$\Delta H_u = 1,0 \frac{u^2}{2g} \quad (3)$$

Uit figuur 2 en 3 blijkt dat het totale energieverlies over de spleet het beste benaderd kan worden met:

$$\Delta H_{\text{tot}} = 1,4 \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

Deze relatie is (in M 1451-8) afgeleid voor spleethoogten van 0,5 tot 2,5 m. Uit (4) volgt dat het intreeverlies ξ_i en het wrijvingsverlies ξ_w volgens de metingen tezamen 0,4 zijn bij genoemde spleethoogten. Bij toenemende spleethoogte zullen de energieverliezen afnemen. Als extreem kan worden gesteld dat het totale verval (= potentiële energie) wordt omgezet in snelheidshoogte. Voor grote spleethoogten (orde 5 m) kan de stroomsnelheid derhalve worden geschat met

$$\Delta H = \frac{u^2}{2g} \quad (5)$$

5.3 Kritieke stroomsnelheid en verval voor het begin van bewegen

De stabiliteit van de stortsteen kan niet rechtstreeks worden gekoppeld aan het verval of de stroomsnelheid. Bij het bepalen van de stabiliteit is namelijk de waterdiepte boven de kruin (spleet) in relatie tot de steenafmetingen van invloed. Met behulp van de gegevens uit het WL-verslag M 711-II "Stroombestendigheid sluitgatdrempel; brede kruin" kan voor de kritieke stroomsnelheid op een drempel met brede kruin en een vrije waterpiegel worden geschreven (zie [1]).

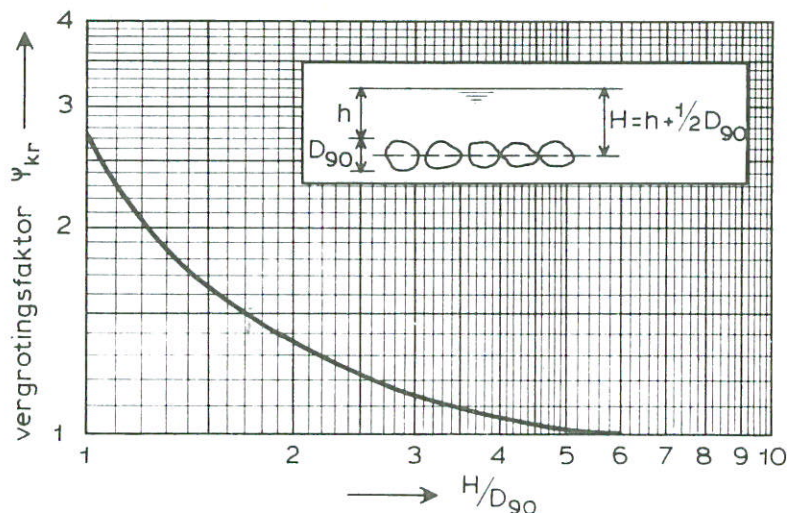
$$\frac{u}{\sqrt{\Delta g D_n}} = 1,4 \log 3,5 \frac{h_{\text{dam}}}{D_n} \quad (6)$$

hierin is:

u	= kritieke stroomsnelheid voor begin van bewegen	(m/s)
g	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
Δ	= relatieve dichtheid van de stortsteen	(-)
D_n	= nominale steendiameter	(m)
h_{dam}	= waterdiepte boven de dam (vrije waterspiegel)	(m)

Deze formule is experimenteel bepaald bij proeven met een vrije waterspiegel met waarden van h_{dam} , die groter waren dan circa 5 maal de gemiddelde steendiameter.

Uit een onderzoek van Ashida en Bayazit [3] (eveneens met een vrije waterspiegel) blijkt dat bij relatief kleine waterdiepten, de stroomparameter van Shields toeneemt. De toename is afhankelijk van de verhouding waterdiepte/steendiameter en geldt voor $H/D_{90} < 5 \text{ à } 6$. De onderstaande grafiek is afgeleid uit de experimentele gegevens van Ashida en Bayazit.



Aannemende dat een dergelijke vergrotingsfactor ook voor de niet-eenparige stroming onder de dorpel geldt, kunnen de kritieke stroomsnelheden volgens (6) als volgt voor de kleine spleethoogten worden aangepast:

$$\bar{u}_{kr} = u \sqrt{\psi_{kr}} \quad (7)$$

waarin:

u = kritieke stroomsnelheid bepaald uit vergelijking (6) (m/s)

ψ_{kr} = vergrotingsfactor bepaald uit de gegeven grafiek (-)

Behalve de geringe waterdiepte speelt ook de vorm van de snelheidsverdeling een rol. Onder de dorpel is geen vrije waterspiegel aanwezig, zoals bij de proeven M 711 wel het geval was. De invloed hiervan zal bij kleinere spleethoogten, waar de contractie het grootst is, het meest merkbaar zijn. Uit de stabiliteitsproeven bleek dat de schade aan de toplaag ontstond aan de bovenstroomse zijde, dus waar de contractie maximaal was. Het snelheidsprofiel wijkt hier aanzienlijk af van het logaritmische snelheidsprofiel. Bij grotere spleethoogten zal de contractie minder zijn en zullen de resultaten van de berekeningen meer in overeenstemming zijn met de werkelijke kritieke stroomsnelheid.

In figuur 4 is voor verschillende spleethoogten de waarde van de kritieke stroomsnelheid volgens (7) of de waarde van het kritiek verval volgens (7) en (4) berekend voor de in model toegepaste bestortingen 300 - 1000 kg ($\Delta D_n = 1,07$ m) en 1000 - 3000 kg ($\Delta D_n = 1,43$ m). Worden de berekende waarden met de gemeten waarden vergeleken (bij een schadekriterium van 10 stenen), dan blijkt de overeenstemming bij een spleethoogte van 2,0 m goed te zijn. Bij een kleinere spleethoogte is de stabiliteit volgens de proeven aanmerkelijk beter dan uit de berekeningen volgt. Bij grotere spleethoogten zal de overeenstemming tussen berekening en metingen naar verwachting beter zijn, omdat de veronderstellingen die voor de berekening noodzakelijk zijn voor deze situatie reëler zijn. Helaas zijn er echter bij de grotere spleethoogten geen metingen verricht. Berekeningen volgens (5) en (7) geven voor een spleethoogte van 5,0 m een kritiek verval van 2,2 m voor de bestorting 300 - 1000 kg ($\Delta D_n = 1,07$ m).

Op grond van berekeningen en proeven wordt geconcludeerd dat in de bouwphase stortsteen 300 - 1000 kg (bij een schadecriterium van 10 stenen) stabiel is tot vervallen van 1,8 m en dat stortsteen 1000 - 3000 kg stabiel is tot vervallen van 2,2 m. Indien meer schade wordt geaccepteerd kunnen grotere vervallen worden toegelaten.

LITERATUUR

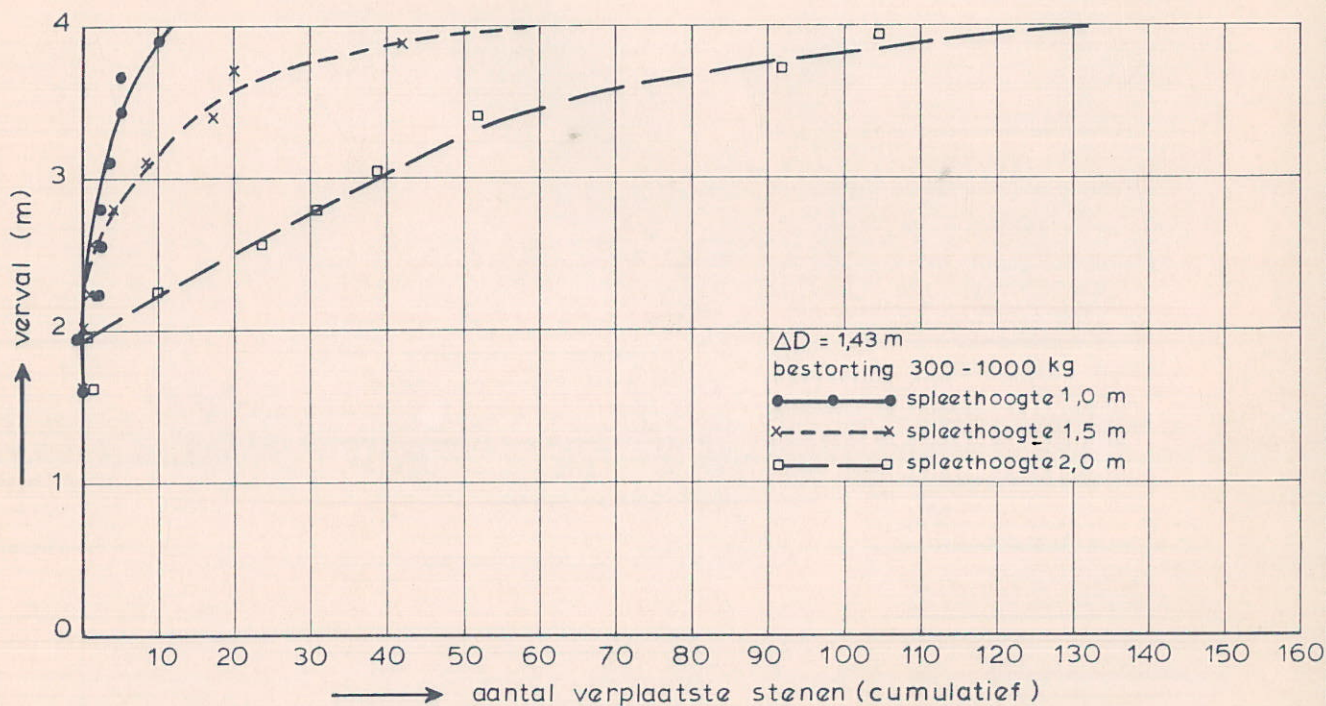
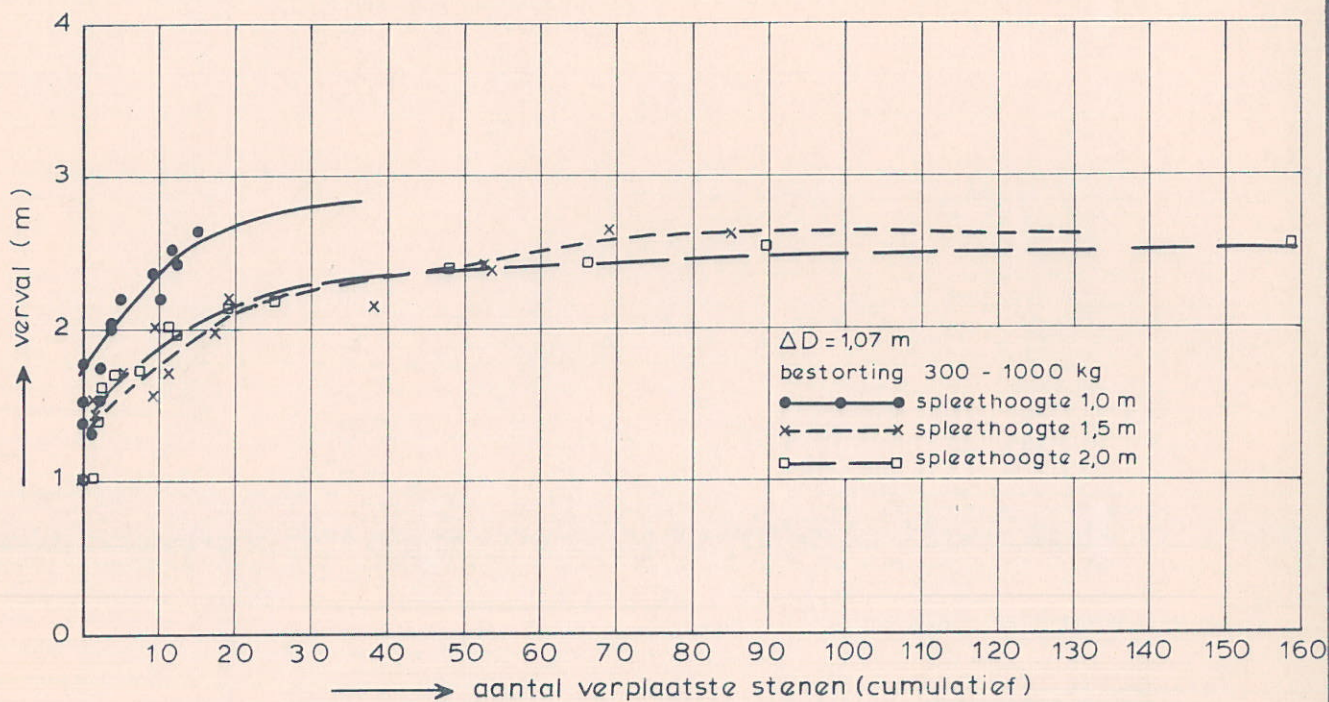
- 1 Waterloopkundig Laboratorium
"Stroombestendigheid sluitgatrempel; brede kruin"
Verslag modelonderzoek M 711-II
- 2 NORTIER, I.W. en VAN DER VELDE, H.
"Hydraulica voor waterbouwkundigen"
Technische Uitgeverij H.Stam N.V.
- 3 ASHIDA, K. and BAYAZIT, M
"Initiation of motion and roughness of flows in steep channels"
Proc 15th IAHR congress, Istanbul, Sept 1973
- 4 Rijkswaterstaat Deltadienst, v.d. Does de Bye, M.R.
"Stabiliteit toplaag onder de dorpelbalk"
Notitie 311 DRO - M - 80028, 25 maart 1980
- 5 Waterloopkundig Laboratorium
"Doorlatendheid van de spleet onder de dorpel"
Interim-verslag modelonderzoek M 1451-8, juni 1980

bestorting	verval	totale schade (aantal stenen)			stroomsnelheid		
		spleethoogte			achter dorpelbalk (m/s)		
		1,0 m	1,5 m	2,0 m	1,0 m	1,5 m	2,0 m
300-1000 kg $\Delta D_n = 1,07$ m (model)	1,00	0	0	0	2,2	3,3	3,8
	1,41	0	2	1	2,7	4,1	4,4
	1,56	0	9	3	3,2	4,2	4,9
	1,74	2	11	7	3,4	4,3	5,4
	1,98	3	17	12	3,3	4,5	5,4
	2,19	10	38	19	3,5	4,5	5,6
	2,43	12	52	66	3,9	5,0	6,0
	2,64	15	69	163	4,2	5,5	6,5
300-1000 kg $\Delta D_n = 1,07$ m model herhaling	1,35	1	1	0	2,9	3,4	4,5
	1,53	2	1	0	3,1	4,0	4,7
	1,74	2	5	4	3,2	4,2	5,0
	2,01	3	9	11	3,4	4,4	5,4
	2,19	4	19	25	3,5	4,6	5,7
	2,37	9	54	48	3,4	4,9	6,1
	2,61	11	86	88	3,8	5,1	6,8
1000-3000 kg $\Delta D_n = 1,43$ m (model)	2,28	2	1	10	3,9	4,9	5,7
	2,55	2	1	24	4,2	5,4	6,1
	2,85	2	4	31	4,3	5,6	6,4
	3,12	3	8	39	4,5	6,0	6,6
	3,45	5	17	52	4,7	6,1	6,8
	3,69	5	20	92	4,9	6,4	7,3
	3,90	10	41	105	5,0	6,9	7,8

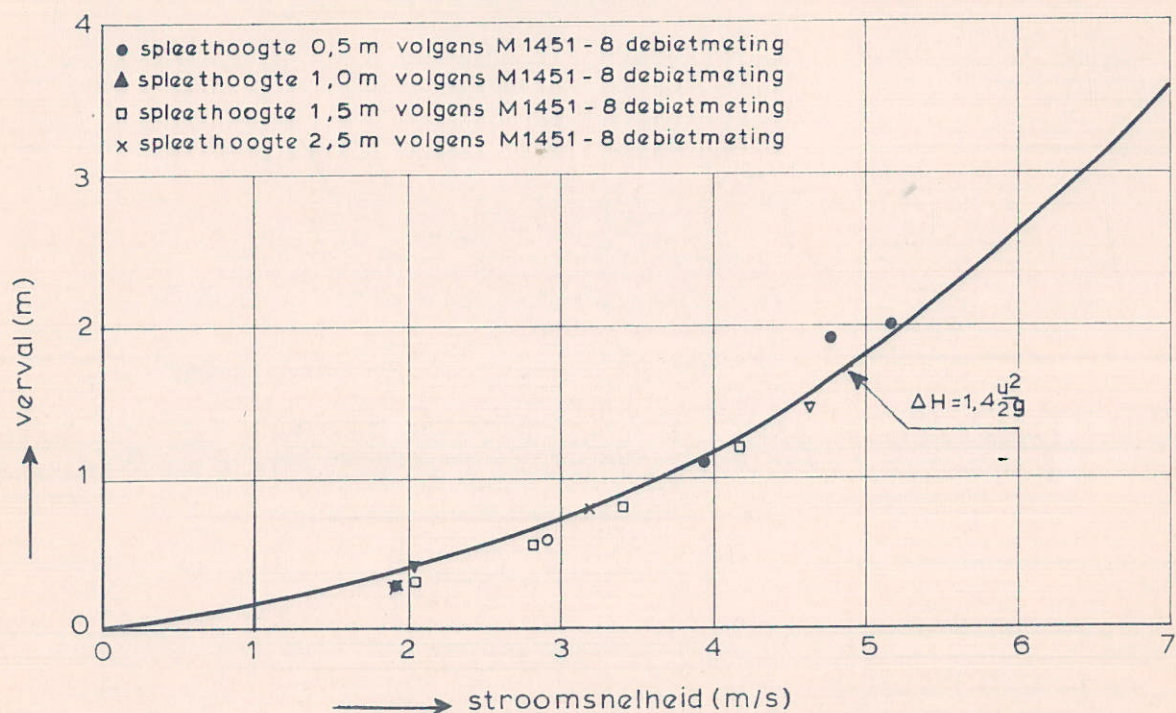
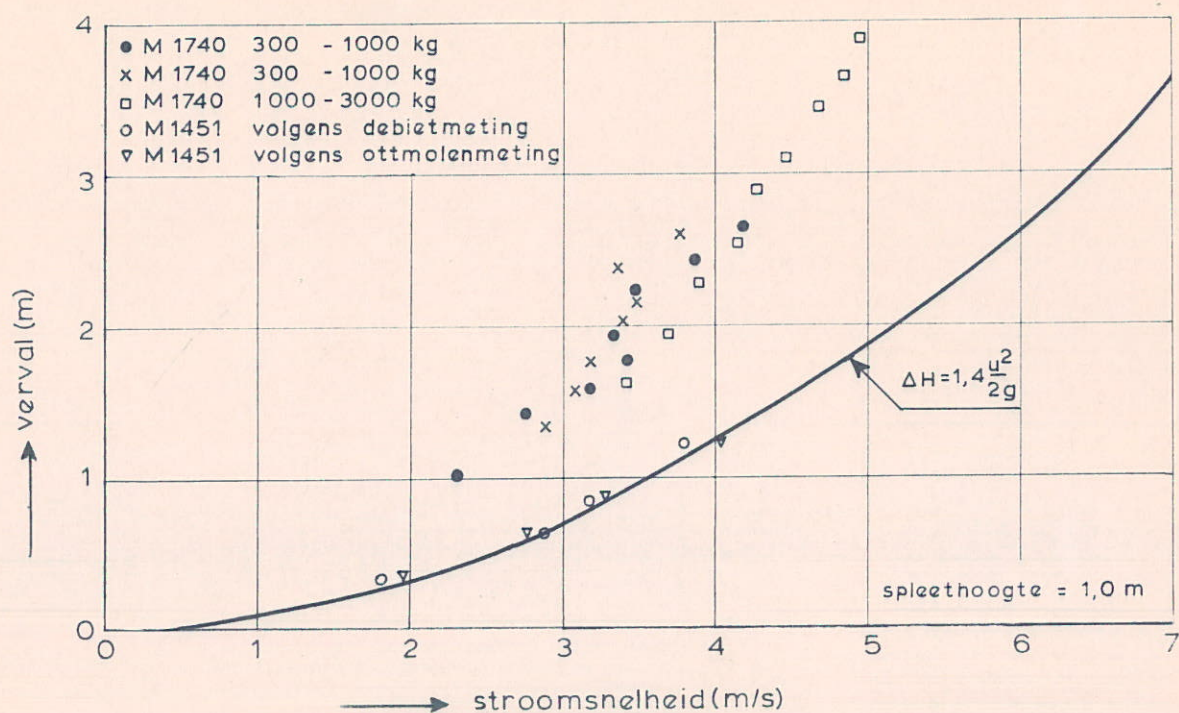
Tabel 1 Overzicht proefresultaten

spleet hoogte	kritiek verval (m)					
	0 stenen		10 stenen		bezwijken	
	300-1000 kg	1000-3000 kg	300-1000 kg	1000-3000 kg	300-1000 kg	1000-3000 kg
1,0 m	1,7	2,2	2,5	3,9	3,1	5,0
1,5 m	1,4	2,2	1,8	3,2	2,6	4,5
2,0 m	1,4	2,0	1,8	2,3	2,5	4,0

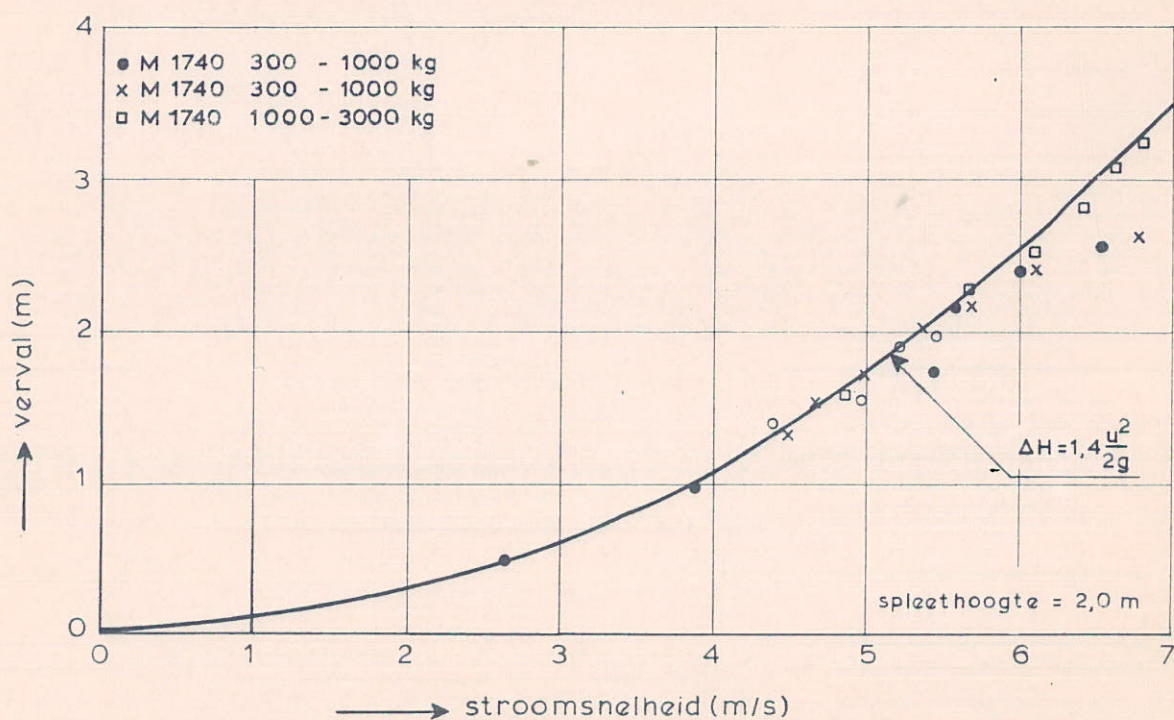
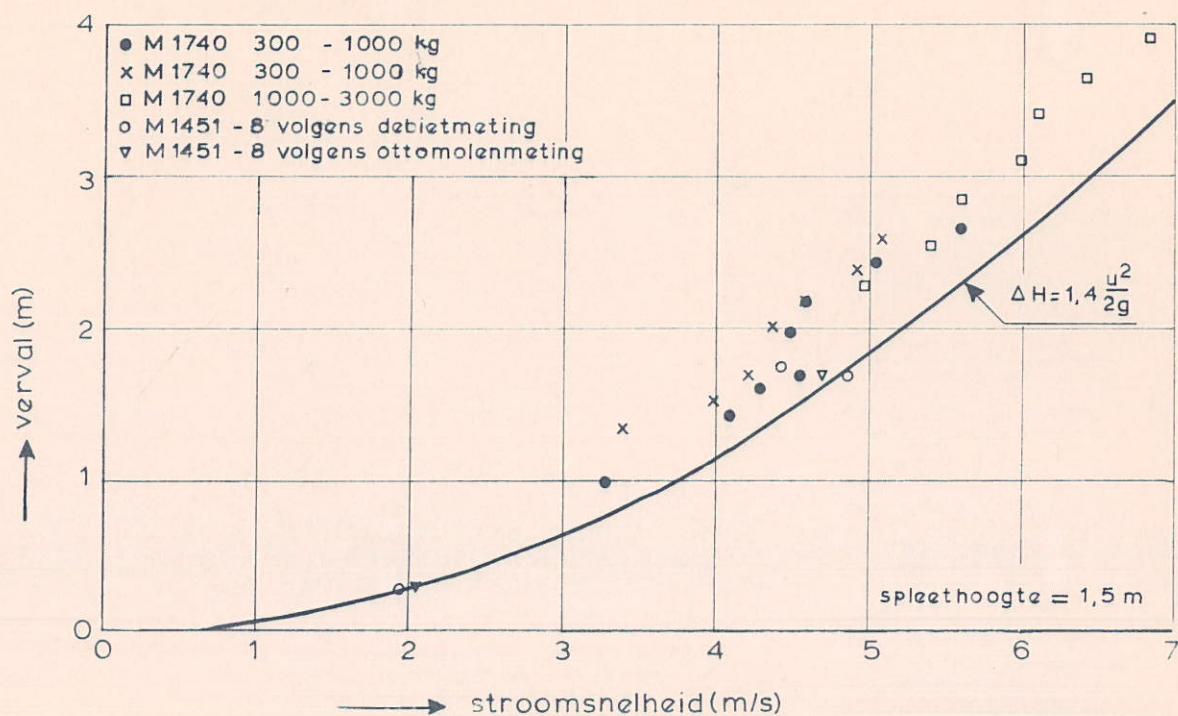
Tabel 2 Kritieke vervallen bij verschillende spleethoogten, schadecriteria en zwaarte van bestortingen op de drempelkruin



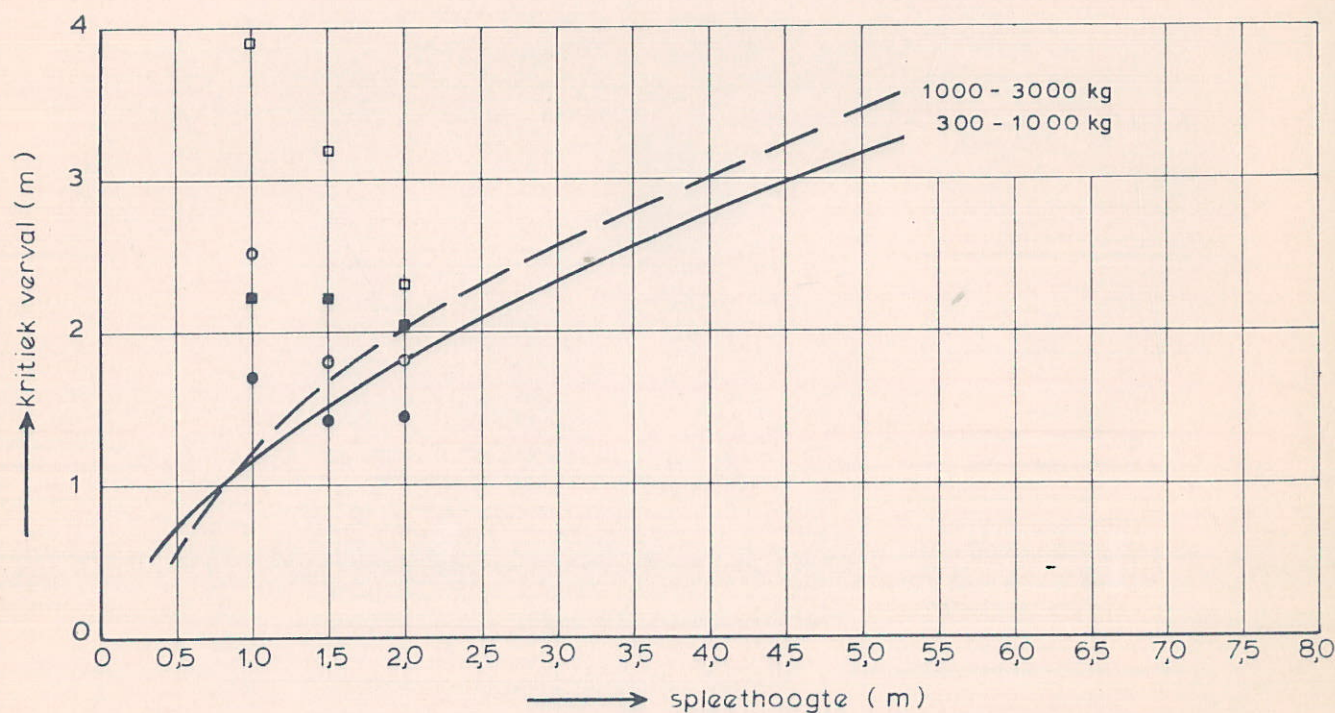
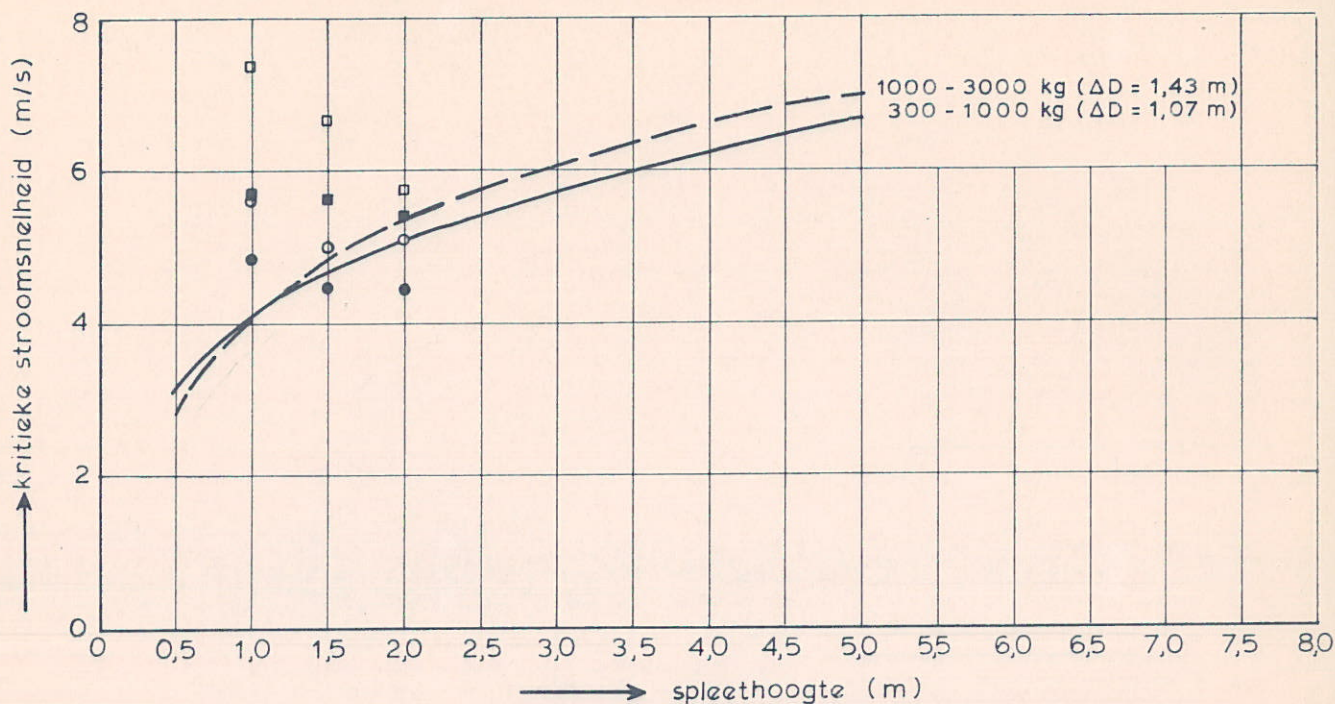
RELATIE TUSSEN SCHADE EN Verval VOOR
DRIE Spleethoogten



RELATIE STROOMSNELHEID EN VERVAL



RELATIE STROOMSNELHEID EN VERVAL



bestorting	metingen		berekeningen volgens M 711 en Ashida
	0 stenen	10 stenen	
300 - 1000 kg	•	○	—————
1000 - 3000 kg	■	□	- - - - -

VERGELIJKING TUSSEN METING EN BEREKENING VAN
KRITIEKE STROOMSNELHEID EN KRITIEK VERVAL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1740

FIG. 4

p.o. box 177

delft

the netherlands