

opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

erosie door open talusbekledingen

praktijkgericht onderzoek dijken

bijlage C, verslag modelonderzoek Deltagoot

juli 1989

erosie door open taludbekledingen

praktijkgericht onderzoek dijken

M. Klein Breteler



INHOUD

	pagina
symbolenlijst	2
<u>1 Inleiding</u>	
1.1 Opdracht	4
1.2 Kader en doel van het onderzoek	4
<u>2 Samenvatting en konklusies</u>	6
<u>3 Theorie</u>	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Uitspoeling als gevolg van het door de toplaag uittredende water	10
3.3 Uitspoeling als gevolg van de stroming over het talud	12
3.3.1 Gemeten snelheid op het talud	12
3.3.2 Erosiediepte volgens Brown	13
3.3.3 Erosiediepte als functie van golfparameters	14
<u>4 Beschrijving van de proeven</u>	16
<u>5 Analyse van de resultaten</u>	20
5.1 Black-box relatie tussen randvoorwaarden en erosiediepte	20
5.2 Vergelijking van theorie voor overstromend water met de erosiemetingen	25
5.3 Vergelijking van theorie voor uitstromend water met de erosiemetingen	27
<u>6 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek</u>	30
Referenties	32
tabellen	
figuren	

SYMBOLENLIJST

A	= aanstroomoppervlak van de korrel ($\cong \pi D_f^2/4$) (m ²)
A _g	= doorstroomoppervlak van het gat. (m ²)
b	= dikte filterlaag (m)
B	= breedte van blok (loodrecht op dijkas) (m)
B'	= hart op hart afstand tussen de gaten (loodrecht op dijkas) (m)
D	= dikte van zetting (m)
D ₅₀	= korrelgrootte die door 50 gewichtsprocenten van het filter worden onderschreden (m)
D _f	= diameter van de korrel (m)
D _s	= karakteristieke korrelgrootte ten aanzien van zwevend transport (m)
g	= zwaartekrachtsversnelling (m/s ²)
G	= gatdiameter (m)
H	= golfhoogte (m)
h	= waterdiepte (m)
k	= (gelineariseerde) doorlatendheidscoëfficiënt van filter (m/s)
k'	= doorlatendheidscoëfficiënt van de toplaag (m/s)
L _o	= golflengte op diep water (= $gT^2/(2\pi)$) (m)
L	= lengte van blok (evenwijdig aan dijkas) (m)
L'	= hart op hart afstand tussen de gaten (evenwijdig aan dijkas) (m)
R _d	= golfsterugloophoogte ten opzichte van SWL (m)
R _u	= golfoploophoogte ten opzichte van SWL (m)
SWL	= stil waterlijn
T	= golfperiode (s)
u _g	= filtersnelheid in het gat (m/s)
u _{g,cr}	= maximaal toelaatbare filtersnelheid in het gat (m/s)
u _{k,min}	= snelheid van de korrel die nodig is om tijdens de heersende overdruk uit het gat te spoelen (m/s)
v _{op}	= maximum snelheid op het talud in opwaartse richting (m/s)
v _{neer}	= maximum snelheid op het talud in neerwaartse richting (m/s)
v _{cr}	= snelheid op het talud waarbij korrels gaan uitspoelen (m/s)
v _{max}	= grootste van v _{op} en v _{neer} (m/s)
w	= valsnelheid van de korrels (m/s)

- x = afstand langs het talud vanaf de stil waterlijn (m)
Y = gatdiepte (m)
z = hoogte ten opzichte van gootbodem (m)
- α = taludhelling ($^{\circ}$)
 Δ_s = relatieve soortelijke massa van de stenen ($\rho_s/\rho - 1$) (-)
 Δ_k = relatieve soortelijke massa van de korrel ($\rho_k/\rho - 1$) (-)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
 ρ_s = soortelijke massa van zetting (kg/m^3)
 ρ_k = soortelijke massa van korrels (gatvulling) (kg/m^3)
 ξ = brekerparameter ($= \tan(\alpha)/\sqrt{(H/L_o)}$) (-)
 λ = leklengte (m) = $\sin\alpha \sqrt{(bDk/k')}$
 ν = viscositeit van water (m^2/s)
 l = geometrie-parameter = $B'L'/A_g$
= quotiënt van zettingoppervlak en gatoppervlak (-)
 Γ_s = invloedsfaktor op de sterkte van de toplaag met betrekking tot
wrijving en traagheid van losse stenen in de zetting (-)

EROSIE DOOR OPEN TALUDBEKLEDINGEN

PRAKTIJKGERICHT ONDERZOEK DIJKEN

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In zijn brief van 16 maart 1987, kenmerk WB 570, verleent de hoofdingenieur-direkteur van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde opdracht aan het Waterloopkundig Laboratorium tot het uitvoeren van onderzoek naar de erosie door open taludbekledingen. Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de kritieke waterbeweging bij een oever- of dijkbekleding waarbij nog toelaatbare erosie van het basis- of filtermateriaal is te verwachten. Het in dit verslag beschreven modelonderzoek, dat is uitgevoerd in de Deltagoot van WL, betreft de erosie van grind en zand uit de gaten van een open dijkbekleding van gezette steen als gevolg van windgolven.

De uitvoering van de proeven was geïntegreerd in het onderzoek "Taludbekleding van gezette steen; eindverifikatie-onderzoek Deltagoot, H195.25" en stond onder leiding van ir. J. Wouters. De rapportage is verzorgd door ir. M. Klein Breteler.

1.2 Kader en doel van het onderzoek

Bij het onderzoek naar de stabiliteit van gezette steen is naar voren gekomen dat een zetting stabiel is als er voor gezorgd wordt dat de overdruk onder de zetting klein blijft. Deze overdruk ontstaat doordat bij een zich terugtrekkende golf (vlak voor de golfklap) de druk op het talud snel afneemt, maar onder de zetting niet. Een methode om de overdruk klein te houden is het toepassen van een zeer doorlatende toplaag. Hierdoor wordt echter het probleem geïntroduceerd dat de gatvulling en/of het onderliggende filtermateriaal dreigt uit te spoelen.

Het doel van het totale onderzoeksprogramma, waar dit modelonderzoek deel van uitmaakt, is het ontwikkelen van ontwerprichtlijnen voor taludbekledingen met gaten die groter zijn dan de zand- of filterkorrels eronder. Dit is gewenst voor milieu-vriendelijke oeverbekledingen en voor dijkbekledingen. Beide konstruktie-typen zijn aan de orde geweest in een inleidende buro-studie [2], die de relevante literatuur behandelt en de afleiding geeft van een formule voor het berekenen van de stabiliteit van een korrel in een diep gat. De konklusies uit de burostudie die betrekking hebben op het modelonderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 3.

Het modelonderzoek met betrekking tot oevers is uitgevoerd in de Pentagoot van WL en is gerapporteerd in [4].

Het onderhavige modelonderzoek heeft als doel een empirische relatie te vinden tussen de te verwachten erosiediepte enerzijds en de golfrandvoorwaarden, de geometrie van de dijkbekleding en de gatvulling anderzijds. Daarnaast hebben de metingen van de watersnelheid op het talud en de verschilddruk over de toplaag als doel de fysische processen beter te begrijpen en een aansluiting te geven met de theoretische en empirische gegevens uit de literatuur. De gemeten watersnelheden zijn in [7] gerapporteerd.

2 Samenvatting en konklusies

Het in dit verslag beschreven modelonderzoek, dat betrekking heeft op dijken, is een deel van het totale onderzoek naar de erosie van de gatvulling in open oever- en dijkbekledingen.

Het doel van het praktijkgerichte onderzoek naar de erosie van open dijkbekledingen is omschreven als het vinden van een empirische relatie tussen de te verwachten erosiediepte enerzijds en de golfrandvoorwaarden, de geometrie van de dijkbekleding en de gatvulling anderzijds.

Het modelonderzoek is uitgevoerd op prototype schaal in de Deltagoot van WL. De taludhelling, de blokdikte D en korrelgrootte van de onderliggende filterlaag zijn gedurende alle proeven gelijk gehouden: $\tan(\alpha) = 0.33$, $D = 0.15$ m en $D_{15 \text{ filter}} = 8.5$ mm.

De golfrandvoorwaarden, de gatdiameter G en korrelgrootte van de gatvulling D_{50} zijn tussen de volgende grenzen gevarieerd:

golfhoopte: $0.2 < H < 1.1$ m (regelmatige golven)

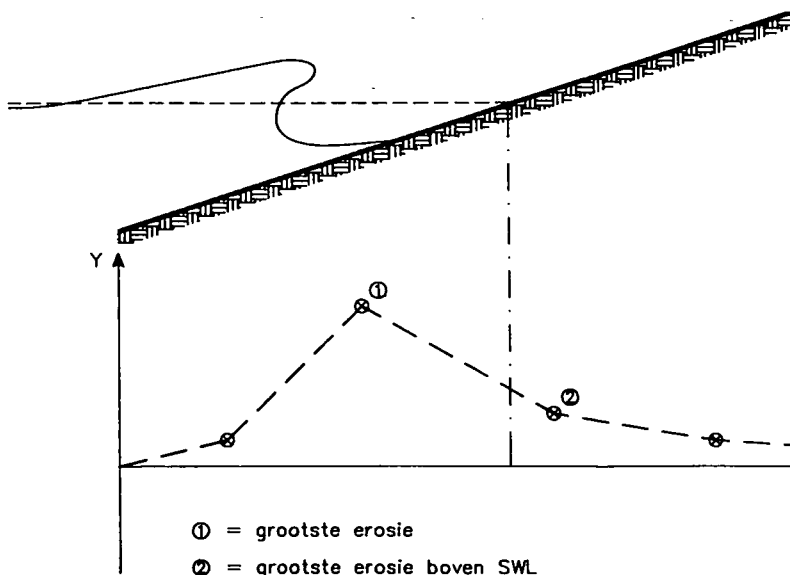
golfteriode: $2.25 < T < 5$ s

gatvulling: $5.0 < D_{50} < 23.5$ mm (en indicatieve meting met $D_{50} = 0.22$ mm)

gatdiameter: $51 < G < 225$ mm

De analyse van de gemeten erosie Y is beperkt tot de volgende twee gemeten waarden (per gatdiameter, vulmateriaal en golfrandvoorwaarde combinatie):

- 1) de grootste erosie, onafhankelijk van de plaats waar dit is gemeten.
- 2) de grootste erosie die is gemeten boven SWL +0.2 m.



Op basis van de meetresultaten zijn de volgende empirische formules opgesteld:

1) Maximale erosiediepte Y voor gehele talud (boven of onder SWL):

$$G > 0.1 \text{ m: } Y/G = 0.23 (H/D_{50})^{0.33} \quad (1)$$

$$G < 0.1 \text{ m: } Y/G = 0.04 (H/D_{50})^{0.5} (B'L'/A_g)^{0.75} \quad (2)$$

2) Grootste erosiediepte die is gemeten boven SWL +0.2 m:

$$Y/G = 0.18 (H/D_{50})^{0.33} \quad (3)$$

met: $B'L'/A_g$ = verhouding tussen zettingoppervlak en gatoppervlak (-)

Vooral bij kleine gaten is er een groot verschil tussen de gemeten erosiediepte onder de stilwaterlijn en boven de stilwaterlijn. Dit kan verklaard worden met de veronderstelling dat bij kleine gaten onder SWL de erosie wordt veroorzaakt door de stroming uit het talud (bezwijkmechanisme 1). Deze is een gevolg van de verschilddruk over de zetting. Hiervoor geldt dat hoe kleiner het gat hoe sterker de stroming uit het talud en dus ook des meer erosie.

Boven SWL is er echter nauwelijks sprake van een verschilddruk en moet de erosie dus veroorzaakt worden door de stroming over het talud (bezwijkmechanisme 2). Deze stroming kan bij kleine gaten maar weinig erosie veroorzaken. Hoe groter de gatdiameter hoe meer erosie er is te verwachten.

Als met bovenstaande formules een erosiediepte wordt berekend die groter is dan de blokdikte D, dan is een ondermijning van de blokken zeer waarschijnlijk. De mate van ondermijning is echter hiermee niet te voorspellen.

Voor kleine gaten onder de stilwaterlijn zijn de metingen vergeleken met een stabiliteitsformule die is afgeleid in de burostudie [2]. Deze formule is gebaseerd op de gemeten kracht op een bol in een cilinder waar water doorheen stroomt. Het betreft in dit verband het bezwijkmechanisme 1.

De snelheid in het gat is tijdens het Deltagoetonderzoek niet gemeten, maar kon berekend worden met het analytische model [5]. Door dit te vergelijken

met de berekende kritieke snelheid volgens de afgeleide stabiliteitsformule (formule (5); zie bladzijde 13) is een voorspelling te geven of het gat zal leegspoelen. Op basis van een vergelijking met de gemeten erosiediepte moet gekonkludeerd worden dat deze voorspellingsmethode onveilige resultaten geeft.

Met betrekking tot bezwijkmechanisme 2 zijn de metingen vergeleken met een semi-empirische formule op basis van de meetresultaten van Brown [2], in combinatie met de gemeten snelheid op het talud volgens de huidige metingen en die van Battjes en Roos [3]. Deze snelheidsmetingen zijn gerapporteerd in bijlage F [7].

De vergelijking leidde tot de konklusie dat bovenstaande formules een veel kleinere invloed van H/D_{50} te zien geven dan volgens de formules op basis van Brown [2]. Het verschil is mogelijk een gevolg van het feit dat Brown z'n formule gebaseerd heeft op metingen met zand, terwijl bovenstaande formules zijn opgesteld voor grind.

In hoofdstuk 6 is aanbevolen het onderzoek voort te zetten in een meer fundamentele richting. Het doel dat daarmee wordt beoogd is een beter begrip van de fysische processen die erosie veroorzaken, zodat zonder aanvullende proeven het toepassingsgebied van de ontwerpformules aanzienlijk vergroot kan worden. Er kan hierbij gebruik gemaakt worden van de gemeten snelheden op het talud en de gemeten drukverschillen over de top laag in combinatie met het rekenprogramma ODYSSEE en de theoretische stabiliteitsrelaties uit hoofdstuk 3.

Verder is aanbevolen om een black-box relatie tussen de snelheid op het talud en de erosie-diepte op te stellen. Hiermee is enerzijds een goede vergelijking met het werk van Brown [2] mogelijk, en anderzijds is dat bruikbaar voor de verdere verbetering van de ontwerpformule voor oevers [4] met betrekking tot de invloed van de korrelgrootte.

3 Theorie

3.1 Inleiding

De waterbeweging als gevolg van golven op een relatief open taludbekleding kan uitspoeling van het onderliggende filtermateriaal veroorzaken, mits de openingen in de toplaag groter zijn dan de filterkorrels. Er zijn hierbij twee bezwijkmechanismen mogelijk:

1. Uitspoeling als gevolg van het door de toplaag uittredende water
2. Uitspoeling door over het talud stromende water.

Het eerste bezwijkmechanisme kan optreden ten tijde van een maximaal teruggetrokken golf. De verschildruk over de toplaag veroorzaakt dan een stroming uit het talud die filterkorrels kan meenemen.

Het tweede bezwijkmechanisme is mogelijk tijdens en vlak na de golfklap, of tijdens de terugloop van een golf. Het water stroomt dan met grote snelheid over het talud en drijft een neer in het gat aan. Hierdoor kunnen filterkorrels uit het talud geslingerd worden.

Een combinatie van beide bezwijkmechanismen is ook mogelijk.

Naarmate de gaten groter worden zal de snelheid van het uitredende water in de gaten afnemen vanwege het grotere doorstroomprofiel en de kleinere verschildrukken. Daardoor zal bezwijkmechanisme 1 minder gemakkelijk kunnen optreden. Aan de andere kant resulteert het groter worden van de gatdiameter in een grotere snelheid in het gat die een gevolg is van het over het talud stromende water. Het gevolg is een toenemend gevaar voor bezwijkmechanisme 2.

Hiermee is aannemelijk gemaakt dat bezwijkmechanisme 1 vooral betrekking heeft op relatief kleine diepe gaten, en bezwijkmechanisme 2 op grote, minder diepe gaten. Dit duidt tevens op de mogelijkheid dat er een gatdiepte/gatbreedte verhouding bestaat die een maximale stabiliteit van het filter garandeert.

Onderstaand worden de konklusies uit de burostudie [2] gegeven die betrekking hebben op deze bezwijkmechanismen. In hoofdstuk 5 worden de meetresultaten vergeleken met de hier gegeven (semi-) theoretische relaties.

3.2 Uitspoeling als gevolg van het door de toplaag uittredende water

Belasting

In de burostudie [2] is een ontwerpkriterium voor de dimensionering van de gaten gegeven, aannemende dat erosie dreigt vanwege het uittredende debiet. Dit kriterium is gebaseerd op de eis dat de filterkorrels pas mogen uitspoelen als de zetting zelf op het punt staat te bezwijken.

Met deze eis is het mogelijk om de stroomsnelheid u_g in het gat in het bezwijkstadium te kwantificeren (belasting) (zie [2]):

$$u_g = \ell k' \sqrt{(\Gamma_s \Delta_s \cos(\alpha))} \quad (4)$$

met: u_g = filtersnelheid in het gat (m/s)

ℓ = geometrie-parameter = quotiënt van zettingoppervlak en gatoppervlak (-)

$$= B'L'/A_g$$

B' = hart op hart afstand tussen de gaten (loodrecht op dijkas) (m)

L' = hart op hart afstand tussen de gaten (evenwijdig aan dijkas) (m)

A_g = gatoppervlak (m²)

k' = turbulente doorlatendheidscoëfficiënt van de toplaag (m/s)

Γ_s = invloedsfaktor op de sterkte van de toplaag met betrekking tot wrijving en traagheid van losse stenen in de zetting (-)

Δ_s = relatieve soortelijke massa van de zetting (\neq gatvulling) (-)
 $= (\rho_s/\rho - 1)$

ρ = soortelijke massa van water (kg/m³)

ρ_s = soortelijke massa van zetting (kg/m³)

α = taludhelling (°)

In formule (4) is het verhang over de toplaag bij bezwijken te herkennen:

$$i'_b = \Gamma_s \Delta_s \cos(\alpha)$$

met: i'_b = verhang over de toplaag bij bezwijken [-]

De grootte van Γ_s volgt uit de stabiliteitsberekening van de toplaag, waarvoor in [5] de formules zijn gegeven. Doorgaans ligt de grootte tussen 1 en 1.4.

De doorlatendheid van de toplaag k' is te berekenen met de formules uit [6]. Voor toplagen zonder geotextiel en een regelmatig patroon van ronde gaten is het diagram in figuur 1 toepasbaar.

Sterkte

De maximaal toelaatbare snelheid in het gat (sterkte) is in [2] afgeleid op basis van een empirische formule voor de kracht op een bol in een cilindrische pijp waar een vloeistof doorheen stroomt. Het resultaat is de volgende formule:

$$u_{g,cr} = u_{k,min} + 1.14 (1 - A/A_g)^{1.2} \sqrt{(\Delta_k g D_f \cos(\alpha))} \quad (5)$$

- met: $u_{g,cr}$ = maximaal toelaatbare filtersnelheid in het gat (m/s)
 $u_{k,min}$ = snelheid van de korrel die nodig is om tijdens de heersende overdruk uit het gat te spoelen (m/s)
 A = aanstroomoppervlak van de korrel ($\cong \pi D_f^2/4$) (m^2)
 A_g = doorstroomoppervlak van het gat (m^2)
 Δ_k = relatieve soortelijke massa van de korrel ($\rho_k/\rho - 1$) (-)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
 D_f = diameter van de korrel (m)

De grootte van $u_{k,min}$ is gelijk aan het quotiënt van de gatdiepte en de duur van de heersende verschuldruk, hetgeen via de theorie niet kwantificeerbaar is. Een indicatie van de grootte van de duur is een vijfde van de golfperiode T.

Formule (5) kwantificeert de kritieke snelheid in het gat ten aanzien van een specifieke korrel met grootte D_f . In geval van een filter met niet-uniforme korrelgrootte kan met de formule afgeschat worden welk aandeel van het filter uit gaat spoelen. In [2] is gebleken dat volgens formule (5) de meest stabiele korrels een diameter hebben die ongeveer de helft is van de gatdiameter.

Als $A \cong A_g$ past de korrel waarschijnlijk niet meer door het gat. Er gaan dan geometrische beperkingen meespelen, waar de formule geen rekening mee houdt.

3.3 Uitspoeling als gevolg van de stroming over het talud

3.3.1 Gemeten snelheid op het talud

Tijdens de modelproeven, waarbij de erosiediepte in de gaten is gemeten (zie hoofdstuk 4), zijn tevens de snelheden op het talud met 5 snelheidsmeters gemeten. Deze proeven zijn uitvoerig gerapporteerd in [7]. Met behulp van deze modelproeven en relevante informatie uit de literatuur (o.a. [3]) is de relatie onderzocht tussen de golfparameters en taludhelling enerzijds en de snelheid op het talud anderzijds. De proeven zijn uitgevoerd met regelmatige golven en een glad talud met helling 1:3. De golfsteilheid (H/L_0) is gevarieerd tussen 0.008 en 0.049 bij een waterdiepte van 5 m.

De analyse van de metingen was gericht op de grootste snelheid langs het talud omhoog per golfperiode (opwaartse snelheid genaamd) en de grootste snelheid langs het talud omlaag (neerwaartse snelheid), beide als functie van de horizontale plaatscoördinaat (t.o.v. SWL).

Mede op basis van de metingen uit [3] zijn semi-empirische relaties afgeleid die de opwaartse en neerwaartse snelheid op het talud beschrijven als functie van de plaats op het talud. Voor een ontwerp van een taludbekleding met gaten zal doorgaans de grootst gemeten snelheid, onafhankelijk van de plaats, het meest relevant zijn:

extreme waarde van snelheid: $v_{\max}/\sqrt{gH} = :$ (6)

	$H/L_o \geq 0.028$	$H/L_o < 0.028$	
		$\xi_o < 2.5$	$\xi_o \geq 2.5$
$h/L_o > 0.15$	neerwaarts: $2 \sqrt{(\xi_o \tan \alpha)}$	opwaarts: $0.8 \xi_o$	opwaarts: $0.8 \xi_o$
$h/L_o \leq 0.15$	opwaarts: $4.8 \tan \alpha$	neerwaarts: $2 \sqrt{(\xi_o \tan \alpha)}$	neerwaarts: $3.1 \sqrt{\tan \alpha}$

- met: v_{\max} = grootste snelheid op het talud (m/s)
 H = golfhoogte inkomende regelmatige golven (m)
 h = waterdiepte (m)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
 ξ_o = breaker parameter = $\tan(\alpha)/\sqrt{(H/L_o)}$
 L_o = golflengte op diep water (m) = $gT^2/(2\pi)$
 α = taludhelling ($^\circ$)

In paragraaf 3.3.3 is dit resultaat gebruikt voor het opstellen van een relatie voor de te verwachten erosiediepte.

3.3.2 Erosiediepte volgens Brown

De maximaal toelaatbare watersnelheid op het talud is langs empirische weg vastgesteld door Brown [2]. Hoewel zijn werk zich beperkt tot vrij fijn filtermateriaal ($0.32 < D_{50} < 1.55$ mm) wordt zijn empirische formule, bij gebrek aan beter, hier toch genoemd:

$$v_{cr} = 21 D_{50}^{0.43} (Y/G)^{0.45} \quad (7)$$

$$\text{of: } \frac{Y}{G} = 1.2 \cdot 10^{-3} \frac{v_{cr}^{2.2}}{D_{50}^{0.96}} \quad (8)$$

met: v_{cr} = snelheid op het talud waarbij korrels gaan uitspoelen (m/s)
 D_{50} = korrelgrootte die door 50 gewichtsprocenten van het filter worden
 onderschreden (m)
 Y = gatdiepte (m)
 G = gatdiameter (m)

Deze formule is opgesteld aan de hand van modelproeven met zowel filters met steile als met flauwe zeefkromme. De grootte van Y/G is gevarieerd van 0.8 tot 2.4.

3.3.3 Erosiediepte als functie van golfparameters

Op basis van bovenstaande relaties voor de snelheid op het talud en de erosiediepte als functie van die snelheid zijn formules op te stellen voor de erosiediepte als functie van de golfparameters. Daartoe worden de formules (6) gesubstitueerd in formule (8) voor het geval dat $v_{cr} = v_{max}$ (bezwijkstadium) en $h/L_o > 0.15$ en $\tan\alpha = 0.33$:

$$\xi_o \leq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.022 \frac{(H\xi_o)^{1.1}}{D_{50}^{0.96}} \quad (9)$$

$$\xi_o \geq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.009 \frac{H^{1.1} \xi_o^{2.2}}{D_{50}^{0.96}} \quad (10)$$

De koëfficiënten in deze formules zijn niet dimensieloos. Als de machten in de formules afgerond worden, dan worden er formules verkregen met dimensieloze parameters en koëfficiënten. Het resultaat is onderstaand gegeven (de koëfficiënten zijn opnieuw berekend, uitgaande van een orde van grootte van H en D_{50} van respectievelijk 0.5 m en 0.005 m:

$$\xi_o \leq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.016 \frac{H}{D_{50}} \xi_o^{1.1} \quad (11)$$

($H/L_o > 0.15$ en $\tan\alpha = 0.33$)

$$\xi_o \geq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.007 \frac{H}{D_{50}} \xi_o^{2.2} \quad (12)$$

In paragraaf 5.2 zijn deze semi-empirische formules vergeleken met de metingen.

4 Beschrijving van de proeven

Het modelonderzoek is uitgevoerd op prototype-schaal in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium de Voorst. Een overzicht van de modelfaciliteit is gegeven in figuur 2.

De ingebouwde dijksectie met taludhelling van 1:3 is opgesplitst in twee delen die elk 2.5 m breed zijn. De modelopstelling is twee keer verbouwd, zodat totaal 6 taludhelften zijn onderzocht. Vanwege het feit dat deze proeven zijn uitgevoerd als geïntegreerd onderdeel van het modelonderzoek ten behoeve van de eindverifikatie van de resultaten uit het steenzettingenonderzoek [1], is de nummering van de proeven niet bij 1 begonnen:

- proef 332 tot en met 342: modelopstelling serie 3 (oost- en westzijde)
- proef 437 tot en met 448: modelopstelling serie 4 (oost- en westzijde)
- proef 534 tot en met 545: modelopstelling serie 5 (oost- en westzijde)

De modelopstellingen zijn getekend in figuur 3 tot en met 9. In elke figuur is aangegeven op welke plaatsen drukopnemers zijn geplaatst. De snelheidsmeters waren alleen aan de oostzijde aanwezig (zie figuur 4, 6 en 8). Deze waren van het type EMS. De resultaten van de snelheidsmetingen zijn gerapporteerd in [7].

Bij serie 3 en 4 zijn bij 18 blokken op het talud de gaten met grind of zand gevuld, terwijl bij serie 5 dat bij 20 blokken is gedaan. Na elke proef is de erosie van de gatvulling gemeten met een duimstok.

Elke proef is uitgevoerd met een zetting die aan oost- en westzijde een gelijk open oppervlak had. Aan de oostzijde is dit echter steeds gerealiseerd met één gat per blok van 50x50 cm en aan de westzijde met 6 gaten per blok. Aan de westzijde zijn deze 6 gaten alleen ter plaatse van de meetsectie onder SWL en de geselecteerde blokken boven SWL gemaakt.

Bij alle proeven is de toplaag niet homogeen geweest (zie figuur 3). Ruim onder de stil waterlijn (tot en met rij 34, ongeveer 2 m onder SWL) was de toplaag opgebouwd uit dichte blokken van 30x25 cm die tegen elkaar zijn gezet. Vanaf rij 35 tot aan de meetsectie (ruim 1 m onder SWL) zijn er blokken van 50x50 cm met een spleetbreedte van 4 mm toegepast.

Vanaf de meetsektie is het talud uitgevoerd met blokken van 50x50 cm zonder spleten en 1 gat van 12.5 cm doorsnede erin. In de meetsektie (bestaande uit een groep van 14 blokken) en op de geselecteerde lokaties zijn de blokken vervangen door die met 1 of 6 gaten met de voor die proevenserie gewenste doorsnede. De meetsektie loopt tot aan de waterlijn.

Vanaf 1 m boven de waterlijn zijn weer de dichte blokken van 30x25 cm toegepast.

In onderstaande tabel is de gatgrootte in de blokken in de modelsektie en in de geselecteerde blokken gegeven (aan de oostzijde steeds 1 gat per blok en aan de westzijde 6 per blok):

	gatdiameter (cm)		relatieve open opp. (%)	$\ell \left(= \frac{B'L'}{A_g} \right)$ (-)
	oost (1/blok)	west (6/blok)		
serie 3	12.5	5.1	4.9	20.4
serie 4	17.0	7.0	9.1	11.0
serie 5	22.5	9.1	15.9	6.3

Onder de blokken is steeds een grof gaas aangebracht dat voorkwam dat de erosie van de gatvulling zo ver kon gaan dat de blokken ondermijnd raakten.

Het filtermateriaal onder de blokken was tijdens alle proeven gelijk. Het was rond grind met een vrij steile zeefkromme en een D_{f15} van 8.5 mm, zoals te zien is in figuur 10. In deze figuur zijn tevens de toegepaste gatvullingen gegeven.

Ten aanzien van de gatvulling is het talud in 4 stroken evenwijdig aan de taludhelling verdeeld, ieder met een serie van 4 of 5 met grind gevulde blokken. Elk met grind gevuld blok is genummerd zoals in figuur 3 is aangegeven.

Gezien het feit dat niet alle gaten op het talud gevuld waren, zouden de metingen een geringe overschatting van de erosie-diepte kunnen geven. Omdat dit de uiteindelijke ontwerpformule hooguit in veilige zin zou kunnen beïnvloeden, wordt hiermee geen rekening gehouden.

Een overzicht van de gatvulling die per proef is gebruikt, is weergegeven in tabel 1. De gatgrootte en gatvulling zijn zo gekozen dat de gaten van 125 mm en de gatvulling met $D_{50} = 5.0$ mm het uitgangspunt vormen. Alle gebruikte gatdiameters zijn op elk nivo ten opzichte van de stil waterlijn (SWL) een keer met dit materiaal gevuld geweest. Alle gebruikte vulmaterialen zijn minstens één keer in combinatie met een gat van 125 mm gebruikt, echter niet allemaal op elk nivo ten opzichte van SWL. Dit laatste is een gevolg van de beperkingen die het beschikbare talud oplegde.

Naast deze systematische reeks van gatdiameter en vulmateriaal combinaties zijn er nog een aantal andere combinaties toegepast, zoals weergegeven in tabel 1.

Bij elke opstelling met gevulde gaten is een reeks van proeven uitgevoerd met diverse combinaties van golfhoogte en golfperiode. De waterdiepte was bij elke proef 5 m. Alle proeven zijn uitgevoerd met regelmatige golven, teneinde de mogelijkheid open te houden om een relatie tussen golfbrandvoorwaarden, watersnelheid op het talud en erosie-diepte te kunnen leggen.

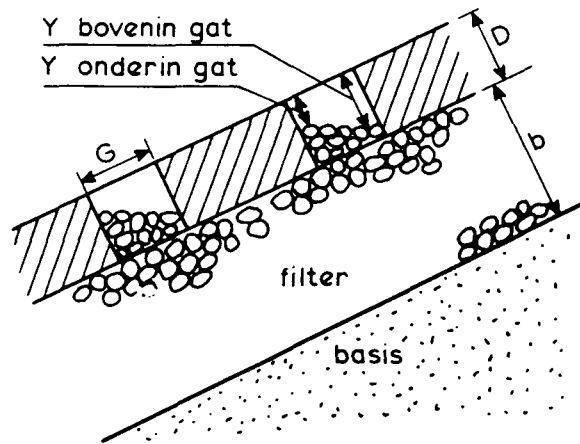
De duur van elke proef bedroeg ongeveer 100 golven. Enerzijds wordt verondersteld dat hiermee de evenwichtsdiepte zal zijn bereikt. Anderzijds wordt verondersteld dat deze golfaanval een redelijke weergave is van de voor erosie maatgevende golven tijdens een langdurige aanval met onregelmatige golven. Ze vertegenwoordigen dan de hoge golven uit een reeks van onregelmatige golven.

Elke reeks van proeven op een bepaalde opstelling is uitgevoerd met een golfperiode van 2.25 s, 3 s, 4 s en 5 s. Bij elke periode zijn drie proeven met verschillende golfhoogten uitgevoerd, tenzij dit bij de grootste golfhoogte problemen met de stabiliteit van de konstruktie zou kunnen veroorzaken. De golfhoogten zijn zo gekozen dat de golfsteilheid varieerde tussen ongeveer 2.5% en 5%, behalve bij de periode van 5 s. Bij deze laatste is juist de aandacht op relatief lange golven met een golfsteilheid van 0.8% tot 1.8% gericht geweest.

Bij de aanvang van de drie proeven met vaste golfperiode zijn de gaten geheel met grind of zand gevuld. Vervolgens zijn de drie proeven met opklimmende golfhoogte uitgevoerd, zonder tussentijds de gaten bij te

vullen. Gezien de verwachting dat de erosie toeneemt bij toenemende golfhoogte wordt het resultaat hierdoor niet beïnvloed. Bovendien wordt de evenwichtsdiepte bij de proeven met de grootste erosie-diepte (grootste golfhoogte) sneller bereikt, dan wanneer de gaten weer aangevuld zouden zijn.

Een volledig overzicht van de uitgevoerde proeven is gegeven in tabel 2. De gemeten erosie-diepten per blok zijn in tabel 2 opgenomen. Steeds is bij een blok met een groot gat de erosie-diepte aan de bovenzijde en aan de onderzijde van het gat gegeven. Vanwege het feit dat het oppervlak van het vulmateriaal ongeveer horizontaal staat, is de erosie-diepte aan de bovenzijde groter dan aan de onderzijde:



vertikale dwarsdoorsnede
van open dijkbekleding

Van de blokken met 6 gaten is in tabel 2 alleen het meest geërodeerde gat opgenomen.

5 Analyse van de resultaten

5.1 Black-box relatie tussen randvoorwaarden en erosiediepte

Een compleet overzicht van de uitgevoerde proeven en de gemeten erosiediepten is gegeven in tabel 2. De meetresultaten zijn grafisch weergegeven in figuur 11 tot en met 26. In deze paragraaf worden stap voor stap de data geanalyseerd aan de hand van de figuren. Het doel hiervan is het opstellen van een black-box relatie tussen de golfrandvoorwaarden en geometrie-parameters enerzijds en de erosie-diepte anderzijds.

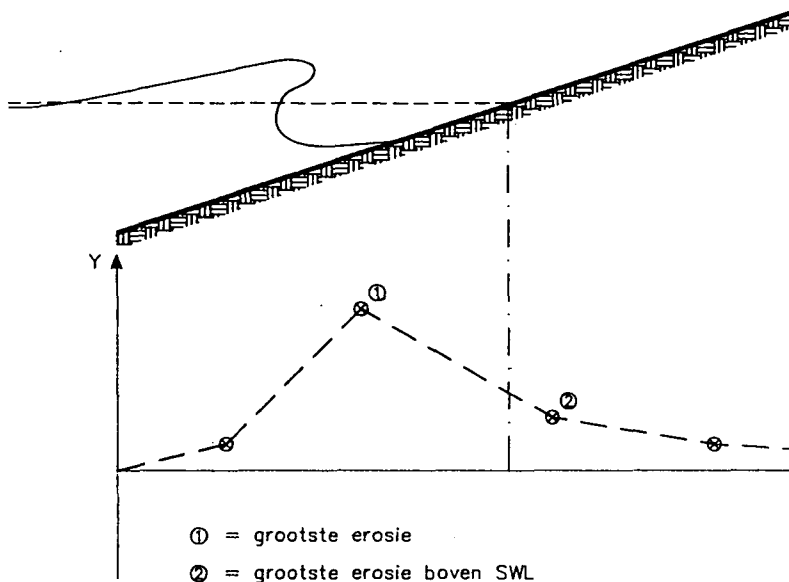
In de figuren 11 tot en met 14 is voor enkele geselecteerde proeven de invloed van de plaats langs de taludhelling op de erosie-diepte zichtbaar gemaakt. Op de horizontale as is de plaats gegeven ten opzichte van een punt op het talud dat 5 m boven de gootbodem ligt. Dit komt ongeveer overeen met de stilwaterlijn.

Het verloop van de erosie-diepte is bij alle proeven vergelijkbaar met die in de gegeven figuren. Meestal is de grootste erosie-diepte iets onder de stilwaterlijn (SWL) gemeten. Naarmate de golven langer worden, neemt de erosie van het diepst gelegen gat toe. Bij een golfperiode van 5 s is het verloop zelfs zodanig dat gekonkludeerd kan worden dat het zwaarst aangevallen gat dieper ligt dan het diepst gelegen meetpunt, zodat de grootste gemeten erosie-diepte wellicht onderschat wordt. Hier is in het vervolg geen rekening mee gehouden.

De verdere analyse wordt beperkt tot de volgende twee gemeten waarden (per gatdiameter, vulmateriaal en golfrandvoorwaarde combinatie):

- 1) de grootste erosie, onafhankelijk van de plaats waar die is gemeten.
- 2) de grootste erosie die is gemeten boven SWL.

Vanwege het feit dat de erosie ter plaatse van SWL niet is gemeten, moet de tweede meetwaarde geïnterpreteerd worden als de grootste erosie boven het nivo SWL +0.2 m.



In figuur 15 tot en met 20 zijn de gemeten maximale erosie-diepten Y uitgezet als functie van de inkomende golfhoogte H_i . In deze figuren valt allereerst op dat de golfperiode T slechts een ondergeschikte invloed op Y heeft. Alleen in figuur 18b ($D_{50} = 23.5$ mm en $G = 170$ mm) zijn er twee meetpunten met $T = 5$ s die afwijken van de tendens in de andere metingen. Dit wordt toegeschreven aan een niet te voorkomen spreiding in de meetresultaten.

Vanwege het feit dat de gaten slechts 15 cm diep zijn en de bodem van elk gat is voorzien van een grof gaas, kan de erosie niet onbeperkt toenemen. Bij sommige proeven, zoals die in figuur 15a ($D_{50} = 5.0$ mm en $G = 51$ mm) is het maximum al bereikt bij de kleinste golfhoogte ($H_i = 0.2$ m). Die proeven hebben daardoor maar een beperkte waarde. Ze geven slechts aan dat de combinatie van gatgrootte en -vulling zeer ongunstig is. Dit blijkt het geval te zijn bij zeer fijn vulmateriaal, zeer grote en zeer kleine gaten. Verderop in deze paragraaf wordt hierop teruggekomen.

De figuren 21 tot en met 26 geven de gemeten maximale erosie boven SWL als functie van de golfhoogte. Ook hier kan gekonkludeerd worden dat de invloed van de golfperiode T klein is. Meestal is de erosie bij $T = 5$ s wat kleiner dan bij de andere perioden, maar de verschillen zijn zodanig klein en aan spreiding onderhevig dat dit verwaarloosd wordt.

De spreiding in en reproduceerbaarheid van de meetresultaten ten aanzien van de erosiediepte boven SWL is zichtbaar als de onderste figuren van figuur 24 en 26 en de bovenste figuren van figuur 22 en 26 met elkaar vergeleken worden. De eerste twee hebben betrekking op gaten van 125 mm en een

gatvulling met D_{50} van 23.5 mm. Voor de laatste twee geldt $G = 125$ mm en $D_{50} = 5.6$ mm. Beide herhalingsproeven hebben plaatsgevonden in een andere serie. Uit de figuren blijkt dat de spreiding en reproduceerbaarheid tegenvalt voor $T = 2.25$ s. Bij het grove vulmateriaal is er een verschil te zien van 3 cm en bij het fijne vulmateriaal is er een verschil van ongeveer 1.5 cm. Verder blijft het verschil beperkt tot hooguit 1 cm, hetgeen goed te noemen is.

De kleine invloed van de golfperiode maakt het mogelijk de figuren te vereenvoudigen, zodat de invloed van de gatdiameter G en de korrelgrootte D_{50} duidelijker tot uiting komt. Het resultaat is gegeven in figuur 27, 28 en 29. De getekende lijnen zijn representaties van de gemiddelde tendens van de meetpunten, waarbij de invloed van de golfperiode is verwaarloosd.

In figuur 27 is de invloed van de gatdiameter G zichtbaar. Alle lijnen hebben betrekking op het kif met $D_{50} = 5.0$ mm. Een opmerkelijke tendens is zichtbaar in de bovenste figuur van figuur 27 (de grootste erosie, onafhankelijk van de plaats waar dit is gemeten). Bij een gatdiameter van 91 en 125 mm is de erosie bij een bepaalde golfhoogte veel minder dan bij grotere of kleinere gaten. Bij een gatdiameter van 51, 70 of 225 mm is de erosie zelfs zo groot dat bij de kleinste golfhoogte (0.2 m) het gat volledig leegspoelt.

Deze tendens is niet waarneembaar als alleen de grootste erosie boven SWL (onderste figuur van figuur 27) beschouwd wordt. Dan neemt de erosie toe als ook de gatgrootte toeneemt.

De oorzaak hiervan zal gezocht moeten worden bij de in hoofdstuk 3 beschreven bezwijkmechanismen. Als de gaten klein zijn, dan kan de over het talud schietende waterstroom het gat niet leegspoelen (bezwijkmechanisme 2). De verschildruk is dan echter groot en de korrels kunnen gemakkelijk door het uit het talud stromende water meegenomen worden (bezwijkmechanisme 1). Bij het groter worden van het gat neemt blijkbaar de mogelijkheid van de uitredende waterstroom om korrels mee te voeren sneller af, dan dat dat voor het over het talud stromende water toeneemt. Het gevolg is het bestaan van een optimale gatdiameter, waarbij beide bezwijkmechanismen moeite hebben om de gatvulling te eroderen. Blijkbaar geldt dat de optimale gatgrootte bij de gebruikte hydraulische randvoorwaarden en constructie-eigenschappen ongeveer bij 100 mm ligt.

Boven de stilwaterlijn zijn de verschildrukken echter klein en kan bezwijkmechanisme 1 nooit optreden. Dit verklaart de tendens in de onderste figuur van figuur 27, want bezwijkmechanisme 2 geeft een grotere erosiediepte naarmate de gatdiameter groter is.

In figuur 28 en 29 is de invloed van de korrelgrootte D_{50} zichtbaar. Het blijkt dat de invloed vrij klein is als de erosie boven SWL wordt beschouwd (zie onderste deel figuur 28). Alleen bij zeer fijn vulmateriaal (zand met D_{50} van 0.22 mm) is de erosie veel groter dan bij grind. Het grove grind van 23.5 mm geeft maar een iets kleinere erosie dan grind van 5 à 10 mm.

Ook als het hele talud wordt beschouwd (figuur 28 boven en figuur 29) blijkt dat de invloed van D_{50} niet zo groot is. De tendens is zodanig dat hoe grover het vulmateriaal hoe kleiner de erosie.

Verwacht mag worden dat deze tendens ook bij de vulmaterialen met D_{50} van 5.0 en 5.6 mm tot uiting komt. Om dit te beoordelen kan het beste gekeken worden naar figuur 15 (onder) en figuur 16 (boven). Het blijkt dat bij een D_{50} van 5.0 mm iets minder erosie is gemeten! Boven SWL (zie figuur 21 en 22) is deze verrassende tendens niet waarneembaar.

Gezien het feit dat voor beide bezwijkmechanismen geldt dat een kleinere korrelgrootte een grotere erosiediepte zou moeten geven, wordt de gekonstateerde tendens bij $D_{50} = 5.0$ mm en 5.6 mm toegeschreven aan spreiding in de meetresultaten.

De tendens in de meetresultaten kan als volgt samengevat worden:

- gehele talud:
 - T heeft verwaarloosbare invloed
 - toename H geeft toename Y
 - toename D_{50} geeft afname Y
 - toename G geeft:
 - afname Y als $G < 100$ mm
 - toename Y als $G > 100$ mm
- boven SWL +0.2 m:
 - T heeft verwaarloosbare invloed
 - toename H geeft toename Y
 - toename D_{50} geeft afname Y
 - toename G geeft toename Y.

Met deze tendensen en formule (7) (Brown [2]) in gedachten zijn de volgende dimensieloze parameters geformuleerd:

Y/G (dimensieloze erosiediepte/gatgrootte verhouding)

H/D_{50} (dimensieloze golfhoogte/korrelgrootte verhouding)

D_{50}/G (dimensieloze korrelgrootte/gatdiameter verhouding)

$B'L'/A_g$ (dimensieloze verhouding tussen zettingoppervlak en gatoppervlak)

De blokdikte D ontbreekt in de dimensieloze parameters omdat verwacht kan worden dat de invloed ervan gering is zolang bezwijkmechanisme 2 maatgevend is. Dit is het geval voor de erosie boven SWL en tevens voor het gehele talud als $G > 100$ mm. Voor de grootste erosie-diepte voor het gehele talud met $G < 100$ mm heeft het geen zin om een parameter met D te formuleren, omdat de blokdikte niet gevarieerd is.

Met de dimensieloze parameters is gezocht naar een empirische formule voor de erosiediepte, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de maximale erosie voor het gehele talud bij grote gaten ($G > 0.1$ m), bij kleine gaten ($G < 0.1$ m) en de maximale erosiediepte boven SWL.

Voor die gevallen waarvoor verwacht kan worden dat bezwijkmechanisme 2 domineert, zijn de gemeten waarden van Y/G op dubbel-logaritmisch papier uitgezet tegen een parameter op basis van $(H/D_{50})(D_{50}/G)^m$. Gezocht is naar een waarde van m waarbij de spreiding het kleinst is. Bij het zoeken is de voorkeur gegeven voor een gelijke m voor de formule met $G > 0.1$ m en voor de formule voor Y boven SWL, gezien de veronderstelling dat in beide gevallen hetzelfde bezwijkmechanisme (2) optreedt. Verder is er een voorkeur voor $m = 0$, teneinde een eenvoudige formule te verkrijgen.

De metingen die betrekking hebben op de grootste erosie in de kleine gaten (bezuikmechanisme 1; erosie door uittredend water) zijn uitgezet tegen een parameter op basis van $(H/D_{50})(B'L'/A_g)^m$. Hierbij is geen gebruik gemaakt van G/D_{50} , omdat uit de theorie blijkt dat de geometrieparameter λ ($=B'L'/A_g$) relevanter is (zie paragraaf 3.2).

Acceptabele resultaten zijn verkregen met de volgende formules:

- Maximale erosiediepte boven SWL +0.2 m:

$$Y/G = 0.18 (H/D_{50})^{0.33} \quad (13)$$

- Y voor gehele talud, mits $G > 0.1$ m:

$$Y/G = 0.23 (H/D_{50})^{0.33} \quad (14)$$

- Y voor gehele talud, mits $G < 0.1$ m:

$$Y/G = 0.038 (H/D_{50})^{0.5} (B'L'/A_g)^{0.75} \quad (15)$$

Deze formules zijn, samen met de meetpunten, in figuur 30 tot en met 32 weergegeven. Steeds zijn alleen die meetpunten weergegeven, waarvoor geldt dat de erosiediepte nog niet is beïnvloed door het gaas onder de blokken.

Het verschil tussen de gemeten waarde van Y/G en de berekende waarde is doorgaans kleiner dan 20%, behalve bij de formule voor de erosie boven SWL. Het verschil met betrekking tot laatst genoemde is vooral groot bij kleine waarden van Y/G en bedraagt dan orde 50%. Dit is meer een gevolg van de spreiding in de meetresultaten (zie bijvoorbeeld figuur 22 en 26), dan een gevolg van de keuze van de parameters of de macht m.

Hoewel de formules zijn afgeleid op basis van proeven met een gaas onder de blokken dat heeft verhinderd dat de blokken ondermijnd raken, wordt toch voorgesteld de formules te gebruiken om te voorspellen of er bij een bepaalde constructie ondermijning van de blokken is te verwachten. Als de berekende erosiediepte Y groter is dan de blokdikte D, dan is ondermijning zeer waarschijnlijk. Over de mate van ondermijning is echter geen uitspraak te doen.

5.2 Vergelijking van theorie voor overstromend water met de erosiemetingen

In de vorige paragraaf is geconstateerd dat de erosie uit grote gaten plaatsvindt door middel van bezwijkmechanisme 2: het over het talud stromende water drijft een neer in het gat aan en die bedreigt de stabiliteit van de gatvulling.

In paragraaf 3.3.3 zijn semi-empirische relaties afgeleid waarmee de erosiediepte in geval van mechanisme 2 berekend kan worden. Deze zijn gebaseerd op de erosiemetingen van Brown [2] en op de snelheidsmetingen die zijn gerapporteerd in [7].

Het onderzoek van Brown [2] heeft zich beperkt tot de erosie als gevolg van de stroming over het talud en vrij fijne gatvulling: $0.32 < D_{50} < 1.55$ mm.

Ondanks dat de huidige metingen zijn uitgevoerd met veel grovere gatvulling ($5 < D_{50} < 23.5$ mm) worden deze meetresultaten onderstaand toch vergeleken met de formules uit paragraaf 3.3.3. De proeven zijn uitgevoerd met $h/L_0 > 0.15$ en $\tan\alpha = 0.33$, zodat gebruik gemaakt kan worden van formule (11) en (12):

$$\xi_0 \leq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.016 \frac{H}{D_{50}} \xi_0^{1.1} \quad (16)$$

$$\xi_0 \geq 2: \quad \frac{Y}{G} = 0.007 \frac{H}{D_{50}} \xi_0^{2.2} \quad (17)$$

Deze formules zijn voor verschillende waarden van ξ_0 in figuur 33 grafisch weergegeven. In deze figuur zijn ook de meetpunten en de empirische relatie uit paragraaf 5.1 te zien. Het valt op dat de metingen een veel kleinere afhankelijkheid van H/D_{50} te zien geven dan bovenstaande formules. Dit is ook te zien aan de formules zelf (formule (14)):

$$Y/G = 0.23 (H/D_{50})^{0.33} \quad (18)$$

In deze formule, die goed aansluit bij de metingen, is ξ_0 niet aanwezig en is Y/G evenredig met $(H/D_{50})^{0.33}$, terwijl het volgens formule (16) tot en met (17) evenredig is met H/D_{50} .

De gekonstateerde verschillen zouden een gevolg kunnen zijn van het feit dat Brown [2] gewerkt heeft met een fijnere gatvulling. De invloed van de grootte van de gatvulling komt tot uiting in de valsnelheid. In [9] zijn formules voor de valsnelheid vermeld:

$$\text{als } 0.1 < D_s < 1 \text{ mm: } w = 10 \frac{v}{D_s} \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta g D_s^3}{100v^2}} - 1 \right) \quad (19)$$

$$\text{als } D_s > 1 \text{ mm: } w = 1.1 \sqrt{\Delta g D_s} \quad (20)$$

met: D_s = karakteristieke korrelgrootte met betrekking tot zwevend transport (m)

v = viscositeit van water (m^2/s)

Voor D_s wordt in [9] aangegeven dat dit bij gering transport ongeveer 0.6 à 0.8 maal D_{50} is. Met de aanname dat $D_s = 0.7D_{50}$ is in figuur 34 de relatie tussen de valsnelheid en D_{50} gegeven. In deze figuur is te zien dat in de range waarbinnen Brown gewerkt heeft de valsnelheid evenredig is met D_{50} , terwijl bij de huidige metingen dit evenredig is met $\sqrt{D_{50}}$.

Dit geeft aan dat het verschil tussen formule (18) en formule (16) tot en met (17) veroorzaakt wordt door het feit dat formule (18) gebaseerd is op metingen met grof materiaal en formule (16) tot en met (17) op veel fijner materiaal.

Een nadere analyse van de snelheid in een gat als functie van de snelheid op het talud, bijvoorbeeld door middel van berekeningen met ODYSSEE (zie [10]), kan meer inzicht in het erosiemechanisme geven waardoor het belang van de valsnelheid beter is in te schatten.

5.3 Vergelijking van theorie voor uitstromend water met erosiemetingen

Bij kleine gaten die zich onder de stilwaterlijn bevinden is bezwijkmechanisme 1 van belang: het uit het talud stromende water dreigt de korrels mee te voeren.

In paragraaf 3.2 is een theoretische ontwerpformule gegeven voor kleine gaten waarmee kan worden vastgesteld of de gatvulling eerder zal uitspoelen dan dat de zetting bezwijkt. Deze formule is niet zomaar met de metingen te vergelijken, omdat bij de metingen er geen gevaar voor instabiliteit van de zetting heeft bestaan.

Teneinde toch een vergelijking mogelijk te maken worden de formules uit [5] en [6] gebruikt om de snelheid in het gat te berekenen. Door deze te vergelijken met de kritieke snelheid volgens formule (5) kan een voorspelling gegeven worden over het al of niet leegspoelen van de gaten.

In principe is het mogelijk om met deze methode de snelheid in het gat u_g als functie van de erosiediepte Y te berekenen en zo bij een bepaalde golfbelasting te berekenen bij welke Y de u_g gelijk is aan u_{gcr} . Dit levert dan de gewenste voorspelling van de evenwichtsdiepte Y . In het kader van dit

praktijkgerichte onderzoek beperken we ons echter tot de vraag of het gat geheel zal leegspoelen.

Gezien deze beperking is alleen de snelheid in het gat zonder vulmateriaal van belang. We berekenen dus de stabiliteit van de laatste korrel in het gat.

In [1] is de doorlatendheid van de toplaag zonder gatvulling en de lek lengte van de meetsektie berekend (westzijde, 6 gaten per blok):

	serie 3	serie 4	serie 5	
k' [mm/s]	11	19	30	(zie figuur 1)
λ [m]	0.26	0.20	0.16	($\lambda = \sin(\alpha)/\sqrt{(kbD/k')}$)

Met het analytisch model voor de stabiliteit van een zetting [5] kan vervolgens de verschilddruk over de toplaag en de snelheid in het gat berekend worden. Enkele resultaten zijn in tabel 3 gegeven. In deze tabel is tevens een kolom opgenomen met de berekende kritieke snelheid in het gat, zonder rekening te houden met de korrelsnelheid $u_{k,min}$. Dit is berekend met formule (5):

$$\begin{aligned}u_{g,cr} - u_{k,min} &= 1.14 (1 - A/A_g)^{1.2} \sqrt{(\Delta_k g D_f \cos(\alpha))} \\ &= 1.14 * (1 - 0)^{1.2} * \sqrt{(1.65 * 9.8 * 5.0 * 10^{-3} * 0.95)} \\ &= 0.32 \text{ m/s}\end{aligned}$$

De laatste kolom van de tabel geeft aan of tijdens de metingen het gat is leeggespoeld of niet.

Uit de tabel blijkt dat bij alle proeven uit serie 3 en 4, waarvoor geldt dat de berekende snelheid in het gat u_g groter is dan $u_{g,cr} - u_{k,min}$, ook gemeten is dat het gat leegspoelt. Bij proef 332, 437, 439 en de proeven uit serie 5 (behalve 543) is echter een lagere snelheid berekend dan de kritieke snelheid, terwijl in de meeste gevallen het gat wel nagenoeg leegspoelt.

Gekonkludeerd moet worden dat, met de berekende snelheid in het gat volgens het analytische model [5] en de berekende kritieke snelheid met formule (5),

een onveilig resultaat verkregen wordt. Dit is zelfs ook het geval als $u_{k,\min} = 0$ wordt gesteld.

6 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Het uitgevoerde modelonderzoek heeft geleid tot een praktisch bruikbare ontwerpformule waarmee de erosiediepte voor een aantal konkrete situaties kan worden voorspeld. De ontwerpformule is echter slechts een "black-box"-relatie tussen de randvoorwaarden en de erosie. Het is daardoor niet meer dan een samenvatting van de meetresultaten, zonder dat het het inzicht in de fysische processen heeft vergroot. Dit inzicht is nodig om te kunnen beoordelen of de afgeleide tendens in de meetresultaten kan worden geëxtrapoleerd naar nog niet onderzochte situaties. Tevens kunnen hiermee de formules verbeterd worden, zodat de spreiding in de meetpunten ten opzichte van de met de formules berekende tendens verkleind wordt. Deze spreiding is nu nog erg groot, namelijk 20%, met uitschieters van 50%.

Aanbevolen wordt om de gemeten stroomsnelheden en verschildrukken te gebruiken om de waterbeweging in een gat te berekenen. Hiervoor zou het komputer-model ODYSSEE gebruikt kunnen worden. Samen met de theoretische relatie uit paragraaf 3.2 is vervolgens een uitspraak te doen over de stabiliteit van de korrels in het gat. Zolang de korrels niet stabiel zijn is er voortschrijdende erosie. Totdat uiteindelijk de evenwichtsdiepte resulteert.

De gemeten erosiediepten als funktie van de verschildruk en snelheid op het talud bieden de mogelijkheid om bovenstaande berekeningsmethode te ijken. De metingen die ruim boven de stilwaterlijn zijn uitgevoerd, zijn te gebruiken om het model zonder verschildruk te ijken, terwijl de metingen onder SWL juist voor de situatie met verschildruk zijn te gebruiken.

Precies dezelfde berekeningsmethode is ook voor oevers te gebruiken. In [4] zijn metingen gepresenteerd van de erosiediepte als funktie van de watersnelheid op het talud. Hoewel de snelheid in dat geval evenwijdig aan de dijkas was gericht en een gevolg was van de haalgolf van een langsvarend schip, zijn de fysische processen die aan de erosie ten grondslag lagen niet verschillend.

Tevens wordt aanbevolen om een black-box relatie op te stellen tussen de gemeten snelheid op het talud en de erosie-diepte boven de stilwaterlijn. Met deze relatie is het mogelijk om de meetresultaten met windgolven op

dijken (onderhavige verslag) te vergelijken met die met haalgolven op oevers [4]. Gezien het feit dat in [4] de korrelgrootte van de niet-koehesieve gatvulling (zand) niet is gevarieerd, en in dit Deltagoot-onderzoek wèl, kan deze vergelijking leiden tot een uitbreiding van de ontwerpformule uit [4] met de invloed van de korrelgrootte. Op basis van de berekening van de snelheid in een gat als gevolg van het overstromende water (ODYSSEE) kan beoordeeld worden in hoeverre de invloed van de valsnelheid van de korrels hierin betrokken moet worden.

Bovendien is dan een betrouwbare vergelijking met het werk van Brown [2] mogelijk.

REFERENTIES

1 A. Burger

Taludbekledingen van gezette steen

Eerste concept meetverslag eindverifikatie-onderzoek Deltagoot

WL/GD H195.25, april '88

2 J. H. Laboyrie e.a.

Erosie door open taludbekledingen

Litaratuurstudie en aanbevelingen voor praktijkgericht onderzoek

Waterloopkundig Laboratorium, H657 bijlage A, nov. 88

3 J.A. Battjes and A. Roos

Characteristics of flow in run-up of periodic waves

Delft University of Technology, report 75-3

4 H.J. Verhey

Erosie door open taludbekledingen

Praktijkgericht onderzoek oevers

Waterloopkundig Laboratorium, modelonderzoek Pentagoot H657 bijlage B

nov. 88

5 M. Klein Breteler

Taludbekledingen van gezette steen

Stabiliteit van toplaag zonder inklemming of interlocking

Waterloopkundig Laboratorium, concept verslag H195.04, nov. 87

6 M. Klein Breteler

Taludbekledingen van gezette steen

Doorlatendheid van de toplaag

Waterloopkundig Laboratorium, H195.07, febr., '88

7 M. Klein Breteler

Erosie door open taludbekledingen

Snelheden op talud door brekende golven

Waterloopkundig Laboratorium, modelonderzoek Deltagoot H657 bijlage F
aug. '89

8 K. den Boer en A. Bezuijen

Taludbekledingen van gezette steen

Samenvattend verslag 1980 - 1984

Waterloopkundig Laboratorium/Grondmechanica Delft, M1795/M1881 deel XV
oktober 1884

9 L.C. van Rijn

Sediment transport

Delft Hydraulics, publication nr 334, febr. 1985

10 S. Boer

Erosion in open revetments

Simulation of recirculation flow in a rectangular cavity

Delft Hydraulics, Report on basic research H462, appendix E of H657,
Oct '88

Tabel 1, toegepaste gatvulling (D_{50} [mm])

	serie 3		serie 4			serie 5		
aantal gaten/blok	1	6	1	1	6	1	1	6
G [mm]	125	51	125	170	70	125	225	91
gatnummer:								
1 t/m 5		5.0			5.0			5.0
6 en 7	5.6		0.22			5.6		
8 en 9	5.6			0.22			5.6	
10 t/m 14	5.0			5.0			5.0	
15 en 16	10.8		23.5			23.5		
17 en 18	10.8			23.5			23.5	
19								23.5
20						23.5		

Tabel 2, gemeten erosiediepte en golfrandvoorwaarden

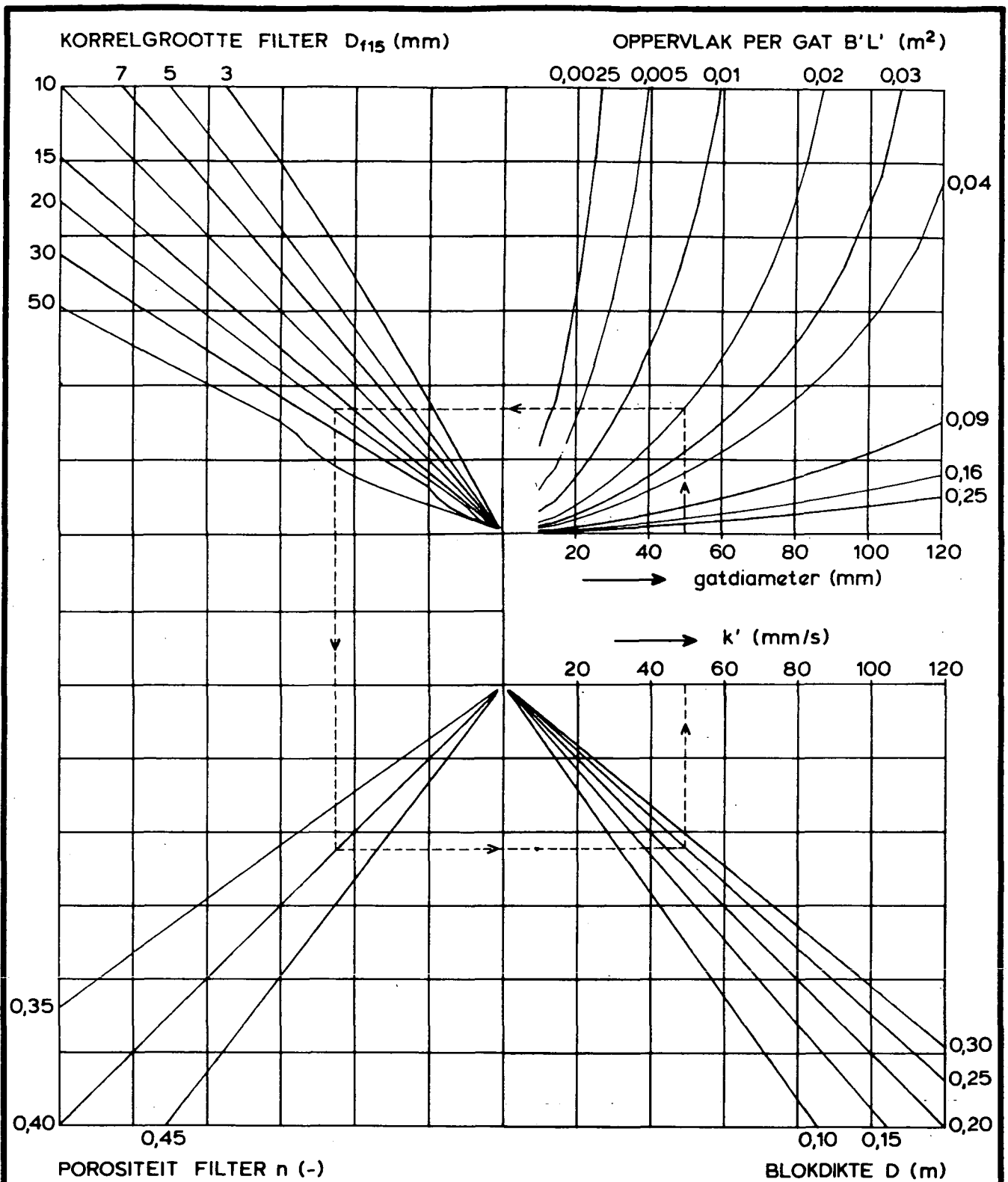
GEMETEN EROSIE BOVENIN GAT [cm]																							
proef nr	H_i [m]	T [s]	ξ_o [-]	gatnr.: 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
332	.20	2.25	2.09	.0	.0	2.8	14.0	.6	.0	7.0	10.5	.3	.0	.0	7.8	7.0	.2	.0	8.3	8.4	.0	-	-
333	.29	2.25	1.74	.0	.0	3.9	14.8	1.0	.0	6.5	11.8	.3	.0	.0	6.7	9.5	.0	.0	6.7	9.0	.5	-	-
334	.38	2.25	1.51	.0	1.4	4.8	15.0	3.0	1.2	8.4	11.3	6.8	.0	.6	9.5	10.9	4.0	.8	7.4	10.5	1.5	-	-
335	.37	3	2.05	.0	1.0	4.3	13.5	1.8	.6	10.1	11.8	12.8	.0	2.4	8.2	11.5	10.5	.0	7.2	9.6	5.7	-	-
336	.50	3	1.77	.0	2.7	5.3	13.5	13.7	8.5	10.0	12.0	13.7	.0	8.5	9.0	12.0	11.8	6.1	7.2	11.1	6.1	-	-
337	.62	3	1.58	.0	3.3	5.5	15.0	14.8	8.0	10.0	14.0	14.0	.0	11.8	9.0	13.2	11.7	7.0	8.0	13.0	8.5	-	-
338	.30	5	3.80	.0	.0	2.5	10.2	14.7	.0	4.1	11.4	13.1	.0	.0	2.8	6.1	11.5	.0	4.0	6.0	9.9	-	-
339	.51	5	2.91	.6	3.0	5.4	12.4	14.6	7.0	9.5	11.8	13.3	.0	7.5	8.8	9.1	13.1	7.5	10.0	8.4	10.8	-	-
340	.70	5	2.49	3.5	4.0	6.1	13.2	15.0	5.6	6.8	14.5	14.6	7.6	8.6	7.2	11.2	14.5	8.0	9.5	11.5	14.7	-	-
341	.65	4	2.07	.4	2.7	5.5	13.7	14.7	8.1	9.8	12.5	14.1	.0	9.5	10.0	11.2	13.3	6.0	9.6	12.1	12.5	-	-
342	.84	4	1.82	2.4	3.5	11.9	14.5	14.5	7.2	10.6	14.0	15.0	3.4	9.4	12.0	13.0	14.5	7.0	10.2	14.0	14.8	-	-
437	.20	2.25	2.09	.0	.0	4.5	12.5	15.0	.0	13.5	13.6	13.4	.0	.0	10.8	11.5	8.1	.0	6.4	7.5	2.1	-	-
438	.29	2.25	1.74	.0	.0	4.3	13.5	16.0	.0	13.3	13.5	13.4	.0	.0	12.0	11.7	7.7	.0	6.4	10.0	1.5	-	-
439	.38	2.25	1.52	.0	1.5	5.0	13.0	15.5	.7	13.8	15.0	14.5	.0	.5	12.8	13.2	8.4	.0	6.0	14.4	2.0	-	-
440	.36	3	2.08	.0	1.9	6.6	13.7	3.7	3.1	14.2	13.6	13.8	.0	3.0	12.0	12.2	10.1	.0	6.3	12.6	5.2	-	-
441	.49	3	1.78	.0	4.7	6.4	14.5	14.5	12.5	15.0	15.0	13.2	.0	12.2	14.0	13.1	11.3	2.8	7.8	12.6	7.1	-	-
442	.62	3	1.58	.0	4.8	6.5	15.5	15.6	14.0	15.0	15.0	14.4	.0	14.0	13.1	14.5	11.5	4.5	7.6	14.9	10.0	-	-
443	.30	5	3.80	.0	.0	3.8	3.1	15.4	.0	11.5	13.0	13.6	.0	.0	10.4	9.0	12.1	.0	3.0	6.4	7.6	-	-
444	.51	5	2.91	.4	4.2	6.6	12.0	15.3	15.5	10.6	13.0	13.6	.0	11.0	12.0	11.2	12.7	5.5	8.8	9.7	9.4	-	-
445	.70	5	2.49	3.2	4.5	7.0	15.3	15.0	12.9	15.0	14.6	15.0	13.0	13.0	14.3	14.8	14.6	8.5	10.0	15.0	14.5	-	-
446	.64	4	2.09	1.3	5.3	7.0	15.2	15.2	15.0	15.0	13.5	14.0	.0	12.8	12.8	13.6	14.0	6.0	8.0	11.5	13.3	-	-
447	.84	4	1.81	3.1	4.8	9.5	15.2	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	5.5	10.2	14.3	13.2	14.3	7.0	9.7	12.5	13.6	-	-
448	1.09	4	1.60	5.4	7.4	13.0	15.1	15.5	15.0	15.0	15.0	15.0	12.3	13.3	15.0	15.0	15.0	7.0	10.0	15.0	15.0	-	-
534	.20	2.25	2.09	.0	.0	8.0	8.0	1.5	.0	8.4	12.7	.0	.0	.0	14.0	4.8	2.6	.0	2.2	6.7	1.2	.0	.0
535	.29	2.25	1.73	.0	.0	7.8	10.5	1.8	.0	9.5	12.7	.0	.0	.0	14.0	10.7	.0	.0	3.5	9.3	.0	.0	.0
536	.38	2.25	1.52	.0	1.5	7.0	13.0	6.5	.5	8.0	12.7	1.5	.0	.5	14.2	14.0	4.0	.5	4.0	14.2	.0	2.1	1.5
537	.37	3	2.06	.0	1.3	6.5	11.4	4.4	.3	11.1	13.0	12.1	.0	2.0	14.2	12.0	12.0	.0	7.0	10.0	4.1	3.0	15.0
538	.50	3	1.77	.0	5.6	7.3	11.1	7.7	10.0	9.2	13.0	12.2	.0	15.0	14.2	12.6	15.4	.5	7.3	12.8	5.8	5.0	15.0
539	.62	3	1.58	.0	7.0	8.5	14.0	15.0	11.0	7.6	14.5	13.2	.0	15.8	14.5	14.0	14.0	1.0	8.0	14.0	9.8	5.5	15.0
540	.31	5	3.74	.0	.0	6.2	4.2	13.8	.0	6.0	10.2	13.0	.0	.0	11.5	8.3	14.1	.0	2.5	10.0	12.2	3.0	11.5
541	.48	5	3.00	.0	4.8	8.2	7.1	14.2	8.9	6.0	11.3	13.2	.0	16.0	14.0	11.4	14.2	8.0	5.9	11.3	12.7	5.8	.0
542	.67	5	2.54	6.5	6.0	8.8	11.0	15.2	6.5	7.0	12.5	14.5	15.2	15.0	14.2	14.2	15.2	7.5	9.0	14.2	14.0	9.5	15.0
543	.65	4	2.07	2.0	6.0	9.0	11.1	14.5	8.5	11.0	13.1	13.3	.0	15.4	14.0	12.4	14.6	5.5	9.2	13.0	12.9	8.5	13.2
544	.86	4	1.80	4.5	5.7	9.7	11.4	14.7	7.0	9.0	12.5	13.3	4.5	16.0	14.2	13.5	14.1	6.8	8.7	13.1	12.8	9.5	14.0
545	1.11	4	1.58	6.2	6.3	13.7	12.2	14.7	7.8	11.2	14.0	13.3	14.0	15.2	14.2	14.8	14.1	6.2	10.0	14.0	14.0	10.0	14.4

Tabel 2, vervolg

GEMETEN EROSIE ONDERIN GAT [cm]																							
proef nr.	H _i [m]	T [s]	ξ ₀ [-]	gatnr.: 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
332	.20	2.25	2.09	.0	.0	1.5	14.0	.0	.0	3.7	6.0	.0	.0	.0	4.0	.6	.0	.0	2.6	1.5	.0	-	-
333	.29	2.25	1.74	.0	.0	1.9	11.1	.6	.0	4.0	7.5	.0	.0	.0	4.5	4.8	.0	.0	2.5	2.3	.5	-	-
334	.38	2.25	1.51	.0	.3	2.1	13.8	1.0	.0	4.5	6.9	1.1	.0	.0	5.0	5.8	.6	.5	3.0	6.3	.1	-	-
335	.37	3	2.05	.0	.0	2.9	13.5	1.8	.0	2.8	9.7	8.8	.0	.0	3.4	8.8	7.0	.0	1.8	6.0	.6	-	-
336	.50	3	1.77	.0	1.5	2.2	13.5	13.7	3.0	4.1	10.1	10.2	.0	6.0	4.0	8.4	8.1	1.5	2.2	7.4	1.5	-	-
337	.62	3	1.58	.0	2.1	3.5	15.0	14.8	5.8	6.8	12.0	8.5	.0	5.0	7.0	9.4	5.6	3.2	5.0	9.0	2.3	-	-
338	.30	5	3.80	.0	.0	1.2	10.2	14.7	.0	5.5	8.6	11.5	.0	.0	4.3	1.6	7.7	.0	1.4	3.1	6.1	-	-
339	.51	5	2.91	.6	1.8	2.0	12.4	14.6	6.6	4.0	10.3	11.4	.0	6.8	3.5	5.6	10.8	6.5	5.0	6.1	7.5	-	-
340	.70	5	2.49	2.4	2.4	3.5	13.2	15.0	5.6	8.0	10.0	12.2	5.9	6.9	7.1	6.0	12.0	5.0	5.0	6.0	9.0	-	-
341	.65	4	2.07	.4	1.7	3.0	13.7	14.7	6.6	3.4	11.5	11.6	.0	4.5	5.5	8.6	12.4	2.7	4.4	8.7	8.9	-	-
342	.84	4	1.82	1.2	2.6	10.0	14.5	14.5	7.2	8.0	10.5	11.5	.8	4.8	8.2	8.2	10.3	4.0	5.0	9.0	11.0	-	-
437	.20	2.25	2.09	.0	.0	1.0	12.5	15.0	.0	13.5	13.0	8.5	.0	.0	4.3	5.0	2.7	.0	2.8	2.0	1.4	-	-
438	.29	2.25	1.74	.0	.0	1.3	13.5	16.0	.0	13.3	13.5	11.1	.0	.0	5.8	6.3	2.4	.0	3.5	4.4	.9	-	-
439	.38	2.25	1.52	.0	.0	3.0	13.0	15.5	.0	13.3	13.8	12.4	.0	.0	10.2	6.8	2.0	.0	2.8	6.8	.0	-	-
440	.36	3	2.08	.0	.0	2.4	13.7	3.7	.2	13.8	13.2	11.5	.0	.0	5.8	7.9	2.0	.0	2.1	6.5	.8	-	-
441	.49	3	1.78	.0	1.5	1.5	14.5	14.5	6.5	15.0	15.0	11.7	.0	5.0	7.2	9.1	4.2	1.0	3.0	7.3	1.4	-	-
442	.62	3	1.58	.0	2.5	3.7	15.5	15.6	12.0	15.0	15.0	7.0	.0	9.7	9.8	10.5	4.2	2.7	3.0	8.6	2.5	-	-
443	.30	5	3.80	.0	.0	.9	3.1	15.4	.0	5.0	10.1	11.2	.0	.0	2.4	4.3	8.1	.0	2.0	1.9	2.7	-	-
444	.51	5	2.91	.3	4.6	3.3	12.0	15.3	12.5	4.6	9.9	11.9	.0	10.2	5.9	5.8	8.8	3.4	3.9	4.5	3.8	-	-
445	.70	5	2.49	2.5	4.1	6.0	15.3	15.0	12.2	15.0	9.2	15.0	3.9	9.4	9.8	9.5	11.0	3.0	4.3	4.8	7.9	-	-
446	.64	4	2.09	.9	3.0	5.0	15.2	15.2	15.0	15.0	12.4	12.2	.0	7.0	7.7	11.5	11.2	2.5	5.0	6.2	10.0	-	-
447	.84	4	1.81	1.2	2.7	6.8	15.2	15.1	15.0	15.0	15.0	15.0	.8	9.2	9.9	11.6	12.7	4.0	5.6	7.0	11.6	-	-
448	1.09	4	1.60	2.8	3.6	11.2	15.1	15.5	15.0	15.0	15.0	15.0	6.0	8.2	15.0	15.0	15.0	4.0	6.8	15.0	15.0	-	-
534	.20	2.25	2.09	.0	.0	3.4	8.0	1.5	.0	3.6	4.7	.0	.0	.0	9.0	1.0	.6	.0	1.9	2.5	.0	.0	.0
535	.29	2.25	1.73	.0	.0	1.5	10.5	1.8	0	4.5	7.0	.0	.0	.0	12.0	2.5	.0	0	3.5	1.8	.0	.0	.0
536	.38	2.25	1.52	.0	1.0	3.0	9.3	1.0	.0	5.0	8.0	.0	.0	.0	12.0	3.5	1.0	.5	2.0	3.5	.0	1.0	.0
537	.37	3	2.06	.0	.0	3.0	11.4	4.4	.3	4.6	8.4	2.6	.0	.3	4.8	5.4	1.8	.0	1.7	2.6	1.4	1.8	5.0
538	.50	3	1.77	.0	2.9	3.4	11.1	7.7	4.4	4.6	10.3	3.4	.0	1.0	7.0	5.5	6.4	.5	1.8	5.3	1.3	3.0	5.5
539	.62	3	1.58	.0	3.0	2.5	10.0	13.0	4.0	8.3	10.4	2.0	.0	10.2	12.2	6.6	4.0	2.5	4.2	7.2	1.5	1.5	4.0
540	.31	5	3.74	.0	.0	.8	4.2	13.8	.0	1.6	2.6	6.3	.0	.0	1.0	1.3	8.0	.0	2.5	2.6	2.5	1.5	3.0
541	.48	5	3.00	.0	5.6	1.5	7.1	14.2	6.0	2.2	4.2	5.8	.0	14.0	3.2	4.3	9.5	2.6	2.8	2.4	3.5	2.9	.0
542	.67	5	2.54	4.0	5.5	7.2	7.2	12.5	5.0	3.8	4.8	5.5	3.5	11.5	6.5	5.4	7.0	2.5	3.0	6.0	7.2	3.3	6.0
543	.65	4	2.07	1.5	5.5	5.5	11.1	14.5	5.0	6.0	8.1	10.0	.0	7.0	9.0	7.2	9.0	3.8	3.8	7.1	6.9	4.0	6.0
544	.86	4	1.80	1.5	3.8	5.7	11.4	14.7	6.8	4.5	8.7	9.7	.2	10.2	10.0	9.7	10.7	4.0	4.8	7.6	8.7	3.9	6.0
545	1.11	4	1.58	4.9	4.0	11.3	12.2	14.7	6.8	7.8	8.8	10.0	8.0	11.1	10.0	8.6	10.7	5.2	6.0	9.0	7.5	7.6	8.0

Tabel 3, berekende stijghoogteverschil en snelheid in gat

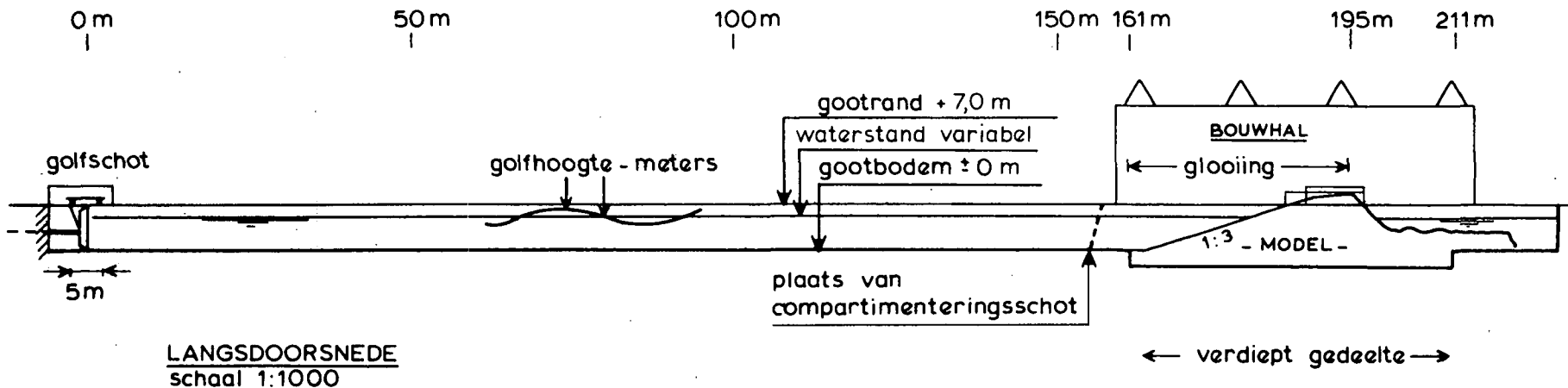
proef nr.	H_i [m]	T [s]	ξ_o [-]	stijghoogteverschil [m]	snelheid in gat [m/s]	$u_{gcr} - u_{kmin}$ [m/s]	gemeten Y > 12 cm?
332	.20	2.25	2.09	.17	.29	.32	ja
334	.38	2.25	1.51	.23	.39	.32	ja
335	.37	3	2.05	.25	.43	.32	ja
337	.62	3	1.58	.31	.53	.32	ja
338	.30	5	3.80	.26	.45	.32	ja
341	.65	4	2.07	.34	.58	.32	ja
437	.20	2.25	2.09	.15	.23	.32	ja
439	.38	2.25	1.52	.20	.30	.32	ja
440	.36	3	2.08	.22	.33	.32	ja
442	.62	3	1.58	.26	.40	.32	ja
443	.30	5	3.80	.22	.33	.32	ja
446	.64	4	2.09	.26	.42	.32	ja
534	.20	2.25	2.09	.14	.20	.32	nee
536	.38	2.25	1.52	.18	.25	.32	ja
537	.37	3	2.06	.18	.27	.32	nee
539	.62	3	1.58	.22	.32	.32	ja
540	.31	5	3.74	.18	.26	.32	ja
543	.65	4	2.07	.23	.34	.32	ja



voorbeeld : gatdiameter = 50 mm $D_{f15} = 20$ mm
 gatafstand B' = 0,15 m $n = 0,4$
 gatafstand L' = 0,13 m $D = 0,25$ } $k' = 53$ mm/s

DOORLATENDHEID TOPLAAG (k') MET REGELMATIG
 GATENPATROON ZONDER GATVULLING

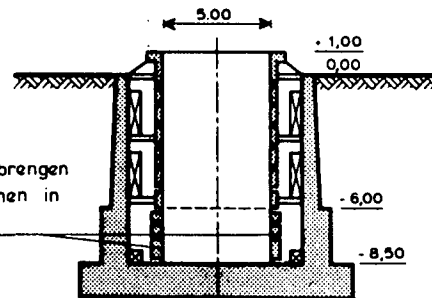
OVERZICHT DELTAGOOT



golffrekwentie - 0,1 - 0,5 Hz

max. golphoogte bij 5 m waterdiepte:
regelmatig - 2,5 m
onregelmatig - 1,75 m significant

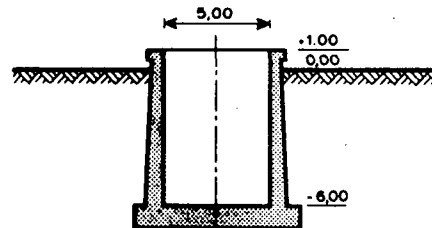
mogelijkheden voor het aanbrengen
van meetinstrumenten en ramen in
de gootwand



DWARSDOORSNEDE II (in bouwhal)

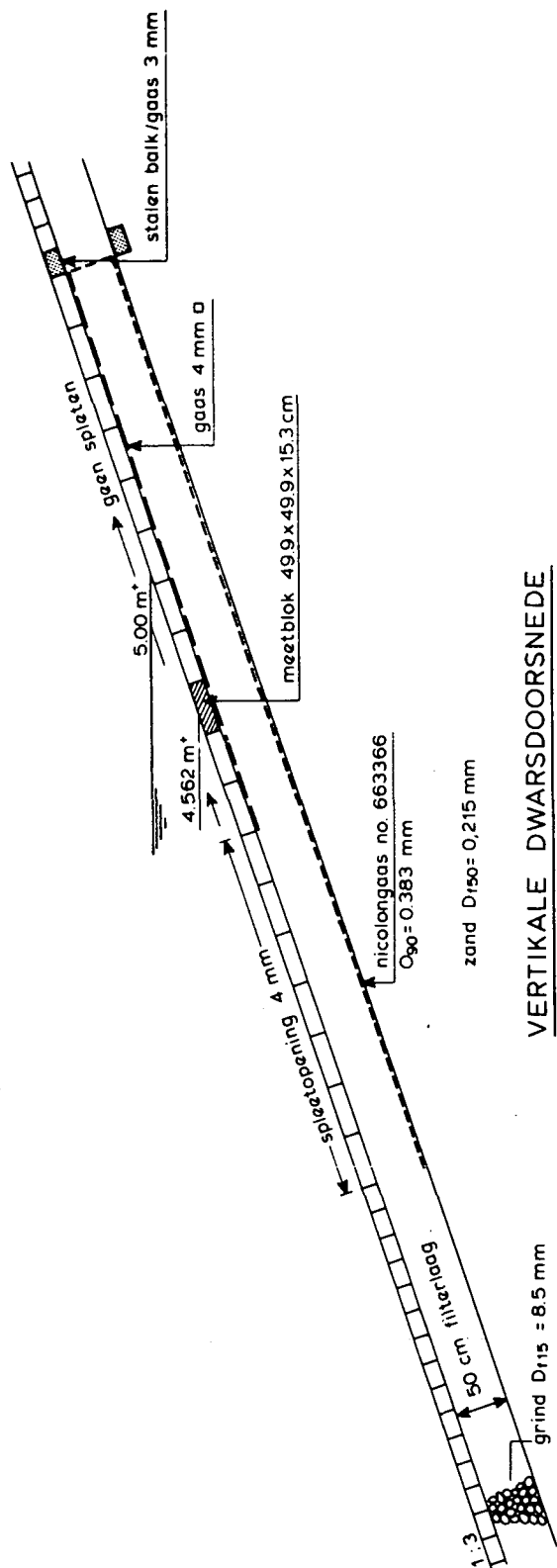
gootgoot : lengte 233 m
breedte 5 m
diepte 7 m

diepe sekties : lengte 50 m
(in bouwhal) breedte 5 m
diepte 9,5 m



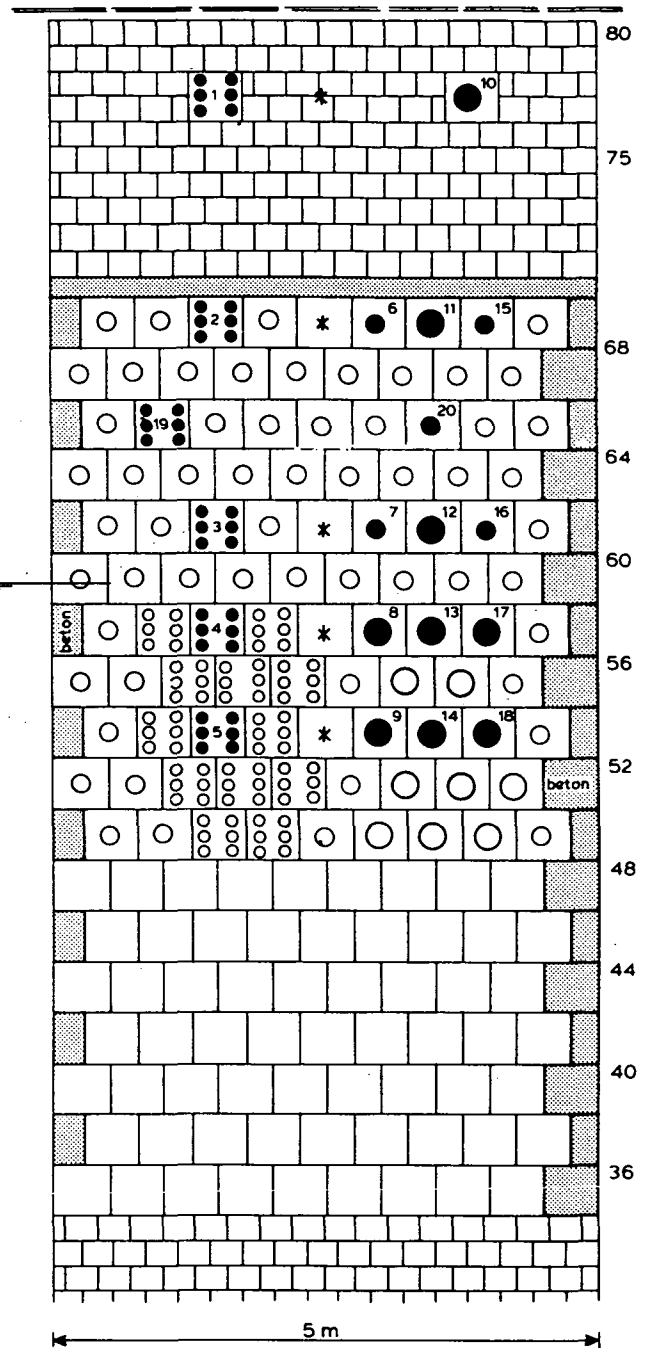
golfschot : door cilinder aangedreven translarend
schot met aan één zijde water

DWARSDOORSNEDE I (buiten)



VERTIKALE DWARSDOORSNEDE

SWL

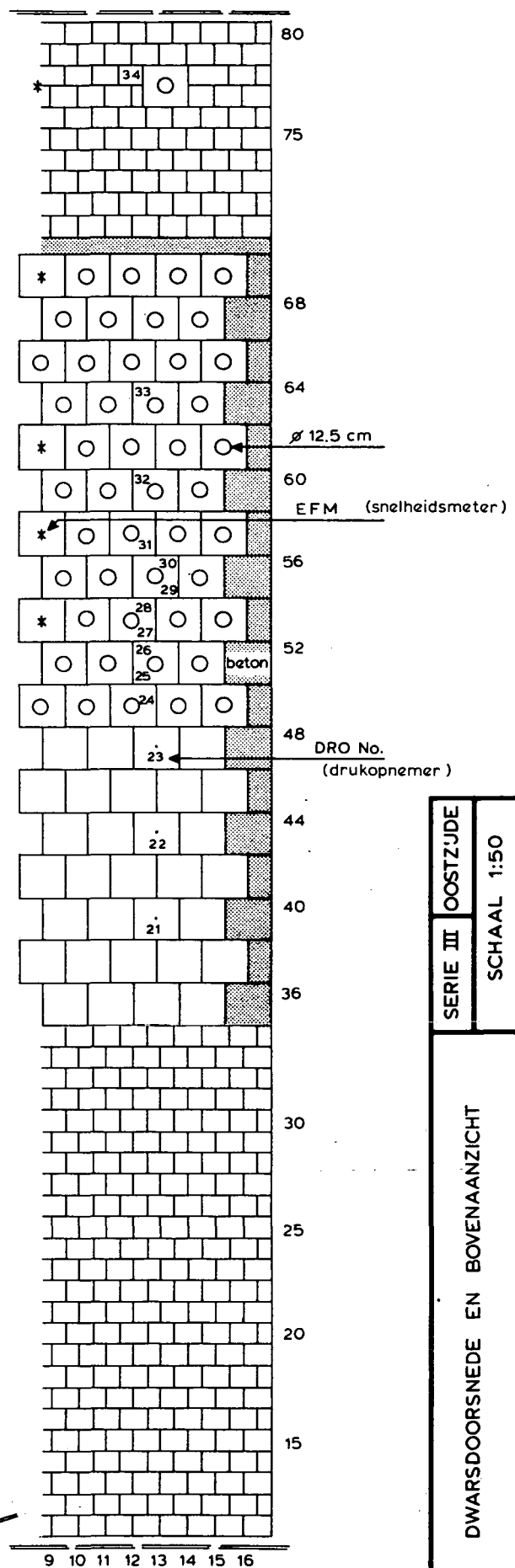
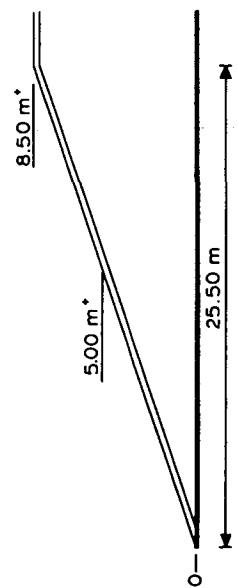
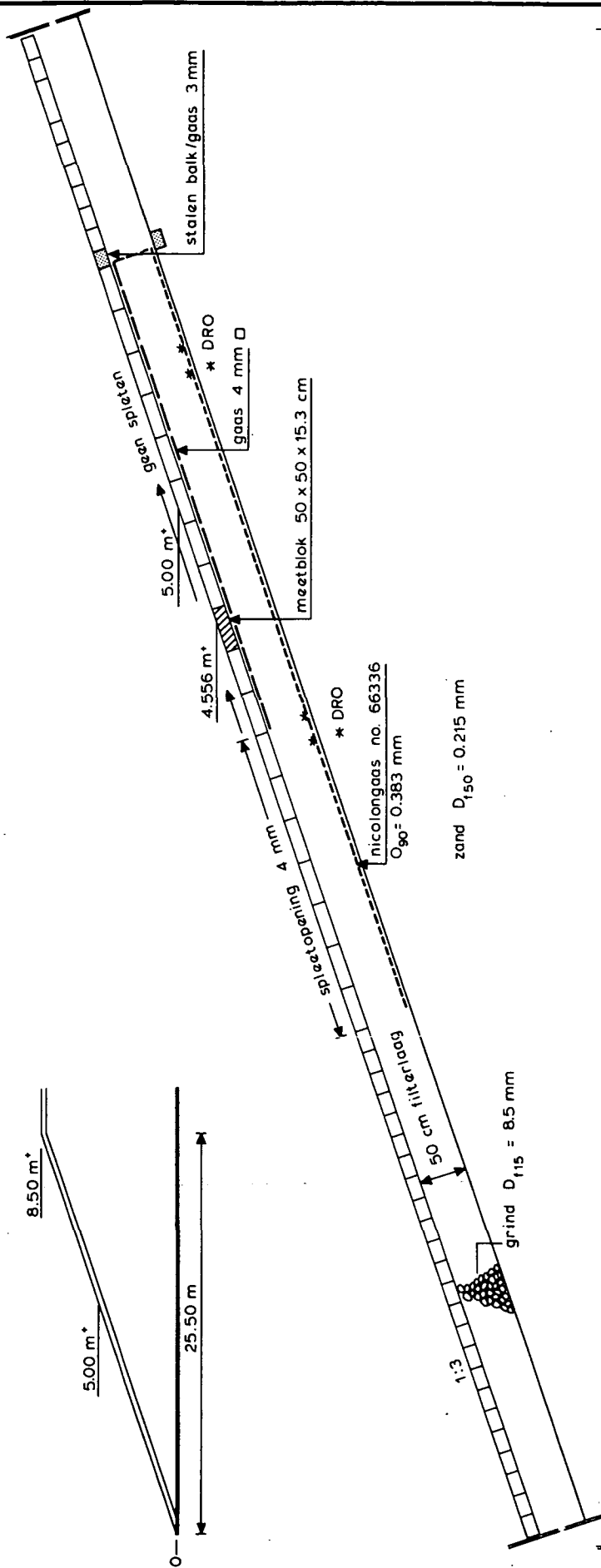


BOVENAANZICHT

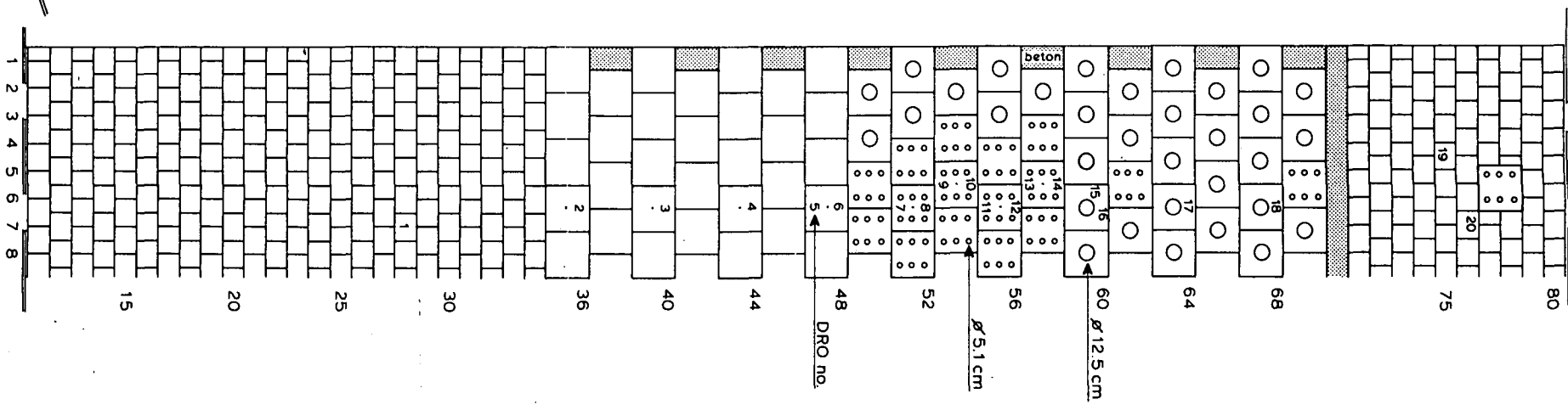
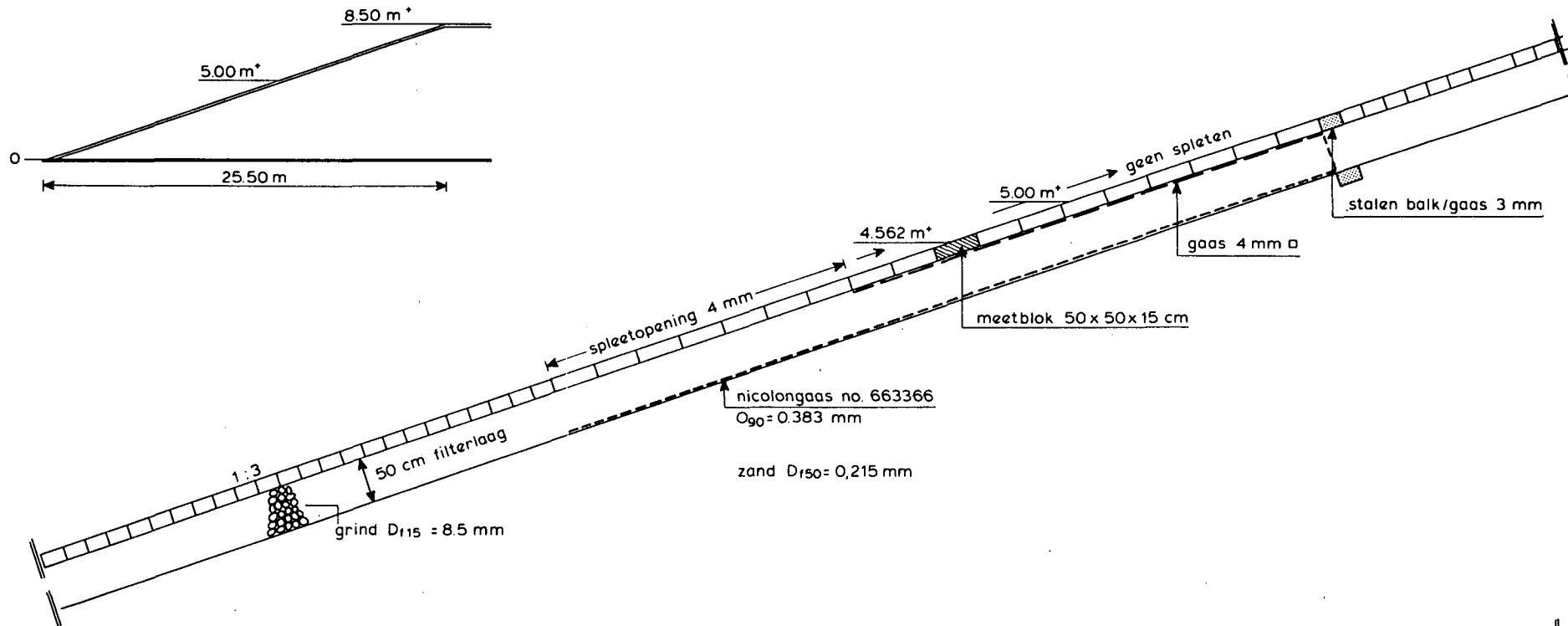
- * = snelheidsmeter
- = gevuld gat ○ = ongevuld gat

blok 19 en 20 tijdens serie 3 en 4
alleen één gat van ϕ 125 mm
zonder gatvulling

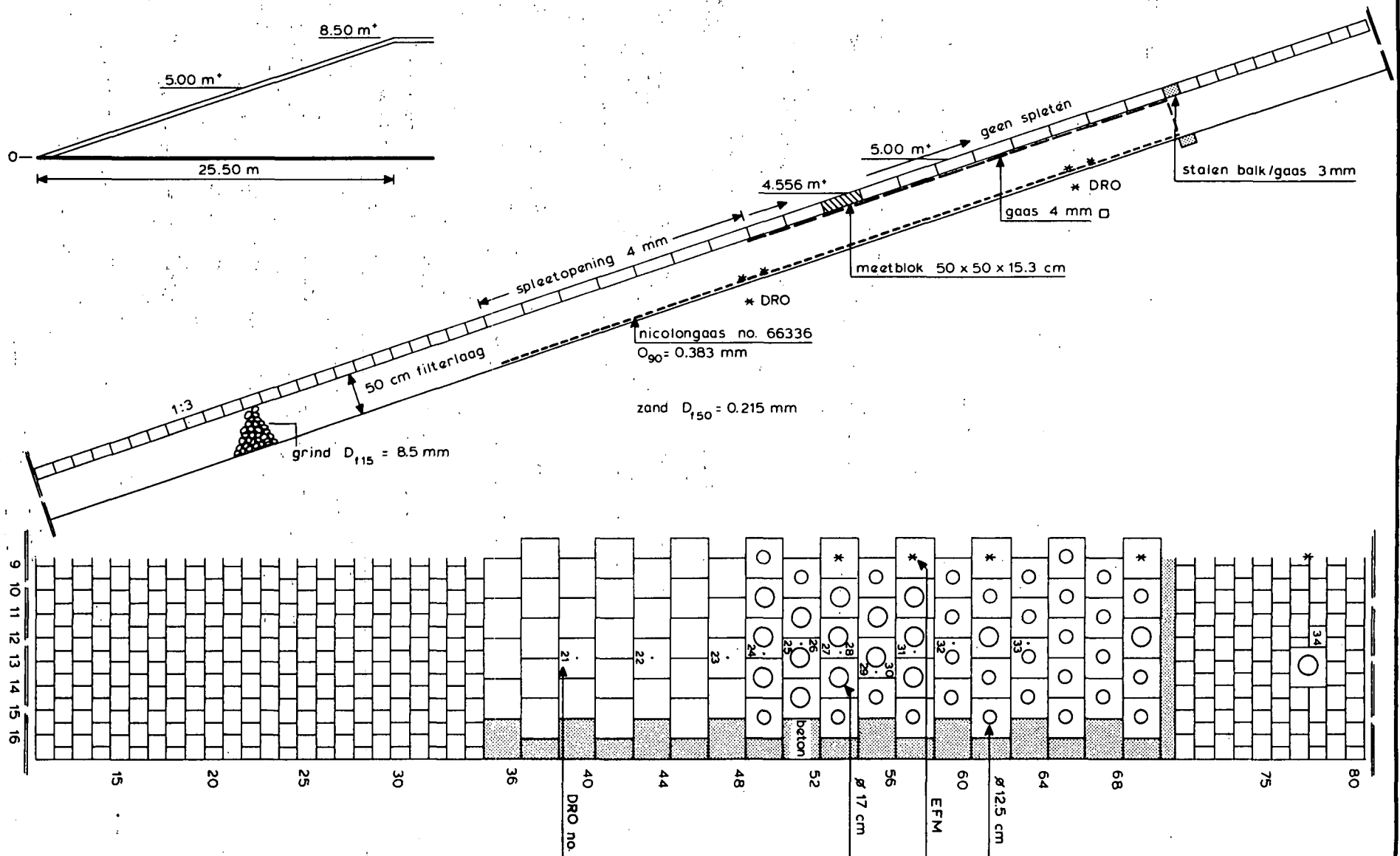
LOKATIE GEVULDE GATEN EN BLOKNUMMERS



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT	SERIE III	OOSTZIJDE
	SCHAAL 1:50	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 657	FIG. 4



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT	SERIE III	WESTZUDE
	SCHAAL 1:50	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 657	FIG. 5



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT

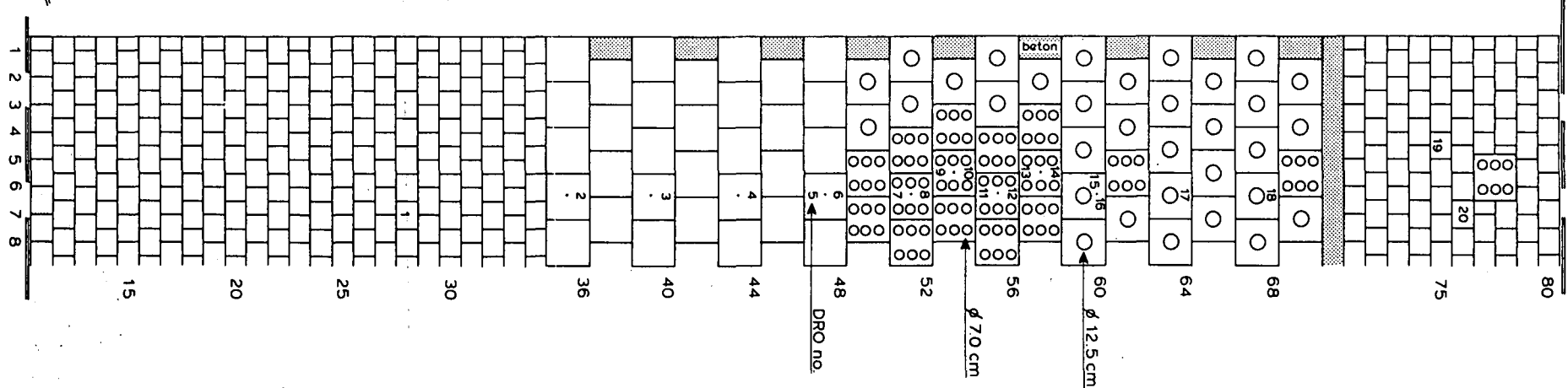
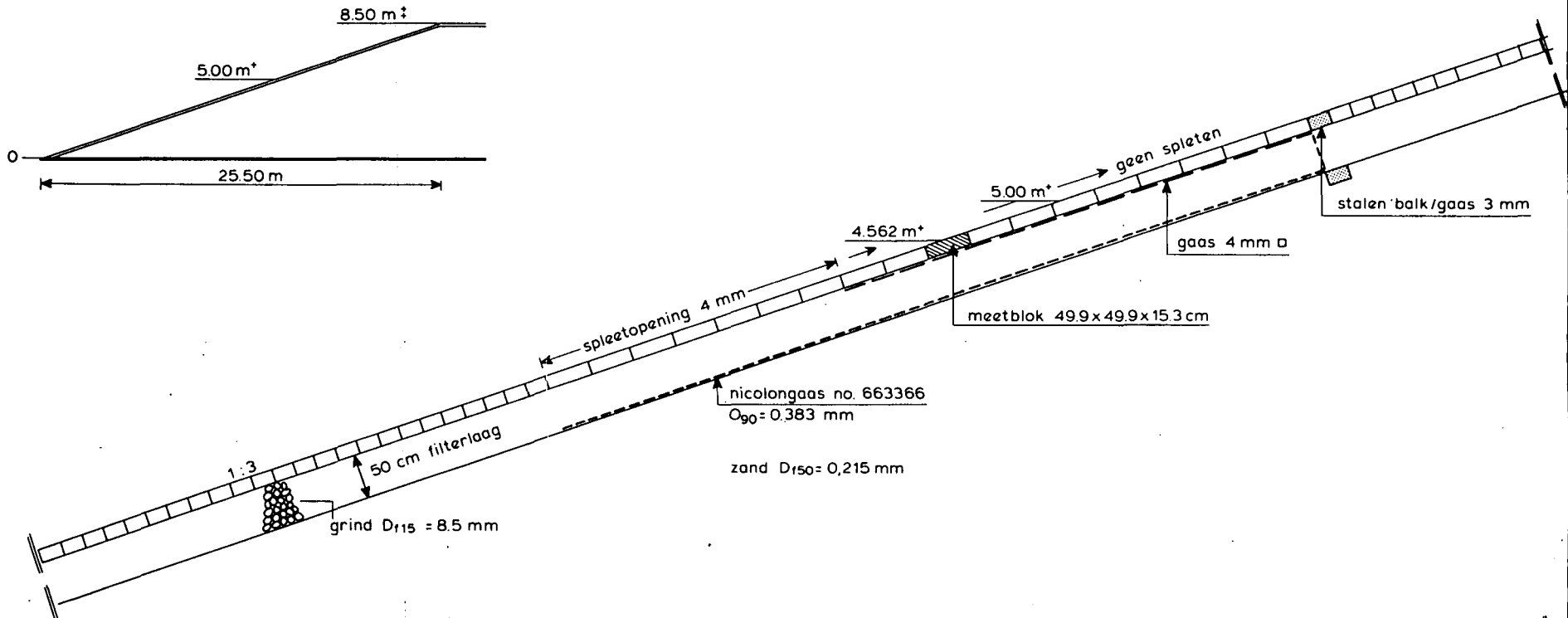
SERIE IV OOSTZIJDE

SCHAAL 1:50

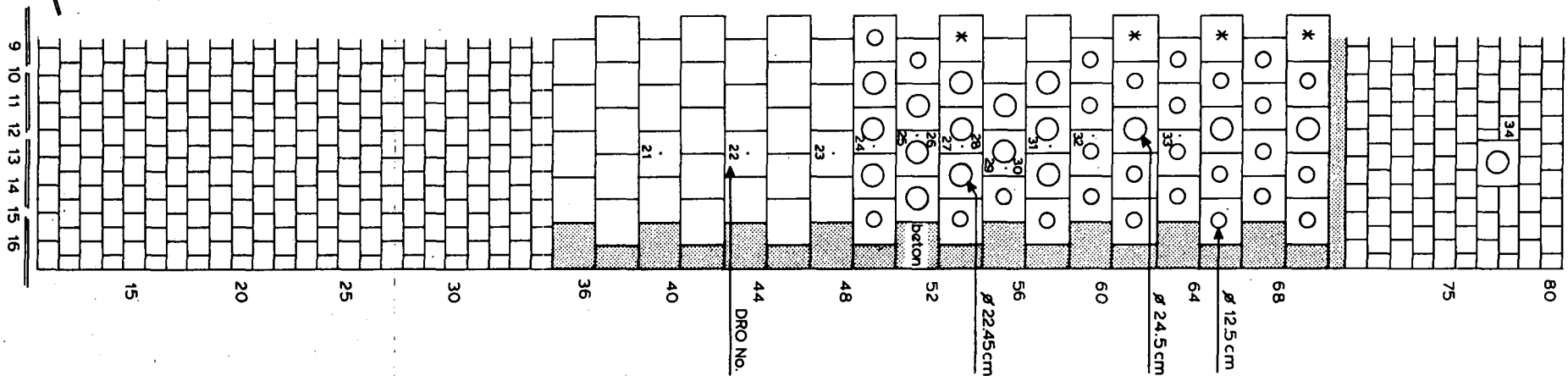
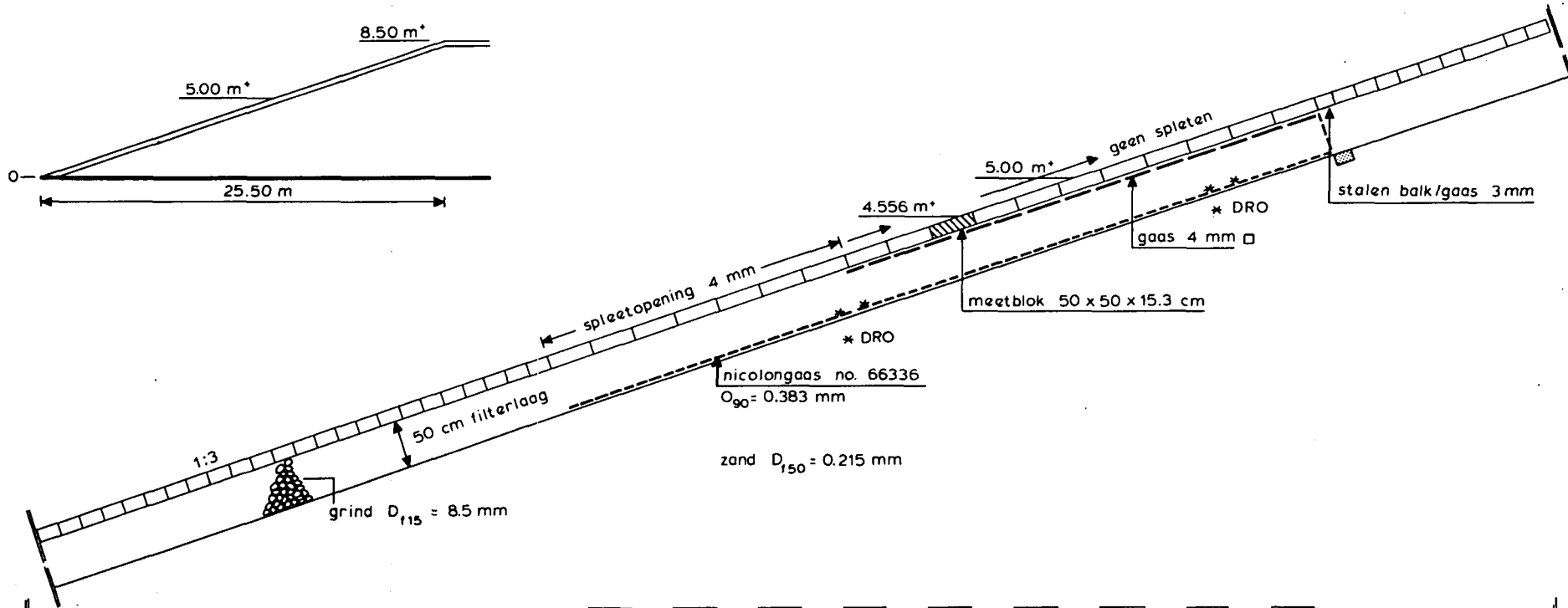
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 6



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT	SERIE IV	WESTZUDE
	SCHAAL 1:50	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	H 657	FIG. 7



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT

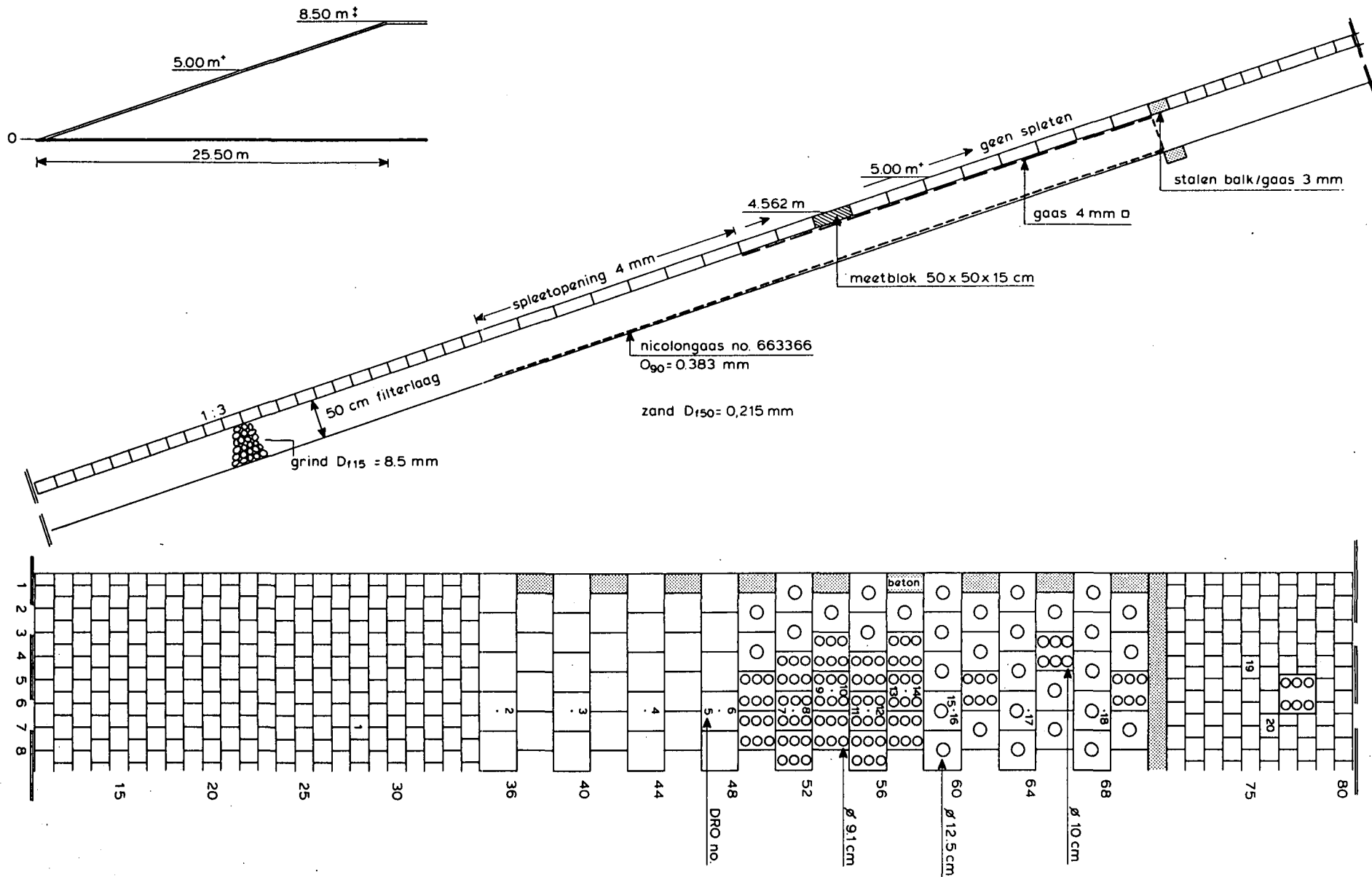
SERIE V OOSTZUDE

SCHAAL 1:50

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 8



DWARSDOORSNEDE EN BOVENAANZICHT

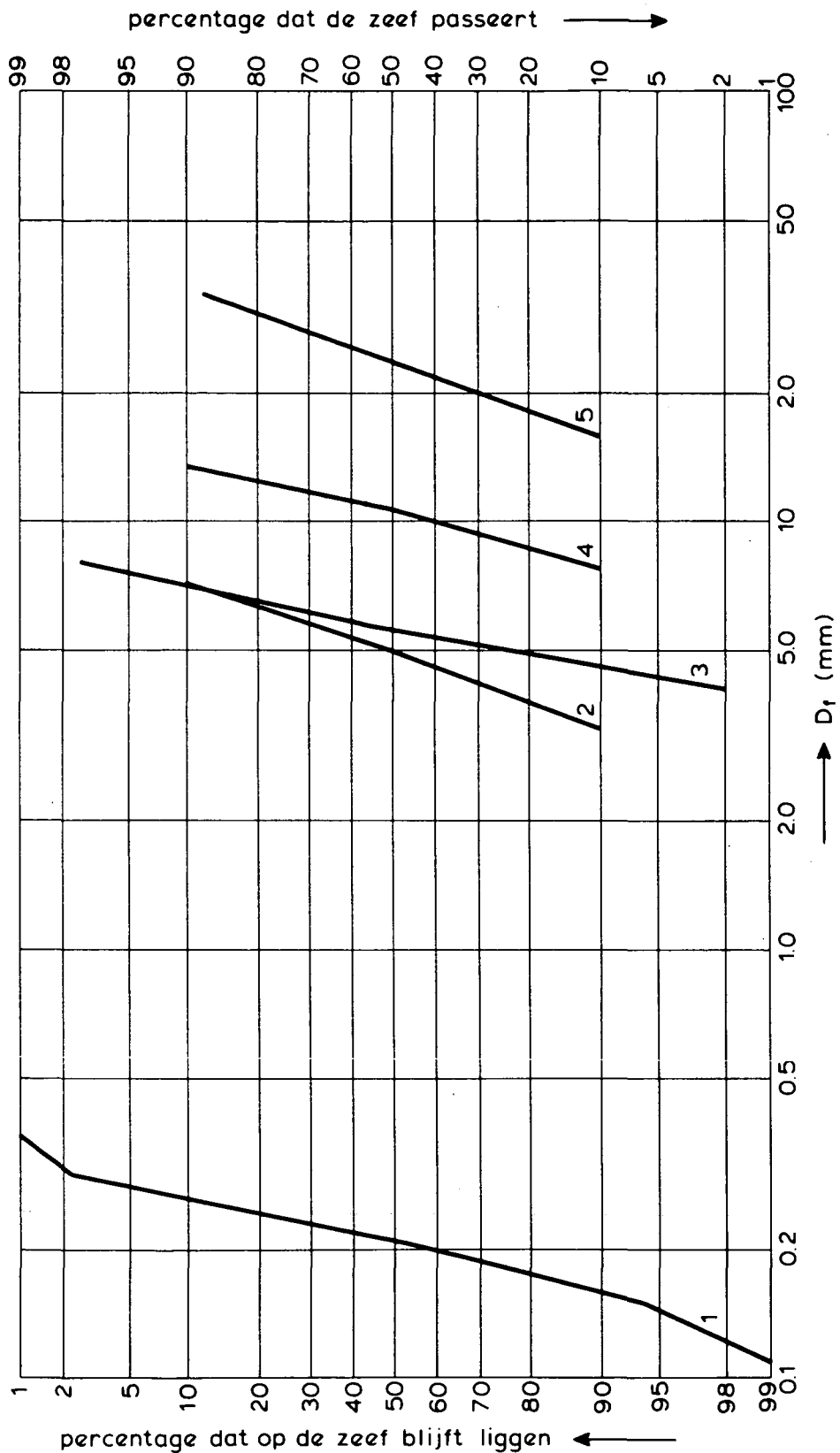
SERIE V WESTZUDE

SCHAAL 1:50

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

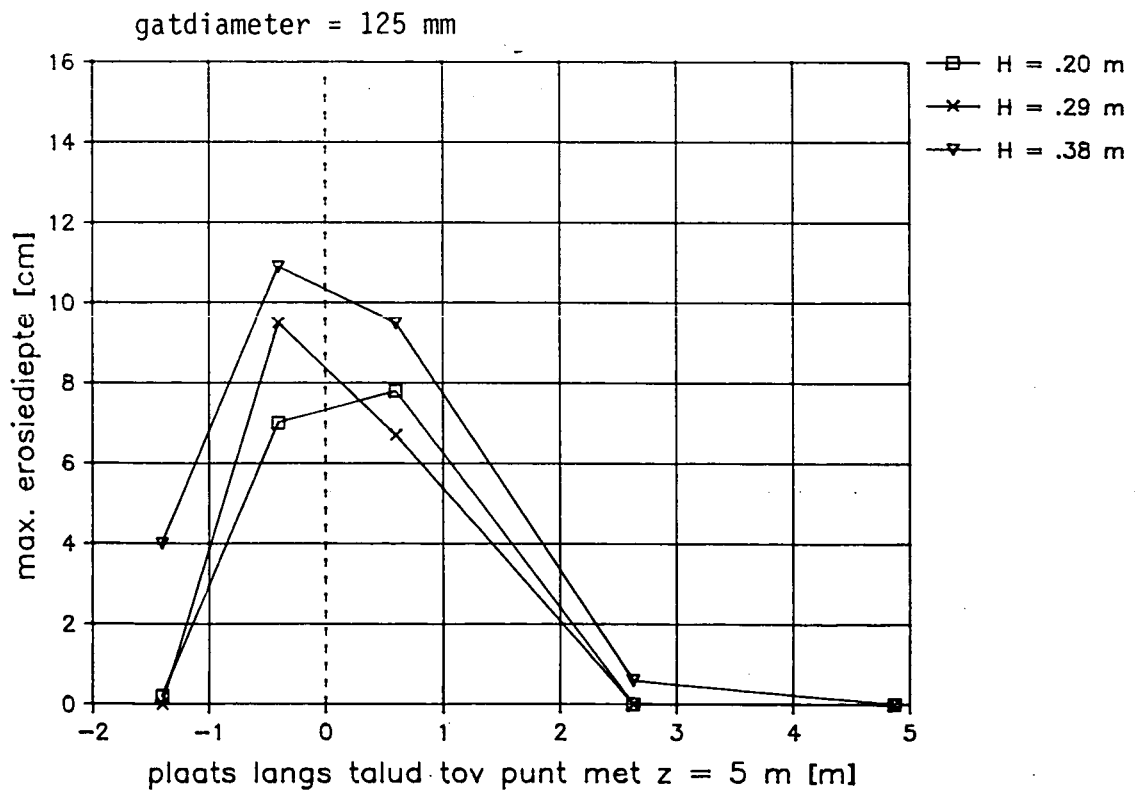
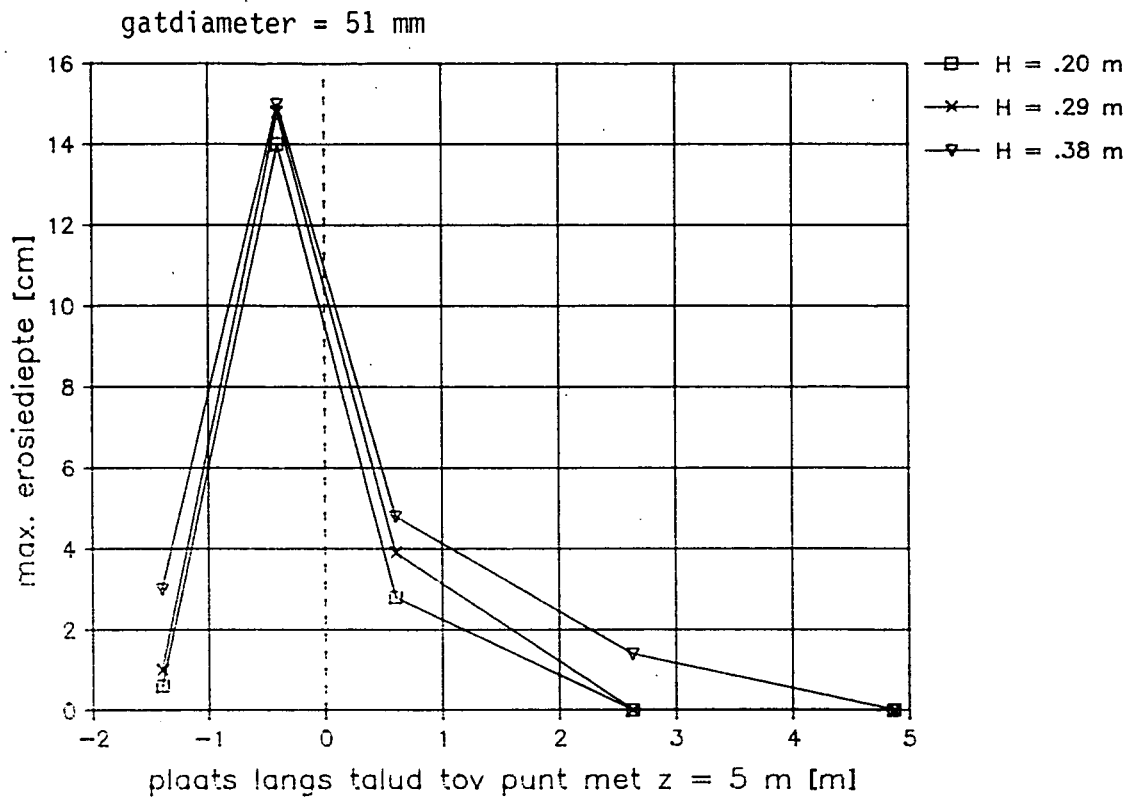
H 657

FIG. 9



gatvulling : 1 = zand ($D_{50} = 0,22$ mm)
 2 = kif ($D_{50} = 5,0$ mm)
 3 = grind ($D_{50} = 5,6$ mm)
 4 = grind ($D_{50} = 10,8$ mm) (ook als filter onder de blokken)
 5 = grind ($D_{50} = 23,5$ mm)

TOEGEPASTE GATVULLING



EROSIE - DIEPTE ALS FUNKTIE VAN PLAATS
T.O.V. SWL

$D_{50} = 5,0$ mm

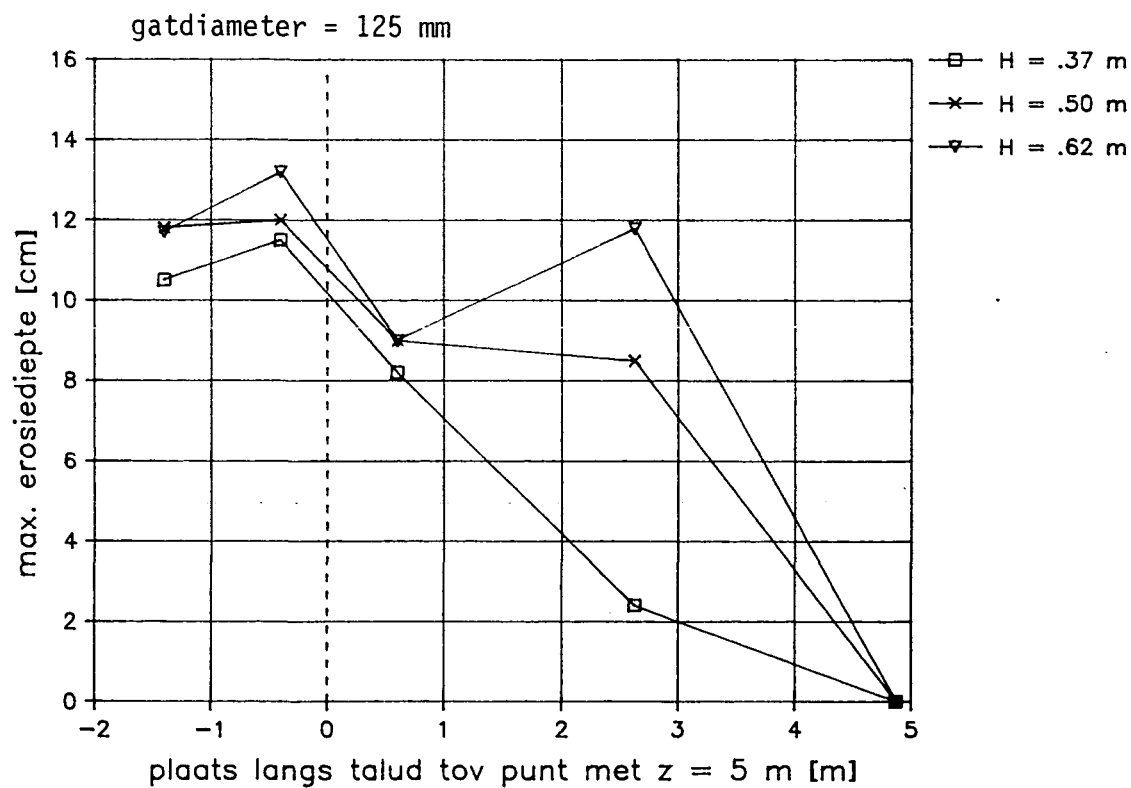
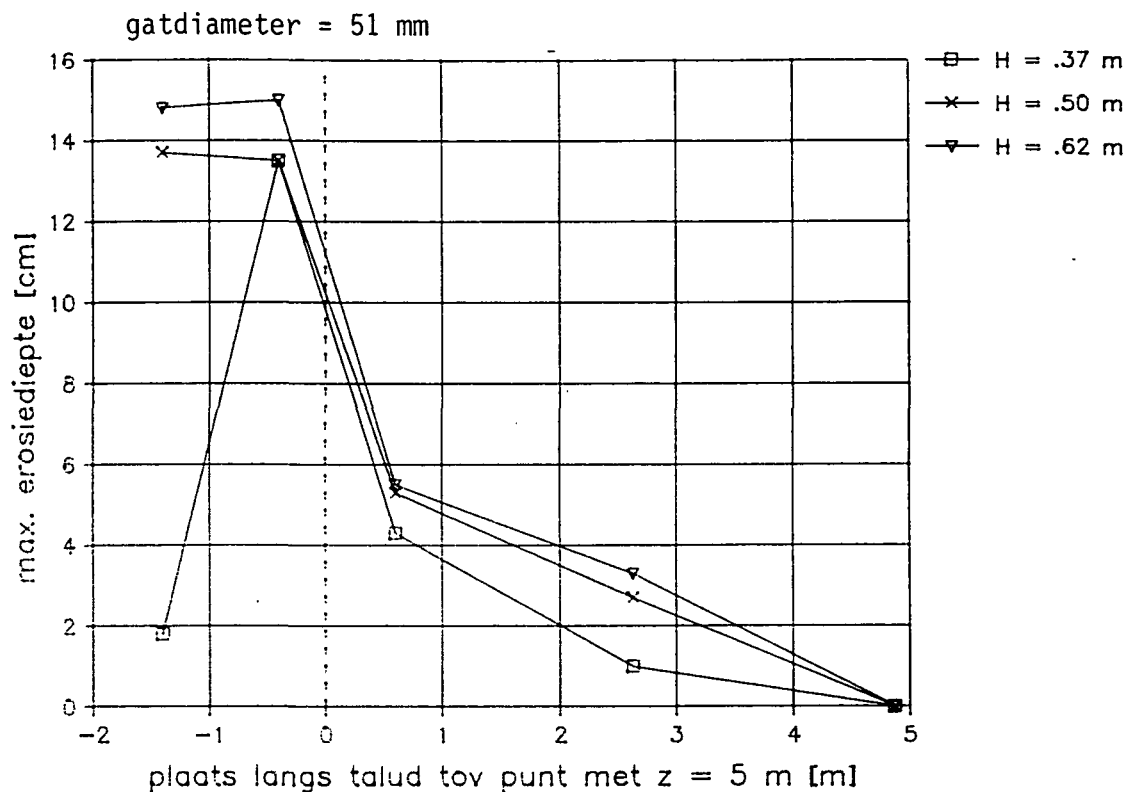
$T = 2,25$ s

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 11



EROSIE - DIEPTE ALS FUNKTIE VAN PLAATS
T.O.V. SWL

$D_{50} = 5,0 \text{ mm}$

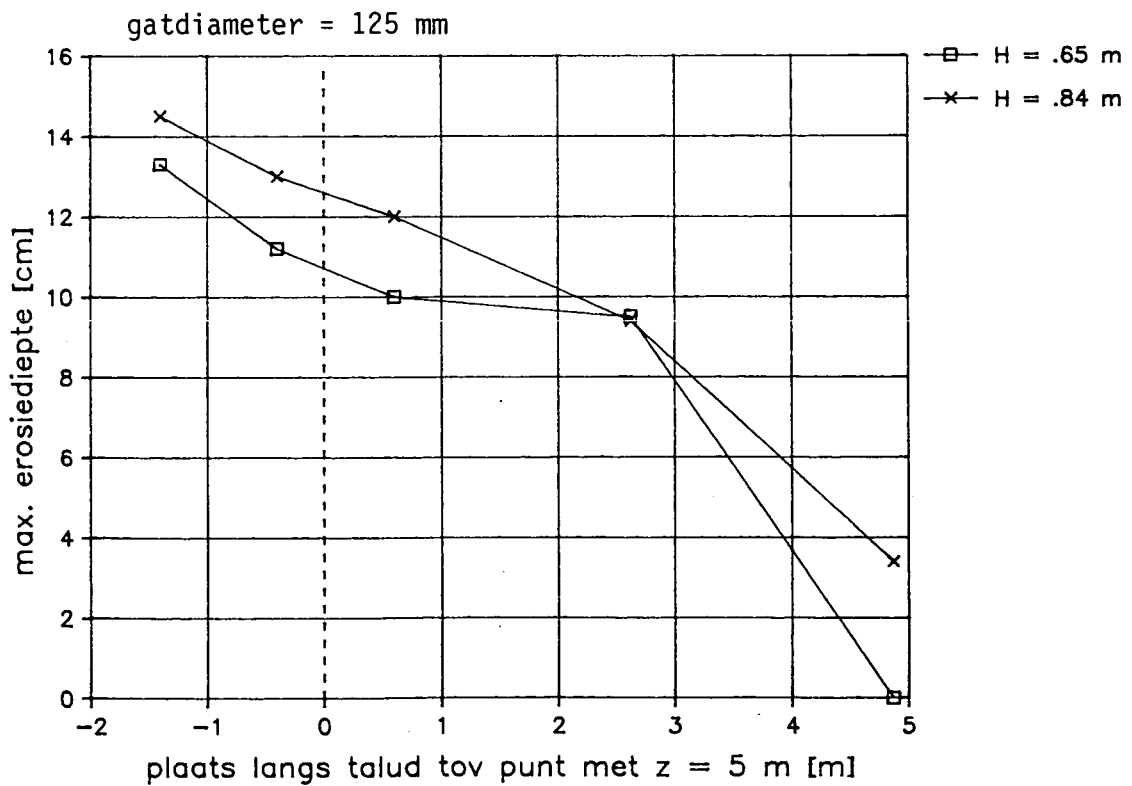
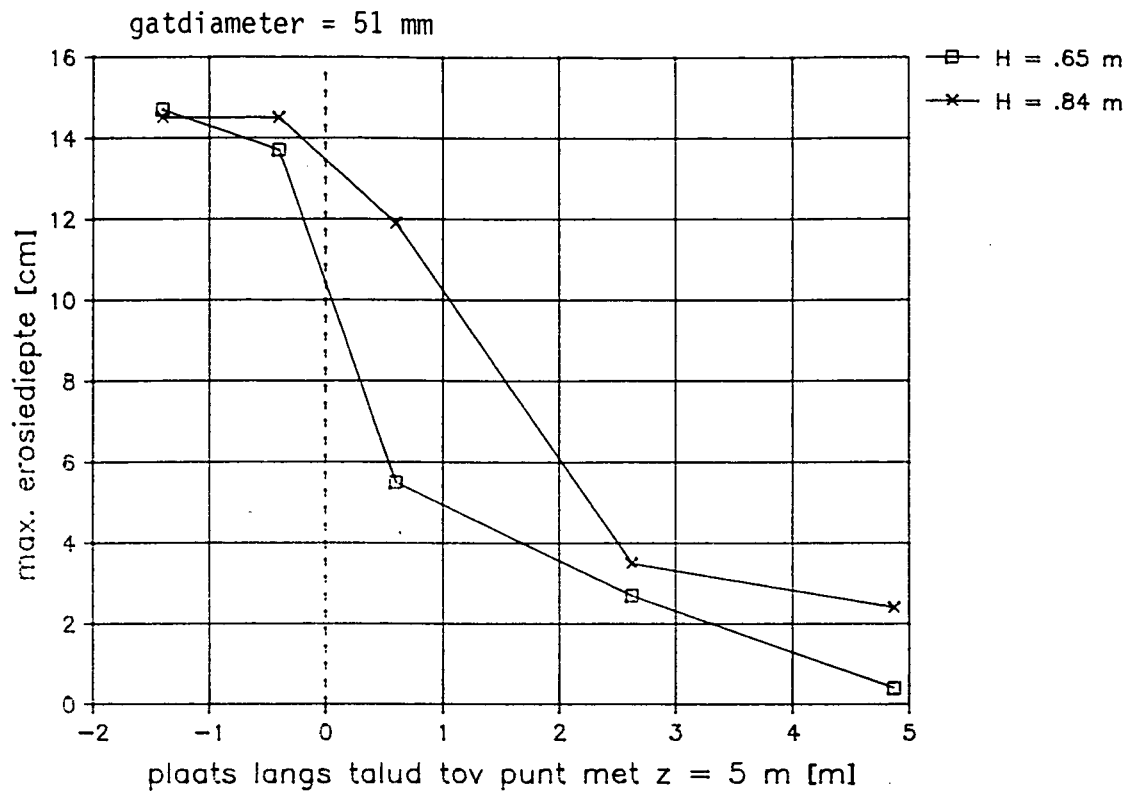
$T = 3 \text{ s}$

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 12



EROSIE - DIEPTE ALS FUNKTIE VAN PLAATS
T.O.V. SWL

$D_{50} = 5,0$ mm

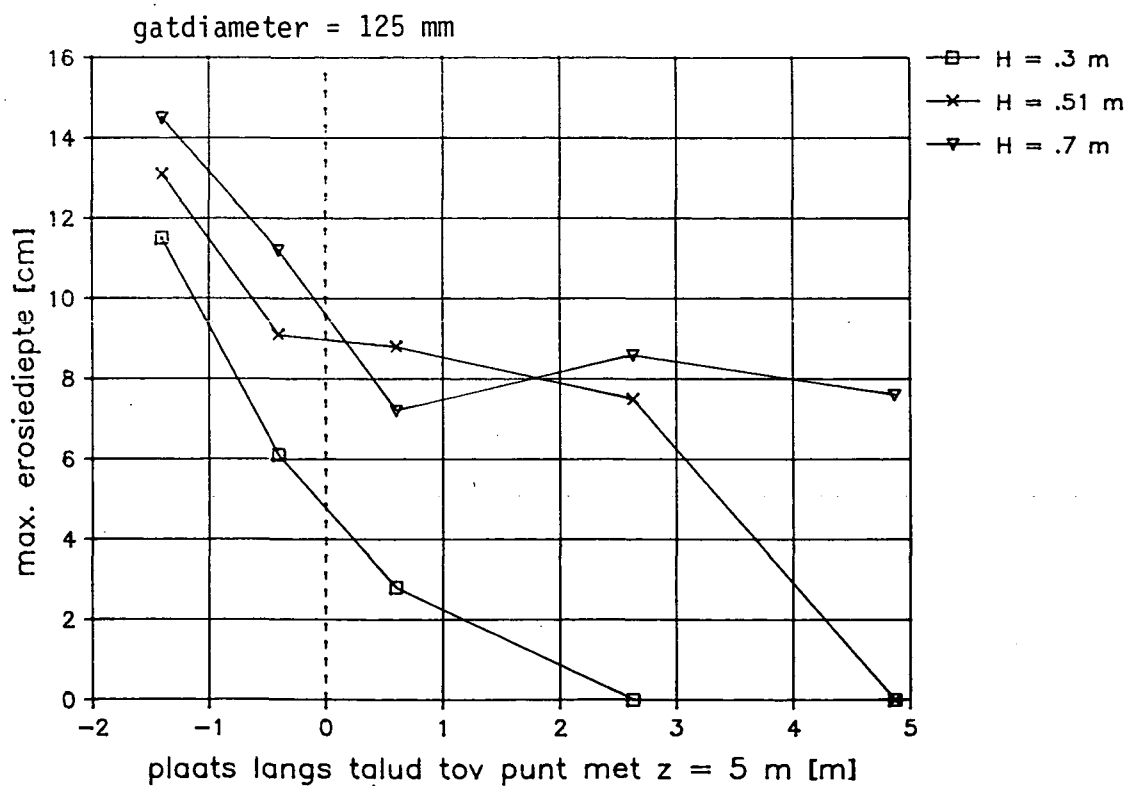
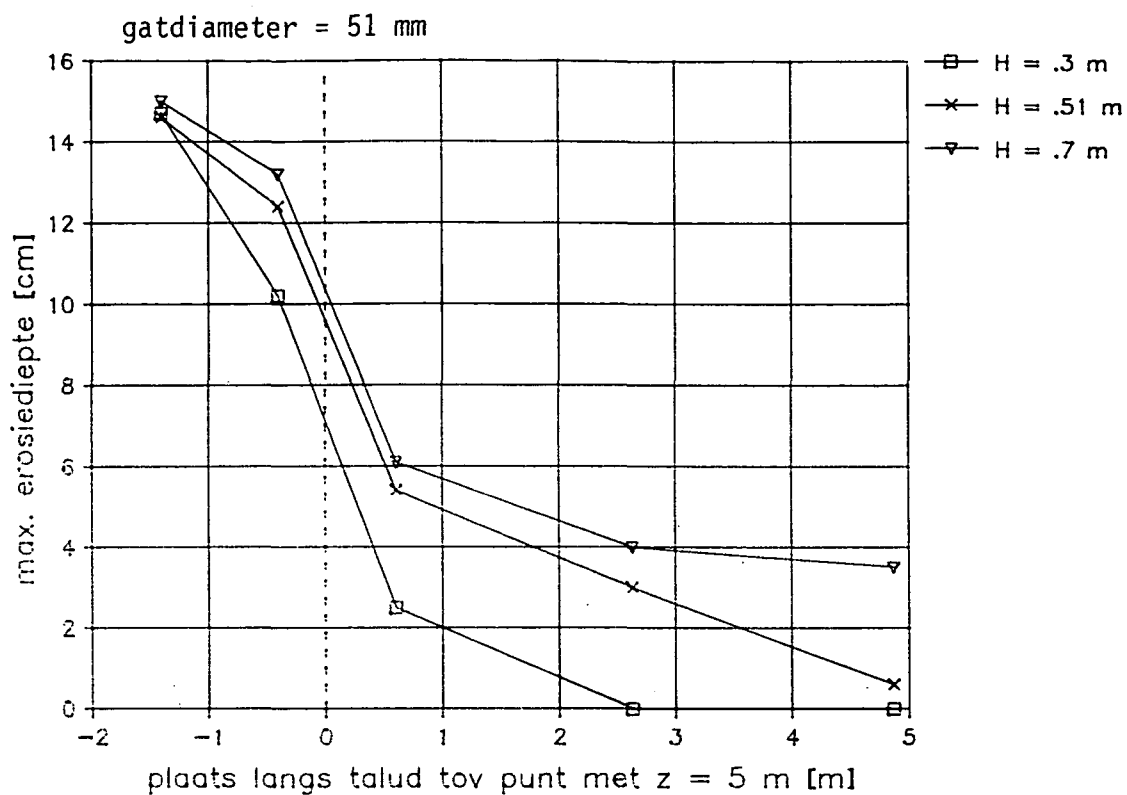
$T = 4$ s

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 13



EROSIE - DIEPTE ALS FUNKTIE VAN PLAATS
T.O.V. SWL

D₅₀ = 5,0 mm

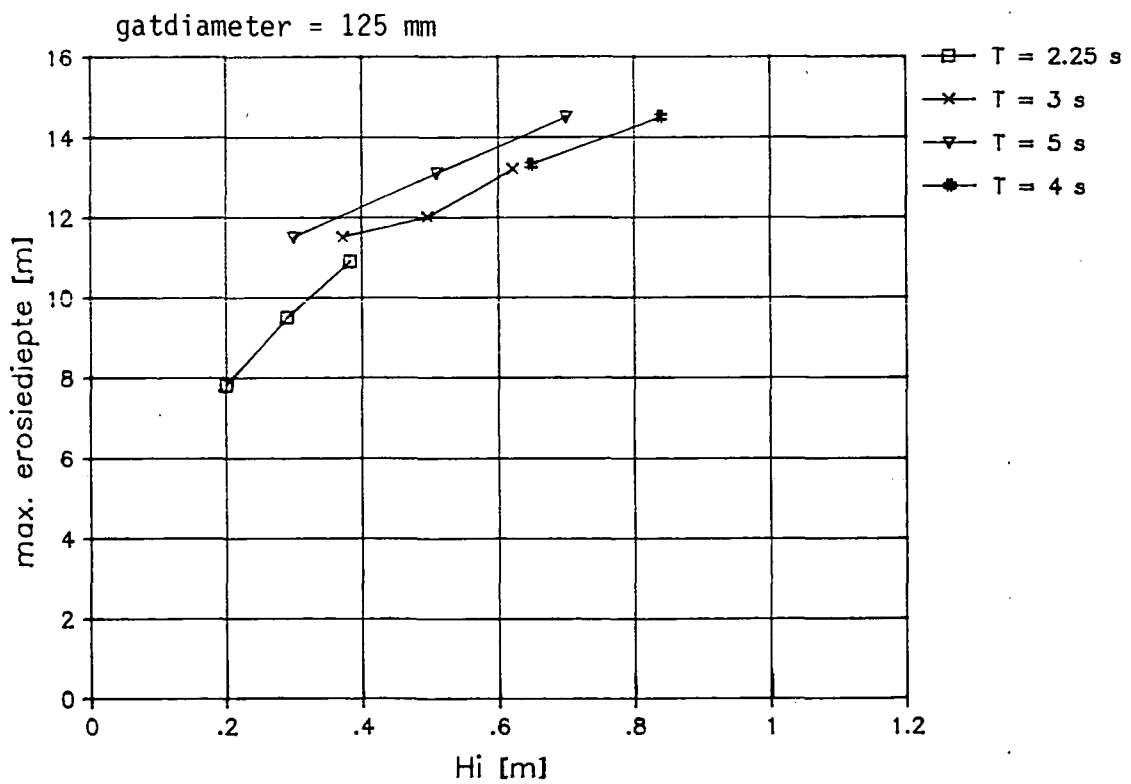
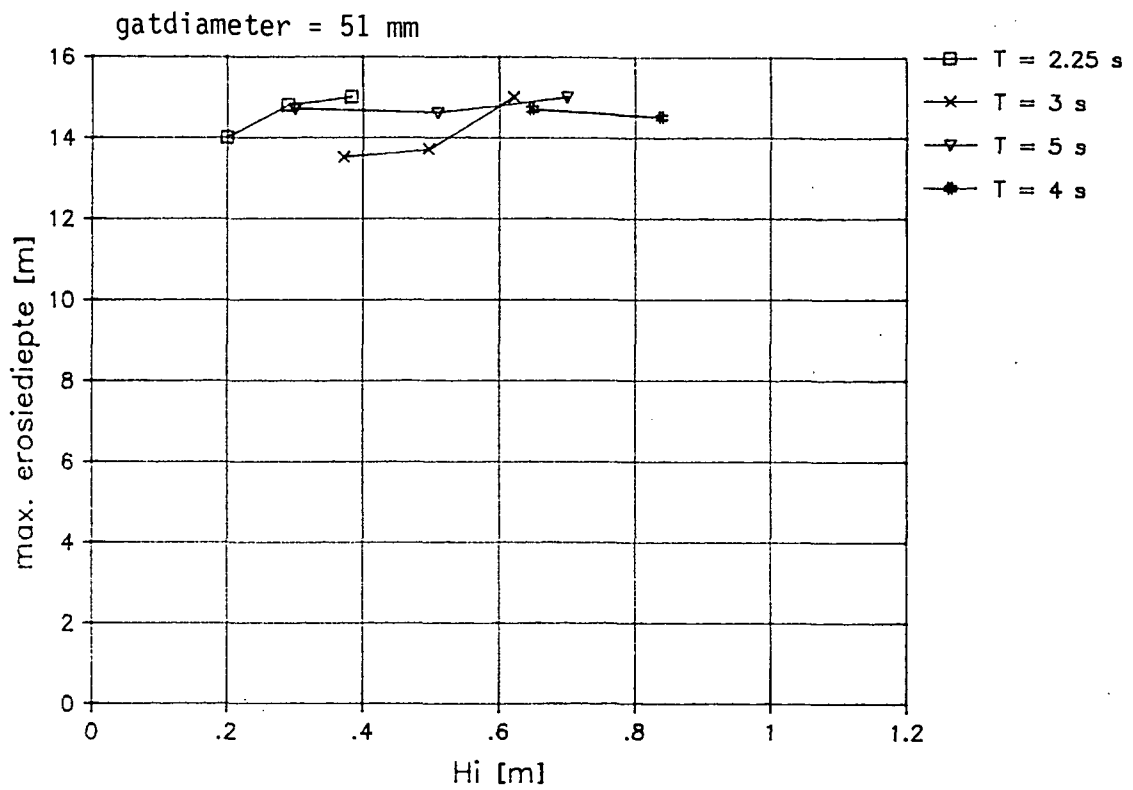
T = 5 s

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 14



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

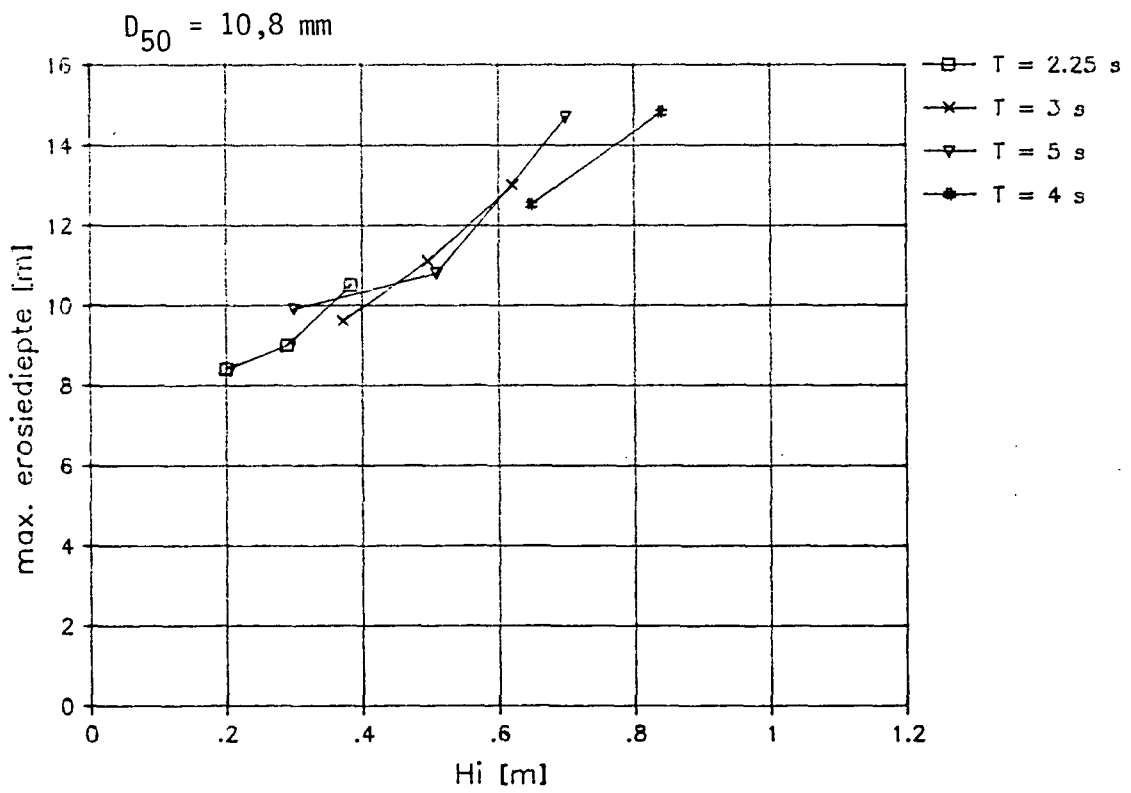
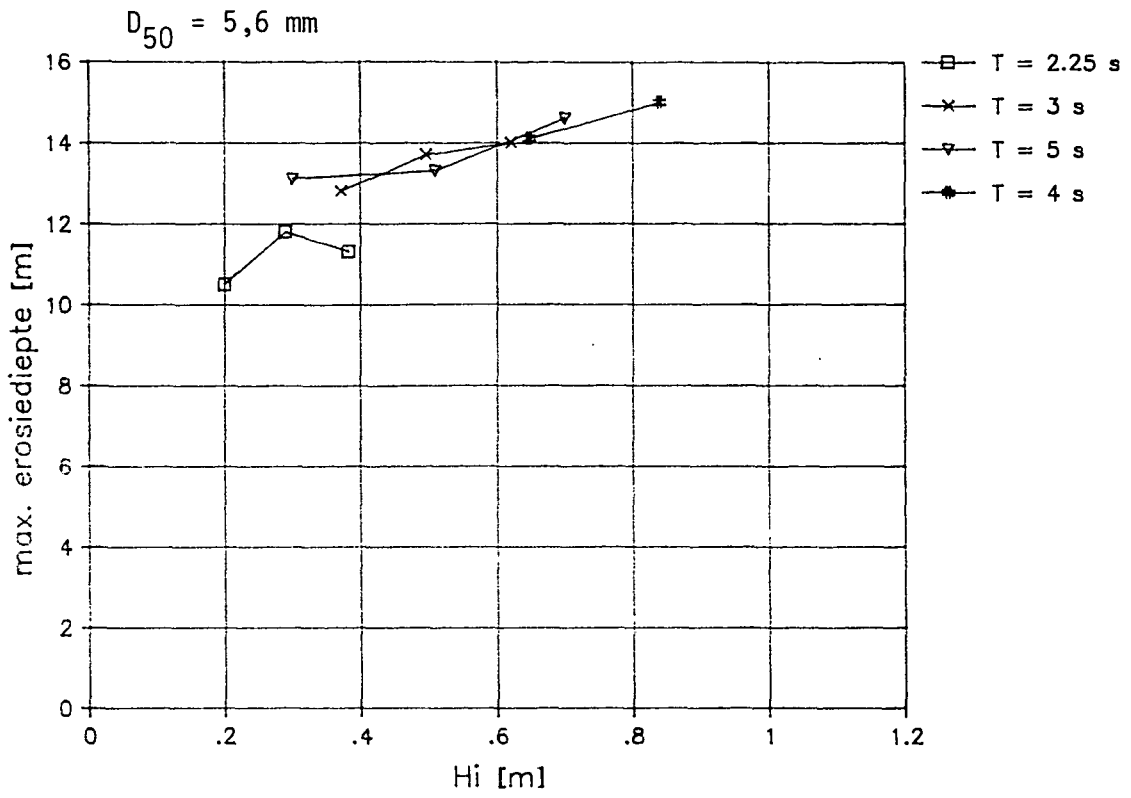
$D_{50} = 5,0 \text{ mm}$

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 15



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

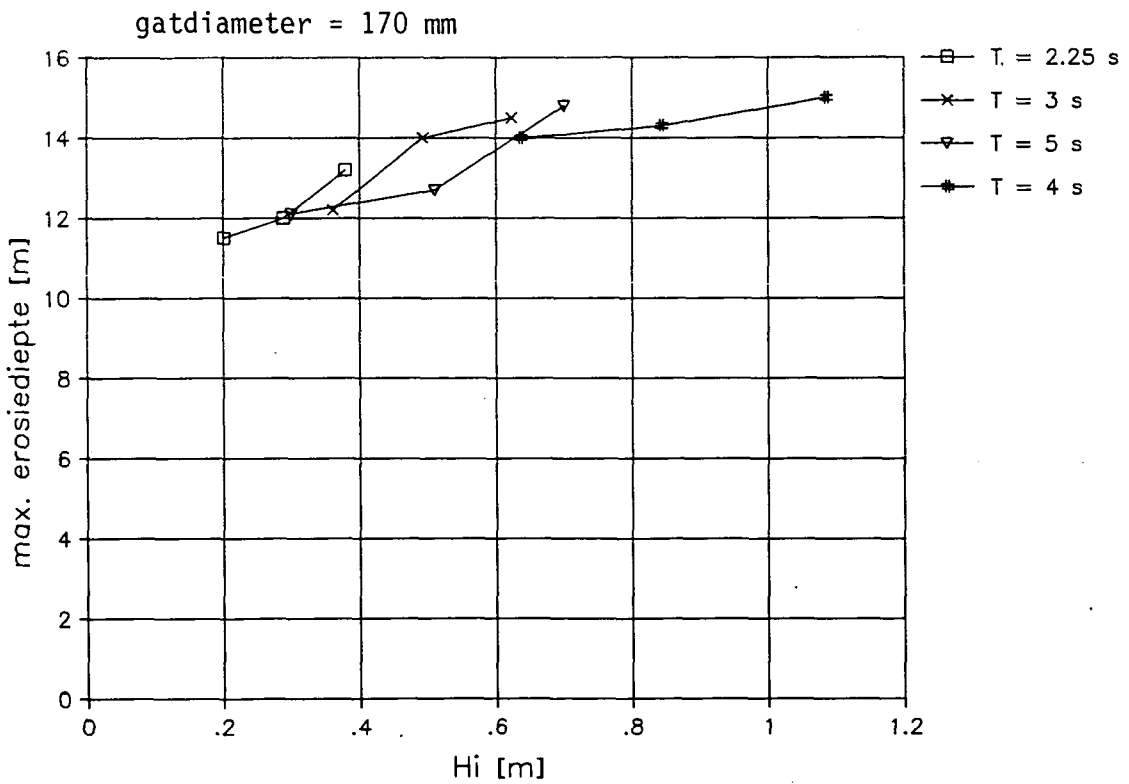
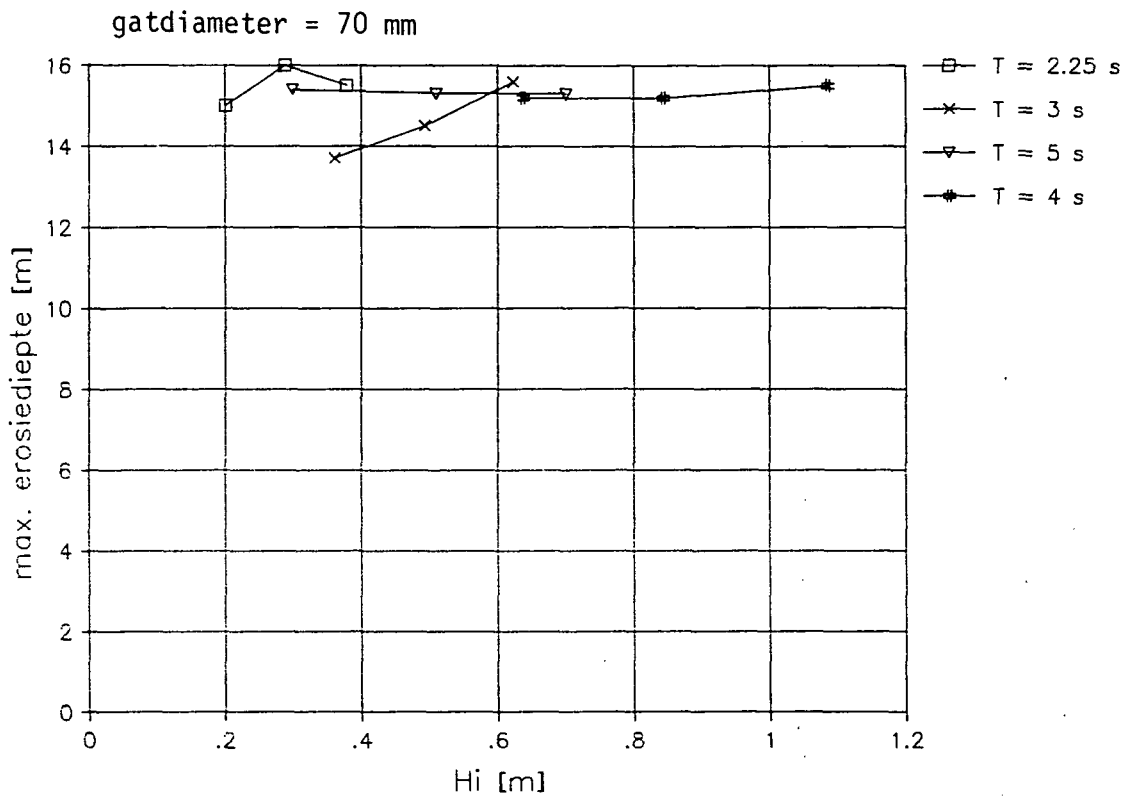
G = 125 mm

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 16



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

D₅₀ = 5,0 mm

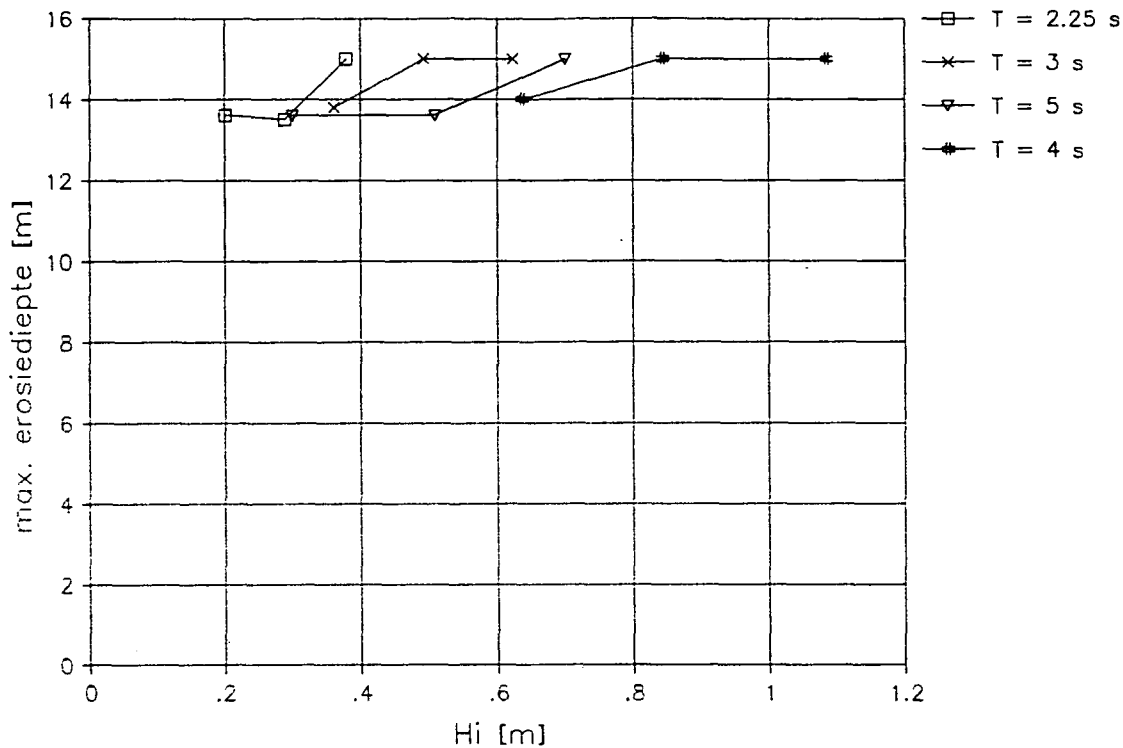
SERIE 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

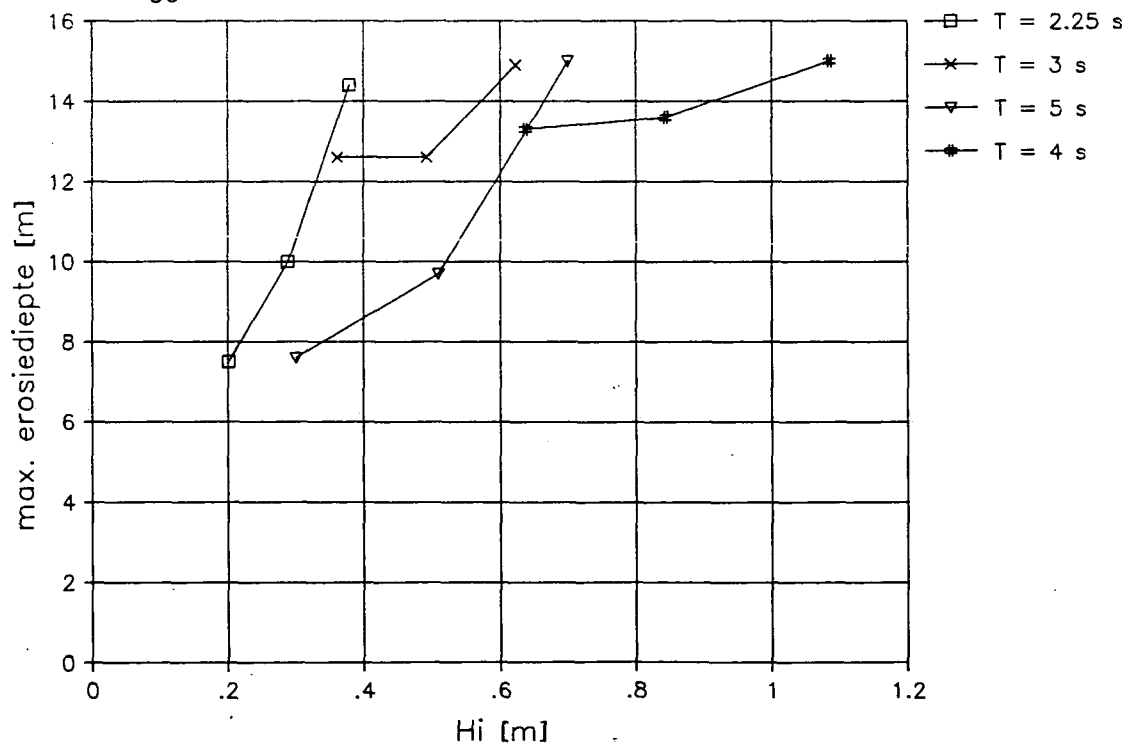
H 657

FIG. 17

$D_{50} = 0,22 \text{ mm}$



$D_{50} = 23,5 \text{ mm}$



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

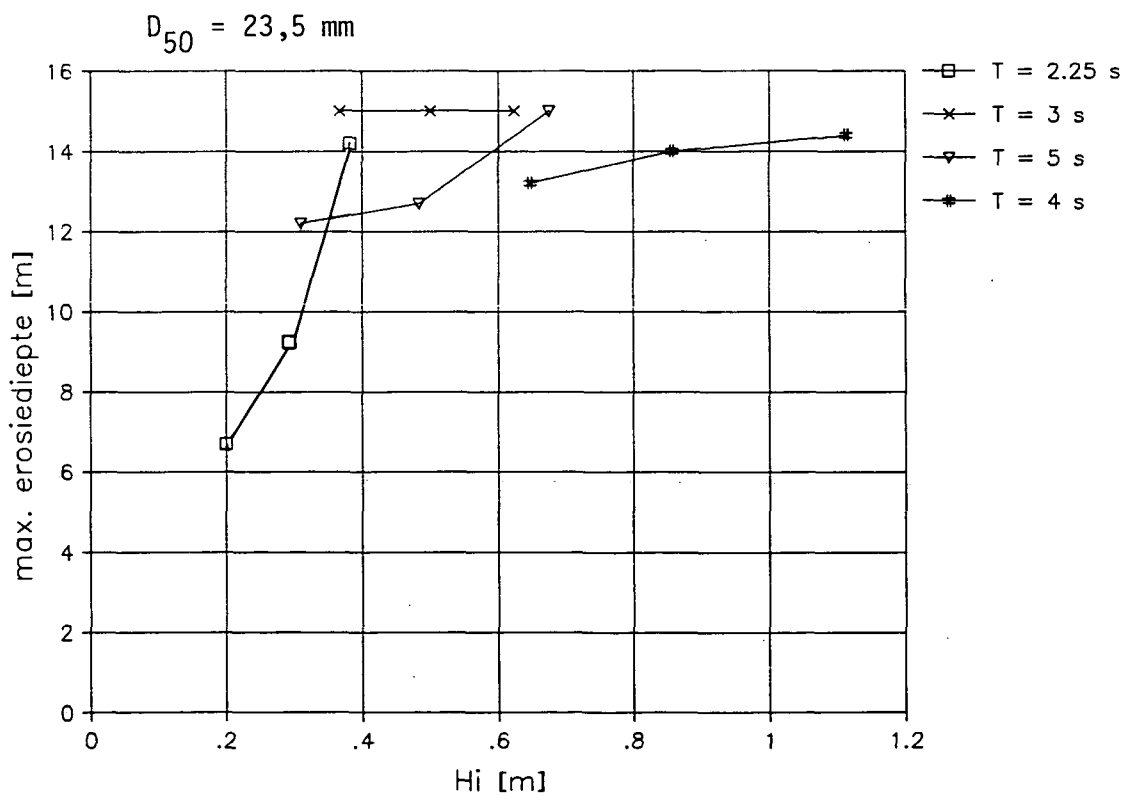
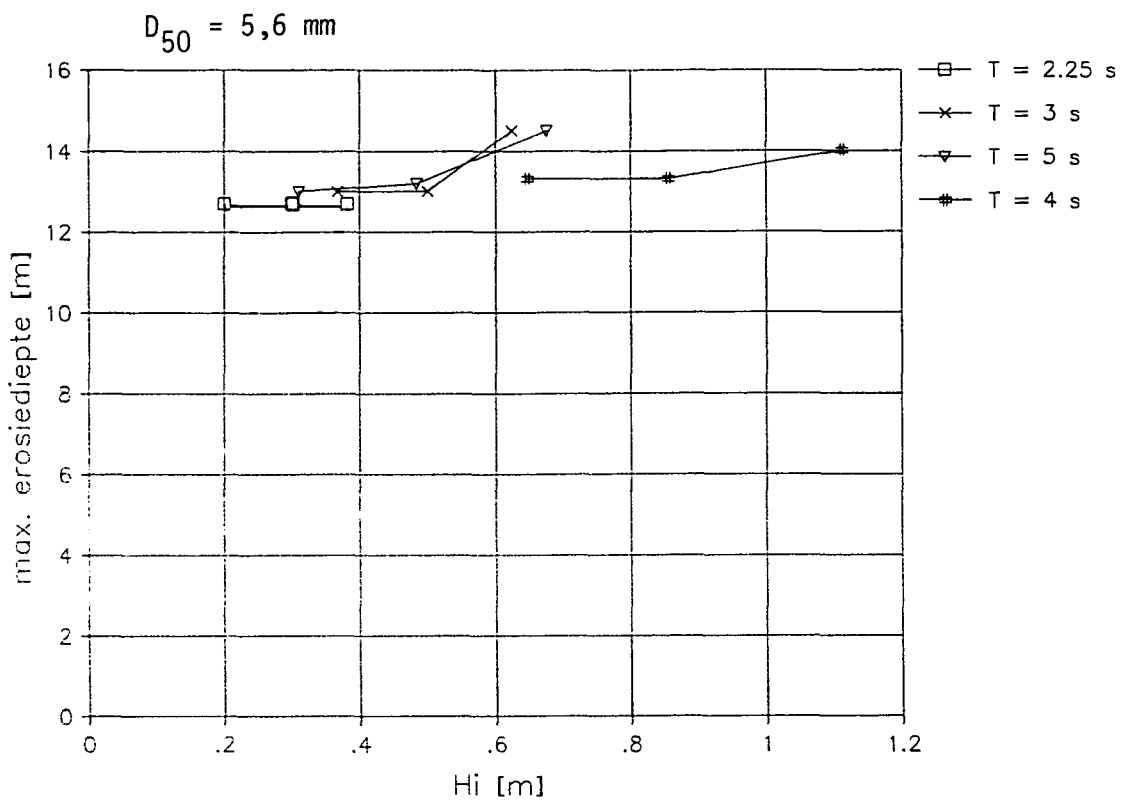
G = 170 mm

SERIE 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 18



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

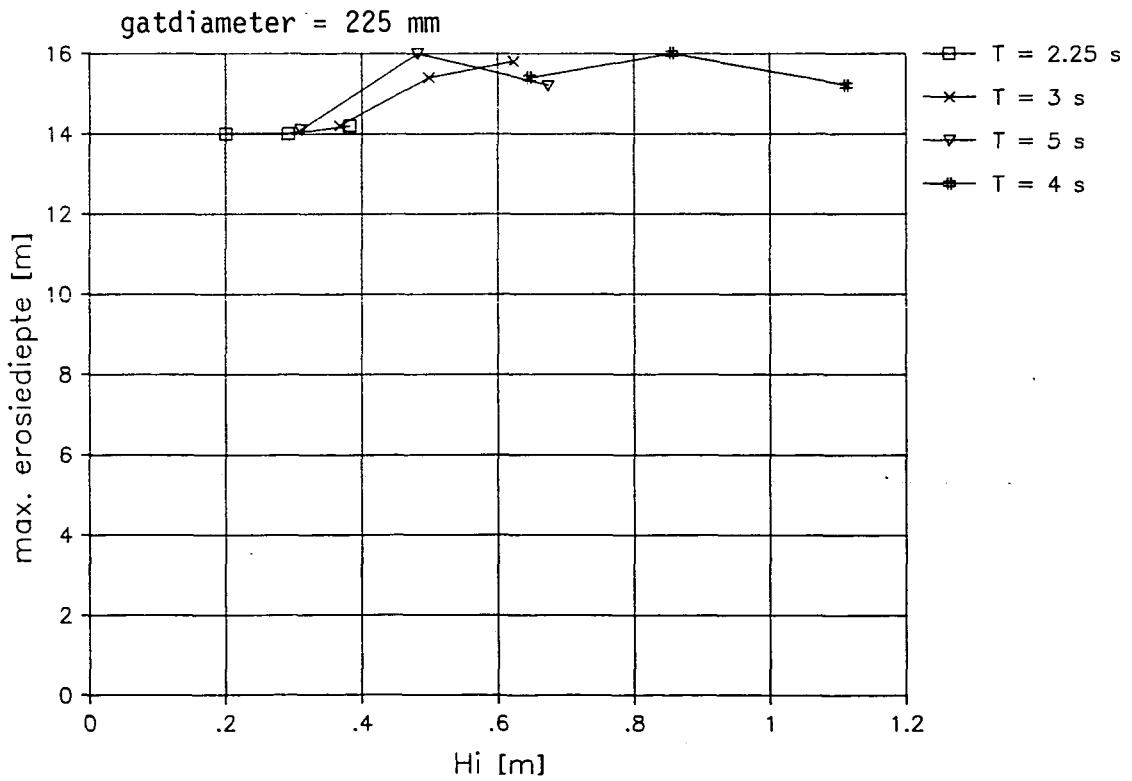
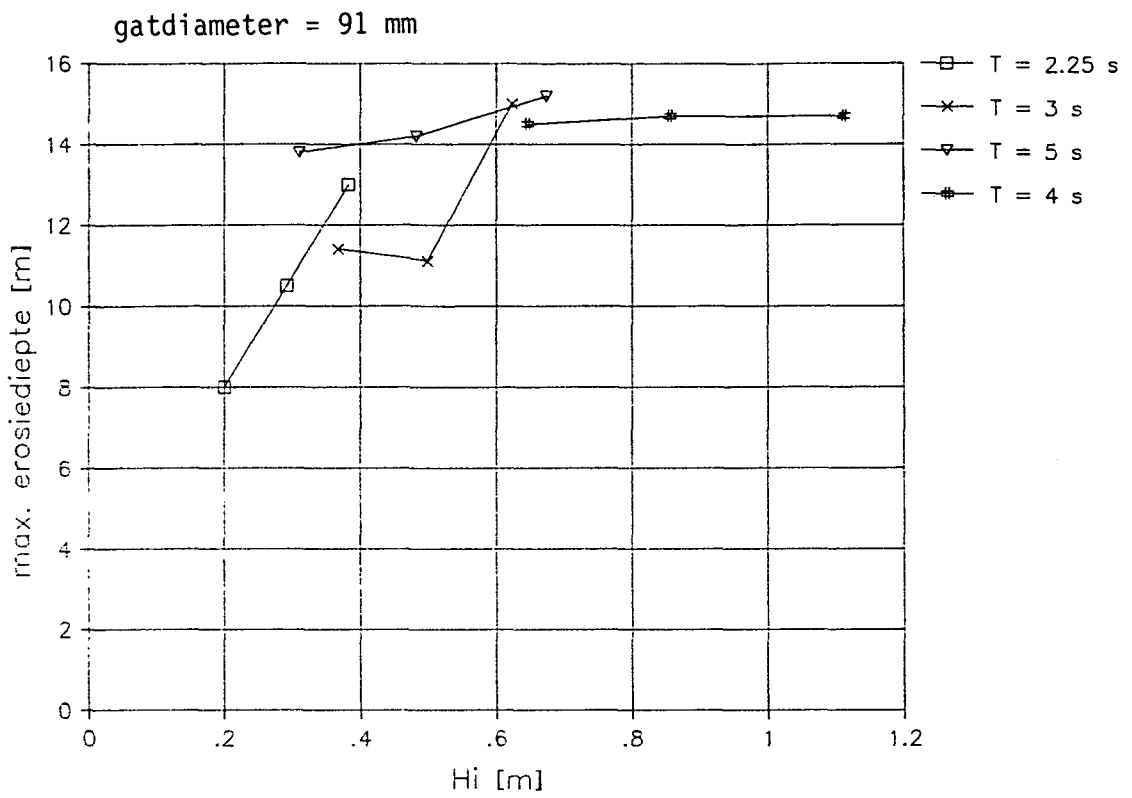
G = 225 mm

SERIE 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 19



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

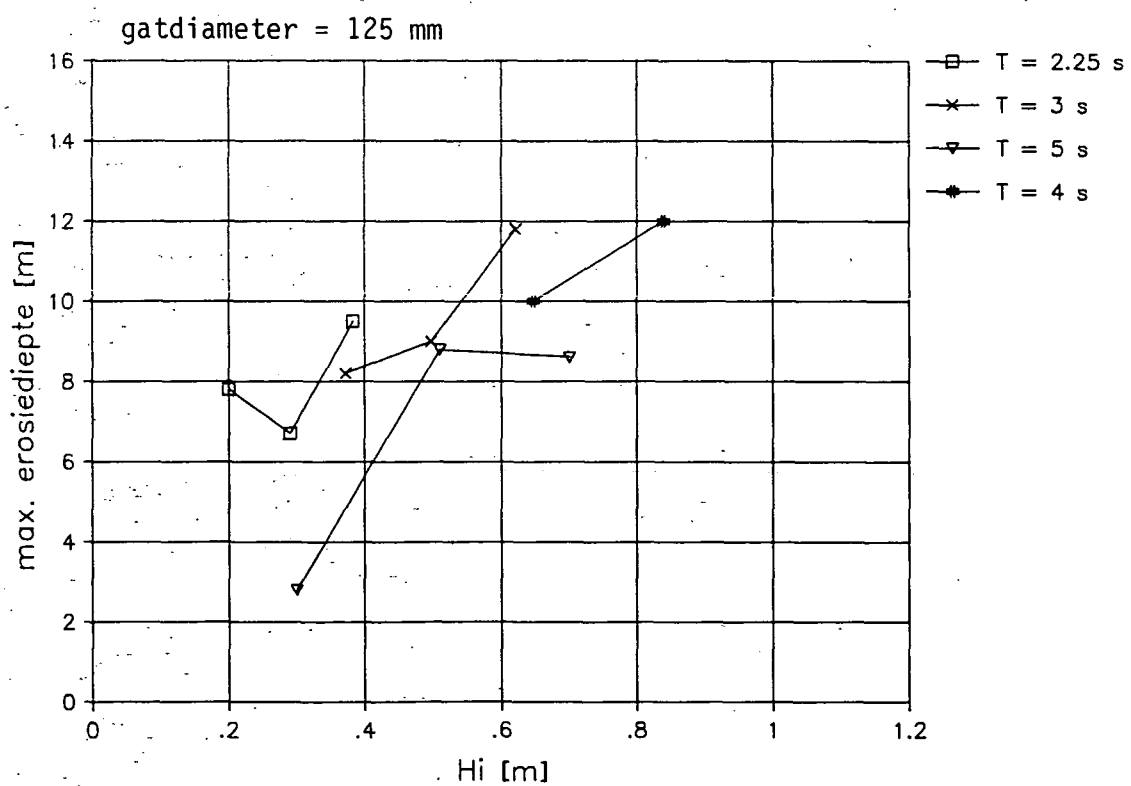
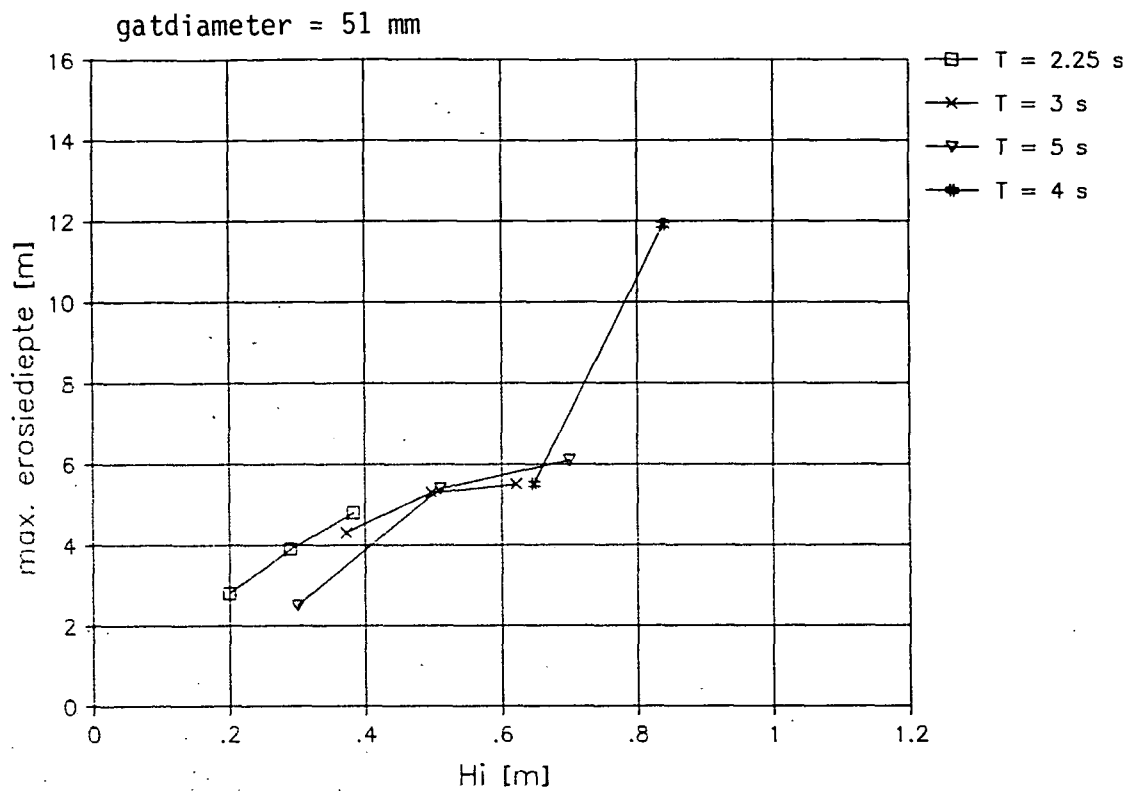
D₅₀=5,0mm

SERIE 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 20



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

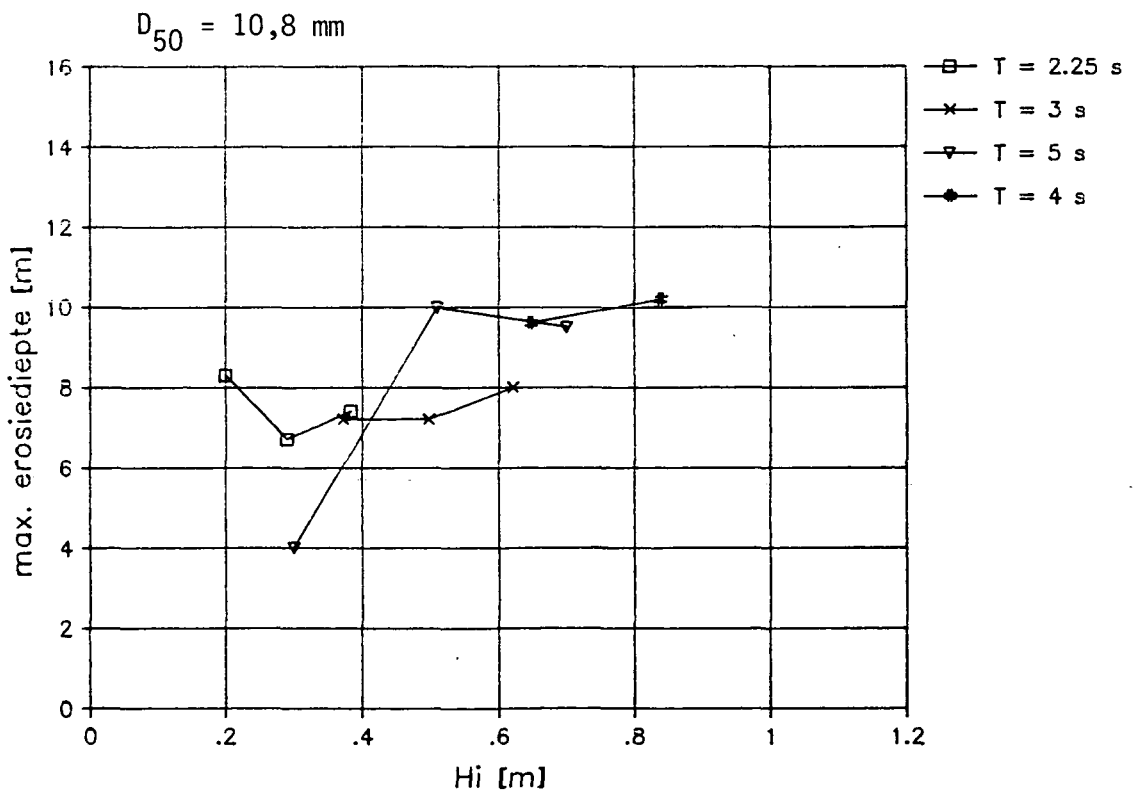
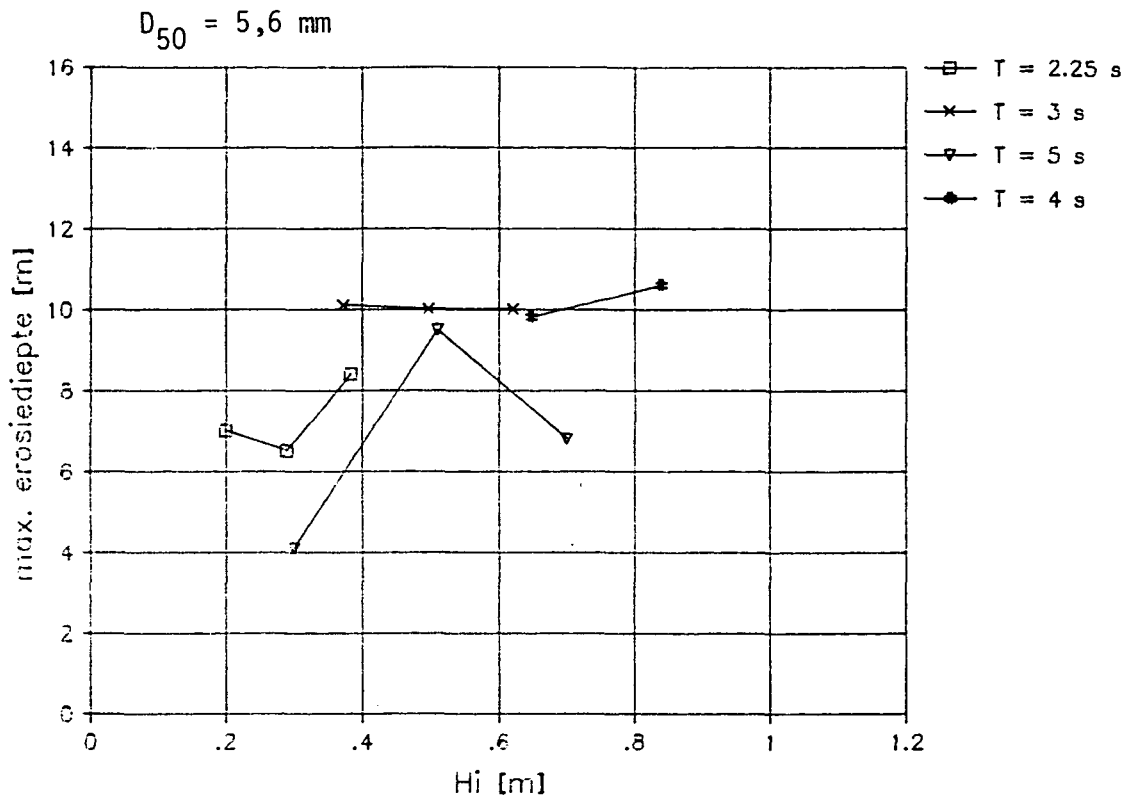
D₅₀=5,0mm

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 21



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

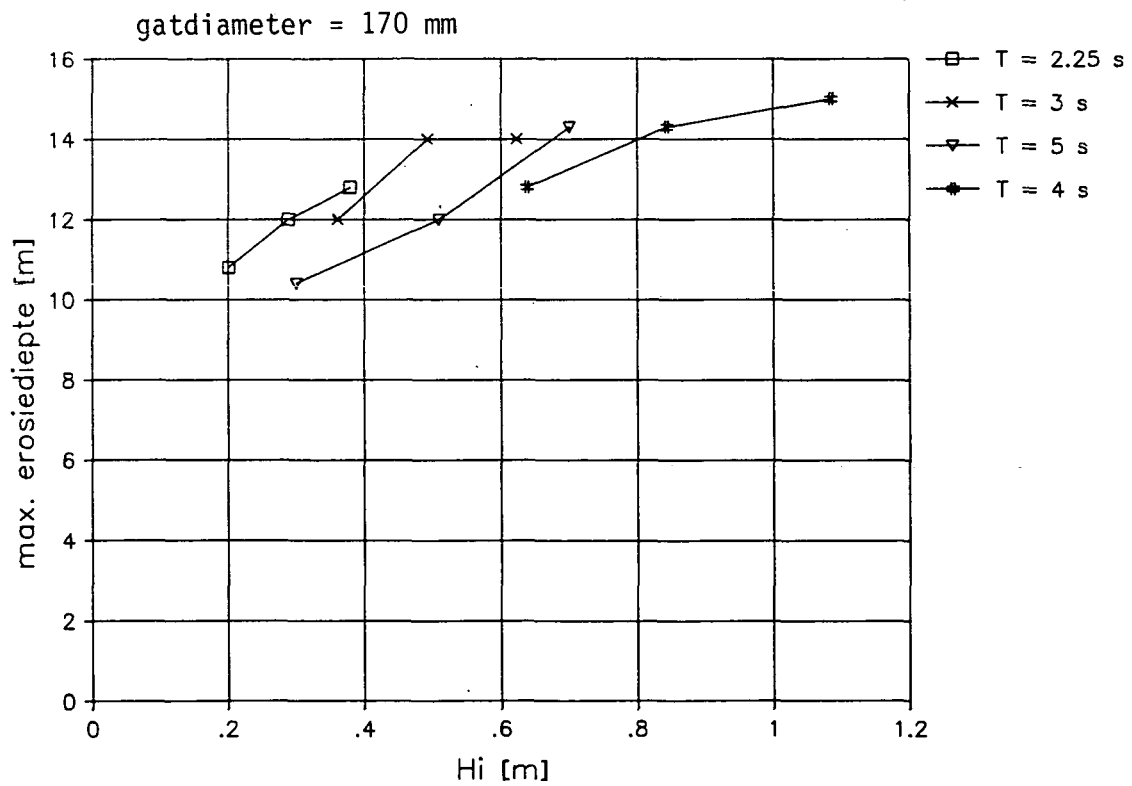
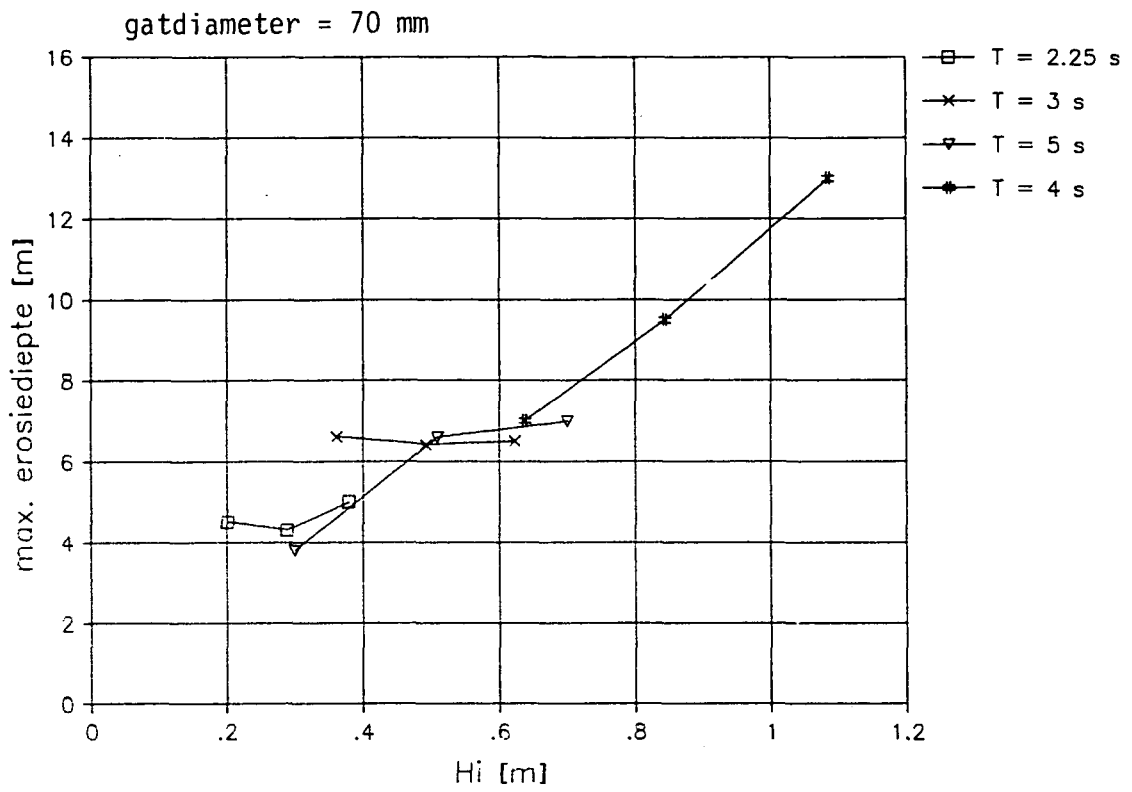
G = 125 mm

SERIE 3

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 22



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

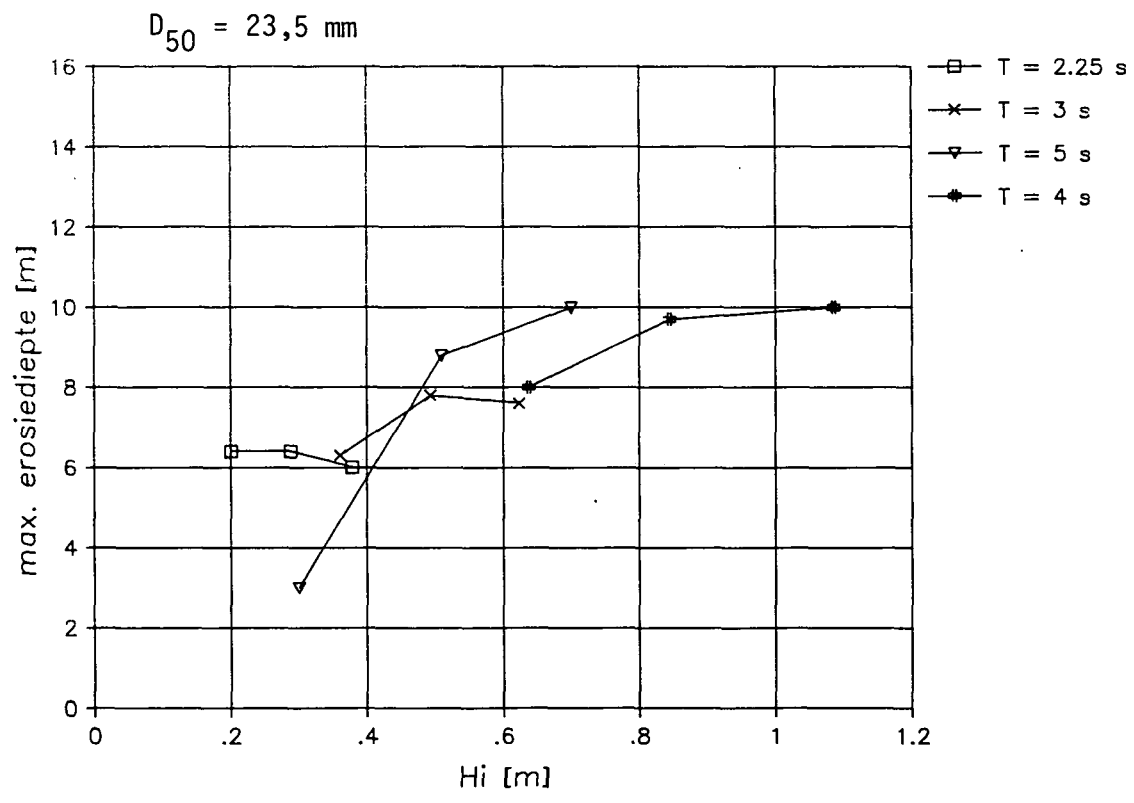
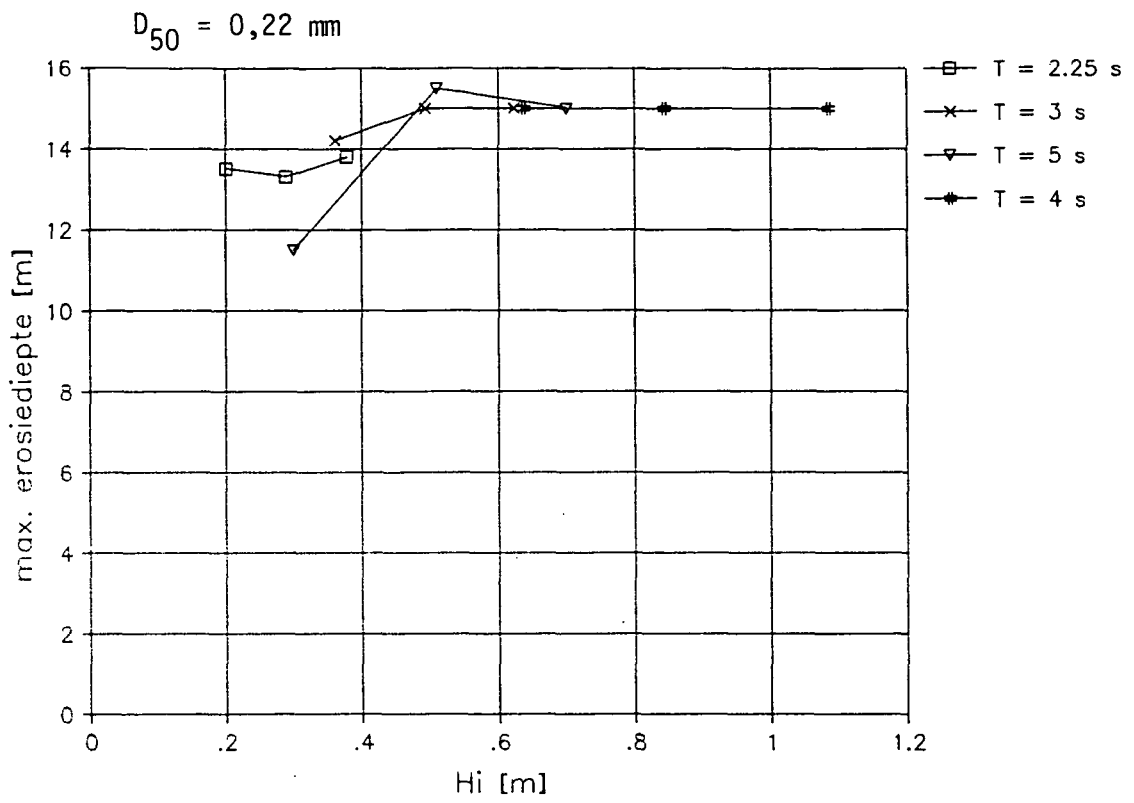
D₅₀=5,0mm

SERIE 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 23



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

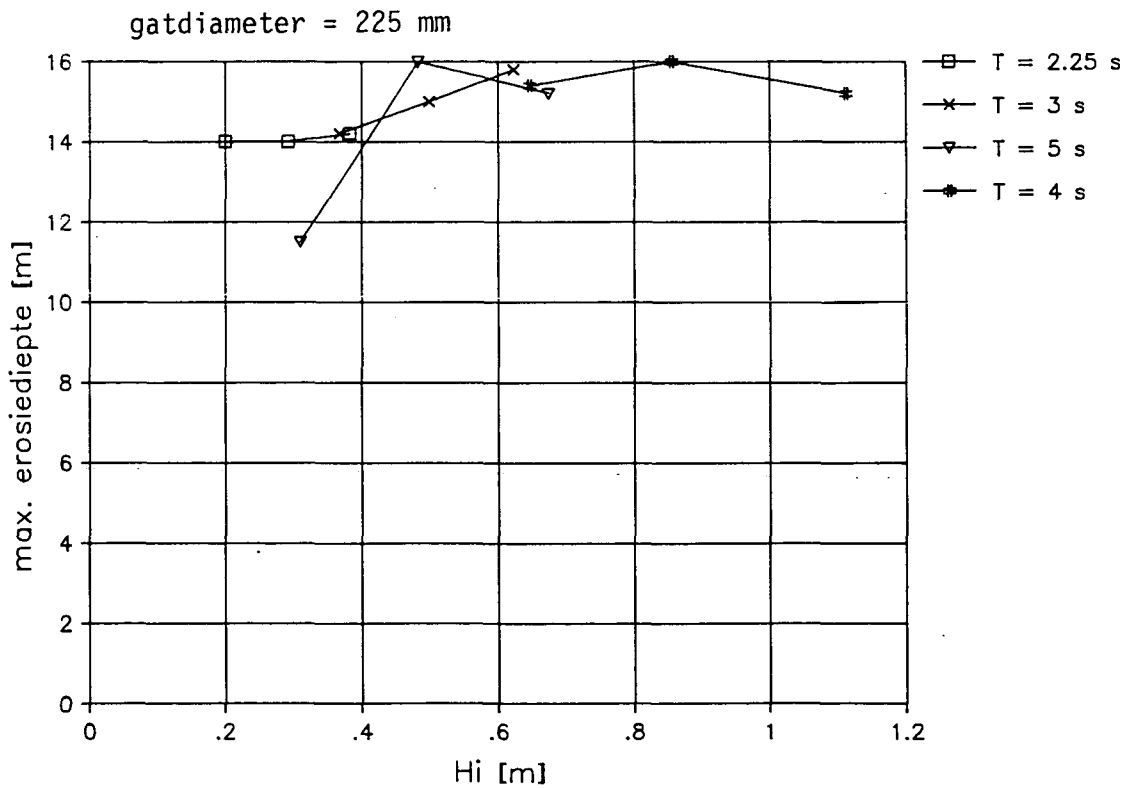
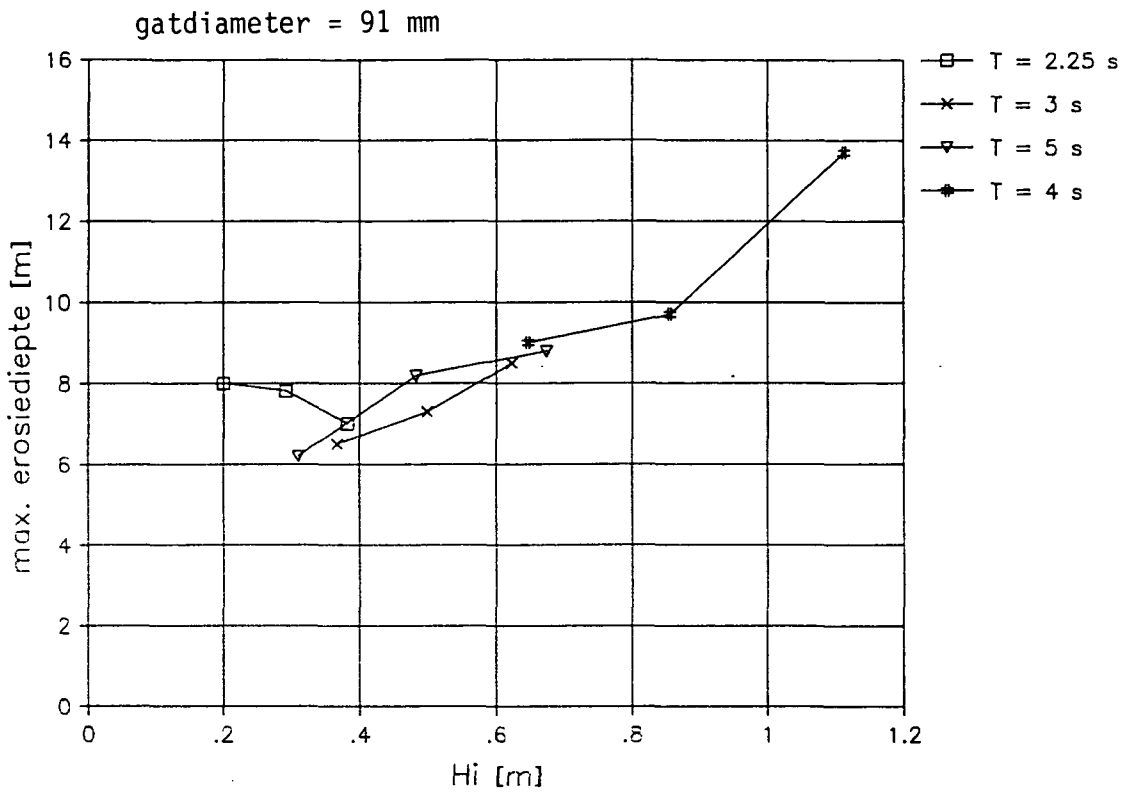
G = 125 mm

SERIE 4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 24



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

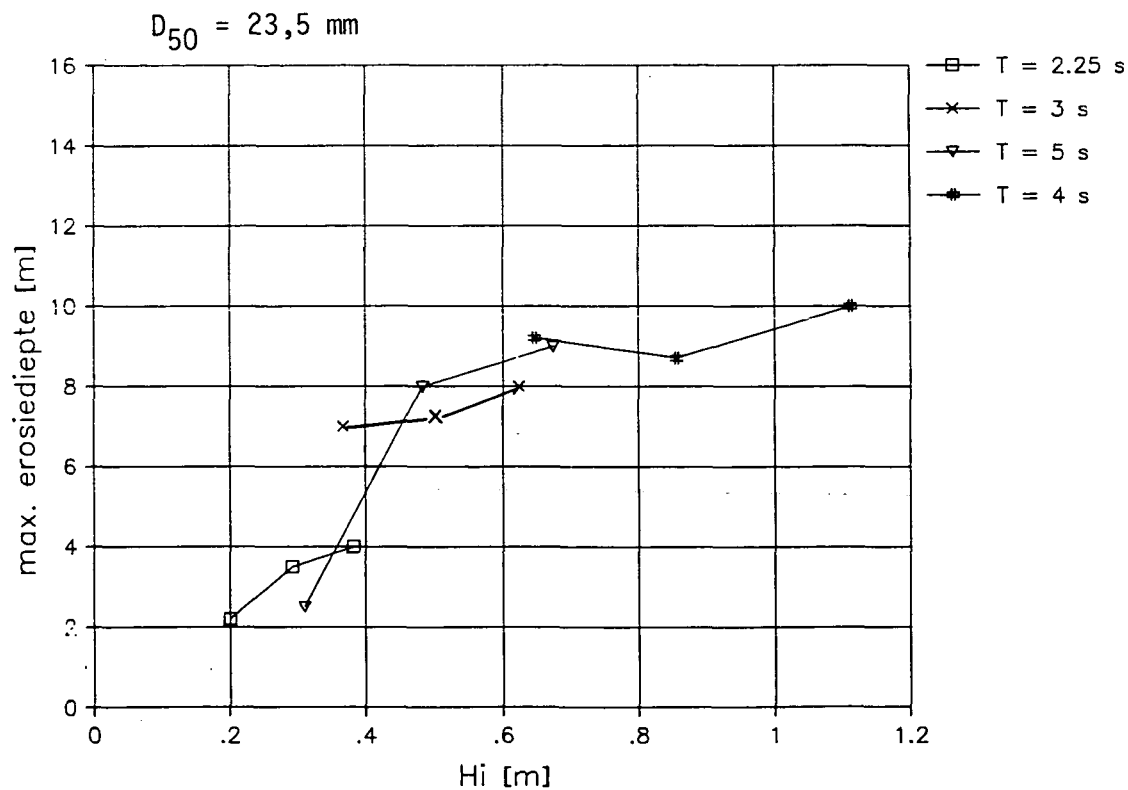
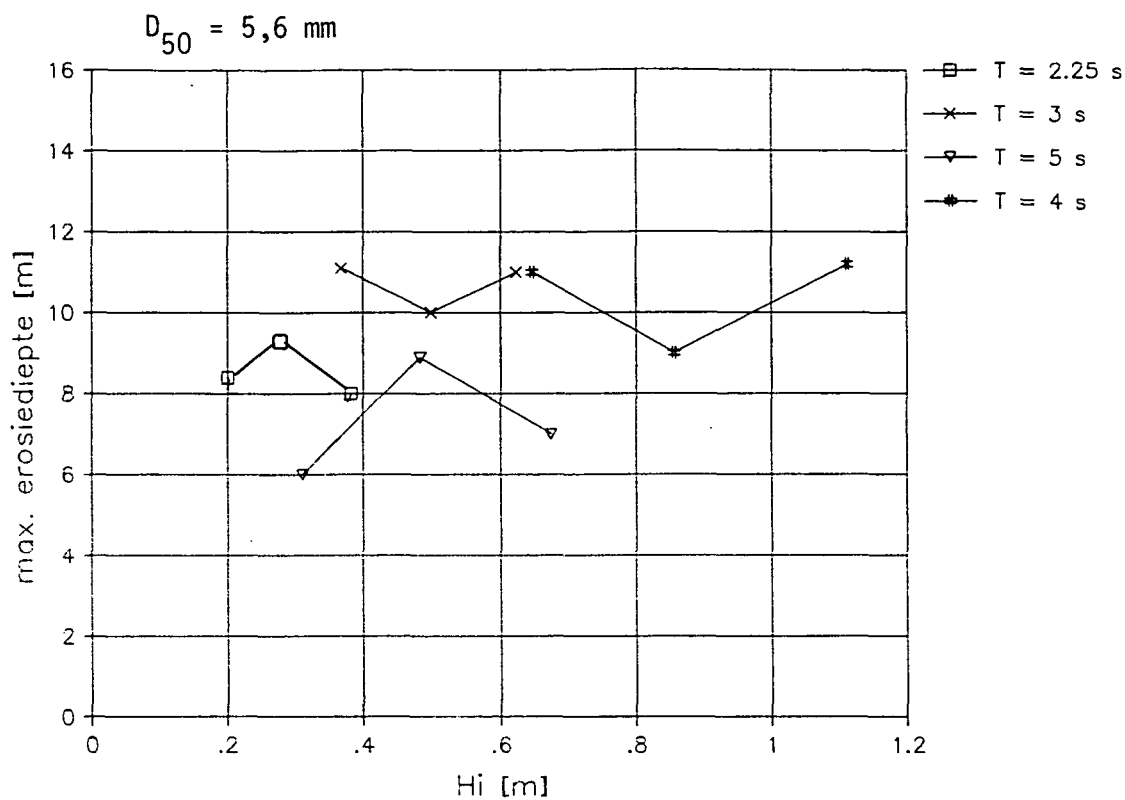
D₅₀=5,0mm

SERIE 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 25



GROOTSTE EROSIE-DIEPTE BOVEN SWL
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

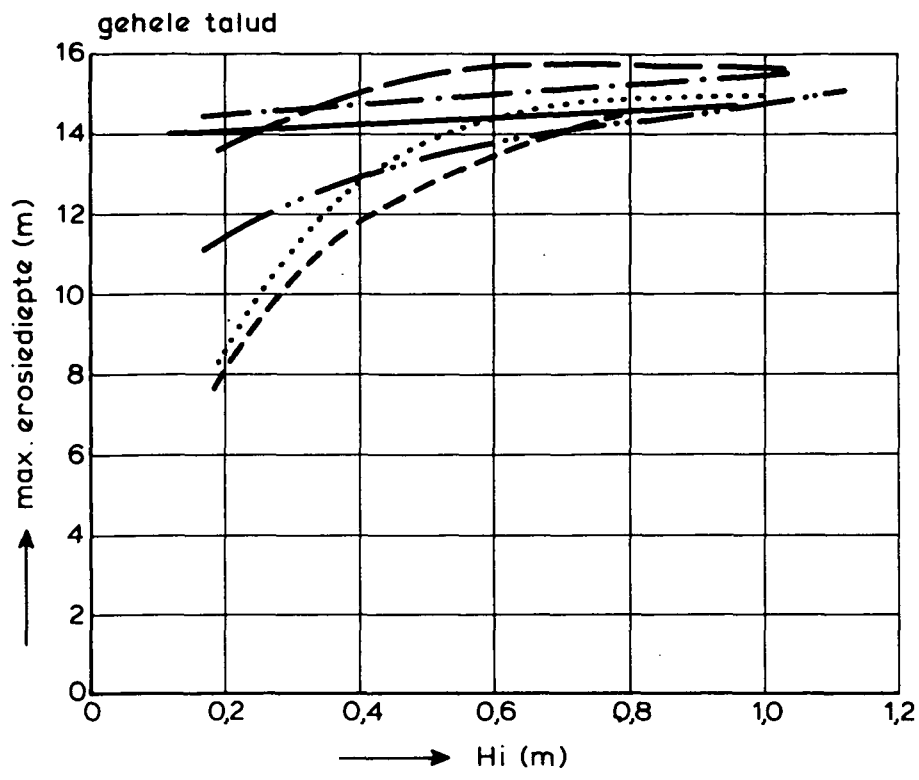
G = 125 mm

SERIE 5

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

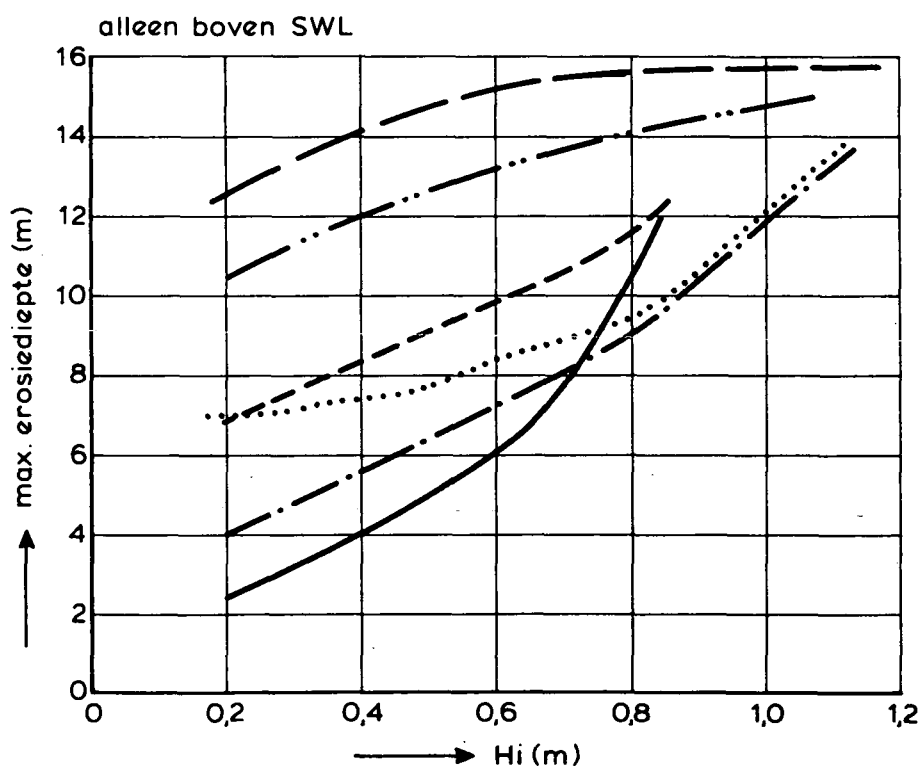
H 657

FIG. 26



gatdiameter:

- 51 mm
- · - 70 mm
- 91 mm
- - - 125 mm
- · · - 170 mm
- - - 225 mm



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

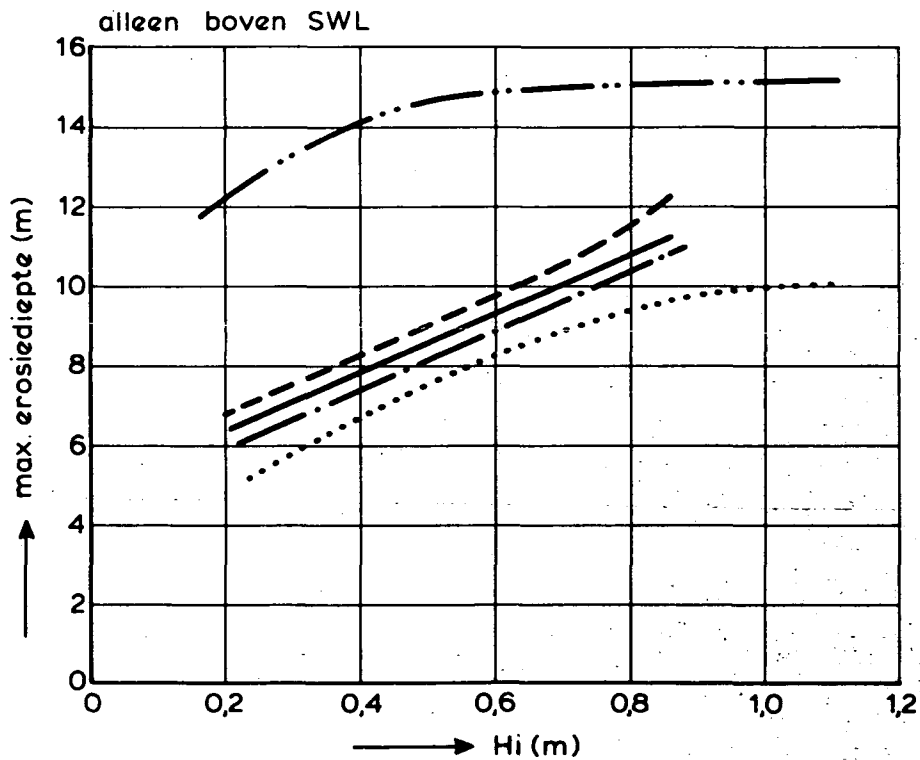
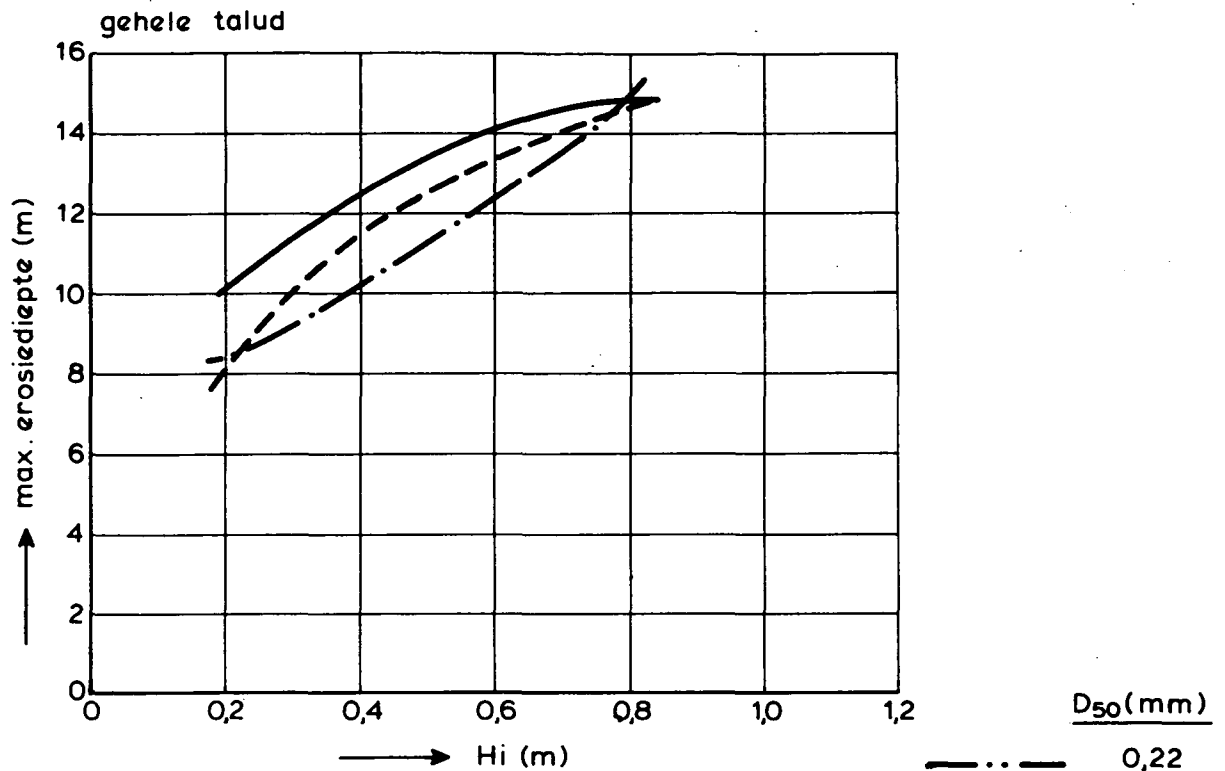
$D_{50} = 5,0 \text{ mm}$

INVLOED G

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 27



GROOTSTE WAARDE VAN EROSIE - DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

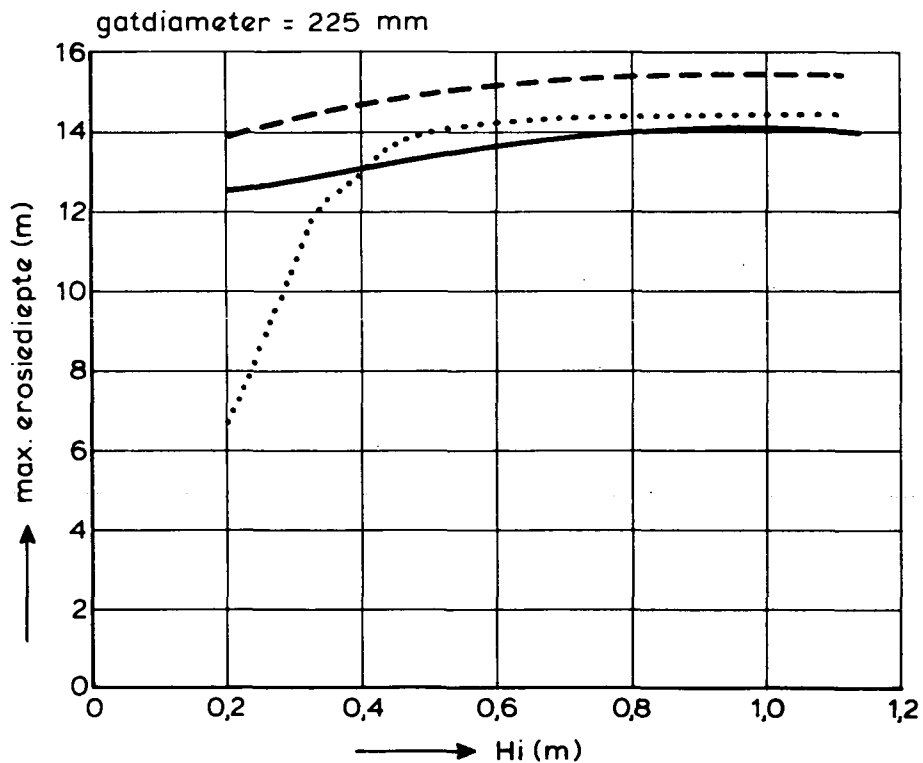
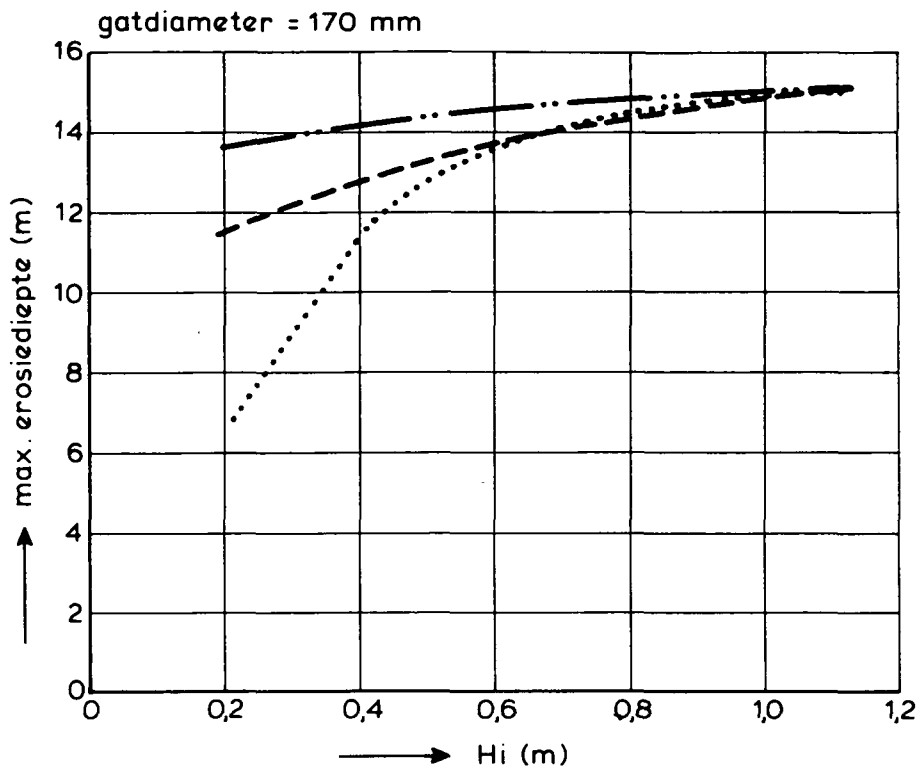
G = 125 mm

INVLOED D_{50}

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 28



(gehele talud)

GROOTSTE WAARDE VAN EROSIÉ-DIEPTE
ALS FUNKTIE VAN GOLFHOOGTE

INVLOED D_{50}

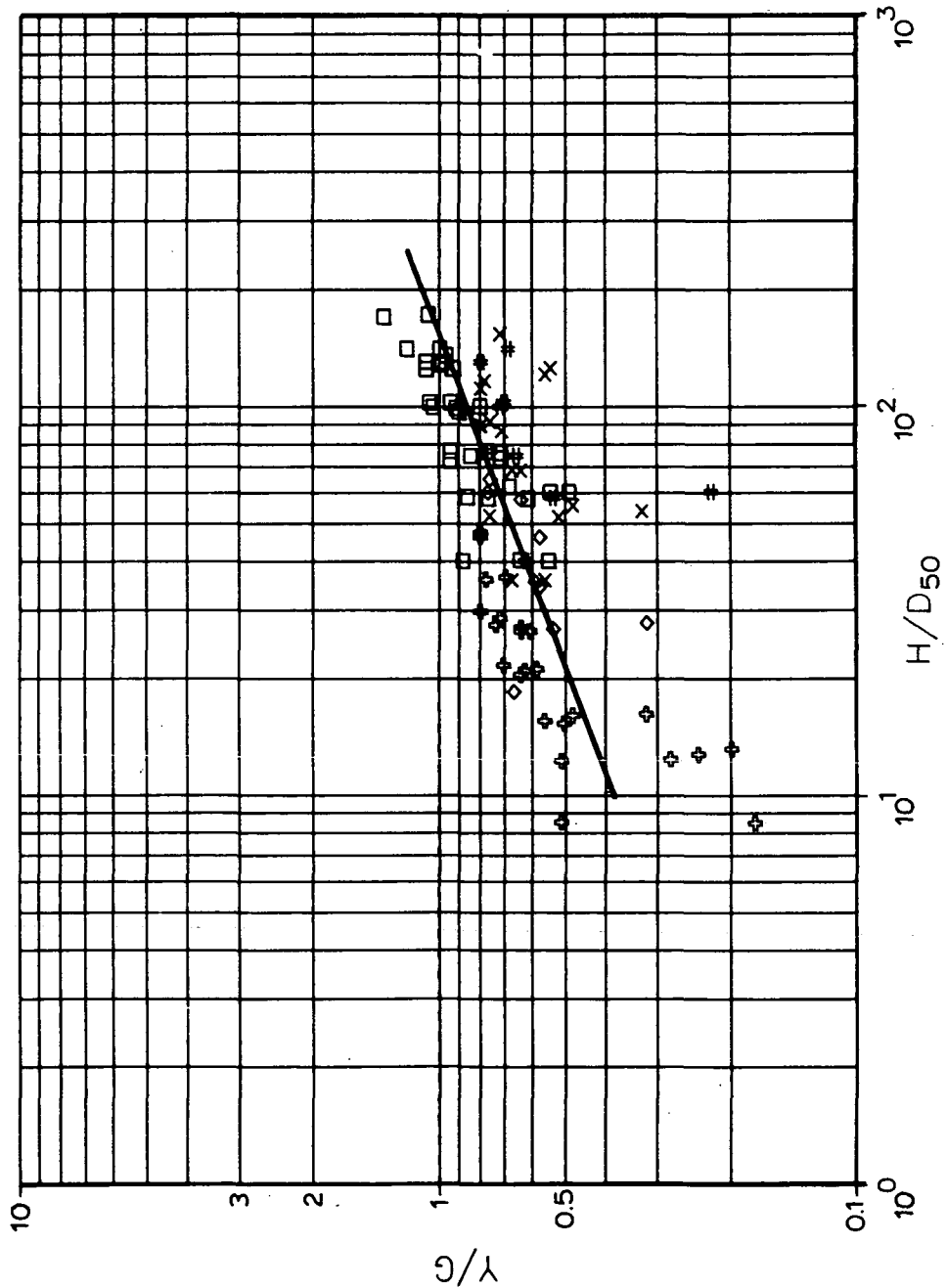
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 29

alleen $Y < 10$ cm

- D50=5.0 mm, G<100 mm
 - × D50=5.6 mm, G=125 mm
 - # D50=5.0 mm, G>100 mm
 - ◇ D50=10.8 mm, G=125 mm
 - ⊕ D50=23.5 mm, G=125 mm
- : $Y = G \left(\frac{H}{D_{50}} \right)^{0.33}$



MAXIMALE EROSIE - DIEPTE BOVEN
SWL + 0,2 M

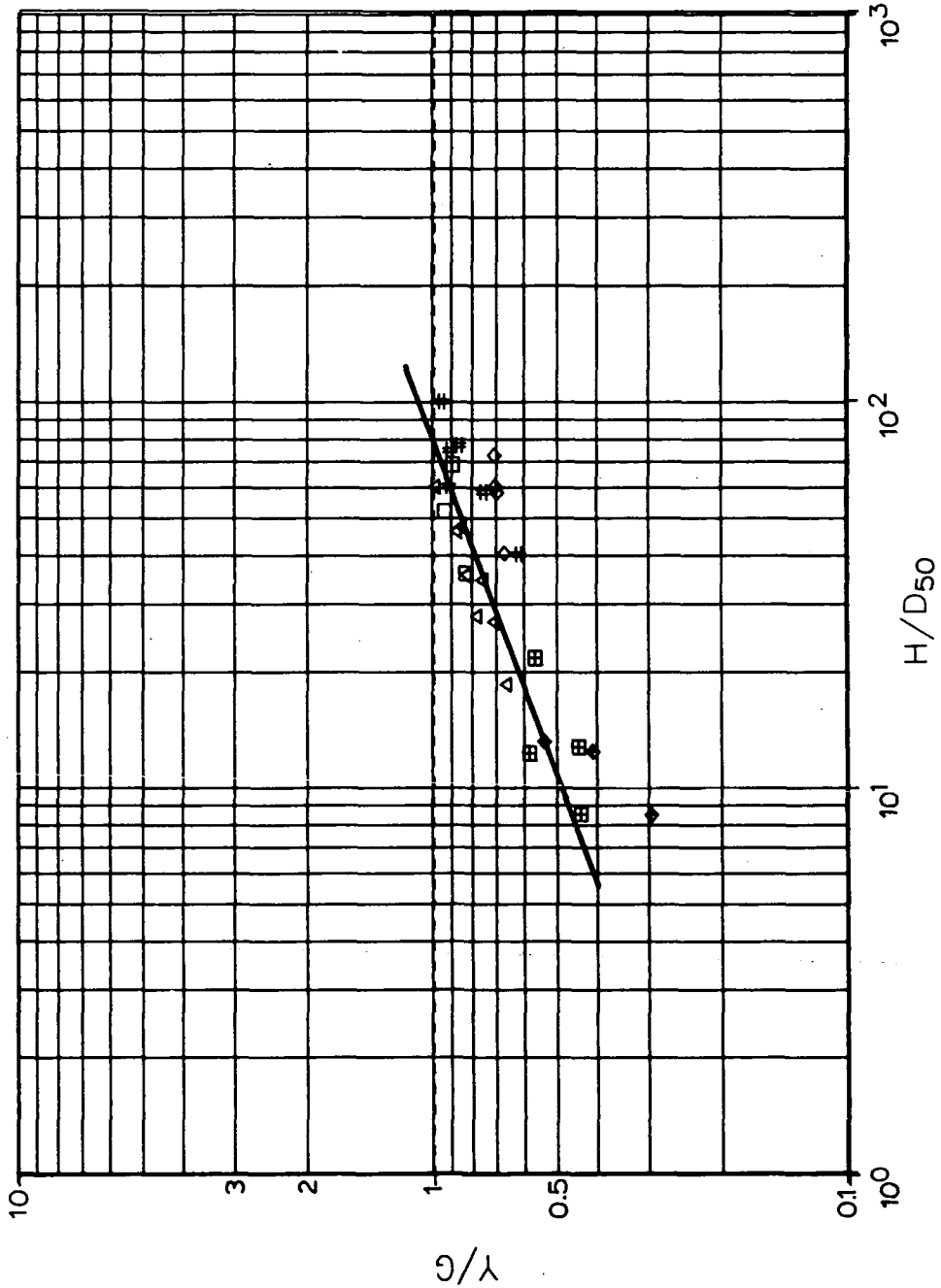
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 30

alleen meetpunten met $Y < 12.5$ cm

- serie 3, D50=5.6 mm
 - # serie 3, D50=5.0 mm
 - ◇ serie 4, D50=5.0 mm
 - △ serie 3, D50=10.8 mm
 - ⊞ serie 4, D50=23.5 mm
 - ◆ serie 5, D50=23.5 mm
- : $\frac{Y}{G} = 0,23 \left(\frac{H}{D_{50}} \right)^{0,33}$



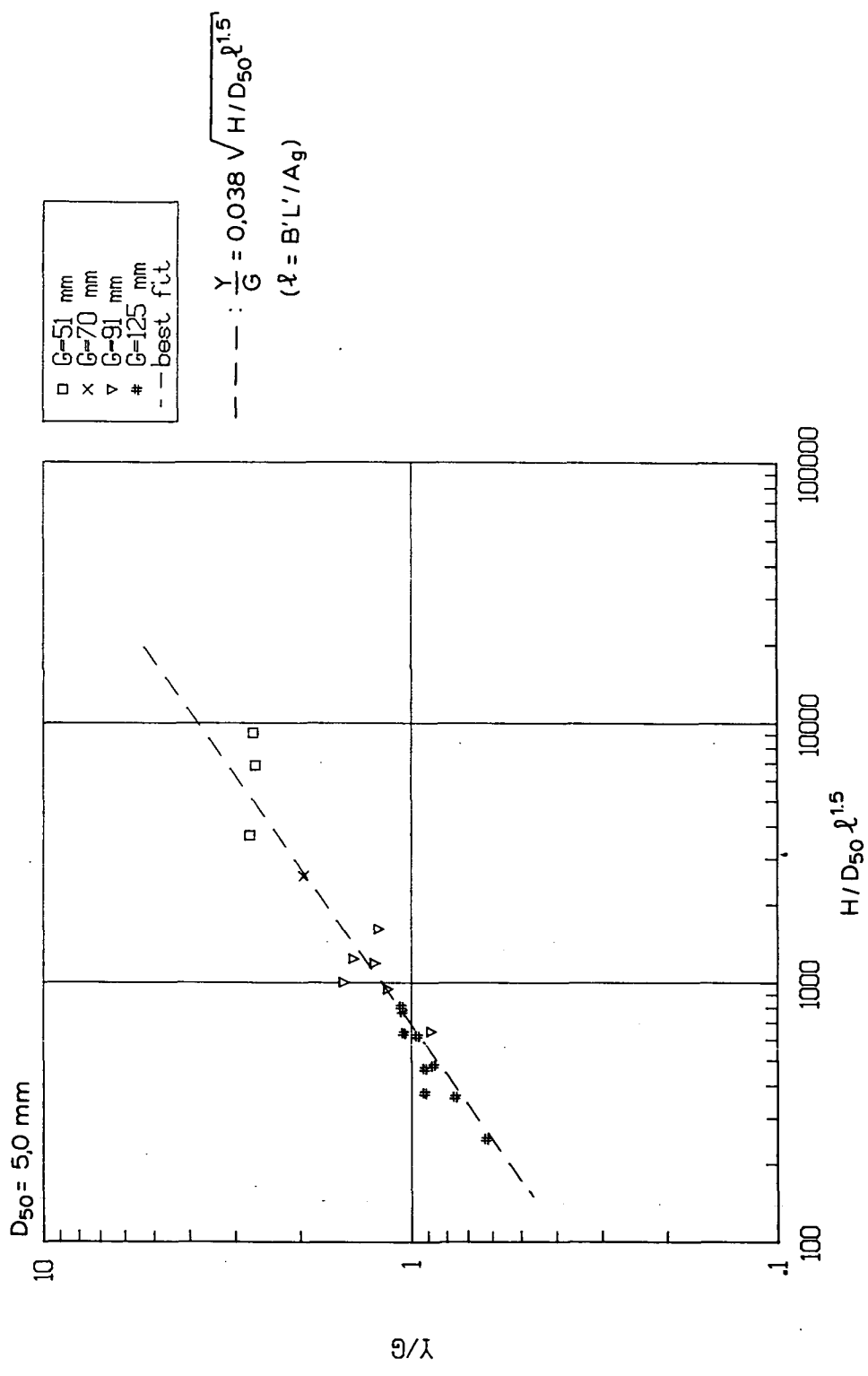
MAXIMALE EROSIE - DIEPTE VOOR
GEHELE TALUD

$G > 0,1$ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 31



alleen meetpunten met $Y < 14$ cm

MAXIMALE EROSIÉ-DIEPTE VOOR
GEHELE TALUD

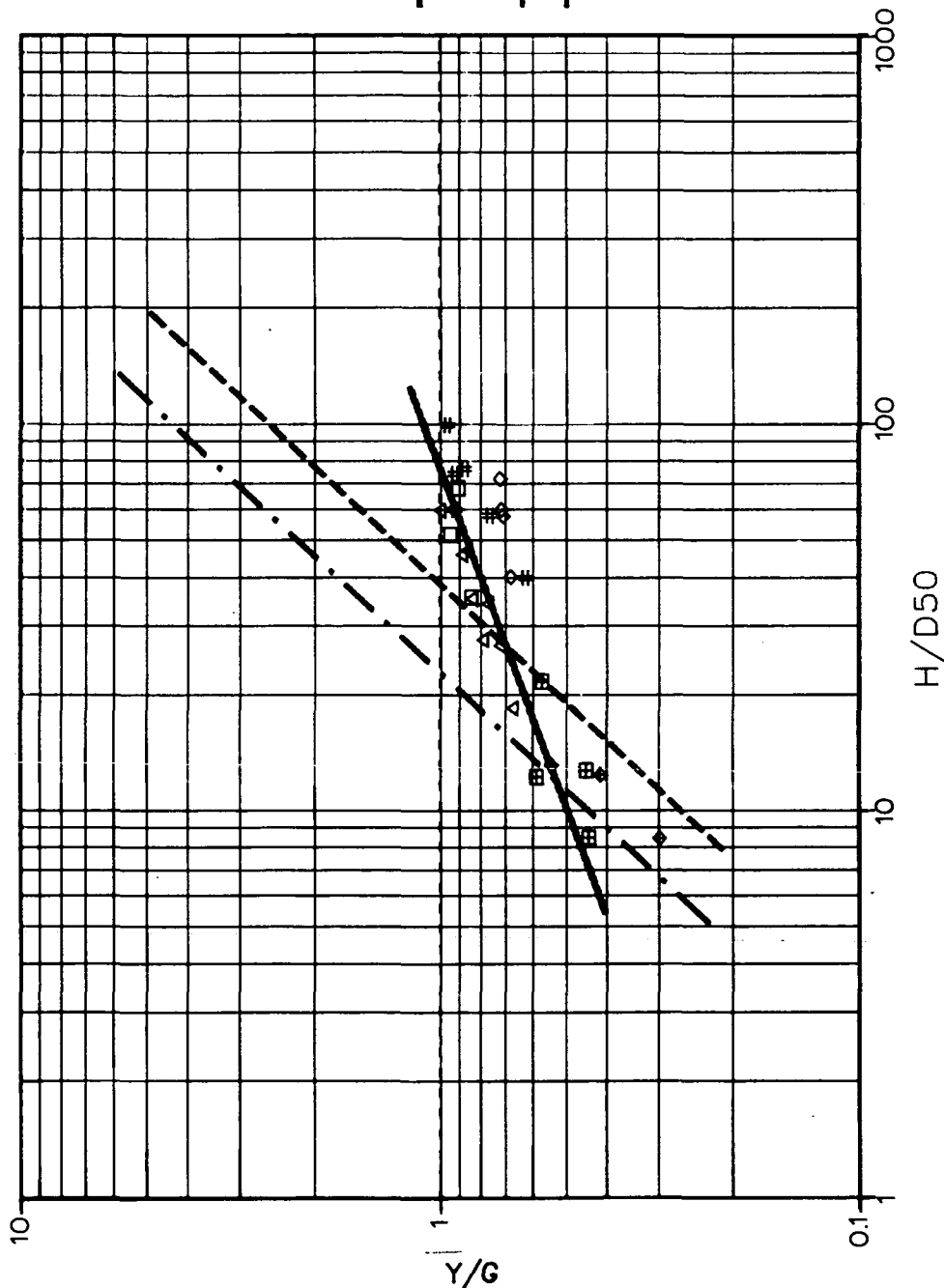
G < 0,1 m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 32

alleen meetpunten met $Y < 12.5$ cm



- serie 3, $D50=5.6$ mm
- # serie 3, $D50=5.0$ mm
- ◇ serie 4, $D50=5.0$ mm
- △ serie 3, $D50=10.8$ mm
- ⊞ serie 4, $D50=23.5$ mm
- ◆ serie 5, $D50=23.5$ mm

$Y/G = 0.23 \left(\frac{H}{D50} \right)^{0.33}$
 — $\xi_0 = 2.3$ } formule (11)
 - · - en (12)
 - - - $\xi_0 = 1.5$ } (Brown)

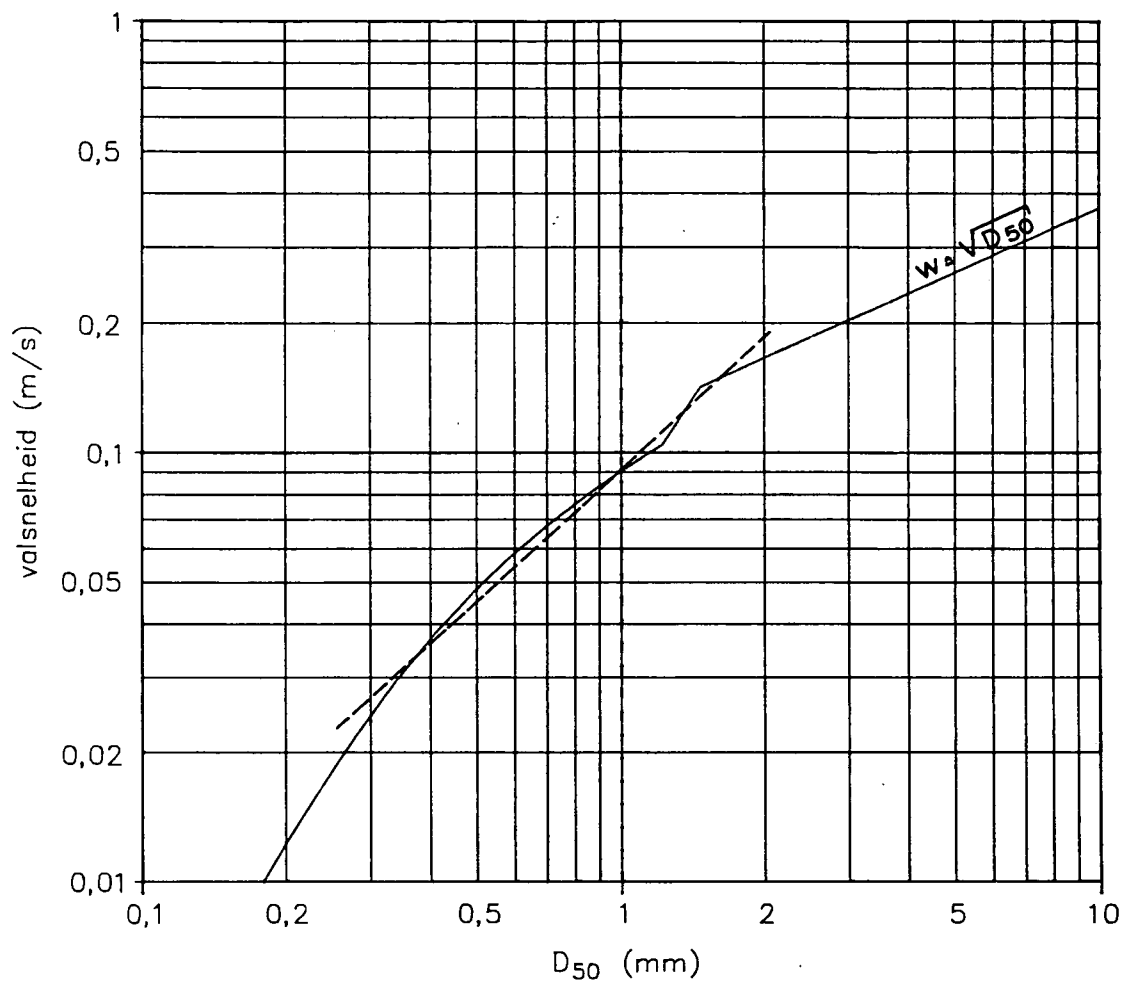
MAXIMALE EROSIÉ-DIEPTE VÓOR
GEHELE TALUD

$G > 0,1$ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 33



———— : valsnelheid volgens [9]

----- : $w \hat{=} D_{50}$ (range van erosiemetingen van Brown)

VALSNELHEID VAN KORRELS IN WATER

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

H 657

FIG. 34

• locatie 'De Voorst'

• hoofdkantoor

www.hydel.nl

hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

