

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat,
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen

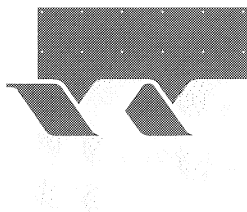
Samenvatting van onderzoek in Deltagoot

november 2000

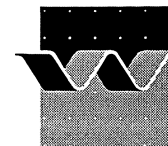
Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen

Samenvatting van onderzoek in Deltagoot

C.L. Lubbers en M. Klein Breteler



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen
Samenvatting van onderzoek in Deltagoot

SAMENVATTING:

In het kader van de renovatie van de Nederlandse steenzettingen werd in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics onderzoek gedaan naar de stabiliteit van een aantal moeilijk te toetsen of te ontwerpen bekledingen. De onderzochte opstellingen zijn:

- Opstelling 1: Basalton op een lage berm
- Opstelling 2: Basalton op zandasfalt
- Opstelling 3: Ingegoten en ingezand basalt
- Opstelling 4: Dichtgeslibde bekledingen
- Opstelling 5: Blokken op mijnsteen met uitvullaag
- Opstelling 6: Blokken op een filter met ondiepwater golfbelasting
- Opstelling 7: Invloed van sterk gebroken golven op de stabiliteit van breuksteen-overlaging op een steenzetting
- Opstelling 12: Hergebruikte betonblokken op hun kant
- Opstelling 20: Plat gezette blokken met brede voegen
- Opstelling 21: Haringmanblokken op hun kant
- Opstelling 23: Vlakke betonblokken op hun kant

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van meer inzicht in de bezwijkmechanismen van de bekledingsconstructies, waarmee de basis gelegd kan worden voor nieuwe ontwerp- en toetsingsregels.

REFERENTIES: Contract DWW 1327
verplichtingenummer: 3100/0300
DWW projectleider: ir. R. 't Hart

REV.	AUTEUR	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDKEURING
1	C.L. Lubbers	juli 2000		M. Klein Breteler	W.M.K. Tilmans
2	C.L. Lubbers	nov.2000		M. Klein Breteler	W.M.K. Tilmans
TREFWOORDEN			INHOUD		STATUS
renovatie, steenzettingen, dijkbekledingen, gietasfalt, zandasfalt, basalt, granietblokken, golfbelasting, golfklappen, bezwijkmechanismen, klemming, stijghoogteverschil.			TEKST:	28	☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF
			TABELLEN:	4	
			FIGUREN:	29	
			APPENDICES:		
PROJECTNUMMER: H3272.77					

Lijst van Tabellen

1. Eigenschappen van uitvullaag en mijnsteen (doorlatendheden zijn berekend met ANAMOS, echter serie 5 en 6 zijn meetwaarden)
2. Vergelijking berekende en gemeten waarden van $F = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$
3. Schadevorm en aantal na trekproeven
4. Overzicht van golfcondities en geconstateerde schade

Lijst van Figuren

1. Stijghoogtefront geeft stijghoogteverschil over de top laag
2. Overzichtstekening opstellingen
3. Deltagoot
4. Aanbrenging van betonzuilen voor opstelling 1
5. Detailtekening opstelling 1. Basalton op berm
6. Detailtekening opstelling 2. Basalton op zandafalt
7. Detailtekening opstelling 3. Met mastiek overgoten basalt
8. Langsdoorsnede opstellingen 4b en 4c. Betonblokken op ingezand mijnsteen
9. Opstelling 5 en 6, langsdoorsnede
10. Detailtekening opstelling 12a; "Koud tegen elkaar"
11. Opstelling 21 - Boven aanzicht detail instrumentatie
12. Opstelling 23 - Boven aanzicht detail instrumentatie
13. Opstelling 20a - Langsdoorsnede
14. Opstelling 21. Verschilprofiel na proef P21o15 in lijn 5
15. Opstelling 21. Verschilprofiel na proef P21o16 in lijn 4
16. Stabiliteit steenzettingen op filter (lijnen van type (c), normaal uit LTV '99)
17. Stabiliteit steenzettingen op geotextiel of zandafalt, op zand of klei (type (a))
18. Stabiliteit steenzettingen. Steenzettingen op filter (type c1); gunstig ($P > 0,40$)
19. Stabiliteit steenzettingen op filter (type c2); ongunstig ($P < 0,40$)
20. Stabiliteit dichtgeslibde steenzettingen op een dichtgeslibd filter (type c3)
21. Vergelijking bezwijkgolffoogte volgens ANAMOS met meetresultaten
22. Gemeten waarde van $\phi_{2\%}/H_s$ als functie van berekende waarde
23. Invloed golfspectrum op de stabiliteit van de steenzetting
24. Opstelling voor de trekproeven
25. Opstelling 7
26. Invloedsfactor voor belasting op een berm; taludhelling onder de berm 1 : 4
27. Invloedsfactor voor belasting op een berm; taludhelling onder de berm 1 : 3
28. Zuigermechanisme
29. Kattenrugmechanisme

Lijst van Symbolen

b	=	dikte van de filterlaag	[m]
c_w	=	voortplantingssnelheid van drukgolven in water	[m/s]
d_{krm}	=	locatie op het talud waar de grootste kracht gemeten is t.o.v. SWL	[m]
d_{vpl}	=	locatie op het talud waar de grootste tijdelijke verplaatsing is gemeten t.o.v. SWL	[m]
$d_{s2\%}$	=	locatie waar het 2%-stijghoogteverschil optreedt t.o.v. SWL	[m]
D	=	toplaagdikte	[m]
D_{15}	=	korreldiameter, die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
D_{f15}	=	korrelgrootte van het filter die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
D_{n50}	=	korrelgrootte die door 50% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
F	=	stabiliteitsparameter = $\xi_{op}^{2/3} H_s / \Delta D$	[-]
F^*	=	stabiliteitsparameter = $\xi_{op}^{1/3} H_s / \Delta D$	[-]
$f_{constructie}$	=	functie die de invloed van de constructieparameters weergeeft	[-]
$f_{golfklap}$	=	functie die de invloed van de golfklap weergeeft	[-]
g	=	gravitatieversnelling	[m/s ²]
H	=	golfhoogte	[m]
$H_{regelmatig}$	=	golfhoogte van regelmatige golven	[m]
H_s	=	significante golfhoogte van inkomende golven	[m]
$H_{s,i}$	=	significante golfhoogte van de inkomende golven in de goot (dit is het gemiddelde van hoogste 1/3 deel)	[m]
k	=	doorlatendheid van het filter (berekend met ANAMOS)	[m/s]
k'	=	doorlatendheid van de toplaag (berekend met ANAMOS)	[m/s]
M_{50}	=	steenmassa die door 50% van de stenen op basis van gewicht wordt onderschreden	[kg]
P	=	parameter voor type steenzetting op filter = $D\Omega\Gamma_{klem}/\sqrt{(bD_{f15})}$	[-]
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum	[s]
$z_{2\%}$	=	golfoploophoogte t.o.v. SWL die door 2% van de golven overschreden wordt	[m]
Δ	=	relatieve volumieke massa = $(\rho_b - \rho)/\rho$	[-]
Γ_{klem}	=	invloed van de klemkracht	[-]
$\phi_{2\%}$	=	stijghoogteverschil met een overschrijdingspercentage van 2%	[m]
ξ_{op}	=	brekerparameter voor onregelmatige golven $\tan\alpha/\sqrt{(H_{si}/L_{op})}$	[-]
Λ	=	leklengte	[m]
ρ	=	soortelijke massa van water	kg/m ³
ρ_b	=	soortelijke massa van blok	kg/m ³
Ω	=	relatief open oppervlak in de toplaag	[-]

Lijst van Figuren

1. Stijghoogtefront geeft stijghoogteverschil over de toplaag
2. Overzichtstekening opstellingen
3. Deltagoot
4. Aanbrenging van betonzuilen voor opstelling 1
5. Detailtekening opstelling 1. Basalton op berm
6. Detailtekening opstelling 2. Basalton op zandafalt
7. Detailtekening opstelling 3. Met mastiek overgoten basalt
8. Langsdoorsnede opstellingen 4b en 4c. Betonblokken op ingezand mijnsteen
9. Opstelling 5 en 6, langsdoorsnede
10. Detailtekening opstelling 12a; "Koud tegen elkaar"
11. Opstelling 21 - Bovenaanzicht detail instrumentatie
12. Opstelling 23 - Bovenaanzicht detail instrumentatie
13. Opstelling 20a - Langsdoorsnede
14. Opstelling 21. Verschilprofiel na proef P21o15 in lijn 5
15. Opstelling 21. Verschilprofiel na proef P21o16 in lijn 4
16. Stabiliteit steenzettingen op filter (lijnen van type (c), normaal uit LTV '99)
17. Stabiliteit steenzettingen op geotextiel of zandafalt, op zand of klei (type (a)
18. Stabiliteit steenzettingen. Steenzettingen op filter (type c1); gunstig ($P > 0,40$)
19. Stabiliteit steenzettingen op filter (type c2); ongunstig ($P < 0,40$)
20. Stabiliteit dichtgeslibde steenzettingen op een dichtgeslibd filter (type c3)
21. Vergelijking bezwijkgolffhoogte volgens ANAMOS met meetresultaten
22. Gemeten waarde van $\phi_{2\%}/H_s$ als functie van berekende waarde
23. Invloed golfspectrum op de stabiliteit van de steenzetting
24. Opstelling voor de trekproeven
25. Opstelling 7
26. Invloedsfactor voor belasting op een berm; taludhelling onder de berm 1 : 4
27. Invloedsfactor voor belasting op een berm; taludhelling onder de berm 1 : 3
28. Zuigermechanisme
29. Kattenrugmechanisme

Lijst van Symbolen

b	=	dikte van de filterlaag	[m]
c_w	=	voortplantingssnelheid van drukgolven in water	[m/s]
d_{krm}	=	locatie op het talud waar de grootste kracht gemeten is t.o.v. SWL	[m]
d_{vpl}	=	locatie op het talud waar de grootste tijdelijke verplaatsing is gemeten t.o.v. SWL	[m]
$d_{s2\%}$	=	locatie waar het 2%-stijghoogteverschil optreedt t.o.v. SWL	[m]
D	=	toplaagdikte	[m]
D_{15}	=	korreldiameter, die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
D_{f15}	=	korrelgrootte van het filter die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
D_{n50}	=	korrelgrootte die door 50% op basis van gewicht wordt onderschreden	[m]
F	=	stabiliteitsparameter = $\xi_{op}^{2/3} H_s / \Delta D$	[-]
F^*	=	stabiliteitsparameter = $\xi_{op}^{1/3} H_s / \Delta D$	[-]
$f_{constructie}$	=	functie die de invloed van de constructieparameters weergeeft	[-]
$f_{golfklap}$	=	functie die de invloed van de golfklap weergeeft	[-]
g	=	gravitatieversnelling	[m/s ²]
H	=	golfhoogte	[m]
$H_{regelmatig}$	=	golfhoogte van regelmatige golven	[m]
H_s	=	significante golfhoogte van inkomende golven	[m]
$H_{s,i}$	=	significante golfhoogte van de inkomende golven in de goot (dit is het gemiddelde van hoogste 1/3 deel)	[m]
k	=	doorlatendheid van het filter (berekend met ANAMOS)	[m/s]
k'	=	doorlatendheid van de toplaag (berekend met ANAMOS)	[m/s]
M_{50}	=	steenmassa die door 50% van de stenen op basis van gewicht wordt onderschreden	[kg]
P	=	parameter voor type steenzetting op filter = $D\Omega\Gamma_{klem}/\sqrt{(bD_{f15})}$	[-]
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum	[s]
$z_{2\%}$	=	golfoploophoogte t.o.v. SWL die door 2% van de golven overschreden wordt	[m]
Δ	=	relatieve volumieke massa = $(\rho_b - \rho) / \rho$	[-]
Γ_{klem}	=	invloed van de klemkracht	[-]
$\phi_{2\%}$	=	stijghoogteverschil met een overschrijdingspercentage van 2%	[m]
ξ_{op}	=	brekerparameter voor onregelmatige golven $\tan\alpha / \sqrt{(H_{si}/L_{op})}$	[-]
Λ	=	leklengte	[m]
ρ	=	soortelijke massa van water	kg/m ³
ρ_b	=	soortelijke massa van blok	kg/m ³
Ω	=	relatief open oppervlak in de toplaag	[-]

I Inleiding

In het kader van de renovatie van de Nederlandse steenzettingen is in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics onderzoek gedaan naar de stabiliteit van een aantal moeilijk te toetsen of te ontwerpen bekledingen.

De opdracht voor dit onderzoek is namens het Projectbureau Zeeweringen te Goes gegeven door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (contract DWW-1327), die in de begeleiding werd bijgestaan door de TAW.

De uitgevoerde proeven zijn in detail omschreven in het meetverslag (Smith e.a. 2000) en de analyse van de proefresultaten is uitvoerig behandeld in het analyseverslag (Klein Breteler e.a. 2000). In het onderhavige verslag is een samenvatting gegeven van de resultaten en conclusies.

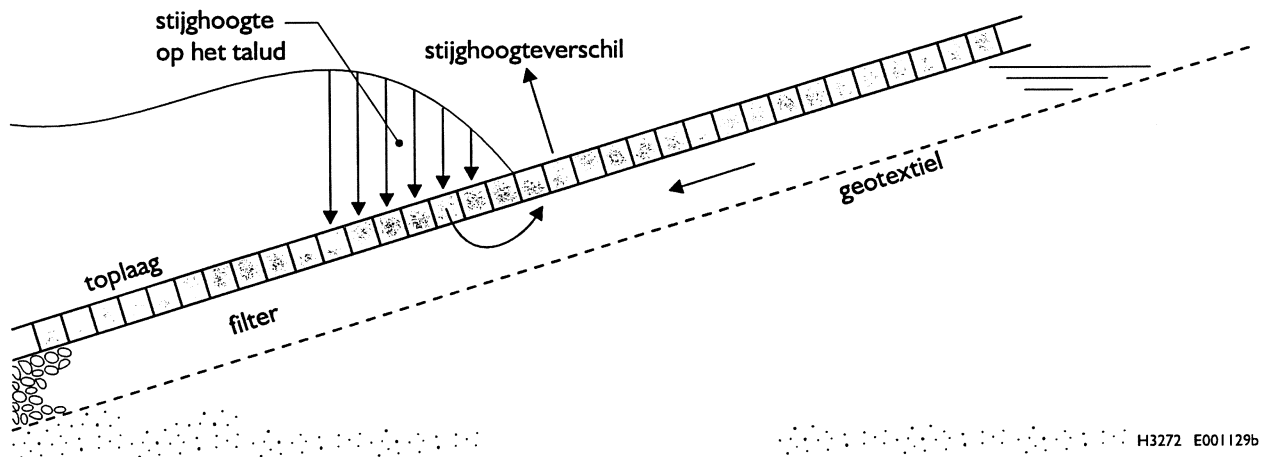
Het onderzoek betrof de volgende proevenseries:

- Serie 1: Basalton op een lage berm
- Serie 2: Basalton op zandasfalt
- Serie 3: Ingewassen en ingezand basalt, met mastiek overgoten
- Serie 4: Dichtgeslibde bekledingen (graniet- en betonblokken)
- Serie 5: Betonblokken op mijnsteen met uitvullaag
- Serie 6: Betonblokken op een filter met ondiep water golfbelasting
- Serie 7: Breuksteenoverlaging op een steenzetting
- Serie 12: Hergebruikte betonblokken op z'n kant
- Serie 20: Plat gezette betonblokken met brede stootvoegen of langsvoegen
- Serie 21: Op hun kant gezette Haringmanblokken met brede stootvoegen
- Serie 23: Op hun kant gezette vlakke betonblokken met brede stootvoegen

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van meer inzicht in de bezwijkmechanismen van de bekledingsconstructies, waarmee de basis gelegd kan worden voor nieuwe ontwerp- en toetsingsregels. De analyse van de onderzoeksresultaten is bewust kort gehouden en is vooral gericht geweest op het signaleren van tekortkomingen in de huidige rekenmethoden voor de stabiliteit van steenzettingen, en op het verkrijgen van praktische richtlijnen waarmee de stabiliteit van de beproefde constructietypen beoordeeld kan worden. Vervolgonderzoek met de gemeten data uit de huidige proevenseries kan het mogelijk maken om de bestaande rekenmethoden te verbeteren en uit te breiden. Waar mogelijk zijn hiervoor aanbevelingen gedaan.

Het uitgangspunt voor de analyse van de proefresultaten was de theorie die opgenomen is in het rekenmodel ANAMOS en een meer verfijnde opvolger daarvan (methode met het Ronde Front). Beide theorieën voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen gaan ervan uit dat het moment vlak vóór de golfklap maatgevend is. Er is dan sprake van maximale golfneerloop en er staat als het ware een muur van water op het talud (zie Figuur 1). Dit wordt het maatgevende stijghoogtefront genoemd. Met de leklengtheorie kan bij een gegeven stijghoogtefront het stijghoogteverschil over de steenzetting worden berekend.

Vervolgens wordt dit stijghoogteverschil vergeleken met het eigen gewicht van de bekleding, waarbij ook enkele invloedsfactoren worden meegenomen, namelijk voor wrijving van het losse blok, de traagheid en de verhinderde toestroming. Dit laatste heeft betrekking op het vastgezogen lijken van de blokken op de ondergrond.



Figuur 1 Stijghoogtefront geeft stijghoogteverschil over de toplaag

De maatgevende stijghoogte op het talud en het stijghoogteverschil over de bekleding kan berekend worden op basis van twee methoden, die beide zijn gebaseerd op de leklengte-theorie:

a) ANAMOS 2.21

De empirische formules voor de stijghoogte op het talud zijn bepaald op basis van proeven met regelmatige golven. Uitgaande van het principe dat elke afzonderlijke golf een belasting geeft die nauwelijks beïnvloed wordt door voorgaande golven, is aannemelijk gemaakt dat het gemeten stijghoogtefront bruikbaar is voor onregelmatige golven (Klein Breteler e.a. 1992). Er is gesteld dat een significant stijghoogteverschil veroorzaakt wordt door een gemeten front bij $H_{\text{regelmatig}} = H_s$. Een stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie volgt uit $H_{\text{regelmatig}} = 1,4 \cdot H_s$.

De formules bleken niet toepasbaar te zijn op constructies met een korte leklengte. Om dit te verhelpen zijn benaderende formules opgesteld, die echter nauwelijks een theoretische onderbouwing hebben.

b) Rond stijghoogtefront

De empirische formules voor de maatgevende stijghoogte op het talud zijn later opgesteld op basis van proeven met onregelmatige golven. Verder is de vorm van het stijghoogtefront verfijnd en is ook de invloed van een berm en een hoog voorland in de formules opgenomen.

Het toepassingsgebied van de nieuwe formules is nog niet verkend, maar is waarschijnlijk ook slechts beperkt tot vrij lange leklengten.

De theorie van ANAMOS en Rond stijghoogtefront is het uitgangspunt voor de analyse van de meetgegevens.

2 Beschrijving onderzochte constructies en proevenprogramma

2.1 De proefopstelling

Alle constructies die in het kader van dit onderzoek in de Deltagoot zijn onderzocht bestonden uit een dijk met een helling van 1:3,5 en een 5 m brede berm met een helling 1:15. Bij de opstelling 1 lag de berm op het niveau +4,0 m ten opzichte van de gootbodem (Figuur 2a) en bij de andere opstellingen op het niveau +5,0 m (Figuur 2b). De kruinhoogte was steeds +8,0 m ten opzichte van de gootbodem. Deze hoogte was zodanig dat er niet of nauwelijks golfoverslag optrad. De geometrie van de onderzochte dijkconstructie is zo gekozen dat zij ongeveer overeenkomt met die van de gemiddelde huidige Nederlandse zeedijken.

In Figuren 2a en 2b is de doorsnede van de hele dijk getekend. De teen van het talud ligt bij $x = 0,00$ m (op 162 m van het golfschot, Figuur 3). Voor elke volgende opstelling werd meestal alleen de bekleding in de golfaanvalszone, en de bijbehorende filterlaag, vervangen (Figuur 4). De kern van het dijklichaam is gedurende het gehele onderzoek gelijk gebleven.

In de dijk waren drainagebuizen aangebracht waarmee de freatische lijn in de dijk kern lager werd gehouden dan de waterstand in de goot (K-G in Figuur 5), teneinde grondmechanische instabiliteit te voorkomen. Na het verdichten van het zand werden de peilbuizen (R-S en Y-Z in Figuur 5) aangebracht om de freatische lijn tijdens de proeven te kunnen meten.

De aansluiting tussen de bekledingselementen en de gootwand was dichtgemaakt met flexibel materiaal (Celrubber), zodat de bekleding niet star ingeklemd kon raken tussen de gootwanden.

Tegen de gootwanden, op de toplaag, waren stalen hoekprofielen gemonteerd om te voorkomen dat de schade aan de toplaag aan zou vangen langs de gootwand.

Het drukverloop (stijghoogte) op en onder de bekleding werd tijdens de proeven geregistreerd met behulp van een wisselend aantal in de bekleding opgenomen drukopnemers (Figuren 5 t/m 13) (behalve serie 2).

Op 8 locaties zijn verplaatsingsopnemers aangebracht waarmee tijdens de proeven de bewegingen van de blokken konden worden gemeten (behalve serie 2, 5 en 6). Voor de beoordeling van de schade per proef is echter vooral gekeken naar de blijvende verplaatsing van blokken na afloop van een proef. Vaak was de grootste blijvende verplaatsing op een andere locatie dan waar een verplaatsingsopnemer was gemonteerd.

Tijdens serie 12, 21 en 23 zijn er krachtopnemerblokken in de bekleding toegepast. Hiermee kon de normaalkracht in een rij blokken gemeten worden, die ontstaat als een rij door de opwaartse krachten gaat opbollen.

De signalen van de instrumenten zijn eerst op 20 Hz analoog gefilterd en vervolgens met 40 Hz bemonsterd en digitaal opgeslagen.

2.2 Overzicht bekledingseigenschappen

Het onderzoek is gericht geweest op een breed scala aan moeilijk te toetsen en te ontwerpen bekledingen. De opbouw en eigenschappen zijn in detail beschreven in het meetverslag (Smith e.a. 2000). In deze paragraaf zijn de belangrijkste eigenschappen kort naast elkaar gezet.

Alleen tijdens serie 1 is ook de bekleding op de berm beschouwd. In alle andere proevenseries ging het uitsluitend om de stabiliteit van de bekleding onder de berm.

De globale opbouw van de beproefde bekledingen was als volgt:

- Serie 1: Betonzuilen op een lage berm
Op de zandkern was een geotextiel gelegd met daarop een dunne filterlaag en Basalton (zie Figuur 5).
- Serie 2: Betonzuilen op zandasfalt
Op de zandkern was een dunne zandasfaltlaag aangebracht met direct daarop een toplaag van Basalton (zie Figuur 6).
- Serie 3: Overgoten en ingezand basalt op ingezand puin
Op de zandkern was eerst een dunne kleilaag aangebracht, een dubbele vlijlaag en ingezand filter. Daarop is de basalt gezet, deels ingewassen en ingezand en vervolgens overgoten met gietasfalt (zie Figuur 7).
- Serie 4: Dichtgeslibde zetting op dichtgeslibd filter
Op een dikke laag dichtgeslibde mijnsteen is een dunne dichtgeslibde uitvullaag en geotextiel aangebracht met daarop rechthoekige betonblokken (zie Figuur 8). Die zijn eerst zonder slib in de spleten beproefd en later met slib. Vervolgens is de blokkenbekleding en geotextiel vervangen door ingewassen en dichtgeslibde granietblokken.
- Serie 5 en 6: Betonblokken op uitvullaag op mijnsteen
De constructie bestond uit een dikke laag mijnsteen en een dunne uitvullaag zonder slib met daarop rechthoekige betonblokken met smalle spleten (zie Figuur 9). In serie 6 is deze constructie belast met golven met een zeer breed spectrum en een lage waterstand
- Serie 7: Breuksteen (21 - 85 kg, $M_{50} = 42$ kg) op een vlakke steenzetting met smalle spleten.
De constructie is belast met golven met een zeer breed spectrum en een lage waterstand.
- Serie 12: Betonblokken op hun kant op een dunne filterlaag
Op een ondoorlatende ondergrond (folie) is steeds dezelfde dunne filterlaag toegepast met daarop blokken op hun kant op schaal 2,5 (Figuur 10). Op serie 12a na zijn de voegen steeds ingewassen met voegvulling (steenslag). De spleten tussen de blokken zijn gevarieerd:
 - serie 12a: koud tegen elkaar
 - serie 12b: brede langsvoeegen zonder afstandhouders
 - serie 12c: brede langsvoeegen met ronde stalen afstandhouders
 - serie 12cc: brede langsvoeegen met plastic afstandhouders
 - serie 12d: brede stootvoegen zonder afstandhouders
 - serie 12cd: brede langsvoeegen met plastic afstandhouders met voetje

- Serie 21: Betonblokken op hun kant op dunne uitvullaag
De betonblokken hadden een Haringman-vorm (met kuiltje in oppervlak) (zie Figuur 11). De blokken zijn op hun kant gezet met brede stootvoegen zonder afstandhouders en zijn vervolgens ingewassen.
- Serie 23: Betonblokken op hun kant op dunne uitvullaag
De bekleding was gelijk aan die van serie 21, behalve dat de blokken vlak waren zonder Haringman-kuiltje (zie Figuur 12).
- Serie 20: Plat gezette vlakke betonblokken met brede voegen
De bekleding is eerst opgebouwd met grote vlakke betonblokken van 50x50x20 cm² met brede stootvoegen die zijn ingewassen met voegvulling (serie 20a) (zie Figuur 13). Vervolgens is dezelfde bekleding op schaal 2 ingebouwd met blokjes van 25x25x10 cm² (serie 20b). Deze schaalproef is tevens uitgevoerd met brede langsvvoegen in plaats van stootvoegen.

In Tabel 1 zijn de belangrijkste eigenschappen van de steenzettingen naast elkaar gezet.

Serie	Uitvullaag			Toplaag						
	b	D ₁₅	k	D	Δ	spleetbreedte		Ω	inwas- sing D ₁₅	k'
	m	mm	mm/s	m	-	stoot- voeg mm	langs- voeg mm	%	mm	mm/s
1	0.10	19	180	0.15	1.376			+15	7.0	21
2	0.10	zandasfalt		0.15	1.376			+15	7.0	
3	0.07	klein	klein	0.20	1.955			-	7.0	-
4b	0.05	klein	klein	0.20	1.337	2	2	0.8	-	klein
4c	0.05	klein	klein	0.20	1.337	2	2	0.8	slib	klein
4d	0.05	klein	klein	0.21	1.582	20	20	12	9.3	klein
5 en 6	0.05	7.1	92	0.25	1.383	2.0	1.6	0.7	-	5.7
12a	0.05	7.2	93	0.20	1.317	0.8	0.8	1.2	-	4.4
12b	0.05	7.2	93	0.20	1.317	0.8	10.6	10.1	6.0	13.5
12c	0.05	7.2	93	0.20	1.317	0.8	10.6	9.3	5.7	12.3
12cc	0.05	7.2	93	0.20	1.317	0.8	9.1	7.3	5.7	9.8
12d	0.05	7.2	93	0.20	1.317	10.6	0.8	5.8	5.7	7.9
12cd	0.05	7.2	93	0.20	1.317	0.8	8.6	6.9	5.7	9.2
20a	0.10	18.6	175	0.20	1.337	26	1	5.2	-	37
20a	0.10	18.6	175	0.20	1.337	26	1	5.2	15.7	9.9
20bs	0.05	10.8	125	0.10	1.344	0.8	13.1	5.3	8.3	8.2
20bl	0.05	10.8	125	0.10	1.344	14.0	0.8	5.2	8.3	7.9
21	0.06	8.0	101	0.20	1.313	6.5	0.8	3.9	2.6	5.5
23	0.06	8.0	101	0.20	1.279	6.5	0.8	3.9	-	32
23	0.06	8.0	101	0.20	1.279	6.5	0.8	3.9	2.6	5.5

Tabel 1 Eigenschappen van uitvullaag en mijnsteen (doorlatendheden zijn berekend met ANAMOS, echter serie 5 en 6 zijn meetwaarden)

In de tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

- b = dikte van de filterlaag (m)
D₁₅ = korrelgrootte van het filter die door 15 gewichtsprocenten onderschreden wordt (m)
k = doorlatendheid van het filter (berekend met ANAMOS) (m/s)
D = dikte van de toplaag (gemiddelde dikte in geval van basalt en graniet) (m)

- Δ = relatieve soortelijke massa van toplaagmateriaal (-)
= $(\rho_b - \rho)/\rho$
 ρ_b = soortelijke massa van blok (kg/m^3)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)
 Ω = relatief open oppervlak (%)
 k' = doorlatendheid van de toplaag (berekend met ANAMOS) (m/s)

De vermelde spleetbreedten zijn de geschatte waarden inclusief inbouw-onnauwkeurigheid. Er is vastgesteld dat de kleine koud tegen elkaar gezette blokken een gemiddelde spleetbreedte van ongeveer 0,8 mm hebben. Voor de grote blokken is dat ongeveer 1 mm. Verder is de spleetbreedte van brede voegen met afstandhouders naar schatting ongeveer 0,6 mm breder dan de maat van de afstandhouders.

Voor het berekenen van de toplaagdoorlatendheid is aangenomen dat de brede voegen zijn ingewassen met voegvulmateriaal, maar de spleten waar blokken koud tegen elkaar liggen niet. Voor de niet ingewassen zettingen met brede voegen is gerekend met een gemiddelde spleetbreedte. Verder zijn eventuele vellingkanten niet meegeteld bij het bepalen van de toplaagdoorlatendheid.

De achtergronden bij deze uitgangspunten en aannamen zijn te vinden in het analyseverslag (Klein Breteler e.a. 2000).

De soortelijke massa van de blokken is doorgaans bepaald door enkele blokken boven water en onder water te wegen. De spreiding in de resultaten was klein (orde 3% verschil tussen hoogste en laagste meetresultaat). Voor serie 5 is ook de soortelijke massa van betonblokken gemeten die 3 etmalen in het water hadden gelegen. Dat leverde een 0,4% hogere waarde.

2.3 Proevenprogramma

Uitgangspunt voor de proevenprogramma's van de verschillende opstellingen was dat er meestal eerst proeven met regelmatige golven werden uitgevoerd en daarna proeven met onregelmatige golven. Het doel van de proeven met regelmatige golven was het verkrijgen van een kleine dataset van drukken op en onder de bekleding, die in de tijd te koppelen zijn aan de (min of meer) bekende waterbeweging. Dit vereenvoudigt de analyse. Bij deze proeven mocht geen schade aan de bekleding optreden. Deze proeven zijn in de analyse niet gebruikt omdat de proeven met onregelmatige golven goed bruikbare resultaten gaven en omdat deze beter aansluiten op de praktijkbelasting.

Bij de proeven met onregelmatige golven was een belangrijk doel het vinden van golfcondities waarbij schade aan de bekleding ontstaat, naast het meten van de drukken, verplaatsingen en krachten.

Vanaf serie 20 zijn alleen nog proeven met onregelmatige golven uitgevoerd, omdat tijdens de analyse duidelijk was geworden dat de golfbelasting tijdens regelmatige golven moeilijk vergelijkbaar is met die van onregelmatige golven.

Het programma voor de proeven met onregelmatige golven bestond meestal uit een serie proeven met een gelijkblijvende waarde van de brekerparameter ξ_{op} (meestal $\xi_{op} \approx 1,4, 1,8$ of $2,2$) waarbij voor de opeenvolgende proeven de golfhoogte meestal met stappen van circa 0,2 m werd opgevoerd totdat schade optrad of de maximale waarde van H_s in de

Deltagoot werd bereikt. In dit laatste geval werd de belasting verder verhoogd door de waarde van ξ_{op} te verhogen.

De waterstand is voor alle proeven zo ingesteld dat de grootste golfbelasting in het midden van de dicht geïnstumenteerde sectie van de bekleding zou gaan vallen.

Voorafgaande aan de reguliere proeven van serie 12c, 12cc, 12d en 12cd werd er een 'ingolfproef' uitgevoerd. Het doel van deze proef was om het inwasmateriaal de kans te geven beter in de voegen te komen (het voegvulmateriaal wordt door de golven in de voegen gewassen). Na deze ingolfproef, die met een lage golfhoogte ($H_{s,i} = 0,5$ m en $T_p = 4,6$ s) en een relatief lange golfperiode werd uitgevoerd, werd de bekleding opnieuw ingewassen. De duur van deze ingolfproef was 30 minuten.

De duur van een proef met regelmatige golven was als regel twaalf minuten (twee minuten ingolven en tien minuten meten). De duur van een proef met onregelmatige golven was als regel circa 1000 golven.

Tijdens proefserie 20a en 23 zijn eerst een aantal proeven uitgevoerd op een bekleding die niet was ingewassen met steenslag. Deze proeven hadden tot doel om te bezien in hoeverre het inwasmateriaal de stabiliteit van de bekleding en de grootte van de verschildrukken beïnvloed.

3 Resultaten

3.1 Schadeontwikkeling

Tijdens de proeven ontwikkelde de schade zich in 5 verschillende vormen. De volgende schadeontwikkelingsmechanismes zijn te onderscheiden:

- **Zuigermechanisme**
Blokken kunnen als gevolg van de golfaanval separaat uit het talud komen. Dit fenomeen wordt zuigermechanisme genoemd, omdat het blok als een zuiger uit het talud gedrukt wordt. Een voorbeeld wordt getoond in Figuur 28.
- **Kattenrugmechanisme**
Wanneer één rij blokken, in de langsrichting van de dijk, in het midden omhoog komt en de blokken onderling in de rij niet verschuiven wordt dit het kattenrugmechanisme genoemd. Een rij blokken bolt als het ware op. Een voorbeeld van dit mechanisme wordt getoond in Figuur 29.
- **S-profiel**
Door een golfvormige verzakking en verhoging van de blokken langs het talud kan een S-profiel ontstaan. Deze vorm van schade wordt derhalve een S-profiel genoemd. Een voorbeeld van de verplaatsing van de blokken volgens een S profiel wordt getoond in Figuur 14
- **Z-profiel**
Door verzakking en verhoging van de blokken langs het talud omhoog kan ook een Z-profiel ontstaan. De gradiënt tussen de verhoging en de verlaging is veel groter dan bij het S-profiel. Deze vorm van schade wordt een Z-profiel genoemd. Een voorbeeld van de verplaatsing van de blokken volgens een Z-profiel wordt getoond in Figuur 15.

Als laatste schademechanisme kan het uitspoelen van inwasmateriaal genoemd worden. Als gevolg van het verdwijnen van het inwasmateriaal tussen de blokken, kunnen deze gaan verschuiven. In serie 12b, met blokken op hun kant met brede langsvogen zonder afstandhouders, gingen rijen blokken het talud af schuiven en ontstonden zeer brede langsvogen waardoorheen het filtermateriaal ging uitspoelen. In serie 23, met blokken op hun kant met brede stootvogen zonder inwasmateriaal, is vastgesteld dat de blokken in een rij zijdelings verschuiven, waardoor ook weer het filtermateriaal ging uitspoelen.

Gezien de aard van het mechanisme wordt het uitspoelen van inwasmateriaal meer gezien als een aanleiding tot een schademechanisme.

Tijdens de proeven in het huidige Deltagootonderzoek werd voor beginnende schade en ernstige schade het volgende criterium gehanteerd:

1. **Beginnende schade:**
 - a) Als een steen ten opzichte van de naastliggende stenen 2 à 5 cm uit de bekleding steekt (10 à 25% van de blokdikte), of

- b) Als de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, gemeten met peil-apparaat) ongeveer 5 cm is geworden.
- 2. Ernstige schade (bezwijken):
 - a) Als een steen geheel uit de zetting is geslagen, of
 - b) Als de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, gemeten met peil-apparaat) meer dan ongeveer 10 cm is geworden.

In de rapportage is dit verder verfijnd tot 4 schadeniveaus a t/m d, zoals vermeld in de volgende paragraaf.

3.2 Golfhoogte bij beginnende schade

Alle metingen die verricht zijn hebben een schadewaarde meegekregen om de ontwikkeling van de schade te kunnen volgen. In de kolom "Schade" in tabel 4 wordt de volgende definitie gehanteerd:

- a) de grootste golfhoogte (H_{si}) waarbij een verplaatsing ten opzichte van een naastliggend blok kleiner dan 10 % van de dikte van het blok optrad
- b) de kleinste golfhoogte (H_{si}) waarbij een verplaatsing ten opzichte van een naastliggend blok tussen 10% en 20% van de dikte van het blok optrad
- c) de kleinste golfhoogte (H_{si}) waarbij een verplaatsing ten opzichte van een naastliggend blok tussen 20% en 50% van de dikte van het blok optrad
- d) de kleinste golfhoogte (H_{si}) waarbij een verplaatsing ten opzichte van een naastliggend blok groter dan 50% van de dikte van het blok optrad

In Figuur 16 zijn de meeste meetpunten uit Tabel 4 weergegeven. Getracht is om per meetserie een schadepunt type d en een schadepunt type b weer te geven. Is er geen schadepunt d gevonden, dan wordt de grootste golfhoogte met schadetype c genomen. Is er geen schadepunt b, dan wordt het grootste schadepunt a gebruikt.

De bovenste lijn geeft de bovengrens van het twijfelachtige gebied aan, die door de Leidraad Toetsing op Veiligheid (TAW 1999) gegeven wordt voor deze constructies. De onderste lijn geeft de ondergrens uit deze Leidraad van het twijfelachtige gebied aan.

In Figuur 16 is te zien dat de bekleding met blokken op de kant en brede ingewassen langsvoeegen (serie 12c, 12cc, 12cd) instabiel wordt (schade type d) bij een $H_s/\Delta D \approx 6$ (zie de gele punten met groene rand). De invloed van ξ_{op} is klein, maar bij een toename van ξ_{op} neemt de grootte van $H_s/\Delta D$ bij schade wel wat af.

In Serie 12b, waarbij geen afstandhouders tussen de blokken gebruikt zijn, treedt reeds schade op bij $H_s/\Delta D \approx 4,5$. Doordat de schade ernstige vormen aanneemt na de onvermijdelijke uitspoeling van het inwasmateriaal wordt deze constructie afgeraden.

De bekleding met blokken op de kant en brede ingewassen stootvoegen (serie 12d, 21 en 23) wordt ook bij een $H_s/\Delta D \approx 6$ instabiel (schade type d) (zie de rode punten met zwarte rand), net als de blokken op hun kant met brede langsvoeegen. De invloed van ξ_{op} is klein. Ook voor Basalton op een lage berm (serie 1) geldt dat schade type d bereikt wordt bij een $H_s/\Delta D \approx 6$.

Bovenstaande series, behalve 12b, hebben ongeveer een zelfde $H_s/\Delta D$ -waarde van ongeveer 6 waarbij de constructie instabiel wordt. Deze constructietypen kunnen 'gunstig' genoemd worden.

De schade van type d bij proef 2o01 (Basalton op zandasfalt) trad op bij $H_s/\Delta D$ van ongeveer 4. Ditzelfde geldt voor een kortdurende golfbelasting op met gietasfalt overgoten basalt.

Series 12a, 20a en 20b hebben een lagere $H_s/\Delta D$ -waarde waarbij de schadetype d optreedt. Voor serie 12a is dat ongeveer 5 (zie de blauwe punten), waarbij een toename van ξ_{op} de grootte van $H_s/\Delta D$ bij schade iets afneemt, doch minder dan volgens $H_s/\Delta D = F\xi_{op}^{-2/3}$. Voor serie 20a is de $H_s/\Delta D \approx 3$ à 3,5 bij schadetype d en voor 20b is dat 3,5 à 4,0 (zie de groene punten). Deze constructies hebben een ongunstigere stabiliteit.

In Figuur 16 valt op dat de meeste schadepunten type d boven de bovenste gestreepte lijn liggen. Dat wil zeggen dat de schade pas optrad bij een grotere golfhoogte dan te verwachten viel op basis van de Leidraad Toetsing. Verder lijkt de invloed van ξ_{op} op de $H_s/\Delta D$ -waarde waarbij schadetype d optreedt kleiner dan volgens de Leidraad Toetsing. De nieuwe metingen stroken niet met de getrokken lijnen uit de Leidraad Toetsing.

Daarom is een andere presentatie van de meetpunten gemaakt. Eerst is de vorm van de onder- en bovengrenslijn bekeken, en vervolgens is de indeling van de metingen aangepast. Dit is onderstaand weergegeven.

Aan de hand van de proefresultaten is het moeilijk om vast te stellen wat het algemene verband is tussen $H_s/\Delta D$ en ξ_{op} . In het Black-box model (en eenvoudige model in Leidraad Toetsing) is uitgegaan van een relatie die voor kleine ξ_{op} sterk dalend was ($H_s/\Delta D \approx c\xi_{op}^{-0,7}$ à $c\xi_{op}^{-1}$), en een stijgende tendens voor $\xi_{op} > 3$ en $H_s/\Delta D > 2$. Deze gecompliceerde tendensen zijn echter niet goed te onderbouwen met de meetpunten, onder andere omdat de metingen verricht zijn bij een beperkte range van brekerparameters: $1,3 < \xi_{op} < 2,3$ (zettingen op filter).

Daarom wordt voor de presentatie van de huidige onderzoeksresultaten weer teruggekeerd naar een eenvoudige relatie. Aan de hand van de ervaringen tijdens modelonderzoek en de ligging van de meetpunten van een aantal series, kan gesteld worden dat er een licht dalende tendens is in $H_s/\Delta D$ als ξ_{op} stijgt. In (Klein Breteler e.a. 2000) is aan de hand van gemeten blokbewegingen in serie 12 vastgesteld dat de relatie $H_s/\Delta D \approx c\xi_{op}^{-1/3}$ beter is dan $H_s/\Delta D \approx c\xi_{op}^{-2/3}$. Dit wordt bij gebrek aan betere informatie hier overgenomen voor zowel de bovenbegrenzing als de onderbegrenzing van de puntenwolken.

De invloed van de brekerparameter ξ_{op} is nu nog zo onzeker dat aanbevolen wordt om eerst proeven te doen met grote ξ_{op} -waarden en vervolgens de invloed nader vast te stellen.

Verder wordt in dit verslag een andere indeling van de constructietypen gehanteerd op basis van het open oppervlak (spleten) in de toplaag ten opzichte van de doorlatendheid van het filter. Voor de gunstige constructies is de toplaag open en het filter relatief dichter. Voor de ongunstige constructies is het andersom: de toplaag is relatief dicht en het filter is open. Deze verhouding tussen de doorlatendheid van de toplaag en het filter wordt aangeduid met de parameter P, waarin ook rekening gehouden wordt met de mate van interactie (klemming) tussen de blokken (invloedsfactor Γ_{klem}). De parameter P is als volgt gedefinieerd:

$$P = \frac{D\Omega}{\sqrt{bD_{f15}}} \Gamma_{klem}$$

Op basis van het onderscheid tussen relatief doorlatende en relatief onderdoorlatende toplagen en filters kan de volgende indeling gemaakt worden.

Type	Constructie	Toplaag	Filter	P	Serie
a	geen filter	open	zandasfalt		2
c1	gunstig	open	dicht	> 0,4	1, 12b, 12c, 12cc, 12cd, 12d, 21, 23
c2	ongunstig	dicht	open	< 0,4	12a, 20, 5
c3	dicht geslibd	dicht	dicht		4

In de Figuren 17 t/m 20 zijn de meetpunten van de constructies van het type a, c1, c2 en c3 apart uitgezet.

In Figuur 17 is meetpunt 2o01 uit serie 2 (Basalton op zandasfalt) uitgezet met meetpunten van andere metingen met blokken op een vrijwel ondoorlatende ondergrond (een geotextiel en zand of klei). Het blijkt dat het proefresultaat met Basalton op zandasfalt goed aansluit op die van de andere constructies van type a. Dit is een verrassend resultaat omdat vóór de proeven nog werd gedacht dat een veel hogere stabiliteit bereikt zou kunnen worden.

In Figuur 18 is te zien dat “Hydroblocks” en “Armorflex zonder kabel (ingewassen)” (Type c1) een $H_s/\Delta D$ -waarde van ongeveer 6 hebben bij schadetype d, net als serie 12 (behalve bij serie 12b die volgens een afwijkend mechanisme bezweek). Voor de huidige metingen geldt een kleine afhankelijkheid van ξ_{op} , waarbij geldt dat $H_s/\Delta D$ afneemt bij toenemende ξ_{op} .

De in de figuur getekende lijnen markeren het 90% betrouwbaarheidsinterval behorende bij de meetpunten. Er is gekozen voor de functie $H_s/\Delta D = F^* \cdot c\xi^{-1/3}$. Om de waarde van F^* van de bovengrenslijn te bepalen worden het gemiddelde en de standaardafwijking van de waarden van F^* van de schadepunten (van type d) bepaald. De waarde van F^* voor de bovengrenslijn wordt verkregen door 1,64 maal de standaardafwijking op te tellen bij de gemiddelde waarden van F^* .

Voor de ondergrens geldt hetzelfde met dit onderscheid dat de meetpunten met schadetype b zijn genomen en vervolgens 1,64 maal de standaardafwijking wordt afgetrokken van de gemiddelde waarde van F^* .

Voor de bepaling van de boven- en ondergrens worden de meetpunten van serie 12b niet gebruikt. De reden hiervoor is het afwijkende bezwijkmechanisme: de rijen blokken gingen schuiven omdat er geen afstandhouders waren gebruikt, die in de praktijk wel altijd gebruikt worden bij brede langsvogen. De meetpunten van ‘Basalt op puin’ worden ook niet gebruikt, omdat deze constructie bij een verrassend lage belasting reeds bezweek. Het is achteraf gissen naar de oorzaken hiervan. Een mogelijke oorzaak zou wellicht kunnen zijn dat de inbouw van het model niet optimaal was, maar dit is niet bekend en moet daarom samen met andere oorzaken nader onderzocht worden.

In Figuur 19 (type c2) is te zien dat de schadepunten van de Oesterdam metingen veel lager liggen dan de huidige metingen, namelijk op een $H_s/\Delta D$ -waarde van ongeveer 3,5.

In Figuur 20 (dichtgeslibde bekledingen, type c3) zijn de boven- en ondergrens wat verder uit elkaar getekend dan uit bovenstaande procedure zou volgen (orde 20%), omdat er erg weinig meetpunten zijn.

3.3 Vergelijking bezwijkgolffhoogte volgens ANAMOS met meetresultaten

Het rekenmodel ANAMOS (inclusief 6-ksi-regel) wordt al jaren toegepast voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen. Daarbij is steeds gewerkt met de aanbeveling om ingewassen zettingen (met voegvulling) van Basalt, Basalton en Hydroblocks door te rekenen alsof zijn niet zijn ingewassen, omdat anders het resultaat overdreven conservatief (veilig) wordt. In het rekenmodel ANAMOS wordt namelijk alleen rekening gehouden met het ongunstige effect van de inwassing (de doorlatendheid van de toplaag wordt minder), en niet met de gunstige invloed van de inwassing (de interactie tussen de blokken wordt groter: betere klemming). Deze voor de praktijk handige uitruil van gunstige en ongunstige effecten, wordt in dit onderzoek in eerste instantie niet doorgevoerd, teneinde een zo zuiver mogelijke vergelijking tussen het rekenmodel en de metingen te verkrijgen.

De gemeten waarden van H_s voor schadetype b en d van een serie zijn vergeleken met de waarde van H_s berekend met ANAMOS met $\Gamma_{\text{klem}} = 1$ en met meerekenen van het inwasmateriaal (indien aanwezig). In Figuur 21 zijn deze punten weergegeven. De meeste punten liggen boven de getrokken lijn. Dit betekent dat ANAMOS conservatieve waarden geeft voor de stabiliteit van de bekleding en daardoor nog wel bruikbaar is.

Serie 12b (blokken op hun kant met brede ingewassen langsvoegen zonder afstandhouders) en serie 23 zonder voegvulling (blokken op hun kant met brede stootvoegen zonder afstandhouders) zijn niet vermeld, omdat deze constructies een ander bezwijkmechanisme vertoonden. In serie 12b spoelde de voegvulling uit, waarna de rijen blokken konden gaan schuiven (in het vlak van het talud). Omdat, dit geleerd hebbende uit deze proef, in de praktijk altijd afstandhouders worden toegepast in de langsvoegen is deze proef minder relevant. Tijdens serie 23 zonder voegvulling in de stootvoegen gingen de blokken ook schuiven, waarna er zoveel ruimte tussen de blokken ontstond dat het filter kon uitspoelen. Dit kan in de praktijk voorkomen worden door het toepassen van afstandhouders of voegvulling.

Het resultaat van ANAMOS bevat weinig veiligheidsmarge voor blokken op hun kant die koud tegen elkaar gezet zijn: voor serie 12a ligt één van de drie punten met schadetype b onder de lijn.

Een erg grote veiligheidsmarge geldt voor serie 21 en 23 (blokken op hun kant met brede ingewassen stootvoegen zonder afstandhouders): de golffhoogte bij schade type b of d is volgens de metingen 1,8 à 2,0 maal hoger dan volgens ANAMOS.

De meetresultaten van de proeven met blokken op hun kant kunnen ook vergeleken worden met ANAMOS-berekeningen waarbij gerekend is zonder de aanwezigheid van inwas-

materiaal, conform de aanbeveling voor Basalt, Basalton en Hydroblocks. Uit onderstaande tabel 2 blijkt dat ANAMOS nog steeds conservatieve resultaten geeft, echter vooral omdat volgens het rekenmodel de stabiliteit niet gegarandeerd kan worden als: $H_s/(\Delta D) > 6\xi_{op}^{-2/3}$ (de 6- ξ -regel).

ANAMOS is echter niet altijd conservatief voor toplagen bestaande uit plat gezette blokken met brede stootvoegen met voegvulling (serie 20). Bij proef 20a08 was reeds schade type c opgetreden bij $F \approx 4,6$, terwijl dit bij het volgens ANAMOS pas optreedt bij $F \approx 4,8$. Dit geeft aan dat ANAMOS een onveilig resultaat geeft als gerekend wordt zonder inwassing! Wellicht is in dit type bekleding de effectiviteit van de inwassing niet zo groot.

Hierdoor is ANAMOS voor toplagen bestaande uit plat gezette blokken met brede stootvoegen alleen bruikbaar als gerekend wordt met ingewassen voegen.

Bekleding	F volgens ANAMOS (zonder inwassing)	F gemeten (schade type b)	F gemeten (schade type c)
12a, blokken op hun kant, koud tegen elkaar	4,8	4,5 à 6	5 à 6,5
12c, blokken op hun kant met brede langsvogen	6	6,5 à 7	7 à 8
12d, blokken op hun kant met brede stootvoegen	6	7 à 7,5	7 à 8
12cd, blokken op hun kant met brede langsvogen	6	6,5 à 7	7 à 9
20, plat gezette blokken met brede stootvoegen	4,8	3,5 à 4,5	4,5 à 6
21, blokken op hun kant met brede stootvoegen	6	9 à 10	9 à 10
23, blokken op hun kant met brede stootvoegen	6	8 à 9	8 à 9

Tabel 2 Vergelijking berekende en gemeten waarden van $F = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s/(\Delta D)$

3.4 Nieuwe empirische relatie voor het stijghoogteverschil over de toplaag

Bij de analyse van de belasting op de steenzettingen zonder dichtslibbing of gietasfalt is vastgesteld dat het maximale stijghoogteverschil over de toplaag veel groter is dan volgens de oude formules (zoals in ANAMOS en het Ronde Front). Dit is vooral te wijten aan het feit dat de nu onderzochte constructies uit een andere klasse van steenzettingen komen. Ze hebben een relatief open toplaag een relatief weinig doorlatend filter (kleine lek lengte). Het is gebleken dat bij een kleine lek lengte ($\Lambda < 0,5$ à $0,7$ m) en kleine brekerparameter ($\xi_{op} < 2$ à $2,5$) er een krachtige golfklap is die leidt tot de belangrijkste stijghoogteverschillen, die een factor 2 groter kunnen zijn dan volgens de berekeningen met ANAMOS. Dat de bezwijk golfhoogte toch nog redelijk wordt voorspeld is met name het gevolg van klemming, die niet in de ANAMOS-berekeningen is meegeteld (zie paragraaf 3.5 en 3.6).

De metingen van alle proevenseries van het huidige Deltagootonderzoek (behalve serie 1) zijn gebruikt om te komen tot betere formules voor het stijghoogteverschil over de top laag. Deze hebben een zuiver empirische basis en hebben daardoor een beperkte geldigheid, maar kunnen toch het ontwikkelen van een nieuwe theorie stimuleren. Bij het zoeken naar invloedrijke parameters is bij dit type open steenzettingen geen duidelijke invloed gebleken van de brekerparameter, de lek lengte, de top laag doorlatendheid, het relatief open oppervlak en de blokbreedte.

Bij het opstellen van de empirische relatie is verondersteld dat er twee processen van belang zijn: de golfklap op het talud (gerelateerd aan golfcondities e.d.) en de druktransmissie naar een blok dat uitgelicht kan worden (gerelateerd aan constructieparameters). In formulevorm wordt dit: $\phi_{2\%}/H_s = f_{\text{golfklap}} \cdot f_{\text{constructie}}$. De volgende empirische relaties sluiten goed aan op de metingen (zie Figuur 22):

$$\bullet \text{ als } H_s \cdot T_p > 5,8 \text{ m} \cdot \text{s}: \quad \frac{\phi_{2\%}}{H_s} = 3,3 \cdot 10^{-4} \frac{c_w^{3/2} (0,7 + 4k / \sqrt{gD})}{g \sqrt{H_s T_p}} \quad (1)$$

$$\text{met } c_w = 1485 \text{ m/s } (3,3 \cdot 10^{-4} c_w^{3/2} / g \approx 1,9 \text{ m}^{1/2} \text{s}^{1/2})$$

$$\bullet \text{ als } H_s \cdot T_p \leq 5,8 \text{ m} \cdot \text{s}: \quad \frac{\phi_{2\%}}{H_s} = 0,8 \cdot \left(0,7 + \frac{4k}{\sqrt{gD}} \right) \quad (2)$$

Hierin is $f_{\text{golfklap}} = \min\{ 3,3 \cdot 10^{-4} c_w^{3/2} / (g \sqrt{H_s \cdot T_p}) ; 0,8 \}$ en $f_{\text{constructie}} = 0,7 + 4k / \sqrt{gD}$.

Vanwege het ontbreken van een goede theoretische onderbouwing van de formules moet aanbevolen worden om bij de eventuele toepassing hiervan een ruime veiligheidsmarge aan te houden.

Er moet duidelijk gesteld worden dat de formules alleen geldig zijn voor de bekledingen en omstandigheden die onderzocht zijn (alle met vrij open top laag):

- Platte blokken van $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ met spleten van minimaal orde 1 mm op een dunne uitvullaag van enkele centimeters dikte en $D_{f15} \approx 5$ à 10 mm op mijnsteen.
- Platte blokken van $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ met brede stootvoegen of langsvogen (met open oppervlak tot 10%) op een dunne filterlaag van enkele centimeters dikte en $D_{f15} \approx 5$ à 10 mm.
- Blokken op hun kant, koud tegen elkaar of met brede stoot- of langsvogen (met open oppervlak tot 10%), op een dunne filterlaag van enkele centimeters dikte en $D_{f15} \approx 5$ à 10 mm.
- Dichtgeslibde granietblokken op een dichtgeslibde filterlaag, waarbij voor de doorlatendheid van het filter in de formule $k \approx 0,001$ à $0,010 \text{ m/s}$ wordt aangehouden.
- Golfcondities die voldoen aan: $H_s \leq 1,7 \text{ m}$; $0,015 \leq H_s/L_{op} \leq 0,050$; diverse golfspectra.
- Taludhelling van 1:3,5 met een 5 m brede berm iets boven de waterlijn.

Uit deze formules blijkt het volgende:

- Het optredende stijghoogteverschil bij een top laag met brede stootvoegen of langsvogen, is gelijk aan die met de blokken koud tegen elkaar.
- Er is bij dit type constructies een verwaarloosbare invloed van de doorlatendheid van de top laag.

- Het stijghoogteverschil is voor bekledingen met voegvulling gelijk aan die zonder voegvulling in de brede voegen.
- Als $H_s \cdot T_p < 6$, dan is de invloed van T_p verwaarloosbaar.

De proefresultaten met een dichtgeslibd filter en toplaag (serie 4d) sluiten redelijk aan op de empirische relaties, mits de filterlaagdoorlatendheid $k \leq 0,01$ m/s gesteld wordt. Dit is te beargumenteren vanuit de gedachte dat er door het slib een weinig watervoerende filterlaag aanwezig is.

Het is in principe mogelijk dat de gemeten stijghoogteverschillen zijn beïnvloed door de beweging van de blokken. Er zijn helaas maar weinig punten in het gebied met $f_{\text{golflap}} < 2500$ en zonder blokbeweging. Er zijn geen verplaatsingen van de blokken met drukopnemers gemeten, waardoor niet eenduidig vastgesteld kan worden of de gemeten stijghoogteverschillen werkelijk zijn beïnvloed door de beweging van de blokken. Voorlopig wordt aanbevolen om de tendens voor $f_{\text{golflap}} < 2500$ nog niet in de praktijk toe te passen.

Aanbevolen wordt om het numerieke model ZSTEEN te ontwikkelen, omdat waarschijnlijk daarmee de stijghoogteverschillen over de toplaag beter berekend kunnen worden dan met ANAMOS of bovenstaande empirische relaties.

3.5 Stabiliteit van toplaag en blokbeweging

Hoewel de stijghoogteverschillen door ANAMOS sterk worden onderschat, wordt toch de stabiliteit in meer of mindere mate onderschat, waardoor ANAMOS voor de praktijk bruikbaar is, mits er zonder klemming gerekend wordt en bij plat gezette ingewassen rechthoekige blokken gerekend wordt met inwasmateriaal (zie § 3.3 en Figuur 21). Kennelijk worden de tekortkomingen in de beschrijving van de stijghoogteverschillen gecompenseerd door de klemming, die in werkelijkheid wel aanwezig is maar niet in ANAMOS wordt meegeteld. Voor een betrouwbaar, breed toepasbaar rekenmodel is het echter wenselijk dat de onderliggende deelprocessen ook goed worden beschreven. Aanbevolen wordt hier nader onderzoek naar te verrichten.

De verhouding tussen het 2%-stijghoogteverschil tijdens de proef met beginnende schade, ten opzichte van het eigen gewicht van de toplaag per m^2 (ΔD), is een maat voor de stabiliteit van de toplaag. Een overzicht van de waarden van $\phi_{2\%}/(\Delta D)$ voor alle proevenseries van het huidige Deltagootonderzoek is onderstaand gegeven. De resultaten zijn gegroepeerd in categorieën die gerelateerd zijn aan de waarde van $\phi_{2\%}/(\Delta D)$ bij begin van beweging:

- i) Zeer kleine sterkte: $\phi_{2\%}/(\Delta D) \approx 1,6$ bij begin van beweging
 - 23 zonder voegvulling (blokken op hun kant met brede stootvoegen)
- ii) Kleine sterkte: $\phi_{2\%}/(\Delta D) \approx 1,9$ bij begin van beweging
 - 4c (dichtgeslibde grote platte blokken met smalle spleten)
 - 5 (grote platte blokken met smalle spleten)
- iii) Gemiddelde sterkte: $\phi_{2\%}/(\Delta D) \approx 2,4$ bij begin van beweging
 - 12a (blokken op hun kant, koud tegen elkaar)
 - 12b (blokken op kant met langsvvoegen zonder afstandhouders)

- 20a zonder voegvulling (grote platte blokken met brede stootvoegen)
 - 20a (grote platte blokken met ingewassen stootvoegen)
 - 20b (kleine platte blokken met ingewassen stootvoegen)
 - 20b (kleine platte blokken met ingewassen langsvoegen)
 - 4d (ingewassen en dichtgeslibde granietblokken)
- iv) Grote tot zeer grote sterkte: $\phi_{2\%}/(\Delta D) \approx 2,7$ à $3,5$ bij begin van beweging
- 4b (grote platte blokken met smalle spleten op dicht filter)
 - 12d (blokken op hun kant met ingewassen stootvoegen)
 - 12cc (blokken op hun kant met ingewassen langsvoegen)
 - 12cd (blokken op hun kant met ingewassen langsvoegen)
 - 21 (blokken op hun kant met ingewassen langsvoegen)
 - 23 (blokken op hun kant met ingewassen langsvoegen)

De gepresenteerde waarden van $\phi_{2\%}/\Delta D$ bij begin van beweging en schade mogen niet gebruikt worden als klemfactor in ANAMOS. Deze waarden sluiten wel aan op formule (1) en (2).

Aan de hand van deze indeling is te zien dat de blokken op hun kant met brede ingewassen voegen een grote tot zeer grote sterkte hebben ($\phi_{2\%}/\Delta D > 2,7$), maar zodra de voegvulling is uitgespoeld, wordt de sterkte zeer klein ($\phi_{2\%}/\Delta D \approx 1,6$). De koud tegen elkaar geplaatste blokken op hun kant hebben een gemiddelde sterkte (2,4).

De plat geplaatste blokken zonder brede voegen hebben een kleine sterkte (1,9), of ze nu dichtgeslibd zijn of niet. Worden de plat geplaatste blokken met brede voegen gezet, dan wordt een gemiddelde sterkte verkregen (2,4). Het maakt in dit geval kennelijk niet uit of er langsvoegen of stootvoegen zijn gebruikt en of ze zijn ingewassen. Desondanks moet in de praktijk de ontbrekende voegvulling (of afstandhouders) altijd direct aangevuld worden, omdat er andere bezwijkmechanismen kunnen optreden, zoals het schuiven van de blokken bij ontbrekende afstandhouders.

Waarschijnlijk hebben de ingewassen en dichtgeslibde granietblokken ook minstens een gemiddelde sterkte ($\phi_{2\%}/\Delta D > 2,4$).

3.6 Inklemming

Uit de metingen van het stijghoogteverschil over de toplaag samen met de geconstateerde schade is de mate van klemming berekend (interactie tussen de blokken). Daarbij is er een vergelijking gemaakt tussen de opgetreden stijghoogteverschillen bij begin van beweging en het eigen gewicht van de toplaag, rekening houdend met minimale wrijving, traagheid en verhinderde toestroming. Op basis hiervan wordt voorzichtig geconcludeerd dat de invloedsfactor voor klemming in deze proefopstelling ongeveer als volgt geweest zou kunnen zijn:

- | | |
|--|--|
| • Basalton op een lage berm, serie 1: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,5$ à $2,5$ |
| • Plat gezette vierkante blokken, serie 5: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,1$ à $1,5$ |
| • Blokken op hun kant, koud tegen elkaar, serie 12a: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 2,1$ à $2,7$ |
| • Blokken op hun kant, met brede langsvoegen, serie 12c, 12cc, 12cd: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 2,2$ à $2,8$ |
| • Blokken op hun kant, met brede stootvoegen, serie 12d: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 2,3$ à $2,9$ |
| • Ingewassen Haringmanblokken op hun kant, serie 21: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 2,5$ à $2,8$ |

- | | |
|---|---|
| • Niet ingewassen blokken op hun kant, proef 23o02: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,1 \text{ à } 1,4$ |
| • Ingewassen blokken op hun kant, serie 23: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 2,6 \text{ à } 2,9$ |
| • Plat gezette grote blokken, serie 20a zonder voegvulling: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,6 \text{ à } 2,0$ |
| • Plat gezette grote blokken, serie 20a met voegvulling: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,4 \text{ à } 1,8$ |
| • Plat gezette kleine blokken, serie 20b met stootvoegen: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,6 \text{ à } 2,0$ |
| • Plat gezette kleine blokken, serie 20b met langsvogegen: | $\Gamma_{\text{klem}} \approx 1,7 \text{ à } 2,1$ |

Deze waarden van Γ_{klem} mogen niet gebruikt worden als klemfactor in ANAMOS, omdat deze gebaseerd zijn op gemeten stijghoogteverschillen.

De klemming van de ingewassen blokken op hun kant (serie 12, 21 en 23) is opmerkelijk groot. Het is zelfs meer dan in serie 1 met (schaars) ingewassen Basalton, die echter niet geheel juist was verschaald. De klemming in serie 5 is gering, zoals te verwachten was uit de ervaringen met trekproeven op de dijk.

De niet ingewassen bekleding van proef 23o02 heeft een hele lage klemfactor ten opzichte van de serie 12a, die ook niet ingewassen was. Het belangrijkste verschil tussen serie 12a en proef 23o02 is dat serie 12a geen brede stootvoegen had, waardoor er in een rij meer interactie tussen de blokken was en geen (significante) ruimte voor de blokken om zijdelings te schuiven.

Het is heel opmerkelijk dat de ingewassen bekleding van serie 20a een lagere klemfactor heeft dan de niet ingewassen bekleding. De klemming zoals die hier is berekend, is eigenlijk een restfactor, die ook beïnvloed wordt door andere bezwijkmechanismen, zoals het schuiven van blokken of de invloed van verhinderde toestroming. Dit laatste zou bij een ingewassen zetting wat groter kunnen zijn, waardoor bij gelijk stijghoogteverschil bij schade ($\phi_{2\%}/\Delta D$) de klemming (restfactor) kleiner is.

Serie “20a zonder voegvulling” had een bijzonder hoge klemfactor t.o.v. de niet ingewassen bekleding van serie 23. Het feit dat de grote blokken pas bij een grotere golfbelasting gaan schuiven, heeft ongetwijfeld bijgedragen aan de stabiliteit. Door de wijze waarop de klemming als een restfactor is behandeld, zal dit ook bijdragen aan de grootte van de Γ_{klem} . Bij zowel serie 23 als bij 20a is schade geïnitieerd door het zijdelings verschuiven van de blokken waardoor het filtermateriaal kon gaan uitspoelen. Aangezien in opstelling 20a veel grotere (0,5 m breed) blokken zijn beproefd dan in opstelling 23 (0,2 m breed), hebben de blokken van opstelling 20a een beduidend grotere weerstand tegen zijdelings verschuiven. Daardoor ontstaat bij de grote hoogte-breedte-verhouding van opstelling 23 (0,2 m/ 0,2 m = 1) het mechanisme ‘zijdelings verschuiven’ al bij een relatief (gezien de bekledingsdikte) lage golfbelasting. Bij de kleine hoogte-breedte-verhouding van opstelling 20a (0,2 m/ 0,5 m = 0,4) wordt het mechanisme pas bij een veel grotere belasting geactiveerd, een belasting die zelfs ongeveer even groot bleek als die bij opstelling 20a met inwassing. Als opstelling ‘20a zonder inwassing’ was voorzien van verankerde afstandhouders in de stootvoegen, dan zou het mechanisme “zijdelingse verschuiving” zijn verhinderd, hetgeen wellicht tot een nog iets hogere sterkte zou hebben geleid. Overigens kijkende naar de inklemming lijkt de bekleding van plat gezette blokken zonder voegvulling goed te presteren in vergelijking met dezelfde met voegvulling. Dit is voor de praktijk niet zo, omdat de belasting ($\phi_{2\%}/\Delta D$) bij een gegeven golfhoogte voor de niet-ingewassen bekleding beduidend groter was.

3.7 Invloed van golfspectrum

De invloed van het golfspectrum op de stabiliteit van steenzettingen is onderzocht door het stijghoogteverschil over de top laag te meten tijdens proeven met diverse spectra:

- Smalle spectra:
 - Jonswap
 - Pierson Moskowitz
- Brede spectra:
 - Gemeten gebroken golven aan het eind van een lang horizontaal voorland
 - dubbeltoppig spectrum

De metingen zijn gegeven in Figuur 23. Te zien is dat het dimensieloze stijghoogteverschil op de kleine blokken groter is dan op de grote blokken. Als we ons richten op de kleine blokken zien we dat het Jonswap en Pierson Moskowitz spectrum het grootste opwaartse stijghoogteverschil geven. Het brede dubbeltoppig spectrum geeft een kleiner opwaarts stijghoogteverschil. Voor de grotere blokken zijn de verschillen zeer klein. Het zeer brede spectrum geeft een gemiddeld 5% lager opwaarts stijghoogteverschil. Omdat de verschillen klein zijn ten opzichte van de spreiding in de resultaten, kan gezegd worden dat het opwaarts stijghoogteverschil tijdens golfaanvallen met een breed golfspectrum niet groter is dan voor golfaanvallen met een smaller spectrum.

3.8 Voegvulling

Tijdens de proevenseries is af en toe de waterstand verlaagd om de schade te inspecteren en te meten hoeveel inwasmateriaal uitgespoeld is. De uitspoeling van het inwasmateriaal is soms direct aanleiding tot vervormingen (zoals in serie 12b), en kan soms indirect de stabiliteit verminderen doordat de klemming afneemt. Zonder inwasmateriaal is de stabiliteit duidelijk kleiner dan met inwasmateriaal, zoals uit de proefresultaten van serie 20a en vooral 23 blijkt.

Uit de metingen is het nauwelijks vast te stellen of de golfhoogte of de totale golfduur primair bepalend is voor de mate van erosie. Dit probleem is veroorzaakt omdat steeds een proefserie is uitgevoerd met stap voor stap toenemende golfhoogte, terwijl uiteraard ook de cumulatieve proefduur toeneemt.

Uit de metingen kan globaal de volgende conclusie getrokken worden, die alleen geldig is voor de onderzochte omstandigheden:

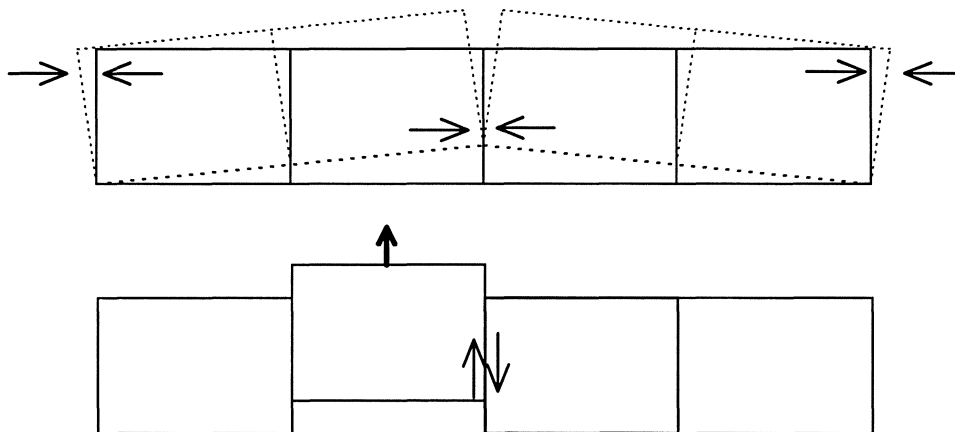
- Erosie van voegvulling uit overwegend vlakke zetting (zonder turbulentieverhogende elementen):
 - Langsvoegen:
15 cm erosie na 4 à 7 uur golven en/of $H_s = 0,6$ à $1,2$ m
 - Stootvoegen:
15 cm erosie na 4 à 8 uur golven en/of $H_s = 1,0$ à $1,6$ m
 - Stootvoegen met Haringmanblokken op hun kant:
15 cm erosie na 12 à 15 uur golven en/of $H_s = 1,4$ à $1,8$ m
- Langsvoegen bij turbulentieverhogende elementen (oneffenheden in taludoppervlak, zoals kabels):

- 15 cm erosie na 0,5 à 2 uur golven en/of $H_s = 0,6$ à $1,0$ m

3.9 Normaalkrachten en momenten in de rijen

Tijdens de proevenseries 12, 21 en 23 is een aantal proefopstellingen uitgerust met krachtopnemerblokken. Dit zijn blokken die de normaalkracht in een rij meten. Doordat de krachtopnemerblokken twee boven elkaar geplaatste krachtopnemers hadden, konden zowel normaalkrachten als momenten gemeten worden.

Aangenomen kan worden dat bij het opbollen van de bekleding er een normaalkracht wordt opgebouwd (spatkracht), omdat een opbollende rij blokken breder is dan een vlak liggende rij. In onderstaande figuur is te zien dat de verplaatsing van blokken aanleiding geeft tot normaalkrachten en/of momenten in een rij.



Figuur Opbollende rij blokken leidt over grotere afstanden tot excentrische normaalkrachten en dus momenten in de rij, schuiven leidt tot schuifkrachten die slechts zeer lokaal kleine momenten opleveren

In de figuur is te zien dat de normaalspanning aan de uiteinden van de opbollende rij bovenin de blokken is geconcentreerd, maar in het midden van de rij onderin de blokken zit. Er is sprake van een drukdiagonaal. Daardoor is er ook een (buigend-) moment in de rij.

In geval van een verticale verplaatsing van één of meerdere blokken is er sprake van onderlinge schuifkrachten tussen het bewegende blok(ken) en de aangrenzende blokken. Daardoor is er slechts zeer lokaal sprake van momenten.

De resultaten van de metingen leiden onder andere tot de volgende constatering:

- De dimensieloze locatie van de grootste kracht in een krachtopnemer, d_{km}/H_s , is meestal ongeveer gelijk aan de dimensieloze locatie van het 2%-stijghoogteverschil, $d_{s2\%}/H_s$, als deze laatste relatief klein is. Het is niet duidelijk waarom in sommige proeven waarbij $d_{s2\%}/H_s$ vrij groot is, de dimensieloze locatie van de grootste kracht veel minder diep is.
- De diepte van de grootste verplaatsing, d_{vpl} , is ongeveer gelijk is aan de diepte met grootste kracht, d_{km} . Vanwege de relatie tussen het opbollen van een rij blokken en de optredende normaalkracht is dat te verwachten.

- Het is gebleken dat de maximale normaalkrachten in de rijen en maximale momenten in de krachtmeetblokken toenemen met het toenemen van de golfbelasting en dat beide in serie 21 wat kleiner zijn dan in serie 23. Dit laatste is logisch als wordt bedacht dat de inwassing in de kuiltjes van de Haringmanblokken (serie 21) zorgt voor meer interactie tussen de rijen dan in geval van vlakke blokken (serie 23).

Hoewel de metingen wel inzicht geven in de processen die spelen bij het bezwijken van steenzettingen, zijn er nog geen conclusies te trekken die in de praktijk bruikbaar zijn. De proefresultaten kunnen goed gebruikt worden als verificatiemateriaal voor het rekenmodel DIANA, waarmee de interactie van blokken en zuilen numeriek gemodelleerd zijn.

3.10 Trekproeven

Op opstelling 12, 20b, 21 en 23 zijn tevens trekproeven op de verschillende blokken uitgevoerd. De trekproeven werden in de eerste proefseries voorafgaande aan de golfproeven uitgevoerd en later nadat al enkele golfproeven waren uitgevoerd. Bij Opstelling 12c werden geen trekproeven uitgevoerd.

Bij een trekproef werd door middel van een trekinstallatie aan één blok van de bekleding getrokken (zie Figuur 24). De belasting op dit ene blok werd opgevoerd totdat het blok (al dan niet tezamen met andere blokken) uit de bekleding omhoog kwam of totdat de maximale toelaatbare belasting van de trekinstallatie werd bereikt.

Eerst werd steeds de gewenste voorspanning van 100 N in de rijen met blokken aangebracht. Dit werd gedaan door de wartelblokken uit te draaien.

Het precies op 100 N brengen van de voorspanning bleek erg moeilijk, waardoor de uiteindelijke voorspanning per proef nogal kan verschillen.

De benodigde kracht om een blok uit het talud te trekken was voor alle trekproeven groter dan 300 N (3 maal het eigen gewicht van het blok). Geconcludeerd mag worden dat geen van de blokken geheel los zat.

In de onderstaande tabel 3 is de vorm van het mechanisme weergegeven. Er blijkt geen duidelijk verband tussen de geometrie en het mechanisme te bestaan.

Serie	kattenrug aantal	zuiger aantal
12a (koud tegen elkaar)	6	2
12b (brede langsvogen)	5	5
12cc (brede langsvogen)	3	1
12d (brede stootvogen)	0	4
12cd (brede langsvogen)	2	2
20b (brede langsvogen)	0	10
20b (brede stootvogen)	10	0
21 (brede stootvogen)	0	8
23 (brede stootvogen)	0	8

Tabel 3 Schadevorm en aantal na trekproeven

Het aantal trekproeven is helaas te klein om op basis van een statistische analyse iets te zeggen over de klemfactor. Daarvoor zijn er minstens 50 à 100 nodig.

3.11 Schaalecten

Aan de hand van de proefresultaten van serie 20b met stootvoegen, die precies op schaal 1:2 ten opzichte van serie 20a met voegvulling is gebouwd, is onderzocht of er schaalecten zijn. Voor de beschouwde proeven geldt dat $H_s T_p < 6$ ms. Rekening houdend met de gebruikelijke schaalregels blijken de lekengte, de optredende stijghoogteverschillen en de bezwijkbelasting slechts orde 10% af te wijken. Gezien de meetnauwkeurigheid kan geconcludeerd worden dat er geen significante schaalecten zijn.

Als formule (1) een trend weergeeft die in werkelijkheid ook echt aanwezig is, dan kan hiermee berekend worden dat er wel schaalecten te verwachten zijn als $H_s T_p > 6$ ms. Bij toenemende constructie-dimensies zal de bezwijkgolffoogte meer dan evenredig hoger worden volgens de formule ($H_s/\Delta D$ neemt toe als H_s en D toenemen). Aanbevolen wordt dit te verifiëren.

3.12 Breuksteen overlaging

Bij de inbouw van de talusbekleding voor Opstelling 7 werd gebruik gemaakt van het 1:3,5 talud zoals dit er na de proeven voor Opstelling 6 in de Deltagoot aanwezig was. Tegen het uit betonblokken van $0,50 \times 0,50 \times 0,25 \text{ m}^3$ bestaande talud was een $2 \cdot D_{n50} = 2 \cdot 0,25 = 0,50 \text{ m}$ dikke laag breuksteen aangebracht, zie Figuur 25. De breuksteenlaag begon op de gootbodem en eindigde op de stilwaterlijn, die afhankelijk van de proef op respectievelijk + 2,0 m en +2,2 m lag. De gebruikte breuksteen was geselecteerd als 21 - 85 kg met een M_{50} van 42 kg en een volumieke massa van 2610 kg/m^3 .

De proeven zijn uitgevoerd met een zeer lage waterstand t.o.v. de golffoogte en een breed golfspectrum. De golffoogteverdeling was bij de constructie niet erg verschillend van een Rayleigh-verdeling. Het spectrum was wel breed en tevens was de golfvorm zeer niet-lineair.

Onder deze omstandigheden blijkt de opgetreden schade aan de constructie slechts orde 10% à 20% groter te zijn dan volgens de formules uit CUR/CIRIA (1991) en het PC-programma BREAKWAT van WL. De invloed van de afwijkende golfvorm en spectrum was derhalve niet groot.

De relatieve golfoploop $z_{2\%}/H_{si}$ bleek tijdens de proeven op Opstelling 7 soms sterk gereduceerd te worden door de aanwezigheid van de breuksteen ($z_{2\%}/H_{si} = 2,1$ à $2,3$). Dit geldt met name als de schade nog maar gering is. Zodra echter de schade, die vooral op de waterlijn plaatsvond, een waarde van 4 à 5 overschrijdt, wordt er weer een relatieve oploop gevonden als op een glad talud (als Opstelling 6: $z_{2\%}/H_{si} = 2,8$ à $3,0$).

4 Conclusies en aanbevelingen

Het huidige onderzoek is vooral gericht geweest op constructies met een relatief open top laag en een relatief weinig doorlatend filter, terwijl in het verleden juist rekenmodellen zijn ontwikkeld voor de relatief dichte toplagen. Hierdoor geeft het onderzoek een belangrijke aanvulling op de bestaande kennis. Het is duidelijk geworden dat bij dit type constructies specifieke schademechanismen spelen die vroeger niet of nauwelijks in de rekenmodellen werden meegeteld, zoals:

- golfklappen
- uitspoeling van voegvulling

Daarnaast is de stabiliteit onder golfaanval gemeten van dichtgeslibde en met gietasfalt overgoten constructies, hetgeen voor het toetsen van groot belang is.

Het onderzoek heeft veel metingen opgeleverd van de golfhoogte bij schade voor een brede range van bekledingen die voorheen nog niet of nauwelijks onderzocht waren. Dit stelt ons in staat om de methode van de eenvoudige toetsing te verbeteren. In vele gevallen zal dit leiden tot een positiever toetsresultaat (minder afkeuringen).

Verder is er veel informatie vergaard over de belangrijkste processen die kunnen leiden tot schade die in een vervolgonderzoek gebruikt kunnen worden voor het ontwikkelen van rekenmethoden. In dit kader wordt er thans gewerkt aan een verbeterde opzet van een numerieke rekenmodel voor het bepalen van de stabiliteit van steenzettingen (ZSTEEN).

Onderstaand worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen gepresenteerd. In het meetverslag (Smith e.a. 2000) en het analyseverslag (Klein Breteler e.a. 2000) zijn deze in meer detail belicht.

Uitspoeling van voegvulling of afstandhouders

Het onderzoek heeft een aantal belangrijke resultaten opgeleverd betreffende de invloed van het voegvulmateriaal en de afstandhouders. Uit de proeven is gebleken dat deze een belangrijke functie vervullen voor de stabiliteit van de bekleding. Voor sommige constructietypen leidt het uitspoelen tot ongewenste bezwijkmechanismen, soms bij een relatief lage golfhoogte.

Op grond hiervan moeten de volgende bekledingen afgeraden worden:

- Blokken op hun kant met brede langsvogen en zonder afstandhouders voldoen niet (Constructie 12b). Al bij relatief lage golven spoelt het inwasmateriaal uit. Het gevolg hiervan is dat de blokken in het vlak van het talud kunnen verschuiven en het filter de ruimte krijgt om uit te spoelen, waarna instabiliteit volgt. Deze constructie wordt derhalve afgeraden.
- Ook de blokken op hun kant met brede langsvogen en plastic afstandhouders zonder voetje voldoen niet (Constructie 12cc). De afstandhouders drijven en werken zich tijdens golfaanval los en komen vervolgens uit de bekleding. Als ook de voegvulling uitspoelt kunnen de blokken in het vlak van het talud verschuiven. Daarna kan het filter

de gelegenheid krijgen om uit te spoelen, waarna instabiliteit volgt. Deze constructie wordt derhalve ook afgeraden.

- Blokken op hun kant met brede stootvoegen en zonder afstandhouders (Constructie 23) zijn beproefd met en zonder ingewassen voegvulling. De bekleding met voegvulling gaf initiële schade bij een bijna drie maal hogere golfhoogte dan die zonder voegvulling. Geconcludeerd mag worden dat het inwasmateriaal essentieel is, en het onderhoud gericht moet zijn op het behoud van de voegvulling, anders kan de constructie instabiel worden. Dit gevaar is vooral van belang als de blokbreedte B en bloklengte L ongeveer gelijk of kleiner zijn dan de blokdikte D , zoals bij blokken op hun kant.

Voor de praktijk kan aanbevolen worden om de steenslagsortering voor de voegvulling bij betonblokken op hun kant niet te fijn te kiezen: er moet een fractie zijn die de spleetbreedte kan overbruggen.

Belasting: stijghoogteverschil over de toplaag in vergelijking tot oude theorie

Bij de analyse van de belasting op de steenzettingen zonder dichtslibbing of gietasfalt is vastgesteld dat het stijghoogteverschil over de toplaag veel groter is dan volgens de oude formules (zoals in ANAMOS en het Ronde Front). Dit is vooral te wijten aan het feit dat de nu onderzochte constructies uit een andere klasse van steenzettingen komen. Ze hebben een relatief open toplaag een relatief weinig doorlatend filter (kleine lek lengte). Het is gebleken dat bij een kleine lek lengte ($\Lambda/D < 3$ à 5) en kleine brekerparameter ($\xi_{op} < 2$ à $2,5$) er een krachtige golfklap is die leidt tot de belangrijkste stijghoogteverschillen, die een factor 2 groter kunnen zijn dan volgens de berekeningen met ANAMOS.

Het belang van de golfklap neemt af als:

- de lek lengte toeneemt, en/of
- de brekerparameter toeneemt, en/of
- de overschrijdingsfrequentie van het stijghoogteverschil toeneemt (van bijvoorbeeld $\phi_{2\%}$ naar $\phi_{13\%}$)

ANAMOS onderschat de gemeten stijghoogteverschillen omdat de theorie ervan uitgaat dat het maatgevende moment vlak vóór de golfklap plaatsvindt, terwijl bij de metingen is gebleken dat bij deze open steenzettingen de maatgevende belasting optreedt tijdens de golfklap.

Naarmate de verhouding tussen golfhoogte en lek lengte, H_s/Λ , kleiner is, is er een kleiner verschil tussen de berekende en de gemeten stijghoogteverschillen. Dit sluit aan bij het feit dat de formules ontwikkeld zijn voor een relatief grote lek lengte.

De met ANAMOS berekende lek lengten blijken wel meestal vrij goed overeen te komen met de gemeten lek lengten. De verschillen waren bijvoorbeeld tijdens serie 12 ongeveer 10 tot 20%.

Nieuwe empirische relatie voor de stabiliteit en het stijghoogteverschil over de topplaat

Het huidige onderzoek heeft veel nieuwe metingen opgeleverd van de golfhoogte bij schade van diverse typen steenzettingen. Omdat er nu constructies beproefd zijn van een type waar in het verleden weinig onderzoek aan gedaan is, vormen deze meetpunten een zeer waardevolle aanvulling. Tevens is nu steeds gewerkt met onregelmatige golven die een veel realistischer belasting geven dan de vroeger veel gebruikte regelmatige golven. Aanbevolen wordt om het huidige Black-box model, dat ten grondslag ligt aan de eenvoudige toetsing (Leidraad Toetsing '99), te verbeteren met de huidige resultaten.

Daarnaast kunnen de huidige meetpunten aanleiding zijn om de bovengrens van de stabiliteit, die nu in ANAMOS is opgenomen (namelijk $H_s/\Delta D = 6\xi_{op}^{-2/3}$), te herzien. Aanbevolen wordt dit nader te onderzoeken.

De metingen van alle proevenseries van het huidige Deltagootonderzoek (behalve serie 1) zijn gebruikt om te komen tot betere formules voor het stijghoogteverschil over de topplaat (zie formule (1) en (2)). Deze hebben een zuiver empirische basis en hebben daardoor een beperkte geldigheid, maar kunnen toch het ontwikkelen van een nieuwe theorie stimuleren. Bij het zoeken naar invloedrijke parameters is bij dit type open steenzettingen geen duidelijke invloed gebleken van de brekerparameter, de leklengte, de topplaatdoorlatendheid, het relatief open oppervlak en de blokbreedte.

Uit deze formules blijkt onder andere:

- Het optredende stijghoogteverschil bij een topplaat met brede stootvoegen of langsvoegen, is gelijk aan die met de blokken koud tegen elkaar.
- Er is een verwaarloosbare invloed van de doorlatendheid van de topplaat.
- Het stijghoogteverschil is voor bekledingen met voegvulling gelijk aan die zonder voegvulling in de brede voegen.
- Als $H_s \cdot T_p < 6$, dan is de invloed van T_p verwaarloosbaar.
- De tendens in de metingen voor $H_s \cdot T_p > 6$ is onverwacht: het dimensieloze stijghoogteverschil $\phi_{2\%}/H_s$ neemt af met toenemende golfhoogte of -periode. Deze tendens zou echter beïnvloed kunnen zijn door de beweging van de blokken tijdens de zwaarste golfbelastingen. Aanbevolen wordt dit resultaat nog niet toe te passen in de praktijk, maar eerst nader te onderzoeken.

De proefresultaten met een dichtgeslibd filter en topplaat (serie 4d) sluiten redelijk aan op de empirische relaties, mits de filterlaagdoorlatendheid $k \leq 0,01$ m/s gesteld wordt. Dit is te beargumenteren vanuit de gedachte dat er door het slib een weinig watervoerende filterlaag aanwezig is.

Invloed van het spectrum op stijghoogteverschil

De invloed van het spectrum op stijghoogteverschil over de topplaat is slechts klein (zie Figuur 23). Een zeer breed spectrum geeft wellicht een 5 à 10% lager stijghoogteverschil dan een smal spectrum zoals Jonswap of Pierson Moskowitz. De golfsteilheid heeft hierop geen invloed.

Invloed van de blok grootte op stijghoogteverschil

Op één van de blokken in serie 20a (blokken van $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ met brede ingewassen stootvoegen) is op 5 plaatsen het stijghoogteverschil gemeten, in plaats van alleen in het midden. Het gemiddelde stijghoogteverschil van deze 5 drukopnemerparen is een betere weergave van de opwaartse belasting dan het stijghoogteverschil in het midden van het blok. Het blijkt dat bij deze grote blokken het gemiddelde stijghoogteverschil ca 25% lager is dan in het midden van het blok.

Waarschijnlijk wordt het verschil vooral veroorzaakt doordat de golfklap een plaatselijke belasting geeft, die bij deze grote blokken niet altijd op het gehele blok een opwaartse verschilddruk geeft. Bij kleine blokken zal dit effect minder spelen, waardoor kleine blokken met dezelfde dikte een grotere opwaartse belasting te verwerken krijgen.

Stabiliteit en blokbeweging

Hoewel de stijghoogteverschillen door ANAMOS sterk worden onderschat, wordt toch de stabiliteit in meer of mindere mate onderschat, waardoor ANAMOS voor de praktijk bruikbaar is, mits er zonder klemming gerekend wordt en bij plat gezette ingewassen rechthoekige blokken gerekend wordt met inwasmateriaal (zie § 3.3 en Figuur 21). Voor alle ingewassen bekledingen die thans zijn onderzocht geldt dat de rekenresultaten met $\Gamma_{\text{klem}} = 1$ beter overeenkomen met de gemeten stabiliteit als gerekend wordt alsof er geen inwasmateriaal aanwezig is (behalve voor plat gezette ingewassen rechthoekige blokken), conform de aanbevelingen uit het verleden.

Kennelijk worden de tekortkomingen in de beschrijving van de stijghoogteverschillen gecompenseerd door de klemming, die in werkelijkheid wel aanwezig is maar niet in ANAMOS wordt meegeteld. Voor een betrouwbaar, breed toepasbaar rekenmodel is het echter wenselijk dat de onderliggende deelprocessen ook goed worden beschreven. Aanbevolen wordt nader onderzoek te verrichten naar de grootte van de klemming en de stijghoogteverschillen als functie van de golfcondities en de constructie eigenschappen.

De verhouding tussen het 2%-stijghoogteverschil ($\phi_{2\%}$) tijdens de proef waarbij beginnende schade is vastgesteld, ten opzichte van het eigen gewicht van de toplaag per m^2 (ΔD), is een maat voor de stabiliteit van de toplaag. De waarden van $\phi_{2\%}/(\Delta D)$ voor alle proevenseries van het huidige Deltagootonderzoek zijn gegroepeerd in categorieën die gerelateerd zijn aan de waarde van $\phi_{2\%}/(\Delta D)$ bij begin van beweging.

Aan de hand van deze indeling blijkt dat de blokken op hun kant met brede ingewassen voegen een grote tot zeer grote sterkte hebben ($\phi_{2\%}/\Delta D > 2,7$), maar zodra de voegvulling is uitgespoeld, wordt de sterkte zeer klein ($\phi_{2\%}/\Delta D \approx 1,6$). De koud tegen elkaar geplaatste blokken op hun kant hebben een gemiddelde sterkte (2,4).

De plat geplaatste blokken zonder brede voegen hebben een kleine sterkte (1,9), of ze nu dichtgeslibd zijn of niet. Worden de plat geplaatste blokken met brede voegen gemaakt, dan wordt een gemiddelde sterkte verkregen (2,4). Het maakt in dit geval kennelijk niet uit of er langsvogegen of stootvoegen zijn gebruikt en of ze zijn ingewassen. Desondanks moet in de praktijk de ontbrekende voegvulling (of afstandhouders) altijd direct aangevuld worden, omdat er anders ongewenste bezwijkmechanismen kunnen optreden, zoals het schuiven van de blokken bij ontbrekende afstandhouders.

Waarschijnlijk hebben de ingewassen en dichtgeslibde granietblokken ook minstens een gemiddelde sterkte ($\phi_{2\%}/\Delta D > 2,4$).

Klemming

Er is een vergelijking gemaakt tussen de opgetreden stijghoogteverschillen bij begin van beweging en het eigen gewicht van de toplaag, rekening houdend met minimale wrijving, traagheid en verhinderde toestroming. Op basis hiervan kunnen voorzichtige conclusies over de invloedsfactor voor klemming getrokken worden voor de situatie waarbij er voldoende inwasmateriaal in de voegen aanwezig is.

De klemming van de ingewassen blokken op hun kant (serie 12, 21 en 23) blijkt opmerkelijk groot ($\Gamma_{\text{klem}} > 2,0$) te zijn. Het is zelfs meer dan in serie 1 met (schaars) ingewassen Basalton. De klemming van plat gezette betonblokken zonder brede voegen (serie 5) is gering ($\Gamma_{\text{klem}} < 1,5$), zoals te verwachten was uit de ervaringen met trekproeven op de dijk.

De plat gezette betonblokken met brede stootvoegen (serie 20) hebben een gemiddelde klemming.

Voor het ontwerpen en toetsen van bekledingen met rechthoekige betonblokken (koud tegen elkaar zowel op de kant als plat, of plat gezet met brede voegen) wordt voorlopig aanbevolen om ANAMOS te gebruiken met geen of geringe klemming, dus $\Gamma_{\text{klem}} < 1,2$ (bovengrens).

Al deze conclusies gelden uitsluitend als de ingewassen bekledingen ook daadwerkelijk voldoende inwasmateriaal in de voegen hebben. Verder geldt dat de deze klemfactoren niet geschikt zijn om te gebruiken in ANAMOS, omdat ze gebaseerd zijn op gemeten stijghoogteverschillen, die groter zijn dan volgens ANAMOS.

Bekleding op de berm

Bij de analyse is geconcludeerd dat ook op de berm de formules een belangrijke onderschatting van het maatgevende stijghoogteverloop op een berm geven (Klein Breteler 2000). Dit is vooral omdat de theorie zich richt op belastingen die relatief lang duren, terwijl ook veel korter durende belastingen schade kunnen geven.

Op basis van de analyse van de resultaten kan geconcludeerd worden dat de rekenmethode voor bermbekledingen aangepast moet worden. Tot de nieuwe methode er is, kan gebruik gemaakt worden van een rekenmethode op basis van ANAMOS en een invloedsfactor. De methode is als volgt:

- a) Voor het dimensioneren berekent men de benodigde toplaagdikte met ANAMOS, alsof het een bekleding betreft op het talud onder de berm. Vervolgens wordt deze toplaagdikte vermenigvuldigd met de invloedsfactor uit Figuur 26 en 27 en resulteert de benodigde toplaagdikte op de berm.
- b) Voor het toetsen deelt men eerst de aanwezige toplaagdikte op de berm door de invloedsfactor uit Figuur 26 en 27 en controleert men vervolgens de stabiliteit met ANAMOS alsof het een bekleding betreft op het talud onder de berm.

Deze methode geeft resultaten die goed overeenkomen met de proefresultaten van serie 1, maar die slechts voor een beperkte range van omstandigheden zijn geverifieerd.

Zuilen op zandasfalt

De proefresultaten hebben laten zien dat de stabiliteit van zuilen op zandasfalt overeenkomt met die van steenzettingen op een geotextiel op zand (zonder granulair filter) (zie Figuur 17). Dit is een veel lagere stabiliteit dan aanvankelijk werd verwacht.

Met de beschikbare informatie kan een eerste aanzet gegeven worden ten aanzien van de verwachte reststerkte van zandasfalt:

- a) Eerst is er sprake van erosie door langsschurende bekledingsresten. De erosiesnelheid is vermoedelijk ongeveer 0,3 à 1,0 cm/uur.
- b) Vervolgens zal er plaatselijk een gat in het zandasfalt ontstaan, waardoor het onderliggende zand uitspoelt en het zandasfalt inzakt en bezwijkt.

Overgoten basalt

De sterkte van een met gietasfalt overgoten constructie is sterk afhankelijk van de belastingsnelheid. Bij een statische overdruk, die iets groter is dan het eigen gewicht, is reeds een ontoelaatbare beweging gemeten. Hierbij is ook van belang dat het statische stijghoogteverschil over een groot oppervlak aangrijpt, maar ook dat de bekleding de gelegenheid krijgt om in de loop van vele minuten omhoog te kruipen, zonder dat er sprake is van een invloed van verhinderde toestroming.

Statische overdruk in combinatie met langdurige golfbelasting heeft een cumulatief effect op het gietasfalt. Langzaam maar zeker wordt het gietasfalt steeds verder opgelicht van de koppen van het basalt, waardoor blazen ontstaan die uiteindelijk zelfs enkele zuilen kunnen overspannen en ook de mastiek uit te voegen trekken. De golven breken de blazen op den duur open. Het is overigens opmerkelijk dat in de praktijk zelden of nooit de vorming van blazen is geconstateerd, maar wel dat het gietasfalt van de koppen van de basalt is verdwenen.

Voor het bezwijkgedrag tijdens golven speelt de staat van het gietasfalt een grote rol:

- Als het gietasfalt de bekleding nog goed waterdicht houdt en de ondergrond een lage doorlatendheid heeft, kan er door de golfbelasting een groot stijghoogteverschil ontstaan, wat bij een noemenswaardige beweging van de toplaag alweer wegvalt. De bekleding lijkt vastgezogen te zijn op de slecht doorlatende ondergrond ('verhinderde toestroming' genaamd).
- Als de toplaag door beschadigingen in het gietasfalt meer doorlatend is geworden en in de ondergrond door minimale bewegingen van de toplaag kanaaltjes zijn gevormd, neemt de invloed van verhinderde toestroming sterk af. Daardoor worden de bewegingen van de toplaag onder de golfbelasting steeds groter, wat het doorlatender worden van toplaag en ondergrond weer versterkt.

De maatgevende belasting voor de samenhangende toplaag als geheel blijkt op te treden tijdens de maximale golfneerloop (tijdens een hoog en steil stijghoogtefront op het talud). De toplaag maakt dan een relatief grote beweging omhoog.

De invloed van de toestroming wordt door de formules sterk overschat. Volgens de berekeningen zou de bekleding door de verhinderde toestroming nauwelijks kunnen bewegen, terwijl dit wel gebeurt. Dit kan een gevolg zijn van het niet goed bekend zijn van de doorlatendheid van de ondergrond, inclusief de invloed van mogelijke kanaaltjes, of doordat de formules niet goed zijn. Aanbevolen wordt dit nader te onderzoeken.

Een eerste schatting voor de stijghoogteverschillen over een enigszins beschadigde bekleding van overgoten basalt kan bepaald worden met ANAMOS als er gerekend wordt met een lek lengte van orde 1 à 2 m.

Voor de eenvoudige toetsing wordt voorlopig het volgende aanbevolen:

- a) Allereerst moet de statische overdruk vergeleken worden met het eigen gewicht van de bekleding. Deze statische overdruk mag niet groter worden dan het eigen gewicht.
- b) Langdurige statische overdruk over een overgoten constructie leidt tot het loslaten van het gietasfalt, waardoor uiteindelijk het gietasfalt plaatselijk van de basaltkoppen wordt afgedrukt. Dergelijke langdurige statische overdruk mag niet optreden.
- c) Ten aanzien van de golfbelasting kan in de eenvoudige toetsing de bekleding beoordeeld worden alsof het een ongunstige constructie is (type 3c) als er sprake is van weinig doorlatende ondergrond en langdurige golfbelasting. Voor kort durende belasting (paar uur) kan een bekleding met gietasfalt in perfecte staat op een weinig doorlatende ondergrond getoetst worden als een normale constructie (type 3b).

Dichtgeslibde bekledingen

Aan de hand van de proefresultaten kon worden vastgesteld dat een bekleding van granietblokken, mits goed ingewassen, stabiel is als deze volledig is dichtgeslibd. Echter, bij rechthoekige betonblokken met smalle dichtgeslibde spleten bleek een eerste initiële blokbeweging al bij een zeer lage belasting op te treden, maar schade (blok eruit) ontstond pas bij een belasting die vergelijkbaar is met die voor niet dichtgeslibde bekledingen.

De erosie van slib uit spleten tussen blokken blijkt niet alleen afhankelijk te zijn van de wisselende gradiënten op het oppervlak. Drukwisselingen onder de bekleding en of minieme blokbewegingen spelen een essentiële rol bij het erosieproces.

Er wordt voorlopig aanbevolen om de toetsing van dichtgeslibde bekledingen uit te voeren met ANAMOS. Daarbij moet zonder inslibbing en zonder voegvulling gerekend worden, maar met in achtname van de maximale stabiliteit: $H_s/\Delta D = 6\xi_{op}^{-2/3}$. De ANAMOS-berekeningen zonder inslibbing en zonder voegvulling geven een veilige onderschatting van de stabiliteit van granietblokken, en voorspelt de stabiliteit van rechthoekige betonblokken precies. Uiteindelijk trad een grote blokverplaatsing pas op bij een belangrijk hogere belasting dan volgens ANAMOS.

Voor de eenvoudige toetsing geven de metingen aan dat een ingewassen en dichtgeslibde natuursteenbekleding getoetst kan worden met diagrammen van type 3b (normale constructie, zie figuur 16) met een bovengrens van het twijfelachtige gebied dat 1,5 maal hoger ligt dan die van type 3b. Daardoor loopt het twijfelachtige gebied bij $\xi_{op} = 1,5$ van 2,7 tot 7,5.

Aanbevolen wordt om tijdens veldmetingen op de dijk het stijghoogteverschil tijdens stormomstandigheden te meten. Daarmee moet de relatie tussen inkomende golfcondities en stijghoogteverschillen gelegd worden.

Referenties

Klein Breteler, M. (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van talusbekledingen

Analyse van resultaten van Deltagootproeven

WL | Delft Hydraulics, H3272, mei 2000

Smith, G.M., Wouters, J., Klein Breteler, M. (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van talusbekledingen,

meetverslag van Deltagootonderzoek

WL | Delft Hydraulics, H3272, februari 2000

TAW 1999

Leidraad toetsen op veiligheid

Cur/Ciria 1991

Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Cur rapport 154

Onderzoek en constructie	proef	H_{si} [m]	T_p [s]	ξ_{op} [-]	$H_s/\Delta D$ [-]	Schade
Basalton op lage berm	1o02	1.04	3.90	1.37	4.12	a
	1o03	1.22	4.30	1.39	5.91	d
Basalton op zandasfalt	2o01	0.85	3.71	1.36	4.12	d
Mastiek overgoten ingewassen en ingezand basalt	3o10	1.26	4.70	1.49	3.29	a
	3o11	1.56	5.30	1.51	4.07	d
Dichtgeslibde granietblokken, dicht filter	4ao06	1.52	5.40	1.56	4.60	a
	4ao07	1.60	5.40	1.52	4.80	b
Schone betonblokken op dichtgeslibd filter	4bo06	0.86	5.40	2.08	3.20	a
Dichtgeslibde betonblokken, dicht filter	4co01	0.71	3.30	1.40	2.70	a
	4co07	1.05	5.80	2.02	3.90	a
	4co08	1.17	4.50	1.48	4.40	c
	4co13	1.50	4.90	1.40	5.60	d
Dichtgeslibde granietblokken, dicht filter	4do10	1.68	6.0(J)	1.65	5.10	a
Blokken 50x50x25 op mijnsteen met uitvullaag	5o05	1.64	5.6(J)	1.56	4.70	a
	5o06	1.64	6.9(J)	1.92	4.70	b
Blokken op filter met ondiep water golfbelasting	6o21	0.91	9.40	3.52	2.63	a
Blokken 20x20x10 cm op de kant koud tegen elkaar	12ao4	1.23	4.30	1.37	4.67	a
	12ao5	1.40	4.70	1.42	5.31	d
	12ao8	1.00	4.90	1.75	3.80	a
	12ao9	1.27	5.50	1.74	4.82	d
	12ao10	0.73	5.20	2.17	2.80	b
	12ao11	0.84	5.50	2.14	3.20	c
	12ao13	1.24	6.60	2.12	4.70	d
Blokken op de kant met brede langsvog zonder afstandhouders	12bo06	1.03	3.90	1.37	3.90	-
	12bo07	1.23	4.30	1.38	4.67	schade
Blokken op de kant brede langsvog ronde stalen afstandhouders+A65	12co3	1.22	4.30	1.39	4.60	a
	12co4	1.40	4.70	1.42	5.30	b
	12co5	1.57	4.80	1.37	6.00	c
	12co7	1.63	6.30	1.76	6.19	d
Blokken op de kant brede langsvog platte plastic afstandhouders	12cco5	1.25	5.50	1.76	4.75	a
	12cco6	1.44	6.10	1.81	5.47	c
	12cco7	1.65	6.40	1.78	6.26	d
Blokken op de kant brede stootvog zonder afstandhouders	12do6	1.40	4.70	1.42	5.32	a
	12do7	1.59	5.00	1.42	6.04	c
	12do10	1.54	7.60	2.18	5.80	c
Blokken op de kant brede langsvog plastic afstandhouders met voetje	12cdo5	1.25	5.50	1.76	4.75	b
	12cdo8	1.52	7.60	2.20	5.77	d
Platte blokken 50x50x20 cm met brede stootvoegen, zonder inwassing	20ao3	0.41	3.17	1.77	1.52	a
	20ao4	0.63	4.01	1.80	2.35	c
idem, met inwassing	20ao5	0.58	2.94	1.38	2.17	a
	20ao6	0.63	5.07	2.27	2.37	b
	20ao7	0.63	4.03	1.82	2.34	b
	20ao8	0.84	4.57	1.78	3.13	c
	20ao9	0.84	4.57	1.80	3.13	c
Platte blokken 25x25x10 cm met brede stootvoegen	20b03	0.32	3.32	2.09	2.39	a
	20b04	0.42	3.18	1.75	3.14	b
	20b05	0.52	3.98	1.96	3.89	c
Platte blokken 25x25x10 cm met brede langsvog	20b09	0.43	3.13	1.71	3.18	b
	20b10	0.51	4.00	1.99	3.82	d
Haringmanblokken 20x20x10 cm op de kant met brede stootvoegen	21o14	1.56	6.36	1.82	5.95	a
	21o15	1.70	6.43	1.76	6.47	b
	21o16	1.55	7.64	2.19	5.90	c
Blokken 20x20x10 cm op de kant met brede stootvoegen (zonder inwassing)	23o1	0.43	3.16	1.72	1.68	a
	23o2	0.52	3.55	1.75	2.05	b
Blokken 20x20x10 cm op de kant met brede stootvoegen (met inwassing)	23o10	1.33	5.53	1.71	5.21	a
	23o11	1.54	6.35	1.82	6.03	d

Tabel 4 Overzicht van golfcondities en geconstateerde schade

— betontalud

▨ basalton op steenslag op geotextiel

Diagram illustrating a cross-section of a riverbed reinforcement project. The diagram shows a concrete channel (betontalud) and a sand core (zandkern). A section of the channel is marked as 'te beproeven steenzetting' (to be tested stone setting). Dimensions include a 5m horizontal distance for the test section, a 1:15 slope for the channel, and a 1:3,5 slope for the sand core. Elevation markers show +5m and +8m. A legend at the bottom identifies the concrete channel and the test section.

Overzichtstekening opstellingen		E000710a
wl delft hydraulics	H3272	Fig. 2



Deltagoot

E000710b

wl | delft hydraulics

H3272

Fig. 3



Aanbrenging van betonzuilen voor opstelling 1		E000710c
wl delft hydraulics	H3272	Fig. 4

coördinaten			
x	y	z	
A	- 14,00	0,00	4,00
B	- 19,00	0,00	4,33
E	- 12,00	0,00	0,00
G	- 22,20	0,00	1,82
K	- 12,00	0,50	1,82
M	- 21,33	0,00	5,00
N	- 10,50	0,00	3,00
P	- 22,50	0,00	5,25
Q	- 22,50	0,00	2,75
R	- 14,50	2,00	3,04
S	- 14,50	2,00	1,50
Y	- 20,00	2,00	3,79
Z	- 20,00	2,00	2,25

goothelft aan halzijde: 1,5 x 2,5m² Basalton,
ingegoten met mastiek

voorrand berm 1,5 à 2m afgerond

15cm beton (M-P)

Basalton (15cm dik); halve spleethoogte inwassen 5/50 mm

filter 10cm dik, 15/40 mm

geotextiel

stalen buis
Ø 50cm in wang van goot

8cm beton

maatgevende stijghoogtefronten

zand

drainagebuis
met drukopnemer

keermuur

drainagebuis

betontalud 1 : 6

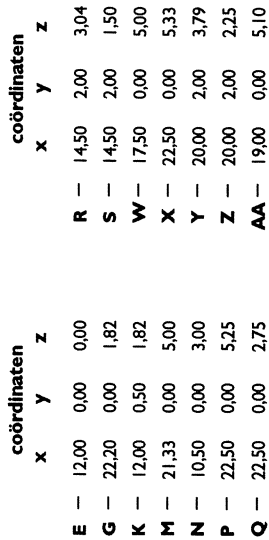
zand

klokpomp voor drainage

z (m)

x (m)

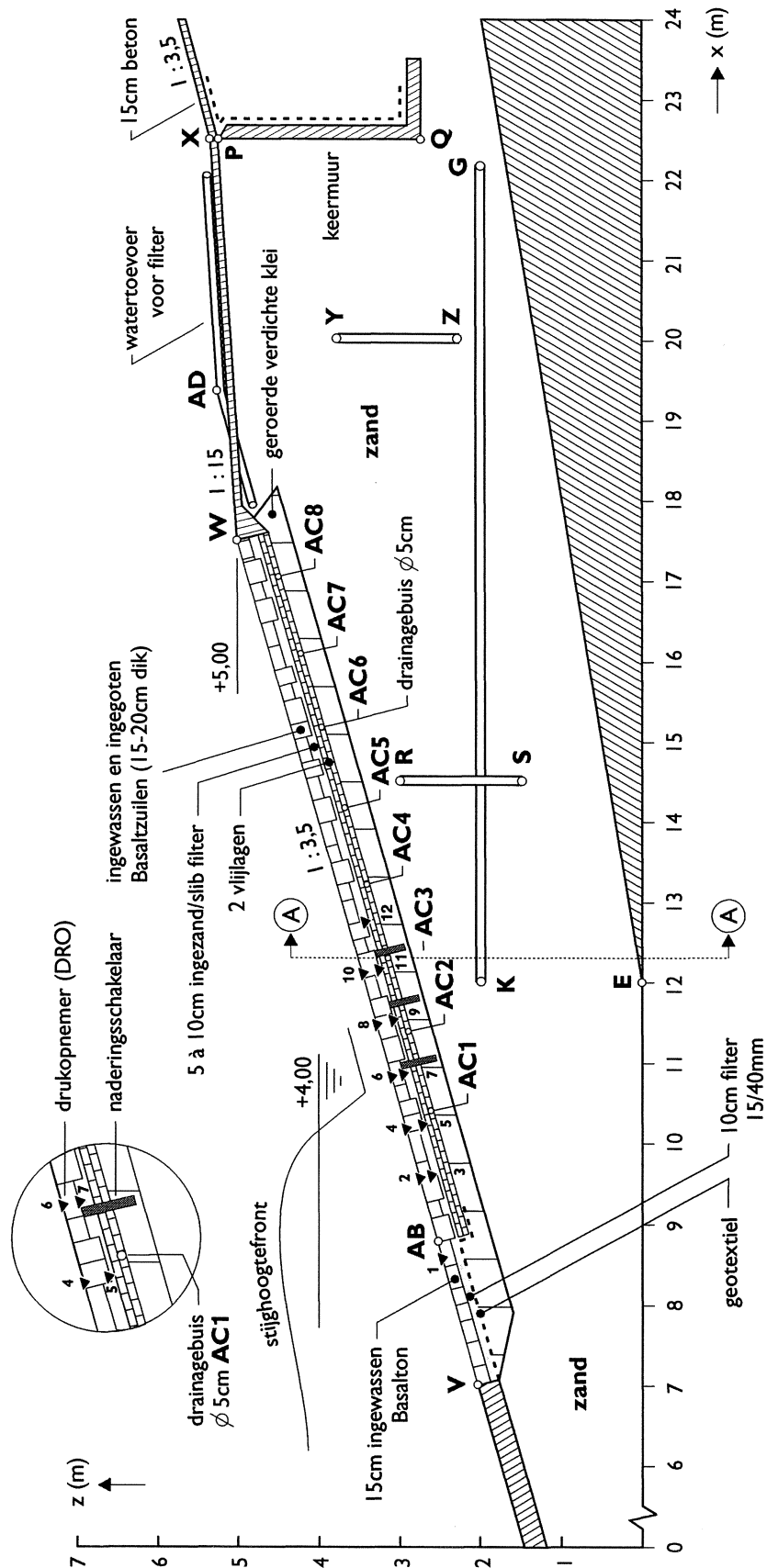
Detailtekening opstelling 1. Basalton op berm.



004

coördinaten			
x	y	z	
E	12,00	0,00	0,00
G	22,20	0,00	2,00
K	12,00	0,50	2,00
N	10,50	0,00	3,00
P	22,50	0,00	5,25
Q	22,50	0,00	2,75
R	14,50	2,00	3,04
S	14,50	2,00	1,50
W	17,50	0,00	5,00
X	22,50	0,00	5,33
Y	20,00	2,00	3,79
Z	20,00	2,00	2,25

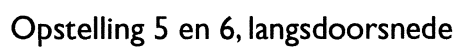
coördinaten			
x	y	z	
AB	8,75	0,00	2,50
AC1	10,33	0,00	2,61
AC2	11,28	0,00	2,88
AC3	12,26	0,00	3,16
AC4	13,22	0,00	3,43
AC5	14,18	0,00	3,71
AC6	15,14	0,00	3,98
AC7	16,10	0,00	4,26
AC8	17,07	0,00	4,53
AD	19,50	0,00	5,23



Detailtekening opstelling 3. Met mastiek overgoten basalt

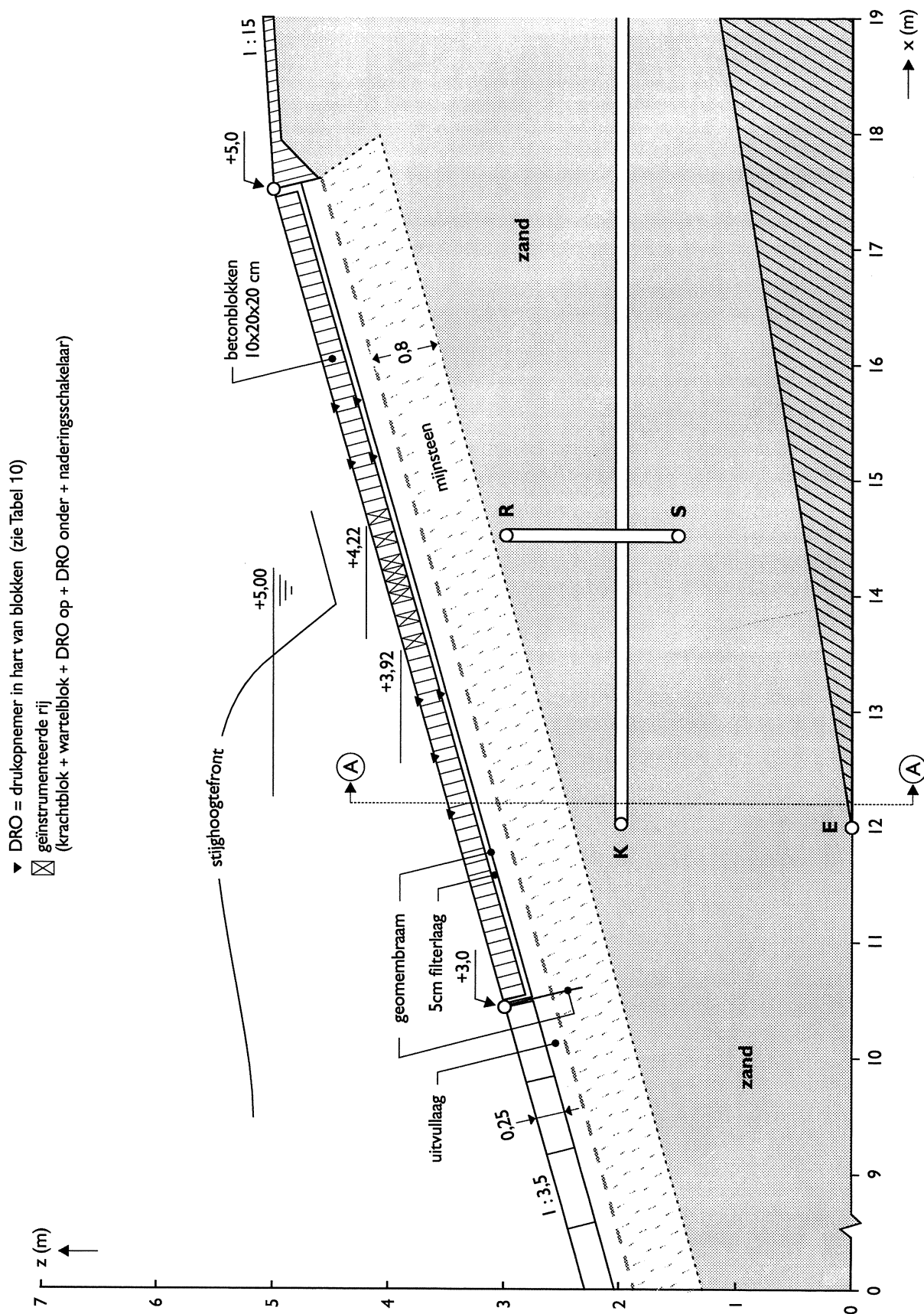
E001127b

▽ = drukopnemer serie 5 in hart van blokken
▼ = drukopnemer serie 6 in hart van blokken



wl | delft hydraulics

FIG. 9



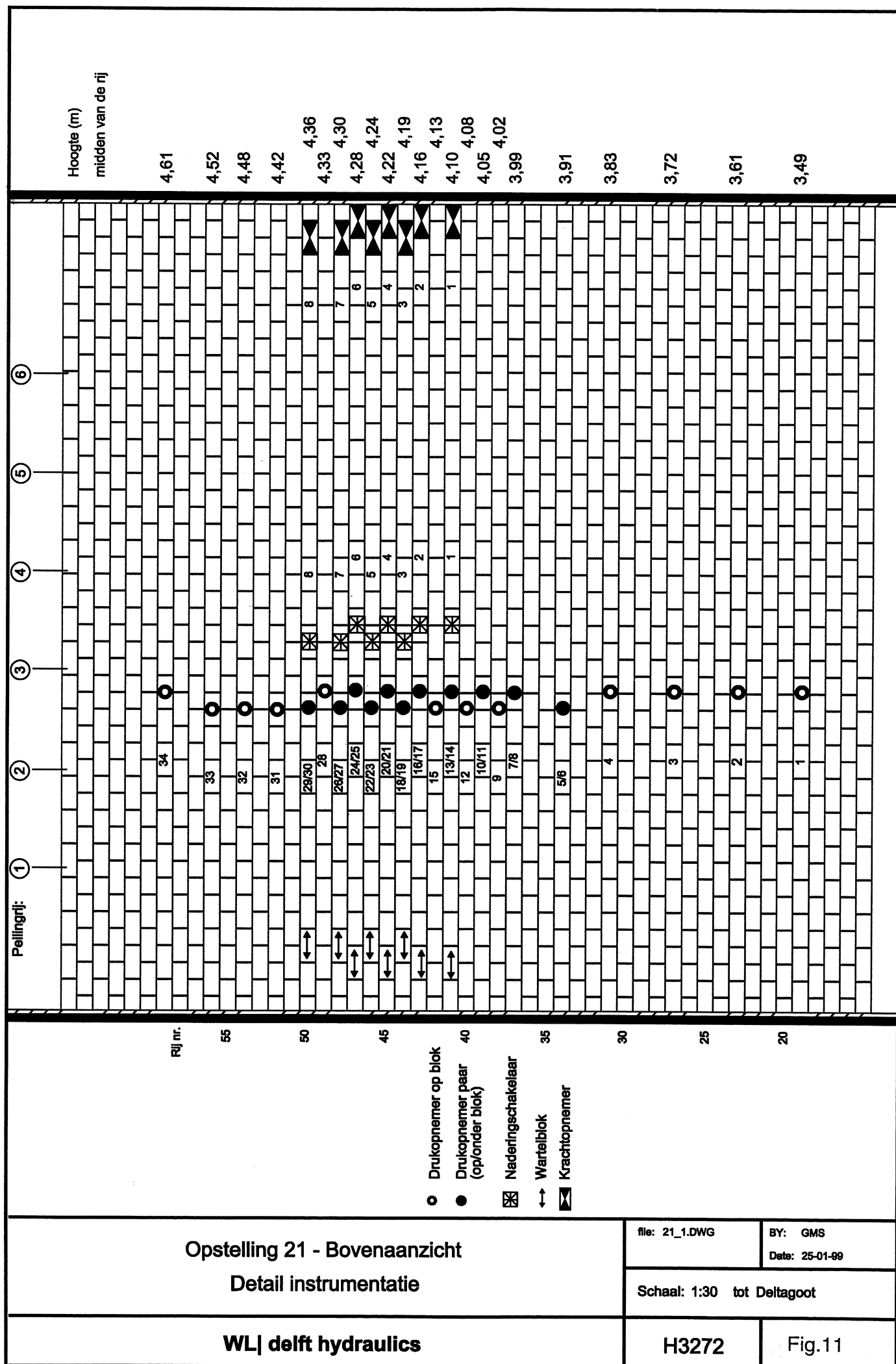
Detailtekening opstelling 12a; "Koud tegen elkaar"

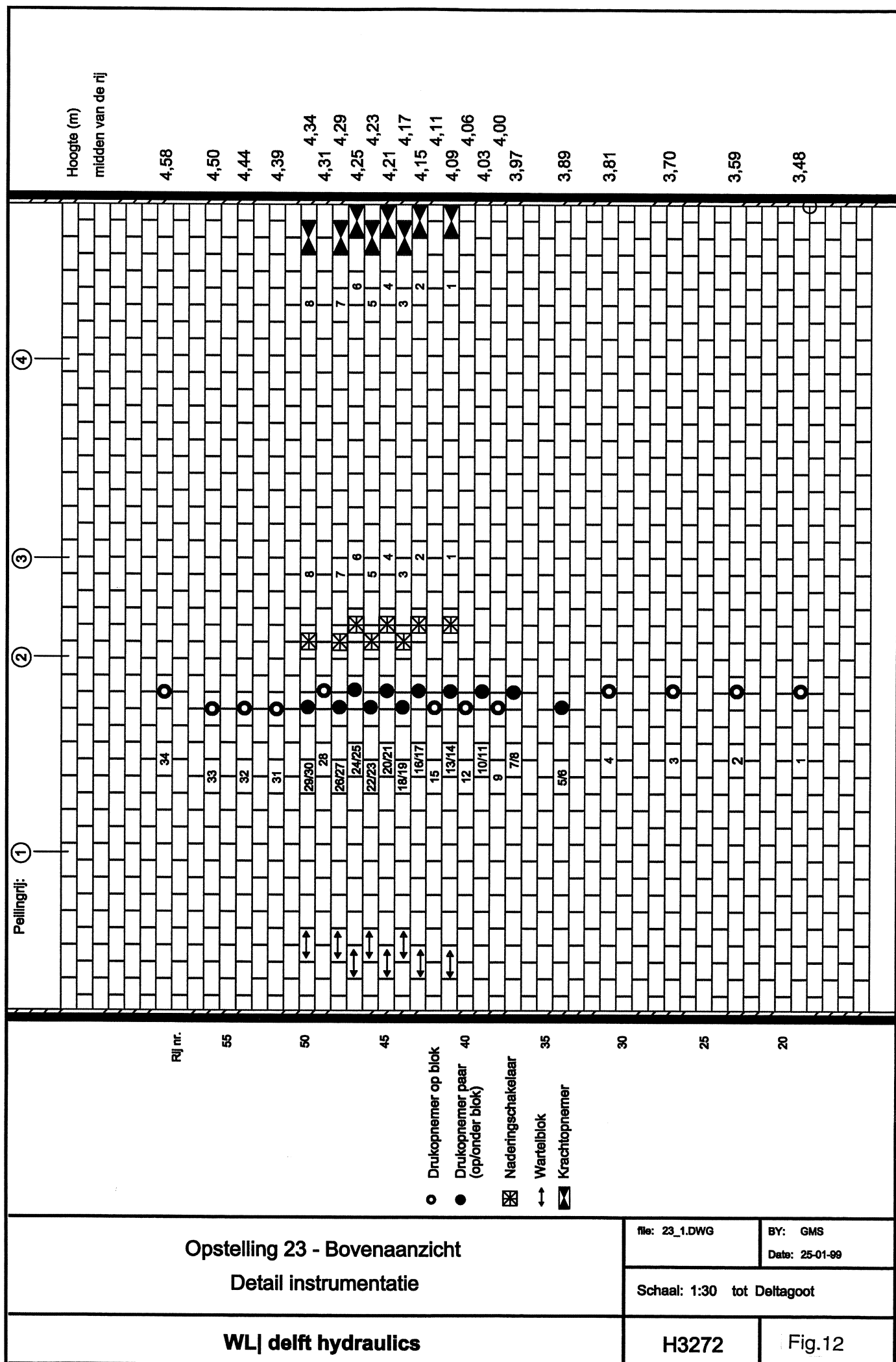
E000208u

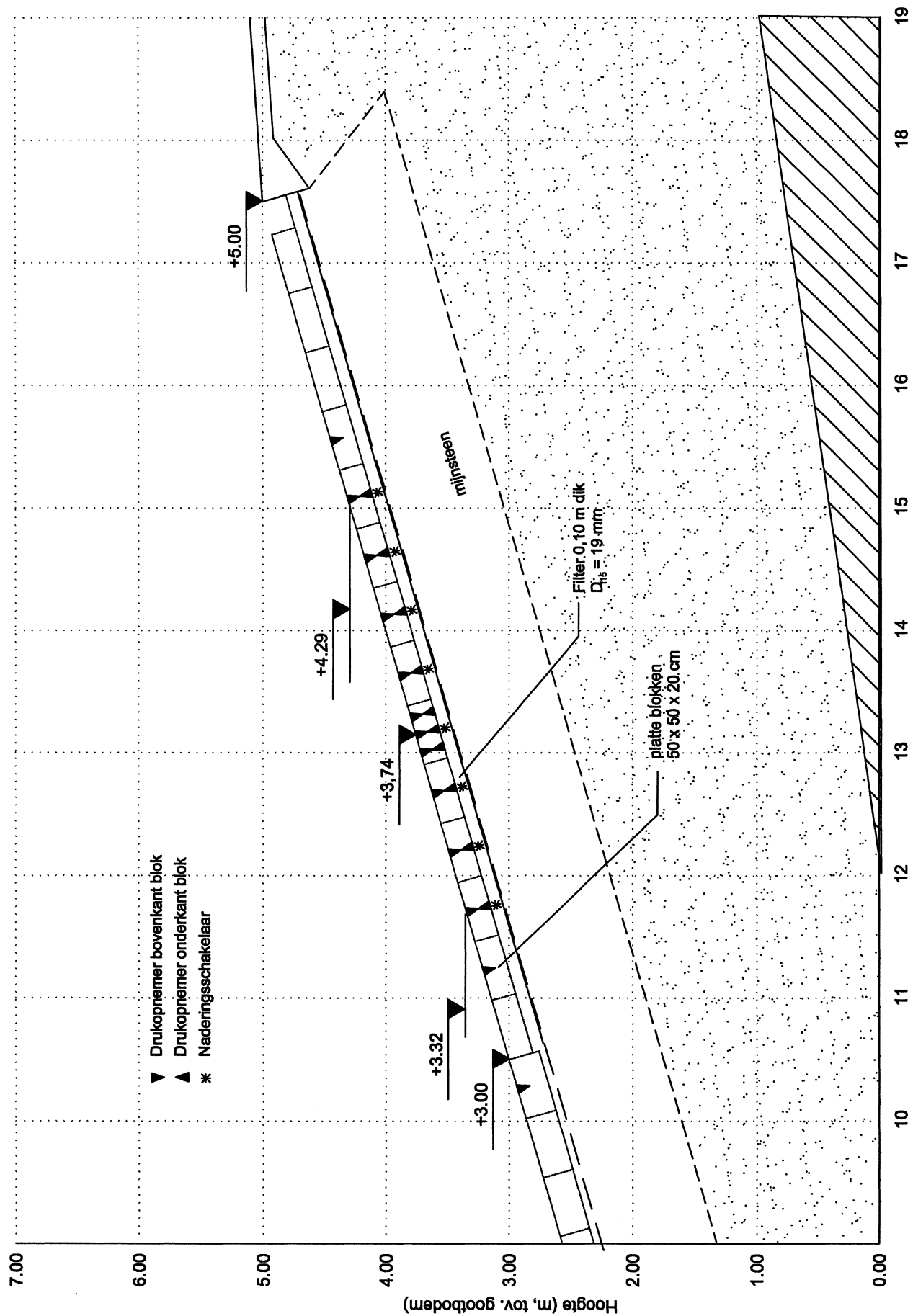
wl | delft hydraulics

H3272

Fig.10







Opstelling 20a - Langsdoorsnede

file: 20a_1.DWG

BY: GMS

Date: 19-02-99

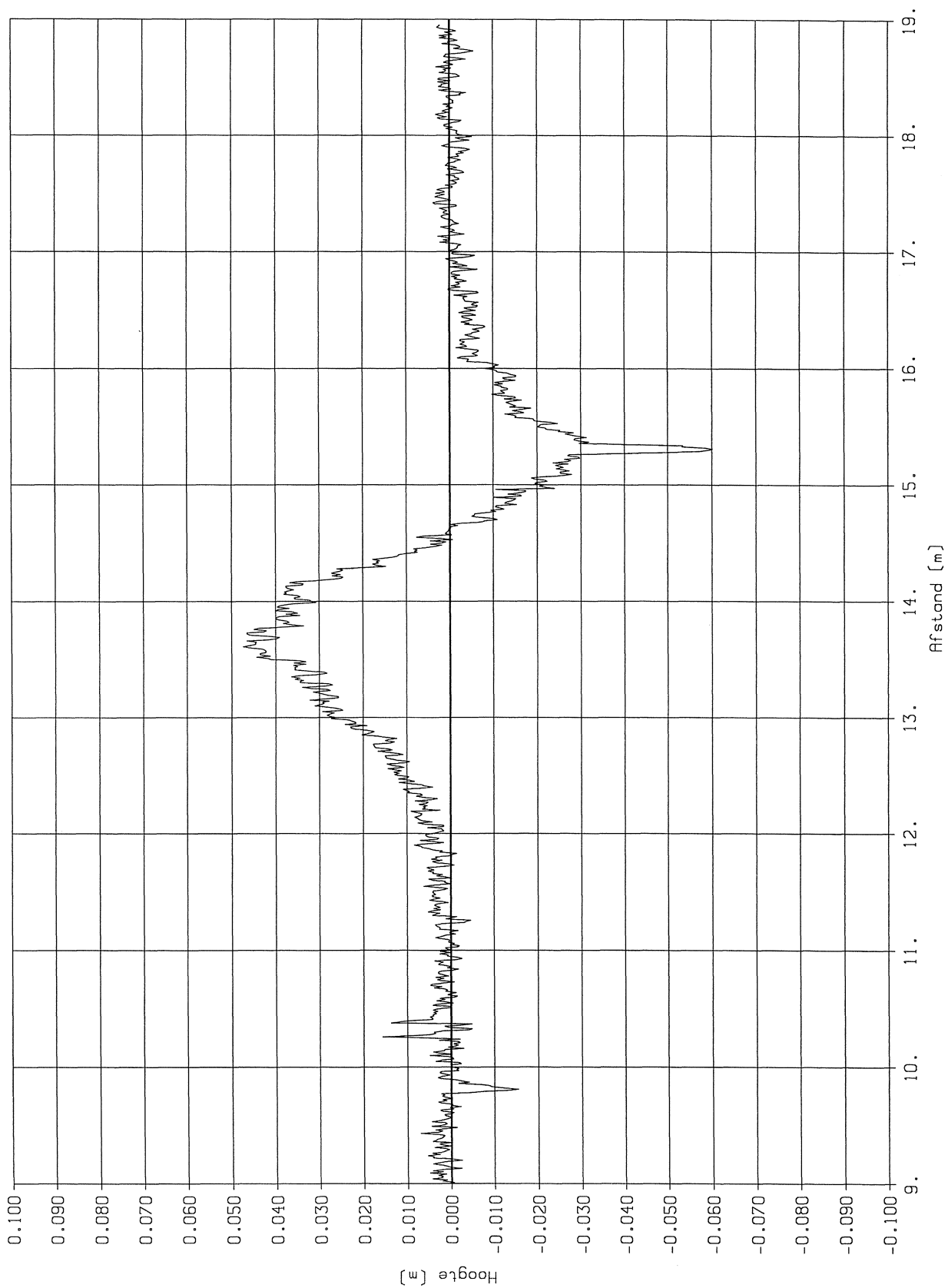
Schaal: 1:45 tot Deltagoot

WL| delft hydraulics

H3272

Fig.13

Verschil



Opstelling 21

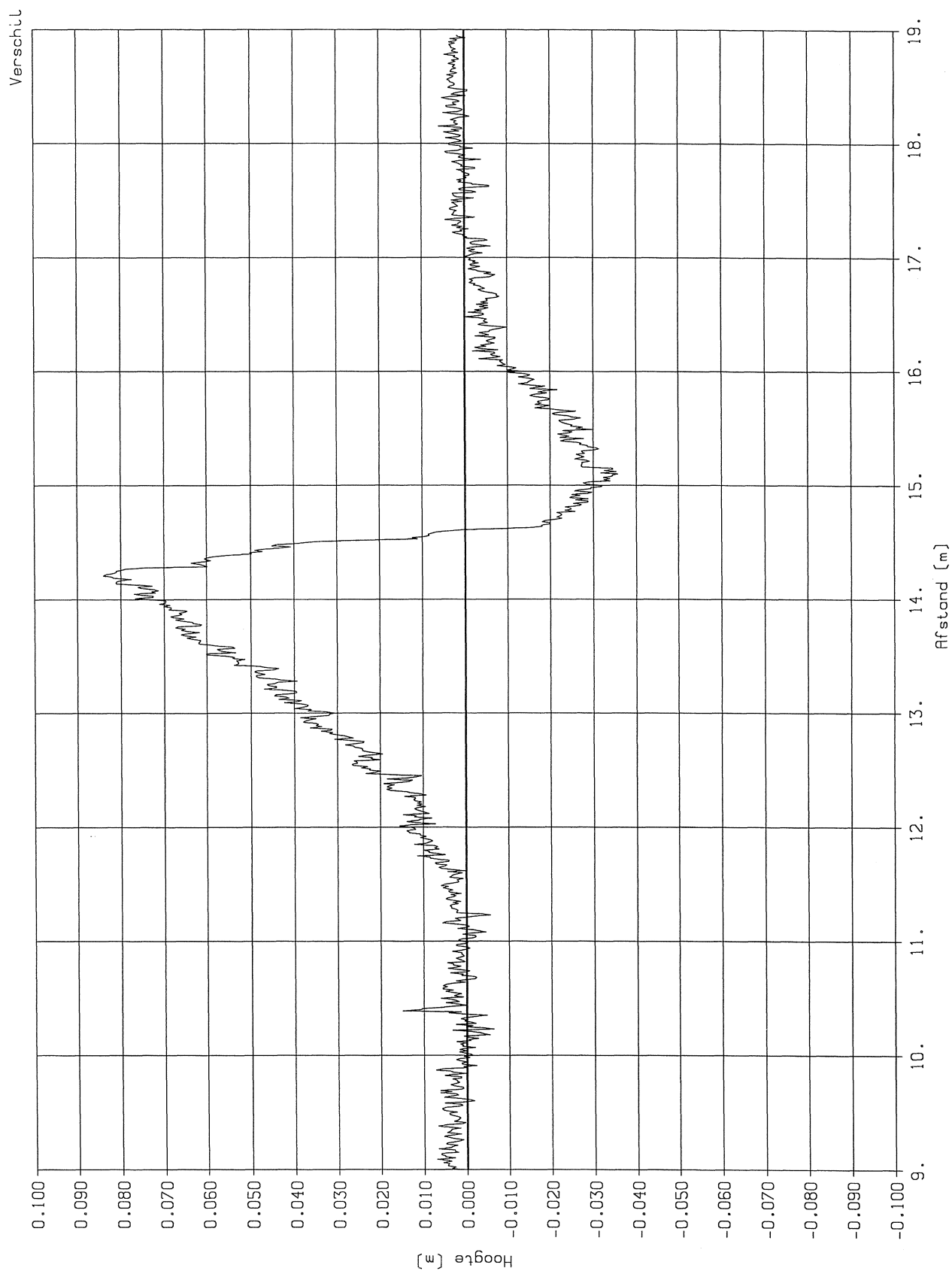
Verschilprofiel na proef P21o15 in lijn 5

k21-z21

WL | DELFT HYDRAULICS

H3272

Fig.14



Opstelling 21

Verschilprofiel na proef P21o16 in lijn 4

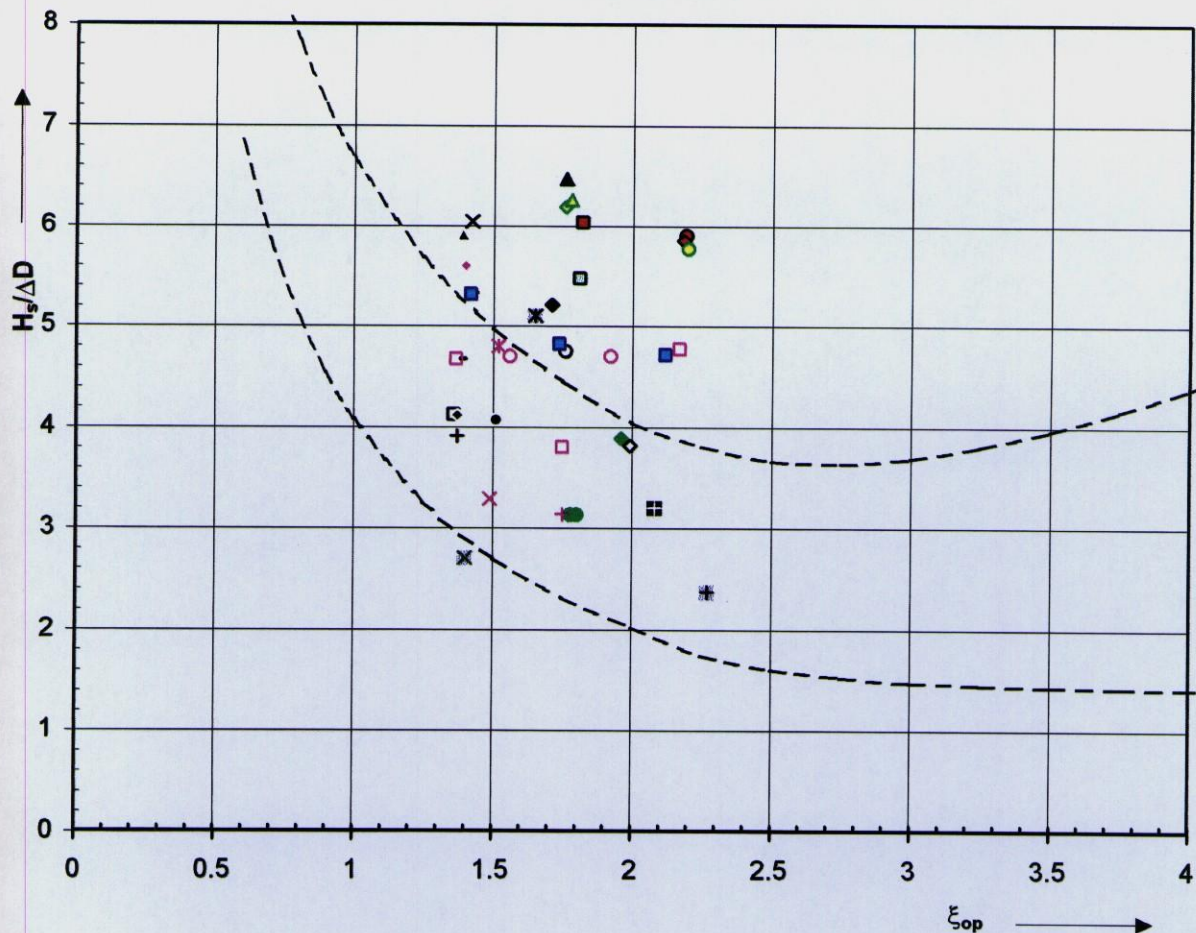
l21-z21

WL | DELFT HYDRAULICS

H3272

Fig.15

onregelmatige golven



- ◆ 23o10
- 21o16 (schade)
- 12co04
- ▲ 12cc07 (schade)
- 12cdo05
- 20a08 20a09 (schade)
- 5o05, 5o06
- 2o01 schade
- 3o11 (schade)
- ✕ 4ao07
- ✕ 4do10
- 23o11 (schade)
- + 12bo6
- ◆ 12co07 (schade)
- ✕ 12do07
- 12cdo08 (schade)
- 12ao04 12ao08 12ao10
- ◆ 20b05 (schade)
- ▲ 1o03 (schade)
- ✕ 3o10
- 4bo06
- ◇ 20b10 (schade)
- ▲ 21o15
- 12b07 (schade)
- 12cc06
- ◆ 12do10 (schade)
- ✕ 20a06
- 12ao05, 12a09 en 12ao13 (schade)
- + 20b04
- ◆ 1o02
- ◆ 4co13 (schade)
- ✕ 4co01

Serie 1 : Basalton op lage berm

Serie 2 : Betonzuilen (D=0,15 m) op zandafalt

Serie 4 : Ingezande en dichtgeslibde bekledingen

Serie 5: plat gezette blokken 50x50x25 cm, koud tegen elkaar op uitvullaag en mijnsteen

Serie 12, 21 en 23: Blokken op hun kant

Serie 12a: koud tegen elkaar

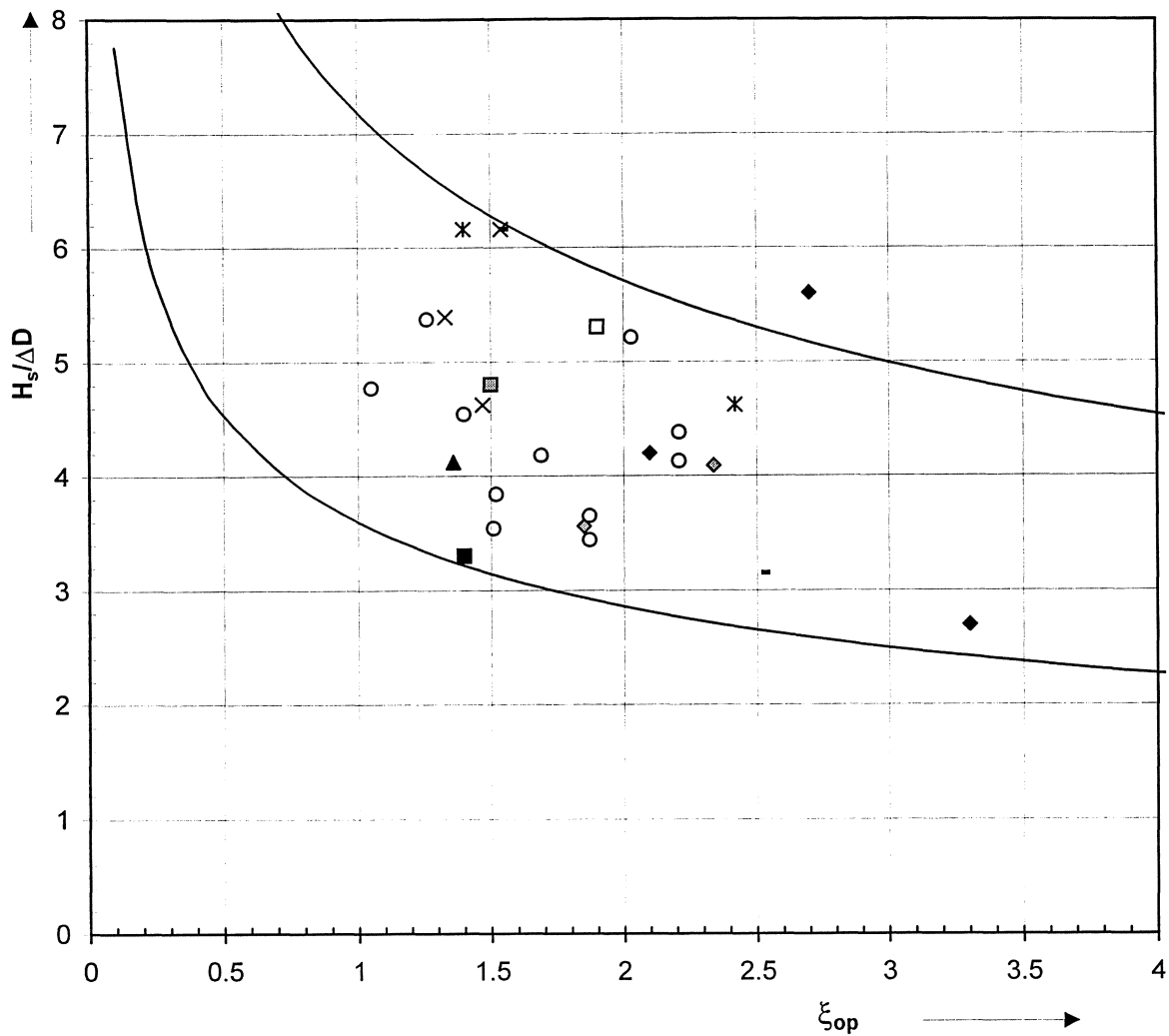
Serie 12b, 12c, 12cc, 12cd: brede ingewassen langsvoegen

Serie 12d, 21 en 23: brede ingewassen stootvoegen

Serie 20: plat gezette blokken met brede ingewassen voegen

Stabiliteit steenzettingen
op filter (lijnen van type (c), normaal uit LTV '99)

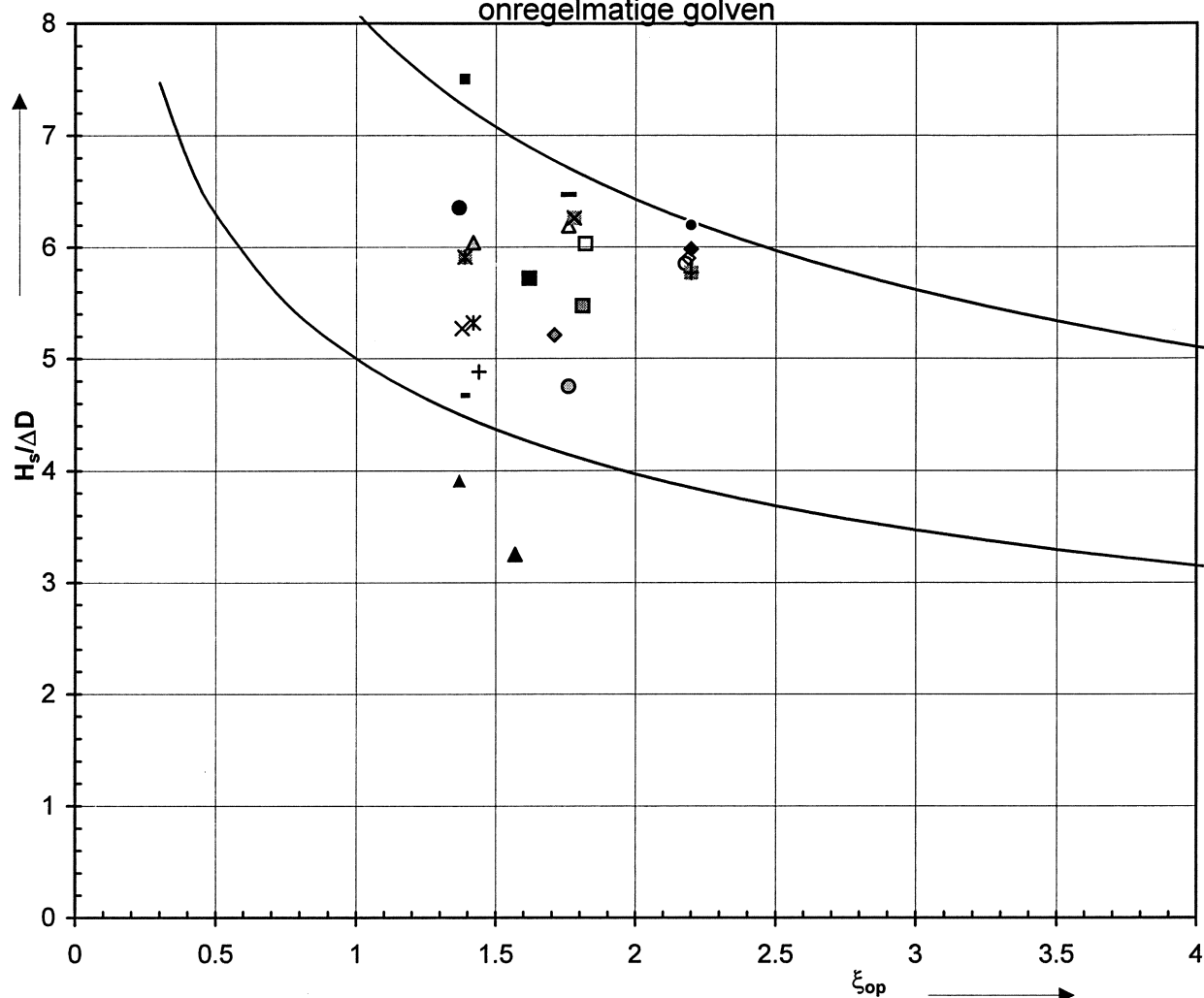
type (a)



- Basalton op zand; Serie u, ingewassen, onreg. golven
- Blokken met gaten op non-woven op zand, Serie x, D=0,2m, reg. golven
- × Blokken op non-woven op zand, Serie x, D=0,1m, reg. golven
- × Blokken op non-woven op zand, Serie x, D=0,2m, reg. golven
- ◆ Blokken op zand, serie t
- Basalton op zand; Serie u, niet ingewassen, reg. golven
- Basalton op zand; Serie u, ingewassen, reg. golven
- ◆ Blokken op geotextiel op zandlaagje op klei, serie Zh, reg. golven
- Blokken op dik geotextiel op goed verdichte klei, serie Ym, reg. golven
- ▲ Basalton op zandasfalt, onreg. golven; 2o01 (schade)

Stabiliteit steenzettingen
op geotextiel of zandasfalt, op zand of klei (type (a))

type c1 gunstige constructie
onregelmatige golven



- 23o11 (Schade)
- 21o15
- △ 12co07 (Schade)
- × 12cc07 (Schade)
- 12do10 (Schade)
- 12cdo08 (Schade)
- ▲ Basalt op puin (Provo-onderzoek)
- Armorflex zonder kabels (niet ingewassen)
- ◆ PIT-Polygoonzuilen, proef 6 (Schade)
- × 12co04
- Hydroblocks, proef 4
- × 1o03, Basalton op lage berm (schade)

- ◆ 23o10
- ◇ 21o16 (Schade)
- 12cc06
- △ 12do07
- 12cdo05
- × PIT-Polygoonzuilen, proef 3
- + Basalton (zonder inwassing)
- 12b07 (schade)
- ▲ 12b06
- Hydroblocks, proef 6 (schade)
- Armorflex zonder kabels (ingewassen)

Serie 1: Basalton op lage berm (1 m onder SWL)

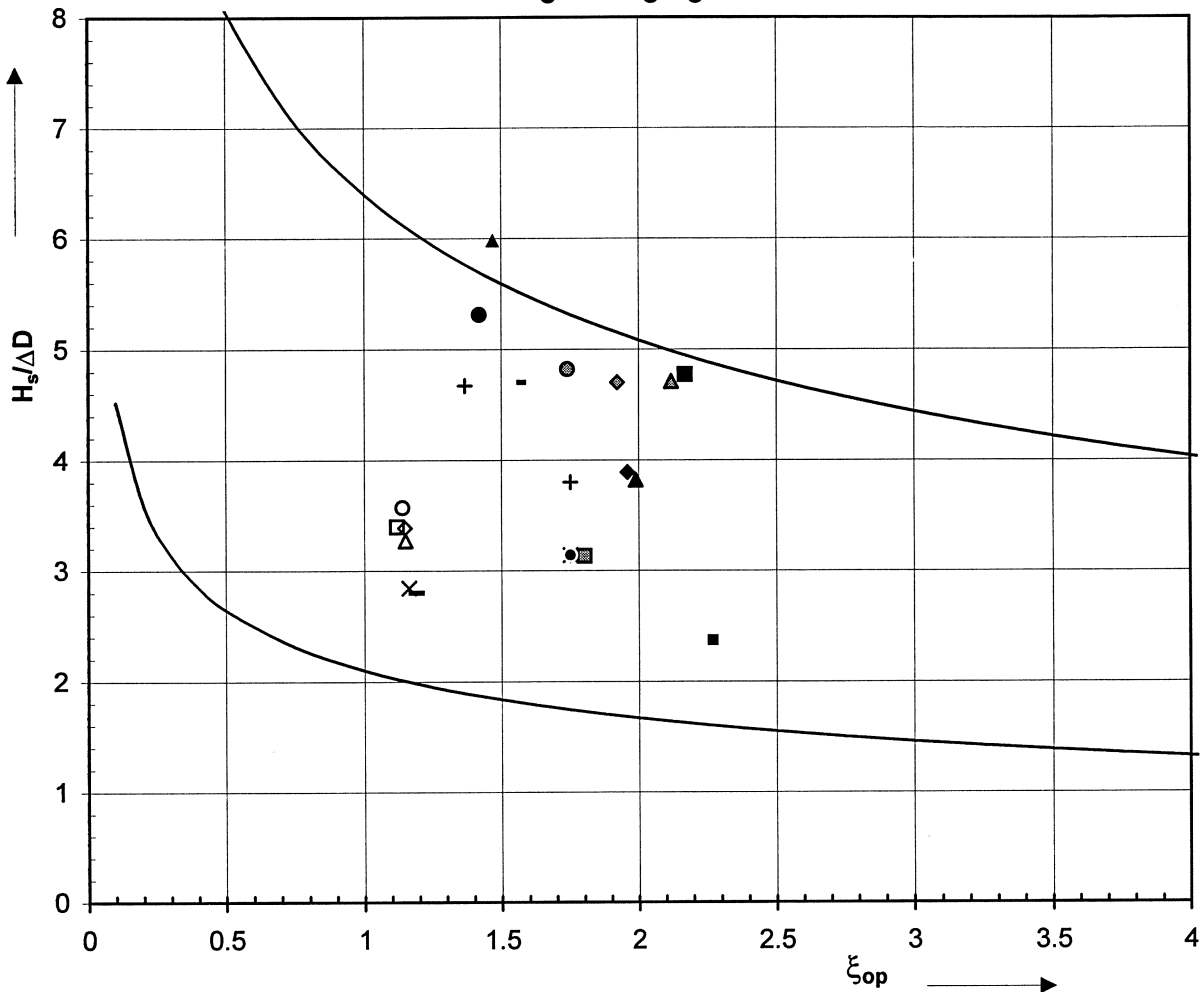
Serie 12, 21 en 23: Blokken op hun kant

Serie 12b, 12c, 12cc, 12cd: brede ingewassen langsvoeegen

Serie 12d, 21 en 23: brede ingewassen stootvoegen

Stabiliteit steenzettingen
Steenzettingen op filter (type c1); gunstig ($P > 0,40$)

type c2 ongunstige constructie
onregelmatige golven



- 20a09 (Schade)
- ◆ 5o06
- 5o05
- ▲ 12ao13 (Schade)
- 12ao9 (Schade)
- + 12ao04 en 12ao08
- 12ao5 (Schade)
- 12ao10
- ✕ 20b04
- ▲ 20b10 (Schade)
- ◆ 20b05 (Schade)
- △ Oesterdam, losse blokken met gaten
- ✕ Oesterdam, talud met berm op of boven SWL, schaakbordverband
- Oesterdam, losse blokken met gaten (schade)
- ◇ Oesterdam, talud met berm op of boven SWL, schaakbordverband (schade)
- Oesterdam, talud met berm op of boven SWL, halfsteensverband
- Oesterdam, talud met berm op of boven SWL, halfsteensverband (schade)
- ▲ Haringmanblokken op mijnsteen (Provo ond.)
- 20a06
- 20b04

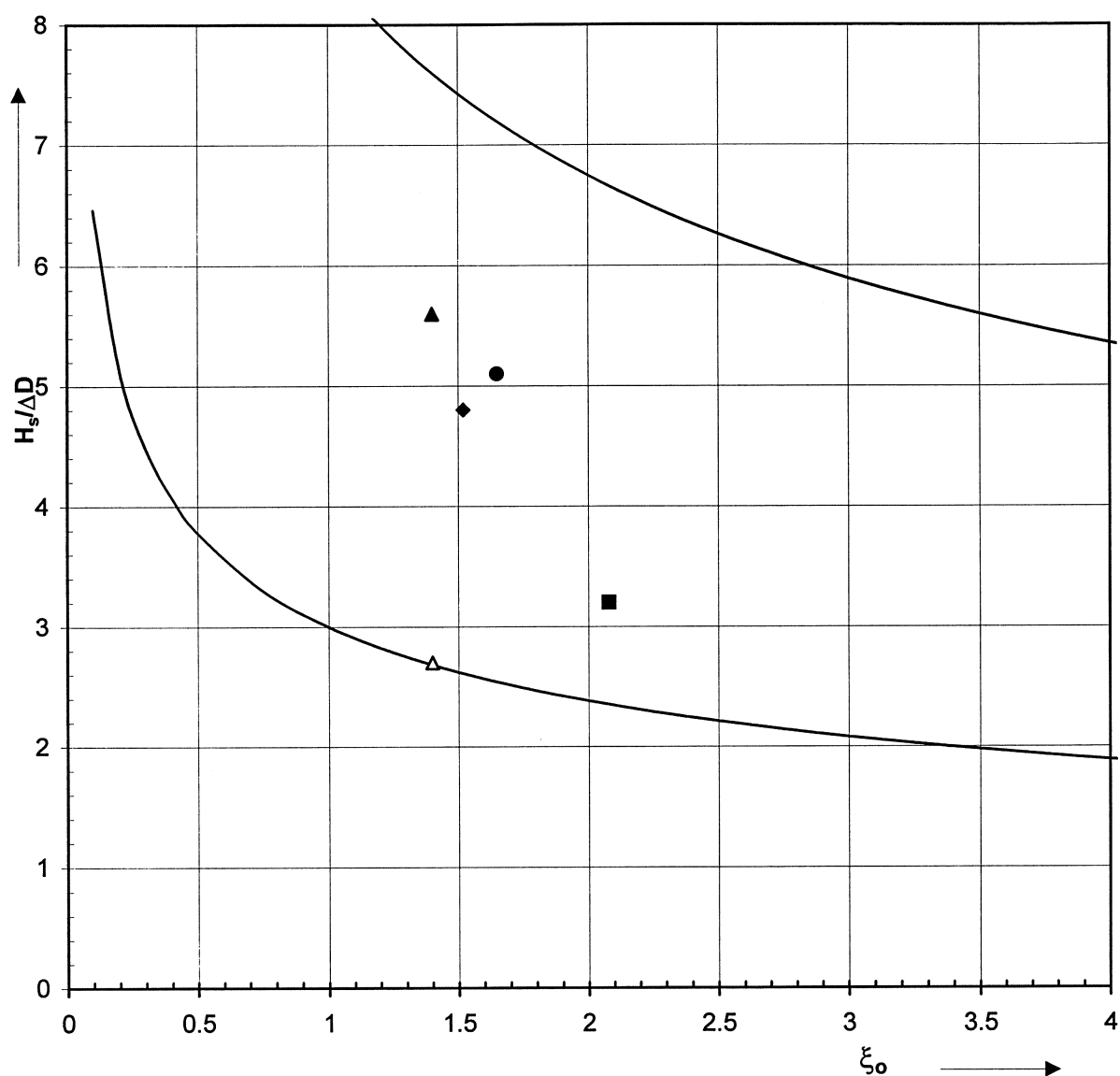
Serie 12a: Blokken op hun kant 20x20x10 cm, koud tegen elkaar

Serie 20: plat gezette blokken met brede ingewassen voegen

Serie 5: plat gezette blokken 50x50x25 cm, koud tegen elkaar op uitvullaag en mijnsteen

Stabiliteit steenzettingen
op filter (type c2); ongunstig ($P < 0,40$)

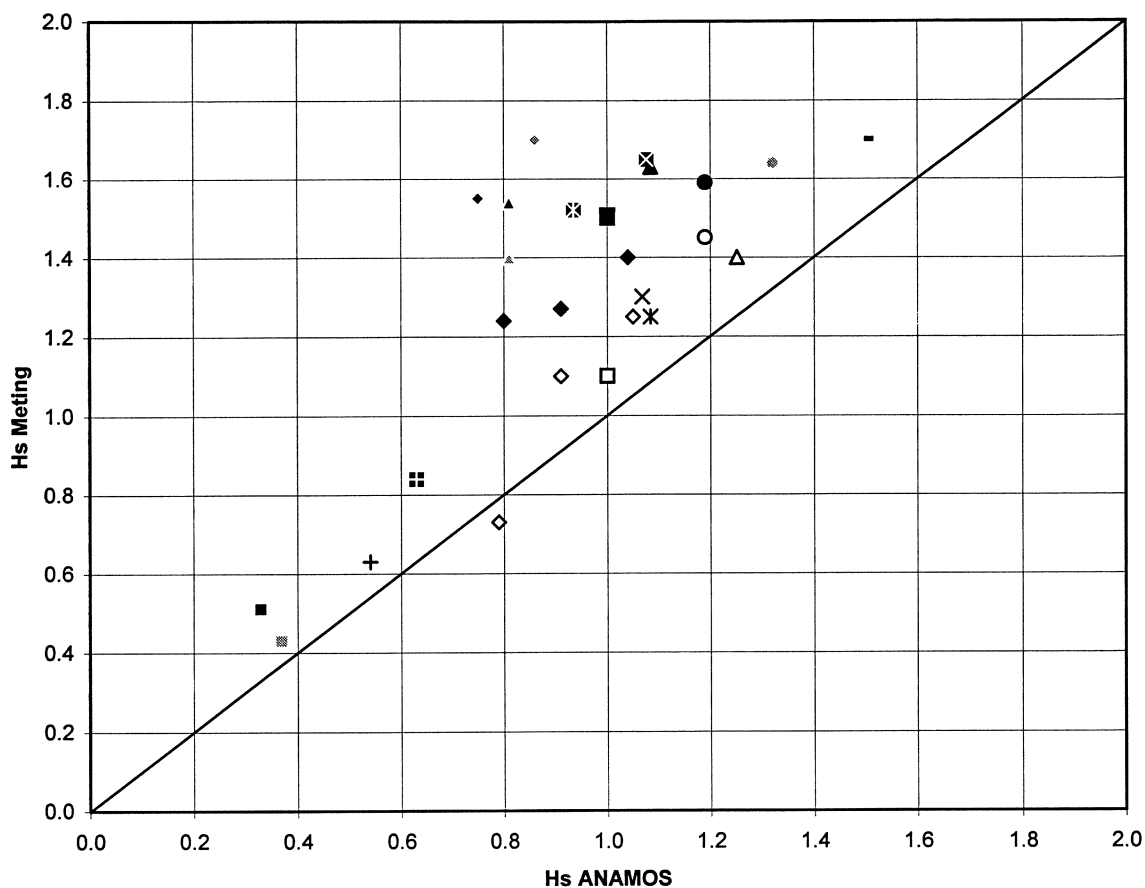
type c3 dichtgeslibde constructie



- ◆ dichtgeslibde granietblokken, proef 4ao07
- schone betonblokken op dichtgeslibd filter, proef 4bo06
- △ dichtgeslibde betonblokken op dicht filter, proef 4co01
- ▲ dichtgeslibde betonblokken op dicht filter, proef 4co13 (schade)
- dichtgeslibde granietblokken, proef 4do10 (nog geen)

Serie 4 : Ingezande en dichtgeslibde bekledingen

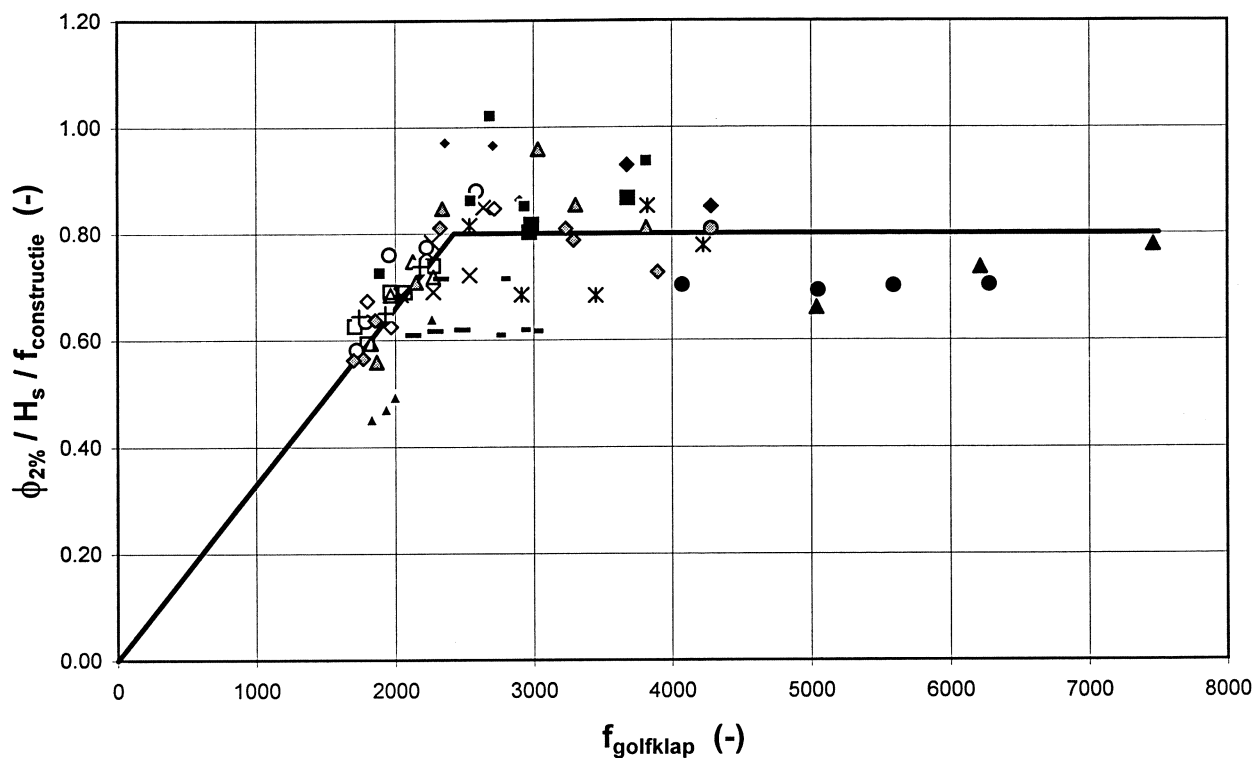
Stabiliteit dichtgeslibde steenzettingen
op een dichtgeslibd filter (type c3)



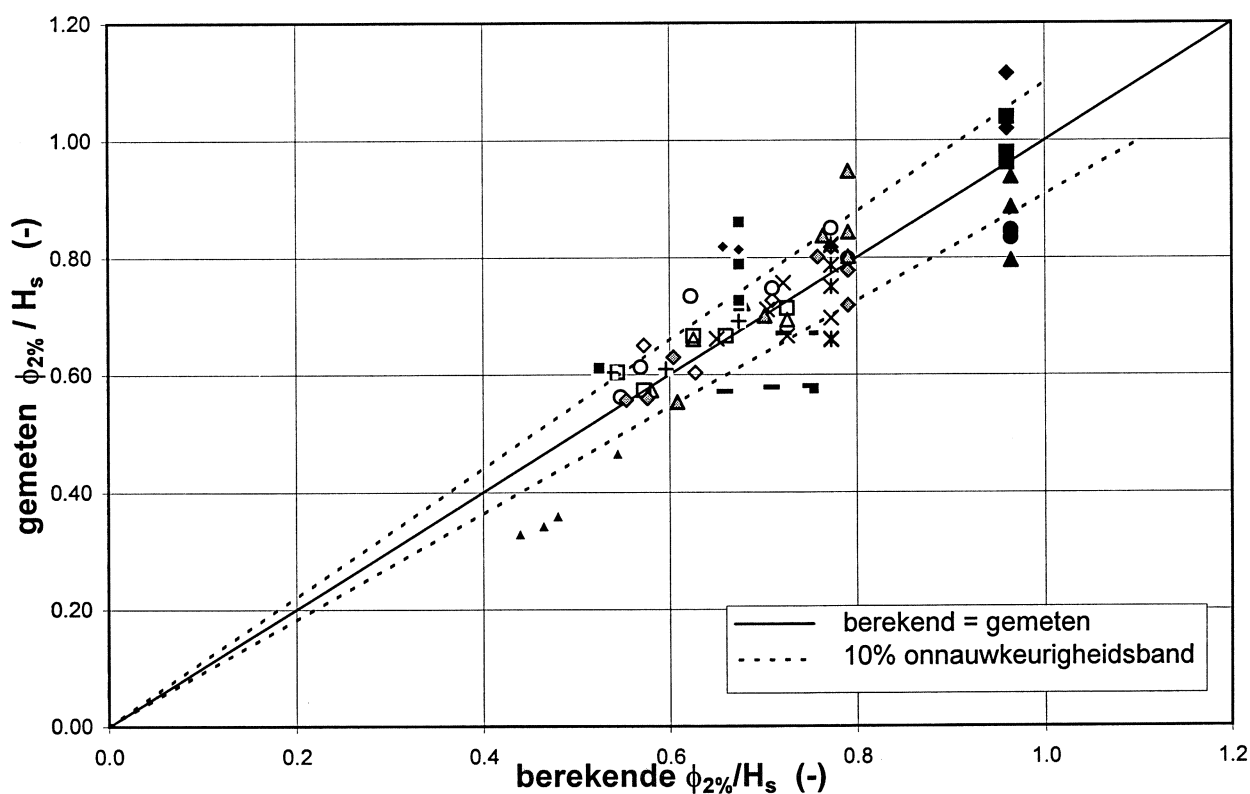
- | | | |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| □ 4c (b) | ■ 4c (d) | ■ 4do10 |
| ◇ 12a (b) | ◆ 12a (d) | △ 12c (b) |
| ▲ 12c (d) | × 12cc (b) | ⊗ 12cc (d) |
| ✕ 12cd (b) | ⊗ 12cd (d) | ○ 12d (b) |
| ● 12d (d) | ⊕ 20a (b) | ⊞ 20a (d) |
| ⊞ 20b (b) | ■ 20b (d) | ◆ 21 (b) |
| ◆ 21 (d) | ▲ 23 ingewassen (b) | ▲ 23 ingewassen (d) |
| — Hs meting = Hs ANAMOS | — 4b (b) | ◇ 12a (b) |
| ◆ 12a (d) | ◇ 12a (b) | ◆ 12a (d) |
| ● 5 (b) | | |

tussen haakjes staat schade-type vermeld.

Vergelijking bezwijkgolffhoogte volgens
ANAMOS met meetresultaten



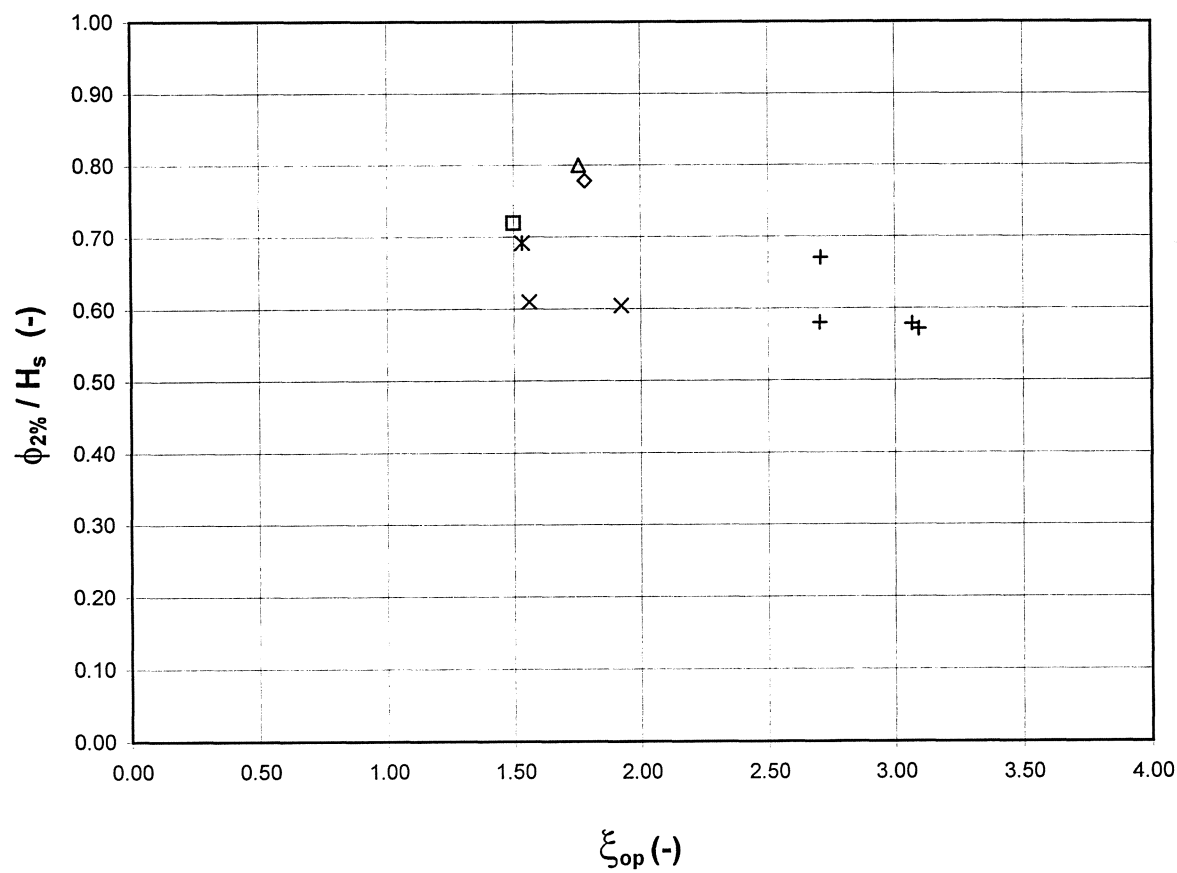
× 12a	* 12b	△ 12c	◇ 12cc	□ 12d
○ 12cd	+ 5	◇ 21	● 23 zonder inwas	△ 23 met inwas
◆ 20a zonder inwas	■ 20a met inwas	▲ 20b: stootvoeg	● 20b: langsvoeg	- 6 Tpd
- 6 Tm,-1,0	◆ 4b	■ 4c	▲ 4d	— formule



de doorlatendheden zijn berekend met ANAMOS (zonder te corrigeren voor de gemeten lek lengte)
 filter doorlatendheid van serie 4b en 4c is geschat op 0,05 m/s en serie 4d op 0,01 m/s

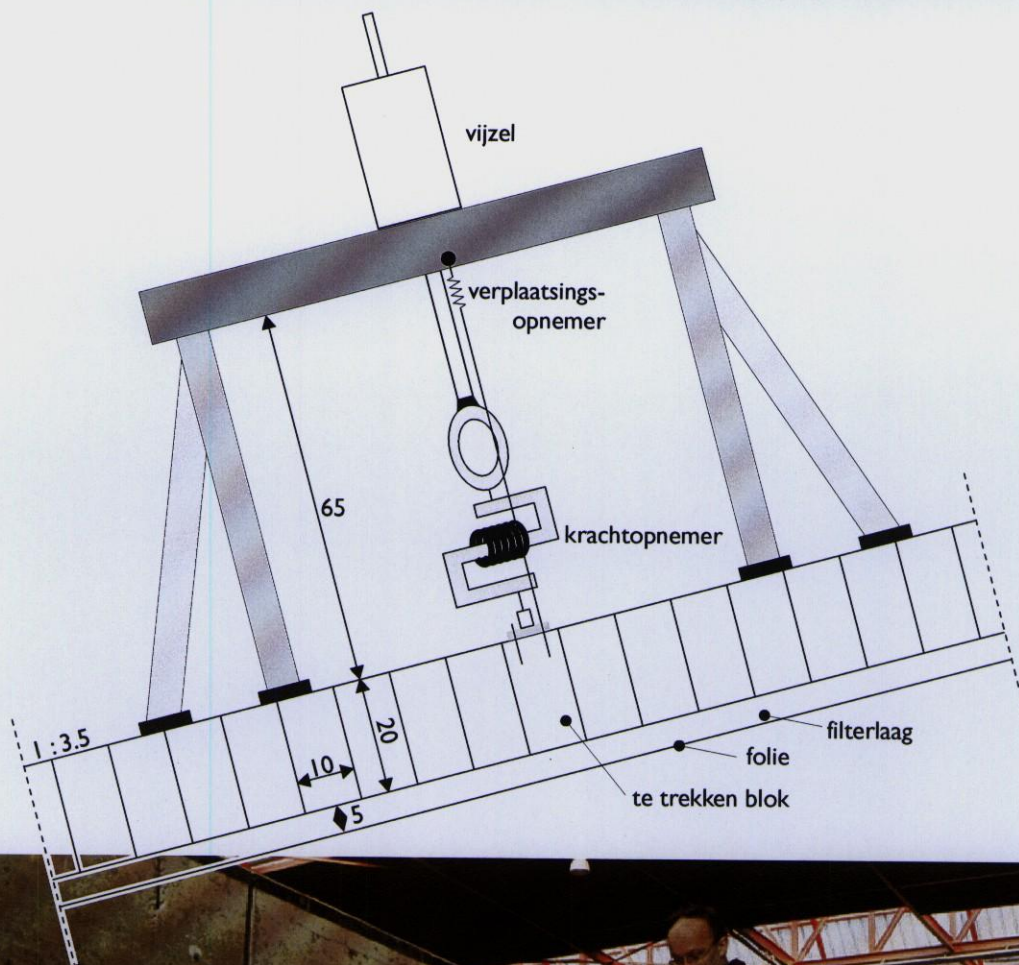
gemeten waarde van $\phi_{2\%}/H_s$
 als functie van berekende waarde

Verhouding van opwaartse stijghoogteverschil en golfhoogte



- × grote blokken, Jonswap, 5o05 en 5o06
- ✕ grote blokken, PM spectrum, 5o04
- △ kleine blokken, Jonswap, 21o03
- ◇ kleine blokken, PM spectrum, 21o06
- kleine blokken, dubbeltoppig spectrum, 21o010
- + grote blokken, breed spectrum, serie 6

Invloed golfspectrum op de stabiliteit van de steenzetting		
WL DELFT HYDRAULICS	H3272	FIG. 23



Opstelling voor de trekproeven

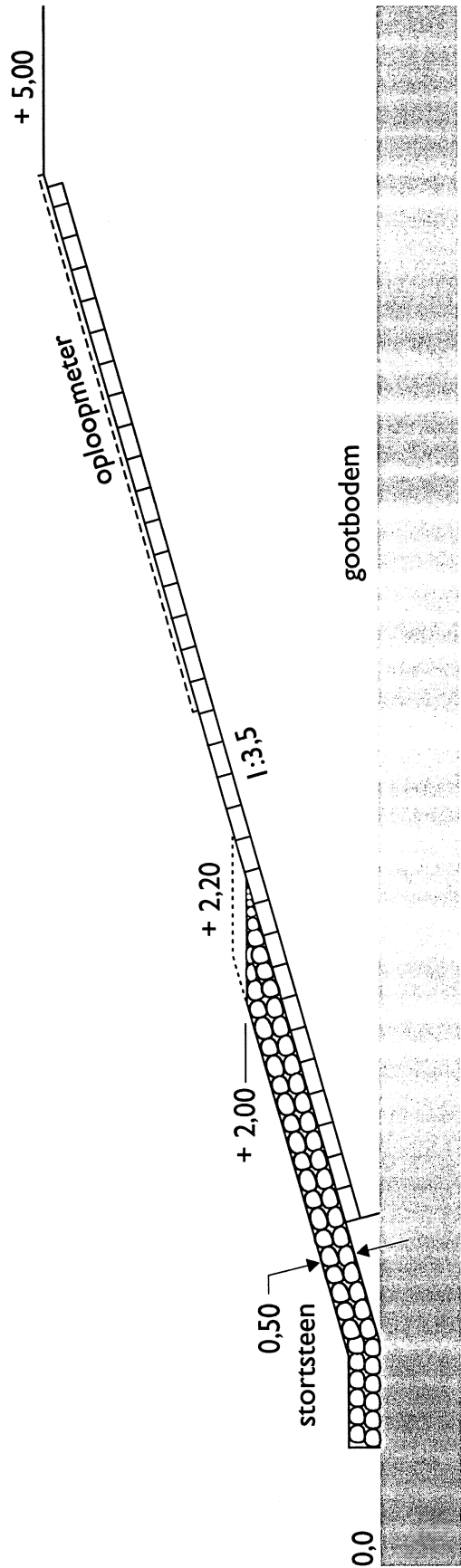
maten in cm

E000710d

wl | delft hydraulics

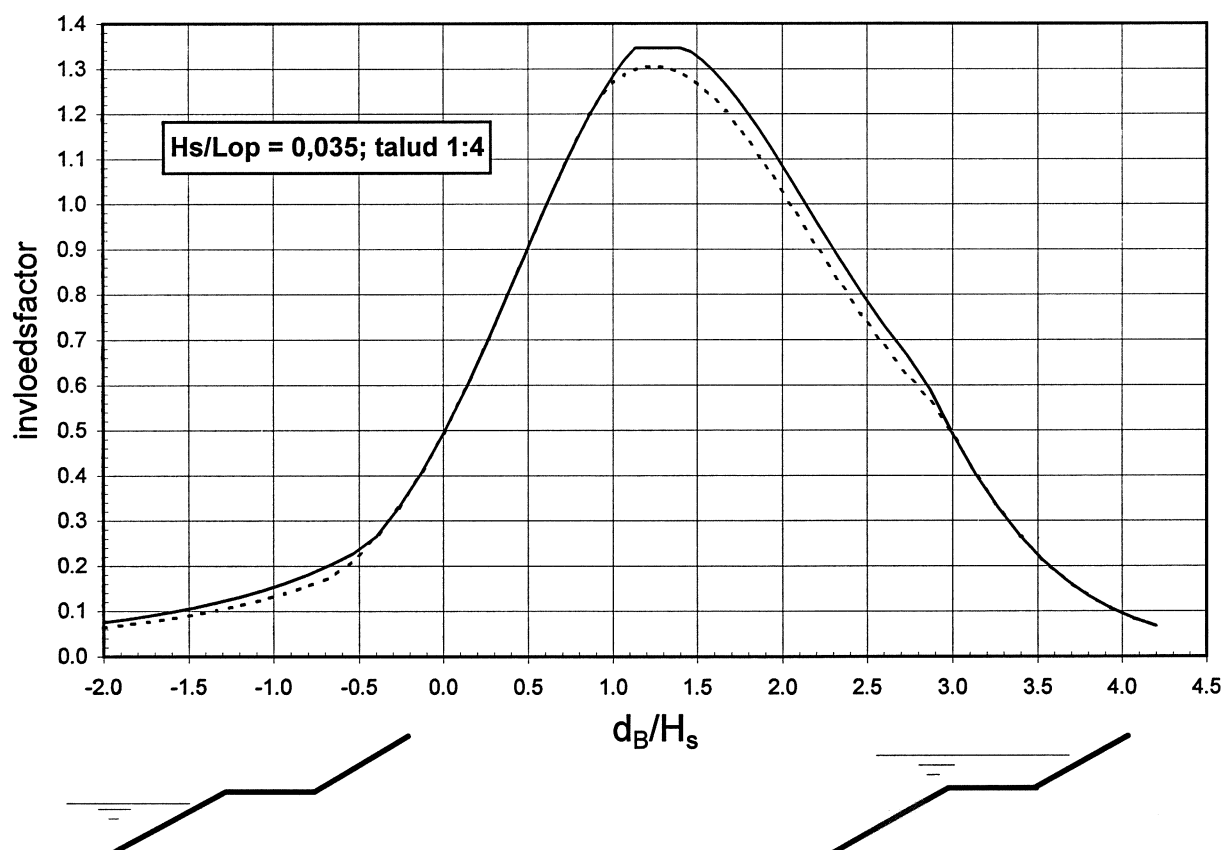
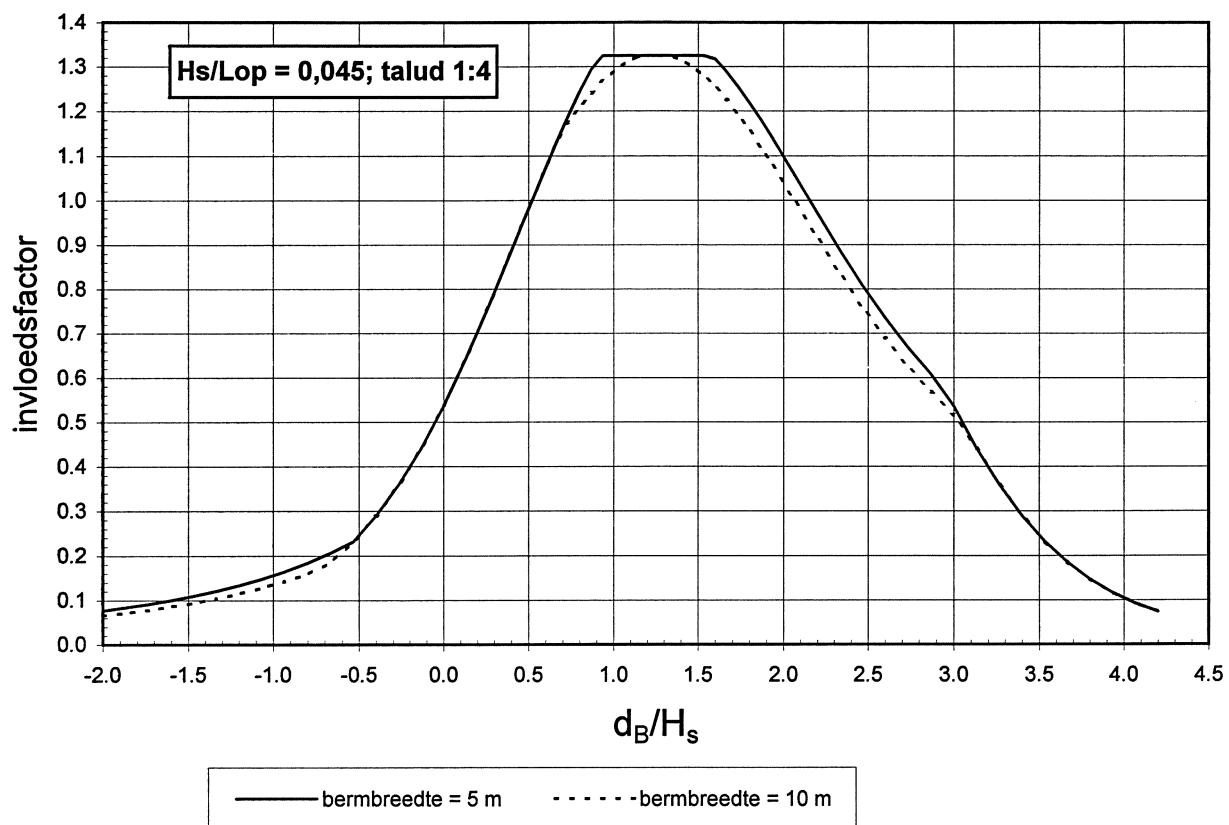
H3272

Fig. 24

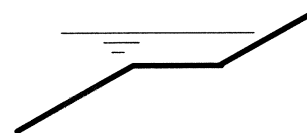
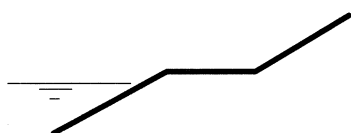
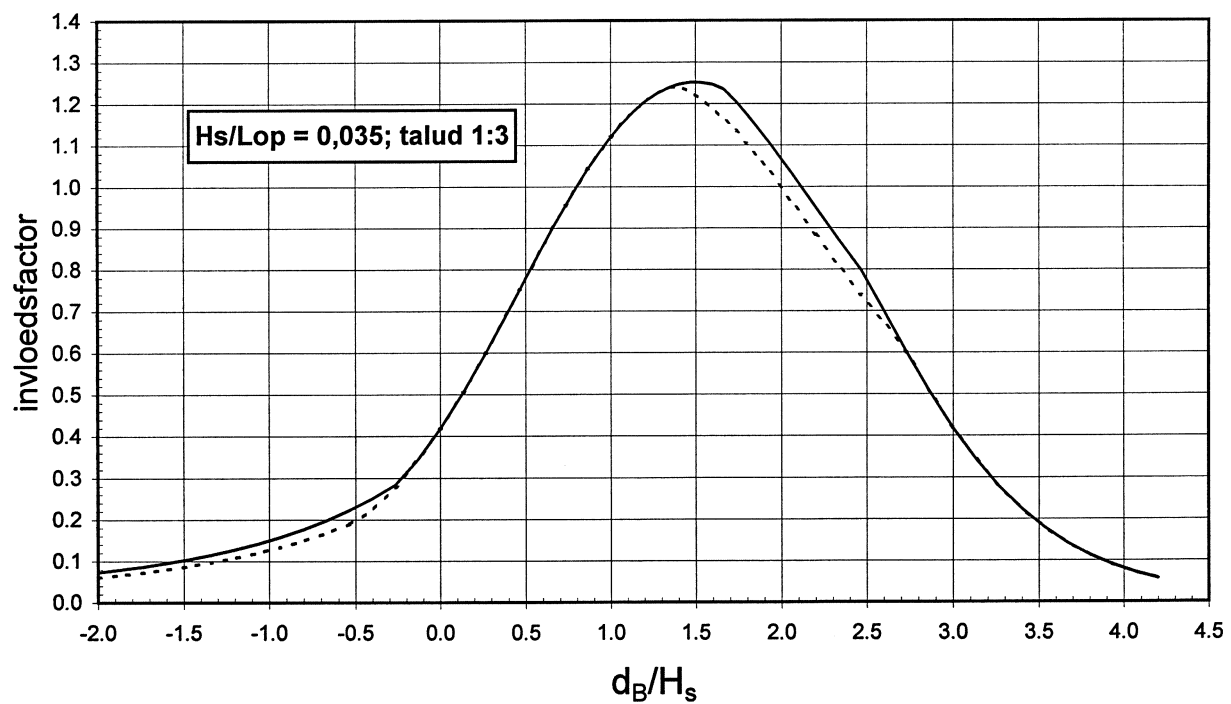
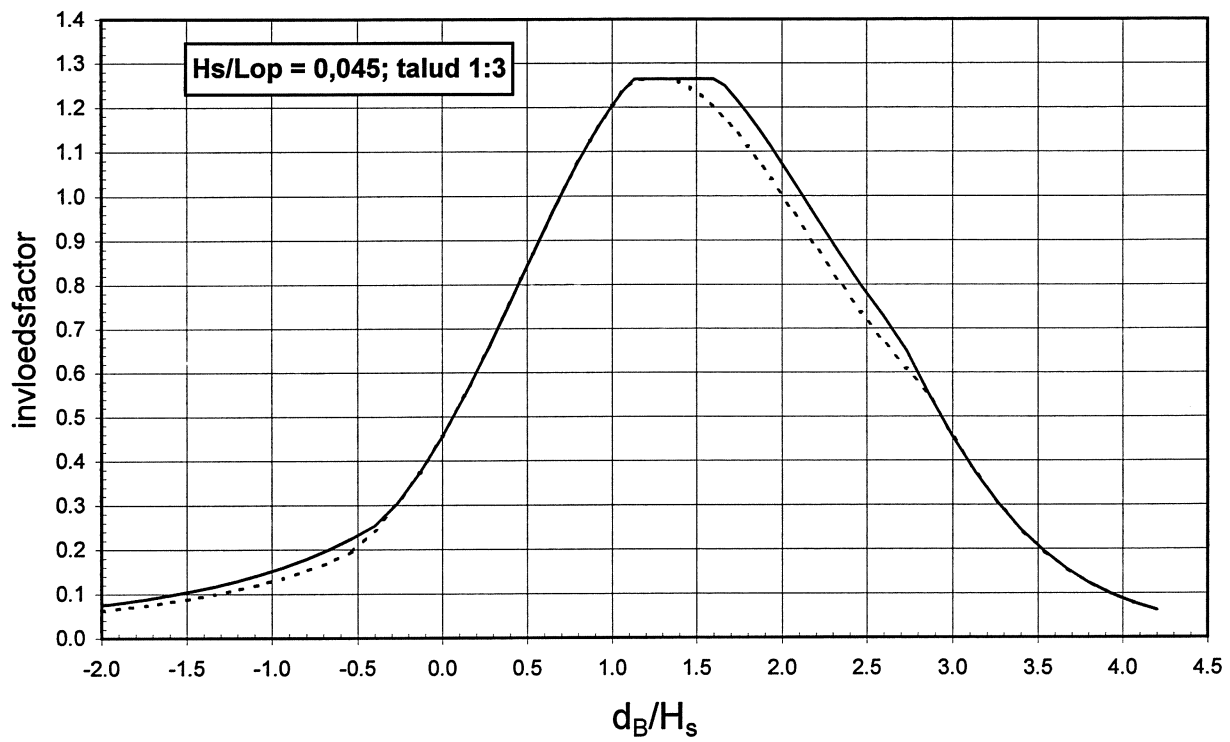


Opstelling 7

E001129c



Invloedsfactor voor belasting op een berm
taludhelling onder de berm 1:4



Invloedsfactor voor belasting op een berm
taludhelling onder de berm 1:3



Zuigermechanisme		E000710e
wl delft hydraulics	H3272	Fig. 28



Kattenrugmechanisme		E000710f
wl delft hydraulics	H3272	Fig. 29