

Opdrachtgever:

RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen

Normaalkracht in steenzetting met blokken op hun kant

Grootschalig onderzoek in Deltagoot

Rapport

oktober 2007

Opdrachtgever:

RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen

Normaalkracht in steenzetting met blokken op hun kant

Grootschalig onderzoek in Deltagoot

G. Wolters en M. Klein Breteler

Rapport

oktober 2007



Opdrachtgever:	RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen							
Titel:	Normaalkracht in steenzetting met blokken op hun kant							
Samenvatting:								
<p>Een van de aspecten van de stabiliteit van steenzettingen is de klemming van de stenen. De klemming maakt dat de stenen een onderlinge interactie hebben waardoor een afzonderlijke steen slechts met een veel grotere kracht dan het eigengewicht uit de steenzetting getrokken kan worden. Teneinde meer inzicht te krijgen in de klemming van steenzettingen heeft Rijkswaterstaat Zeeland opdracht verleend aan WL Delft Hydraulics om in de Deltagoot de normaalkracht in een steenzetting te meten. Deze normaalkracht is een belangrijk gegeven om met een grotere nauwkeurigheid de klemming in een steenzetting te kunnen voorspellen. Dit is een belangrijk aspect van de stabiliteit van steenzettingen.</p> <p>De metingen zijn uitgevoerd in een steenzetting van blokken op hun kant van $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ op een talud met helling van 1:3. De proeven zijn uitgevoerd op prototypeschaal (1:1).</p> <p>Dit rapport beschrijft de opzet van de krachtmetingen in de Deltagoot en de resultaten van het onderzoek.</p>								
Referenties:			Contract ZLDO 35070541 contactpersoon opdrachtgever: Y. Provoost					
Ver	Auteur		Datum	Opmerk.	Review		Goedkeuring	
0	G. Wolters M. Klein Breteler		1 augustus 2007		B. Hofland		W.M.K. Tilmans	
1	G. Wolters M. Klein Breteler		11 oktober 2007		B. Hofland		M.R.A. van Gent	
Projectnummer:			H4941					
Trefwoorden:			Steenzetting, klemming, taludbekledingen					
Aantal bladzijden:			36					
Classificatie:			Geen					
Status:			Definitief					

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Modelopstelling Deltagoot	3
	2.1 Meetlocatie Deltagoot	3
	2.2 Opzet van de proeven	3
	2.3 Krachtopnemers bij de teen	5
3	Proevenprogramma	7
4	Resultaten	11
5	Conclusies	17
	Referenties	19

Bijlagen

A Tabellen

B Figuren

Symbolenlijst

Symbol	Eenheid	Betekenis
D_n	(m)	Nominale diameter van granulair materiaal
D_f	(m)	Zeefdiameter van granulair materiaal
$E(f)$	(m ² s)	Energiedichtheid als functie van f
F	(-)	Stabiliteitsparameter ($\xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$)
G	(N)	Gewichtskracht van de steenzetting
H_{m0}	(m)	Significante golfhoogte, bepaald uit het spectrum.
H_{max}	(m)	Maximale golfhoogte
H_s	(m)	Significante golfhoogte, gemiddelde golfhoogte van de 1/3 hoogste golven
H_{sN}	(m)	Significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven
N	(-)	Aantal golven tijdens een proef
N_T	(N)	Normaalkracht in de steenzetting bij de teen
$T_{m-1,0}$	(s)	Spectrale golfperiode
T_p	(s)	Periode bij de piek van het golfspectrum
b	(m)	Dikte van de filterlaag
f	(Hz)	Golffrequentie
g	(m/s ²)	Gravitatieversnelling
h	(m)	Waterdiepte
m_0	(m ²)	Nulde moment van de energiedichtheid ($\int E(f) df$)
n	(-)	Aantal proeven
N_T	(N)	Maximale normaalkracht in de steenzetting bij de teen
s_{op}	(-)	Golfsteilheid op basis van de diepwater golflengte

Symbol	Eenheid	Betekenis
α	(°)	Taludhelling
Δ	(-)	Relatieve soortelijke massa van de topplagelementen $((\rho_s - \rho) / \rho)$
ρ	(kg/m ³)	Soortelijke massa van water
ρ_s	(kg/m ³)	Soortelijke massa van topplagelementen
ξ_{op}	(-)	Brekerparameter ($\tan \alpha / \sqrt{H_s / (1,56 T_p^2)}$)

I Inleiding

Een van de aspecten van de stabiliteit van steenzettingen is de klemming van de stenen. De klemming maakt dat de stenen een onderlinge interactie hebben waardoor een afzonderlijke steen slechts met een veel grotere kracht dan het eigengewicht uit de steenzetting getrokken kan worden. Teneinde meer inzicht te krijgen in de klemming van steenzettingen heeft Rijkswaterstaat Zeeland opdracht verleend aan WL | Delft Hydraulics om in de Deltagoot de normaalkracht in een steenzetting te meten. Deze normaalkracht is een belangrijk gegeven om met een grotere nauwkeurigheid de klemming in een steenzetting te kunnen voorspellen. Dit is een belangrijk aspect van de stabiliteit van steenzettingen (Peters 2007).

De metingen zijn uitgevoerd in een steenzetting van blokken op hun kant van $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ op een talud met helling van 1:3. De proeven zijn uitgevoerd op prototypeschaal (1:1).

Dit rapport beschrijft de opzet van de krachtmetingen in de Deltagoot en de resultaten van het onderzoek. Tijdens dezelfde proeven is ook de bekleding onderzocht. Dit onderzoek is separaat gerapporteerd (WL 2007).

Het onderzoek is uitgevoerd o.l.v. ir. M. Klein Breteler en dr. G. Wolters, in opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland, projectbureau Zeeweringen. Het project is inhoudelijk begeleid door ir. R. 't Hart van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat.

2 Modelopstelling Deltagoot

2.1 Meetlocatie Deltagoot

De locatie van de proeven was de 240 m lange Deltagoot van WL | Delft Hydraulics, zie Figuur 1. De goot is 5 m breed en 7 m diep. In deze faciliteit kunnen constructies beproefd worden op grote schaal bij een waterdiepte van 1 tot 5,5 m. De maximale golfcondities zijn golfhoogtes tot $H_s \approx 1,6$ m (onregelmatige golven) en golfperiodes van 1 tot 12 s. De maximale capaciteit is afhankelijk van de waterdiepte en de modelopstelling.

Voor de golfschotsturing kan er gebruikgemaakt worden van eerste orde en tweede orde sturing. Voor relatief korte golven op ondiep water zorgt de tweede orde golfschotsturing ervoor dat er minder stoorgolven ontstaan in de goot omdat deze golfschotsturing beter aansluit op de relatief korte golf toppen en lange golfdalen die normaal zijn bij dit soort condities. Het golfschot is verder uitgerust met een actief reflectiecompensatiesysteem (ARC), zodat de golfenergie die reflecteert op de constructie, niet opnieuw reflecteert op het golfschot en de golfcondities beïnvloedt.



Figuur 1 Deltagoot van WL | Delft Hydraulics in de Voorst (Marknesse)

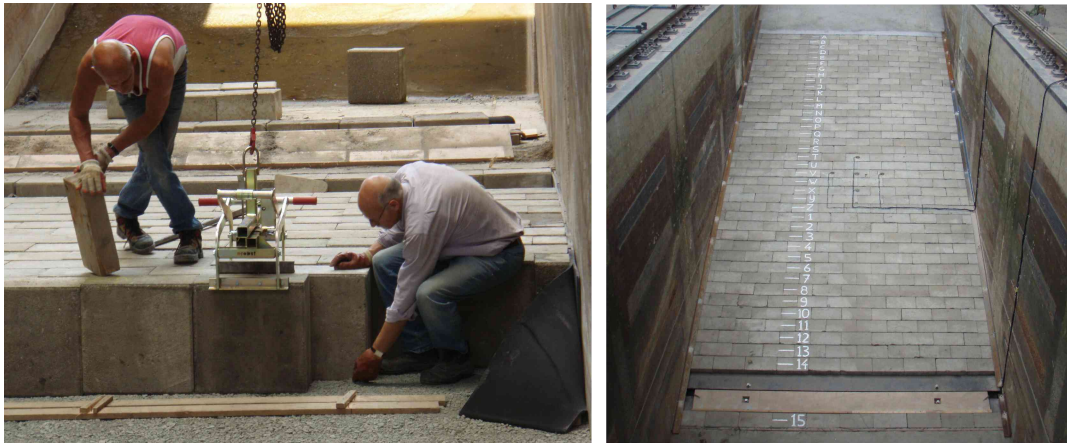
2.2 Opzet van de proeven

De modelopstelling is weergegeven in Figuur B1 t/m B4 in de bijlage B. Een dijkprofiel met een taludhelling van 1:3 met een kruinhoogte van 8,3 m ten opzichte van de gootbodem is voor het onderzoek gebruikt. De blokken zijn ingebouwd vanaf een hoogte van +2,20 m tot een hoogte van +5,45 m.

De kern van de dijk bestaat uit zand, met daarop een 0,3 m dikke laag zandcementstabilisatie dat een goede weergave is van de kleilaag die normaal in de werkelijkheid wordt toegepast. Dit voorkomt grondmechanische instabiliteit tijdens de golfaanval. Op de laag zandcementstabilisatie is een geotextiel aangebracht en daarop een laagje steenslag. Deze filterlaag van steenslag is 11,5 cm dik met een korrelgrootte van 4 – 20 mm (D_{n10} - D_{n90}), zoals dat veel in Zeeland wordt toegepast onder blokken op hun kant. Een zeefkromme van het filtermateriaal is gegeven in Figuur B5 in bijlage B.

Op het laagje steenslag zijn de blokken op hun kant gezet (50 x 50 x 25 cm), die door de opdrachtgever beschikbaar zijn gesteld. De blokken zijn koud tegen elkaar geplaatst in halfsteensverband zonder afstandhouders (zie figuur 2).

Door kleine maatafwijkingen in de blokken ontstaan er grotere en kleinere spleten tussen de blokken.



Figuur 2 Plaatsen van blokken (links) en de steenzetting na gereedkomen (rechts)

Van 4 blokken is de soortelijke massa bepaald: 2282,5, 2286,6, 2282,0 en 2273,9 kg/m³. De gemiddelde soortelijke massa was derhalve $\rho_s = 2281 \text{ kg/m}^3$.

Ten behoeve van het meten van de normaalkracht in de steenzetting zijn op 2 à 2,5 m onder de waterlijn krachtopnemers tussen stalen balken in de bekleding aangebracht (zie paragraaf 2.3).

Samenvattend zijn de afmetingen van de constructie (maten in de Deltagoot, zie figuur B3):

- hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- taludhelling van 1:3
- blokken van +2,20 m boven de gootbodem tot +5,45 m boven de gootbodem van 50x50x25 cm³ die een toplaag met dikte van 50 cm vormen
- soortelijke massa van de betonblokken: 2281 kg/m³
- gemiddelde spleetbreedte tussen de blokken: 2,4 mm
- Een filterlaag van steenslag van 11,5 cm dik en $D_{f15} = 4,5 \text{ mm}$
- Een dummy bekleding van beton van de gootbodem tot een hoogte van +1,90 m
- Stalen balken en krachtopnemers tussen +1,90 m en +2,20 m
- Een dummy bekleding van beton vanaf +5,45 m boven de gootbodem tot de kruin van de dijk

De proeven zijn uitgevoerd bij waterstanden per proef variërend van 4,34 tot 5,00 m boven de gootbodem.

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook rubber aangebracht met een dikte van 2,4 cm, zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klem wigt tussen de starre gootwanden en een overschatting van de stabiliteit verkregen wordt.

Elke rij blokken die ingebouwd is in de modelopstelling is voorzien van een nummer of letter. De bovenste rij is rij A, en de onderste rij boven de krachtopnemers is rij 14. Onder de krachtopnemers is ook nog een rij aanwezig: nr. 15.

2.3 Krachtopnemers bij de teen

Voor het meten van de normaalkracht in het vlak van de steenzetting, zijn onderin het blokkentalud twee horizontale stalen balken geplaatst met daartussen twee krachtopnemers. Deze instrumenten zaten op een niveau van ca 2 m boven de gootbodem. Hiermee is het mogelijk om de normaalkracht in het vlak van de steenzetting te meten. Dit is de kracht die de stenen uitoefenen op de teen van de dijkbekleding.

De normaalkracht in een steenzetting is relevant voor de grootte van de klemming tussen de stenen. Naarmate de normaalkracht groter is, zal het meer kracht kosten om een afzonderlijke steen uit de steenzetting te trekken, mits deze steen niet volledig los in de steenzetting zit. Deze metingen leveren belangrijke gegevens toe aan het onderzoek naar de invloed van klemming op stabiliteit van steenzettingen (Peters, 2007).

Tekeningen van de stalen balken en krachtopnemers zijn gegeven in figuur 3 en in Figuur B3 en B4 in bijlage B.

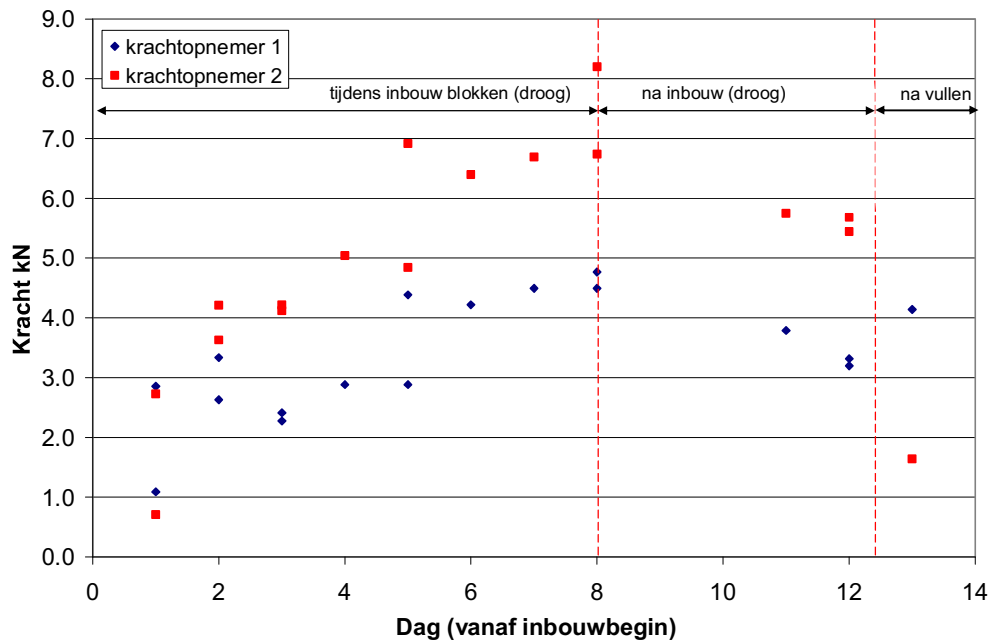


a) Links: krachtopnemer (15 ton bereik), rechts: inbouw van krachtopnemer



b) Ingebouwde teenconstructie

Figuur 3 Krachtmetingen op teenconstructie



Figuur 4 Krachtmetingen op teenconstructie (tijdens inbouw en vullen)

Tijdens de inbouw zijn een aantal krachtmetingen uitgevoerd, waarvan de resultaten zijn samengevat in Figuur 4. Krachtopnemer 1 zat aan de meetcabinezijde. In deze figuur blijkt dat tijdens de inbouw van de blokken de kracht op de teenconstructie eerst toegenomen is tot 13 kN (dag 8, totale kracht voor beide krachtopnemers). Na dag 8 waren alle blokken ingebouwd. In de volgende dagen, tijdens het inbouw van de bekabeling en drukopnemers, is de kracht weer afgenomen tot 9 kN (voor het vullen van de goot). Na het vullen van de goot en voor het begin van de proeven is de kracht verder afgenomen tot 6 kN. De gemeten kracht na het vullen (Figuur 4) komt overeen met de begin van de krachtmeting in Figuur 6. De daling van de kracht na inbouw kan verklaard worden door het opbouwen van wrijving met de filterlaag.

3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma is uitgevoerd in twee series proeven, bestaande uit proef 11 t/m 17 in de eerste serie en proef 21 t/m 26 in de tweede serie. De eerste serie is uitgevoerd met een golfsteilheid $s_{op} \approx 0,035$ en de tweede serie met relatief lange golven met $s_{op} \approx 0,020$. De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum omdat dit een goede benadering is voor de zeeegang langs de Nederlandse kust.



Figuur 5 Golfbelasting tijdens de proeven

Vanwege de duur van de proeven, en het soms optreden van problemen met de golfschotsturing, zijn een aantal proeven in verschillende delen uitgevoerd. De golfcondities van elke proefdeel zijn weergegeven in tabel A1 in bijlage A. In tabel 3.1 zijn de golfcondities gegeven per proef, die zijn samengesteld uit de proefdelen. In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

h	=	waterdiepte (m)
H_s	=	significante golfhoogte (m)
H_{max}	=	grootste gemeten inkomen golfhoogte (m)
s_{op}	=	golfsteilheid op basis van diepwater golflengte (-)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode (s)
F	=	$\xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ = stabiliteitsparameter (-)
s_{op}	=	$H_s / (1,56 T_p^2)$ = golfsteilheid (-)
ξ_{op}	=	$\tan \alpha / \sqrt{H_s / (1,56 T_p^2)}$ = brekerparameter (-)
N	=	aantal golven tijdens de proef (-)
α	=	taludhelling ($^\circ$)
Δ	=	$(\rho_s - \rho) / \rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
D	=	dikte van de top laag (m)

proef	h (m)	H _s (m)	H _{max} (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	duur (uur)	N (-)	S _{op} (-)	ξ _{op} (-)	H _s /(ΔD) (-)	F (-)
T11	4,340	1,20	1,79	4,76	4,38	1,18	1125	0,034	1,81	1,87	2,78
T12	4,450	1,39	1,82	5,14	4,85	1,28	1146	0,034	1,82	2,16	3,22
T13	4,530	1,50	1,95	5,44	5,13	1,35	1134	0,032	1,85	2,34	3,53
T14	4,430	1,50	1,99	5,51	5,17	3,00	2523	0,032	1,87	2,34	3,56
T15	4,700	1,53	2,15	5,45	5,15	4,58	3850	0,033	1,84	2,38	3,57
T16	4,630	1,55	2,10	5,54	5,23	7,64	6387	0,033	1,85	2,43	3,66
T17	4,819	1,57	2,17	5,14	5,19	10,25	8398	0,038	1,71	2,45	3,50
T21	4,900	1,49	2,08	6,56	6,12	1,69	1214	0,022	2,24	2,33	3,98
T22	4,985	1,58	2,21	7,08	6,41	1,78	1252	0,020	2,35	2,46	4,35
T23	4,900	1,56	2,33	7,15	6,36	3,13	2144	0,020	2,39	2,43	4,34
T24	4,789	1,56	2,23	6,88	6,34	5,00	3561	0,021	2,29	2,44	4,24
T25	4,887	1,57	2,39	7,03	6,38	8,00	5669	0,020	2,33	2,46	4,32
T26	4,985	1,59	2,27	7,10	6,36	8,25	5646	0,020	2,35	2,48	4,37

Tabel 1 Proevenprogramma

Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

$$T_{m-1,0N} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i m_{-1i})}{\sum_{i=1}^n (N_i m_{0i})}$$

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}}$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i}$$

met:

H_{sN} = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)

T_{pN} = golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

N_i = aantal golven in proef i (-)

H_{si} = significante golfhoogte in proef i (m)

T_{pi} = de golfperiode tijdens proef i, bij de piek van het spectrum (s)

n = aantal proeven (-)

T_{m-1,0N} = golfperiode op basis van het spectrum (T_{m-1,0} ≈ T_{p/1,1}) over de beschouwde proeven (s)

$m_0 = \int E(f) df =$ nulde moment van de energiedichtheid (oppervlak onder het spectrum) (m^2)

$m_{-1} = \int f^{-1} \cdot E(f) df$

$E(f)$ = energiedichtheid als functie van f (grafiek van het spectrum) (m^2s)

f = golffrequentie = $1/T$ (Hz)

Op dezelfde wijze kunnen de uitgevoerde proeven met de hoogste golfcondities samengesteld worden. Het resultaat hiervan is gegeven in tabel 3.2.

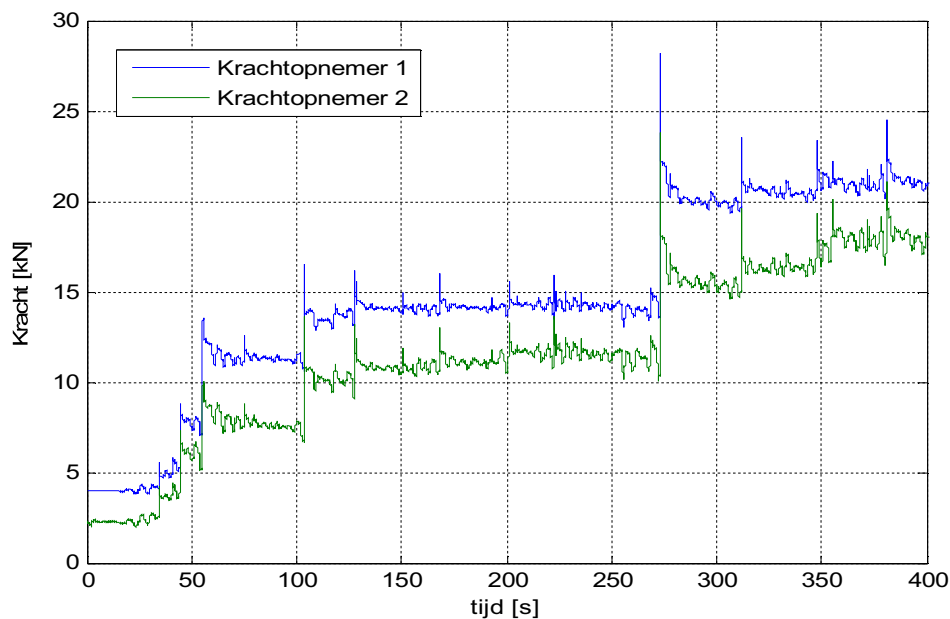
proef	h (m)	H_s (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	duur (uur)	N (-)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	F (-)
T13-17	4,686	1,55	2,17	5,36	5,19	26,82	22292	0,035	1,79	2,41	3,57
T22-26	4,906	1,57	2,39	7,04	6,36	26,16	18272	0,020	2,34	2,46	4,33

Tabel 2 Samengestelde golfcondities van de proeven met hoogste golven

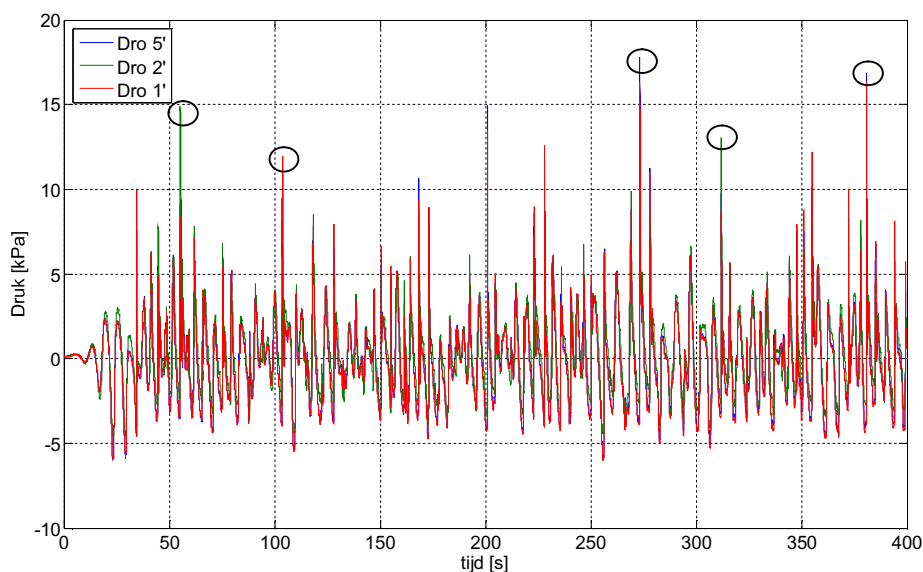
Tijdens proef 17A waren er problemen met de golfschotsturing, waardoor deze proef is uitgevoerd met een iets afwijkende golfconditie, namelijk $H_s = 1,61$ m en $T_p = 4,64$ s. Omdat dit slechts een klein deel was van de totale belastingduur bij deze golfcondities (3,5 uur van 26,82 uur) hebben deze afwijkingen een verwaarloosbare invloed op het resultaat. Tijdens deze proef is ook geen blokbeweging geconstateerd.

4 Resultaten

Na ca. 5 minuten golven (proef T11) is de krachtopnemer aan de linker kant (halzijde) kapot gegaan. Er is toen besloten met één werkende krachtopnemer verder te golven (alleen een krachtmeting aan de meetcabinezijde) omdat op korte termijn geen nieuwe krachtopnemer beschikbaar was en de moeite voor het vervangen onredelijk hoog bleek. Verder was aan het begin van de proef al duidelijk geworden dat de krachten in de steenzetting vrij symmetrisch zijn. De linker en rechter krachtopnemers maten een kracht in dezelfde orde van grootte (maximale verschil was 4 kN bij krachten tot 22 kN op een krachtopnemer), zie Figuur 6.



Figuur 6a Krachtverloop voor krachtopnemer 1 (meetcabinezijde) en drukopnemer 2 (halzijde), Proef T11



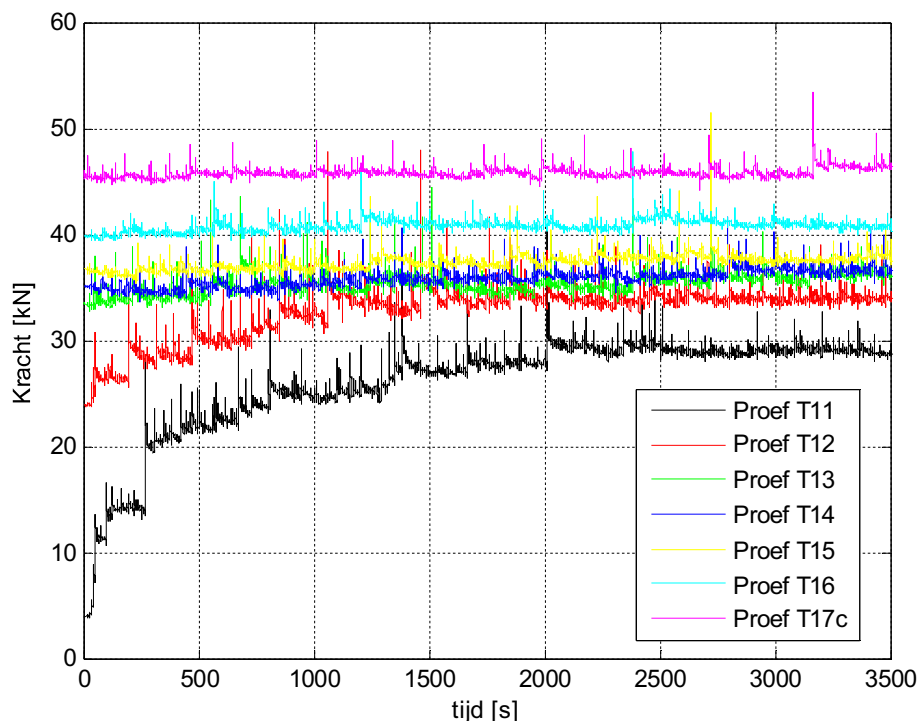
Figuur 6b Drukverloop voor drukopnemer 1', 2' en 5' (op de toplaag), Proef T11

In Figuur 6b is getoond dat de sprongen in het krachtsverloop precies op hetzelfde moment plaatsvinden als hoge drukpieken op de toplaag als gevolg van golfklappen (proef 11). Hiermee is het aannemelijk gemaakt dat grote golfklappen zoveel trillingen in de steenzetting veroorzaken dat de wrijving met de filterlaag wordt verbroken en er een groter aandeel van de gewichtscomponent langs het talud op de teenconstructie gaat drukken. In de latere proeven verdwijnen de grotere sprongen in het krachtsverloop, zie Figuur 7a en 7b.

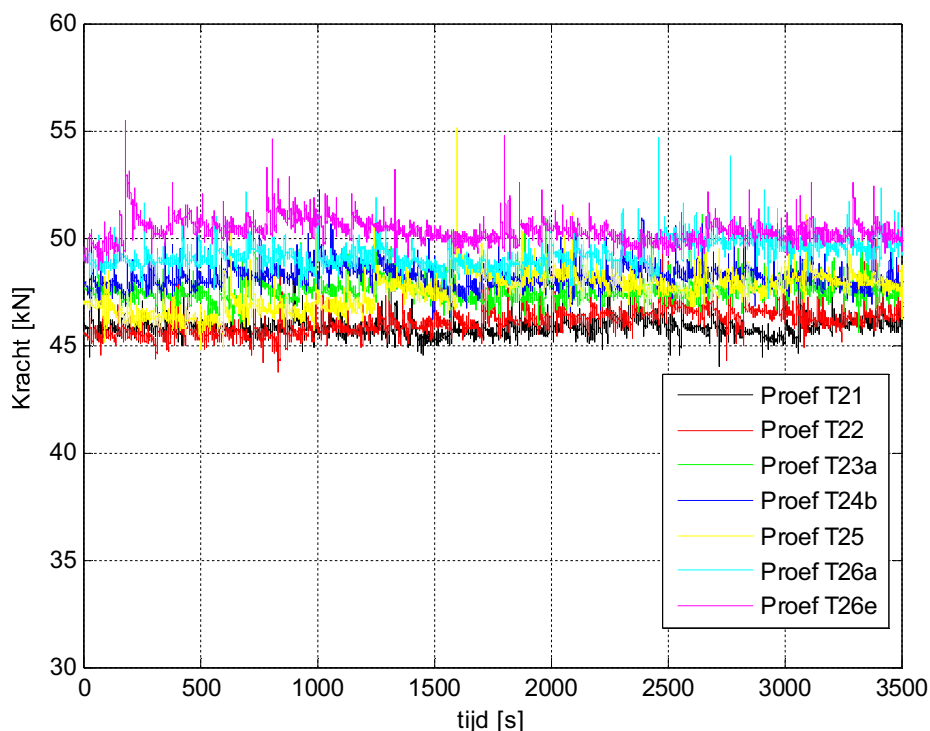
Het gemeten krachtsverloop voor de rechter drukopnemer (meetcabinezijde) is gegeven in Figuur 7. Hier is alleen het krachtverloop voor de eerste 3500s per proef getoond omdat de krachtmeting voor het rest van de tijd nauwelijks verschilt van de waarde aan het eind van deze periode.

Tijdens de eerste proeven (T11-T13) heeft de kracht op de teen zich stap voor stap opgebouwd. Tijdens proef 14 leek de kracht op de teen dan een evenwicht te bereiken (~37 kN), maar groeide toch nog wat in de volgende proeven. In de verdere proeven zijn geen grote sprongen in de normaalkracht meer te zien, maar alleen een geleidelijke verhoging van de normaalkracht.

Uitgaand van een gelijke verdeling van de kracht op beide drukopnemers ligt de maximale kracht op de teen dus bij ca. 100 kN (Proef 26). Omdat de laatste proeven (T22-T26) alleen nog kleine verhogingen (< 5 kN) in de krachten gaven, lijkt het dat 100 kN kennelijk de maximale teenbelasting is.



Figuur 7a Krachtverloop van de krachtopnemer aan meetcabinezijde (T11-T17)



Figuur 7b Krachtverloop van de krachtopnemer aan meetcabinezijde (T21-T26)

Deze kracht op de teen kan vergeleken worden met de component van de gewichtskracht evenwijdig aan het talud:

$$N_T = G \sin \alpha.$$

Met:

N_T = maximale normaalkracht in de steenzetting bij de teen (N)

G = gewichtskracht van de steenzetting (N)

α = taludhelling ($^\circ$)

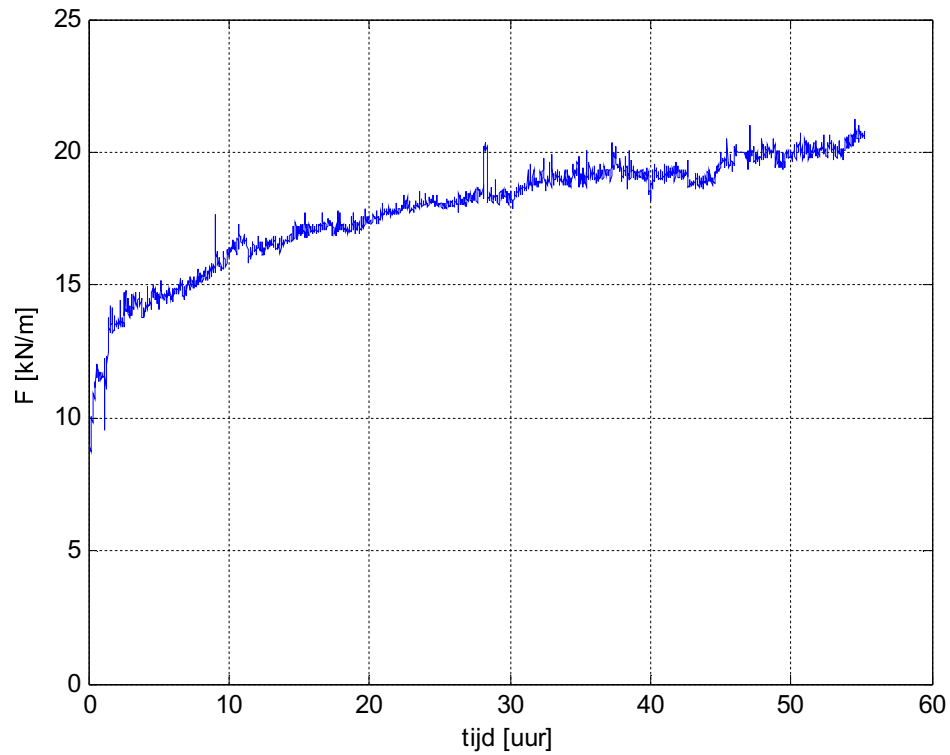
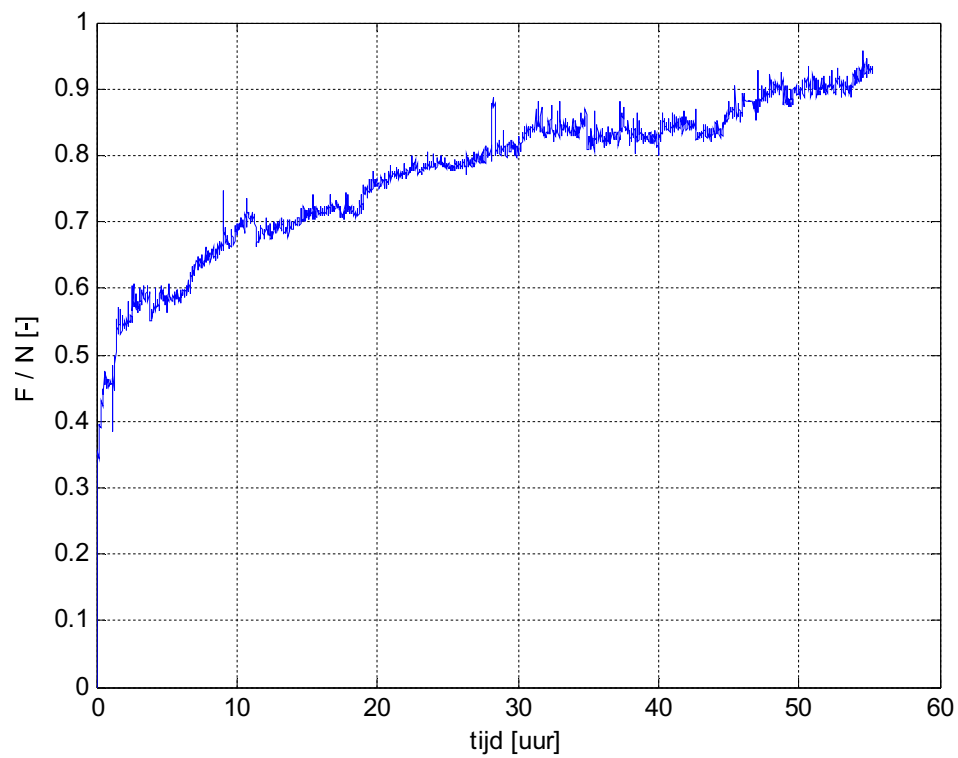
Hierbij moet rekening gehouden worden dat een groot deel van de steenzetting onder water zit. Het verschil tussen de gewichtsc component evenwijdig aan het talud en de gemeten kracht bij de teen is gelijk aan de wrijving van de stenen op de ondergrond (en wellicht wat wrijving met de gootwand).

Bij een waterstand van 4,7 m boven de gootbodem is de steenzetting over een lengte van 8,54 m onder water en 1,61 m boven water. Met een soortelijke massa van de blokken van 2281 kg/m^3 is het gewicht per m^2 steenzetting (de spleten en stalen balk worden verwaarloosd):

- onder water: $\rho g \Delta D = 1000 \cdot 9,8 \cdot 1,281 \cdot 0,5 = 6,28 \text{ kN/m}^2$
- boven water: $\rho_s g D = 2281 \cdot 9,8 \cdot 0,5 = 11,18 \text{ kN/m}^2$

De steenzetting was 4,95 meter breed. De normaalkracht wordt hiermee:

$$N_T = G \sin \alpha = 4,95 \cdot (8,54 \cdot 6,28 + 1,61 \cdot 11,18) \cdot 0,32 = 112 \text{ kN}$$

Figuur 8a Krachtverloop (kN/m) als functie van de tijd (T11-T26)

Figuur 8b Relatieve krachtverloop voor de drukopnemer op meetcabinezijde als functie van de tijd (T11-T26)

In Tabel 3 is de theoretische maximale normaalkracht N_T voor elke proef gegeven. In deze tabel is ook de lengte van de steenzetting onder water en de lengte boven water gegeven, gemeten in het hart van de laag blokken.

proef	h (m)	lengte o.w. m	lengte b.w. m	Normaalkracht kN
T11	4.34	7.40	2.75	120.8
T12	4.45	7.75	2.40	118.2
T13	4.53	8.00	2.15	116.2
T14	4.43	7.69	2.47	118.7
T15	4.70	8.54	1.61	112.1
T16	4.63	8.32	1.83	113.8
T17	4.82	8.92	1.24	109.2
T21	4.90	9.17	0.98	107.3
T22	4.99	9.44	0.71	105.2
T23	4.90	9.17	0.98	107.3
T24	4.79	8.82	1.33	110.0
T25	4.89	9.13	1.02	107.6
T26	4.99	9.44	0.71	105.2

Tabel 3 Maximale normaalkracht in de steenzetting bij de teen (T11-T26) (lengte o.w. = lengte onder water, lengte b.w. = lengte boven water).

In Figuur 8 is het verloop van de kracht bij de teen gegeven als functie van de tijd voor alle proeven tezamen. In de bovenste figuur is dit gepresenteerd als een kracht per meter dijk, en in de onderste figuur is dit dimensieloos gemaakt met de theoretische maximale normaalkracht N_T . In Figuur 8a is te zien dat de kracht op de teen steeds verder toeneemt, al wordt die toename op den duur telkens kleiner. Verder blijkt dat aan het eind van de proevenserie de normaalkracht in de krachtopnemers is opgelopen tot ruim 20 kN/m, zodat aangenomen kan worden dat de totale normaalkracht in de steenzetting ca. 100 kN is geworden. Kennelijk rustte toen al ongeveer 93% van de gewichtscomponent op de teen. Net na de aanleg was dit nog minder dan 10%, maar liep tijdens de eerste proef al snel op naar orde 50%, zie Figuur 8b.

5 Conclusies

In het kader van een grootschalige onderzoek naar de stabiliteit van blokken op hun kant in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics zijn metingen uitgevoerd van de kracht die een steenzetting op de teen uitoefent.

Uit de metingen is gebleken dat net na de aanleg nog maar 10% van de gewichtscapaciteit van de steenzetting langs het talud op de teen drukt, maar na ruim 10 minuten golfbelasting is dit al opgelopen tot 50%. Tijdens golfklappen is de normaalkracht in sprongen toegenomen, waaruit blijkt dat trillingen een belangrijke invloed hebben. Hierdoor neemt de wrijving met het filter af.

Aan het eind van de proevenserie, die 53 uur duurde, was de normaalkracht opgelopen tot ongeveer 93% van de gewichtscapaciteit evenwijdig aan het talud.

Referenties

Peters, D.J. (2007)

Kennisontwikkeling ten behoeve van Steentoets

Verzamelde memo's betreffende de implementatie-gereedmaken van het klemmingsonderzoek

Royal Haskoning, maart 2007

WL | Delft Hydraulics (2007)

Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant

Grootschalig onderzoek in Deltagoot

WL | Delft Hydraulics, H4941, oktober 2007

A Tabellen

proef	h (m)	H _s (m)	H _{max} (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	duur (s)	N (-)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	H _s /(\Delta D) (-)	F (-)
T11	4,340	1,20	1,79	4,76	4,38	4250	1125	0,034	1,81	1,87	2,78
T12	4,450	1,39	1,82	5,14	4,85	4608	1146	0,034	1,82	2,16	3,22
T13	4,530	1,50	1,95	5,44	5,13	4860	1134	0,032	1,85	2,34	3,53
T14	4,430	1,52	1,99	5,49	5,18	4400	1006	0,032	1,86	2,37	3,57
T14A	4,430	1,49	1,94	5,53	5,16	6400	1517	0,031	1,89	2,33	3,55
T15	4,700	1,52	2,07	5,32	5,15	6200	1445	0,034	1,80	2,37	3,50
T15A	4,700	1,53	2,15	5,53	5,16	10300	2405	0,032	1,86	2,39	3,62
T16	4,630	1,55	2,01	5,59	5,22	7200	1666	0,032	1,87	2,43	3,68
T16A	4,630	1,55	2,10	5,40	5,23	7200	1674	0,034	1,81	2,42	3,59
T16B	4,630	1,55	2,04	5,59	5,24	7200	1674	0,032	1,87	2,42	3,68
T16C	4,630	1,56	2,05	5,57	5,22	5900	1373	0,032	1,85	2,44	3,68
T17	4,830	1,55	2,10	5,40	5,13	16200	3776	0,034	1,81	2,42	3,59
T17A	4,800	1,61	2,14	4,64	5,26	12600	2884	0,048	1,52	2,51	3,33
T17B	4,820	1,53	1,95	5,61	5,17	1800	403	0,031	1,89	2,39	3,65
T17C	4,800	1,55	2,17	5,41	5,20	5400	1128	0,034	1,81	2,42	3,59
T17D	5,000	1,60	2,02	5,48	5,24	900	207	0,034	1,80	2,50	3,71
T21	4,900	1,49	2,08	6,56	6,12	6084	1214	0,022	2,24	2,33	3,98
T22	4,985	1,58	2,21	7,08	6,41	6408	1252	0,020	2,35	2,46	4,35
T23	4,900	1,61	2,12	7,21	6,33	2483	397	0,020	2,37	2,51	4,46
T23A	4,900	1,55	2,33	7,16	6,41	6000	1180	0,019	2,39	2,42	4,34
T23B	4,900	1,52	2,19	7,09	6,26	2800	567	0,019	2,39	2,38	4,26
T24	4,800	1,57	2,01	6,78	6,51	1220	231	0,022	2,25	2,45	4,21
T24A	4,790	1,56	2,23	6,87	6,34	9980	1980	0,021	2,29	2,44	4,24
T24B	4,785	1,56	2,05	6,91	6,33	6800	1350	0,021	2,30	2,44	4,25
T25	4,890	1,59	2,39	7,09	6,39	10400	2054	0,020	2,34	2,47	4,37
T25A	4,890	1,51	1,97	6,54	6,37	1200	231	0,023	2,22	2,35	4,00
T25B	4,885	1,58	2,18	7,04	6,39	14850	2926	0,020	2,33	2,47	4,34
T25C	4,885	1,51	2,22	6,96	6,21	2350	458	0,020	2,36	2,36	4,18
T26	4,980	1,61	2,27	7,17	6,43	5400	1022	0,020	2,36	2,51	4,44
T26A	4,985	1,58	2,27	7,02	6,32	7200	1438	0,021	2,33	2,47	4,33
T26B	4,990	1,60	2,16	7,35	6,34	2100	407	0,019	2,42	2,49	4,49
T26C	4,990	1,60	2,16	7,36	6,35	2100	413	0,019	2,42	2,50	4,50
T26D	4,990	1,60	2,12	7,35	6,34	2100	411	0,019	2,42	2,49	4,50
T26E	4,985	1,57	2,20	6,96	6,35	10800	1955	0,021	2,31	2,46	4,29

Tabel A.1 Proevenprogramma

rij	z*	x**
A	5.45	186.29
B	5.37	186.04
C	5.28	185.80
D	5.20	185.55
E	5.12	185.31
F	5.03	185.06
G	4.95	184.82
H	4.87	184.57
I	4.78	184.32
J	4.70	184.08
K	4.62	183.83
L	4.54	183.59
M	4.45	183.34
N	4.37	183.09
O	4.29	182.85
P	4.20	182.60
Q	4.12	182.36
R	4.04	182.11
S	3.95	181.87
T	3.87	181.62
U	3.79	181.37
V	3.71	181.13
W	3.63	180.88
X	3.55	180.64
Y	3.46	180.39
Z	3.38	180.15
1	3.30	179.90
2	3.22	179.65
3	3.14	179.41
4	3.06	179.16
5	2.98	178.92
6	2.89	178.67
7	2.81	178.42
8	2.73	178.18
9	2.65	177.93
10	2.57	177.69
11	2.49	177.44
12	2.40	177.20
13	2.32	176.95
14	2.24	176.70

*niveau t.o.v. gootbodem

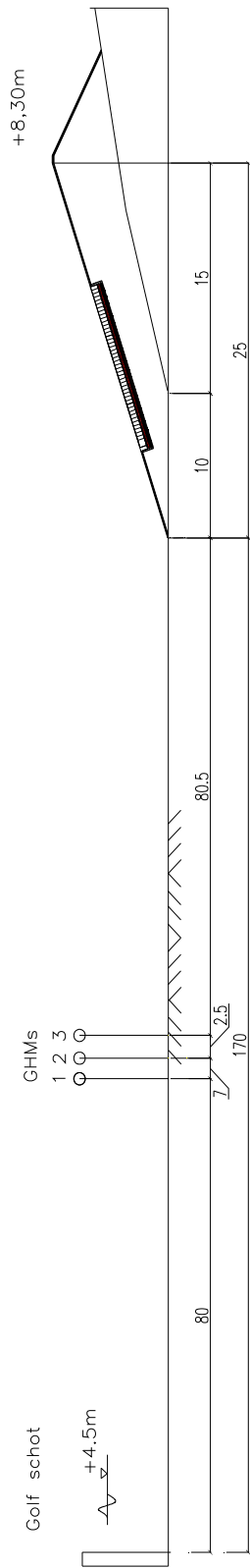
**vanaf golfschot

Tabel A.2 Posities van blokrijen (midden op het blok)

B Figuren

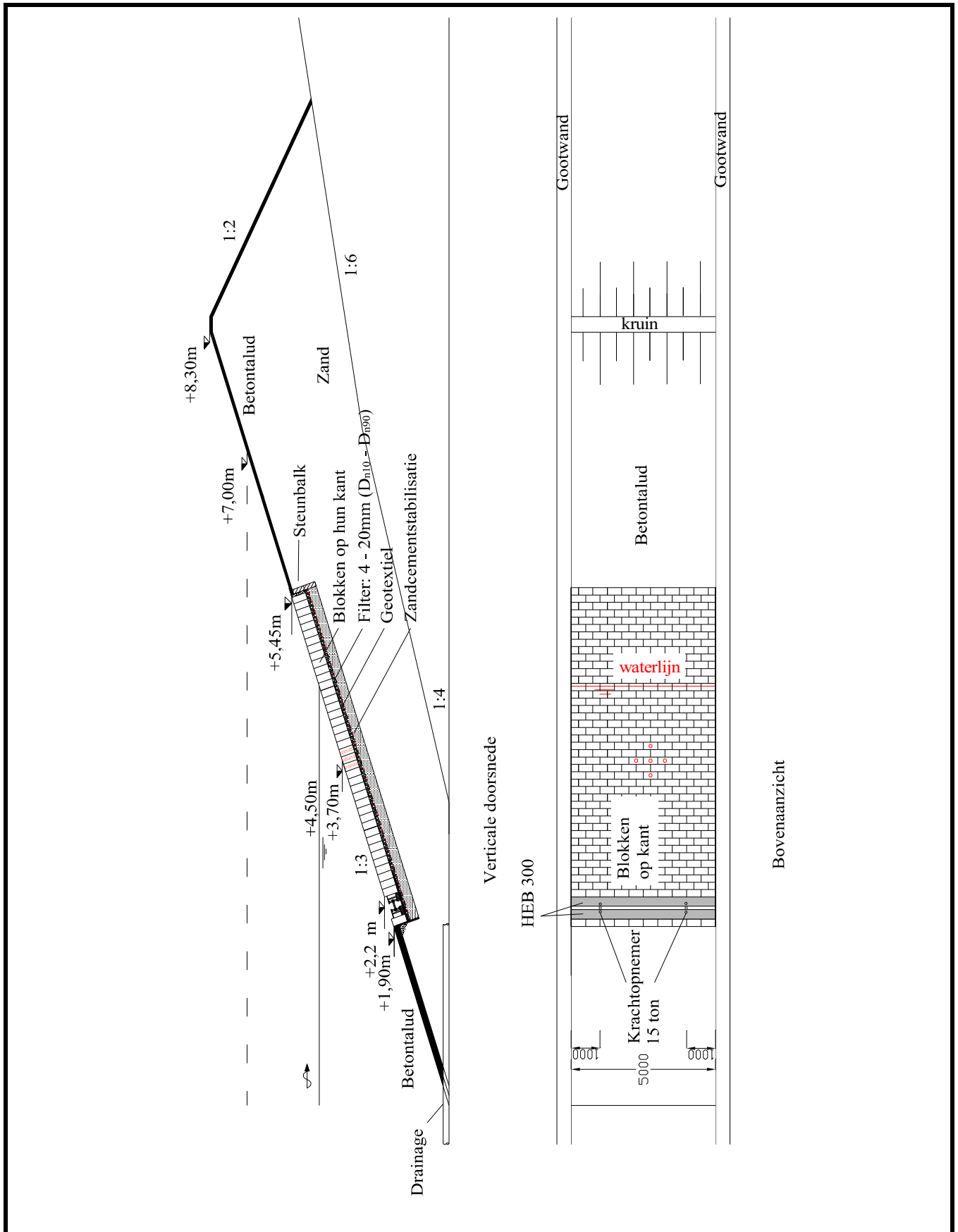
DIJK MODEL

Breedte van test sectie: 5m

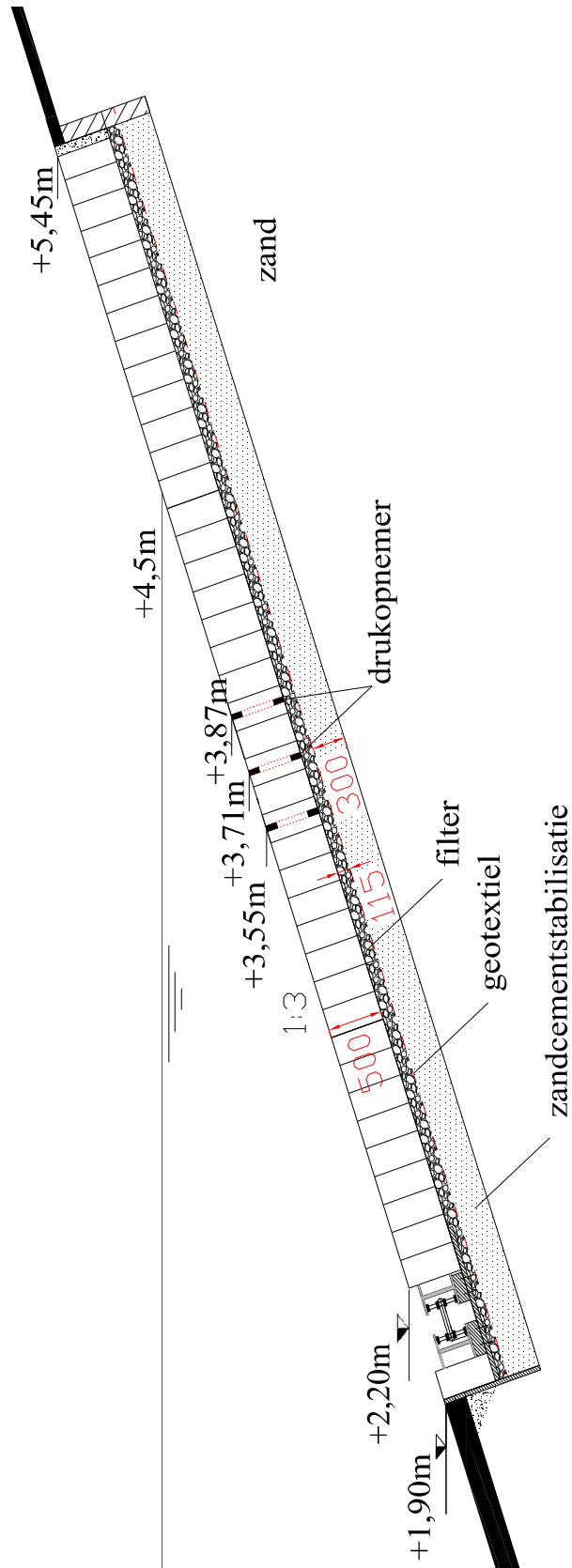


Deltagootproeven met blokken op hun kant

Posities van golfhoogtemeters (GHMs)

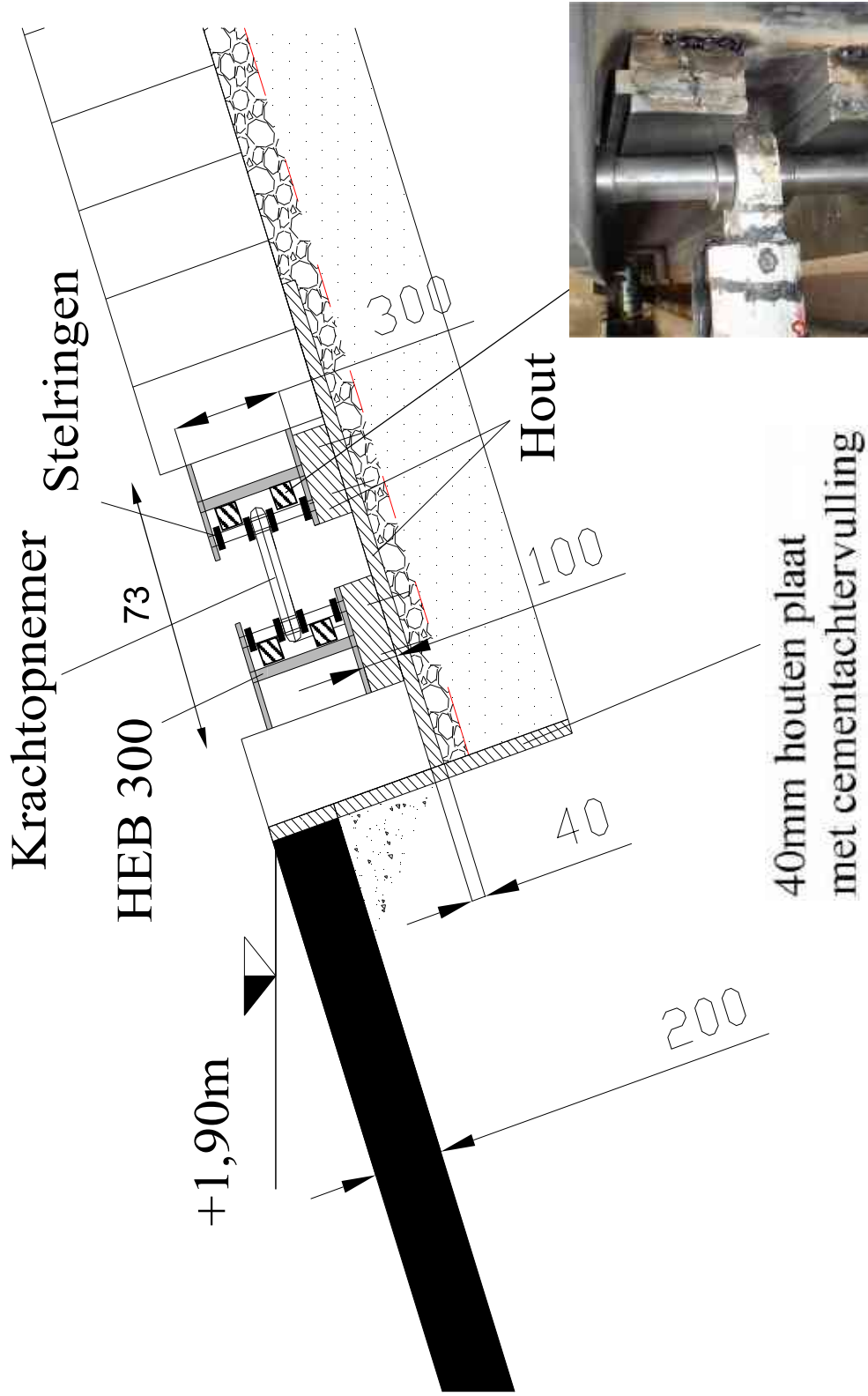


Deltagootproeven met blokken op hun kant		
Opzet in de Deltagoot (Langsdoorsnede en bovenaanzicht)		
WL Delft Hydraulics	H4941	Fig. B.2



Deltagootproeven met blokken op hun kant

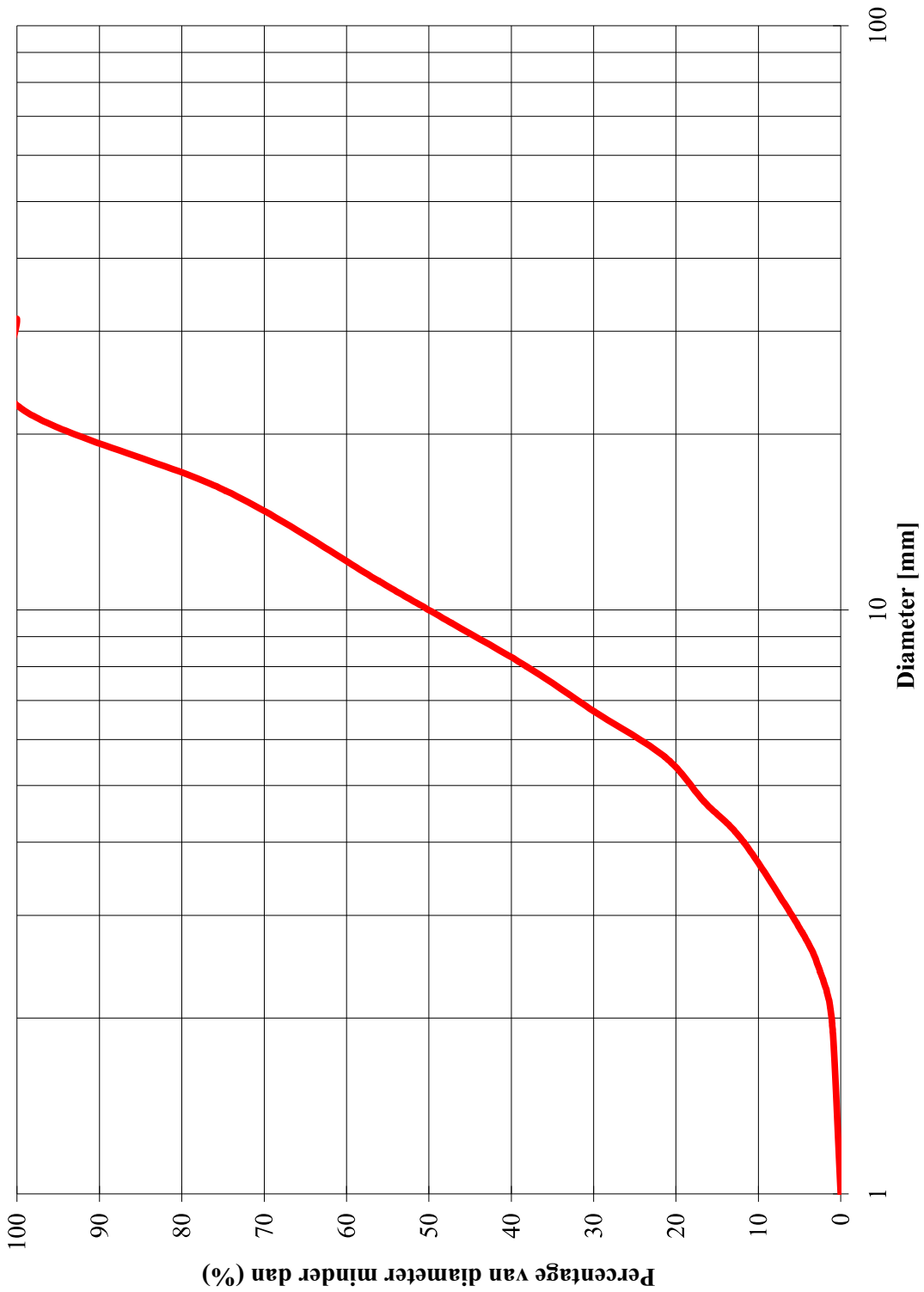
Opzet in de Deltagoot (Detaildoorsnede)



ondersteuning van staaf door krachtopnemer

<p>Deltagootproeven met blokken op hun kant</p>		
<p>Detailtekening krachtopnemers</p>		
<p>WL Delft Hydraulics</p>	<p>H494I</p>	<p>Fig. B.4</p>

Korrelverdeling volgens NEN5104



Deltagootproeven met blokken op hun kant

Zeefkromme