

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,
Directie Zeeland (PBZ)



Langeduursterkte van steenzettingen

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

november 2005

H4475

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

RWS Directie Zeeland, Projectbureau
Zeeweringen

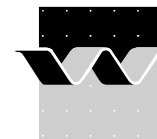
Langeduursterkte van steenzettingen

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

ir M. Klein Breteler en ir W.D. Eysink

Verslag Deltagootonderzoek

november 2005



OPDRACHTGEVER:	Projectbureau Zeeweringen van de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat				
TITEL:	Langeduursterkte van steenzettingen				
SAMENVATTING:	<p>Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van de invloed van de belastingduur op de bezwijkbelasting van verschillende typen steenzettingen, op basis van grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot van WL. In het onderhavige onderzoek zijn vier type steenzetting op een talud van 1:3,5 onderzocht, namelijk:</p> <ul style="list-style-type: none">• Basalton (D = 20 cm; $\Delta = 1,827$; b = 12 cm; $D_{f15} = 22$ mm)• Basalt (D = 20 cm; $\Delta = 1,955$; b = 12 cm; $D_{f15} = 22$ mm)• Blokken op hun kant (D = 20 cm; $\Delta = 1,317$; b = 5 cm; $D_{f15} = 7$ mm)• Hydroblocks:<ul style="list-style-type: none">– 15 cm dik: D = 15 cm; $\Delta = 1,426$; b = 12 cm; $D_{f15} = 22$ mm– 20 cm dik: D = 20 cm; $\Delta = 1,359$; b = 12 cm; $D_{f15} = 22$ mm <p>Het onderzoek heeft geleid tot een eerste aanzet tot de kwantificering van de invloed van de belastingduur voor deze steenzettingtypen, die in een later stadium verder onderbouwd kan worden op basis van onder andere de resultaten van het onderzoek naar de invloed van klemming op de stabiliteit van steenzettingen. De thans afgeleide formules kunnen al wel gebruikt worden voor het bepalen van een schatting van de invloed van de belastingduur op de stabiliteit. Het is gebleken dat deze invloed vooral groot is voor blokken op hun kant, maar betrekkelijk klein is voor de andere onderzochte typen.</p>				
REFERENTIES:	Contract ZLA 5862 Projectleider PBZ: Y. Provoost Projectbegeleider DWW: R. 't Hart				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
0	M. Klein Breteler	2 mei '05		I. Wenneker	G.M. Toms
1	M. Klein Breteler	31 mei 2005		I. Wenneker	W.M.K. Tilmans
2	M. Klein Breteler	17 november 2005		I. Wenneker	W.M.K. Tilmans
PROJECTNUMMER:	H4475				
TREFWOORDEN:	Steenzettingen, belastingduur, uitspoeling van inwasmateriaal				
AANTAL BLADZIJDEN:	160				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA, tot		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Inhoud

Lijst van tabellen

Lijst van Figuren

Symbolenlijst

1	Inleiding	1
2	Modelontwerp en bouw	3
2.1	Testsectie.....	4
2.2	Meetsysteem	7
3	Uitgevoerde proeven	9
3.1	Achtergrond van geplande proevenprogramma.....	9
3.2	Langeduurproef Basalton.....	13
3.3	Langeduurproeven basalt.....	15
3.4	Langeduurproef met blokken op hun kant.....	17
3.5	Langeduurproef met Hydroblocks	21
4	Analyse van de resultaten.....	33
4.1	Grootschalige vervorming	34
4.2	Uitspoeling van inwasmateriaal.....	37
4.3	Lokale vervorming en schade	38
4.4	Belasting	45
4.4.1	Extreme golven.....	45
4.4.2	Sommatie van belastingduren met verschillende golfcondities.....	46
4.4.3	Invloed van toenemende hoogte van de waterstand	47
4.4.4	Golfcondities vlak voor het moment van schade.....	48
4.5	Kwantificering van de toenemende belasting en de afnemende sterkte	49

4.5.1	Inleiding	49
4.5.2	Kwantificering van de invloed op de belasting	50
4.5.3	Kwantificering van de invloed op de sterkte	50
4.5.4	Rekenmethode voor het schatten van de stabiliteit bij langdurige belasting	55
5	Conclusies	59
A	Figuren	A-1
B	Tabellen	B-1
C	Foto's	C-1
D	Resultaten van schade-inspecties	D-1
D.1	Basalton	D-1
D.2	Basalt	D-3
D.3	Blokken op hun kant	D-6
D.4	Hydroblocks van 15 cm dik	D-8
D.5	Hydroblocks van 20 cm dik	D-13
E	Grootschalige vervorming	E-1
E.1	Verticale verplaatsing	E-1
E.2	Verplaatsing langs het talud	E-4
F	Scheefheid van het talud	F-1
G	Zone met grote golfbelasting	G-1
G.1	Inleiding	G-1
G.2	Belastingzone	G-1
G.3	Belastingduur	G-9
G.4	Conclusie	G-11
H	Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen	H-1

Lijst van Tabellen

- 2.1 Resultaten van zeving van filtermateriaal en inwasmateriaal

- 3.1 Uitgevoerde proeven Basaltonbekleding
- 3.2 Uitgevoerde proeven op basaltbekleding
- 3.3 Uitgevoerde proeven op blokken-op-hun-kant
- 3.4 Uitgevoerde proeven op Hydroblocks van 15 cm dik
- 3.5 Uitgevoerde proevenserie op Hydroblocks van 20 cm dik
- 3.6 Resultaten van wrijvingsproeven met Hydroblocks

- 4.1 locatie verzakking, bolling, omhoog bewegende stenen en schade (*berekend met golfhoogte van proef 5251, toen bolling is ontstaan)
- 4.2 resultaten ANAMOS berekeningen met blokken op hun kant.
- 4.3 hoogte van de maximaal belaste zone in vergelijking tot de maximale waterstandsverandering tijdens de proevenseries
- 4.4 resultaat van een voorbeeldberekening.

Lijst van Figuren

- 2.1 Zeefkromme van het filtermateriaal onder Blokken op hun kant
- 2.2 Stalen rooster onderaan de testsectie en echolood (alleen Basalton)

- 3.1 Ontwikkeling van de sterkte als functie van de tijd
- 3.2 Golfbelasting op Basalton
- 3.3 Erosie tot op het geotextiel uit de grote gaten, terwijl in andere openingen nog wel inwasmateriaal aanwezig is.
- 3.4 Schade na proef P4812
- 3.5 Schade na proef P4618
- 3.6 Schade na proef P4120
- 3.7 Schade tijdens proef P4122 na totaal 3,38 uur golven
- 3.8 Golfbelasting op blokken-op-hun-kant tijdens proef P4934
- 3.9 Schade na proef P4934
- 3.10 Toestand steenzetting na 3,5 uur golven (na proef P4141)
- 3.11 Inbouw 15 cm dikke Hydroblocks op 6 à 7 cm dik filter
- 3.12 Schade tijdens proef P5252
- 3.13 Schade tijdens proef P4251
- 3.14 Schade na proef P4252
- 3.15 Schade tijdens proef P4253
- 3.16 Bolling in talud na proef P4256
- 3.17 Schade tijdens proef P4257 van serie 5
- 3.18 Schade langeduurproef op Hydroblocks van 20 cm dik in proef P4860
- 3.19 Proefopstelling wrijvingsproeven met de Hydroblocks
- 3.20 bolling en betonbramen op Hydroblocks
- 3.21 betonbramen en bolling zorgen voor twee contactpunten tussen de blokken
- 3.22 een rij bolle blokken kan vervormen zonder dat de normaalkracht toeneemt, terwijl rechthoekige blokken moeten verschuiven, waardoor ze een extra normaalkracht genereren.

- 4.0 voorbeeld van S-profiel (tijdens serie 1 van blokken op hun kant) (zie ook figuur C6)
- 4.1 bolling in de bekleding na proef 5251 (serie 1 met Hydroblock)
- 4.2 uitspoeling van inwasmateriaal aan halzijde (rechts op de foto), dat zich verzameld aan de meetcabinezijde
- 4.3, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Basalton
- 4.4, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Basalton
- 4.5, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Basalt (Y = blijvende verplaatsing van een steen)
- 4.6, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Basalt

- 4.7, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Blokken op hun kant (Y = blijvende verplaatsing van een steen)
- 4.8, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op blokken op hun kant
- 4.9, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Hydroblocks (Y = blijvende verplaatsing van een steen)
- 4.10, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Hydroblocks
- 4.11, resultaten van de proeven op basalt
- 4.12, resultaten van de proeven op blokken op hun kant
- 4.13, resultaten van de proeven op Hydroblocks (alleen eerste schade op ongebruikte blokken)
- 4.14, resultaten van de proeven op Hydroblocks van 15 cm
- 4.15, resultaten van de proeven op Basalton en trendlijn van Hydroblocks van 20 cm

Symbolenlijst

b	=	dikte van de filterlaag (m)
c	=	coëfficiënt (-)
c_1 en c_2	=	coëfficiënten die afhankelijk zijn van het type bekleding (-)
c_H	=	coëfficiënt voor het bepalen van de maximale golfhoogte (-)
c_{opzet}	=	component van de gradiënt van het waterstandsverloop betreffende de stormopzet op meer dan twee uur voor of na de top van de storm (m/uur)
D_{f15}	=	korrelgrootte van het filter, onderschreden door 15 gewichtsprocenten (m)
D	=	dikte van de top laag (m)
d	=	diepte onder de stilwaterlijn (m)
$d_{\phi dip}$	=	locatie van de maximale gediptheid tijdens de golfklap
f	=	wrijvingscoëfficiënt (-)
f_B	=	invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)
f_S	=	invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)
F	=	$H_s/(\Delta D) \cdot \xi_{op}^{2/3}$ = stabiliteitsparameter (-)
F_{kort}	=	stabiliteitsparameter tijdens begin van schade in een korteduurproef (-)
$F(t)$	=	stabiliteitsparameter tijdens begin van schade in een langeduurproef met duur van t uur (-)
F_{min}	=	stabiliteitsparameter bij begin van schade bij $N = \infty$ (-)
F_{1000}	=	stabiliteitsparameter bij begin van schade bij $N = 1000$ (-)
F_m	=	$\xi_{op}^{2/3} \cdot H_{max}/(\Delta D)$ = Stabiliteitsparameter bij begin van schade (-)
F_{m1000}	=	Stabiliteitsparameter bij begin van schade bij $N = 1000$, gebaseerd op H_{max} (-)
F_{mN}	=	$\xi_{op}^{2/3} \cdot H_{max}/(\Delta D)$ = stabiliteitsparameter gebaseerd op de maximale golfhoogte tijdens een belasting met N golven (-)
F_N	=	$\xi_{op}^{2/3} \cdot H_s/(\Delta D)$ = stabiliteitsparameter gebaseerd op de significante golfhoogte tijdens een belasting met N golven (-)
h	=	waterdiepte (m)
H_s	=	significante golfhoogte (op basis van energie) (m)
H_{sA}	=	maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS echter zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel (m)
$H_{1/3}$	=	significante golfhoogte, berekend als gemiddelde golfhoogte van hoogste eenderde deel van de golven (m)
H_{m0}	=	significante golfhoogte, berekend op basis van energie inhoud (m)
$H_{x\%}$	=	golfhoogte die door $x\%$ van de golven overschreden wordt (m)
H_m	=	gemiddelde golfhoogte (m)
H_{rms}	=	root-mean-square golfhoogte (m)
H_{max}	=	grootte van de grootste golf (m)
H_{max-1}	=	grootte van de een na de grootste golf (m)
H_{max-2}	=	grootte van de 2 na de grootste golf (m)
$H_{max,p}$	=	maximale golfhoogte in N golven, met een overschrijdingsfrequentie van p (-)
H_{max}	=	verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte (m)
$\widetilde{H}_1, \widetilde{H}_2$	=	dimensieloze golfhoogteparameters (-)
\widetilde{H}_{tr}	=	dimensieloze golfhoogteparameter betreffende de grens tussen het steile deel van de golfhoogte overschrijdingskromme en het flauwe deel (-)
H_1, H_2	=	golfhoogteparameter (m)
k	=	doorlatendheid van de filterlaag (m/s)

k'	=	doorlatendheid van de toplaag (m/s)
p	=	overschrijdingskans (-)
P_{toets}	=	toetspeil (m)
N	=	aantal golven ($= t/T_m \approx 1,1 \cdot t/T_p$) (-)
R_{getij}	=	getijrange (waterstandsverschil tussen GLW en GHW) (m)
S_{op}	=	golfsteilheid = $H_s/(1,56T_p^2)$ (-)
t	=	proefduur (uur)
t	=	tijd (s)
t	=	duur van de belasting (s)
t_{storm}	=	stormduur (uur)
$t_{\text{belasting}}$	=	belastingduur ter plaatse van een te toetsen lokatie (uur)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
T_m	=	gemiddelde golfperiode (s)
T_{pD}	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode (s)
Y	=	verplaatsing van een steen haaks op het toplaagoppervlak (m)
z	=	niveau t.o.v. de gootbodem (m)
$Z_{\text{belasting}}$	=	hoogte van de belastingzone op het talud (verticaal gemeten) die een gelijke totale erosie oplevert bij een belastingniveau gelijk aan de maximale (m)
α	=	taludhelling ($^\circ$)
α_{bodem}	=	bodemhelling voor de constructie ($^\circ$)
Δ	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
φ	=	wrijvingshoek (-)
ρ_s	=	soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)
ρ	=	soortelijke massa van water (kg/m^3)
ξ_{op}	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter (-)
Λ	=	leklengte (m)

I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten.

In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft het voorliggende verslag betrekking op het deelonderzoek 1.2 “Invloed van stagnant peil op sterkte van steenzettingen, Deltagootonderzoek”.

Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen in de Deltagoot is weergegeven in bijlage H.

Het onderzoek is er op gericht het bezwijkgedrag van steenbekledingen onder langdurige golfaanval te kunnen vergelijken met het gedrag onder kortdurende golfaanval. Reeds aan het begin van het onderzoek is vastgesteld dat het daarbij beter is om niet met een stagnant waterpeil te werken, maar met een in kleine stappen oplopende waterstand (zie paragraaf 3.1).

Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van de invloed van de belastingduur op de bezwijkbelasting van verschillende typen steenzettingen. Als middel om dat doel te bereiken is getracht zoveel mogelijk inzicht te verkrijgen in de relevante processen aan de hand van de waarnemingen tijdens de Deltagootproeven, maar het onderzoek richt zich niet op het verkrijgen van een sluitende theoretische achtergrond voor elke geconstateerde tendens.

De proeven in de Deltagoot zijn uitgevoerd met steenzettingen die thans in de praktijk het meest gebruikt worden. Om binnen de mogelijkheden van de Deltagoot schade te krijgen, zijn wel relatief dunne bekledingen toegepast, namelijk:

1. Basalton met een dikte van 20 cm en een soortelijke massa van 2827 kg/m^3 op een 12 cm dikke filterlaag met $D_{f15} = 22 \text{ mm}$.
2. Basalt met een dikte van 20 cm en een soortelijke massa van 2955 kg/m^3 op een 12 cm dikke filterlaag met $D_{f15} = 22 \text{ mm}$.
3. Betonblokken van $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ op hun kant met een toplaagdikte van 20 cm en een soortelijke massa van 2317 kg/m^3 op een filterlaag van 5 cm dik met een korrelgrootte van 7 mm (gelijk aan serie 12a uit 1998; Smith e.a. 2000).
4. Hydroblocks met een dikte van 15 cm en een soortelijke massa van 2426 kg/m^3 op een 6 à 7 cm dikke filterlaag met $D_{f15} = 22 \text{ mm}$. Lopende het onderzoek is deze serie uitgebreid met een vijfde steenzetting:
5. Hydroblocks met een dikte van 20 cm en een soortelijke massa van 2359 kg/m^3 op een 10 cm dikke filterlaag met $D_{f15} = 22 \text{ mm}$ (aansluitend bij proeven uit 1998; Leeuwestein, 1998).

De eerstgenoemde steenzetting wordt weliswaar steeds minder toegepast, maar omdat het bij aanvang van het onderzoek al was ingebouwd in de Deltagoot, was het relatief eenvoudig hierop een langeduurproef uit te voeren.

Gegevens van het bezwijkgedrag onder kortdurende golfaanval kunnen worden verkregen uit reeds eerder uitgevoerd onderzoek, behalve voor de opstelling met Hydroblocks. Om het onderzoek niet onnodig omvangrijk te maken, kregen de nieuwe proeven dan ook zoveel mogelijk een modelopstelling die reeds eerder in de Deltagoot was beproefd. Alleen voor de opstelling met Hydroblocks van 15 cm dik was het noodzakelijk ook een korteduurproef te doen.

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler en ir. W.D. Eysink. Het onderzoek werd namens de opdrachtgever begeleid door ir. R. 't Hart van de DWW van RWS.

2 Modelontwerp en bouw

In 2003 is onderzoek naar de stabiliteit van basalt en Basalton uitgevoerd op een dijktalud zonder berm (Eysink en Klein Breteler, 2003). Voor het onderzoek in 2003 was gekozen voor een taludhelling van 1:3,5. Het huidige onderzoek is een uitbreiding van het voorgaande onderzoek. De sterkte van dezelfde steenzettingen is nu onderzocht onder een langdurige, extreme golfbelasting. Daarnaast zijn ook steenzettingen van betonblokken van 20x20x10 cm op hun kant en van Hydroblocks van 15 cm en 20 cm dik langdurig beproefd. Een overzicht van de modelopstelling is gegeven in figuur 1 in bijlage A. In de figuur is te zien dat de teen van het talud is gemaakt op 171,00 m afstand van het golfschot.

Mede in verband met de beperkte hoogte van de zijschotten op de gootrand moest bij het ontwerp van het model een compromis worden gesloten tussen een minimum waterstand in de goot om vervorming van de hoge golven door bodemwrijving klein te houden, de maximum golfhoogte die moest worden gegenereerd en een verwerkbaar golfoverslag onder extreme golfcondities. Er is gekozen voor een waterstand van 4 à 5 m boven de gootbodem. Dat heeft geleid tot een benodigde kruinhoogte van 8,75 m boven de gootbodem. De overslag die dan incidenteel nog kan plaatsvinden, kan in een reservoir achter de kruin van het talud worden opgevangen en via drie buizen met een diameter van 20 cm onder vrij verval terugstromen naar de goot. Tijdens alle proeven bleken deze buizen ruim voldoende te zijn om het overslagdebiet weer terug te voeren naar de goot.

De dijk is opgebouwd door in lagen zand aan te brengen op een bestaand golfdempend talud en deze per laag te verdichten. Het deel van het talud dat niet door brekende golven wordt belast, is afgewerkt met beton. Dit beton had bij de teen tot een hoogte van 2 m boven de gootbodem een dikte van 15 cm en in de golfploopzone een dikte van 10 cm.

Om te voorkomen dat de betonlaag aan de teen wordt opgedrukt tijdens het leegpompen van de goot, is een grinddrain met twee drainagebuizen aangebracht en is de teen van de betonplaat opgesloten met hoekijzers. Het deel tussen 2 m en 6 m boven de gootbodem aan de gootzijde is de testsectie waar de te beproeven steenzetting is aangebracht.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de dijk in de Deltagoot niet helemaal haaks op de gootas is aangelegd, zie bijlage F. De golven komen daarom niet helemaal loodrecht op het talud aan, maar met een kleine hoek van orde 1° .

Vele video-opnamen van de brekende golven op het talud zijn tot in detail bestudeerd door ze vertraagd af te spelen en te kijken of de golfklap aan de ene zijde eerder op het talud komt dan aan de andere zijde. Er is geconcludeerd dat geen systematisch verschil kan worden vastgesteld, hetgeen ook niet verwacht werd, gezien de geringe scheefheid van het talud. De golfklap komt net zo vaak aan de ene zijde eerder op het talud als aan de andere zijde, en komt vaak aan beide zijden tegelijk neer.

De scheefheid zou de oorzaak kunnen zijn van het feit dat aan de halzijde het inwasmateriaal wat sneller uitspoelde dan aan de meetcabinezijde, en soms ook aan de meetcabinezijde zich onder de golfaanvalszone ophoopte. Voor de stabiliteit van basalt en Basalton had dit geringe consequenties, omdat ook aan de halzijde nog steeds vrij veel inwasmateriaal in de spleten bleef zitten. Wellicht heeft dit wel de stabiliteit van de Hydroblocks beïnvloed, omdat in deze bekleding aan de halzijde vrijwel geen

inwasmateriaal overbleef en juist daar steeds de schade ontstond. De in dit onderzoek gemeten sterkte zal daarom voor Hydroblocks waarschijnlijk meer overeenkomen met de sterkte nabij een verticale overgangsconstructie of nabij een bocht in de dijk.

Gezien het feit dat in de praktijk de golven ook nooit loodrecht op de dijk aankomen en in de analyse de relatieve invloed van de duur van de belasting geïsoleerd is, heeft dit geen invloed op de waarde van dit onderzoek.

2.1 Testsectie

In de golfaanvalszone, namelijk tussen 2 m en 6 m boven de gootbodem, is het zandtalud bedekt met een 50 cm dikke laag zandcementstabilisatie (zie figuur 1 in bijlage A). Dit voorkomt dat er grondmechanische instabiliteit ontstaat tijdens de proeven en het representeert de kleilaag die in de praktijk wordt toegepast.

Tussen bekleding en gootwand is steeds rubber toegepast om te voorkomen dat de bekleding op gespannen komt te staan tussen de starre gootwanden.

Basalton en basalt

Voor de eerste twee proevenseries met Basalton en basalt is op de zandcementstabilisatie een geotextiel aangebracht met daarop een filterlaag van 12 cm dik, bestaande uit gebroken graniet met korrelgrootte van 20 tot 40 mm ($D_{f15} = 22$ mm = korrelgrootte die door 15 gewichtsprocenten onderschreden wordt). De basalt- en de Basaltonzettingen zijn in 2003 ingewassen met gebroken graniet met korrelgrootte van 5 tot 30 mm ($D_{f15} = 7,5$ mm).

Voor de bouw van deze steenzettingen zijn dezelfde Basaltonzuilen en basaltzuilen gebruikt als zijn getest in het vorige onderzoek (Eysink en Klein Breteler, 2003). Alle basaltzuilen waren geselecteerd op een hoogte tussen 18 en 22 cm. Uit controle op 21 aselekt gekozen zuilen bleek toen dat de hoogte van de zuiltjes in het algemeen binnen de range van 19 – 21 cm viel met een gemiddelde hoogte van 20 cm. De basalt had ook relatief kleine kopafmetingen. Door 21 stuks te meten is vastgesteld dat 20% groter is dan ongeveer 23x23 cm en dat 25% kleiner is dan ongeveer 16x16 cm. De gemiddelde maat was ongeveer 19x20 cm.

Ook de Basalton uit 2003 en 2004 was speciaal geselecteerd: de grootste zuilen waren weggelaten. De kopafmetingen waren 20x25 tot 25x30 cm, met een gemiddelde van ongeveer 23 x 26 cm. De Basalton had mooie rechte zijkanten (niet bol), maar was iets taps, namelijk ca 1 mm (van boven iets smaller dan van onderen).

De Basalton en basalt zijn door professionele steenzetters aangebracht.

Blokken op hun kant

Na het testen van de Basalton- en de basaltbekleding is een bekleding van betonblokken van 20x20x10 cm op hun kant in de testsectie aangebracht op een 5 cm dikke filterlaag met korrelgrootte van 5 tot 12 mm ($D_{f15} = 6,5$ mm). De blokken zijn in halfsteensverband koud tegen elkaar geplaatst zonder inwasmateriaal. Er is getracht deze steenzetting precies gelijk te maken aan die uit 1998 (Smith, Wouters en Klein Breteler, 2000).

Langs beide gootwanden is rubber met een dikte van 4,8 cm (per wand) toegepast met een elasticiteitsmodules $E \approx 3,6$ MPa.

Net als in 1998 ontstond het probleem dat de blokjes ongeveer 10 cm dik zijn, maar dat deze maat een vrij grote variatie vertoont, namelijk tussen 9,5 en 10,5 cm. Teneinde de steenzetting er netjes in te krijgen, zijn alle blokjes opgemeten en zijn steeds de blokjes met een ongeveer gelijke dikte in een rij toegepast.

De steenzetting is passend tussen de rubberen randen langs de gootwand ingebouwd. Er is daarbij een rij blokjes geplaatst en is gemeten hoe breed het laatste blokje zou moeten zijn. Dat blokje is vervolgens op maat gezaagd en kon er vervolgens vrijwel nooit in geschoven worden omdat het rubber erg stroef is. Dan is het één na het laatste blokje verwijderd, vervolgens is het halve blokje tegen het rubber geplaatst en daarna is het één na het laatste blokje er tussen gezet. Meestal moest die even aangestampt worden met de voeten.

Er is een klein verschil tussen de huidige opstelling en die van 1998. Toen zijn in de golfaanvalzone acht rijen voorzien van wartelblokken, waarmee een kleine voorspanning in de rij gemaakt is (dwars op de gootas).

De spleetbreedte is rondom 10 blokken opgemeten, hetgeen een gemiddelde heeft opgeleverd van $s = 0,42$ mm (met een grote spreiding). Door de bijdrage van de hoekpunten zal de werkelijke spleetbreedte iets groter zijn, $s \approx 0,4$ à $0,7$ mm. Tijdens het onderzoek in de Deltagoot van 1998 zijn ook de spleetbreedtes gemeten. Toen was het gemiddelde iets groter: $s \approx 0,8$ mm ($0,5$ à $1,0$ mm).

De rechthoekige blokjes zijn toegepast tussen een niveau van +2,6 m boven de gootbodem tot +5,0 m. Omdat er niet voldoende rechthoekige blokjes waren, zijn daaronder en daarboven blokjes met een ‘Haringmankuiltje’ toegepast. De schade is echter steeds opgetreden in de zone tussen +3,0 m en +4,5 m.

De soortelijke massa van de blokjes was 2317 kg/m^3 .

Hydroblocks

Na de langeduurproeven met de blokken op hun kant is een steenzetting van 15 cm dikke Hydroblocks met een gemiddelde dichtheid van 2426 kg/m^3 in de testsectie aangebracht op een filterlaag van 6 à 7 cm dik en langdurig beproefd. De dikte van de filterlaag is na de bouw op zes plaatsen gecontroleerd en bleek te variëren tussen 6,2 cm en 7,3 cm, met als gemiddelde 6,9 cm. De filterlaag bestond uit gebroken graniet met korrelgrootte van 20 – 40 mm. Na het inbouwen werd de steenzetting ingewassen met gebroken graniet van 5 – 30 mm en aangetrild. Ook de Hydroblocks waren, zoals gebruikelijk, aan de zijkanten van de goot opgesloten in rubberstrips (met dikte van 2,7 cm en hoogte van 15 cm) en geborgd met hoekijzers.

De Hydroblocks waren wat taps, maar ook iets bol aan de zijkant (ca. 1 mm).

Nadat deze steenzetting een aantal keren was beproefd en relatief snel was bezwaken, is besloten om deze voor de laatste duurproef te vervangen door een steenzetting van Hydroblocks van 20 cm dik op een filterlaag van 10 cm met hetzelfde filter- en inwasmateriaal. De gemiddelde dichtheid van deze blokken was 2359 kg/m^3 . Ook was besloten om de blokken vanaf de halzijde in te bouwen met de sluitsteen aan de zijde van de meetcabine. Ook de blokken waren 180° gedraaid.

Tijdens het inbouwen is de dikte van de filterlaag op 11 plaatsen gecontroleerd en deze bleek te variëren tussen 8,6 cm en 10,9 cm, met gemiddelde van 9,7 cm.

Filter- en inwasmateriaal

De steenzettingen met basalt, Basalton en Hydroblock waren alle drie uitgevoerd met hetzelfde type filtermateriaal en inwasmateriaal. Tijdens het onderzoek zijn verschillende malen monsters genomen uit de voorraad materiaal. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.1.

materiaal	datum monstername	D ₁₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
filter	25-11-'03	20,4	22,0	28,5	32,1
filter	2-9-'04	20,7	22,0	28,2	36,9
filter	3-1-'05	22,6	24,0	30,7	37,6
filter	21-1-'05	20,4	21,9	28,6	38,7
inwas	25-11-'03	6,6	7,6	12,5	27,7
inwas	2-9-'04	7,6	9,0	16,4	29,4
inwas	3-1-'05	5,8	6,7	12,8	30,7
inwas	21-1-'05	6,9	8,2	15,0	29,6

Tabel 2.1, Resultaten van zieving van filtermateriaal en inwasmateriaal (D_x = korrelgrootte die door x procent op basis van gewicht wordt onderschreden) (zie ook figuur 12 en 13 in bijlage A)

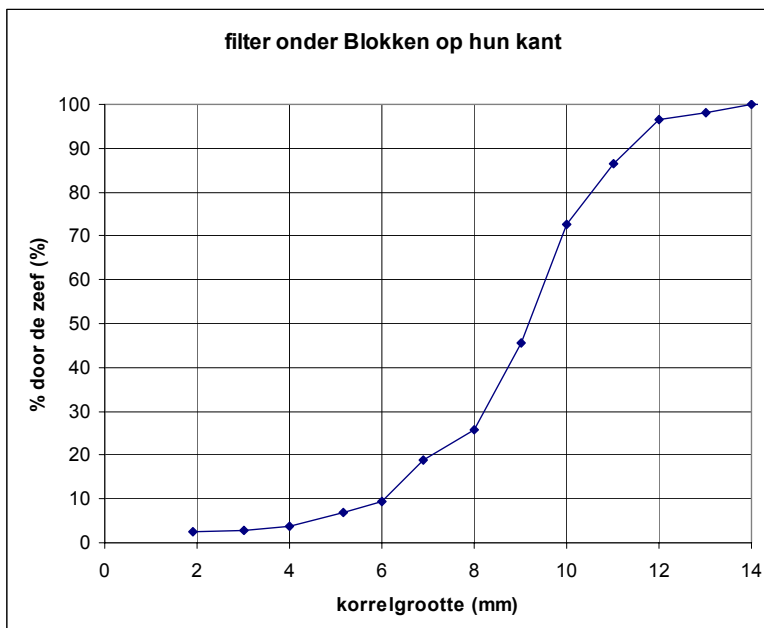


Fig. 2.1 Zeefkromme van het filtermateriaal onder blokken op hun kant

Gezien het feit dat doorgaans monsters van beperkte omvang (ca 10 kilo) zijn onderzocht, is enige variatie van de korrelgrootte normaal. Het laatste monster was extra groot (21-1-'05: ca. 25 kg) waardoor dat een wat hogere betrouwbaarheid heeft.

Verder is het onvermijdelijk dat de voorraad materiaal niet perfect homogeen is. Vooral de D_{50} van het inwasmateriaal varieert zo sterk dat dit een gevolg moet zijn geweest van de inhomogeniteit van de voorraad. De variatie is echter niet zodanig groot dat dit de resultaten van de proeven zal hebben beïnvloed.

Het filter onder de blokken op hun kant bestond uit gebroken graniet van 5 – 12 mm met $D_{15} = 6,5$ mm (zie Fig. 2.1).

2.2 Meetsysteem

Het onderzoek richtte zich op het vaststellen van het tijdstip waarop de steenbekleding bij de gegeven golfbelasting bezwijkt. De golfdruk op het talud en de druk in het filter als gevolg van de golfaanval werden niet meer gemeten, omdat het voorgaande onderzoek voldoende informatie op dat gebied geeft.

In de goot werden drie golfhoogtemeters gebruikt om de werkelijke golfcondities in de goot te meten en te analyseren. De golfhoogtemeters zijn op een onderlinge afstand in de goot geplaatst die afhankelijk is van de golflengte. De locatie van de golfhoogtemeters is steeds vastgelegd in de SEQ-file van de metingen.

Tijdens het golven was er continu iemand aanwezig om te zien of er schade optrad.

Om ook te kunnen vaststellen of er op een lager niveau een steen uitgeslagen was, is tijdens het testen van de Basaltonzetting aan de teen van de testsectie een echolood op een van de zijwanden van de goot geplaatst samen met een stalen rooster van betonijzer. Het rooster met een maaswijdte van 10 cm had een hoogte van 40 cm (zie foto in fig. 2.2). Het echolood “keek” vlak voor het rooster langs naar de gootwand aan de overzijde. Als er een steen van het talud tegen het rooster zou rollen, dan kon dit op een display bij de waarnemer worden afgelezen. De werking is voor aanvang van de proeven getest en het bleek te werken. Controleberekeningen naar het energieverlies door het rooster toonden aan dat het rooster de resultaten van het onderzoek niet zouden beïnvloeden.

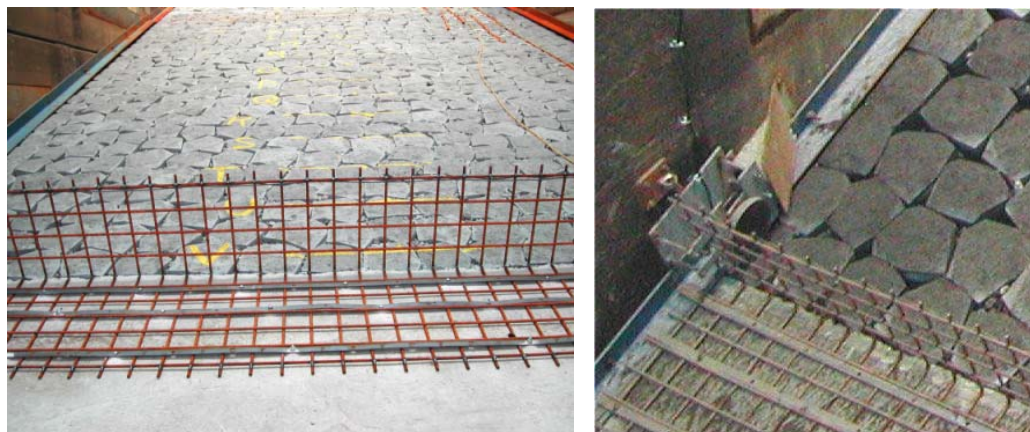


Fig. 2.2 Stalen rooster onderaan de testsectie en echolood (alleen Basalton)

Tijdens de proeven bleek echter dat in de buurt van het echolood het inwas- en filtermateriaal volledig werd uitgespoeld van $z = 2,00$ m tot $z = 2,50$ m (ruim onder de

golfaanvalszone) als gevolg van de lokaal opgewekte turbulentie (zie figuur 3.3). Dit heeft bij de Basalton daar niet geleid tot het bezwijken van de steenbekleding, enerzijds omdat er toch nog spleten waren met inwasmateriaal en anderzijds omdat de hydraulische belasting in deze zone niet zo groot is. Het modeleffect van het echolood werd echter te gevaarlijk geacht en daarom is het stalen net met het echolood niet meer toegepast bij het testen van de andere steenzettingen.

Het is overigens denkbaar dat ook uitstekende perkoenpalen, afrasteringen en andere objecten op de dijken in de praktijk het uitspoelen van het inwasmateriaal kunnen bespoedigen.

Verder is op gezette tijden de waterstand verlaagd om eventuele schade visueel vast te stellen. Bij die gelegenheden zijn ook een aantal gemerkte punten op het talud, die in het vorige onderzoek ook zijn gemonitord, nauwkeurig ingemeten. De gemerkte stenen (met een schroef en gele verf) lagen op het zwaarst belaste deel van het talud, verdeeld over vier raaien langs het talud. Op deze wijze kon op betrouwbare wijze worden nagegaan of er ook vervorming van de steenzetting optrad.

De resultaten van het monitoren van de gemerkte stenen zijn gegeven in Bijlage E.

De belangrijkste bevindingen van de verschillende inspecties van het talud en van de schaderapporten zijn gegeven in Bijlage D

3 Uitgevoerde proeven

3.1 Achtergrond van geplande proevenprogramma

Het proevenprogramma is gebaseerd op de ingeschatte waterstandsvariaties in Nederland tijdens toetsomstandigheden en een schatting van de mate waarin de langeduursterkte afwijkt van de korteduursterkte. In deze paragraaf wordt dit nader toegelicht.

Belastingduur

Ten einde goed inzicht te krijgen in de invloed van de belastingduur op de stabiliteit voor de hele range aan belastingduren die in de praktijk voorkomen, is het noodzakelijk om proeven met ten minste 3 verschillende belastingniveaus uit te voeren, gericht op (prototypeschaal):

- korte duur: schade na ca. 1 à 3 uur (voor sommige constructies is deze reeds beschikbaar)
- middellange duur: schade na ca. 6 à 12 uur
- zeer lange duur: schade na ca. 20 à 40 uur

Deze belastingduren hebben betrekking op de situatie in de Oosterschelde en IJsselmeer (en de meeste locaties langs de Westerschelde en Waddenzee) bij een maatgevende golfhoogte van ongeveer 1,5 à 2,5 m. In de Deltagoot worden de proeven uitgevoerd met een golfhoogte van 0,7 à 1,5 m, waaruit blijkt dat er een schaalfactor van ca $n_L = 1,0$ à 2,5 gehanteerd is ($n_L =$ lengteschaal). De proeven met blokken op hun kant zijn gezien hun afmetingen uitgevoerd op schaal 2,5.

Voor de tijdschaal geldt $n_t = \sqrt[3]{n_L}$, waardoor de proeven in de Deltagoot ongeveer 10 à 35% korter duren dan overeenkomstige belastingen in de Oosterschelde en IJsselmeer:

- korte duur: schade na ca. 1 à 2 uur op Deltagootschaal
- middellange duur: schade na ca. 4 à 10 uur op Deltagootschaal
- zeer lange duur: schade na ca. 14 à 35 uur op Deltagootschaal

In de Deltagoot zijn verschaalde steenzettingen toegepast, waarbij de schaal was afgestemd op de mogelijke golfcondities en de beschikbaarheid van materiaal.

In het huidige onderzoek is de proefduur gedefinieerd vanaf het tijdstip dat de computer is aangezet voor het bemonsteren van de golfhoogtemeters (dit is het tijdstip waarop de eerste golven tussen de golfhoogtemeters en de constructie lopen) tot het moment dat er geen golven meer gegenereerd worden, of het moment dat er schade is opgetreden. De werkelijke duur dat er golven op het talud zijn gekomen kan orde 10 s langer zijn en dat is verwaarloosbaar op de totale proefduur. Als de proefduur wordt weergegeven in een aantal golven, dan is dat het quotiënt van de proefduur en de gemiddelde inkomende golfperiode. Dit aantal is doorgaans ca 2% groter dan het aantal inkomende golven dat door de verwerkingsoftware is bepaald.

Voor het berekenen van de belastingduur op basis van het waterstandsverloop en de grootte van het de belastingzone wordt verwezen naar hoofdstuk G.3 in bijlage G.

Waterstandsverloop in de tijd

Voor het uitvoeren van korteduurproeven was het altijd vanzelfsprekend om de proeven uit te voeren met een constante waterstand. Nu de proeven uitgevoerd worden met een lange tot zeer lange duur, was het verstandig opnieuw stil te staan bij de keuze van het waterstandsscenario. In Nederland kan de waterstand als volgt onder maatgevende omstandigheden veranderen (maxima op prototypeschaal):

- Grote getijslag in combinatie met groeiende stormopzet (Westerschelde): ca 1 à 1,5 m/uur
- Kleine getijslag (Waddenzee): ca 0,4 à 0,8 m/uur
- Geen getij in combinatie met grote stormopzet (IJsselmeer): 0,1 à 0,2 m/uur
- Geen getij in combinatie met kleine stormopzet (Oosterschelde met gesloten kering): 0 à 0,05 m/uur

Daarnaast kan ook de waterstand gedurende een aantal uren ongeveer constant zijn, waarbij een waterstand ongeveer constant genoemd wordt als de variatie klein is t.o.v. de hoogte van de belastingszone: minder dan ca $0,2H_s \xi_{op}$ ($< 0,2$ à $1,0$ m) (zie Klein Breteler 2004 en bijlage G). In gebieden met een grote getijslag, zoals de Westerschelde, zal dit slechts kort zijn: enkele uren. Op de Oosterschelde kan dit zeer lang zijn: tientallen uren.

De invloed van een verandering van de waterstand tijdens een langeduurproef is nog niet goed bekend, maar er kan gedacht worden aan de volgende aspecten:

- Als de golfbelasting langdurig de gelegenheid heeft om op een smalle strook steenzetting te beuken, is de kans groter dat de klemming losgewerkt wordt en de steenzetting bezwijkt. Daardoor zal een constante waterstand een lagere stabiliteit geven dan een variërende waterstand.
- Bij een bepaalde waterstand zal er een zone zwaar belast worden, die als gevolg daarvan enkele centimeters naar beneden kan schuiven (verdichting van de zetting). Dit heeft in de zone daarboven mogelijk tot gevolg dat de klemming afneemt. Als de waterstand stijgt, zal even later de zone met kleinere klemming zwaar belast worden, waardoor de stabiliteit wat kleiner zal zijn dan bij constante waterstand.
- Bij een veranderende waterstand zal de $\phi_{w2\%}$ (stijghoogteverschil over de toplaag die door 2% van de golven wordt overschreden) op de maximaal belaste locatie kleiner zijn dan bij een constante waterstand. Als deze belasting maatgevend is voor de stabiliteit, zal de stabiliteit bij variërende waterstand hierdoor iets hoger zijn. Als echter het maximale stijghoogteverschil bepalend is voor de stabiliteit, zal dit aspect geen invloed hebben op de stabiliteit.
- Een variërende waterstand zal de golven de gelegenheid geven om een brede strook steenzetting af te tasten op zoek naar de zwakste steen. Hierdoor zal de stabiliteit kleiner zijn bij een variërende waterstand.

Met dit in gedachten is gekozen om de waterstand tijdens de langeduurproeven niet constant te houden.

Helaas is het niet mogelijk om met de huidige golfschotsturing tijdens de proeven de waterstand aan te passen. Daarom is op gezette tijden de waterstand in stappen verhoogd volgens het volgende globale scenario (h = waterstand boven de gootbodembodem):

- 1 uur ingolven met een wat lagere golfhoogte
- $0 < t < 3,5$ uur: h = 4,20 m
- $3,5 < t < 7$ uur: h = 4,40 m
- $7 < t < 14$ uur: h = 4,60 m
- $14 < t < 28$ uur: h = 4,80 m
- $t > 28$ uur: h = 4,80 m of h = 5,00 m

Golfhoogte

De golfcondities tijdens de langeduurproeven moeten iets lager zijn dan die tijdens de korteduurproef schade hebben opgeleverd. Immers: de langeduursterkte is waarschijnlijk lager dan de korteduursterkte. De afname van de sterkte als functie van de belastingduur werd voor de proeven beschreven met de volgende formule (zie par. 4.4 voor een betere formule):

$$F(t) = F_{\text{kort}} - c \cdot \log(t) \quad (3.1)$$

Met:

- F_{kort} = Stabiliteitsparameter tijdens begin van schade in een korteduurproef (-)
- $F(t)$ = Stabiliteitsparameter tijdens begin van schade in een langeduurproef met duur van t uur (-)
- c = coëfficiënt (-)
- t = proefduur in uren

De waarde van de stabiliteitsparameter F is als volgt gedefinieerd:

$$F = H_s / (\Delta D) \cdot \xi_{\text{op}}^{2/3} \quad (3.2)$$

Met:

- F = Stabiliteitsparameter (-)
- H_s = Significante golfhoogte (m)
- Δ = Relatieve soortelijke massa (-)
- D = Dikte van de toplaag (m)
- ξ_{op} = Brekerparameter = $\tan \alpha / \sqrt{s_{\text{op}}}$ (-)
- s_{op} = Golfsteilheid = $H_s / (1,56 T_p^2)$ (-)
- α = Taludhelling ($^\circ$)
- T_p = Golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

Op basis van een langeduurproef uit 1984 (Burger, 1985) was voor de proeven geschat dat de waarde van c ongeveer 1,0 à 1,5 zou kunnen zijn. Met deze schatting is het proevenprogramma verder uitgewerkt, waarbij de belasting zo is gekozen dat er een langeduurproef (ca. 16 à 35 uur op Deltagoetschaal) en een middenlangeduurproef (5 à 10 uur) wordt gerealiseerd.

De significante golfhoogte, die in dit verslag is aangeduid met H_s , is bepaald aan de hand van de energie-inhoud en is dus gelijk aan H_{m0} .

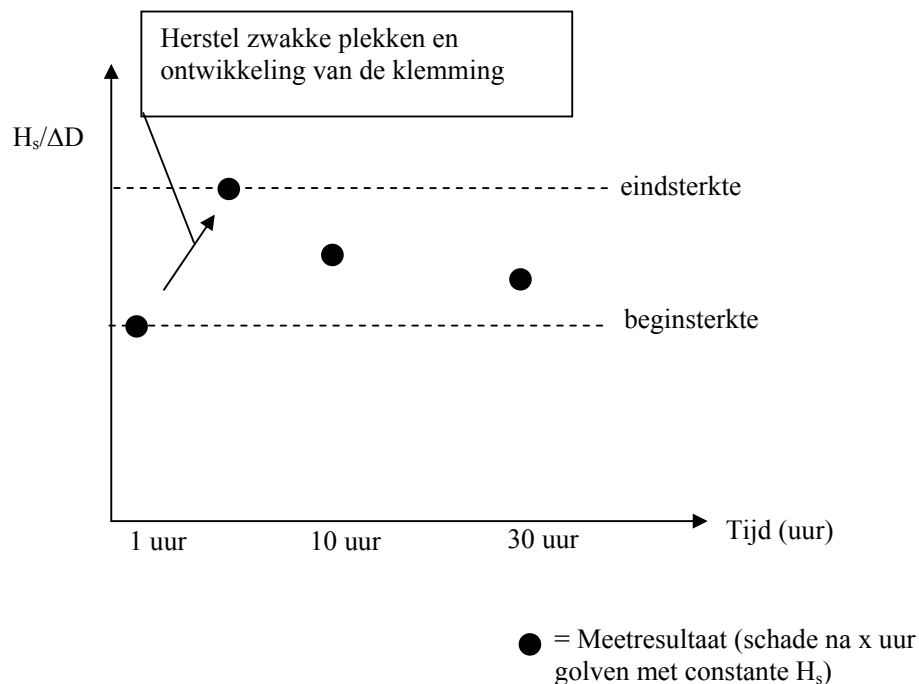
Als de significante golfhoogte groter is dan ongeveer 1,2 à 1,4 m, dan is het denkbaar dat de maximale golfhoogte beperkt wordt door de capaciteit van de Deltagoot, of als gevolg van breking door de beperkte waterdiepte. De maximale golfhoogte van een afzonderlijke golf in de Deltagoot is ongeveer 2,4 à 2,8 m. De waterdiepte was in de goot ongeveer 4 à 5 m, hetgeen gezien de schaalfactor relatief diep was.

Ingolven

De analyse van oude proeven met een steenzetting van basalt hebben opgeleverd dat zo'n steenzetting direct na de bouw al bij een vrij lage golfhoogte enige schade geeft (Rudolph en Klein Breteler 2004). Als echter die schade, bestaande uit het uitgelicht raken van een zuil, een paar maal gerepareerd is, dan heeft de steenzetting zijn eindsterkte bereikt. Voor de huidige proeven met basalt is gedurende 6,5 uur gegolfd om deze eindsterkte te bereiken. Tussentijds is één maal schade gerepareerd.

Het feit dat tijdens het ingolven de sterkte langzaam toeneemt tot de eindsterkte bereikt is, waarna de sterkte als functie van de belastingduur weer afneemt, is weergegeven in figuur 3.1.

Voor de langeduurproef met Basalton is niet ingegolfd, omdat deze bekleding al een zware golfbelasting te verduren had gekregen tijdens het vorige onderzoek. Voor de proeven met blokken op hun kant is wel ingegolfd.



Figuur 3.1 Ontwikkeling van de sterkte als functie van de tijd

Ook de proevenseries op blokken op hun kant en Hydroblocks zijn vaak gestart met een ingolfproef. Zo'n proef is bedoeld om de bekleding te onderwerpen aan een belasting die de blokken een beetje doet bewegen en in trilling brengt, zodat alle blokken de gelegenheid

krijgen om goed tegen elkaar aan te gaan liggen en het inwasmateriaal de gelegenheid krijgt om zich vast te wiggen. Vanaf serie 3 van de proeven op Hydroblocks is na het ingolven steeds het talud weer opnieuw ingewassen en is met een trilplaat gezorgd dat ook de aanvulling van het inwasmateriaal goed tussen de spleten komt. Hierdoor is bereikt dat de bekleding bij aanvang van de langeduurproeven in optimale conditie verkeerde.

Als het eerste deel van het degeneratieproces bestaat uit het uitspoelen van inwasmateriaal, zoals bij Hydroblocks, dan is de ingolfproef niet meegeteld als na de ingolfproef het talud opnieuw is ingewassen.

In andere gevallen is het niet altijd eenvoudig om te beoordelen of een ingolfproef meegeteld moet worden bij de belastingduur of niet.

Vermoedelijk is in het eerste deel van het degeneratieproces, als alleen het inwasmateriaal uitspoelt, de golfhoogte nog niet zo erg belangrijk. De duur van de ingolfproef zal dan simpelweg opgeteld kunnen worden bij een erna komende proef met hogere golfhoogte, mits deze golfhoogten niet te veel verschillen (minder dan bv. 20 à 30%).

Voor het berekenen van de totale duur van de belasting is voorlopig kozen om in zo'n geval de som van de belastingduren ($t_1 + t_2$) aan te houden, in combinatie met het gewogen gemiddelde van de golfhoogte ($(t_1 H_{s1} + t_2 H_{s2}) / (t_1 + t_2)$).

3.2 Langeduurproef Basalton

De sterkte van dezelfde steenzetting van Basaltonblokken, als beproefd gedurende verschillende golfcondities met een korte duur (ca 1000 golven per conditie) in het vorig onderzoek (Eysink en Klein Breteler, 2003), is nu onderzocht onder een langdurige golfbelasting met gemiddeld $H_s = 1,38$ m, $T_p = 8,0$ s en golfsteilheid $H_s / (1,56 T_p^2) = 0,014$ ofwel $\xi_{op} = 2,44$. De golfcondities zijn gemaakt met een Pierson-Moskovitz-spectrum met tweede orde golfschotsturing.

De proeven zijn uitgevoerd in week 34 van 2004. Het uitgevoerde proevenprogramma is beschreven in tabel 3.1. Nadere details omtrent de golfcondities zijn gegeven in tabel B.1 en B.5.



Figuur 3.2 Golfbelasting op Basalton (zie ook figuur C1)



Figuur 3.3 Erosie tot op het geotextiel uit de grote gaten, terwijl in andere openingen nog wel inwasmateriaal aanwezig is.

serie	proef	H _s (m)	T _p (s)	h (m)	duur (uur)	Σduur (uur)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	F (-)
inwassen en trillen									
nov '03	23-26	>1,2	6-8	4.6-5.1	6,77	6,77			
dec '03		1,45	5,17	4,50	1,33	8,10	0,035	1,53	5,27
juli 2004		1,40	4,90	4,39	1,00	9,10	0,037	1,48	4,97
1	P4201	1,24	8,06	4,20	1,00	10,10	0,012	2,58	6,39
	P4202	1,34	8,05	4,20	1,00	11,10	0,013	2,48	6,72
	P4203	1,26	7,80	4,20	1,00	12,10	0,013	2,48	6,32
	P4204	1,33	8,01	4,20	2,50	14,60	0,013	2,48	6,67
2	P4401	1,38	8,60	4,42	1,50	16,10	0,012	2,61	7,16
	P4402	1,36	8,07	4,41	2,00	18,10	0,013	2,47	6,80
3	P4601	1,39	7,90	4,63	7,00	25,10	0,014	2,39	6,80
4	P4801	1,40	7,88	4,82	3,00	28,10	0,014	2,38	6,82
	P4802	1,38	7,95	4,83	4,00	32,10	0,014	2,42	6,80
	P4803	1,38	7,87	4,81	7,00	39,10	0,014	2,39	6,75
5a	P5001	1,46	8,18	5,02	1,90	41,00	0,014	2,42	7,18
	P5002	1,36	8,11	5,02	0,55	41,55	0,013	2,48	6,83
5b	P4804	1,39	8,12	4,83	6,50	48,05	0,014	2,46	6,93
	P4805	1,38	8,12	4,81	3,00	51,05	0,013	2,47	6,89

Tabel 3.1 Uitgevoerde proeven op de Basaltonbekleding (de huidige proeven starten bij serie 1; de proeven uit 2003 en juli 2004 zijn ook vermeld voorzover H_s > 1,2 m) (zie ook bijlage B)

In deze tabel is h de waterstand ten opzichte van de gootbodem.

In de tabel zijn ook proeven vermeld die in november 2003 (Eysink en Klein Breteler, 2003), december 2003 (Doorn en Eysink, 2004) en die in juli 2004 op deze Basalton bekleding zijn uitgevoerd, voorzover deze proeven zijn uitgevoerd met golven die hoger zijn dan 1,2 m. In juli 2004 zijn er proeven uitgevoerd met vrij kleine golven ($H_s = 0,68$ m en $T_p = 8$ s, duur = 15 min) en een proef met grote golven die in bovenstaande tabel is vermeld.

De bekleding is sinds de bouw in 2003 niet meer opnieuw ingewassen.

Tijdens serie 5 moest de waterstand worden verlaagd, omdat er teveel brekende golven in de goot optraden, waardoor de golfhoogtemeters werden vernield. De vermelde golfcondities zijn door steeds weer optredende schade iets minder nauwkeurig dan die tijdens de eerste vier series. Voor de maximale golfhoogte en aantallen golven groter dan een bepaalde waarde, zoals vermeld in tabel B.1 en B.5, kan de fout aanzienlijk zijn (5 à 10 %).

Volgens ANAMOS zou deze bekleding stabiel moeten zijn tot $F_{1000} = 6$.

Ook na langdurige belasting is de Basaltonbekleding niet bezwaken. Tijdens het proevenprogramma in 2003 en het testen van de nieuwe golfschotsturing in 2004 was reeds gedurende totaal 10,2 uur een golfbelasting met golfhoogte hoger dan 1,2 m uitgevoerd. De totale belastingduur die deze bekleding doorstaan heeft komt hiermee op 52,2 uur.

Voor de reststerkteproef zijn vervolgens handmatig gaten in de steenzetting aangebracht (zie Klein Breteler 2004a).

Een uitvoerige beschrijving van de constatering tijdens de proeven is gegeven in bijlage D.

3.3 Langeduurproeven basalt

De sterkte van een vergelijkbare steenzetting van basaltblokken, als beproefd met korte duurproeven in het vorig onderzoek (Eysink en Klein Breteler, 2003), is nu onderzocht onder langdurige golfbelastingen met een golfsteilheid $H_s/(1,56T_p^2) \approx 0,022$ ofwel $\xi_{op} \approx 1,9$. De golfcondities zijn gemaakt met een Pierson-Moskovitz-spectrum met tweede orde golfschotsturing.

Het uitgevoerde proevenprogramma is in tabel 3.2 beschreven. Nadere details omtrent de golfcondities zijn gegeven in tabel B.2 en B.6.

De proeven 4010, 4210, 4211 en 4410 zijn ingolfproeven die bedoeld waren om de eindsterkte van de basalt te verkrijgen (zie figuur C2). Dit is nader uitgelegd in paragraaf 3.1 en in figuur 3.1.

Elke proevenserie werd beëindigd als er schade aan de bekleding was ontstaan (zie figuur C2 t/m C5) behalve serie 2, omdat de indruk was ontstaan dat het belastingniveau wat te laag was om binnen een redelijke termijn schade te krijgen.

De schade bestond steeds uit één of twee zuilen uit de bekleding, namelijk na proef P4812 en na proef P4618. Tijdens de proevenseries is het geregeld voorgekomen dat één of meerdere zuilen enkele centimeters omhoog waren gekropen. Verder is tijdens proef P4810 één tapse zuil uit de bekleding gekomen, maar deze schade wordt toegeschreven aan het proces van het ontwikkelen van de sterkte tot de eindsterkte.

serie	proef	H _s (m)	T _p (s)	h (m)	duur (uur)	Σduur per serie	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	F (-)
inwassen, trillen, inwassen									
ingolven	P4010	0,92	4,82	4,04	2,00	2,00	0,025	1,79	3,47
ingolven	P4210	1,26	6,06	4,22	1,77	3,77	0,022	1,93	4,99
ingolven	P4211	1,23	6,08	4,20	1,73	5,50	0,021	1,96	4,92
ingolven	P4410	1,28	6,16	4,40	1,10	6,60	0,022	1,94	5,10
inwassen									
1	P4411	1,30	5,91	4,41	3,50	3,50	0,024	1,85	5,01
1	P4610	1,27	6,04	4,63	6,00	9,50	0,022	1,91	5,00
1	P4810	1,17	6,35	4,82	0,42	9,92	0,019	2,09	4,90
1	P4811	1,27	5,93	4,84	8,83	18,75	0,023	1,88	4,94
1	P4812	1,25	5,96	4,83	4,75	23,50	0,023	1,90	4,91
inwassen									
2	P4215	1,46	6,59	4,22	3,50	3,50	0,022	1,95	5,82
2	P4415	1,43	6,62	4,42	3,50	7,00	0,021	1,98	5,76
2	P4615	1,42	6,47	4,63	5,75	12,75	0,022	1,94	5,65
2	P4616	1,41	6,71	4,61	1,25	14,00	0,020	2,02	5,75
inwassen									
3	P4418	1,59	6,85	4,42	3,50	3,50	0,022	1,94	6,32
3	P4618	1,53	6,63	4,60	3,83	7,33	0,022	1,91	6,03
reststerkte	P4619	1,55	6,71	4,60	1,00	1,00	0,022	1,92	6,13

Tabel 3.2 Uitgevoerde proeven op de basaltbekleding (h = waterstand t.o.v. de gootbodem) (zie ook bijlage B)

Volgens ANAMOS zou deze bekleding stabiel moeten zijn tot $F_{1000} = 6$.

Na elke proevenserie is de schade hersteld, zijn alle omhoog gekomen zuilen weer naar beneden geslagen en is het talud opnieuw ingewassen.

De geconstateerde uitspoeling van inwasmateriaal, de beweging van stenen en de uiteindelijke schade is uitvoerig in bijlage D beschreven.

Tijdens proef 4811 is vastgesteld dat de waterstand gedurende de 8,83 uur golven 8 cm was gedaald, van +4,84 naar +4,76 m. Tijdens de andere proeven was de waterstand wel vrijwel constant.

Proef P4619 is extra uitgevoerd als reststerkteproef, nadat er in proef P4618 een steen uit het talud was verdwenen. De schade breidde zich tijdens dit uur niet uit en ook was er geen ondermijning (vergelijkbaar resultaat met Klein Breteler 2004a).



Figuur 3.4 Schade na proef P4812 (zie ook figuur C2 t/m C5) (serie 1) (z = 4,13 m)



Figuur 3.5 Schade na proef P4618 (serie 3) (z = 3,50 m)

3.4 Langeduurproef met blokken op hun kant

Na het beëindigen van de langeduurproeven met de basaltbekleding is in week 47 gestart met het verwijderen van de basalt en de filterlaag. Vervolgens is een nieuwe filterlaag aangebracht en zijn betonstenen van 20x20x10 cm met een dichtheid van 2317 kg/m^3 op hun kant, koud tegen elkaar, in halfsteensverband op het filter aangebracht. De stenen werden aan beide zijden van de goot opgesloten met 4,8 cm dikke rubberstrippen (4x 1,2 cm) en geborgd met hoekijzers. Deze steenzetting is niet ingewassen. Het filter bestond uit gebroken graniet van 5 – 12 mm met $D_{f15} = 6,5 \text{ mm}$ (zie fig. 2.1).

De totale dikte van de nieuwe steenbekleding met filter bedroeg 25 cm, i.e. 7 cm minder dik dan de basaltbekleding met filter. Om dit goed op te vangen is er een geleidelijke overgang gemaakt van de betontaluds naar de testsectie. De lengte van deze overgangen bedroeg 2 m en lag ver buiten de sectie waar mogelijk schade tijdens de golfproeven zou kunnen optreden. Door deze geleidelijke overgangen zijn er geen merkbare invloeden te verwachten op de golfbelasting in de testsectie.

De proeven zijn uitgevoerd in week 48 t/m begin week 51 van 2004. Het uitgevoerde proevenprogramma is gegeven in tabel 3.3. Om aan te sluiten bij eerder onderzoek uit 1998 zijn de golfcondities in dit geval gemaakt met een JONSWAP-spectrum met tweede orde golfschotsturing. Nadere details omtrent de golfcondities zijn gegeven in tabel B.3 en B.7.

serie	proef	H_s (m)	T_p (s)	h (m)	duur (uur)	Σ duur per serie	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	F (-)
1	P4120	0,83	4,32	4,10	1,00	1,00	0,029	1,69	4,48
1	P4121	0,83	4,40	4,10	1,00	2,00	0,027	1,72	4,53
1	P4122	0,82	4,38	4,11	1,62	3,62	0,027	1,73	4,49
ingolven	P4930	0,49	3,50	4,91	1,00	1,00	0,026	1,78	2,74
2	P4931	0,64	3,88	4,90	1,00	1,00	0,027	1,73	3,50
2	P4932	0,66	3,89	4,90	2,50	3,50	0,028	1,71	3,57
2	P4933	0,68	3,88	4,90	0,78	4,28	0,029	1,68	3,64
2	P4934	0,68	3,86	4,90	2,09	6,37	0,029	1,67	3,63
ingolven	P4040	0,45	3,15	4,00	1,00	1,00	0,029	1,67	2,43
3	P4140	0,52	3,47	4,10	1,00	1,00	0,028	1,72	2,82
3	P4141	0,54	3,47	4,11	2,50	3,50	0,029	1,69	2,89
3	P4240	0,53	3,46	4,21	3,50	7,00	0,028	1,70	2,87
3	P4340	0,53	3,45	4,31	2,50	9,50	0,028	1,70	2,84
3	P4341	0,53	3,47	4,31	4,50	14,00	0,028	1,70	2,86
3	P4440	0,52	3,46	4,41	6,50	20,50	0,028	1,71	2,83
3	P4441	0,53	3,44	4,41	7,50	28,00	0,029	1,69	2,85
3	P4540	0,53	3,45	4,51	2,50	30,50	0,029	1,69	2,85
3	P4541	0,53	3,43	4,52	9,50	40,00	0,029	1,68	2,84
reststerkte	P4542	0,72	3,97	4,50	3,50	3,50	0,029	1,67	3,84

Tabel 3.3 Uitgevoerde proeven op blokken op hun kant (zie ook bijlage B)

Volgens ANAMOS zou deze bekleding stabiel moeten zijn tot $F_{1000} = 4$.

Reeds tijdens de eerste proef (P4120), die oorspronkelijk bedoeld was als ingolfproef, met $H_s = 0,83$ m (duur: 1 uur) zijn reeds bewegende blokken geconstateerd. Een blok was maar

liefst 6 cm omhoog gekomen, maar zat wel muurvast. Andere blokken waren 1 à 5 cm omhoog gekomen, maar zaten los in de bekleding (zie Fig. 3.6 en bijlage D).

Gezien dit resultaat was besloten om verder te gaan met deze golfconditie en dezelfde waterstand van $h = 4,1$ m. Na het tweede uur golven (proef P4121) was het schadebeeld niet erg veranderd. Van de blokken die iets omhoog waren gekomen zaten er acht volledig los en konden gemakkelijk op en neer bewegen. De blokken die het verst omhoog stonden, zaten vast.

Uiteindelijk is na totaal 3,62 uur golven een blok uit de zetting geslagen op een niveau van $z = +3,43$ m (SWL $-0,68$ m).



Fig. 3.6 Schade na proef P4120 (zie ook figuur C6) (serie 1)



Fig. 3.7 Schade tijdens proef P4122 na totaal 3,62 uur golven (zie ook figuur C6) (serie 1)

Na het herstellen van de schade is de waterstand omhoog gebracht naar $h = 4,9$ m. Bij deze waterstand is eerst 1 uur ingegolfd met een golfhoogte van circa $H_s = 0,49$ m. Vervolgens is de golfhoogte verhoogd naar $H_s = 0,64$ à $0,68$ m. Al snel gingen enkele blokken op en neer

bewegen, zie bijlage D.3. Uiteindelijk is er na 6,37 uur golven met $H_s = 0,64$ à $0,68$ m schade ontstaan op een niveau van +4,37 m (één blok eruit).



Figuur 3.8 Golfbelasting op blokken op hun kant tijdens proef P4932 (sputters zijn gevolg van golfneerloop tegen opstaande randjes) (zie ook figuur C7) (serie 2)

Na deze schade is de steenzetting en het filter volledig uit het model verwijderd en opnieuw ingebouwd voor een langeduurproef met een wat lagere golfbelasting. Na het ingolven in proef P4040 is de langeduurproef gestart met proef P4140. Na 3,5 uur golven (na proef P4141) zag het talud er uit als weergegeven in Fig. 3.10.



Figuur 3.9 Schade na proef P4934 (zie ook figuur C7) (serie 2)

Uiteindelijk is er 40 uur lang op deze steenzetting gegolfd met een golfhoogte $H_s = 0,53$ m en een periode $T_p = 3,46$ s zonder dat er een blok is uitgeslagen. Wel werden meerdere bewegende blokken waargenomen, waaruit blijkt dat de belasting (bij deze duur) dicht in de buurt van de schadebelasting moet hebben gezeten.

Het onderzoek op deze steenbekleding is afgesloten met een reststerkteproef. Op twee plaatsen is op 48 en 54 cm onder de waterlijn (halzijde: $z = 4,02$ m en $d/H_s = 0,68$; meetcabinezijde: $z = 3,96$ m en $d/H_s = 0,75$) een blok uit de bekleding verwijderd en is de steenzetting gedurende 3,5 uur belast met een golfconditie met $H_s = 0,72$ m en een periode $T_p = 3,97$ s. Dit heeft niet geleid tot het uitslaan van meer blokken of het bezwijken van de steenzetting (zie ook figuur C8).

Hierdoor kan in feite gesteld worden dat de bekleding een belastingduur van 43,5 uur zonder schade doorstaan heeft.

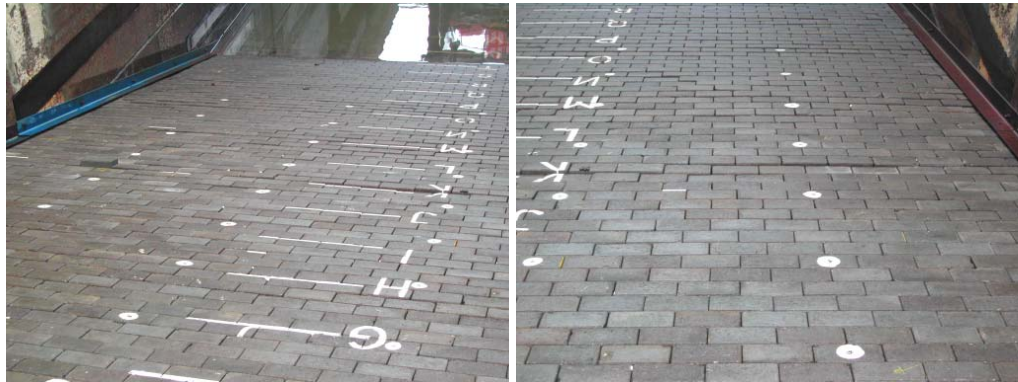


Fig. 3.10 Toestand steenzetting na 3,5 uur golven (na proef P4141) (serie 3)

3.5 Langeduurproef met Hydroblocks

Het totale onderzoek naar de sterkte van steenbekledingen onder langdurige golfbelasting is besloten met het testen van een steenbekleding van Hydroblocks:

- 5 proevenseries met een toplaagdikte van $D = 15$ cm en een soortelijke massa van de Hydroblocks van circa $\rho_s = 2426$ kg/m³
- 1 proevenserie met $D = 20$ cm en $\rho_s = 2359$ kg/m³



Fig. 3.11 Inbouw 15 cm dikke Hydroblocks op 6 à 7 cm dik filter

De bekleding met $D = 15$ cm is in de tweede helft van december 2004 ingebouwd en in januari 2005 getest. De bekleding van 20 cm dikte is eind januari aangebracht en begin februari 2005 beproefd.

serie	proef	H_s (m)	T_p (s)	h (m)	duur (uur)	Σ duur per serie	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	F (-)
inwassen, trillen, inwassen									
1	P5050	0,83	4,84	5,00	1,23		0,023	1,89	5,97
1	P5250	0,95	5,16	5,20	1,27		0,023	1,89	6,78
1	P5251	1,08	5,76	5,20	1,37		0,021	1,98	7,97
1	P5252	1,96	6,45	5,20	0,02		0,030	1,64	12,76
inwassen									
ingolven	P4150	0,77	4,85	4,10	1,00	1,00	0,021	1,98	5,64
2	P4250	1,02	5,97	4,20	1,50	2,50	0,018	2,11	7,85
2	P4251	0,99	5,53	4,20	0,85	3,35	0,021	1,99	7,29
inwassen									
ingolven	P4151	0,70	4,50	4,11	1,00	1,00	0,022	1,92	5,06
3	P4252	0,89	5,70	4,20	1,07	2,07	0,017	2,16	6,93
inwassen, trillen, inwassen, trillen									
ingolven	P4152	0,70	4,72	4,11	1,00	1,00	0,020	2,01	5,22
ingolven	P4850	0,69	4,78	4,81	1,00	1,00	0,019	2,05	5,22
4	P4253	0,75	5,17	4,21	1,63	2,63	0,018	2,13	5,82
trilen, inwassen, trillen, inwassen									
ingolven	P4254	0,56	4,19	4,21	1,00	1,00	0,020	2,00	4,15
inwassen, trillen									
5	P4255	0,63	4,64	4,22	2,00	2,00	0,019	2,09	4,80
5	P4256	0,64	4,65	4,21	1,50	3,50	0,019	2,07	4,87
5	P4457	0,65	4,58	4,41	0,63	4,13	0,020	2,03	4,85

Tabel 3.4 Uitgevoerde proeven op Hydroblocks van 15 cm dik (zie ook bijlage B)

Volgens ANAMOS zou deze bekleding stabiel moeten zijn tot $F_{1000} = 6$.

Het uitgevoerde proevenprogramma van de bekleding met $D = 15$ cm is gegeven in Tabel 3.4. De golfcondities zijn gemaakt met een Pierson-Moskovitz-spectrum met tweede orde golfschotsturing. Nadere details omtrent de golfcondities zijn gegeven in tabel B.4 en B.8.

De eerste proevenserie bestond uit een ingolfproef (P5050) en een aantal proeven met oplopende golfbelasting met ruim 1000 golven om de korteduursterkte te bepalen. Het talud

was aan het eind van proef P5251 bij een golfhoogte van $H_s = 1,08$ m al extreem vervormd en is direct in het begin van proef P5252 binnen 1 à 2 minuten bezweken (zie Fig. 3.12) (gat: $4,34 < z < 4,62$ m). Proef P5252 was ingesteld op een golfhoogte van $H_s = 1,2$ m, maar duurde zo kort dat de uiteindelijk gerealiseerde significante golfhoogte sterk door toeval werd bepaald. In deze proef waren toevallig al direct aan het begin zeer hoge golven gegenereerd die de schade hebben veroorzaakt. Direct na die schade is de proef gestopt. Als de proef nog een uur was voortgezet, was vrijwel zeker een significante golfhoogte van ongeveer 1,2 m gerealiseerd, maar omdat nu direct na de hoogste golven als gestopt is, was de significante golfhoogte van de 9 gemeten golven extreem hoog.



Fig. 3.12 Schade na proef P5252 (zie ook figuur C9) (serie 1)

De schade is hersteld door het talud tussen de niveau's +4,00 m en +5,10 m aan de halzijde uit te breken (15 rijen en 8 kolommen) en inclusief filter te vervangen en weer in te wassen, maar niet opnieuw te trillen. Het nieuwe talud is opnieuw ingegolfd met proef P4150.

De tweede proevenserie was bedoeld om de middellangeduursterkte te bepalen bij een langduriger belasting met een lagere golfhoogte. Eerst is het talud ingegolfd met $H_s = 0,77$ m. Daarna is de steenzetting niet opnieuw ingewassen of getrild.

De steenzetting bezweek uiteindelijk na een belasting van 2,35 uur met een golfhoogte van $H_s = \text{ca } 1,0$ m tijdens proef P4251 (zie Fig. 3.13) (gat: $3,10 < z < 3,80$ m). Voor de totale belastingduur wordt nu de ingolffproef ook meegeteld, omdat deze ook aanzienlijk heeft bijgedragen aan het uitspoelen van het inwasmateriaal. Dit uitspoelen wordt gezien als een onderdeel van het teruglopen van de sterkte tijdens langdurige golfbelasting. De totale belastingduur die geleid heeft tot de schade is derhalve 3,35 uur.

De schade na de tweede proevenserie is vervolgens opnieuw op dezelfde manier als eerder hersteld door een deel van de bekleding met filter te verwijderen (niet over de volle gootbreedte: van L tot nr. E: $3,03 < z < 4,00$ m; 15 rijen en 13 kolommen aan de halzijde). Het was deze keer moeilijk om de bovenste rij Hydroblocks van het herstelde deel er weer in te krijgen. Om dit toch voor elkaar te krijgen zijn er 4 stenen iets afgeslepen en er met enig geweld weer in gestampt. De inbouwrichting was vanuit het midden naar de halzijde. Het talud is wel opnieuw ingewassen, maar niet opnieuw getrild.

De derde proevenserie is weer begonnen met een ingolfproef (P4151) en vervolgens voortgezet met een lagere golfbelasting ($H_s = 0,89$ m) dan in de vorige serie. Ondanks dat trad er reeds na ruim een uur golven schade op (zie figuur 3.14) (gat: $3,38 < z < 3,52$ m). Vóór het bezwijken was de steenzetting in het schadegebied al aanzienlijk opgebeld door migratie van het filtermateriaal zoals blijkt uit de gebogen “waterlijn” op de foto in figuur C11.



Fig. 3.13 Schade tijdens proef P4251 (zie ook figuur C10) (serie 2)



Fig. 3.14 Schade na proef P4252 (zie ook figuur C11) (serie 3)

De mogelijkheid is overwogen dat de snelle schade het gevolg zou kunnen zijn van het niet goed vastklemmen van de herstelde steenzetting, omdat de bovenliggende stenen niet goed zijn nagezakt tijdens het ingolven. Om er zeker van te zijn dat dit in de volgende serie niet kan gebeuren is een groot deel van de steenzetting (tweederde van de gootbreedte in het schadegebied en tot boven aan toe) opnieuw ingebouwd.

Een ruim gebied rond het gat is uitgebroken en het filter is daar verwijderd (van M tot nr. 2: $2,90 < z < 4,96$ m; 30 rijen en 12 kolommen). Vervolgens is het filter weer aangebracht en

zijn de blokken geplaatst, maar nu met tegengestelde inbouwrichting: van hal naar meetcabine. De reden voor het omdraaien van de inbouwrichting is het feit dat er steeds vrij dicht bij de halzijde van de goot schade is opgetreden, hetgeen verband zou kunnen houden met de inbouwrichting.

In het midden moet het dan mooi aansluiten op het stuk steenzetting dat is blijven liggen. Helaas bleek bij ongeveer zes rijen de rij stenen iets te kort te zijn en bleef er een opening van 1 à 2 cm over. Dit is opgevuld met wat passende steenslag (stopstukken). Het talud is volledig ingewassen en nu wel getrild.



Fig. 3.15 Schade tijdens proef P4253 (zie ook figuur C12) (serie 4)

Voor alle zekerheid is de herstelde steenzetting ook nog eens bij twee verschillende waterstanden ingegolfd met relatief hoge golven (proeven P4152 en P4850) voordat met de volgende langeduurproef is begonnen. In deze vierde proevenserie bezweek de steenzetting toch nog vrij snel na 2,63 uur (incl. een ingolfproef) bij een ten opzichte van de derde serie nog verder gereduceerde belasting ($H_s = 0,75$ m) (zie Fig. 3.15) (gat: $3,59 < z < 3,66$ m). Hier wordt alleen de eerste ingolfproef voor de totale belastingduur meegeteld, omdat de tweede ingolfproef veel hoger op het talud is uitgevoerd en daardoor niet bijgedragen heeft aan de verzwakking van het uiteindelijk beschadigde deel van de bekleding.

De schade aan de steenzetting in de goot is daarna weer op een andere manier hersteld. De bekleding is nu ter plaatse van de schade over vrijwel de hele breedte van de goot verwijderd en weer ingebouwd (van K t/m D: $3,17 < z < 4,14$ m; 14 rijen en 17 kolommen). De blokken zijn geplaatst van hal naar meetcabine. De bekleding is al voor het inwassen zwaar aangetrild en daarna na het inwassen nog eens.

Na de ingolfproef (P4254) is het talud weer ingewassen en aangetrild. Dit is gedaan om de interpretatie van het proefresultaat eenvoudiger te maken. Bij de vorige series blijft het moeilijk te beoordelen in hoeverre de tijd van het ingolven meegeteld moet worden bij de totale belastingduur. Gezien het feit dat deze toen substantieel bijgedragen hebben aan het uitspoelen van het inwasmateriaal, wordt de ingolfproef maar wel meegeteld in de totale proefduur. Voor het bepalen van de gemiddelde significante golfhoogte tijdens een proevenserie, wordt de ingolfproef echter niet meegeteld. Dit wordt later in hoofdstuk 4 nader beschreven.

Na 3,5 uur golven met een golfhoogte van slechts $H_s = 0,64$ m was er al weer een aanzienlijke bolling in de steenzetting ontstaan met een hoogte van 10 cm (zie Fig. 3.16)



Fig. 3.16 Bolling in talud na proef P4256 (zie ook figuur C13) (serie 5)



Fig. 3.17 Schade tijdens proef P4257 van serie 5 (zie ook figuur C13)

Na nog eens 38 minuten golven is er tijdens proef P4257 een blok uit deze opbolling geslagen (zie Fig. 3.17) (gat: $z = 3,73$ m).

Na deze schade is besloten om het onderzoek af te ronden met een langeduurproef op een nieuwe bekleding van nieuwe Hydroblocks, maar nu van 20 cm dik met een gemiddelde dichtheid van 2359 kg/m^3 . Om deze proevenserie te laten aansluiten bij proeven die zijn uitgevoerd in 1998, is deze bekleding gelegd op een filterlaag van 10 cm dik. Het filtermateriaal zelf is niet gewijzigd, evenmin als het inwasmateriaal. Deze keer zijn de blokken niet gelegd vanaf de meetcabinezijde met de sluitsteen aan de halzijde, maar andersom teneinde de schade aan de halzijde wat verder van de gootwand af te krijgen.

Na het ingolven van het talud met proef P4160 is de nieuwe steenzetting langdurig belast met golven met $H_s \approx 1,1$ m. De steenzetting is pas na 19,75 uur golven tijdens proef P4860 bezweken, nadat na circa 18,8 uur golven is waargenomen dat de bolling in het talud wat begon toe te nemen. Op $t = 19,75$ uur ontstond in rij J (bovenste gat) de eerste schade. Daar was een enkel blok uit de bekleding geslagen. In de paar daarop volgende golven ontstond

het tweede gat tussen J en L, terwijl de golfmachine al was uitgeschakeld. De schade is te zien op de volgende foto (Fig. 3.18) (gat: $3,71 < z < 3,92$ m).

serie	proef	H, (m)	T _p (s)	h (m)	duur (uur)	Σduur per serie	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	F (-)
inwassen, trillen, inwassen									
ingolven	P4160	0,85	5,14	4,09	1,00	1,00	0,021	1,99	4,95
inwassen, trillen									
6	P4260	1,15	5,97	4,21	3,02	3,02	0,021	1,98	6,70
6	P4261	1,10	5,62	4,20	0,50	3,52	0,022	1,91	6,25
6	P4460	1,10	6,38	4,42	0,40	3,92	0,017	2,17	6,78
6	P4461	1,11	5,97	4,42	3,10	7,02	0,020	2,02	6,54
6	P4660	1,09	6,06	4,62	7,00	14,02	0,019	2,07	6,53
6	P4860	1,10	6,03	4,79	5,73	19,75	0,019	2,06	6,52

Tabel 3.5 Uitgevoerde proevenserie op Hydroblocks van 20 cm dik (zie ook bijlage B)

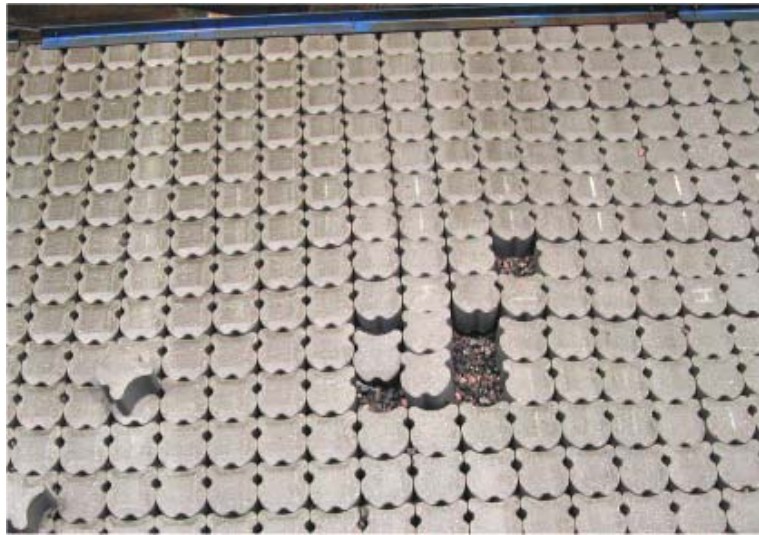


Fig. 3.18 Schade langeduurproef op Hydroblocks van 20 cm dik in proef P4860 (zie ook figuur C14) (serie 6)

Wrijvingsproeven met Hydroblocks

Om er achter te komen of het steeds weer herstellen van de steenzetting met dezelfde blokken de wrijving tussen de stenen zou kunnen verminderen zijn er eenvoudige wrijvingsproeven uitgevoerd met nieuwe blokken, met uitgespoelde blokken uit het schadegebied in de goot en met nieuwe blokken waarvan de contactvlakken met een betonsteen zijn geschuurd (zie Fig. 3.19). Op een plank met een lengte van 2,08 m is een Hydroblock op zijn kant vastgebonden. Een tweede Hydroblock werd hier ook weer op zijn kant opgezet. Daarna is de plank aan de andere zijde zo hoog opgehesen, tot het losse blok van het vastgebonden blok afschoof. Na afschuiving werd gemeten hoe hoog de plank aan het einde was opgetild. Uit deze hoogte kon samen met de lengte van de plank de hoek, φ ,

bepaald worden waarbij het blok er af schoof. De wrijvingscoëfficiënt, f , is vervolgens gelijk aan de tangens van die hoek: $f = \tan\phi$.



Fig. 3.19 Proefopstelling wrijvingsproeven met de Hydroblocks

De proeven zijn uitgevoerd met drie sets stenen van zowel de nieuwe blokken als van de shadeblokken uit de goot, waarbij een set bestaat uit een onderblok dat vast zat aan de plank en een los blok dat eraf kon schuiven. Met elke set is driemaal een wrijvingsproef uitgevoerd (proef a, b en c).

In het begin zijn enkele proeven alleen met een droog contactvlak uitgevoerd, daarna ook met een nat gemaakt contactvlak. De laatste proeven zijn alleen met een nat contactvlak uitgevoerd, omdat dat het meest representatief is. De resultaten van de proeven zijn gegeven in Tabel 3.6.

Uit de resultaten blijkt:

- Bij alle natte shadeblokken is er een duidelijke tendens dat f afneemt na elke afschuiving. In iets mindere mate is dit te zien bij de natte nieuwe Hydroblocks. Deze afname wordt mogelijk veroorzaakt door een slijpeffect van de afgeschoven steen.
- De geschuurde natte, nieuwe Hydroblocks hebben de laagste wrijvingscoëfficiënt.
- Er is geen significant verschil tussen de wrijvingscoëfficiënt voor de ongeschuurde nieuwe blokken en de shadeblokken uit de goot.

Proef 1 Nieuwe Hydroblokken						
set 1	droog			nat		
	h (m)	φ (rad)	f (-)	h (m)	φ (rad)	f (-)
a	1.220	0.627	0.724			
b	1.225	0.630	0.729			
c	1.207	0.619	0.713			
set 2						
a	1.230	0.633	0.733	1.175	0.600	0.685
b	1.230	0.633	0.733	1.140	0.580	0.655
c	1.250	0.645	0.752	1.150	0.586	0.664
set 3						
a				1.250	0.645	0.752
b				1.212	0.622	0.717
c				1.183	0.605	0.691
Proef 2 Geschuurde Hydroblocks						
set 1	droog			nat		
	h (m)	φ (rad)	f (-)	h (m)	φ (rad)	f (-)
a	1.090	0.552	0.615	1.070	0.540	0.600
b	1.065	0.538	0.596	1.020	0.513	0.563
c	1.110	0.563	0.631	0.990	0.496	0.541
set 2						
a				0.965	0.482	0.524
b				0.965	0.482	0.524
c				0.98	0.491	0.534
set 3						
a				1.000	0.502	0.548
b				0.950	0.474	0.513
c				0.960	0.480	0.520
Proef 3 Schadeblokken uit goot						
set 1	droog			nat		
	h (m)	φ (rad)	f (-)	h (m)	φ (rad)	f (-)
a	1.208	0.620	0.713	1.210	0.621	0.715
b	1.210	0.621	0.715	1.165	0.595	0.676
c	1.230	0.633	0.733	1.090	0.552	0.615
set 2						
a				1.235	0.636	0.738
b				1.195	0.612	0.702
c				1.190	0.609	0.698
set 3						
a				1.200	0.615	0.706
b				1.105	0.560	0.627
c				1.020	0.513	0.563

Tabel 3.6 Resultaten van wrijvingsproeven met Hydroblocks

Bolling en bramen

De afnemende stabiliteit van Hydroblocks na het opnieuw gebruiken van de blokken uit het schadegebied, zou ook veroorzaakt kunnen zijn door het feit dat de Hydroblocks een beetje bol waren, in combinatie met betonbramen langs het ondervlak. De bolling en de betonbramen zijn duidelijk te zien in figuur 3.20.

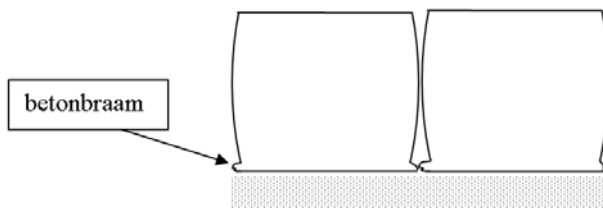
Voordat de Hydroblocks in het talud werden geplaatst, zijn de betonbramen grofweg verwijderd, echter zonder alles tot op de mm glad te maken. De resterende betonbramen zorgen ervoor dat de Hydroblocks aan de onderkant contact met elkaar maken, en ter plaatse van de maximale bolling, zoals geïllustreerd in figuur 3.21. De twee contactpunten maken dat een kolom Hydroblocks, waarin een normaalkracht aanwezig is, enige buigsterkte heeft. Deze buigsterkte draagt bij aan de stabiliteit van de bekleding, omdat het opbollen van een veld Hydroblocks daardoor wordt tegengegaan.



Figuur 3.20, bolling en betonbramen op Hydroblocks

Als na een schade de Hydroblocks opnieuw in de bekleding worden gezet, is het denkbaar dat tijdens de bewegingen bij het ontstaan van schade en de handelingen tijdens het herzetten de betonbramen verder afslijten. In het ergste geval resteren er dan blokken die slechts ter plaatse van de maximale bolling van de zijvlakken onderling contact maken. Ondanks de aanwezigheid van een normaalkracht in een kolom van Hydroblocks, zal dan toch relatief gemakkelijk de kolom kunnen opbollen (buiging in de kolom door de geringe buigstijfheid), zie figuur 3.22.

Hoe kleiner de bolling van de zijkanten van de Hydroblocks hoe groter de overspanning moet zijn om een zekere verticale verplaatsing te krijgen. Ofwel: naarmate de bolling kleiner is zal bij een zelfde overspanning de maximale verticale verplaatsing kleiner zijn.



Figuur 3.21, betonbramen en bolling zorgen voor twee contactpunten tussen de blokken

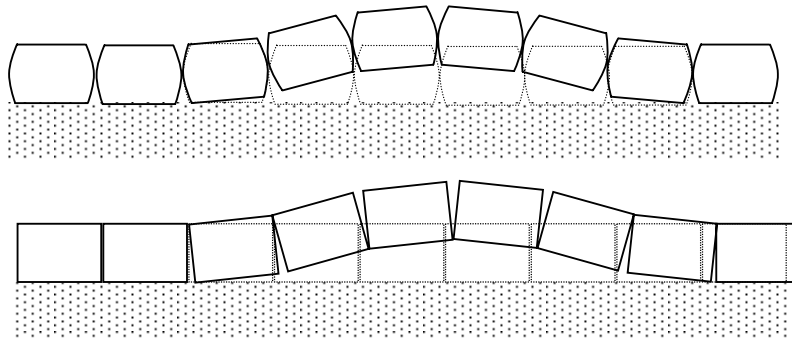
Bij het opmeten van enkele Hydroblocks is vastgesteld dat de bolling meestal 0,5 à 1,5 mm bedraagt.

Op 1 september 2005 is een bezoek gebracht aan de betonfabriek in Goes waar de Hydroblocks geproduceerd worden. Op het opslagterrein is vastgesteld dat vele partijen Hydroblocks betonbramen hebben, en vermoedelijk ook een beetje bol zijn. Sommige partijen hebben echter geen betonbramen.

Volgens de deskundigen aldaar zijn de bolling en de bramen een gevolg van dezelfde oorzaak: de beton is tijdens het storten wat aan de vochtige kant.

Verder slijt de onderkant van de mal het sterkst, en daarom wordt die na verloop van tijd verbeterd door een ring van ca. 3 mm dikte op de mal te lassen. Om te voorkomen dat deze ring iets te klein is, hetgeen desastreus is bij het losse van de blokken, wordt hij altijd iets te groot gekozen. Zodra er zo'n opgelaste ring wordt toegepast, zal dus het grondvlak van het blok ca. 1 à 2 mm groter zijn dan de rest van het blok. Dit is ook geconstateerd bij Basalton.

Verder zijn ook een aantal Basaltonzuilen nader geïnspecteerd. Deze blijken duidelijk taps te zijn, met het grootste oppervlak onder. Deze tapsheid bedraagt 1 à 5 mm. Er is een partij met dikte van 30 cm geïnspecteerd die ook een beetje bol is, met een bolheid tot 3 mm. De partij met dikte van 15 cm was niet bol.



Figuur 3.22, een rij bolle blokken kan vervormen zonder dat de normaalkracht toeneemt, terwijl rechthoekige blokken moeten verschuiven, waardoor ze een extra normaalkracht genereren.

4 Analyse van de resultaten

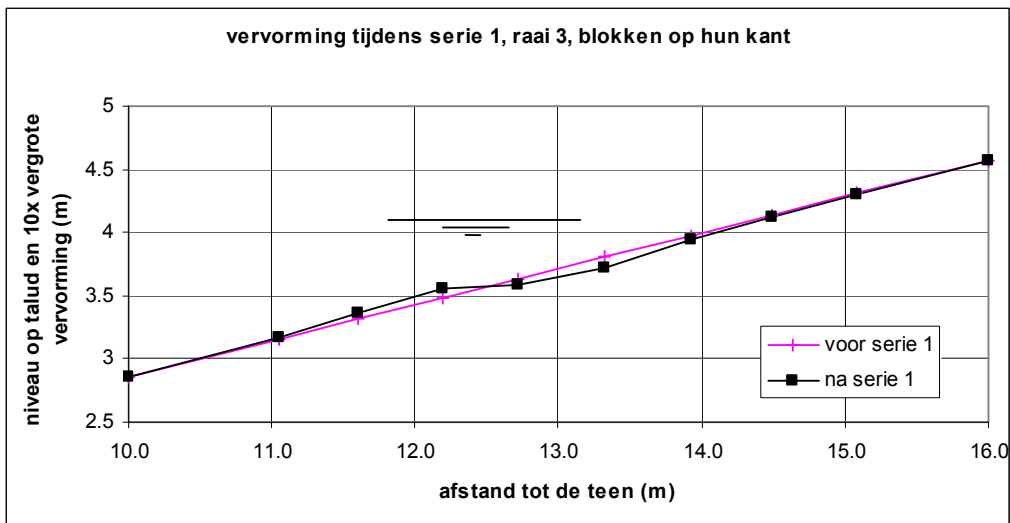
Tijdens de uitvoering van de proeven is duidelijk geworden dat er een aantal processen spelen die invloed hebben op de langeduursterkte van steenzettingen:

- **Grootschalige vervorming**
De golfbelasting, en waarschijnlijk vooral de golfklappen, zorgen voor een grootschalige vervorming van het talud en de steenzetting. Ter plaatse van de golfklappen bestaat deze vervorming uit een verlaging en daar vlak onder ontstaat een verhoging van het taludoppervlak, waardoor er zich een S-vormige vervorming gaat aftekenen (zie figuur 4.0). Het wordt hier een grootschalige vervorming genoemd, omdat de golflengte van de vervorming zich uitstrekt over meerdere stenen. Verder is in de metingen te zien dat een verticale verplaatsing (opbolling, kattenrug) soms gepaard gaat met verschuivingen langs het talud (naar beneden of naar boven) eronder en/of erboven (zie bv. figuur E13 en E14).
De grootschalige vervorming bestaat dus uit twee componenten: een verticale verplaatsing, haaks op het talud, en een verschuiving in het vlak van het talud (horizontale verplaatsing).
- **Uitspoeling van inwasmateriaal**
Gedurende de golfbelasting spoelt het inwasmateriaal geleidelijk uit. Doorgaans blijft dit inwasmateriaal geruime tijd op het talud heen en weer bewegen onder invloed van de golfploop en neerloop. Maar na verloop van tijd heeft het materiaal de neiging om zo ver het talud af te bewegen dat het buiten de invloed van de golven komt en zich ophoopt op het talud. In de golfaanvalzone is er dan een tekort aan inwasmateriaal dat uiteindelijk leidt tot het volledig leeg raken van de spleten tussen de stenen. Het is erg afhankelijk van het type steenzetting of dit heel snel (Hydroblock) of heel langzaam (Basalton) gaat.
- **Lokale vervorming en schade**
De opwaartse stijghoogteverschillen als gevolg van de golfbelasting zorgen ervoor dat enkele stenen of groepen van stenen omhoog gedrukt worden. Dit tijdelijke bewegen van stenen tijdens een hoge golf wordt een blijvende verplaatsing zodra de steen niet meer omlaag kan bewegen als gevolg van het migreren van filtermateriaal onder de bewegende steen, of doordat de klemming van de omliggende stenen het terugbewegen verhindert. Dit wordt een lokale vervorming genoemd omdat het een afzonderlijke steen betreft (blokken op hun kant) of een kleine groep stenen.
Uiteindelijk kan de beweging zo groot zijn dat één of meerdere stenen uit de zetting gelicht worden.

Deze verschillende aspecten van het degenereren van de steenzetting onder invloed van golfbelasting worden in dit hoofdstuk eerst apart behandeld, waarna later de samenhang wordt uitgewerkt.

Daarnaast heeft de lange duur ook invloed op de belasting. De statistische grootheden zoals de significante golfhoogte of de golfhoogte met een bepaald overschrijdingspercentage blijven weliswaar constant met toenemende belastingduur, maar de kans dat de maximale golfhoogte tijdens de proef groter is dan tijdens een korteduurproef wordt met het toenemen van de duur steeds groter. In figuur 14 en 15 in bijlage A is het verloop van de maximale

golfhoogte weergegeven. In paragraaf 4.4 wordt aandacht geschonken aan de invloed van de maximale golfhoogte op het ontstaan van schade.



Figuur 4.0, voorbeeld van S-profiel (tijdens serie 1 van blokken op hun kant) (zie ook figuur C6)



Figuur 4.1, bolling in de bekleding na proef 5251 (serie 1 met Hydroblock)

4.1 Grootschalige vervorming

De grootschalige vervorming is in detail beschreven in bijlage E. In de figuren in de bijlage is een positieve verplaatsing altijd omhoog gericht.

De locatie van de vervormingen zijn onderstaand weergegeven als een dimensieloze diepte onder de stilwaterlijn:

$$d/H_s = (h - z)/H_s \tag{4.1}$$

met:

- d = diepte onder de stilwaterlijn (m)
- H_s = significante golfhoogte (m)
- h = waterdiepte (m)
- z = niveau t.o.v. de gootbodem (m)

Het blijkt dat de aard en grootte van de vervorming sterk afhankelijk is van het type steenzetting.

De Basalton is tijdens de proeven het minst vervormd. Zowel de verticale als de horizontale verplaatsingen bleven beperkt tot hooguit orde 5 mm, ondanks dat de belasting toch zeer aanzienlijk was ($H_s/\Delta D = 3,8$; $F = 6,8$).

De vervorming van de basalt was een stuk meer. Plaatselijk verzakte de steenzetting tot maximaal 22 mm en wat lager op het talud kwam de bekleding wat omhoog, maximaal 7 mm.

Het is verder opmerkelijk dat een deel van de basalt omlaag schuift, maar een ander deel omhoog. Op het niveau $z = +4,5$ m (vlak onder de waterlijn: $d/H_s \approx 0,1$ à $0,2$) bijvoorbeeld schuift de bekleding in raai 1 en 2 (over de halve gootbreedte) omhoog: in serie 1 maar liefst 7 mm en in serie 2 zelfs 8 mm.

Laag op het talud, namelijk op $0,6 < d/H_s < 1,1$, gaat de bekleding over vrijwel de volle breedte omlaag, namelijk 5 à 10 mm.

De verticale verplaatsing was niet zodanig dat het bol gaan staan van de bekleding spatkrachten geeft in het vlak van het talud waardoor het bovenste deel van het talud omhoog gedrukt zou kunnen gaan worden. De verticale verplaatsingen waren daarvoor te klein. Voorlopig is er dus nog geen verklaring voor de omhoog gerichte beweging hoog op het talud. Gezien het feit dat deze verschuiving naar boven niet gemeten is in de waterpassingen, maakt de meting verdacht.

De verschuiving naar beneden was ook reeds geconstateerd tijdens de proeven in 2003 (Eysink ea., 2003).

De bekleding met blokken op hun kant laat weer een heel ander gedrag zien. In deze bekleding gaan tijdens de golfbelasting afzonderlijke stenen op en neer bewegen en tekent zich een zone af waar blokken een stukje uit de bekleding steken, met wat hoger op het talud een verzakking van de bekleding. De op en neergaande beweging van afzonderlijke blokken bedroeg soms maar liefst de halve toplaagdikte.

De blokken op hun kant zijn vrijwel niet in het vlak van het talud verschoven.

Tijdens de golfbelasting op de Hydroblocks is aanvankelijk vrijwel geen vervorming te zien, totdat er geleidelijk aan een bolling ontstaat. De bekleding is daar dan opgelicht terwijl het inwasmateriaal naar beneden is gevallen tussen de toplaag en het filter. Doorgaans is er een vrij geringe verzakking hoger op het talud te zien.

Tijdens het opbollen neemt lokaal de filterlaagdikte toe en wordt dus ook de leklengte groter ($\Lambda = \sqrt{(bDk/k')}$). Daardoor zal ook het stijghoogteverschil over de toplaag toenemen en de stabiliteit afnemen.

Net boven de bolling is de bekleding steeds 5 à 15 mm langs het talud omhoog gedrukt, waarschijnlijk als gevolg van de spatkrachten in de bolling.

		dimensieloze diepte t.o.v. SWL, d/H_s (-)			
	serie	verzakking	bolling	stenen omhoog	schade
Basalton	1	0,15–0,46			
basalt	ingolven		0,44–0,62	0,59	0,70
	1	0,70–0,90	1,00–1,20	0,89 1,06	(0,20) 0,56
	2	0,50–0,65		0,79	
	3			0,58	0,72
blokken op hun kant	1	0,40–0,60	0,70–1,00	0,25–1,40	0,84
	2	0,40–0,65	0,65–1,00	0,67–1,11	0,77
	3			0,55–1,46	
Hydroblock	1		0,61–0,87		0,60–0,90*
	2		0,30–1,40		0,34–1,18
	3	0,45–0,53	0,53–1,16		0,72–0,98
	4	0,31–0,64	0,64–1,39		0,68
	5	0,35–0,45	0,47–1,25		1,04
	6		0,50–1,26		0,79–0,98

Tabel 4.1, locatie verzakking, bolling, omhoog bewegende stenen en schade (*berekend met golfhoogte van proef 5251, toen bolling is ontstaan)

In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de locatie van de vervormingen. Deze locatie is dimensieloos gemaakt door de diepte t.o.v. de stilwaterlijn te delen door de significante golfhoogte.

In de tabel is te zien dat de verzakking van de toplaag meestal plaatsvindt in de zone $0,4 < d/H_s < 0,6$. Alleen tijdens de eerste serie van de proeven met basalt was de verzakking extreem diep: $0,7 < d/H_s < 0,9$.

De bolling vindt meestal iets lager op het talud plaats: $0,6 < d/H_s < 1,1$. Het bovenste punt van de bolling sluit meestal mooi aan op het onderste punt van de verzakking. De spreiding in de locatie en grootte van de bolling is veel groter dan die van de verzakking.

De locatie van de bolling kan vergeleken worden met de locatie waar de grootste belasting op het talud aangrijpt. Daartoe is in bijlage G de dimensieloze locatie van de belastingzone t.o.v. SWL als functie van de brekerparameter ξ_{op} bepaald:

$$-0,6 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,2 \cdot H_s \xi_{op}$$

De huidige proeven op basalt, blokken op hun kant en Hydroblocks zijn uitgevoerd met een brekerparameter van $\xi_{op} = 1,7$ à $2,6$. Uit de formule blijkt dat voor deze omstandigheden de maximale belasting plaatsvindt op diepte van $0,4H_s$ à $1,5H_s$ onder SWL. Deze locatie komt heel mooi overeen met de locatie waar de bolling in het talud is opgetreden.

4.2 Uitspoeling van inwasmateriaal

De uitspoeling van het inwasmateriaal is relevant voor de Basalton, de basalt en de Hydroblocks. De blokken op hun kant waren immers niet ingewassen. Het inwasmateriaal draagt waarschijnlijk bij aan de interactie tussen de verschillende stenen, waardoor afzonderlijke stenen goed geklemd liggen tussen hun burens. Dit draagt bij aan de stabiliteit en er wordt algemeen aangenomen dat deze invloed dominant is over het negatieve effect van inwasmateriaal, namelijk dat de doorlatendheid van de toplaag erdoor afneemt.

De uitspoeling van het inwasmateriaal is in detail beschreven in bijlage D. Het blijkt dat bij alle proeven en alle bekledingstypen het inwasmateriaal vrij snel en in een groot gebied uitspoelt. De diepste uitspoeling treedt op bij de wat grotere openingen en is al snel gelijk aan de toplaagdikte. Bij Basalton was gelijk bij de eerste inspectie na proef 4601 al geconstateerd dat de uitspoeling gelijk is aan de toplaagdikte, maar toen was er ook al totaal 25 uur gegolfd. Bij de basalt blijkt de diepste uitspoeling gelijk aan de toplaagdikte te zijn na een periode van 4 à 10 uur golven (ingolfproeven: na 6,6 u; serie 1: na 9,5 uur; serie 2: na ca 10 uur; serie 3 na 3,5 u)

Tijdens de proeven op de Hydroblock bleek steeds al bij de eerste inspectie na 1 à 2 uur golven dat de uitspoeldiepte al gelijk was aan de toplaagdikte.



Figuur 4.2, uitspoeling van inwasmateriaal aan halzijde (rechts op de foto), dat zich verzameld aan de meetcabinezijde

Er is echter een groot verschil geconstateerd tussen Basalton en basalt enerzijds en Hydroblock anderzijds. Bij Basalton en basalt spoelt al het inwasmateriaal uit de grote gaten uit, maar zijn er rond de zuilen altijd een aantal kleine gaten of smalle spleten waar het inwasmateriaal langdurig blijft zitten. Hierdoor zal de klemming in dit type bekledingen toch langdurig op een hoog peil blijven. Desondanks is geconstateerd dat er geen kattenrug ontstaat tijdens het bezwijken van basalt, maar dat er een afzonderlijke steen als een zuiger uitgelicht wordt. Dit duidt toch op een *lokaal* lage klemming van basalt.

Bij de Hydroblocks bleek echter de uitspoeling uit alle gaten en spleten ongeveer gelijke tred te houden, waardoor er al na een paar uur geen inwasmateriaal meer over was om bij te dragen aan de klemming. Daarentegen is het nog de vraag of de Hydroblocks de inwassing

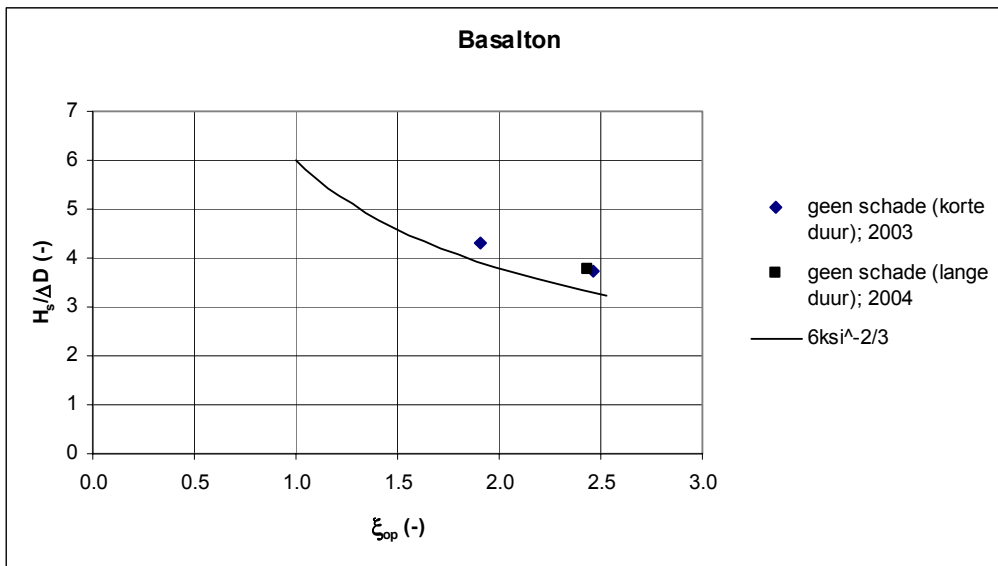
nodig heeft om goed geklemd te liggen. Tijdens het bezwijken ontstond steeds een duidelijke kattenrug, dat duidt op een hoge klemming. Deze kattenrug was niet alleen langs de waterlijn aanwezig (die nog wel met vrij kleine klemming zou kunnen ontstaan doordat de belasting in de breedte ongeveer constant is) maar ook langs het talud omhoog en omlaag.

4.3 Lokale vervorming en schade

In dit onderzoek is steeds getracht de golfcondities zo te kiezen dat er geleidelijk aan steeds meer vervorming optrad totdat de belasting uiteindelijk na vele uren uitmondde in schade. Er is in dit verband sprake van schade als één of meer stenen uit de toplaag zijn geslagen.

Basalton

Helaas is het niet altijd gelukt om schade te krijgen. Reeds bij de eerste proevenserie, met een bekleding van Basalton, bleek de langeduursterkte groter te zijn dan verwacht was. Uiteindelijk is er ruim 51 uur gegolfd zonder dat er schade is ontstaan.



Figuur 4.3, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Basalton

In figuur 4.3 is de belastinggrootte $H_s/(\Delta D)$ van de huidige proeven, en die van 2003 (Eysink e.a. 2003), gegeven als functie van de brekerparameter ξ_{op} . De golfhoogte en golfperiode zijn hiervoor gemiddeld over de proeven, rekening houdend met de duur van de afzonderlijke proeven. Dit is voorlopig als volgt gedaan:

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_i H_{si}}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad \text{en} \quad T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i T_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4.2)$$

Met:

H_s = significante golfhoogte (op basis van energie) (m)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

- H_{si} = significante golfhoogte in proef i (m)
 T_{pi} = golfperiode bij de piek van het spectrum in proef i (s)
 t_i = duur van proef i (uur)
 n = aantal proeven in een serie (-)

In figuur 4.3 is tevens de zogenaamde 6- ξ -lijn getekend:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = F \xi_{op}^{-2/3} \quad \text{met } F = 6 \quad (4.3)$$

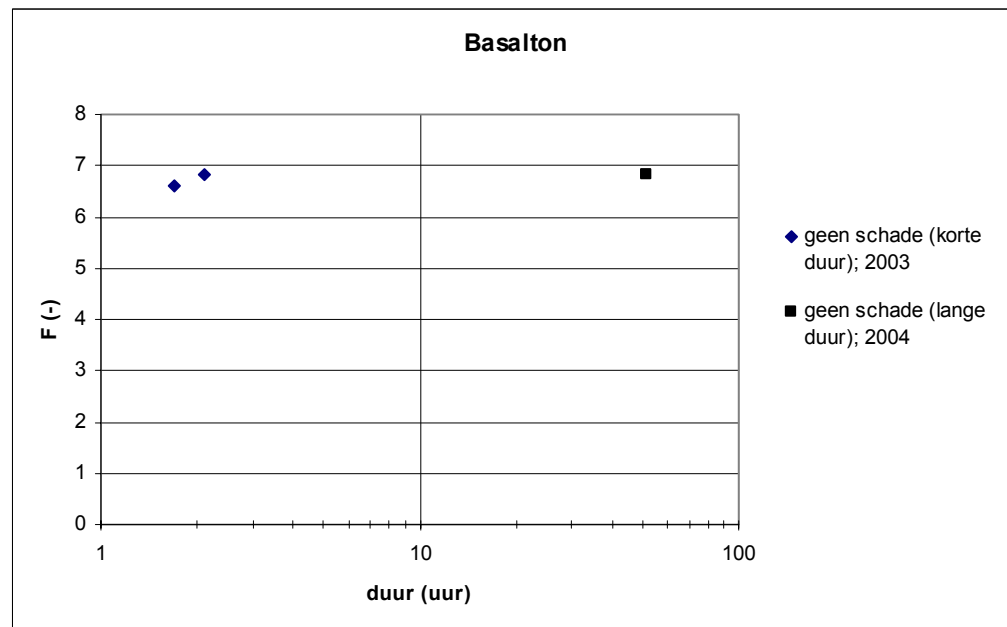
Met:

- $\xi_{op} = \tan \alpha / \sqrt{(H_s / (1,56 T_p^2))}$ = brekerparameter (-)
 $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
 D = dikte van de toplaag (m)
 F = stabiliteitsparameter (-)
 α = taludhelling ($^\circ$)
 ρ_s = soortelijke massa van de stenen (kg/m^3)
 ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)

De korteduurproeven uit 2003 zijn uitgevoerd met exact dezelfde constructie als de huidige langeduurproeven. Voor de golfcondities van die proeven wordt verwezen naar tabel B.10 in bijlage B.

In de figuur is te zien dat de punten boven de 6- ξ -lijn liggen, die in ANAMOS als bovengrens van de stabiliteit geldt. Desondanks is er zelfs na langdurige belasting geen schade ontstaan aan de Basalton.

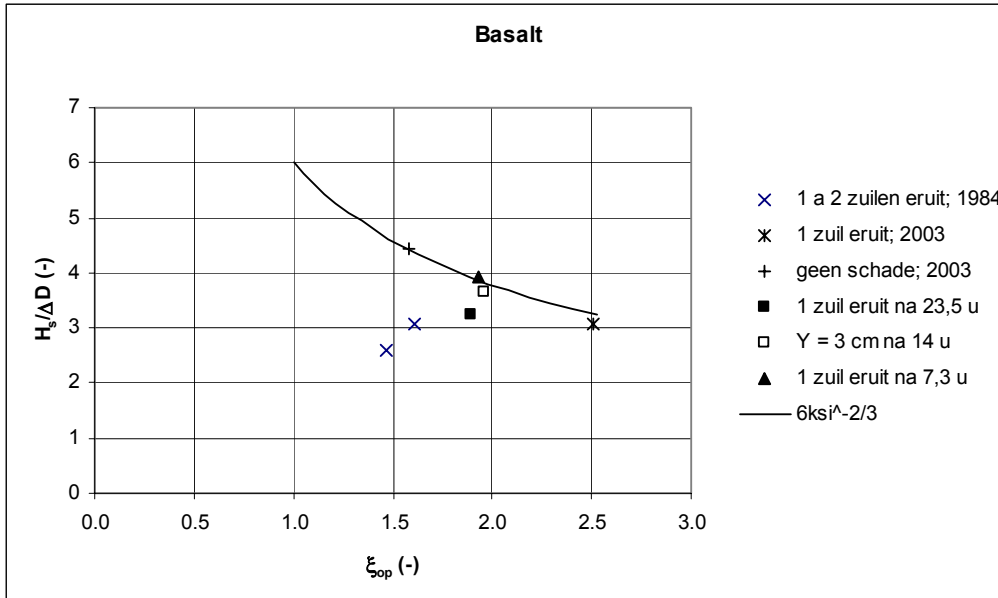
In figuur 4.4 is de grootte van de stabiliteitsparameter $F = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ gegeven als functie van de belastingduur. De waarde van F geeft aan hoe zwaar de belasting is geweest op de bekleding, t.o.v. de sterkte.



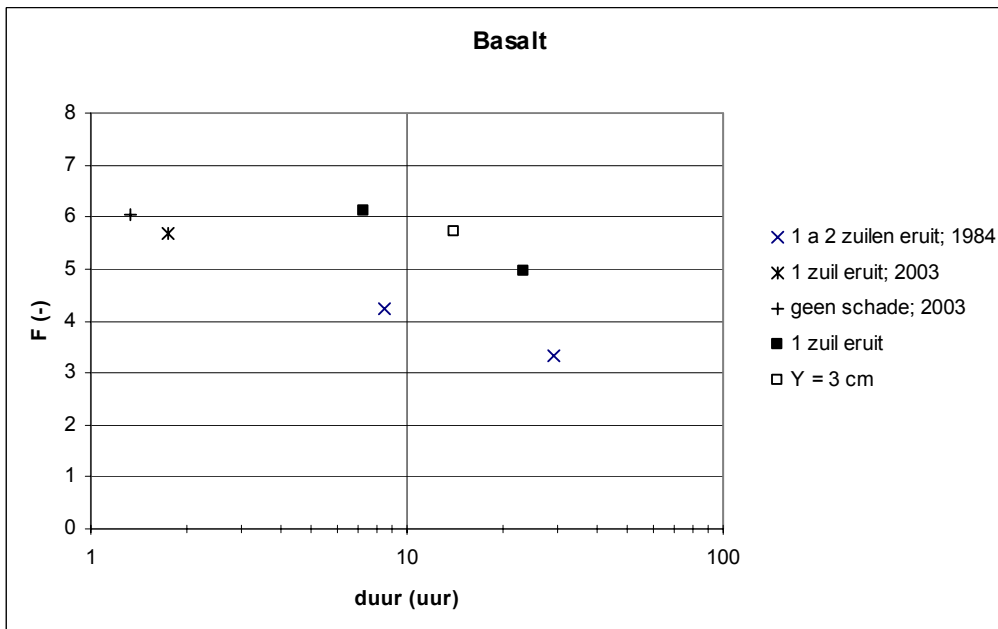
Figuur 4.4, stabiliteitsparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Basalton

Basalt

In figuur 4.5 en 4.6 zijn de proefresultaten op de basalt gegeven. In deze figuur zijn ook de resultaten van de proeven uit 2003 (Eysink e.a. 2003) op dezelfde constructie en de proeven uit 1984 (Burger 1985) op veel dikkere basalt gegeven. In 1984 betrof het een basaltbekleding van 30 cm dikte ($\Delta = 1,996$) op een talud van 1:3,5. Voor de golfcondities van die proeven wordt verwezen naar tabel B.10 in bijlage B.



Figuur 4.5, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Basalt (Y = blijvende verplaatsing van een steen)



Figuur 4.6, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Basalt

De blijvende verplaatsing van een steen t.o.v. zijn burens wordt in de legenda van de figuur aangeduid met Y.

In figuur 4.6 is duidelijk de trend te herkennen dat een toename van de duur een afname van de toelaatbare F geeft. Vooral de punten uit 1984 en 2003 enerzijds en de punten uit 2004 anderzijds lijken op een lijn te liggen. In de volgende paragraaf zal dit nader gekwantificeerd worden.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat de bekleding niet de neiging heeft om op te bollen (slechts max. 7 mm, zie paragraaf 4.2), zoals je zou verwachten bij een bekleding met grote klemming, maar er bleken afzonderlijke zuilen te zijn die geleidelijk aan steeds verder uit de bekleding werken. Zo steekt er na 3,5 uur golven in serie 3 een steen 5 cm omhoog, en slaat er uiteindelijk een steen geheel uit de bekleding na ruim 7 uur golven.

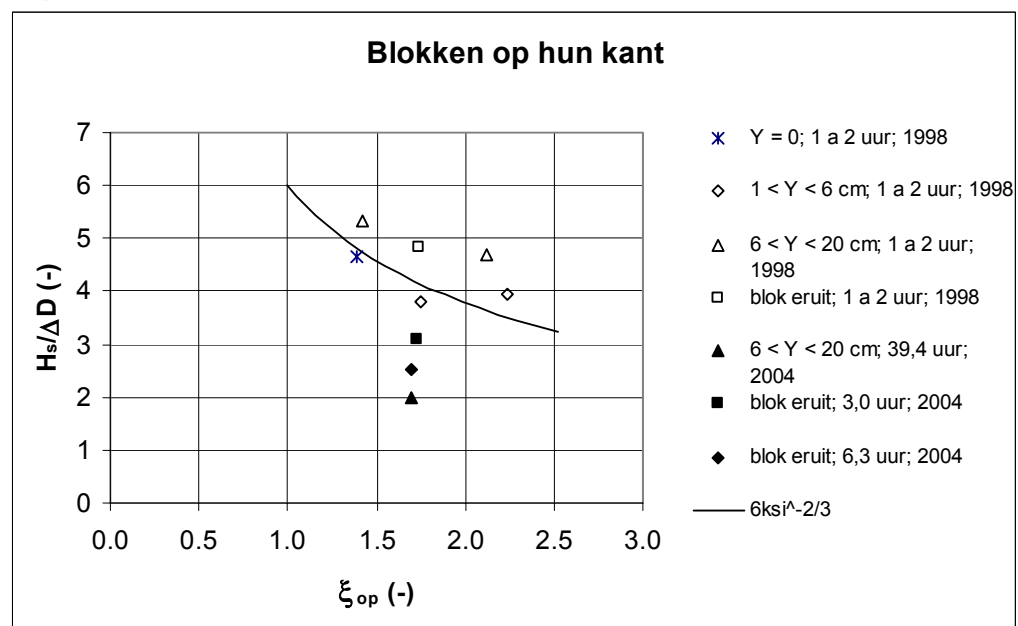
Bij het ingolven was reeds geconstateerd dat de grote variatie aan steenafmetingen ook een nadeel kent. Er zitten ook stenen tussen met een sterk tapse vorm (breed van boven en smal van onderen), die er relatief snel door de golven uit gelicht kunnen worden. Steenzetters zouden alleen de ongeveer prismatische zuilen moeten verwerken, maar controle hierop is waarschijnlijk lastig.

Blokken op hun kant

In de bekleding met blokken op hun kant waren kennelijk vele losse blokken aanwezig, omdat al bij een vrij lage belasting afzonderlijke blokken volgens het zuigermechanisme omhoog kwamen.

De thans beproefde bekleding van blokken op hun kant is zo goed mogelijk gelijk gemaakt aan de bekleding die in 1998 is beproefd (Smith e.a. 2000). Zo zijn er exact dezelfde blokjes toegepast, op een vergelijkbare filterlaag en taludhelling. Voor de golfcondities van die proeven wordt verwezen naar tabel B.11 in bijlage B.

De proefresultaten van nu en die uit 1998 zijn weergegeven in figuur 4.7 en 4.8.



Figuur 4.7, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Blokken op hun kant (Y = blijvende verplaatsing van een steen)

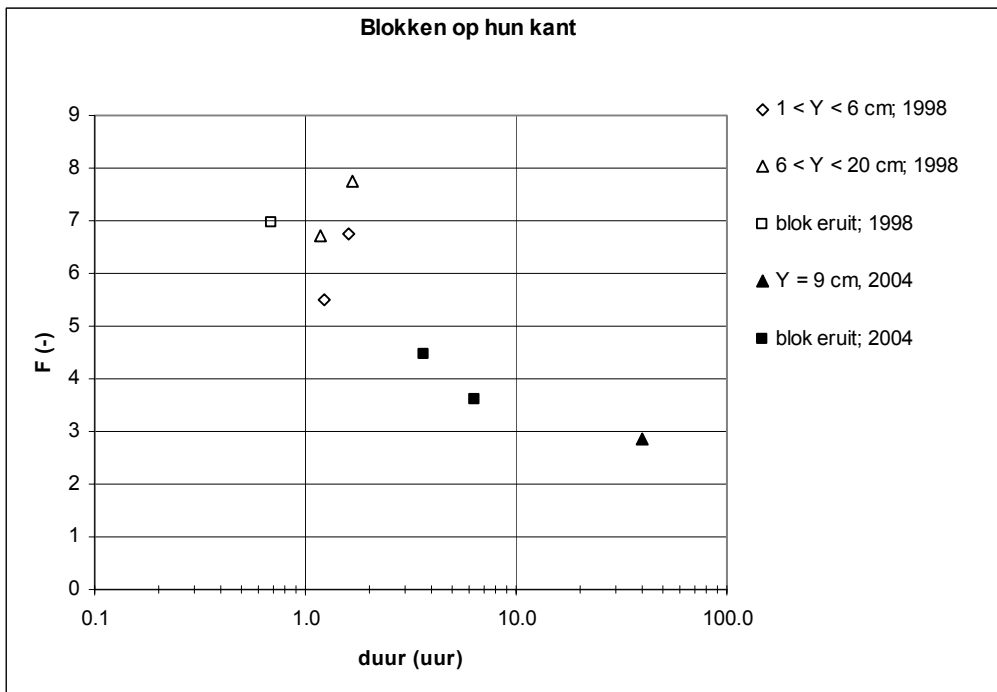
In figuur 4.7 is te zien dat de punten uit 1998 rond de 6- ξ -lijn liggen en veel hoger liggen dan de huidige meetpunten. In figuur 4.8 is een duidelijke trend zichtbaar ten aanzien van de invloed van de belastingduur. De indruk bestaat echter dat er toch belangrijke verschillen zijn tussen de constructie uit 1998 en die van 2004. Een belangrijk verschil is de spleetbreedte. In 1998 was deze 0,5 à 1,0 mm, maar in 2004 was de spleetbreedte beduidend kleiner, namelijk 0,4 à 0,7 mm.

Juist voor dit type bekleding is er een grote invloed te verwachten van de spleetbreedte. Om dit in beeld te brengen zijn een aantal ANAMOS berekeningen gemaakt voor $\xi_{op} = 1,7$, waarvan de resultaten in tabel 4.2 zijn weergegeven.

	s = 0,4 mm	s = 0,6 mm	s = 0,8 mm	s = 1,0 mm
$H_s/\Delta D = 2; F = 2,85$	instabiel	stabiel	stabiel	stabiel
$H_s/\Delta D = 3; F = 4,27$	instabiel	instabiel	stabiel	stabiel
$H_s/\Delta D = 4; F = 5,70$	instabiel	instabiel	instabiel	stabiel

Tabel 4.2, resultaten ANAMOS berekeningen met blokken op hun kant.

Op grond hiervan wordt ingeschat dat de stabiliteit van de constructie uit 2004 orde 10 à 20% lager is dan de constructie uit 1998.



Figuur 4.8, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op blokken op hun kant

Gezien deze grote gevoeligheid voor de breedte van de spleten kunnen er wel conclusies getrokken worden uit de trend in de meetpunten, maar zal men de hoogte van de bezwijkbelasting niet zomaar kunnen toepassen in de praktijk. Dit kan pas na het meten van de spleetbreedte van in de praktijk gerealiseerde constructies, waarna met ANAMOS-berekeningen de eventuele verschillen verdisconteert kunnen worden.

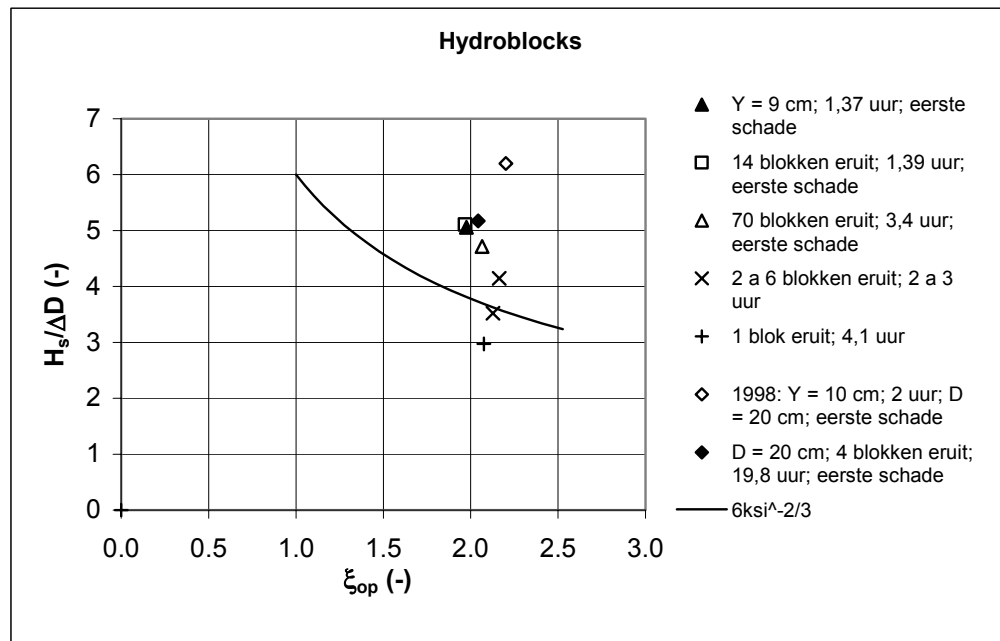
Hydroblocks

Het bezwijken van de Hydroblocks is steeds ingeleid door het ontstaan van een markante bolling in het bekledingsoppervlak. Als zo'n bolling eenmaal ontstaan is, bleek daarna binnen 1 à 2 uur schade op te treden. Soms kwamen er dan een of twee stenen uit de toplaag, maar soms barstte er een groot oppervlak open.

Op grond van dit bezwijkmechanisme bestaat de indruk dat er een grote mate van klemming in de toplaag aanwezig is, ondanks het feit dat het inwasmateriaal al vrij snel uitspoelde. Dit duidt erop dat het beton op beton contact van de verschillende blokken zeer belangrijk is voor de klemming.

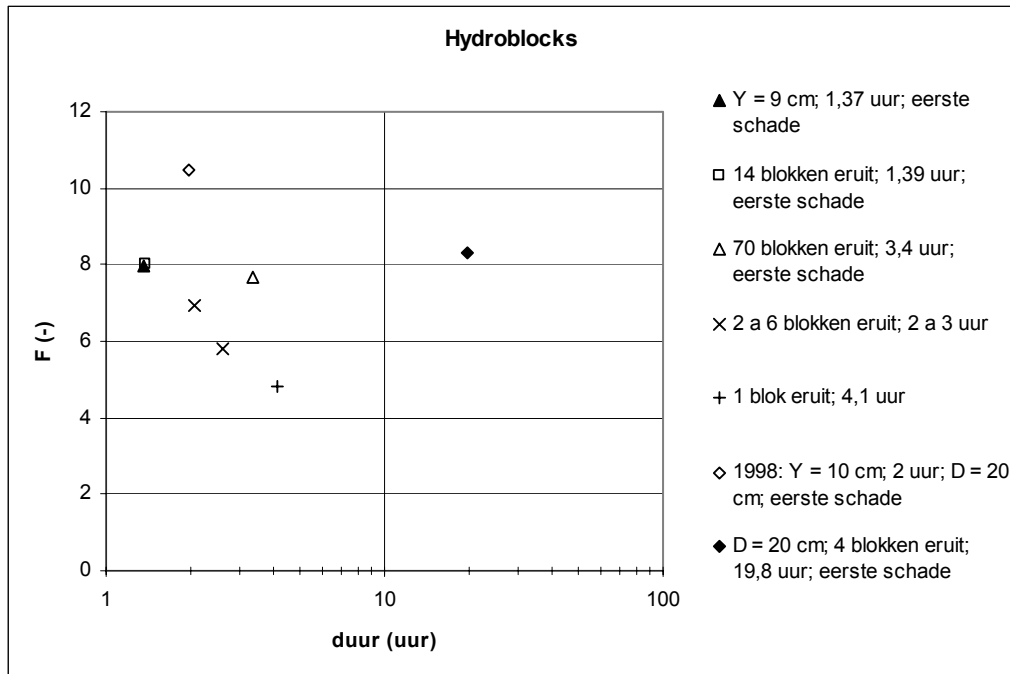
In figuur 4.9 en 4.10 zijn de resultaten van de proeven weergegeven, samen met het resultaat uit 1998 (Leeuwestein, 1998). In 1998 is in de Deltagoot een bekleding van Hydroblocks beproefd met toplaagdikte van 20 cm ($\Delta = 1,291$), op een 10 cm dikke filterlaag met $D_{f15} = 19$ mm met een talud helling van 1:3,5. De toplaag was ingewassen met steenslag met korrelgrootte van 8 tot 42 mm ($D_{15} = 9$ mm). Voor de golfcondities van die proef wordt verwezen naar tabel B.11 in bijlage B.

Als in de legenda van de figuren de dikte van het toplaag niet is vermeld, gaat het om de Hydroblock van 15 cm dikte. Als het jaartal niet is vermeld, gaat het om de proeven uit 2005.



Figuur 4.9, $H_s/\Delta D$ als functie van ξ_{op} van de proeven op Hydroblocks (Y = blijvende verplaatsing van een steen)

In de figuren is onderscheid gemaakt tussen de punten die betrekking hebben op proeven op Hydroblocks die nog niet eerder betrokken waren bij een bezwijkproef, en de Hydroblocks die al eerder in de proevenserie tot schade toe waren beproefd. Er bestaat namelijk de indruk dat de stabiliteit lager wordt als de blokken al eens eerder in een bezwijkproef zijn gebruikt. In de figuren is dat ook te zien aan de ligging van de kruisjes en de open driehoekjes, die beduidend lager liggen dan de andere punten.



Figuur 4.10, stabiliteitparameter F als functie van de belastingduur van de proeven op Hydroblocks

In paragraaf 3.4 zijn de resultaten van wrijvingsproeven gegeven, waaruit blijkt dat de wrijving tussen de blokken afneemt als ze al eens langs elkaar geschuurd zijn. Deze invloed is echter niet bijzonder groot en bovendien was de wrijving van de blokken uit het schadegebied niet significant lager dan van de nieuwe blokken. In die paragraaf is ook aangegeven dat de bolling in combinatie met betonbramen een invloed zou kunnen hebben. Als de betonbramen door de bewegingen van de blokken tijdens de schade en de handelingen tijdens het opnieuw inbouwen verdwijnen, dan blijven er bolle blokken over die slechts halverwege de hoogte onderling contact maken. Er is dan veel minder kracht nodig om de bekleding te vervormen (op te bollen) dan wanneer de blokken mooi rechthoekig zijn of tenminste twee contactpunten hebben.

Eerder in deze paragraaf is geconcludeerd dat het inwasmateriaal weinig aan de inklemming bijdraagt, en de klemming vooral ontleend wordt aan het goede beton op beton contact. De bolheid van de blokken (en de enigszins afnemende wrijving) kan daarom de werking van de klemming, en dus de stabiliteit, danig verminderen.

In figuur 4.10 is te zien dat de stabiliteit van de 20 cm dikke Hydroblocks veel hoger is dan de 15 cm dikke Hydroblocks, terwijl op de verticale as de stabiliteitsparameter F is weergegeven, waarin reeds het dikteverschil verdisconteerd zou moeten zijn. In deze parameter is immers de verhouding golfhoogte tot toplaagdikte opgenomen. Kennelijk geeft een 20/15 maal dikkere toplaag een meer dan 20/15 maal hogere bezwijkgolffhoogte.

Ook volgens ANAMOS, waarbij de gemeten constructie-eigenschappen zijn gebruikt als invoer, zou de $H_s/\Delta D$ bij bezwijken van de Hydroblockbekledingen hooguit 3% moeten verschillen.

Voor het geval dat klemming echter een belangrijke rol speelt, is door Peters (2002) vastgesteld dat de stabiliteit wat sterker afhankelijk is van de toplaagdikte dan volgt uit een los-blok-analyse (zoals in ANAMOS). Het vergroten van de dikte van de toplaag heeft dan

een grotere invloed dan volgt uit ANAMOS. De huidige proeven blijken dit te bevestigen. Hiermee is een deel van het geconstateerde verschil in stabiliteit te verklaren.

Voor het huidige onderzoek moet daarom onderscheid gemaakt worden tussen de 15 cm dikke en 20 cm dikke Hydroblocks waar het gaat om het vaststellen van de invloed van de duur van de belasting.

4.4 Belasting

4.4.1 Extreme golven

Met het langer worden van de belastingduur (terwijl H_s constant blijft) worden statistische eigenschappen van de belasting, zoals bijvoorbeeld de significante golfhoogte en de $H_{2\%}$, niet anders dan in een korte belasting van bv. 1000 golven. Er is echter wel een goede kans dat de maximale golfhoogte toeneemt. Die is namelijk afhankelijk van toeval, en naarmate de belastingduur groter wordt, is er meer kans op een toevallig grote waarde. Dit komt ook tot uiting in de formules van Battjes en Groenendijk (2000) waarmee de verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte in een golfveld van N golven kan worden berekend:

$$H_{\max} = \min \left\{ H_1 \sqrt{\ln N} ; H_2 (\ln N)^{1/3,6} \right\} \quad (4.4)$$

$$H_1 = \widetilde{H}_1 \cdot \left(0,673H_s + 0,203 \frac{H_s^2}{h} \right) \quad (\text{relevant voor relatief diep water: } H_{\max} < \widetilde{H}_{tr}) \quad (4.5)$$

$$H_2 = \widetilde{H}_2 \cdot \left(0,673H_s + 0,203 \frac{H_s^2}{h} \right) \quad (\text{relevant voor relatief ondiepwater: } H_{\max} > \widetilde{H}_{tr}) \quad (4.6)$$

$$\widetilde{H}_{tr} = \frac{(0,35 + 5,8 \tan \alpha_{\text{bodem}}) h}{0,673H_s + 0,203H_s^2 / h} \quad (4.7)$$

met:

H_{\max} = verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte (m)

N = aantal golven (-)

h = waterdiepte (m)

$\widetilde{H}_1, \widetilde{H}_2$ = dimensieloze golfhoogteparameters (-)

\widetilde{H}_{tr} = dimensieloze golfhoogteparameter betreffende de grens tussen het steile deel van de golfhoogte overschrijdingskromme en het flauwe deel (-)

H_1, H_2 = golfhoogteparameter (m)

α_{bodem} = bodemhelling voor de constructie ($^\circ$)

\widetilde{H}_1 en \widetilde{H}_2 zijn op een gecompliceerde manier afhankelijk van \widetilde{H}_{tr} . Door Battjes en Groenendijk (2000) is de relatie in tabelvorm gegeven. Teneinde de methode praktisch bruikbaar te krijgen zijn hiervoor thans benaderingen afgeleid:

$$\widetilde{H}_1 \approx 1 + 8e^{-3,5\widetilde{H}_{tr}-0,3} \quad \text{als } \widetilde{H}_{tr} > 0,15 \quad (4.8)$$

$$\widetilde{H}_2 \approx \max \left\{ 1,06 ; 0,8 + 0,28\widetilde{H}_{tr} \right\} \quad (4.9)$$

In de huidige toepassing wordt \widetilde{H}_1 alleen gebruikt als er relatief diep water is en dan geldt $\widetilde{H}_{tr} > 3$ en is $\widetilde{H}_1 \approx 1$.

Met deze benaderingen worden de formules als volgt:

$$H_{\max} = H_s \left(0,673 + 0,203 \frac{H_s}{h} \right) \cdot \min \left\{ \sqrt{\ln N} ; c_H (\ln N)^{1/3,6} \right\} \quad (4.10)$$

$$\text{met: } c_H = \max \left\{ 1,06 ; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{\text{bodem}}) h^2}{0,673 H_s h + 0,203 H_s^2} \right\} \quad (4.11)$$

In figuur 14 en 15 van bijlage A is het verloop van de maximale golfhoogte (H_{\max}) als functie van de tijd tijdens de proevenseries gegeven. Hieruit blijkt dat H_{\max} meestal toeneemt gedurende de serie, en soms gelijk blijft omdat de maximale golfhoogte al eerder in de serie was opgetreden. In de figuren is ook de berekende verwachtingswaarde van H_{\max} gegeven. De berekende waarden blijken over het algemeen goed overeen te komen met de gemeten waarden. De grootste afwijkingen zijn gevonden bij Basalton, waar de berekende H_{\max} lager was dan de gemeten waarden. Dit kan een gevolg zijn van toeval.

In figuur 17 zijn de gemeten waarden van H_{\max} uitgezet tegen de berekende waarden. Ook uit deze figuur blijkt dat de rekenmethode goed voldoet.

In figuur 16 zijn de gemeten relatieve hoogten van de maximale golfhoogte, H_{\max}/H_s , de op 10 naar hoogste golven, $H_{\max-10}/H_s$, en de op 50 na hoogste golven, $H_{\max-50}/H_s$, gegeven als functie van het aantal golven in de proef. Merk op dat in deze figuur elk puntje een afzonderlijke proef weergeeft, en dat er geen hele series zijn weergegeven. Het valt in deze figuur op dat de spreiding van H_{\max}/H_s veel groter is dan die van $H_{\max-10}/H_s$ en $H_{\max-50}/H_s$. Dat is logisch, omdat de laatste twee veel minder beïnvloed worden door het toeval.

Verder is in deze figuur onderscheid gemaakt tussen proeven met relatief diep water ($h/H_s > 3,5$), en wat ondieper water. De meeste punten onderin de puntenwolk betreffen de proeven met relatief ondiep water, maar ook bovenin de puntenwolk komen proeven voor met relatief ondiep water.

Met het toenemen van de proefduur is duidelijk te zien dat ook de H_{\max}/H_s , $H_{\max-10}/H_s$ en $H_{\max-50}/H_s$ toenemen. De waarden lijken van 1000 golven (normale proefduur) naar 10,000 golven toe te nemen met ongeveer 25 à 30%, maar dat is slechts schijn. De werkelijke toename is slechts 10 à 20% als gevolg van het toenemen van de proefduur, en de rest van de toename is een gevolg van het feit dat de proeven met meer dan 7000 golven zijn uitgevoerd met relatief diep water. De grotere waterdiepte geeft ook een toename van H_{\max} .

Deze invloed van de belastingduur op de grootte van de belasting kan in de analyse goed meegenomen worden door de belasting te karakteriseren door de grootte van H_{\max} in plaats van H_s .

4.4.2 Sommatie van belastingduren met verschillende golfcondities

Een proevenserie bestaat steeds uit een aantal proeven die uiteindelijk geleid hebben tot schade. De golfcondities tijdens deze proeven waren niet allemaal exact gelijk. Vooral de

ingolfproef was uitgevoerd met wat lagere golven, maar ook de andere proeven zijn uitgevoerd met verschillende condities.

Om toch een relatie te kunnen leggen tussen de grootte van de golfcondities enerzijds en de opgetreden schade anderzijds, is gezocht naar een manier waarop een aantal uren golfbelasting met de ene significante golfhoogte opgeteld kan worden bij een belastingduur met een andere golfhoogte.

Daarvoor is aangenomen dat in het eerste deel van het degeneratieproces, waarbij het inwasmateriaal uitspoelt, de golfhoogte nog niet zo erg belangrijk is. Een periode met een belasting met wat lagere golfhoogte zal dan simpelweg opgeteld kunnen worden bij een erna komende periode met hogere golfhoogte, mits deze golfhoogten niet te veel verschillen (minder dan bv. 20 à 30%).

Zodra het inwasmateriaal verdwenen is, zal de golfhoogte waarschijnlijk belangrijker worden, omdat dan grote verschildrukken nodig zijn om stenen op te lichten. Maar in dat stadium van de proevenserie zijn de golfcondities meestal nauwelijks meer veranderd.

Op basis van deze overwegingen is aangenomen dat het gewogen gemiddelde van de golfhoogte $(t_1 H_{s1} + t_2 H_{s2}) / (t_1 + t_2)$ en de som van de belastingduren $(t_1 + t_2)$ kunnen worden aangehouden.

4.4.3 Invloed van toenemende hoogte van de waterstand

Ten aanzien van de belastingduur tijdens de proeven moet er ook rekening gehouden worden met het feit dat de waterstand tijdens de series niet constant was. Als de waterstand zo snel stijgt dat na verloop van tijd een geheel nieuw stuk steenzetting belast wordt, is de feitelijke belastingduur kleiner dan de totale duur van de proevenserie. Het gaat hierbij om de verandering van de waterstand t.o.v. de breedte van de zone die zwaar belast wordt. Dit laatste is gekwantificeerd door de maximale gediptheid tijdens de golfklappen in een aantal oude proeven te analyseren. Het resultaat ervan is gegeven in figuur G6 in bijlage G. Bij de brekerparameters van de huidige proeven ($1,7 < \xi_{op} < 2,4$) heeft de zone met de grootste belasting (maximale gediptheid) een hoogte van ongeveer $0,5H_s$, terwijl ook buiten deze zone de belasting nog aanzienlijk is. In tabel 4.3 is dit vergeleken met de waterstandsverandering tijdens de proevenseries.

Uit deze tabel blijkt dat tijdens de meeste series de waterstandsverandering veel kleiner was dan de hoogte van de maximaal belaste zone. Alleen tijdens de proevenserie op Basalton, de derde serie van de blokken op hun kant en de zesde serie met Hydroblocks van 20 cm dikte is de waterstandsverandering zo groot geweest, dat tijdens het eerste deel van de proevenserie een totaal ander deel van de bekleding belast is geweest dan tijdens het laatste deel.

Als gekeken wordt naar de belastingsduur gedurende een waterstandsverandering van ten hoogste de helft van de belaste zone, dan blijkt dit voor Basalton 34 uur te zijn, voor de derde serie van de blokken op hun kant 26 uur en voor de zesde serie met Hydroblocks 13 uur. De volledige duur van deze proevenseries was respectievelijk 51 uur, 40 uur, en 20 uur. Zoals in paragraaf 3.1 is aangegeven, is het op dit moment nog niet goed mogelijk een uitspraak te doen over de invloed van de variërende waterstand op de langeduursterkte. Daarom kan er ook geen keuze gemaakt worden tussen het beschouwen van de volledige proefduur, of een gereduceerde proefduur. Daarom wordt de analyse voortgezet met beide

varianten om te zien of de uiteindelijke conclusie er erg afhankelijk van is. In de volgende paragraaf blijkt dat dit niet het geval is.

bekleding	serie	H _s (m)	hoogte zone max. belasting (m)	max. waterstandsverschil (m)
basalton		1,38	0,69	0,82
basalt	1	1,27	0,63	0,43
basalt	2	1,43	0,72	0,41
basalt	3	1,54	0,77	0,18
blokken	1	0,82	0,41	0,01
blokken	2	0,66	0,33	0,01
blokken	3	0,53	0,26	0,42
hydroblock	1	1,09	0,55	0,00
hydroblock	2	1,01	0,50	0,00
hydroblock	3	0,89	0,44	0,00
hydroblock	4	0,75	0,38	0,10
hydroblock	5	0,64	0,32	0,19
hydroblock	6	1,11	0,55	0,59

Tabel 4.3, hoogte van de maximaal belaste zone in vergelijking tot de maximale waterstandsverandering tijdens de proevenseries

4.4.4 Golfcondities vlak voor het moment van schade

De indruk zou kunnen ontstaan dat de bekleding bezwijkt op het moment dat de grootste golven langs zijn gekomen. Er zijn verschillende vormen van bezwijkgedrag denkbaar:

- Bros bezwijken zonder vermoeiing: de bekleding kan oneindig veel golven weerstaan zolang ze een kleinere belasting geven dan de sterkte. De golven die een grotere belasting geven dan de sterkte veroorzaken direct bezwijken
- Taai bezwijken zonder vermoeiing: de bekleding kan oneindig veel golven weerstaan zolang ze een kleinere belasting geven dan de sterkte. De golven die een grotere belasting geven dan de sterkte veroorzaken een grote vervorming, die op den duur leidt tot bezwijken.
- Bezwijken door vermoeiing: elke golf draagt bij aan het degeneratieproces en uiteindelijk kan er bezwijken optreden door zeer vele kleine golven, of enkele zeer grote golven.

Om hierover uitsluitsel te geven zijn in tabel B.9 de golfgegevens bijeengebracht van het laatste deel van de proeven die geleid hebben tot schade. Steeds zijn de laatste vijftig golven geanalyseerd en is daarvan de significante golfhoogte bepaald, de grootste golfhoogte, de één na de grootste en twee na de grootste golf.

Het blijkt dat tijdens de helft van de proevenseries de significante golfhoogte in de laatste vijftig golven iets hoger is, maar in de andere helft iets lager is dan in de rest van de proevenserie. Gemiddeld is de significante golfhoogte in de laatste vijftig golven slechts 1% hoger geweest dan in de hele serie. Dit is een verwaarloosbaar klein verschil.

Verder is in de tabel te zien dat de grootste golven in de laatste vijftig golven veel kleiner zijn dan de grootste golven uit de hele proevenserie. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de golfcondities tijdens de laatste vijftig golven niet zodanig waren dat hieruit de schade verklaard kan worden. Er is daarom veel meer een proces gaande van geleidelijke degeneratie die uiteindelijk uitmondt in schade, vergelijkbaar met een vollopende emmer die uiteindelijk overloopt. Waarschijnlijk dragen de kleinste golven niet bij aan het degeneratieproces en dragen de grootste extra veel bij. De bezwijkvorm is daarmee een combinatie van bezwijken door vermoeiing en taai bezwijken zonder vermoeiing.

Uitgaande van de constatering dat het degeneratieproces vooral snel voortschrijdt tijdens de belasting met de hoogste golven, terwijl de laagste helft van de golven nauwelijks bijdragen, maakte dat het golfveld gekarakteriseerd moet worden met een parameter die de grootte van de grote golven weergeeft. De significante golfhoogte, die gelijk is aan het gemiddelde van de hoogste eenderde deel van de golven, dicht waarschijnlijk nog te veel waarde toe aan de wat lagere golven. Andere parameters, zoals H_{max} , H_{max-10} , of het gemiddelde van de hoogste 50 golven lijken een betere maat.

Wel moet opgemerkt worden dat deze analyse is gebaseerd op de inkomende golfhoogte op ongeveer 70 meter van de constructie. Hoewel er een hoge correlatie is te verwachten met het stijghoogteverschil over de toplaag, zou een analyse daarvan de voorkeur hebben gehad. Helaas zijn die tijdens deze proeven niet gemeten.

4.5 Kwantificering van de toenemende belasting en de afnemende sterkte

4.5.1 Inleiding

In de vorige paragrafen is vastgesteld dat er verschillende processen spelen m.b.t. de belasting en de sterkte tijdens de geleidelijke degeneratie van de steenzetting onder invloed van de langdurige golfbelasting. Dit is deels afhankelijk van het type bekleding:

- Basalt: eerst uitspoeling van inwasmateriaal en verschuiving van de zuilen in het vlak van het talud, en later werken afzonderlijke zuilen zich gedurende enkele uren omhoog om uiteindelijk uit de toplaag gelicht te worden.
- Blokken op hun kant: afzonderlijke blokken gaan op en neer bewegen, waarbij er tevens migratie van filtermateriaal optreedt dat voorkomt dat afzonderlijke blokken weer helemaal terug kunnen zakken. Uiteindelijk is de beweging zo groot dat een blok uit de toplaag gelicht wordt.
- Hydroblocks: het inwasmateriaal spoelt vrij snel uit en vele uren later gaat de bekleding opbollen, waarna afzonderlijke blokken eruit gelicht worden of een grote groep blokken opbarst. Tijdens het opbollen neemt lokaal de filterlaagdikte toe en wordt dus ook de lek lengte groter ($\Lambda = \sqrt{(bDk/k')}$). Daardoor zal ook het stijghoogteverschil over de toplaag toenemen en de stabiliteit afnemen.

- Algemeen ten aanzien van de belasting: de verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte neemt toe met de duur van de belasting.

De Basalton was niet bezweken, en kan er dus weinig over het degeneratieproces gezegd worden.

In deze paragraaf is getracht een rekenmethode op te stellen voor het bepalen van de bezwijkbelasting (golfhoogte en golfperiode) als functie van de belastingduur. Daartoe is eerst de aandacht gericht op de invloed van de belastingduur op de grootte van de belasting (H_{\max}) en vervolgens is de relatie tussen de belastingduur en de sterkte in formulevorm samengevat op basis van de beschikbare metingen. Uiteindelijk worden de formules voor belasting en sterkte gecombineerd in een voorgestelde rekenmethode.

4.5.2 Kwantificering van de invloed op de belasting

Ten einde rekening te houden met de invloed van de belastingduur op de belastinggrootte, zoals omschreven in paragraaf 4.4, wordt in deze analyse gebruik gemaakt van de maximale golfhoogte, H_{\max} , voor het beschrijven van de belastinggrootte. Deze parameter karakteriseert de grootste golven in het golfveld beter dan de significante golfhoogte, die het gemiddelde is van de hoogste eenderde deel van de golven. Andere parameters, zoals $H_{\max-10}$ of het gemiddelde van de hoogste 50 golven, zouden ook gebruikt kunnen worden, maar hebben als nadeel dat ze lastiger te bepalen zijn. Gezien het feit dat de meetgegevens waarop de rekenmethode gebaseerd moet worden vrij beperkt zijn, is het niet logisch om een erg verfijnde parameter voor het karakteriseren van de belasting te kiezen.

De maximale golfhoogte wordt beschouwd in relatie tot het eigengewicht van de toplaag: ΔD . Daarnaast is de wijze waarop de golven breken op het talud van belang. Voor het karakteriseren hiervan wordt gebruikgemaakt van de brekerparameter. Deze wordt nog voorlopig op de gebruikelijke wijze gedefinieerd: $\xi_{op} = \tan\alpha / \sqrt{(H_s / (1,56T_p^2))}$.

In de analyse wordt gebruikgemaakt van de stabiliteitsparameter, F_m , die een combinatie is van de dimensieloze maximale golfhoogte, $H_{\max}/\Delta D$, en de brekerparameter:

$$F_m = \xi_{op}^{2/3} \frac{H_{\max}}{\Delta D} \quad (4.12)$$

met: F_m = stabiliteitsparameter op basis van de maximale golfhoogte (-)

Voor het karakteriseren van de duur van de belasting wordt gebruikgemaakt van het aantal golven, N . Het voordeel hiervan ten opzichte van de duur in uren, is dat dit een dimensieloze grootte is en derhalve niet beïnvloed wordt door de schaal van de proeven.

De grootte van H_{\max} kan berekend worden met de formules uit paragraaf 4.4.

4.5.3 Kwantificering van de invloed op de sterkte

De sterkte van de steenzetting loopt tijdens de langdurige belasting geleidelijk terug als gevolg van een degeneratieproces.

Dit degeneratieproces start met een relatief snel verlopende uitspoeling van het inwasmateriaal. Dit zal in een figuur met de stabiliteitsparameter als functie van de duur, zoals figuur 4.8, tot uiting komen in een wat steilere lijn bij kleine belastingduren, en een wat vlakke lijn bij grote belastingduren.

Daarnaast zal er ongetwijfeld een belastingniveau $H_{\max}/\Delta D$ (of stabiliteitsparameter, F_m) zijn dat zelfs bij een onbeperkte belastingduur weerstaan kan worden. Als namelijk de golven een stijghoogteverschil geven dat kleiner is dan het eigen gewicht van de stenen, zal er geen schade ontstaan. Dit zal in een figuur met de stabiliteitsparameter, F_m , als functie van de duur tot uiting komen in een horizontale asymptoot.

Met het bovenstaande in gedachte is de trend van F_m als functie van N beschreven met twee rechte lijnen op half-logaritmisch papier (bi-lineaire relatie tussen F_m en $\log N$):

$$F_m = F_{m1000} \cdot \max \left\{ 1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2 \right\} \quad (4.13)$$

met:

- F_m = $\xi_{op}^{2/3} \cdot H_{\max}/(\Delta D)$ = Stabiliteitsparameter bij begin van schade (-)
- F_{m1000} = Stabiliteitsparameter bij begin van schade bij $N = 1000$, gebaseerd op H_{\max} (-)
- N = Aantal golven (= $t/T_m \approx 1,1 \cdot t/T_p$) (-)
- T_m = Gemiddelde golfperiode (s)
- t = Duur van de belasting (s)
- c_1 en c_2 = Coëfficiënten die afhankelijk zijn van het type bekleding (-)

De waarden van c_1 en c_2 zijn afhankelijk van het type bekleding en zijn onderstaand bepaald aan de hand van de meetresultaten. In deze formule is $c_1 \cdot F_{m1000}$ de helling van de dalende tak in de halflogaritmische figuur van F_m tegen N (zoals figuur 4.11). De $c_2 \cdot F_{m1000}$ is de minimale stabiliteit bij $N = \infty$.

Basalton wordt als laatste behandeld, omdat tijdens de proeven geen schade is ontstaan en het daardoor moeilijk is om de trend vast te stellen.

Bepaling c_1 en c_2 per toplaagtype

In figuur 4.11 zijn de beschikbare meetpunten voor basalt weergegeven. De metingen uit 1984 zijn er nu niet bij, omdat van die proeven de maximale golfhoogte niet beschikbaar is. Voor het bepalen van de trendlijn is rekening gehouden met het feit dat de schade uit 2003 verkregen is op een basaltbekleding die nog niet op zijn eindsterkte was gekomen. De korteduursterkte is dus hoger dan het sterretje in de figuur. De trendlijn start voor 1000 golven bij $F_m = 11,3$, hetgeen overeenkomt met $F = 7$. De verhouding $H_{\max}/H_s \approx 1,6$ omdat tijdens de proeven de waterdiepte ongeveer driemaal de significante golfhoogte was. Er geldt dan ook dat $F_m/F \approx 1,6$.

Vervolgens is de trendlijn door de drie meetpunten getrokken, waarbij ook alvast rekening gehouden is met de metingen op Hydroblocks. Gezien het feit dat basalt, Hydroblocks en Basalton vergelijkbare bekledingsystemen zijn, kan men verwachten dat er ongeveer een vergelijkbare trendlijn van toepassing is.

Dit leverde het volgende op:

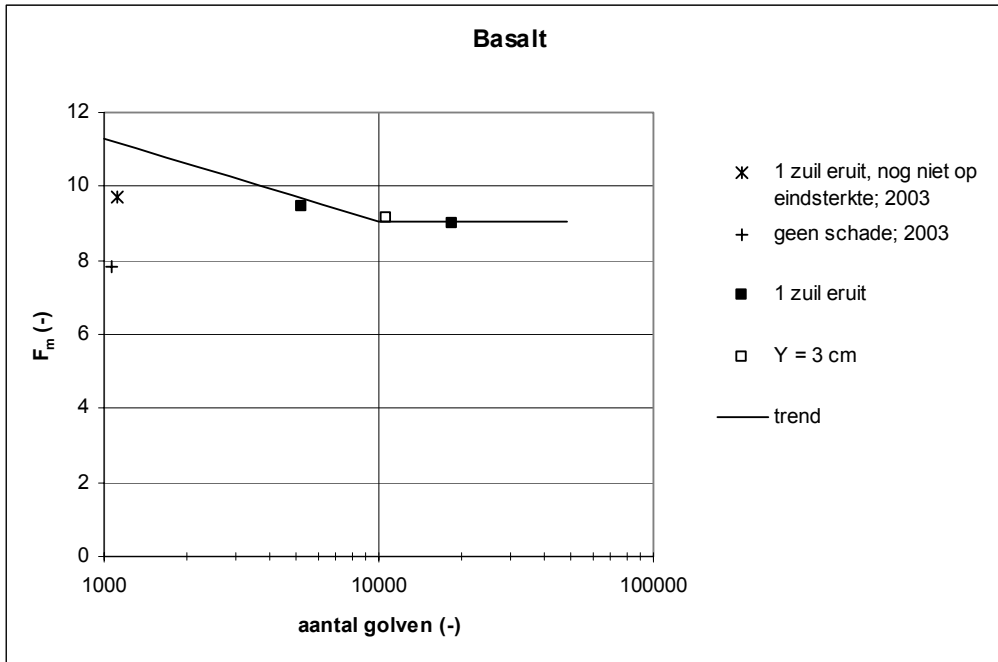
$$F_m = 11,3 \cdot \max \left\{ 1 - 0,2 \cdot \log \frac{N}{1000}; 0,8 \right\} \quad (4.14)$$

Voor basalt geldt derhalve: $F_{m1000} \approx 11,3$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$.

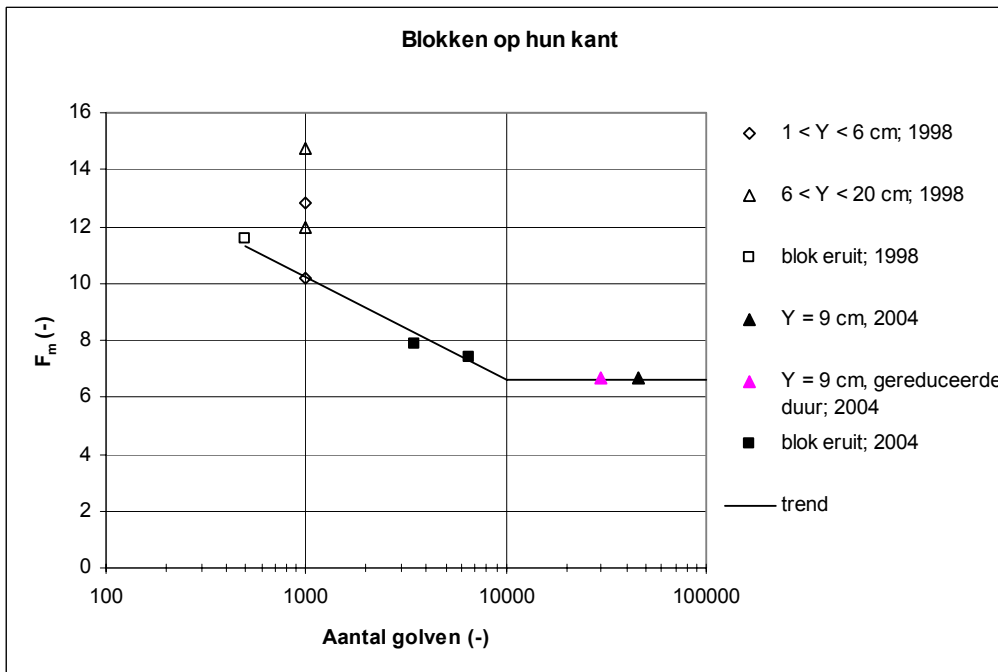
Teneinde te controleren of het gebruik van H_{\max} wel het beste resultaat oplevert, zijn in figuur 9 (in bijlage A) de meetpunten nogmaals uitgezet, maar dan tegen het aantal golven dat groter is dan 1,0 m. In figuur 9 is dit ook gedaan als functie van respectievelijk het aantal

golven dat groter is dan 1,25 m en 1,5 m. Merk op dat in deze figuur gebruikgemaakt is van F op basis van H_s .

Dit levert echter geen betere trend op in de meetpunten.



Figuur 4.11, resultaten van de proeven op basalt



Figuur 4.12, resultaten van de proeven op blokken op hun kant

In figuur 4.12 zijn de resultaten van de proeven met blokken op hun kant gegeven, samen met een trendlijn met $F_{m1000} = 10,2$, $c_1 = 0,35$ en $c_2 = 0,65$. De lijn ligt bij $N = 1000$ (duur

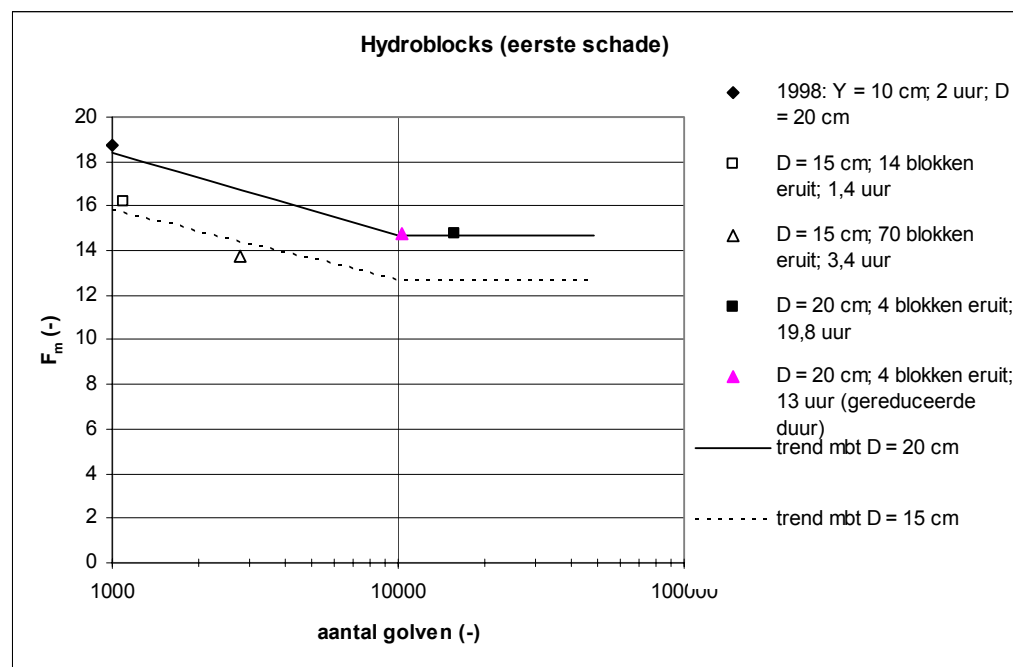
van een normale korteduurproef) wat lager dan de schadepunten uit 1998. Dit is toegelicht in de paragraaf 4.3.

De waarde van F_{m1000} komt overeen met een $F_{1000} \approx 5,9$, gegeven het feit dat de waterdiepte ongeveer 5 à 8 maal de significante golfhoogte was.

De proef uit 2004, die weergegeven is met een dichte driehoek, is tweemaal in de figuur gezet: eenmaal met de volledige proefduur, en eenmaal met een gereduceerde duur. In de vorige paragraaf is aangegeven dat door de stijgende waterstand het niet eenvoudig is om aan te geven wat de precieze belastingduur van afzonderlijke blokken geweest is. Daarom is het punt weergegeven met de totale duur van de proef, en de geschatte duur dat de belasting daadwerkelijk op het langdurigst belaste blok aanwezig was. Deze punten liggen zo dicht bij elkaar, en bovendien in het vlakke deel van de trendlijn, dat het kiezen voor een van beide geen invloed heeft op de resulterende trendlijn.

In figuur 10 (in bijlage A) zijn de meetpunten nogmaals uitgezet, maar dan tegen het aantal golven dat groter is dan respectievelijk 1,0 m, 1,25 m en 1,5 m. Merk op dat in deze figuur gebruikgemaakt is van F op basis van H_s .

Dit levert echter geen betere trend op in de meetpunten.



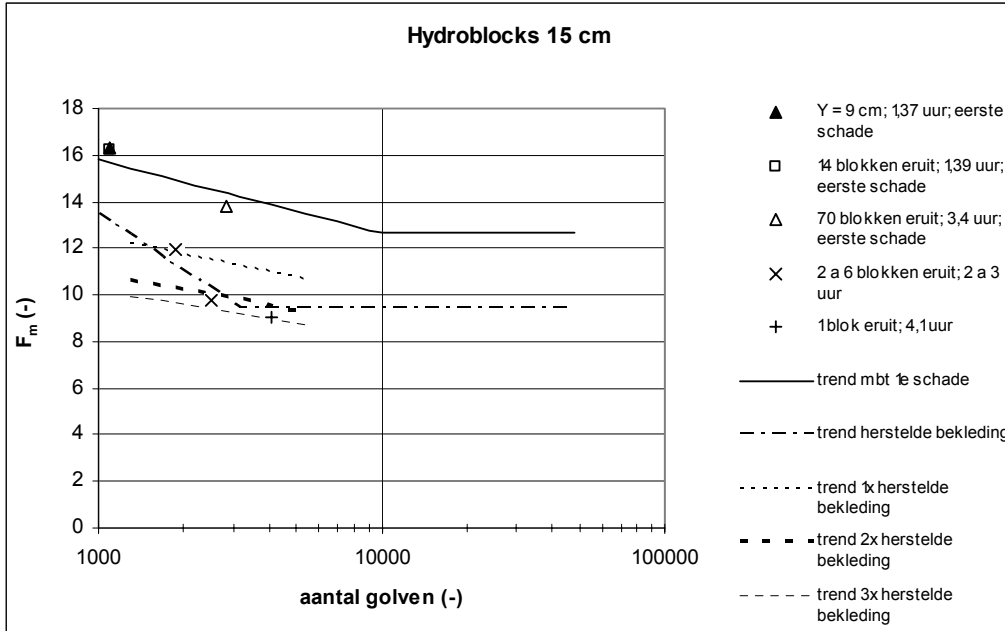
Figuur 4.13, resultaten van de proeven op Hydroblocks (alleen eerste schade op ongebruikte blokken)

Met betrekking tot de Hydroblocks is in paragraaf 4.3 geconcludeerd dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen blokken die voor het eerst gebruikt zijn, en blokken die al eerder in een proef zijn gebruikt waarbij schade is opgetreden. In figuur 4.13 zijn de meetpunten gegeven van de proeven met nog niet eerder gebruikte Hydroblocks. Verder is er onderscheid gemaakt tussen de Hydroblocks van 20 cm en van 15 cm.

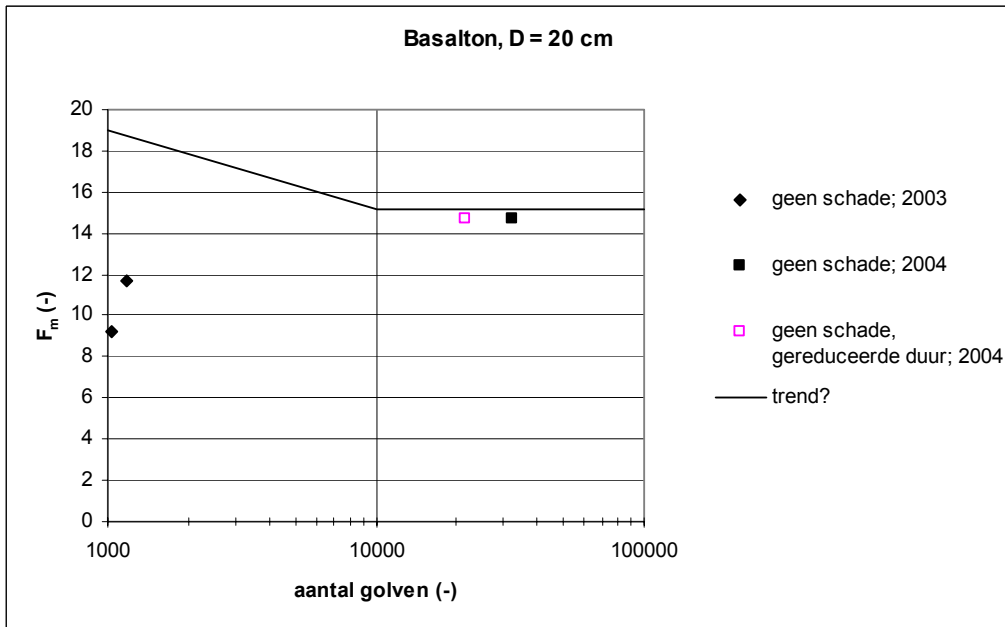
Het blijkt mogelijk te zijn om dezelfde waarden van c_1 en c_2 toe te passen als bij basalt. Alleen de waarde van F_{m1000} is nu beduidend hoger:

- Hydroblocks van 20 cm dikte: $F_{m1000} \approx 18,4$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$

- Hydroblocks van 15 cm dikte: $F_{m1000} \approx 15,8$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$
Omdat $h/H_s \approx 4$ voor de Hydroblocks van 20 cm en $h/H_s \approx 5$ à 7 voor die van 15 cm, komt dit overeen met respectievelijk $F_{1000} \approx 11$ en 9.



Figuur 4.14, resultaten van de proeven op Hydroblocks van 15 cm



Figuur 4.15, resultaten van de proeven op Basalton en trendlijn van Hydroblocks van 20 cm

In figuur 4.14 zijn alle proefresultaten met Hydroblocks van 15 cm verzameld, inclusief de proeven met hergebruikte Hydroblocks, die al eerder in een beschadigde bekleding gezeten hebben. We zien in deze figuur dat de bezwijkbelasting voor de hergebruikte Hydroblocks heel sterk afneemt met toenemende belastingduur ($F_{m1000} \approx 13,5$, $c_1 \approx 0,6$ en $c_2 \approx 0,7$). Het is

echter denkbaar dat er niet één trend, maar drie trends in de figuur zitten, namelijk die voor eenmaal ($F_{m1000} \approx 12,5$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$), tweemaal ($F_{m1000} \approx 10,9$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$) of driemaal ($F_{m1000} \approx 10,2$, $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$) hergebruikte Hydroblocks. Gezien de ligging van de meetpunten lijkt dit de meest plausibele conclusie, maar anderzijds lijkt het wel minder waarschijnlijk dat de stabiliteit bij elke keer opnieuw hergebruiken weer verder afneemt.

Zoals in paragraaf 4.3 is uitgelegd, is deze afnemende stabiliteit waarschijnlijk een gevolg van de bolling van de blokken in combinatie met betonbramen. Gezien het feit dat gestreefd moet worden naar zo recht mogelijke blokken zonder betonbramen, waarbij dit verschijnsel waarschijnlijk niet optreedt, wordt hier niet getracht deze problematiek verder op te lossen.

In figuur 4.15 zijn de resultaten van de proeven op Basalton gegeven. Omdat bij geen van de proeven schade is opgetreden, zal de lijn met maximaal toelaatbare waarden van F_m boven de meetpunten moeten liggen. Voorlopig is dezelfde lijn getekend als voor Hydroblock van 20 cm. Het is echter niet te zeggen of deze lijn ook toepasbaar is op Basalton.

4.5.4 Rekenmethode voor het schatten van de stabiliteit bij langdurige belasting

De geconstateerde trend in de meetpunten kan gebruikt worden voor het maken van een voorlopige schatting van de teruglopende stabiliteit als functie van de belastingduur. Helaas moet geconstateerd worden dat er nog onvoldoende theoretische basis is om met een beperkt aantal meetpunten definitieve conclusies te kunnen trekken.

Mocht men desondanks een indruk willen hebben van de invloed van de belastingduur op de stabiliteit, dan kan dit als volgt geschat worden. Onderstaand wordt eerst vrij uitvoerig stap voor stap de rekenmethode weergegeven, en daarna nog eens kort samengevat waarbij verschillende stappen in het rekenproces zijn samengevoegd.

Steeds is uitgegaan van de veronderstelling dat de golfcondities tijdens de storm constant blijven. Dit is conform de eenvoudige toetsing volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV '04), maar levert een overschatting van de belasting. In werkelijkheid zal tijdens de storm de golfhoogte geleidelijk aan toenemen tot een maximum dat ongeveer 4 uur aanhoudt, en daarna weer afnemen.

Het schatten van de stabiliteit bij langdurige belasting start bij het bepalen van de waarde van F_{1000} met de gebruikelijke rekenmodellen, zoals ANAMOS, echter zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel. Dit betekent dat F_{1000} groter mag zijn dan 6, waarbij F_{1000} als volgt gedefinieerd is:

$$F_{1000} = \xi_{op}^{2/3} \frac{H_{sA}}{\Delta D} \quad (4.15)$$

met: H_{sA} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS (m)

Vervolgens kan de waarde van F_{m1000} als volgt berekend worden:

$$F_{m1000} = F_{1000} \left(0,673 + 0,203 \frac{H_{sA}}{h} \right) \cdot \min \left\{ \sqrt{\ln 1000} ; c_H (\ln 1000)^{1/3,6} \right\} \quad (4.16)$$

met:

$$c_H = \max \left\{ 1,06 ; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{bodem}) h^2}{0,673 H_{sA} h + 0,203 H_{sA}^2} \right\} \quad (4.17)$$

α_{bodem} = bodemhelling voor de constructie ($^{\circ}$)
 h = waterdiepte (m)

Door gebruik te maken van de H_{max} als belastingkarakteriserende parameter wordt rekening gehouden met het toenemen van de grootte van de belasting bij toenemende belastingduur.

Daarna kan de waarde van F_m voor een belasting van N golven berekend worden:

$$F_{mN} = F_{m1000} \cdot \max \left\{ 1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2 \right\} \quad (4.18)$$

met:

$$F_{mN} = \xi_{\text{op}}^{2/3} \cdot H_{\text{max}} / (\Delta D) = \text{stabiliteitsparameter gebaseerd op de maximale golfhoogte tijdens een belasting met } N \text{ golven (-)}$$

Het aantal golven, N , kan berekend worden door de verwachte belastingduur (zie bijlage G) te delen door de gemiddelde golfperiode: $t/T_m \approx 1,1 \cdot t/T_p$.

Formule (4.18) verdisconteert de invloed van de sterkte-afname als functie van de belastingduur.

Voor c_1 en c_2 worden de volgende waarden geadviseerd, gebaseerd op de recente proeven:

- Basalt en Hydroblocks: $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$
- Blokken op hun kant: $c_1 \approx 0,35$ en $c_2 \approx 0,65$
- Gezien het feit dat de Basalton niet bezweken is, kon geen waarde bepaald worden van c_1 en c_2 . Eventueel kan voorlopig gebruik gemaakt worden van dezelfde waarde als voor Hydroblocks.

De waarden voor Hydroblocks zijn afgeleid voor rechte blokken (niet bol) zonder betonbramen.

Vervolgens kan dit resultaat weer omgerekend worden naar F_N (gedefinieerd met de significante golfhoogte):

$$F_N = \min \left\{ 6; \frac{F_{mN}}{\left(0,673 + 0,203 \frac{H_{sA}}{h} \right) \cdot \min \left\{ \sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6} \right\}} \right\} \quad (4.19)$$

In deze laatste formule is tevens de 6-ksi-regel opgenomen. Met deze formule wordt de invloed van de belastingduur op de belastinggrootte verdisconteert.

Dit leidt uiteindelijk tot de toelaatbare belasting bij een belastingduur van N golven:

$$\left[\frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{toelaatbaar bij } N \text{ golven}} = F_N \xi_{\text{op}}^{-2/3} \quad (4.20)$$

In bovenstaande procedure wordt dus eerst de invloed van de langeduurbelasting verdisconteerd, en dan pas wordt de 6-ksi-regel toegepast. Deze volgorde is zo gekozen omdat dit in overeenstemming is met het verdisconteren van de invloed van de lange leklengte. Het is gebruikelijk om altijd eerst een ANAMOS berekening te maken, gericht op het bepalen van de stabiliteitreducerende werking van de lange leklengte en pas daarna te controleren of de berekende stabiliteit leidt tot $F_{1000} > 6$. Aanbevolen wordt dezelfde systematiek te hanteren voor de langeduurbelasting.

In tabel 4.4 is een fictief voorbeeld uitgewerkt waarin de invloed van de langeduurbelasting volgens deze procedure is te zien. In dit voorbeeld is gewerkt met $h/H_s = 3$ en een belastingduur van 3000 golven (ongeveer 5 uur) en 20.000 golven (ongeveer 25 à 30 uur), hetgeen representatief is voor respectievelijk de Westerschelde ($T_p \approx 7$ s; $P_{toets} = 5,8$ m; $R_{getij} = 4,0$ m) en de Oosterschelde ($T_p \approx 5,5$ s).

	Westerschelde		Oosterschelde	
	zuilen	blokken	zuilen	blokken
$z_{belasting} = 0,4H_s\xi_{op}$ (zie §G.4)	1,8	1,8		
belastingduur (formule G.12)	5 uur	5 uur		
N	3000	3000	20.000	20.000
F_{1000} (ANAMOS zonder 6-ksi-regel)	7,5	5,0	7,5	5,0
c_H (formule 4.17)	1,20	1,20	1,20	1,20
F_{m1000} (formule 4.16)	11,4	7,6	11,4	7,6
F_{mN} (formule 4.18)	10,3	6,3	9,1	4,9
f_B (formule 4.22)	0,96	0,96	0,90	0,90
f_S (formule 4.23)	0,90	0,83	0,80	0,65
F_N (formule 4.19)	6,0	4,0	5,4	2,9

Tabel 4.4, resultaat van een voorbeeldberekening ($h/H_s = 3$, $\tan\alpha_{bodem} = 0$).

Bovenstaande procedure kan als volgt kort samengevat worden:

$$\left[\frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{toelaatbaar bij } N \text{ golven}} = \min \left\{ 6\xi_{op}^{-2/3}; f_B f_S \frac{H_{sA}}{\Delta D} \right\} \quad (4.21)$$

$$f_B = \frac{1,71 \cdot \min \{ 1,54; c_H \}}{\min \{ \sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6} \}} \quad (4.22)$$

$$f_S = \max \left\{ 1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2 \right\} \quad (4.23)$$

$$c_H = \max \left\{ 1,06; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{bodem}) h^2}{0,673 H_{sA} h + 0,203 H_{sA}^2} \right\} \quad (4.24)$$

- Basalt, Basalton en Hydroblocks: $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$
- Blokken op hun kant: $c_1 \approx 0,35$ en $c_2 \approx 0,65$

met:

H_{sA} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS echter zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel (de waarde van $F_{1000} = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ mag dus groter zijn dan 6) (m)

$f_B = F_{m1000}F_m/(F_{1000}F_{mN}) =$ invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)

$f_S = F_{mN}/F_{m1000} =$ invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)

$\alpha_{\text{bodem}} =$ bodemhelling voor de constructie ($^\circ$)

$h =$ waterdiepte (m)

Met deze formules kan een voorlopige schatting van de invloed van de belastingduur op de stabiliteit verkregen worden. In tabel 4. 4 zijn ook de afzonderlijke invloedsfactoren voor de belasting en de sterkte vermeld.

Aanbevelingen

Het beperkte aantal meetpunten waar de conclusies op gebaseerd zijn, maakt het noodzakelijk voorzichtig te zijn bij het geven van conclusies. Aanbevolen wordt om met nader onderzoek te komen tot een betere theoretische onderbouwing van de conclusies. Deze onderbouwing kan gebaseerd worden op het volgende:

- nadere analyse van het bezwijkmechanisme van steenzettingen, aan de hand van de resultaten van alle Deltagootonderzoeken tot nu toe, en de schadegevallen uit de praktijk.
- kwantificering van de invloed van de klemming op de stabiliteit van steenzettingen, in relatie tot de mogelijke reductie van klemming als gevolg van langdurige belasting. Als de invloed van de klemming op de stabiliteit van steenzettingen beter wordt begrepen, is het denkbaar dat ook de invloed van de breedte-hoogte verhouding van de zuilen en blokken in rekening gebracht kan worden. Het huidige onderzoek is ten aanzien van basalt, Basalton en Hydroblocks uitgevoerd met een relatief dunne toplaag ten opzichte van het steenoppervlak. Dit zou invloed kunnen hebben op de resultaten.
- een probabilistische analyse van de belasting en sterkte, waarin naar voren komt dat iedere golf een bepaalde faalkansbijdrage geeft, die afhankelijk is van de grootte van de golf. Naarmate de belasting langer duurt is de totale kans op falen groter en is er meer kans op grote golven die een relatief grote bijdrage geven aan de totale faalkans.
- Een theoretisch bepaalde minimale stabiliteit bij extreem lange belasting. Dit levert de theoretische onderbouwing van de horizontale asymptoot in bijvoorbeeld figuur 4.12.

Verder wordt aanbevolen om de invloed van het geleidelijk toenemen van de golfhoogte en erna weer afnemen tijdens een storm in de methodiek op te nemen, en tevens dit aspect op te nemen in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV '04). Doordat nu gerekend wordt met een constante golfhoogte gedurende de gehele stormperiode, wordt de belasting meestal overschat.

Pas als de resultaten van het huidige Deltagootonderzoek beter begrepen worden kunnen de conclusies gebruikt worden voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen in de praktijk. Tot die tijd wordt aanbevolen de conclusies met de nodige voorzichtigheid te gebruiken.

5 Conclusies

In het onderhavige onderzoek zijn vier type steenzetting op een talud van 1:3,5 onderworpen aan een langdurige golfbelasting in de Deltagoot (veel meer dan 1000 golven), namelijk:

- Basalton ($D = 20$ cm; $\Delta = 1,827$; $b = 12$ cm; $D_{f15} = 22$ mm)
- Basalt ($D = 20$ cm; $\Delta = 1,955$; $b = 12$ cm; $D_{f15} = 22$ mm)
- Blokken op hun kant ($D = 20$ cm; $\Delta = 1,317$; $b = 5$ cm; $D_{f15} = 7$ mm)
- Hydroblock
 - 15 cm dik: $D = 15$ cm; $\Delta = 1,426$; $b = 12$ cm; $D_{f15} = 22$ mm
 - 20 cm dik: $D = 20$ cm; $\Delta = 1,359$; $b = 12$ cm; $D_{f15} = 22$ mm

Deze steenzettingen zijn een schaalmodel van de veelvuldig in de praktijk voorkomende steenzettingen.

De proeven zijn uitgevoerd met een stap voor stap langzaam oplopende waterstand, omdat dit het beste overeenkomt met de praktijksituatie in Nederland. De waterstand liep echter zo langzaam op, dat tijdens de meeste series de waterstandsverandering veel kleiner was dan de hoogte van het maximaal belaste deel van het talud.

De golfcondities waren per bekledingstype constant voor wat betreft de brekerparameter, namelijk $\xi_{op} \approx 2,44$ voor Basalton, $\xi_{op} \approx 1,93$ voor Basalt, $\xi_{op} \approx 1,71$ voor de blokken op hun kant en $\xi_{op} \approx 2,03$ voor Hydroblocks.

De stabiliteit van de bekleding van Basalton bleek veel groter te zijn dan verwacht. Ook na 50 uur golven was er nog geen (begin van) instabiliteit te bespeuren. De andere bekledingstypen konden wel binnen de maximaal gestelde proefduur één of meer keren tot schade gebracht worden.

Het onderzoek heeft geleid tot de volgende conclusies:

- Er is vastgesteld dat verschillende processen spelen tijdens de geleidelijke degeneratie van de steenzetting onder invloed van de langdurige golfbelasting, afhankelijk van het type bekleding:
 - Basalt: eerst uitspoeling van inwasmateriaal en verschuiving van de zuilen in het vlak van het talud, en later werken afzonderlijke zuilen zich gedurende enkele uren omhoog om uiteindelijk uit de toplaag gelicht te worden.
 - Blokken op hun kant: afzonderlijke blokken gaan op en neer bewegen, waarbij er tevens migratie van filtermateriaal optreedt dat voorkomt dat afzonderlijke blokken weer helemaal terug kunnen zakken. Uiteindelijk is de beweging zo groot dat een blok uit de toplaag gelicht wordt.
 - Hydroblocks: het inwasmateriaal spoelt vrij snel uit en vele uren later gaat de bekleding opbollen, waarna afzonderlijke blokken eruit gelicht worden of een grote groep blokken opbarst. Tijdens het opbollen neemt lokaal de filterlaagdikte toe en wordt dus ook de lek lengte groter. Daardoor zal ook het stijghoogteverschil over de toplaag toenemen en de stabiliteit afnemen.
 - Gezien het feit dat de Basalton niet bezwaken is, is er geen informatie verkregen over het degeneratieproces.

- Het inwasmateriaal spoelt vrij snel en in een groot gebied uit. De diepste uitspoeling treedt op bij de wat grotere openingen en is al snel gelijk aan de toplaagdikte. Bij Basalton en basalt spoelt al het inwasmateriaal uit de grote gaten uit, maar zijn er rond de zuilen altijd een aantal kleine gaten of smalle spleten waar het inwasmateriaal langdurig blijft zitten. Hierdoor zal de klemming in dit type bekledingen toch langdurig op een hoog peil blijven. Desondanks is geconstateerd dat er geen kattenrug ontstaat tijdens het bezwijken van basalt, maar dat er een afzonderlijke steen als een zuiger uitgelicht wordt. Dit duidt toch op een lokaal lage klemming van basalt. Bij de Hydroblocks bleek echter de uitspoeling uit alle gaten en spleten ongeveer gelijke tred te houden, waardoor er al na een paar uur geen inwasmateriaal meer over was om bij te dragen aan de klemming. Daarentegen is het nog de vraag of de Hydroblocks de inwassing nodig heeft om goed geklemd te liggen. Tijdens het bezwijken ontstond steeds een duidelijke kattenrug, dat duidt op een grote interactie tussen de stenen.
- Tijdens de degeneratie van de steenzetting ontstaat er diep onder water een bolling in het taludoppervlak, of zijn er op en neer bewegende blokken, met daarboven een verzakking. De verzakking bevindt zich meestal in de zone $0,4 < d/H_s < 0,6$ en de bolling of bewegende blokken op $0,6 < d/H_s < 1,1$ (d = diepte onder de stilwaterlijn). Het bovenste punt van de bolling sluit meestal mooi aan op het onderste punt van de verzakking. De locatie van de bolling of bewegende blokken komt heel goed overeen met de locatie van de grootste stijghoogteverschillen over de toplaag. Hiervoor zijn een aantal proeven uit het verleden met drukopnemers op de toplaag geanalyseerd.
- Het is gebleken dat de stabiliteit van de geleverde Hydroblocks sterk vermindert als de blokken al eens tot schade toe belast zijn. Uit wrijvingsmetingen is gebleken dat de wrijvingscoëfficiënt van de blokken iets afneemt als de blokken langs elkaar geschuurd worden. Maar waarschijnlijk is het belangrijker dat de geleverde Hydroblocks van 15 cm dikte een beetje bol waren en betonbramen hadden. In paragraaf 4.3 is uiteengezet dat daardoor de stabiliteit aanvankelijk vrij goed is, maar na het afschuren van de betonbramen sterk kan afnemen. De betonbramen schuren eraf vanwege de onderlinge bewegingen van de blokken tijdens het optreden van schade en de handelingen tijdens het opnieuw inbouwen van de blokken. Aanbevolen wordt om in de praktijk zo recht mogelijke blokken toe te passen.
- Aan de hand van een analyse van de laatste 50 golven voor het optreden van schade is geconcludeerd dat deze golven niet zodanig waren dat hieruit de schade verklaard kan worden. De significante golfhoogte tijdens deze laatste 50 golven was ongeveer gelijk aan die van de rest van de proevenserie, en de maximale golfhoogte was beduidend lager dan de eerder opgetreden maximale golfhoogte. Dit is een sterke aanwijzing dat er een proces gaande is van geleidelijke degeneratie die uiteindelijk uitmondt in schade, vergelijkbaar met een vollopende emmer die uiteindelijk overloopt. Het is echter wel te verwachten dat de grootste golven de belangrijkste bijdrage geven aan het degeneratieproces.
- Omdat het degeneratieproces vooral snel voortschrijdt tijdens de belasting met de hoogste golven, terwijl de laagste helft van de golven waarschijnlijk nauwelijks bijdragen, maakte dat het golfveld gekarakteriseerd moet worden met een parameter die de grootte van de grote golven weergeeft, zoals H_{\max} .
- Met het toenemen van de belastingduur neemt de kans toe dat er zeer grote golven optreden. Dit betekent dat de verwachtingswaarde van de maximale golfhoogte toeneemt met de toenemende belastingduur. Daarom is de invloed van de belastingduur op de stabiliteit onderzocht met de maximale golfhoogte (H_{\max}) als belangrijkste

belastingparameter, naast de ξ_{op} , die de wijze van breken van de golven op het talud karakteriseert.

- De trend in de afname van de sterkte kan beschreven worden met de volgende formule:

$$F_m = F_{m1000} \cdot \max \left\{ 1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2 \right\} \quad (5.1)$$

met:

F_m = $\xi_{op}^{2/3} \cdot H_{max} / (\Delta D)$ = Stabiliteitsparameter bij begin van schade (-)

F_{m1000} = Stabiliteitsparameter bij begin schade bij $N = 1000$, gebaseerd op H_{max} (-)

N = Aantal golven ($= t/T_m \approx 1,1 \cdot t/T_p$) (-)

T_m = Gemiddelde golfperiode (s)

t = Duur van de belasting (s)

De coëfficiënten c_1 en c_2 zijn afhankelijk van het type bekleding:

- Basalt en Hydroblocks: $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$
- Blokken op hun kant: $c_1 \approx 0,35$ en $c_2 \approx 0,65$
- Gezien het feit dat de Basalton niet bezwaken is, kon geen waarde bepaald worden van c_1 en c_2 . Eventueel kan voorlopig gebruik gemaakt worden van dezelfde waarde als voor Hydroblocks.

De waarden voor Hydroblocks zijn afgeleid voor rechte blokken (niet bol) zonder betonbramen.

De geconstateerde trend kan gebruikt worden voor het maken van een voorlopige schatting van de teruglopende sterkte als functie van de belastingduur. Zoals in de aanbevelingen is weergegeven, is er nog onvoldoende theoretische basis om met het beperkte aantal meetpunten definitieve conclusies te kunnen trekken.

- Aanvullend op het huidige proevenprogramma zijn enkele reststerkte-proeven uitgevoerd, gericht op het vaststellen van de tijdsduur vanaf initiële schade (steen uit de bekleding) totdat de bekleding en filter over een groot oppervlak is weggeslagen. Na afloop van de proeven op Basalton, basalt en blokken op hun kant is respectievelijk 5 uur, 1 uur en 3,5 uur gegolfd op de beschadigde bekleding. Het bleek dat dit niet leidde tot vergroting van de schade. Geconcludeerd kan worden dat onder deze omstandigheden de reststerkte kennelijk behoorlijk groot is. De reststerkte-proeven op Basalton zijn uitvoerig gerapporteerd door Klein Breteler (2004a).

Procedure voor het schatten van de stabiliteit

Met de resultaten van het onderzoek kan voorlopig als volgt de stabiliteit van steenzettingen tijdens langdurige golfbelasting geschat worden:

$$\left[\frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{toelaatbaar bij } N \text{ golven}} = \min \left\{ 6 \xi_{op}^{-2/3}; f_B f_S \frac{H_{sA}}{\Delta D} \right\} \quad (5.2)$$

$$f_B = \frac{1,71 \cdot \min \{ 1,54; c_H \}}{\min \left\{ \sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6} \right\}} \quad (5.3)$$

$$f_S = \max \left\{ 1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2 \right\} \quad (5.4)$$

$$c_H = \max \left\{ 1,06; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{\text{bodem}}) h^2}{0,673 H_{sA} h + 0,203 H_{sA}^2} \right\} \quad (5.5)$$

- Basalt, Basalton en Hydroblocks: $c_1 \approx 0,2$ en $c_2 \approx 0,8$
- Blokken op hun kant: $c_1 \approx 0,35$ en $c_2 \approx 0,65$

met:

H_{sA} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS echter zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel (de waarde van $F_{1000} = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ mag dus groter zijn dan 6) (m)

f_B = invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)

f_S = invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)

α_{bodem} = bodemhelling voor de constructie ($^\circ$)

h = waterdiepte (m)

Tijdens de levensduur van de constructie moet deze met geregeld onderhoud in optimale conditie gehouden worden. Dit betekent dat het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld moet worden en als een zware storm geleid heeft tot blokbeweging bij een bekleding van blokken op hun kant, dan moeten alle uitstekende blokken weer terug gezet worden. Alleen dan zou de met bovenstaande formule ontworpen steenzetting de langdurige golfbelasting kunnen weerstaan.

Aanbeveling voor vervolgonderzoek

Zoals in bovenstaande procedure is aangegeven zijn de resultaten van dit onderzoek geschikt om een schatting te geven van de teruglopende stabiliteit als functie van de belastingduur. Het beperkte aantal meetpunten waar de conclusies op gebaseerd zijn, maakt het noodzakelijk voorzichtig te zijn bij het geven van conclusies. Aanbevolen wordt om met nader onderzoek te komen tot een betere theoretische onderbouwing van de conclusies. Deze onderbouwing kan gebaseerd worden op het volgende:

- nadere analyse van het bezwijkmechanisme van steenzettingen, aan de hand van de resultaten van alle Deltagootonderzoeken tot nu toe, en de schadegevallen uit de praktijk.
- kwantificering van de invloed van de klemming op de stabiliteit van steenzettingen, in relatie tot de mogelijke reductie van klemming als gevolg van langdurige belasting. Als de invloed van de klemming op de stabiliteit van steenzettingen beter wordt begrepen, is het denkbaar dat ook de invloed van de breedte-hoogte verhouding van de zuilen en blokken in rekening gebracht kan worden. Het huidige onderzoek is ten aanzien van basalt, Basalton en Hydroblocks uitgevoerd met een relatief dunne toplaag ten opzichte van het steenoppervlak. Dit zou invloed kunnen hebben op de resultaten.
- een probabilistische analyse van de belasting en sterkte, waarin naar voren komt dat iedere golf een bepaalde faalkansbijdrage geeft, die afhankelijk is van de grootte van de golf. Naarmate de belasting langer duurt is de totale kans op falen groter en is er meer kans op grote golven die een relatief grote bijdrage geven aan de totale faalkans.
- een theoretisch bepaalde minimale stabiliteit bij extreem lange belasting. Dit levert de theoretische onderbouwing van de horizontale asymptoot in bijvoorbeeld figuur 4.12.

Verder wordt aanbevolen om de invloed van het geleidelijk toenemen van de golfhoogte en erna weer afnemen tijdens een storm in de methodiek op te nemen, en tevens dit aspect op te nemen in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV '04). Doordat nu gerekend wordt met

een constante golfhoogte gedurende de gehele stormperiode, wordt de belasting meestal overschat.

Pas als de resultaten van het huidige Deltagootonderzoek beter begrepen worden kunnen de conclusies gebruikt worden voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen in de praktijk. Tot die tijd wordt aanbevolen de conclusies met de nodige voorzichtigheid te gebruiken.

Referenties

- Battjes, J.A., en H.W. Groenendijk (2000)
Wave height distributions on shallow foreshores
Coastal Engineering 40, pp 161-182, Elsevier Science BV
- Burger, A. (1985)
Sterkte Oosterscheldedijken onder geconcentreerde golfaanval.
Onderzoek naar de stabiliteit van enkele veel voorkomende taludverdedigingen onder langdurige golfaanval bij een vaste waterstand.
Verslag grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot.
WL | Delft Hydraulics, verslag M 2036 maart 1985.
- Doorn, N., W.D. Eysink (2004)
Golfmetingen met drukopnemers, haalbaarheidsonderzoek
WL | Delft Hydraulics, verslag H4318, januari 2004
- Eysink, W.D. en Klein Breteler, M. (2003);
Onderzoekprogramma Kennisleemten Steenbekledingen,
Deltagootonderzoek naar stabiliteit van baslt (fase 1) en Basalton (fase 2);
WL / Delft Hydraulics, Meetverslag H4327, december 2003.
- Leeuwestein, W (1998)
Pit-polygoonzuilen en Hydroblock
Grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot
WL / Delft Hydraulics, verslag H3224, oktober 1998
En aanvullende notitie van november 1998, AS.98.67
- Klein Breteler, M. (2000)
Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen
Analyse van resultaten van Deltagootproeven
WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, mei 2000
- Klein Breteler (2004)
Zone met grote golfbelasting
WL | Delft Hydraulics, notitie H4134, 7 april 2004
- Klein Breteler (2004a)
Onderzoekprogramma Kennisleemten Steenbekledingen,
Reststerkte van steenzetting met zuilen na initiele schade
WL / Delft Hydraulics, conceptverslag H4327, Oktober 2004.
- Kuiper, C., en B van Vossen
Onderzoekprogramma Kennisleemten Steenbekledingen,
Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven
WL / Delft Hydraulics, verslag H 4329, december 2003
- Meer, J.W. van der, en J.P. de Waal (1993)
Waterbeweging op taluds; invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval
WL / Delft Hydraulics, verslag H1256, april 1993
- Peters, D.J. (2002)
Gezette steenbekledingen onder golfaanval; mechanica studie het liggerwerk
Royal Haskoning, 9 dec. '02

Rudolph en Klein Breteler (2004)

Onderzoekprogramma Kennisleemten Steenbekledingen,
Analyse van de stabiliteit van basalt
WL / Delft Hydraulics, conceptverslag H 4422, Oktober 2004.

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

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, meetverslag van Deltagootonderzoek;
WL / Delft Hydraulics, verslag H 3272, februari 2000.

Vroeg, J.H. (1992)

Reststerkte van dijkbekledingen; granulair filters
Verslag modelonderzoek in Scheldebak, deel II
WL | Delft Hydraulics, verslag H195, juli 1992

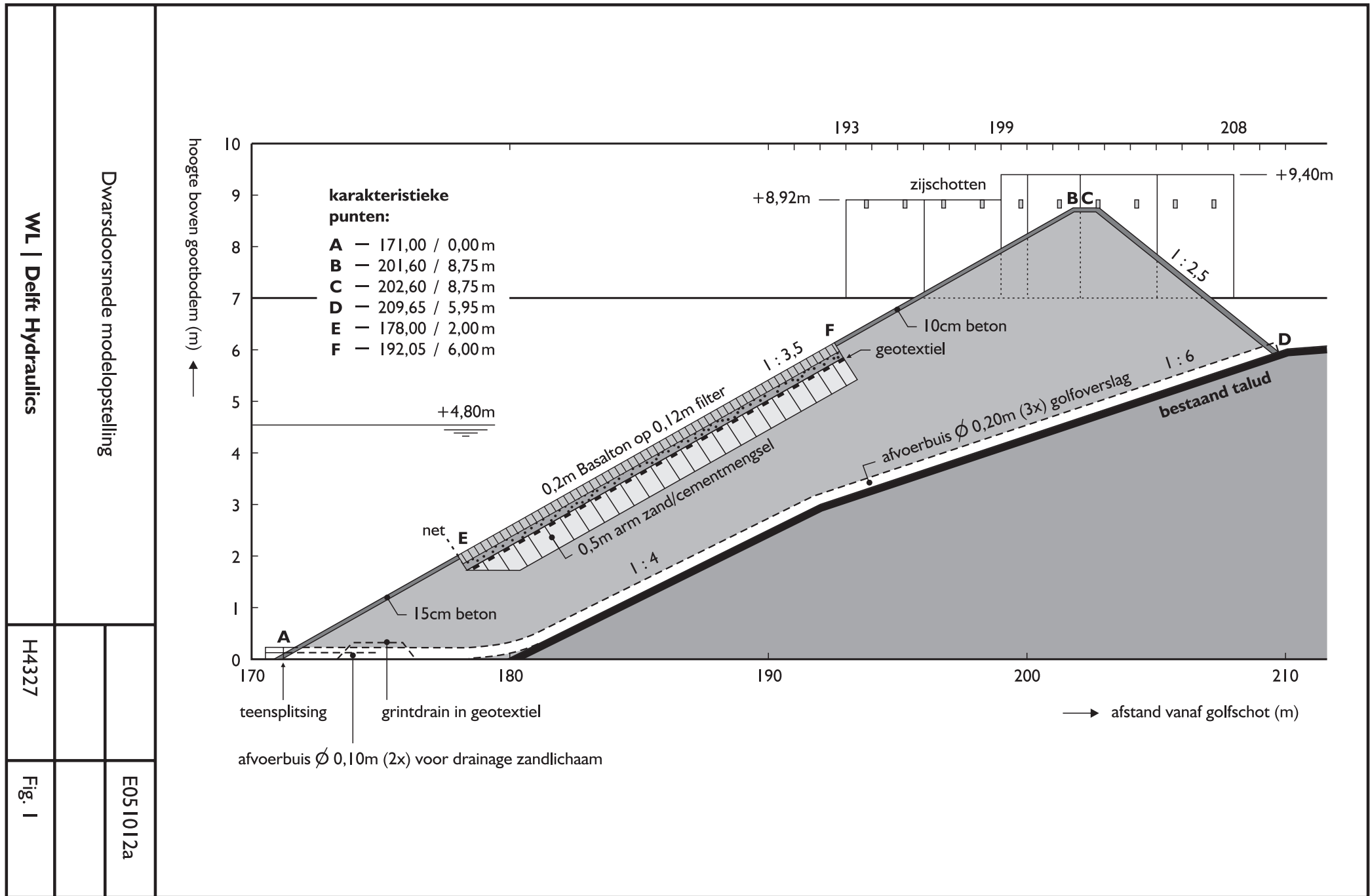
VTV (2004)

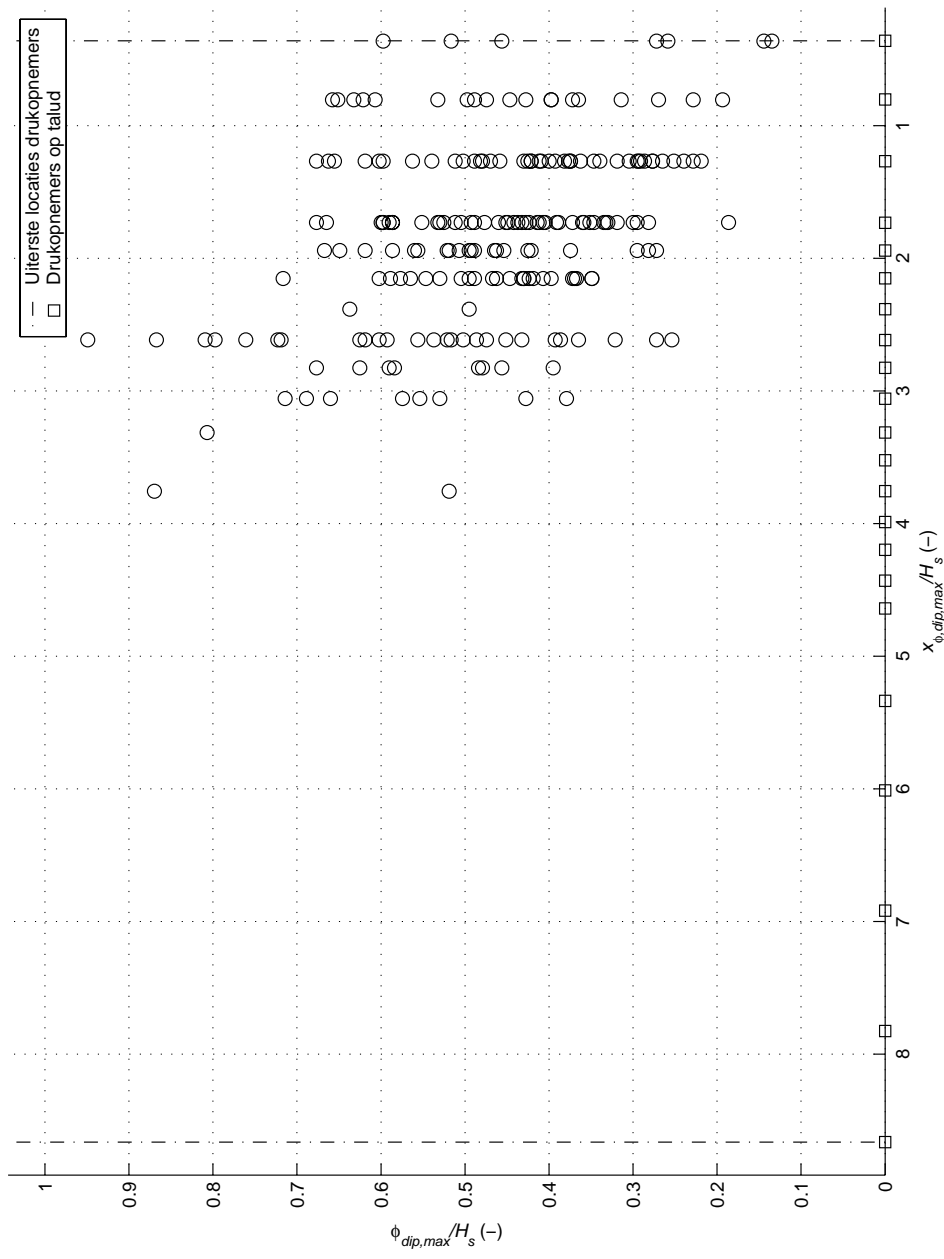
De veiligheid van primaire waterkeringen in Nederland
Voorschrift Toetsen op Veiligheid, voor de tweede toetsenronde van 2001 tot 2006
TAW 2004

Wenneker, I., M. Klein Breteler, W.D.Eysink en E.M. Coeveld

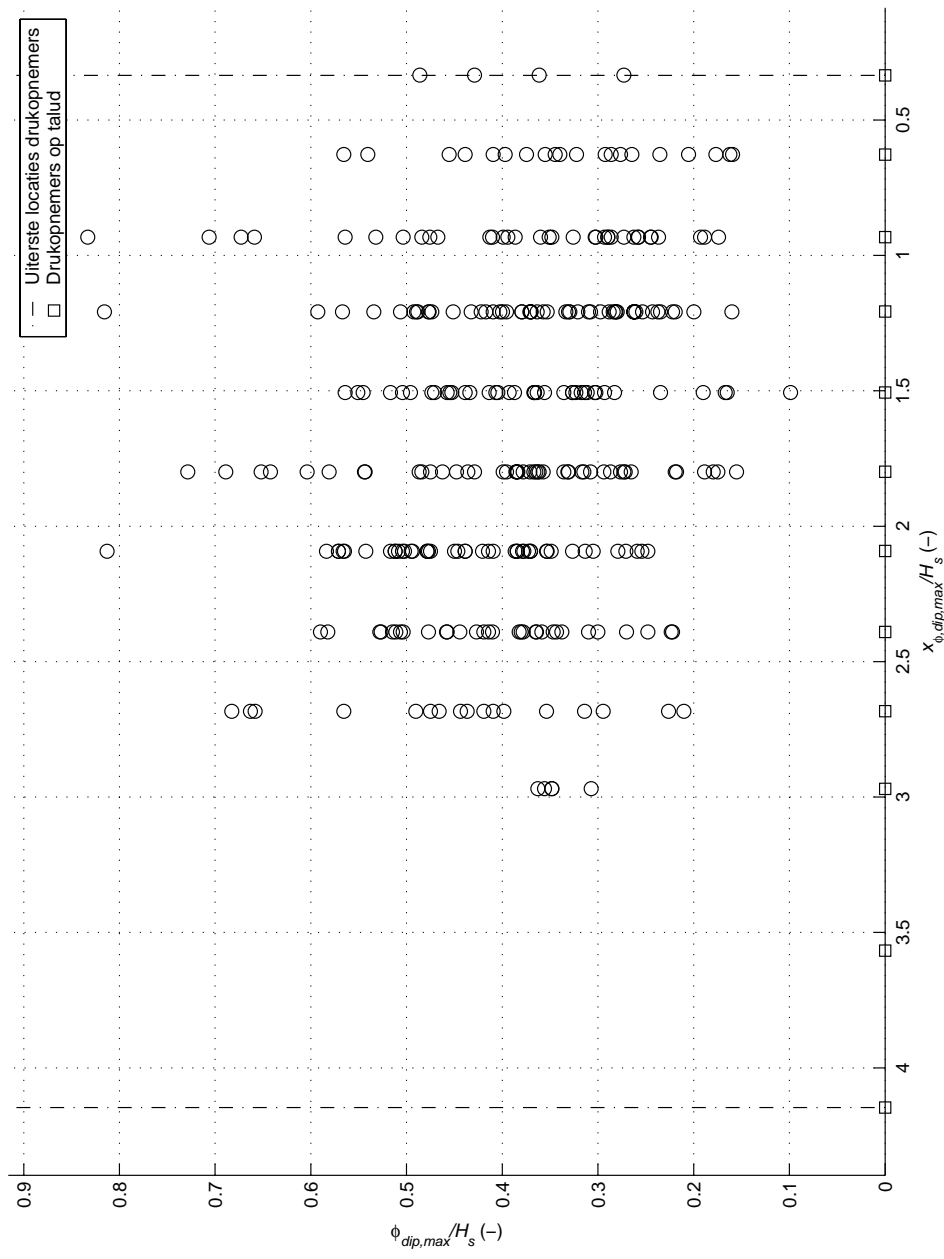
Onderzoekprogramma Kennisleemten Steenbekledingen,
Verificatie van invloed van lange golven op stabiliteit van steenzettingen
WL / Delft Hydraulics, conceptverslag H4421, november 2004

A Figuren

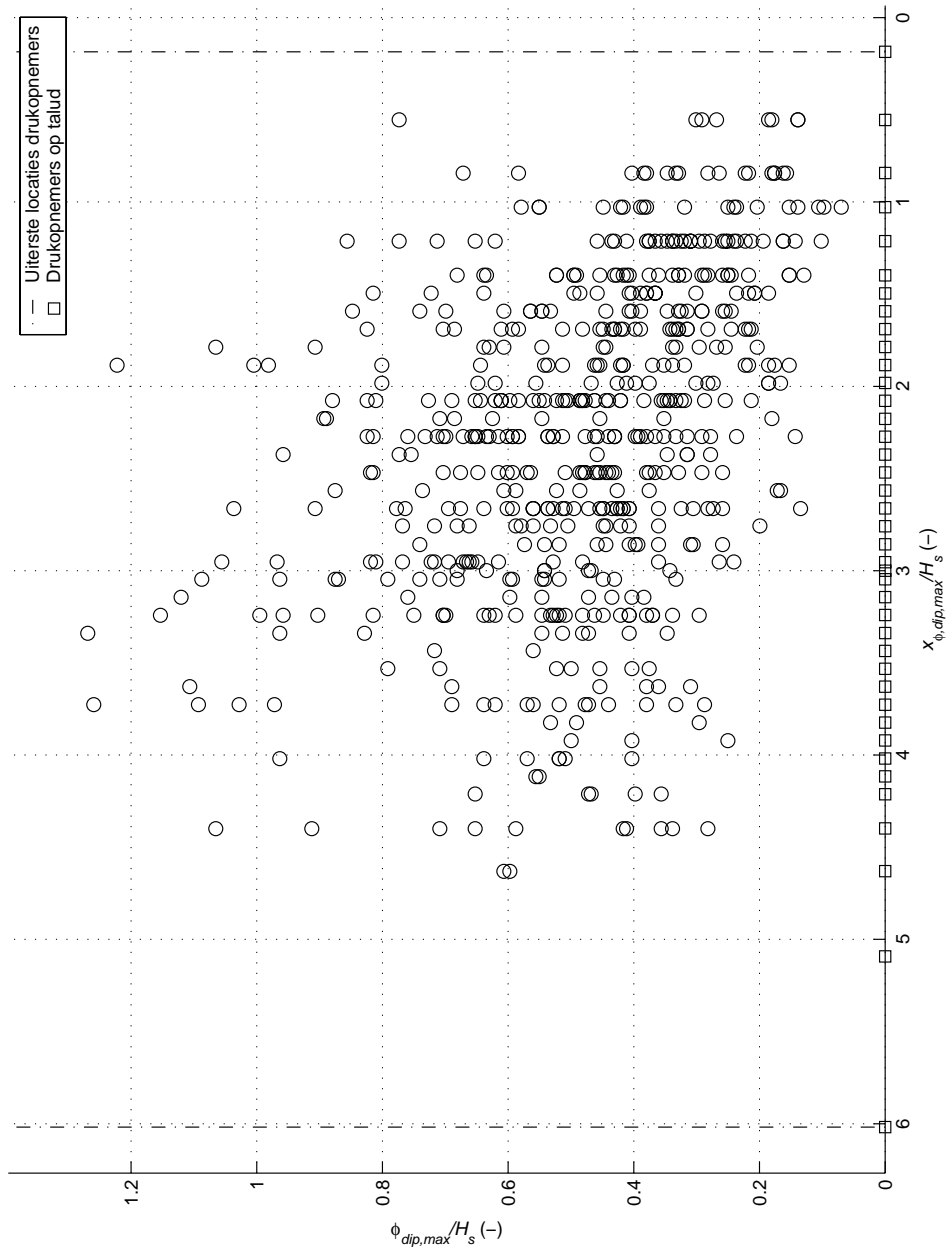




Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$		
	23o01, $\xi_{op} = 1.72$	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. 2



Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$		
	5005, $\xi_{op} = 1.56$	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. 3



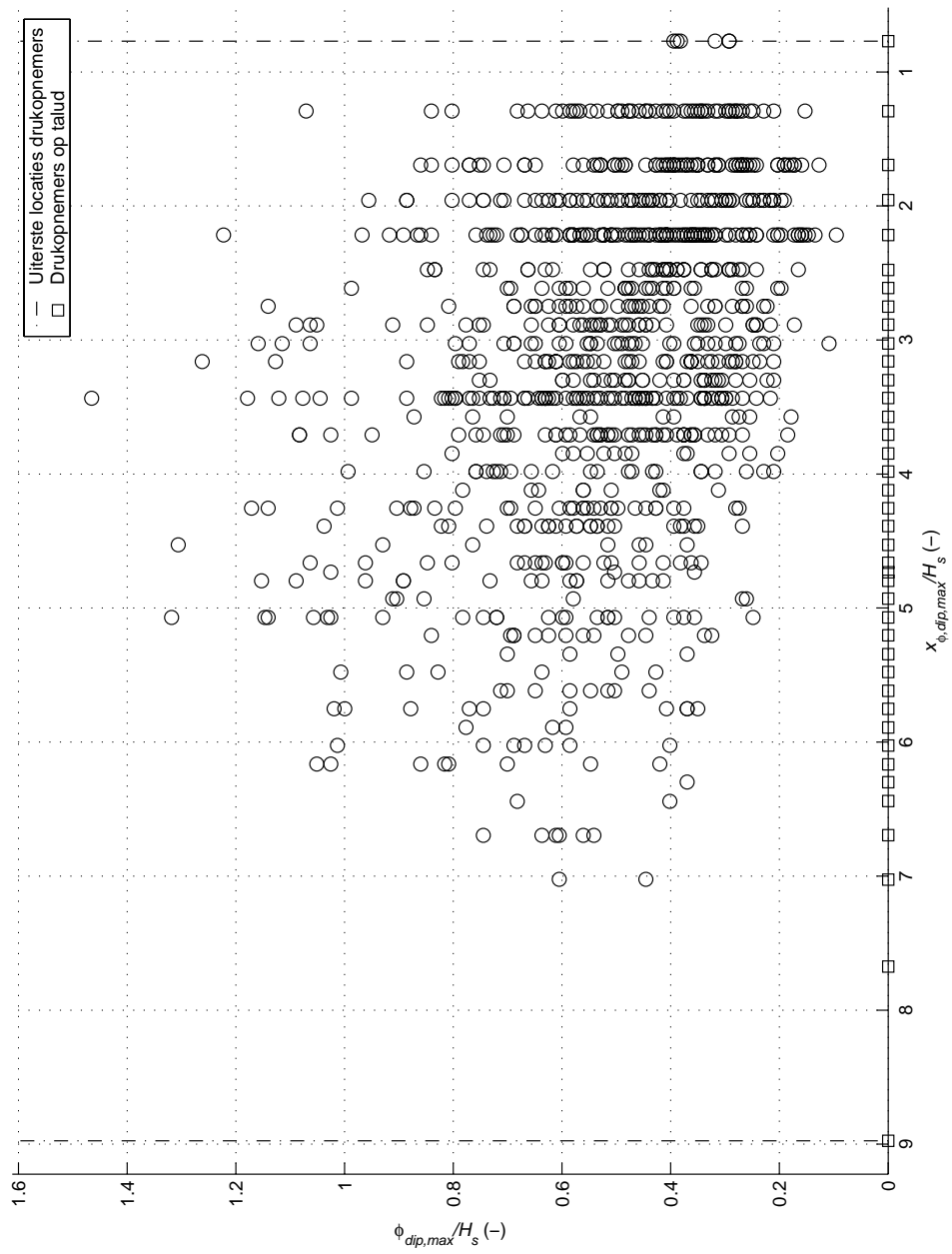
Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$

$t_{301}, \xi_{op} = 2.52$



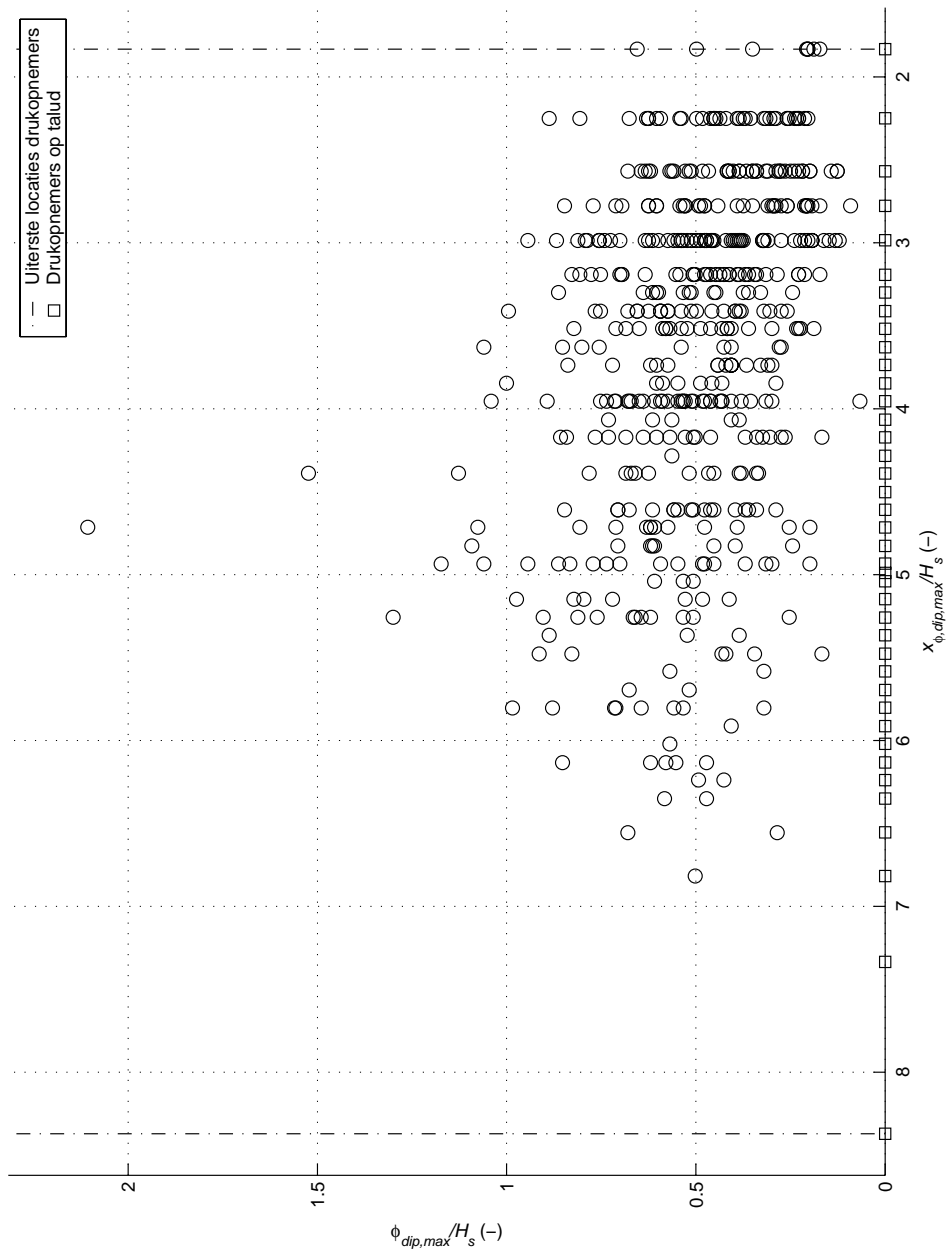
Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$

$t_{502}, \xi_{op} = 3.42$

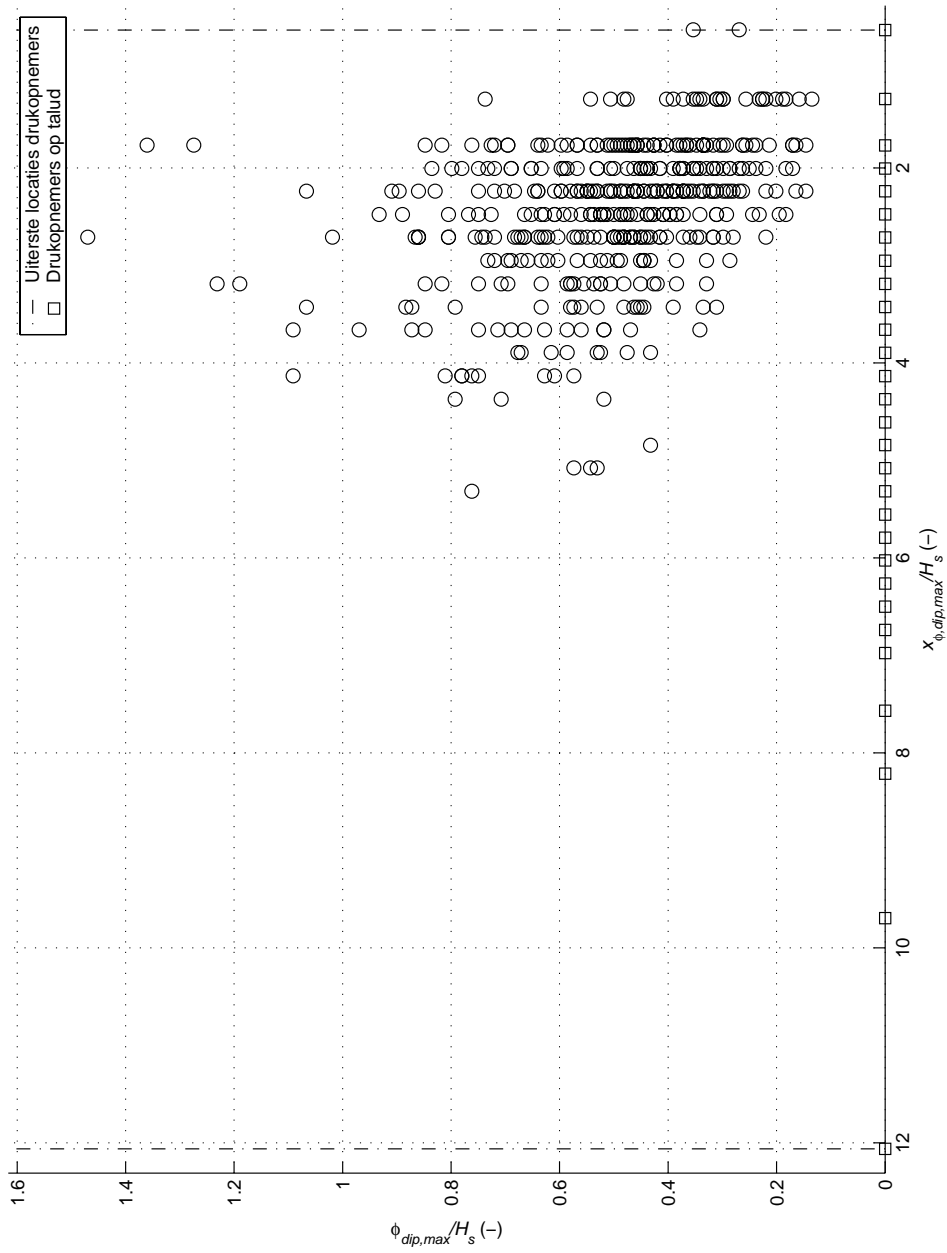


Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$

t503, $\xi_{op} = 2.4$

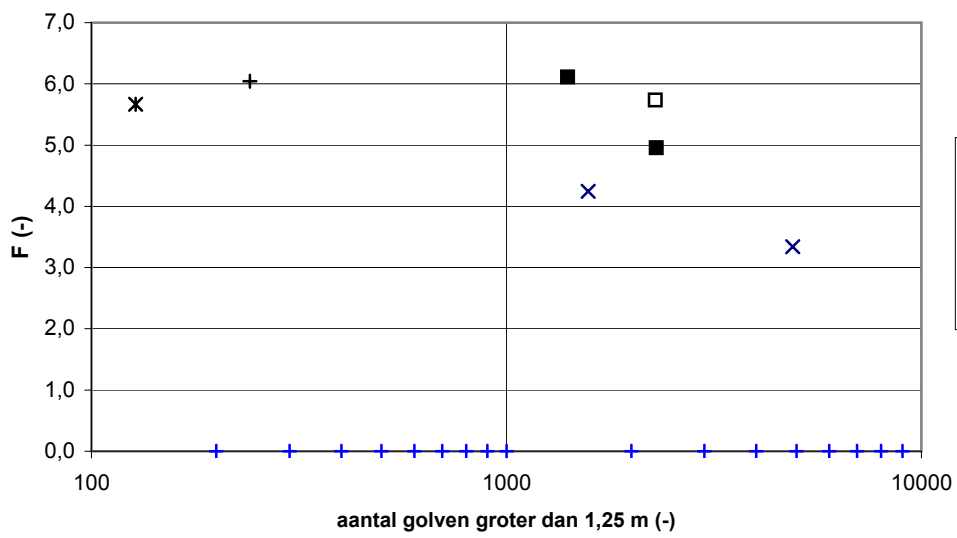
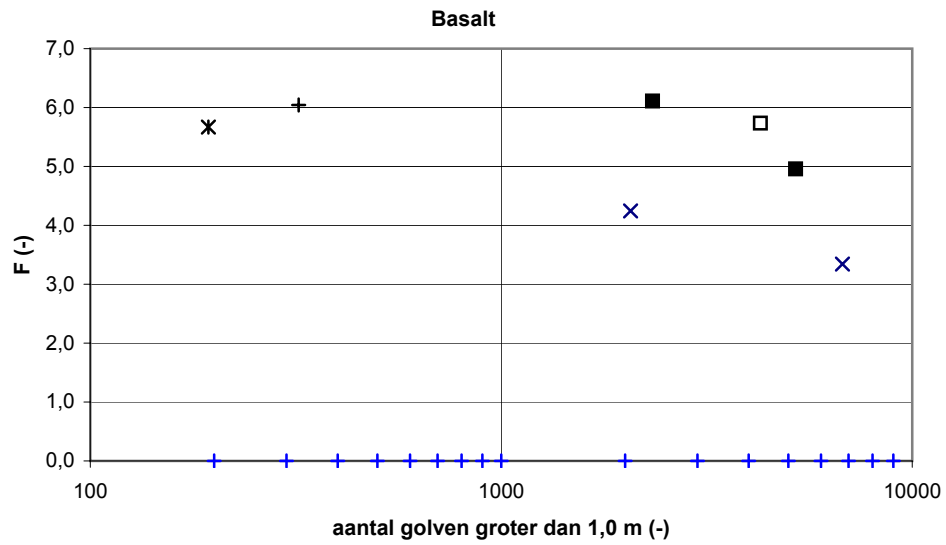


Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$		
	t401, $\xi_{op} = 2.42$	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. 7

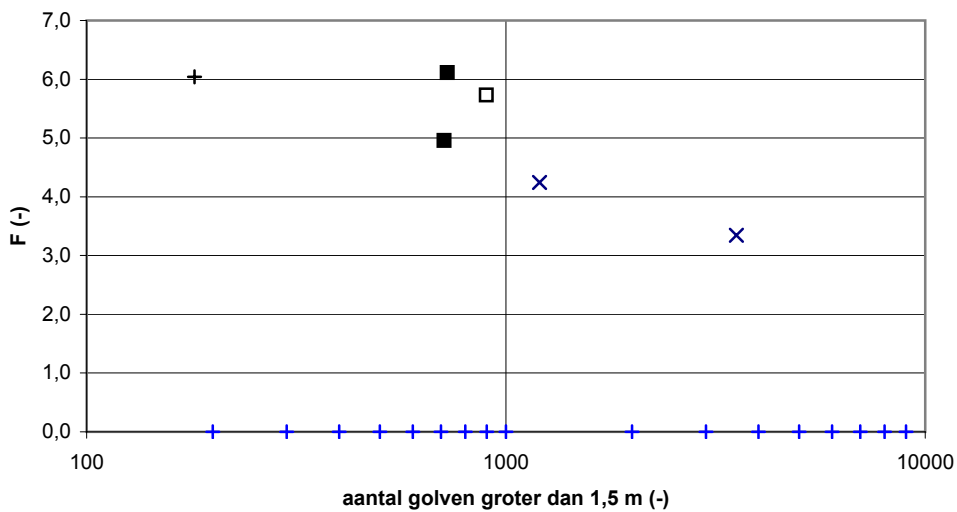


Max. gediptheid $\phi_{dip,max}/H_s$ tijdens golfklap tegen locatie $x_{\phi,dip,max}/H_s$

p4003, $\xi_{op} = 1.5$

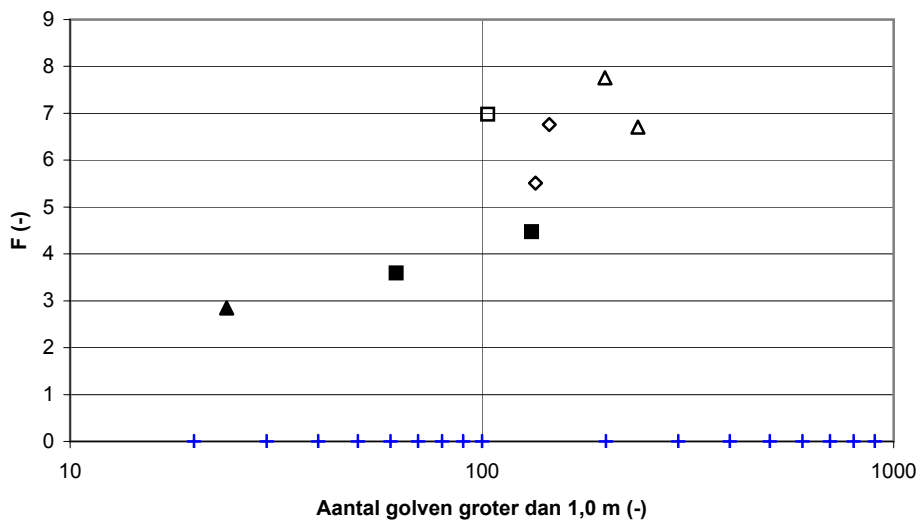
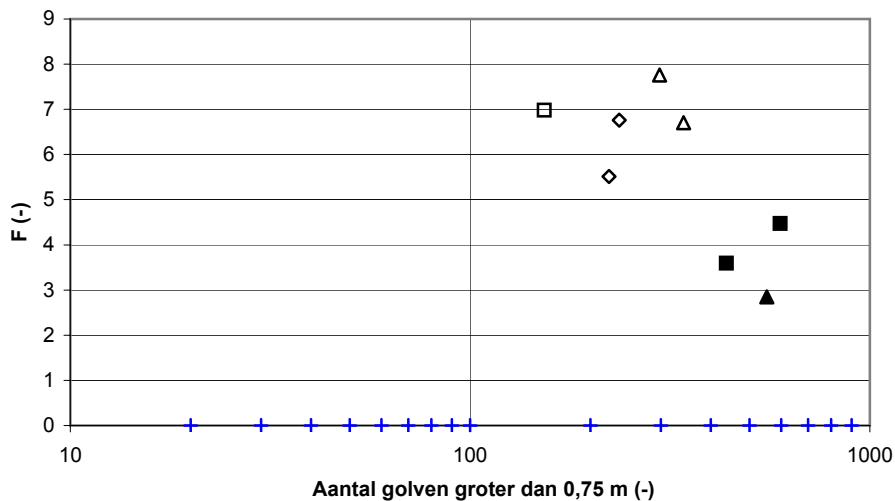


- ✕ 1 a 2 zuilen eruit; 1984
- ✕ 1 zuil eruit; 2003
- + geen schade; 2003
- 1 zuil eruit
- Y = 3 cm
- + (blue)

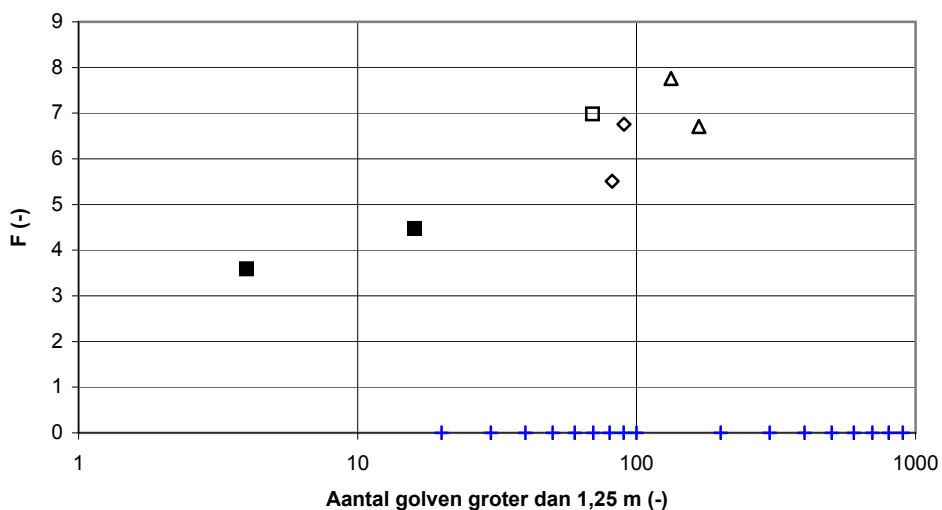


Bezwijkbelasting als functie van aantal golven
Basalt

Blokken op hun kant

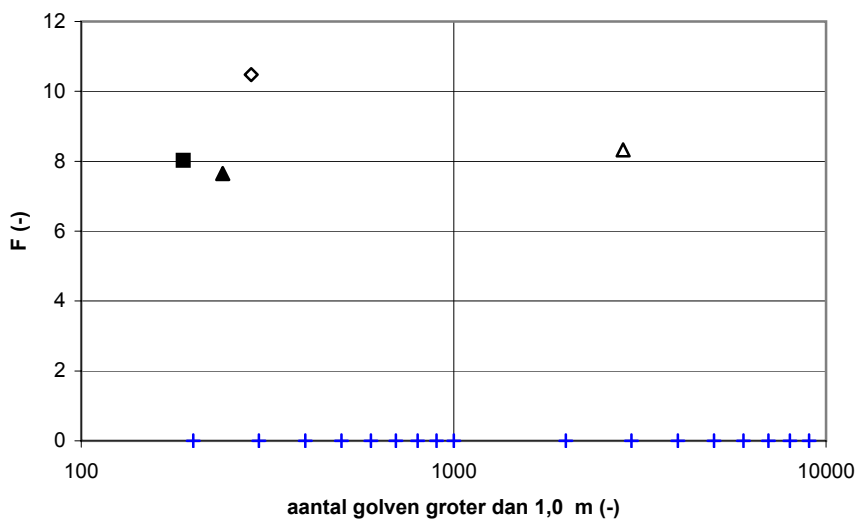
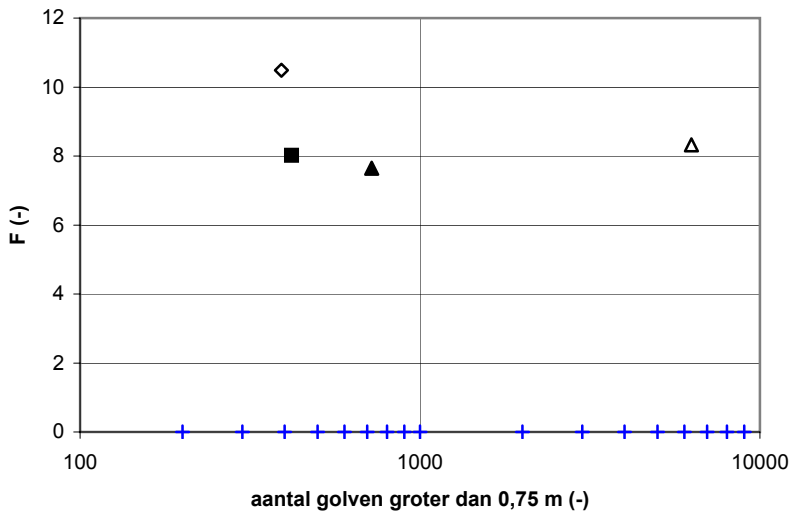


- ◇ 1 < Y < 6 cm; 1998
- △ 6 < Y < 20 cm; 1998
- blok eruit; 1998
- ▲ Y = 9 cm, 2004
- blok eruit; 2004
- +

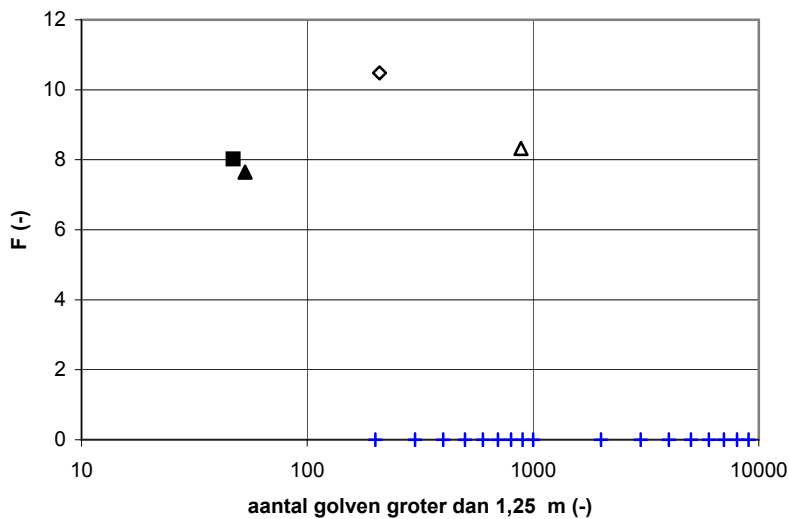


Bezwijkbelasting als functie van aantal golven
Blokken op hun kant

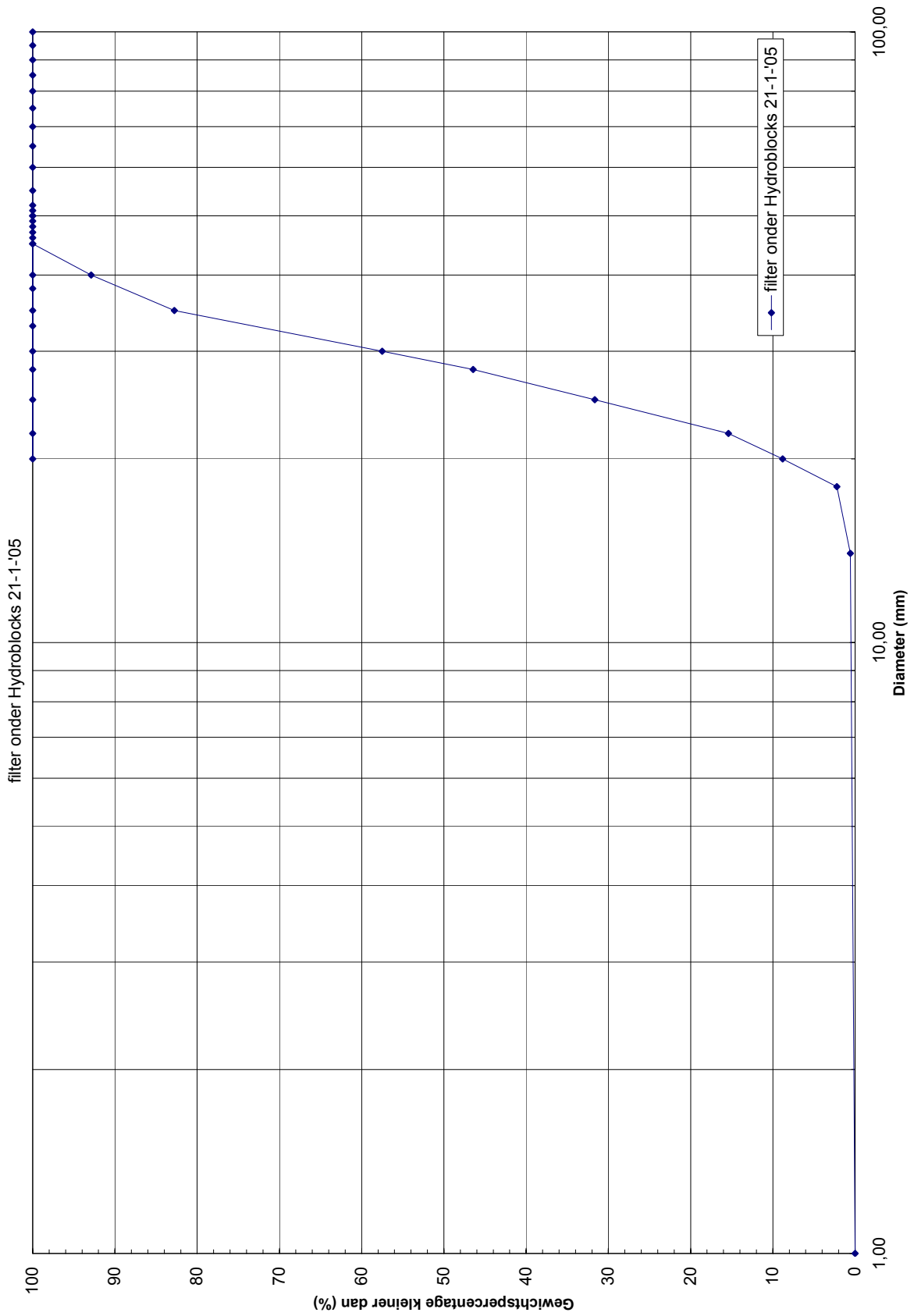
Hydroblocks (eerste schade)



- ◇ 1998: Y = 10 cm; 2 uur; D = 20 cm
- D = 15 cm; 14 blokken eruit; 1,4 uur
- ▲ D = 15 cm; 70 blokken eruit; 3,4 uur
- △ D = 20 cm; 4 blokken eruit; 19,8 uur
- +



Bezwijkbelasting als functie van aantal golven
Hydroblocks

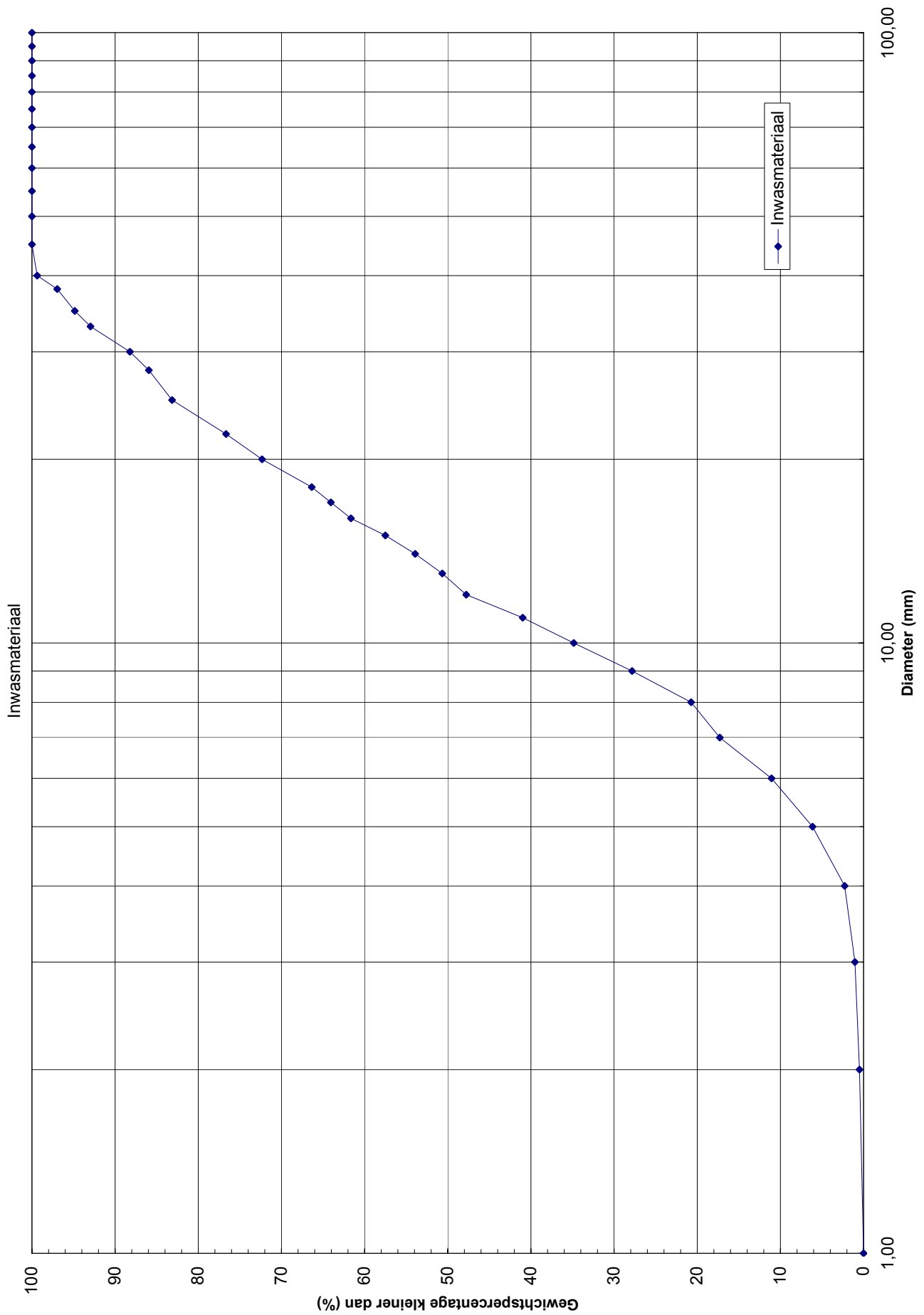


filter onder Hydroblocks 21-1-'05

filter onder Hydroblocks 21-1-'05

filter onder Hydroblocks 21-1-'05

Zeefkromme		
filter onder Hydroblocks 21-1-'05		
WL Delft Hydraulics	H4475	FIG. 12



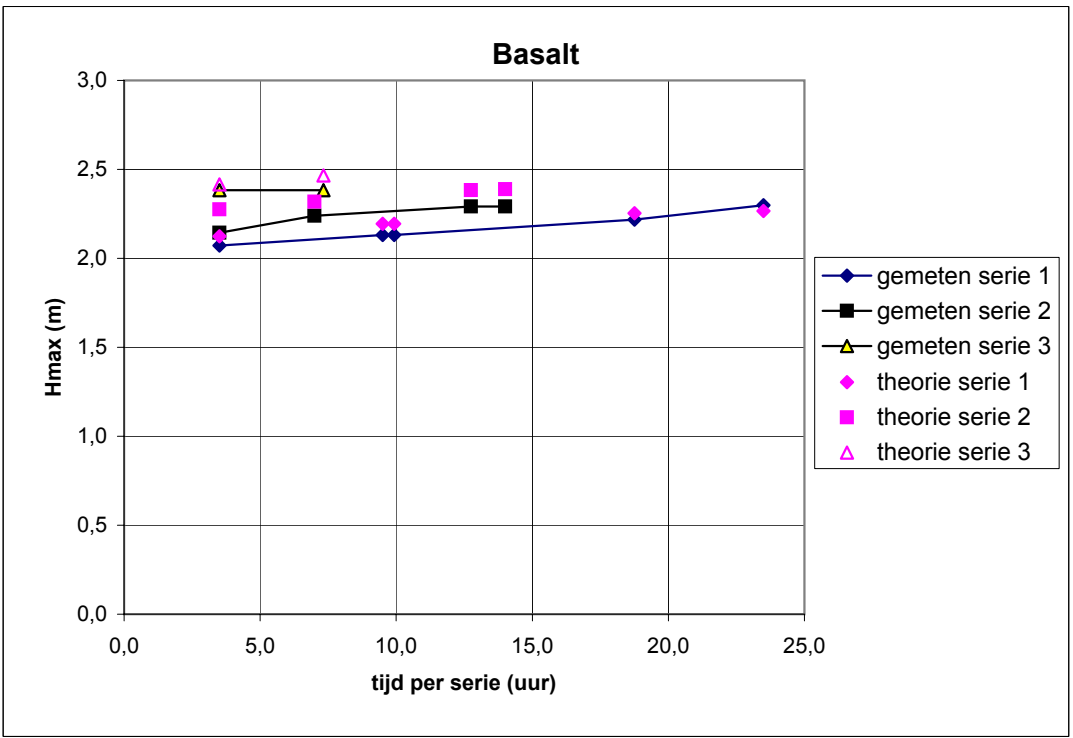
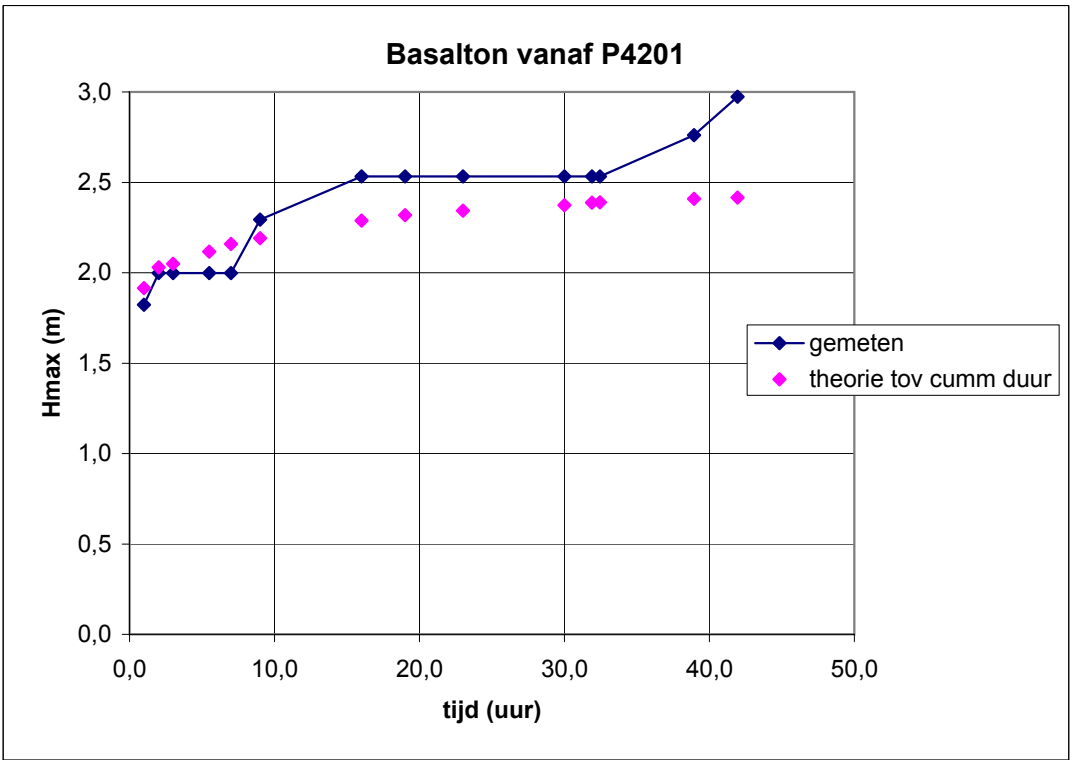
Zeefkromme

Inwasmateriaal Hydroblocks 3-1-'05

WL | Delft Hydraulics

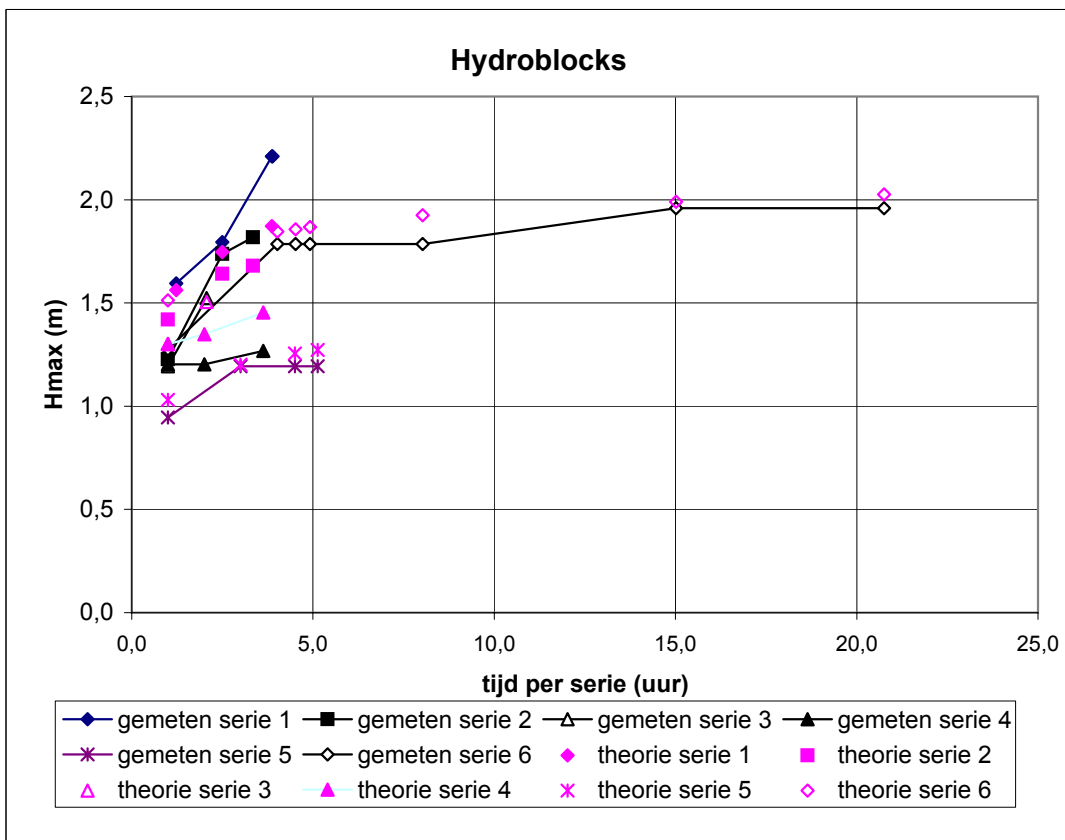
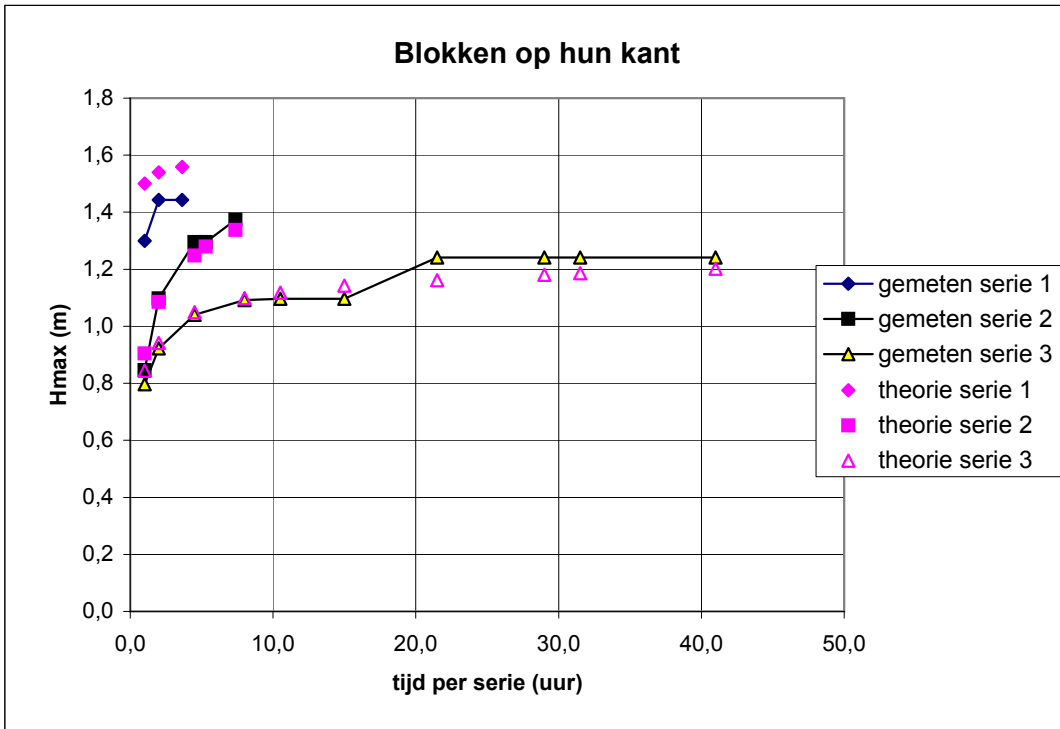
H4475

FIG. 13



theorie van Battjes & Groenendijk

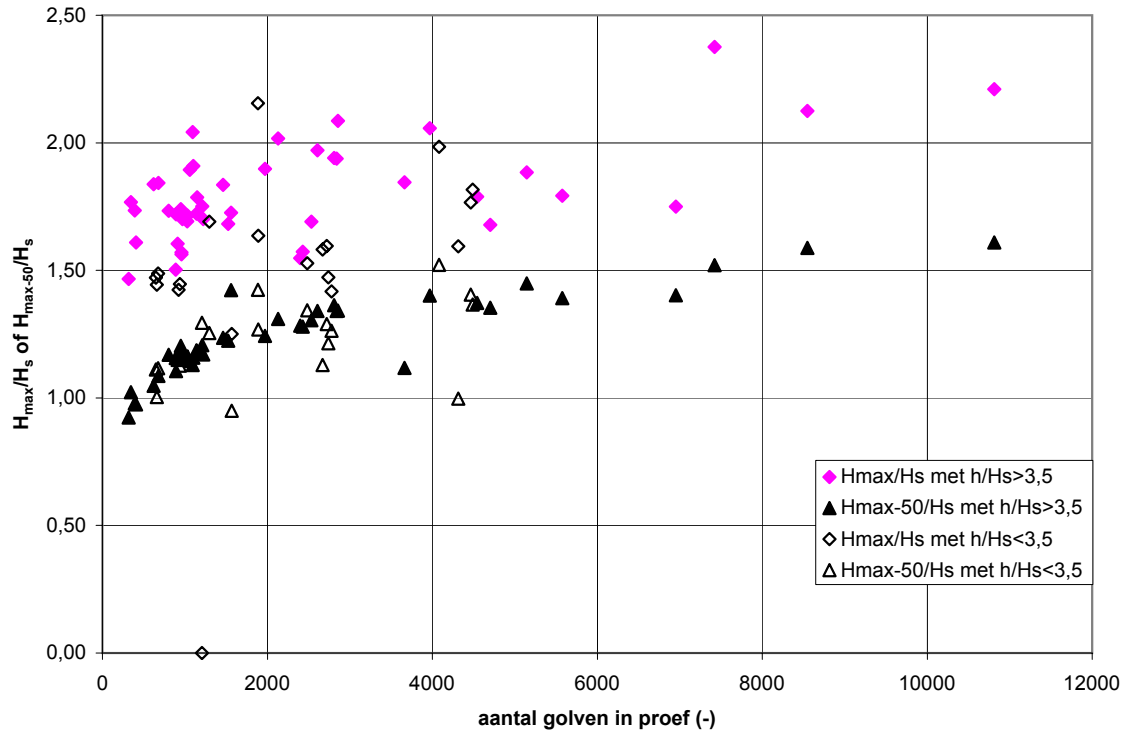
Maximale golfhoogte als functie van duur Basalton en basalt		
WL Delft Hydraulics	H4475	FIG. 14



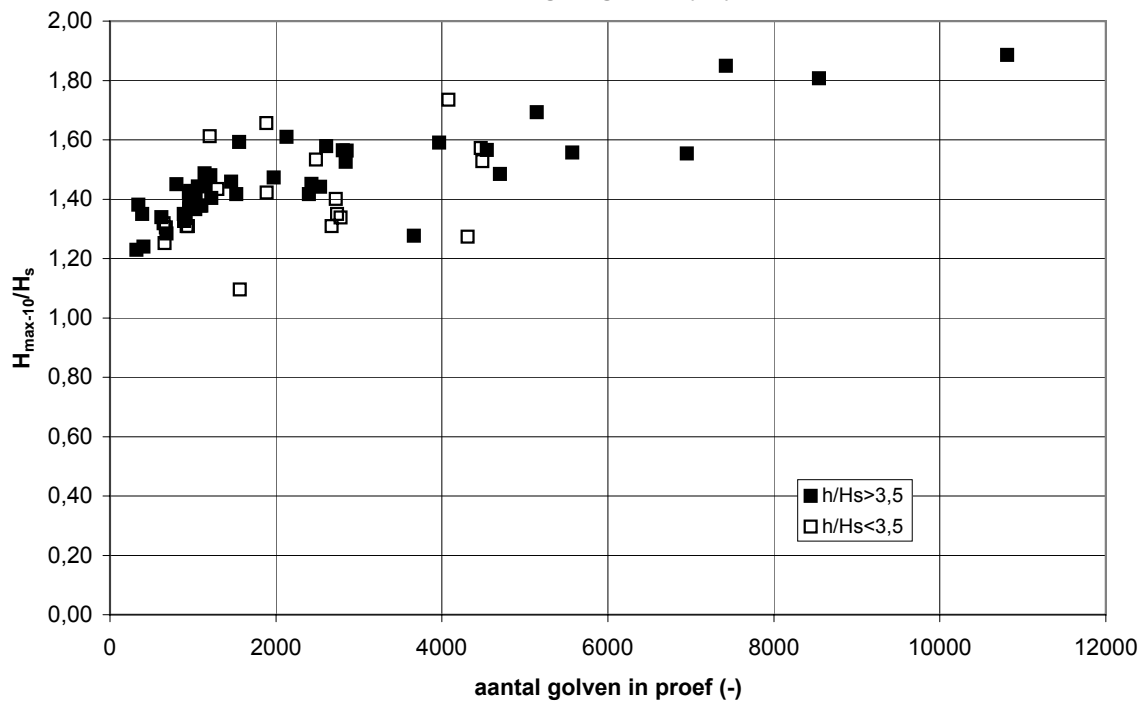
theorie van Battjes & Groenendijk

Maximale golfhoogte als functie van duur
 Blokken op hun kant en Hydroblocks

Hoogste golf (H_{max}) en 50 na hoogste golf (H_{max-50})

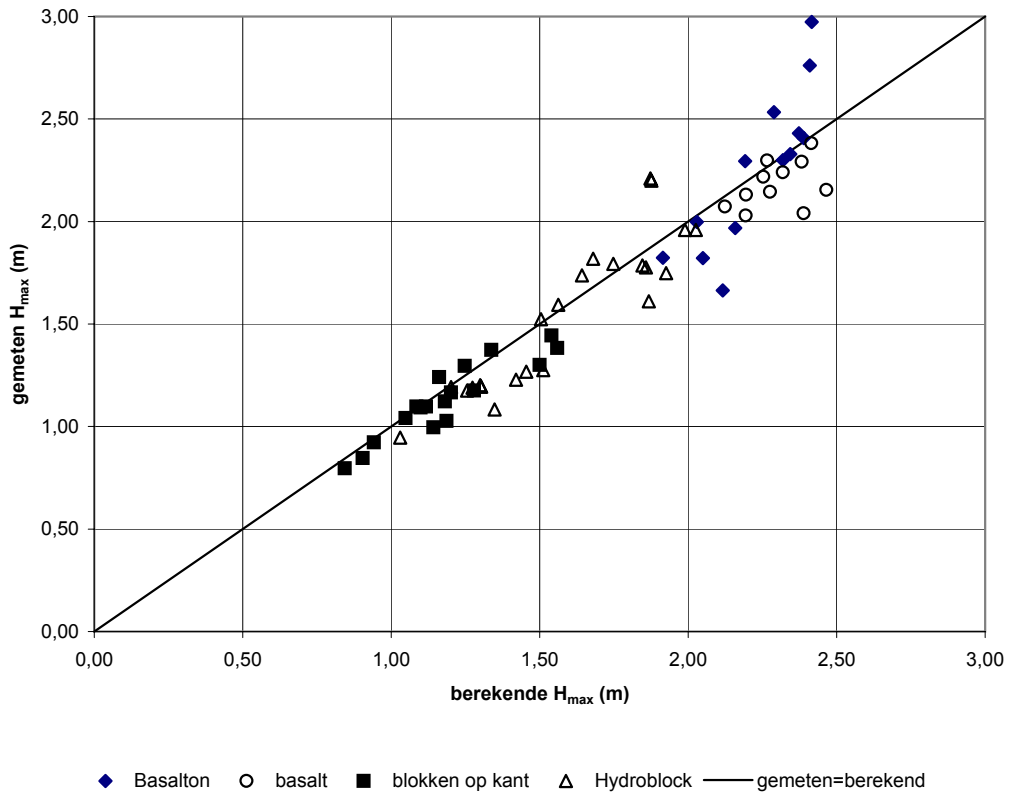


10 na hoogste golf (H_{max-10})



Extreme golven

Maximale golfhoogte



theorie van Battjes & Groenendijk

Vergelijking berekende maximale golfhoogte met metingen

B Tabellen

	h	H _{1/3}	H _{m0}	H _{10%}	H _{2%}	H _{1%}	H _{1/10}	H _m	H _{rms}	T _m	T _{pD}	T _{m-1,0}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]
P4201	4.20	1.215	1.24	1.323	1.630	1.686	1.497	0.758	0.855	5.55	8.06	7.32
P4202	4.20	1.308	1.34	1.413	1.740	1.813	1.624	0.814	0.921	5.35	8.05	7.37
P4203	4.20	1.225	1.26	1.331	1.597	1.661	1.490	0.776	0.868	5.46	7.80	7.24
P4204	4.20	0.969	0.98	1.047	1.338	1.441	1.223	0.596	0.678	5.75	8.01	8.99
P4401	4.42	1.352	1.38	1.478	1.768	1.827	1.667	0.864	0.964	5.84	8.60	7.47
P4402	4.41	1.312	1.36	1.415	1.811	1.908	1.666	0.822	0.928	5.56	8.07	7.48
P4601	4.63	1.366	1.39	1.468	1.832	1.949	1.696	0.855	0.964	5.61	7.90	7.35
P4801	4.82	1.361	1.41	1.472	1.833	1.929	1.695	0.858	0.964	5.71	7.88	7.42
P4802	4.83	1.341	1.38	1.446	1.796	1.879	1.665	0.841	0.947	5.68	7.95	7.36
P4803	4.81	1.343	1.38	1.442	1.819	1.938	1.670	0.842	0.949	5.64	7.87	7.35
P5001	5.02	1.422	1.46	1.506	1.974	2.160	1.768			5.68	8.18	7.90
P5002	5.02	1.329	1.362	1.463	1.772	1.935	1.596			5.75	8.11	7.75
P4804	4.83	1.357	1.391	1.460	1.781	1.923	1.629			5.74	8.12	8.20
P4805	4.81	1.347	1.380	1.430	1.834	1.966	1.633			5.73	8.12	8.01

h = waterdiepte (m)

H_{1/3} = significante golfhoogte, berekend als gemiddelde golfhoogte van hoogste eenderde deel van de golven (m)

H_{m0} = significante golfhoogte, berekend op basis van energie inhoud (m)

H_{x%} = golfhoogte die door x% van de golven overschreden wordt (m)

H_m = gemiddelde golfhoogte (m)

H_{rms} = root-mean-square golfhoogte (m)

T_m = gemiddelde golfperiode (s)

T_{pD} = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

T_{m-1,0} = spectrale golfperiode (s)

Tabel B.1, golfcondities van de proeven met Basalton

	h	H _{1/3}	H _{m0}	H _{10%}	H _{2%}	H _{1%}	H _{1/10}	H _m	H _{rms}	T _m	T _{pD}	T _{m-1,0}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]
P4010	4.04	0.879	0.916	0.931	1.186	1.241	1.078	0.566	0.629	3.96	4.82	4.59
P4210	4.22	1.202	1.257	1.299	1.585	1.680	1.463	0.784	0.867	4.59	6.06	5.57
P4211	4.20	1.187	1.231	1.276	1.563	1.640	1.446	0.767	0.851	4.62	6.08	5.52
P4410	4.40	1.225	1.280	1.314	1.630	1.733	1.492	0.802	0.884	4.68	6.16	5.55
P4411	4.41	1.251	1.299	1.349	1.656	1.745	1.524	0.816	0.902	4.63	5.91	5.55
P4610	4.63	1.219	1.269	1.311	1.616	1.732	1.494	0.790	0.876	4.59	6.04	5.48
P4810	4.82	1.138	1.169	1.240	1.628	1.703	1.482	0.628	0.766	3.87	6.35	5.42
P4811	4.84	1.221	1.267	1.302	1.614	1.741	1.497	0.785	0.874	4.57	5.93	5.44
P4812	4.83	1.193	1.245	1.283	1.546	1.622	1.442	0.783	0.862	4.67	5.96	5.47
P4215	4.22	1.420	1.456	1.486	1.847	1.993	1.749	0.909	1.021	4.60	6.59	5.96
P4415	4.42	1.356	1.416	1.446	1.795	1.855	1.639	0.873	0.972	4.72	6.62	5.90
P4615	4.63	1.396	1.437	1.474	1.879	1.964	1.707	0.899	0.998	4.80	6.47	5.77
P4616	4.61	1.357	1.411	1.433	1.774	1.864	1.629	0.885	0.978	4.79	6.71	5.84
P4418	4.42	1.657	1.559	1.774	2.249	2.372	2.036	1.051	1.179	5.08	6.85	7.27
P4618	4.60	1.472	1.520	1.578	1.895	1.971	1.763	0.942	1.052	4.96	6.61	6.11
P4619	4.60	1.488	1.551	1.580	1.916	1.995	1.792	0.972	1.074	5.08	6.71	6.12

h = waterdiepte (m)

H_{1/3} = significante golfhoogte, berekend als gemiddelde golfhoogte van hoogste eenderde deel van de golven (m)

H_{m0} = significante golfhoogte, berekend op basis van energie inhoud (m)

H_{x%} = golfhoogte die door x% van de golven overschreden wordt (m)

H_m = gemiddelde golfhoogte (m)

H_{rms} = root-mean-square golfhoogte (m)

T_m = gemiddelde golfperiode (s)

T_{pD} = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

T_{m-1,0} = spectrale golfperiode (s)

Tabel B.2, golfcondities van de proeven met Basalt

	h	H _{1/3}	H _{m0}	H _{10%}	H _{2%}	H _{1%}	H _{1/10}	H _m	H _{rms}	T _m	T _{pD}	T _{m-1,0}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]
P4120	4.100	0.804	0.832	0.861	1.117	1.141	1.008	0.512	0.572	4.75	4.32	4.17
P4121	4.100	0.809	0.829	0.882	1.099	1.227	1.028	0.514	0.577	4.80	4.40	4.15
P4122	4.110	0.787	0.801	0.845	1.036	1.137	0.962	0.500	0.561	4.78	4.41	4.20
P4930	4.910	0.477	0.492	0.513	0.652	0.731	0.602	0.301	0.339	3.89	3.50	3.44
P4931	4.900	0.625	0.640	0.672	0.831	0.913	0.773	0.402	0.447	4.31	3.88	3.77
P4932	4.900	0.642	0.657	0.686	0.881	0.972	0.804	0.408	0.457	4.25	3.89	3.75
P4933	4.900	0.666	0.678	0.715	0.930	1.013	0.847	0.416	0.470	4.30	3.88	3.78
P4934	4.900	0.666	0.681	0.711	0.931	1.025	0.846	0.425	0.475	4.30	3.86	3.76
P4040	4.000	0.445	0.455	0.476	0.618	0.653	0.560	0.285	0.318	3.59	3.15	3.15
P4140	4.100	0.498	0.516	0.528	0.681	0.747	0.622	0.318	0.355	3.83	3.47	3.38
P4141	4.110	0.521	0.537	0.559	0.710	0.754	0.650	0.332	0.371	3.86	3.47	3.38
P4240	4.210	0.518	0.531	0.554	0.713	0.764	0.648	0.331	0.370	3.87	3.46	3.39
P4340	4.310	0.512	0.526	0.549	0.699	0.745	0.642	0.327	0.365	3.85	3.45	3.38
P4341	4.310	0.514	0.528	0.546	0.712	0.766	0.645	0.326	0.365	3.85	3.47	3.39
P4440	4.410	0.510	0.522	0.548	0.701	0.768	0.646	0.323	0.363	3.86	3.46	3.38
P4441	4.410	0.515	0.528	0.551	0.721	0.792	0.656	0.327	0.367	3.86	3.44	3.38
P4540	4.510	0.518	0.529	0.550	0.717	0.757	0.646	0.333	0.371	3.89	3.44	3.39
P4541	4.520	0.515	0.528	0.549	0.709	0.777	0.650	0.326	0.366	3.85	3.43	3.38
P4542	4.500	0.701	0.720	0.750	0.966	1.046	0.875	0.447	0.500	4.36	3.97	3.84

h = waterdiepte (m)

H_{1/3} = significante golfhoogte, berekend als gemiddelde golfhoogte van hoogste eenderde deel van de golven (m)

H_{m0} = significante golfhoogte, berekend op basis van energie inhoud (m)

H_{x%} = golfhoogte die door x% van de golven overschreden wordt (m)

H_m = gemiddelde golfhoogte (m)

H_{rms} = root-mean-square golfhoogte (m)

T_m = gemiddelde golfperiode (s)

T_{pD} = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

T_{m-1,0} = spectrale golfperiode (s)

Tabel B.3, golfcondities van de proeven met blokken op hun kant

	h	H _{1/3}	H _{m0}	H _{10%}	H _{2%}	H _{1%}	H _{1/10}	H _m	H _{rms}	T _m	T _{pD}	T _{m-1.0}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]
P5050	5.000	0.791	0.835	0.844	1.089	1.151	0.985	0.506	0.567	5.34	4.84	4.63
P5250	5.200	0.908	0.947	0.967	1.231	1.373	1.132	0.583	0.650	5.71	5.16	5.02
P5251	5.200	1.037	1.082	1.114	1.376	1.492	1.272	0.668	0.743	6.08	5.76	5.29
P5252	5.200											
P4150	4.100	0.738	0.765	0.797	0.970	1.032	0.917	0.473	0.527	5.18	4.85	4.52
P4250	4.200	0.980	1.022	1.072	1.316	1.422	1.214	0.631	0.703	5.96	5.97	5.31
P4251	4.200	0.948	0.987	1.017	1.261	1.316	1.181	0.614	0.681	6.01	5.53	5.30
P4151	4.110	0.682	0.702	0.740	0.923	1.005	0.849	0.433	0.486	4.95	4.50	4.30
P4252	4.200	0.840	0.886	0.906	1.134	1.187	1.031	0.544	0.604	5.72	5.70	4.92
P4152	4.110	0.682	0.701	0.727	0.913	1.027	0.850	0.434	0.486	4.95	4.72	4.30
P4850	4.810	0.669	0.690	0.722	0.906	0.968	0.833	0.424	0.475	4.97	4.78	4.32
P4253	4.210	0.729	0.753	0.793	0.955	1.030	0.899	0.460	0.518	5.20	5.17	4.53
P4254	4.210	0.541	0.559	0.582	0.728	0.767	0.674	0.347	0.387	4.60	4.19	3.97
P4255	4.220	0.608	0.629	0.660	0.795	0.872	0.749	0.388	0.435	4.84	4.64	4.17
P4256	4.210	0.626	0.640	0.670	0.849	0.922	0.782	0.402	0.449	4.86	4.65	4.18
P4457	4.410	0.626	0.647	0.661	0.860	0.907	0.779	0.398	0.447	4.88	4.58	4.14
P4160	4.090	0.827	0.849	0.893	1.112	1.153	1.021	0.528	0.589	5.45	5.14	4.72
P4260	4.210	1.110	1.153	1.180	1.492	1.545	1.357	0.708	0.793	6.21	5.97	5.39
P4261	4.200	1.059	1.104	1.108	1.476	1.627	1.312	0.673	0.756	6.13	5.62	5.32
P4460	4.420	1.067	1.099	1.144	1.470	1.542	1.319	0.683	0.766	6.25	6.38	5.33
P4461	4.420	1.079	1.112	1.147	1.426	1.536	1.318	0.692	0.773	6.22	5.97	5.38
P4660	4.620	1.054	1.093	1.124	1.397	1.514	1.295	0.672	0.752	6.18	6.06	5.36
P4860	4.790	1.056	1.096	1.124	1.410	1.519	1.300	0.673	0.754	6.18	6.03	5.35

Tabel B.4, golfcondities van de proeven met Hydroblocks

Proef	N (-)	Aantal golven > 0.75 m		Aantal golven > 1 m		Aantal golven > 1.25 m		Aantal golven > 1.5 m		H _{max} (m)	H _{max-1} (m)	H _{max-2} (m)
		aantal	deel	aantal	deel	aantal	deel	aantal	deel			
P4201	649	304	0.49	166	0.27	81	0.13	28	0.05	1.82	1.77	1.73
P4202	673	330	0.51	205	0.32	110	0.17	50	0.08	2.00	1.94	1.94
P4203	659	340	0.52	190	0.29	92	0.14	28	0.04	1.82	1.72	1.70
P4204	1566	469	0.30	198	0.13	53	0.03	5	0.00	1.66	1.66	1.62
P4401	925	522	0.58	324	0.36	176	0.20	84	0.09	1.97	1.95	1.94
P4402	1294	681	0.53	410	0.32	214	0.17	105	0.08	2.29	2.18	2.16
P4601	4489	2504	0.56	1609	0.36	873	0.19	405	0.09	2.53	2.35	2.34
P4801	1890	1024	0.56	664	0.36	348	0.19	170	0.09	2.30	2.26	2.20
P4802	2535	1382	0.55	879	0.35	468	0.18	214	0.08	2.33	2.18	2.14
P4803	4467	2453	0.55	1539	0.34	807	0.18	369	0.08	2.43	2.31	2.29
P5001	1205	614	0.55	392	0.35	136	0.12	102	0.09			
P5002	345	187	0.55	127	0.37	40	0.12	28	0.08	2.41	2.35	2.28
P4804	4080	2202	0.54	1419	0.35	494	0.12	358	0.09	2.76	2.75	2.71
P4805	1884	1004	0.53	633	0.34	207	0.11	152	0.08	2.97	2.90	2.76

N = aantal golven (-)

H_{max} = grootte van de grootste golf (m)

H_{max-1} = grootte van de een na de grootste golf (m)

H_{max-2} = grootte van de 2 na de grootste golf (m)

Tabel B.5, aantal extreme golven en grootte van hoogste golven in de proeven op Basalton

Proef	N (-)	Aantal golven > 0.75 m		Aantal golven > 1 m		Aantal golven > 1.25 m		Aantal golven > 1.5 m		H _{max} (m)	H _{max-1} (m)	H _{max-2} (m)
		aantal	deel	aantal	deel	aantal	deel	aantal	deel			
P4010	1818	224	0.26	61	0.07	7	0.01	1	0.00	1.58	1.36	1.33
P4210	1389	699	0.52	375	0.28	166	0.12	44	0.03	1.82	1.78	1.76
P4211	1349	664	0.49	362	0.27	143	0.11	41	0.03	1.82	1.77	1.73
P4410	847	441	0.53	246	0.29	108	0.13	32	0.04	1.96	1.79	1.78
P4411	2721	1484	0.55	834	0.31	383	0.14	125	0.05	2.07	2.00	1.98
P4610	4702	2452	0.52	1322	0.28	588	0.13	177	0.04	2.13	2.09	2.02
P4810	391	142.2	0.36	82	0.21	37	0.09	15	0.04	2.03	1.85	1.83
P4811	6954	3593	0.52	1975	0.28	865	0.12	277	0.04	2.22	2.11	2.10
P4812	3661	1880	0.51	992	0.27	424	0.12	119	0.03	2.30	1.93	1.92
P4215	2738	1719	0.63	1142	0.42	594	0.22	238	0.09	2.14	2.07	2.02
P4415	2670	1587	0.59	1054	0.39	546	0.20	207	0.08	2.24	2.16	2.06
P4615	4312	2630	0.61	1711	0.40	953	0.22	380	0.09	2.29	2.15	2.11
P4616	940	573.3	0.61	370	0.39	191	0.20	72	0.08	2.04	2.01	1.99
P4418	2481	1582	0.64	1077	0.43	667	0.27	340	0.14	2.38	2.21	2.17
P4618	2780	1766	0.64	1259	0.45	738	0.27	385	0.14	2.15	2.10	2.08
P4619	709	471.9	0.67	335	0.47	201	0.28	98	0.14	2.18	2.08	2.06

N = aantal golven (-)

H_{max} = grootte van de grootste golf (m)

H_{max-1} = grootte van de een na de grootste golf (m)

H_{max-2} = grootte van de 2 na de grootste golf (m)

Tabel B.6, aantal extreme golven en grootte van hoogste golven in de proeven op Basalt

Proef	N (-)	Aantal golven > 0.5 m		Aantal golven > 0.75 m		Aantal golven > 1 m		Aantal golven > 1.25 m		H _{max} (m)	H _{max-1} (m)	H _{max-2} (m)
		aantal	%	aantal	%	aantal	%	aantal	%			
P4120	957	450	49%	163	17.8%	42	4.6%	4	0.4%	1.30	1.28	1.27
P4121	951	444	49%	153	16.8%	50	5.5%	8	0.9%	1.44	1.41	1.34
P4122	1558	784	49%	281	17.6%	40	2.5%	4	0.2%	1.38	1.37	1.32
P4930	1141	122	11%	7	0.6%	0	0.0%	0	0.0%	0.85	0.84	0.79
P4931	1032	292	30%	49	5.0%	3	0.3%	0	0.0%	1.10	1.09	1.02
P4932	2606	797	31%	154	6.0%	21	0.8%	1	0.0%	1.29	1.23	1.18
P4933	802	268	33%	67	8.2%	9	1.1%	0	0.0%	1.18	1.11	1.08
P4934	2130	696	33%	161	7.6%	29	1.4%	3	0.1%	1.37	1.30	1.27
P4040	1210	92	8%	3	0.3%	0	0.0%	0	0.0%	0.80	0.78	0.78
P4140	1148	153	14%	10	0.9%	0	0.0%	0	0.0%	0.92	0.83	0.81
P4141	2840	460	16%	31	1.1%	1	0.0%	0	0.0%	1.04	0.94	0.94
P4240	3969	615	16%	47	1.2%	1	0.0%	0	0.0%	1.09	0.96	0.94
P4340	2855	423	15%	25	0.9%	1	0.0%	0	0.0%	1.10	0.97	0.95
P4341	5145	786	15%	61	1.2%	0	0.0%	0	0.0%	1.00	0.98	0.94
P4440	7422	1090	15%	88	1.2%	5	0.1%	0	0.0%	1.24	1.08	1.04
P4441	8547	1256	15%	119	1.4%	6	0.1%	0	0.0%	1.12	1.11	1.09
P4540	2808	426	15%	34	1.2%	1	0.0%	0	0.0%	1.03	0.96	0.92
P4541	10814	1618	15%	134	1.3%	9	0.1%	0	0.0%	1.17	1.16	1.14
P4542	3577	1346	38%	352	10.0%	44	1.2%	2	0.1%	1.46	1.31	1.24

N = aantal golven (-)

H_{max} = grootte van de grootste golf (m)

H_{max-1} = grootte van de een na de grootste golf (m)

H_{max-2} = grootte van de 2 na de grootste golf (m)

Tabel B.7, aantal extreme golven en grootte van hoogste golven in de proeven op blokken op hun kant

Proef	N (-)	Aantal golven > 0.5 m		Aantal golven > 0.75 m		Aantal golven > 1 m		Aantal golven > 1.25 m		H _{max} (m)	H _{max-1} (m)	H _{max-2} (m)
		aantal	%	aantal	%	aantal	%	aantal	%			
P5050	1102	534	49.7%	180	16.8%	38	3.5%	4	0.4%	1.59	1.41	1.28
P5250	1060	599	58.4%	280	27.3%	78	7.6%	17	1.7%	1.79	1.66	1.50
P5251	1093	722	66.3%	413	37.9%	183	16.8%	43	3.9%	2.21	1.93	1.79
P5252	9	8	88.9%	6	66.7%	5	55.6%	4	44.4%	2.20	2.17	1.51
P4150	913	370	42.2%	114	13.0%	14	1.6%	0	0.0%	1.23	1.17	1.12
P4250	1220	745	62.9%	402	33.9%	155	13.1%	38	3.2%	1.74	1.62	1.61
P4251	681	406	62.0%	205	31.3%	71	10.8%	15	2.3%	1.82	1.70	1.53
P4151	969	335	35.6%	82	8.7%	11	1.2%	0	0.0%	1.19	1.15	1.10
P4252	894	474	54.7%	189	21.8%	42	4.8%	4	0.5%	1.52	1.33	1.28
P4152	966	332	35.4%	82	8.7%	9	1.0%	0	0.0%	1.20	1.14	1.09
P4850	958	308	33.1%	72	7.7%	6	0.6%	0	0.0%	1.08	1.07	1.05
P4253	1525	650	42.4%	204	13.3%	20	1.3%	1	0.1%	1.27	1.20	1.16
P4254	1028	194	19.5%	12	1.2%	0	0.0%	0	0.0%	0.95	0.89	0.88
P4255	1973	526	27.4%	76	4.0%	3	0.2%	0	0.0%	1.19	1.10	1.05
P4256	1463	411	28.9%	78	5.5%	3	0.2%	0	0.0%	1.18	1.14	1.13
P4457	619	182	30.2%	32	5.3%	1	0.2%	0	0.0%	1.19	1.07	0.98
P4160	890	435	50.3%	175	20.3%	47	5.4%	2	0.2%	1.28	1.27	1.24
P4260	2399	1626	70.2%	1016	43.9%	509	22.0%	170	7.3%	1.78	1.76	1.75
P4261	407	264	67.0%	154	39.1%	74	18.8%	21	5.3%	1.78	1.69	1.66
P4460	318	213	69.2%	134	43.5%	54	17.5%	18	5.8%	1.61	1.58	1.54
P4461	2429	1670	69.4%	1027	42.7%	466	19.4%	145	6.0%	1.75	1.72	1.71
P4660	5573	3731	67.5%	2175	39.3%	966	17.5%	290	5.2%	1.96	1.90	1.86
P4860	4543	3050	67.6%	1775	39.3%	785	17.4%	240	5.3%	1.96	1.95	1.89

Tabel B.8, aantal extreme golven en grootte van hoogste golven in de proeven op Hydroblocks

	serie	van hele serie				laatste proef	laatste 50 golven tot schade			
		H_s	H_{max}	H_{max-1}	H_{max-2}	H_s	H_s	H_{max}	H_{max-1}	H_{max-2}
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
basalt	ingolf	1.25	1.96	1.82	1.82	1.28	1.18	1.78	1.31	1.26
	1	1.27	2.30	2.13	2.11	1.25	1.26	1.57	1.34	1.26
	3	1.54	2.38	2.21	2.17	1.52	1.57	2.10	2.05	2.01
blokken	1	0.82	1.44	1.41	1.38	0.80	0.86	1.17	1.02	0.98
	2	0.66	1.37	1.30	1.29	0.68	0.81	1.12	1.06	1.03
Hydroblocks	1	1.09	2.21	2.20	2.17	1.09	0.97	1.42	1.31	1.16
	2	1.01	1.82	1.74	1.70	0.99	0.98	1.20	1.20	1.17
	3	0.89	1.52	1.33	1.28	0.89	0.83	1.21	1.18	1.16
	4	0.75	1.27	1.20	1.16	0.75	0.82	1.03	1.03	1.00
	5	0.64	1.19	1.19	1.18	0.65	0.56	0.75	0.69	0.62
	6	1.11	1.96	1.96	1.95	1.10	1.17	1.68	1.46	1.41

Tabel B.9, golfcondities tijdens de laatste 50 golven voor het ontstaan van schade in vergelijking tot die van de hele serie en de gehele laatste proef.

toplaag	referentie	proef	H_s (m)	T_p (s)	duur (uur)	H_s/ΔD (-)	ξ_{op} (-)	F (-)
Basalton	Eysink en Klein Breteler, 2003	24	1,37	8,08	2,10	3,75	2,46	6,84
Basalton	Eysink en Klein Breteler, 2003	26	1,57	6,70	1,70	4,30	1,91	6,61
Basalton	huidige onderzoek	alle	1,38	8,01	51,05	3,77	2,44	6,82
basalt	Burger, 1985	21	1,55	5,12	29,25	2,59	1,47	3,34
basalt	Burger, 1985	23	1,85	6,14	8,50	3,09	1,61	4,25
basalt	Eysink en Klein Breteler, 2003	8A	1,20	7,70	2,00	3,07	2,51	5,67
basalt	Eysink en Klein Breteler, 2003	18	1,74	5,85	1,50	4,45	1,58	6,04
basalt	huidige onderzoek	serie 1	1,27	5,97	23,50	3,24	1,89	4,95
basalt	huidige onderzoek	serie 2	1,43	6,56	14,00	3,67	1,95	5,73
basalt	huidige onderzoek	serie 3	1,54	6,72	7,33	3,94	1,93	6,11

Tabel B.10, golfcondities van de in hoofdstuk 4 gebruikte proeven op Basalton en basalt

toplaag	referentie	proef	H_s (m)	T_p (s)	duur (uur)	H_s/ΔD (-)	ξ_{op} (-)	F (-)
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao4	1,23	4,30	1,09	4,67	1,38	5,80
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao5	1,40	4,70	1,19	5,32	1,42	6,71
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao8	1,00	4,90	1,24	3,80	1,75	5,51
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao9	1,27	5,50	0,69	4,82	1,74	6,98
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao12	1,04	6,40	1,62	3,95	2,24	6,76
blokken op kant	Smith e.a., 2000	12ao13	1,24	6,60	1,67	4,71	2,12	7,76
blokken op kant	huidige onderzoek	serie 1	0,82	4,38	3,62	3,10	1,73	4,47
blokken op kant	huidige onderzoek	serie 2	0,66	3,88	6,37	2,52	1,70	3,59
blokken op kant	huidige onderzoek	serie 3	0,53	3,45	43,50	2,00	1,70	2,85
Hydroblocks	Leeuwestein, 1998	p6	1,60	7,80	1,97	6,20	2,20	10,48
Hydroblocks	huidige onderzoek	1	1,09	5,77	1,39	5,11	1,97	8,02
Hydroblocks	huidige onderzoek	2	1,01	5,81	3,35	4,72	2,06	7,65
Hydroblocks	huidige onderzoek	3	0,89	5,70	2,07	4,14	2,16	6,93
Hydroblocks	huidige onderzoek	4	0,75	5,17	2,63	3,52	2,13	5,82
Hydroblocks	huidige onderzoek	5	0,64	4,64	4,13	2,97	2,08	4,84
Hydroblocks	huidige onderzoek	6	1,11	6,02	19,75	5,17	2,04	8,33

Tabel B.11, golfcondities van de in hoofdstuk 4 gebruikte proeven op Blokken op hun kant en Hydroblocks

C Foto's



Na proef 4601



Na proef 4803

Basalton



Na proef 4010



Na proef 4410

Basalt
ingolven



Na proef 4610



na proef 4812

Basalt
serie 1



Na proef 4215



Na proef 4616



Na proef 4616

Basalt
serie 2



Na proef 4418

Basalt
serie 3

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C5



Na proef 4120



Na proef 4121



Na proef 4122



Na proef 4122



Na proef 4122

Blokken op hun kant
serie 1



Na proef 4932



Na proef 4934

Blokken op hun kant
serie 2

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C7



Na proef 4341



Na proef 4541



Na proef 4542

Blokken op hun kant
serie 3 en reststerkte



Na proef 5251



Na proef 5251



Na proef 5252

Hydroblocks
serie 1

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C9



Na proef 4251

Hydroblocks
serie 2

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C10



Na proef 4252



Na proef 4252

Hydroblocks
serie 3



Na proef 4850



Na proef 4253

Hydroblocks
serie 4

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C12



Na proef 4256



Na proef 4257

Hydroblocks
serie 5

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. C13



Na proef 4660



Na proef 4860



Na proef 4860

Hydroblocks
serie 6

D Resultaten van schade-inspecties

D Resultaten van schade-inspecties

In de inspectie- en schaderapporten is de locatie op het talud aangegeven met de letters die op het talud waren geschilderd. Het niveau van deze letters t.o.v. de gootbodem is weergegeven in tabel D.1. In de tekst is verder de locatie vertaald naar een dimensieloze diepte onder de stilwaterlijn:

$$d/H_s = (h - z)/H_s$$

met:

d = diepte onder de stilwaterlijn (m)

H_s = significante golfhoogte (m)

h = waterdiepte (m)

z = niveau t.o.v. de gootbodem (m)

D.1 Basalton

De langeduurproef met Basaltonbekleding is gestart op 16 augustus 2004 met de proeven P4201, P4202, P4203 en P4204 met een waterstand van +4,20 m boven de gootbodem. Tijdens de hele langeduurproef is per periode van 10 minuten gekeken hoe diep de grootste golfteerugloop was op een letterschaal van A t/m V, die met een interval van 0,5 m langs het talud was uitgezet. Letter A lag op $z = +4,93$ m boven de gootbodem en de letter V op $z = +2,03$ m, vlak bij de overgang naar het onderste betontalud op $z = +1,99$ m.

Bij bovengenoemde proeven met een waterstand van 4,20 m werd overwegend de letter V afgelezen ($1,62 < d/H_s < 1,75$). Tijdens de proeven P4401 en P4402, met een waterstand van +4,41 m, was de letter U de meest afgelezen letter (met $d/H_s = 1,64$). Met enige regelmaat werden ook de letters T en V als extreem opgegeven bij deze waterstand ($1,53 < d/H_s < 1,75$).

Bij de volgende proef P4601, met een waterstand van 4,63 m, verschoof dit naar de letters Q, R, S en T ($1,38 < d/H_s < 1,67$). Bij een waterstand van 4,82 m verschoof dit verder naar boven naar de letters P, Q en R met het zwaartepunt rond Q en R ($1,51 < d/H_s < 1,64$). Bij de hoge waterstand van 5,02 m verschoof dit verder omhoog naar de letters M, N, O en P en incidenteel zelfs Q ($1,3 < d/H_s < 1,7$), met het zwaartepunt rond N en O ($1,37 < d/H_s < 1,57$).

De extreme golfteerloop was derhalve ongeveer $d/H_s \approx 1,7$. Deze waarnemingen zijn echter grof en subjectief en hebben daardoor beperkte waarde.

Schade aan het talud is onder andere bepaald door het regelmatig waterpassen van 20 gemerkte stenen in het talud verdeeld over 4 raaien op respectievelijk 1, 2, 3 en 4 meter uit de gootwand aan de halzijde. Metingen zijn verricht voor proef P4201, na proef P4204, na proef P4402, na proef P4601, na proef P4803 en na proef P4805. De resultaten hiervan zijn gegeven in Bijlage E.

Gedurende de hele langeduurproef is de Basaltonbekleding niet bezweken. Omdat er tijdens de proef weinig veranderde, zijn er niet veel inspectierapporten gemaakt.

letter	Basalton	basalt	Blokken op hun kant	Hydroblock van 15 cm	Hydroblock van 20 cm
A	4,93	5,07	5,13	4,55	5,16
B	4,78	4,94	4,99	4,41	5,02
C	4,64	4,81	4,85	4,27	4,88
D	4,51	4,69	4,71	4,14	4,74
E	4,37	4,55	4,58	4,00	4,61
F	4,23	4,40	4,45	3,87	4,47
G	4,10	4,28	4,30	3,73	4,33
H	3,96	4,13	4,17	3,59	4,20
I	3,81	4,00	4,03	3,45	4,06
J	3,67	3,85	3,89	3,31	3,92
K	3,52	3,72	3,75	3,17	3,78
L	3,39	3,56	3,61	3,03	3,65
M	3,26	3,43	3,48	2,90	3,51
N	3,13	3,31	3,34	2,77	3,37
O	2,99	3,16	3,20	2,62	3,24
P	2,84	3,04	3,08		3,10
Q	2,71	2,89	2,94		2,96
R	2,57	2,74	2,79		2,83
S	2,44	2,61	2,65		2,69
T	2,30	2,47	2,52		2,56
U	2,17	2,31	2,38		2,42
V	2,03				2,29

Tabel D.1, niveau van de letters op het talud t.o.v. de gootbodem (m)

De eerste is gemaakt na proef P4601 (zie ook figuur C1). Dit rapport vermeldt dat ter plaatse tussen M en Q ($0,98 < d/H_s < 1,38$) aan de halzijde plaatselijk alle inwasmateriaal uit de spleten is gespoeld en de onderkant van de stenen te zien is. Dat is tussen de golfterugloop en de stilwaterlijn. Daarboven en daaronder alsook aan de meetcabinezijde zijn de spleten redelijk tot goed gevuld.

De inspectie van het talud na proef P4803 geeft eenzelfde beeld, alleen is het gebied met uitspoeling naar boven uitgebreid tot de letter J ($0,83 < d/H_s < 1,38$).

Ook het inspectierapport na proef P4805 geeft aan dat in het gebied aan de halzijde tussen de letters J t/m P ($0,83 < d/H_s < 1,43$) sommige spleten (ca 5 à 6 stuks) helemaal leeg zijn tot aan de onderkant van de steen. In de buurt van het echolood is in het gebied tussen S en V ($1,72 < d/H_s < 2,01$) op meerdere plaatsen niet alleen al het inwasmateriaal (tot 20 cm

diepte) weggespoeld, maar ook het filtermateriaal tot op het geotextiel (totaal 30 cm diep) en hangen de Basaltonstenen, ingeklemd tussen betonplaat en de bovenliggende blokken, in de lucht. De oorzaak hiervan werd toegeschreven aan de lokale turbulentie die werd opgewekt door de golfgedreven waterbeweging langs het echolood en door het stalen vangnet. Om deze reden zijn beiden bij de andere proeven ook verwijderd en is dit effect niet meer waargenomen.

De spleten tussen de blokken waren in het algemeen aan de zijde van de meetcabine redelijk tot volledig gevuld. De oorzaak was dat het uitgespoelde inwasmateriaal zich vooral aan die zijde op het talud verzamelde en langs het talud met de golven heen en weer bewoog. Het bij een neergaande golf uitgespoelde materiaal werd daardoor aan die zijde steeds weer teruggebracht met de volgende golfoploop. Waarom het uitgespoelde inwasmateriaal zich aan de zijde van de meetcabine concentreerde was niet duidelijk.

D.2 Basalt

In week 39 en 40 van 2004 is de basaltbekleding in de goot aangebracht en, na het haven-damonderzoek, is in week 45 met de langeduurproef begonnen. Ook nu was er weer, als bij de Basalton, een letterschaal langs het talud uitgezet (A op 5,07 m en U op 2,31 m boven de gootbodem) en waren er weer vier raaien, nu met elk 7 meetpunten, uitgezet om de vervorming van het talud te monitoren via waterpassingen. Metingen zijn verricht voor en na proef P4010, na proef P4211, na proef P4410, na proef P4411, na proef P4610, na proef P4812, na proef P4215, na proef P4415, na proef P4418, na proef P4618 en na proef P4619. De resultaten hiervan zijn gegeven in Bijlage E.

De waarnemingen ten aanzien van het uitspoelen van het inwasmateriaal zijn weergegeven in figuur D1.

Ingolven

Na de eerste ingolfproef P4010 is het talud geïnspecteerd (zie ook figuur C2). Op het hele talud was er weinig inwasmateriaal uitgespoeld, behalve in een smal gebied tussen L en P-Q ($0,52 < d/H_s < 1,15$) op een afstand van 1,5 m tot 3 m van de gootwand aan de halzijde. In dat deel werd uitspoeling van inwasmateriaal geconstateerd variërend van 5 cm bij L, oplopend tot 11-12 cm tussen O en P ($0,96 < d/H_s < 1,09$) en daarna weer afnemend tot ca 7 cm tussen P en Q. Tussen L en M ($d/H_s = 0,59$) was een steen circa 4 cm omhoog gekomen. Tussen P en Q ($1,09 < d/H_s < 1,25$) lag aan de meetcabinezijde veel uitgespoeld inwasmateriaal op het talud.

Na proef P4211 (na 5,5 uur golven) was er weer een inspectie. Over een breedte van ca. 4 m van het talud aan de halzijde was tussen H en Q ($0,06 < d/H_s < 1,06$) veel inwasmateriaal uit de spleten verdwenen. De diepte van de uitspoeling varieerde tussen 5 en 14 cm. Nog nergens was de onderkant van de stenen te zien. Dezelfde steen bij L ($d/H_s = 0,59$) stond nu ca. 5 cm omhoog, maar zat wel muurvast.

Tijdens proef P4410 zijn er na 1 uur en 6 minuten vlak bij de gootwand aan de halzijde tussen L en M ($d/H_s = 0,70$) twee stenen uit het talud geslagen (zie ook figuur C2).

De steen tussen L en M ($d/H_s = 0,70$) in het midden van de goot stak nog steeds 5 cm boven het talud uit.

In een strook van 1,5 m langs de gootwand bij de meetcabine was bijna geen inwasmateriaal uitgespoeld. Ook onder op het talud (onder Q-P; $d/H_s > 1,1$) was weinig inwasmateriaal uit de spleten verdwenen (ca. 3 à 4 cm). In het deel van het talud aan de halzijde was tussen Q en N ($0,86 < d/H_s < 1,18$) ca. 17 tot 20 cm uitgespoeld. Tussen N en D liep dat geleidelijk terug tot ca. 5 cm en boven D ($d/H_s < -0,23$) bleef dat ca. 5 cm. Na deze ingolfserie is het talud hersteld en opnieuw ingewassen voor de langeduurproef met een waterstand startend op +4,41 m.

Serie I

Bij de inspectie na proef P4610 ziet het talud er nog goed uit, zie figuur C3. Eén steen staat ca. 5 cm omhoog (steeds dezelfde steen tussen L en M; $d/H_s = 0,89$). Onder Q zit het inwasmateriaal er nog in. Daarboven is er tot G ($0,27 < d/H_s < 1,37$) gemiddeld ca. 6 cm uitgespoeld. Op sommige plaatsen is dit meer (13 tot 15 cm), maar dat is dan wel gebeurd bij grote spleten. Tussen Q en M ($0,94 < d/H_s < 1,37$) zijn er enkele uitschieters tot 21 cm. Boven H ($d/H_s < 0,39$) is de uitspoeling gemiddeld in de orde van 4 tot 5 cm. Aan de meetcabinezijde is het talud over een breedte van ca. 1,5 m van boven tot beneden geheel vol met inwasmateriaal.

Tijdens proef P4810 was er na 22 minuten schade. Er bleek vlak bij de gootwand aan de halzijde net boven E ($d/H_s = 0,20$) een steen losgeslagen te zijn. Deze steen bleek zeer taps van vorm (zie onderstaande foto). Er is besloten om deze steen te vervangen door een normale steen, die met wat “wiggen” is vastgezet in het talud. Daarna is de proevenserie voortgezet. Deze schade is nog toegeschreven aan het proces van het ontwikkelen van de sterkte tot de eindsterkte. Op dit hoge niveau op het talud hadden we tot nu toe nog niet gevolgd.



Tapse steen uit proef P4810, die is vervangen

Tijdens proef P4812 is er vlak bij de gootwand aan de halzijde ter hoogte van H ($d/H_s = 0,56$) weer een steen uit het talud geslagen (zie ook figuur 3.4 en C3). Deze steen was 10 bij

15 cm dik en 21 cm hoog. Gezien het feit dat dit een normale zuil is die na langdurige belasting uit het talud is geslagen, wordt dit gezien als een schade op een moment dat de bekleding zijn volle eindsterkte heeft. De rest van het talud ziet er nog goed uit. De steen tussen L en M ($d/H_s = 1,06$) staat nog steeds omhoog, nu ca. 7 cm. Het steentje ernaast staat nu ca. 2 cm omhoog. Het talud aan de meetcabinezijde is over een breedte van 1,5 m goed met inwasmateriaal gevuld. Aan de halzijde is het talud onder P redelijk gevuld. Van P tot E ($0,22 < d/H_s < 1,43$) is er gemiddeld ca. 10 cm uitgespoeld. In een strook van 1,5 m langs de gootwand aan de halzijde is tussen P en L ($1,01 < d/H_s < 1,43$) op enkele plaatsen al het inwasmateriaal uitgespoeld. Midden in de goot is het talud redelijk gevuld. Bovenin het talud is ca. 5 cm uitgespoeld. Na deze proef was de langeduurproef beëindigd en is het talud weer hersteld (stenen die omhoog stonden zijn ook weer omlaag geslagen) en ingewassen voor de middenlangeduurproef (serie 2).

Serie 2

Na proef P4215 zag het talud er nog goed uit met weinig uitgespoeld inwasmateriaal (zie figuur C4). Onder Q waren alle spleten vol. Vanaf Q t/m O ($0,73 < d/H_s < 0,91$) was er gemiddeld 7 à 8 cm uit. Verder naar boven nam dit af tot ca. 5 cm. Het deel van het talud aan de meetcabinezijde was over een breedte van 2 m goed gevuld. Al het uitgespoelde inwasmateriaal lag weer op dat deel van het talud.

Na proef P4415 lag het talud er nog keurig bij. Onder Q ($d/H_s > 1,07$) en in een strook van 1,5 m breed langs de gootwand aan de meetcabinezijde waren de spleten nog goed gevuld. In het andere deel van het talud was tussen P en J ($0,40 < d/H_s < 0,97$) 7 à 8 cm uitgespoeld. Op sommige plaatsen 10 cm met uitschieters tot 18 cm. Van J naar boven toe loopt dit terug naar 4 à 5 cm. Al het uitgespoelde inwasmateriaal lag weer aan de meetcabinezijde.

Na proef P4616 is het beeld nog vergelijkbaar (zie ook figuur C4). Nu is dezelfde steen tussen L en M ($d/H_s = 0,79$) weer 3 cm omhoog gekomen. Bij N ($d/H_s = 0,93$) is een klein steentje 2 à 3 cm omhoog gekomen. Onder P ($d/H_s > 1,11$) was het talud goed gevuld; slechts 4 à 5 cm eruit. Verder naar boven, van P tot H ($0,34 < d/H_s < 1,11$), was talud redelijk gevuld; 8 à 10 cm eruit. Op sommige plaatsen is 17 à 20 cm uitgespoeld. Van H tot boven nam de uitspoeling weer geleidelijk af tot ca. 5 cm.

Serie 3

Na proef P4616 is voor de volgende proevenserie, het talud opnieuw ingewassen, de waterstand verlaagd tot 4,42 m en is de golfhoogte verhoogd. Na proef P4418 zag het talud er nog steeds goed uit (zie figuur C5). De steen tussen L en M ($d/H_s = 0,58$) was inmiddels 5 cm omhoog gekomen. Het steentje bij N ($d/H_s = 0,70$) staat nog 2 à 3 cm omhoog. Onder Q, boven N en langs de gootwand aan de meetcabinezijde is het talud nog goed gevuld. Tussen Q en N ($0,70 < d/H_s < 0,96$) is er gemiddeld 10 cm inwasmateriaal uitgespoeld; op enkele plaatsen tot 19 à 20 cm.

Tijdens proef P4618 is na 3,83 uur de steen tussen L en M ($d/H_s = 0,72$) uit het talud geslagen (zie figuur 3.5). Daarna is er nog 24 minuten doorgegolfd. Bij inspectie bleek er, naast het ontstaan van het gat in het talud, geen belangrijke veranderingen te zijn opgetreden ten opzichte van de vorige inspectie.

D.3 Blokken op hun kant

Serie 1

Het eerste schaderapport is opgemaakt na proef P4120 (zie ook figuur C6 en 3.6). Net onder J ($d/H_s = 0,29$) stak een blok 1,5 cm boven de rest uit en tussen J en K ($d/H_s = 0,32$) stak een ander blok 1,3 cm omhoog. Tussen K en L ($0,42 < d/H_s < 0,59$) werd aan de meetcabinezijde een duidelijke algehele verlaging waargenomen. De rij ter hoogte van L was 1 cm gezakt. De rij erboven was 1,5 cm meer gezakt, dus 2,5 cm. De rij daarboven was nog weer 2,2 cm meer gezakt, dus 4,7 cm en de rij daarboven was nog 2 cm verder gezakt, dus 6,7 cm op $d/H_s = 0,49$. Hier was dus het volledige filter weg. Tussen ML en N ($0,67 < d/H_s < 0,92$) stonden meerdere stenen circa 3 cm omhoog. Enkele andere stonden tussen 1,3 en 2,8 cm omhoog en één steen stond zelfs 6 cm omhoog ter hoogte van M ($d/H_s = 0,75$). Ter hoogte van Q ($d/H_s = 1,40$) stond er nog één steen 5,5 cm omhoog en ter hoogte van O ($d/H_s = 1,09$) nog één steen 1 cm omhoog.

Na proef P4121 was er eenzelfde beeld als na proef P4120 (zie ook figuur C6). De steen bij J ($d/H_s = 0,25$) stond nu 2 cm omhoog, die tussen J en K ($d/H_s = 0,32$) was weer teruggezakt. Tussen K en L ($0,42 < d/H_s < 0,59$) werd weer aanzienlijke zakking waargenomen, die nog iets was toegenomen tot ca. 8 cm. Tussen M en N ($0,75 < d/H_s < 0,92$) stonden weer veel stenen omhoog. Sommige waren nog iets verder omhoog gekomen, anderen waren weer teruggezakt. Veel van de omhoog gekomen stenen (1,2 tot 5,5 cm) stonden los in het talud. De steen ter hoogte van O ($d/H_s = 1,09$) was verder omhoog gekomen tot 6,5 cm boven het talud, terwijl de steen ter hoogte van P ($d/H_s = 1,23$) weer was teruggezakt.

Tijdens proef P4122 is er na 1 uur en 37 minuten laag op het talud een steen uitgespoeld (zie ook figuur C6). Bij inspectie na de proef bleek de derde hele steen vanaf de gootwand aan de halzijde eruit te zijn tussen M en N ($d/H_s = 0,84$). De steen bij J ($d/H_s = 0,27$) was inmiddels 3 cm omhoog gekomen en een tweede steen in de buurt was 2 cm omhoog gekomen. Tussen M en N ($0,77 < d/H_s < 0,94$) stonden veel stenen tussen 3 en 12 cm omhoog en was er dus één steen uitgeslagen. De steen ter hoogte van O ($d/H_s = 1,11$) was teruggezakt tot 3 cm boven het talud en ter hoogte van P ($d/H_s = 1,26$) staken nu 3 stenen 2, 3 en 6 cm boven het talud. Na deze proef is het talud ongeveer hersteld door de stenen naar beneden te slaan. Daarna is het talud verder met een hogere waterstand getest op het onbeschadigde deel.

Serie 2

Tijdens proef P4931 is na ongeveer 35 minuten golven een steen, ongeveer ter hoogte van F of iets daar onder ($d/H_s \approx 0,75$), gaan bewegen. De beweging was eerst 1 à 2 cm op en neer, en op $t = 50$ min zelfs 8 à 10 cm. Later werd het nog eens 4 à 5 cm en na afloop van de proef is de steen teruggezakt tot een definitieve verplaatsing van 1 à 2 cm. Er is toen niet afgepompt om een gedetailleerde inspectie uit te voeren.

Het eerstvolgende schaderapport is na proef P4932 (zie figuur C7 en 3.8). Net boven F ($d/H_s = 0,64$) waren delen van drie rijen blokken circa 2 cm gezakt. Tussen F en G ($0,69 < d/H_s <$

0,90) waren aan de halzijde twee blokken 4 cm respectievelijk 5,5 cm omhoog gekomen. Tussen G en H ($0,90 < d/H_s < 1,11$) waren nog eens twee blokken omhoog gekomen; één aan de halzijde 5,5 cm en één aan de meetcabinezijde 2,5 cm. Alle vier omhoog gekomen blokken zaten volledig los in het talud.

Tijdens proef P4934 is geconstateerd dat een aantal blokken op en neer bewogen, waarbij sommige wel 10 cm omhoog zijn gekomen en daarna weer naar beneden zijn gezakt (zie figuur C7 en 3.9).

De proef is na 2,09 uur gestopt nadat er tussen F en G ($d/H_s = 0,77$) aan de halzijde op 0,8 m uit de gootwand een blok uit het talud was geslagen. Ter hoogte van E ($d/H_s = 0,47$) waren de blokken 1 tot 2 cm gezakt. Tussen E en F ($d/H_s = 0,62$) stond één blok 4,5 cm omhoog en ter hoogte van F ($d/H_s = 0,67$) waren de blokken 2,5 cm gezakt. Ter hoogte van G ($d/H_s = 0,88$) stonden aan de halzijde twee blokken 5 cm en 7 cm omhoog en stond aan de meetcabinezijde één blok (naast steen 30) 3 cm omhoog. Tussen G en H ($0,88 < d/H_s < 1,08$) stonden aan de meetcabinezijde twee blokken 3 cm en 4 cm omhoog. Alle omhoogstaande stenen zaten volledig los in het talud.

Van de spleten rond het omhoog staande blok tussen E en F zijn de spletenbreedten gemeten. De spleet aan de bovenzijde van dit blok was 2,1 mm breed, en de andere spleten slechts 0,5 à 0,6 mm. De gemiddelde spletenwiden in dit gebied was 0,6 mm.

Na deze proef is het talud inclusief filter tussen 2 rijen onder D tot 2 rijen boven N ($3,40 < z < 4,65$ m) uitgebroken en opnieuw ingebouwd. Tot nu toe waren de blokjes ingebouwd beginnend aan de meetcabinezijde en eindigend met een pasblok aan de halzijde. Tijdens deze verbouwing naar de derde serie is deze inbouwrichting omgedraaid.

Serie 3

Tijdens proef P4040 is geconstateerd dat een blok tijdens de laatste vijf minuten golven ter hoogte van K ($d/H_s = 0,55$) ongeveer 2 cm omhoog is gekomen.

Tijdens proef P4140 is na 31 minuten vastgesteld dat in de meetcabinezijde van de goot een blok ongeveer 2 cm omhoog was gekomen. Vrij snel na de start van proef P4141 is het blok ter hoogte van K ($d/H_s = 0,67$) ongeveer 3 à 4 cm omhoog gekomen, maar ging later weer naar beneden.

Het eerstvolgende schaderapport is gemaakt na proef P4141 (zie ook figuur 3.10). Alleen in de blokkenrij ter hoogte van K ($d/H_s = 0,67$) was er enige schade. De blokken 4, 5 en 6 vanaf de gootwand aan de halzijde stonden circa 1,5 cm omhoog. Drie blokken rond de letter K stonden 1,5 cm, 2,5 cm en 1,5 cm omhoog. En tenslotte stond het vijfde blok uit de gootwand ter hoogte van K ($d/H_s = 0,67$) aan de meetcabinezijde 4,5 cm omhoog.

De situatie na proef P4240 (na 3,5 uur extra golven) was niet veel veranderd. Sommige van de eerder genoemde stenen ($d/H_s = 0,87$) waren circa 1 tot 1,5 cm verder omhoog gekomen. Een steen aan de meetcabinezijde ter hoogte van K stak nu 5 cm omhoog. Het talud tussen D en O ($-0,95 < d/H_s < 1,91$) vertoonde een lichte golving.

Na proef P 4341 (7 uur extra golven na proef P4240) stond de blokkenrij ter hoogte van K ($d/H_s = 1,06$) in het algemeen circa 1,5 cm omhoog met daarin drie blokken die verder

uitstaken, namelijk 4 cm, 3 cm en 6 cm (zie figuur C8). In een rij iets boven K ($d/H_s = 0,95$) werden ook veel verhogingen van circa 1,5 cm gemeten, met twee blokken die daar bovenuit staken met 2 cm en 2,5 cm. Eenzelfde beeld werd enkele rijen onder J ($d/H_s = 0,90$) waargenomen: De rij toonde een hoogteverschil met de vorige rij en net onder waterpasblok 27 ($d/H_s = 0,71$) stak er een blok 5,5 cm bovenuit. Alle 6 omhoog stekende blokken stonden los.

Na proef P4441 werd na totaal 28 uur golven het volgende beeld waargenomen. De schade was in het algemeen gering. Ter hoogte van H ($d/H_s = 0,46$) waren drie blokken 0,5 cm tot 1 cm gezakt. Enkele blokkenrijen onder I ($d/H_s = 0,83$) staken drie individuele blokken 3 cm tot 4 cm uit het talud. In een rij tussen J en K staken 4 individuele blokken 2,8 cm tot 5 cm uit het talud. Ter hoogte van K ($d/H_s = 1,25$) stak nog een blok 4 cm uit het talud.

Na proef P4541, na nog eens 12 uur golven, was de schade maar in geringe mate toegenomen (zie figuur C8). Vlak onder G ($d/H_s = 0,46$) was een blok 1,7 cm gezakt. Tussen I en J ($d/H_s = 0,98$) was aan de halzijde een blok 5 cm omhoog gekomen. Net boven I ($d/H_s = 0,88$) waren aan de meetcabinezijde 6 blokken 2 cm tot 4,2 cm omhoog gekomen. Tussen I en J ($d/H_s = 1,06$) zijn de blokken, die tijdens P4441 omhoog staken, nog iets verder omhoog gekomen: resp. 4,8 cm, 3,5 cm en 9 cm. Tussen J en K ($d/H_s = 1,33$) zijn drie van de vier blokken terug gezakt en stak het vierde blok met 2,5 cm iets minder ver uit. Het blok ter hoogte van K ($d/H_s = 1,46$) is met 4,8 cm iets verder omhoog gekomen. In dezelfde rij zijn aan de meetcabinezijde nog twee andere blokken omhoog gekomen. Deze steken 3,8 cm en 6 cm uit.

Na deze proef zijn er twee stenen uit het talud verwijderd voor de reststerkteproef P4542. Het schaderapport na de reststerkteproef P4542 geeft aan dat er na 3,5 uur golven met twee gaten in het talud tussen I en J (halzijde: $z = 4,02$ m en $d/H_s = 0,68$; meetcabinezijde: $z = 3,96$ m en $d/H_s = 0,75$) niet echt veel is gebeurd. Eén gat was aangebracht op 4,5 blok van de gootwand aan de halzijde en één blok op 3,5 blok uit de gootwand aan de meetcabinezijde (de twee blokken die er het hoogst uitstaken na proef P4541). Tussen G en H ($0,27 < d/H_s < 0,46$) was het gebied met zakkingen (tussen 1 cm en 2,3 cm) toegenomen. Het blok tussen I en J ($d/H_s = 0,75$) was verder tot 10 cm omhoog gekomen (zie figuur C8). Net boven I ($d/H_s = 0,70$) waren aan de meetcabinezijde de 6 omhoogstaande blokken weinig veranderd. Schuin boven het gat aan de meetcabinezijde en net onder de rij omhoogstaande blokken was een blok 2,4 cm gezakt. Tussen het gat en J ($d/H_s = 0,78$) was een hele rij over de volle breedte van de goot 1 tot 2 cm gezakt. Tussen J en K ($0,84 < d/H_s < 1,04$) stonden nu vijf in plaats van vier blokken omhoog. Het blok tussen de letters J en K stak nog steeds 2,5 cm uit. Het blok ter hoogte van K was iets terug gezakt van 4,8 cm naar 2,5 cm en de andere twee aan de cabinezijde waren circa 1,5 cm verder omhoog gekomen. Het tijdens deze proef omhoog gekomen blok stak 8,1 cm uit het talud.

D.4 Hydroblocks van 15 cm dik

De waarnemingen ten aanzien van het uitspoelen van het inwasmateriaal zijn weergegeven in figuur D2 en D3.

Serie I

De eerste schade-inspectie op de Hydroblocks is uitgevoerd na proef P5250. Op het eerste gezicht lag het talud er nog goed bij. De belangrijkste schade is uitspoeling van inwasmateriaal op de helft van het talud aan de *halzijde*. Boven nr. 1 ($d/H_s < 0,11$) was daar gemiddeld 5 tot 6 cm uit de spleten gespoeld. Verder naar beneden toe liep dit geleidelijk op tot 13 cm bij A ($d/H_s = 0,69$) en 15 cm bij C ($d/H_s = 0,98$). Na C liep de uitspoeling weer terug tot 13 cm bij D ($d/H_s = 1,12$) en nog maar 5 cm bij E en F ($1,26 < d/H_s < 1,40$). Daarna liep het geleidelijk verder terug tot J. Vanaf J naar beneden ($d/H_s > 1,99$) was het talud goed gevuld.

De andere helft van het talud aan de *meetcabinezijde* was in het algemeen goed gevuld. alleen in het bovenste deel boven nr. 4 ($d/H_s < 0,54$) was er gemiddeld 2 tot 3 cm uitgespoeld. Het uitgespoelde inwasmateriaal hoopte zich op op deze helft van het talud van N tot 1 m onder O ($2,56 < d/H_s < 3,0$). Bij meting bleek het hier verzamelde volume inwasmateriaal 76 liter te bedragen.

Tijdens proef P5251 is er een bolling in het talud ontstaan aan de halzijde tussen A en C ($0,61 < d/H_s < 0,87$) met een oppervlak van ongeveer 5x5 blokken (zie figuur C9). Na afloop van de proef had deze een hoogte bereikt van 9 cm. Ter plaatse van de bolling was al het inwasmateriaal uitgespoeld en lag het waarschijnlijk tussen de toplaag en het filter. Hoger op het talud was er geen kuil ontstaan.

Na proef P5251 is de uitspoeling in hetzelfde patroon doorgedaan. Aan de *halzijde* was boven nr. 2 ($d/H_s < 0,22$) 5 tot 6 cm uitgespoeld. Vanaf nr. 2 tot ergens tussen E en F ($0,22 < d/H_s < 1,15$) waren alle spleten compleet leeg en lag er ook inwasmateriaal onder de stenen. Daarna nam de uitspoeling snel af van 15 cm tot 3 à 4 cm ter hoogte van G. Tussen G en J ($1,36 < d/H_s < 1,75$) was er gemiddeld 1 tot 2 cm uitspoeling in sommige spleten oplopend tot 5 à 6 cm. Onder J ($d/H_s > 1,75$) was alles nog goed gevuld.

Aan de *meetcabinezijde* werd in grote lijnen eenzelfde patroon van uitspoeling gevonden, maar met veel geringere uitspoeling. Boven nr. 4 ($d/H_s < 0,48$) was gemiddeld 3 cm inwasmateriaal uitgespoeld en op enkele plaatsen oplopend tot 6 à 7 cm. Tussen nr. 4 en E ($0,48 < d/H_s < 1,11$) was gemiddeld 6 tot 7 cm uitgespoeld met uitschieters van 10 tot 15 cm. Vanaf E ($d/H_s > 1,11$) verder naar beneden was dit deel van het talud goed gevuld met een gemiddelde uitspoeling van slechts 1 à 2 cm. Op enkele plaatsen werd een uitspoeling van 5 tot 6 cm waargenomen.

Tijdens proef P5252 ontstond er na enkele grote golven al schade (zie figuur C9 en 3.12). Aan de *halzijde* was boven nr. 1 ($d/H_s < 0,05$) gemiddeld 6 cm inwasmateriaal uitgespoeld. Van iets boven nr. 1 tot iets onder nr. 2 ($0,03 < d/H_s < 0,14$) kraakte het talud als je er over liep. Tussen 2 en 4 ($0,12 < d/H_s < 0,26$) was het talud 4 tot 5 cm gezakt. Vanaf iets boven A tot aan C ($0,33 < d/H_s < 0,48$) waren 14 blokken weggeslagen. De rijen blokken net boven dit gat hingen in de lucht. Een duimstok kon hier over een afstand van 52 cm onder gestoken worden (ondermijning). Het talud onder het gat van C tot E/F ($0,48 < d/H_s < 0,65$) kraakte als er op werd gelopen. In dat gebied was gemiddeld 6 cm uitgespoeld in de kleine spleten en 10 cm in grote spleten. Vanaf F naar J ($0,68 < d/H_s < 0,96$) liep de uitspoeling terug naar goed gevulde spleten.

Aan de *meetcabinezijde* waren de spleten in het talud boven B ($d/H_s < 0,40$) gemiddeld 6 cm uitgespoeld en in de grote spleten soms tot 9 à 10 cm. Tussen B en H ($0,40 < d/H_s < 0,82$) was de uitspoeling gemiddeld 4 à 5 cm in sommige grote spleten oplopend tot 15 cm. Vanaf I naar beneden ($d/H_s > 0,89$) was dit deel van het talud goed gevuld met inwasmateriaal.

Vervolgens is het talud hersteld van E tot nr 1 ($4,00 < z < 5,10$ m; 15 rijen en 8 kolommen), ingewassen, maar niet getrild.

Serie 2

Tijdens proef P4251 ontstond er na 51 minuten schade (zie figuur C10 en 3.13). Eerst kwam het derde blok uit de gootwand ter hoogte van de letter I ($d/H_s = 0,75$) aan de *halzijde* 2 à 3 cm omhoog. Daarna kwamen er tijdens een golf meerdere blokken in die rij 2 cm omhoog. Vervolgens is er snel daarna één blok uitgeslagen, waarna er in korte tijd meerdere volgden. Globaal werd er een gat van 7 blokken breed en 10 rijen hoog geslagen in het talud aan de halzijde tussen F en L ($0,34 < d/H_s < 1,18$). Onder het gat was het talud 5 tot 6 cm opgebouwd. Deze opbolling liep nog een stuk door langs de zijkant van het gat aan de meetcabinezijde. Boven het gat was gemiddeld circa 4 cm inwasmateriaal uitgespoeld en onder het gat en de opbolling was slechts 1 tot 2 cm uitgespoeld. Aan de *meetcabinezijde* was boven F ($d/H_s < 0,34$) circa 3 cm inwasmateriaal uitgespoeld. Dit liep op tot 5 à 6 cm tussen H en J ($0,62 < d/H_s < 0,90$). Daaronder liep dit weer snel terug tot gemiddeld 1 à 2 cm op het lage deel van het talud.

Een ruim gebied rond het gat is uitgebroken en het filter is daar verwijderd (van L tot nr. E: $3,03 < z < 4,00$ m; 15 rijen en 13 kolommen). Vervolgens is het filter weer aangebracht en zijn de blokken geplaatst. De laatste rij blokken pastte niet helemaal en daarom zijn 4 blokken wat afgeslepen en met enig geweld er weer in gestampd. Het talud is volledig ingewassen, maar niet getrild.

Serie 3

Tijdens proef P4252 is geconstateerd dat het inwasmateriaal in het midden van de goot en aan de meetcabinezijde door de golven over het talud heen en weer worden gespoeld. Aan de halzijde is dit echter niet te zien. Kennelijk is hier het inwasmateriaal al deels verdwenen.

De schade in de derde proevenserie ontstond tijdens proef P4252 na 1 uur en 4 minuten (zie figuur C11 en 3.14). Toen is er aan de halzijde tussen H en J ($0,72 < d/H_s < 0,98$) een gat geslagen van 2 blokken breed en 3 rijen hoog. In een vrij groot gebied rond dit gat (tussen E/F en L, $0,30 < d/H_s < 1,31$) waren de spleten op het talud aan de halzijde totaal leeg (15 cm uitspoeling). Boven C en onder M ($d/H_s < -0,07$; $d/H_s > 1,46$) waren de spleten in het talud goed gevuld. Dit gold ook voor het merendeel van het talud aan de meetcabinezijde. Alleen tussen J en L ($1,00 < d/H_s < 1,31$) was daar het inwasmateriaal uitgespoeld van ca 8 cm aan de halzijde afnemend tot 3 cm op 4 blokken uit de gootwand aan de andere zijde.

Rij J, net onder het gat, was het sterkst opgebouwd. Op de foto in figuur C11 is de nat-droog overgang van de waterlijn nog duidelijk te zien als een hoogtelijn. Bij de interpretatie van deze hoogtelijn moet rekening gehouden worden met het feit dat het talud aan de halzijde (links op de foto) enkele centimeters hoger was als gevolg van het feit dat de dijk niet precies haaks op de goot is ingebouwd. Het is te zien dat middenin de goot de opbolling al een beetje begint (een paar cm) en zijn hoogste punt bereikt ter plaatse van het blok rechts onder het gat (vijfde blok vanaf de halzijde). Dat blok is echter niet alleen opgebouwd maar

ook t.o.v. de bolling nog verder omhoog gekomen. Ter plaatse van het blok ernaast (het zesde blok vanaf de halzijde) is de opbolling opgemeten en bedroeg 7 cm. Er zijn totaal ongeveer 8 rijen betrokken bij deze bolling.

Een ruim gebied rond het gat is uitgebroken en het filter is daar verwijderd (van M tot nr. 2: $2,90 < z < 4,96$ m; 30 rijen en 12 kolommen). Vervolgens is het filter weer aangebracht en zijn de blokken geplaatst, maar nu met tegengestelde inbouwrichting: van hal naar meetcabine. De reden voor het omdraaien van de inbouwrichting is het feit dat er steeds vrij dicht bij de halzijde van de goot schade is opgetreden, hetgeen verband zou kunnen houden met de inbouwrichting.

In het midden moet het dan mooi aansluiten op het stuk steenzetting dat is blijven liggen. Helaas bleek bij ongeveer zes rijen de rij stenen iets te kort te zijn en bleef er een opening van 1 à 2 cm over. Dit is opgevuld met wat passende steenslag (stopstukken). Het talud is volledig ingewassen en nu wel getrild.

Serie 4

De volgende inspectie is uitgevoerd na proef P4850 van serie 4 (zie figuur C12). De grootste uitspoeling zat weer aan de halzijde van de letterraai (strook met letters en strepen) op het talud. Aan de halzijde was boven nr. 2 ($d/H_s < -0,22$) circa 3 cm uitgespoeld. Tussen nr. 2 en B ($-0,22 < d/H_s < 0,58$) was gemiddeld 5 cm uitgespoeld. Tussen B en E ($0,58 < d/H_s < 1,17$) waren de spleten helemaal tot vrijwel leeg. Tussen E en H ($1,17 < d/H_s < 1,77$) was maar 5 cm uitgespoeld, terwijl tussen H en K ($1,77 < d/H_s < 2,38$) de spleten weer leeg tot vrijwel leeg waren. Onder K ($d/H_s > 2,38$) waren de spleten weer goed gevuld. Het lage vak met lege spleten moet zijn ontstaan tijdens proef 4152 met de lagere waterstand en het hoge vak tijdens proef P4850 met de hoge waterstand. Frapant is dat het lage vak niet meer is opgevuld met heen en weer slingerende inwasmateriaal tijdens de volgende proef. Kennelijk concentreert het uitgespoelde inwasmateriaal zich op de taludhelft aan de zijde van de meetcabine. Daar waren de spleten, op enkele gaten na, goed gevuld en werden ook twee hopen inwasmateriaal op het talud teruggevonden; één tussen J en L ($2,17 < d/H_s < 2,57$) en één tussen N en O ($2,96 < d/H_s < 3,54$).

Tijdens de ingolfproeven zijn er twee bollingen ontstaan met een hoogte van ongeveer 1 à 2 cm, op enige afstand onder de waterlijn ($d/H_s \approx 0,9$).

Tijdens proef P4253 is er na ongeveer 1 uur geconstateerd dat de rij ter hoogte van G iets begon op te bollen ($d/H_s \approx 0,64$) (zie figuur C12 en 3.15).

Na 1 uur en 38 minuten is er vlak bij de gootwand aan de halzijde een blok uitgeslagen uit de rij onder G ($d/H_s = 0,68$). Vlak erna werd ook het blok eronder weggeslagen. Naast en onder het gat was het talud in de breedte tussen de gootwand en de letterraai en in de hoogte vanaf rij G tot rij K ($0,64 < d/H_s < 1,39$) opgebouwd. Tussen de rij onder E tot G ($0,31 < d/H_s < 0,64$), boven het gat, is het talud duidelijk gezakt. De spleten in het gebied tussen de letterraai en de gootwand aan de halzijde en tussen E en J ($0,28 < d/H_s < 1,20$) zijn volledig uitgespoeld. Ter hoogte van E is op twee plekken zelfs het doek te zien (daar is ook filtermateriaal weg). Ook in het opgeboude gebied is het doek door de spleten te zien. Daar is een hoogte van doek tot bovenkant steen van 21,7 cm gemeten.

Aan de *halzijde* was het talud boven nr. 4 ($d/H_s < -0,63$) maar 3 à 4 cm uitgespoeld. Tussen nr. 4 en C ($-0,63 < d/H_s < -0,07$) was er 5 à 6 cm uitgespoeld en van C naar E ($-0,07 < d/H_s < 0,28$) liep dat snel op van 6 cm tot 15 cm uitspoeling.

Onder L ($d/H_s > 1,57$) en aan de meetcabinezijde van de letterraai waren de spleten in het talud goed gevuld; alleen de bovenste 1 tot 2 cm is eruit gespoeld.

Op het talud aan de *meetcabinezijde* had zich weer veel uitgespoeld inwasmateriaal opgehoopt tussen I en L ($1,01 < d/H_s < 1,57$) en tussen N en een punt 0,5 à 1 m onder O ($1,92 < d/H_s < 2,4$).

Een ruim gebied rond het gat over vrijwel de gehele breedte van de goot is uitgebroken en het filter is daar verwijderd (van K t/m D: $3,17 < z < 4,14$ m; 14 rijen en 17 kolommen). Vervolgens is het filter weer aangebracht en zijn de blokken geplaatst van hal naar meetcabine. Het talud is eerst getrild, vervolgens ingewassen, getrild en weer ingewassen.

Serie 5

Het eerste inspectierapport van serie 5 is gemaakt na de eerste proef: P4254. Het talud onder J ($d/H_s > 1,60$) en aan de meetcabinezijde van de letterraai was nog goed gevuld met inwasmateriaal. Ook aan de halzijde was het talud boven nr. 4 ($d/H_s < -0,85$) nog goed gevuld (ca. 2 cm uitspoeling). Van nr. 4 tot F ($-0,85 < d/H_s < 0,61$) nam de uitspoeling geleidelijk toe tot 5 cm. Van F naar H ($0,61 < d/H_s < 1,11$) nam de uitspoeling snel toe van 5 cm tot 20 cm (spleet helemaal leeg en deel filter weg), om daarna weer snel af te nemen tot 3 cm tussen I en J ($d/H_s \approx 1,5$).

Ook nu werd weer een concentratie van uitgespoeld inwasmateriaal aan de meetcabinezijde gevonden en wel tussen H en J ($1,11 < d/H_s < 1,60$).

Er was nog geen bolling ontstaan.

Na proef P4256 is geconstateerd dat het talud weer begon op te bollen (zie figuur C13 en 3.16). Het betrof een gebied van ongeveer 7 rijen bij 8 kolommen met een hoogste punt van ca. 10 cm hoogte tussen G en H ($d/H_s = 0,86$).

Boven C ($d/H_s < -0,09$) werd een gemiddelde uitspoeling van 4 à 5 cm waargenomen. Tot D ($d/H_s = 0,11$) liep dit geleidelijk op tot 7 cm en daarna liep de uitspoeling snel op tot 20 cm (lege spleet) tussen E en I ($0,32 < d/H_s < 1,18$). Drie blokken in de rij direct onder G ($d/H_s = 0,79$) waren opgebald en hingen gewoon in de lucht met circa 5 cm holle ruimte er onder. Van I naar J ($1,18 < d/H_s < 1,40$) nam de uitspoeling weer snel af tot 8 cm. Onder K ($d/H_s > 1,63$) was de uitspoeling overal minder dan 3 cm.

Ook nu weer werd er veel uitgespoeld inwasmateriaal teruggevonden op het talud aan de meetcabinezijde tussen J en een lijn 0,8 m onder O ($1,40 < d/H_s < 2,9$).

Proef P4257 is na 38 minuten afgebroken, omdat er ter hoogte van G ($d/H_s = 1,04$) een blok uit het reeds opgebolde gebied was geslagen (zie figuur C13 en 3.17). De maximale bolling lag een rij lager en bedroeg ongeveer 11 à 12 cm. Ter hoogte van het gat was de bolling 8 cm.

De uitspoeling op het talud aan de halzijde was overal circa 1 cm toegenomen.

De accumulatie van uitgespoeld materiaal was ook nu weer aanwezig op de taludhelft aan de meetcabinezijde.

D.5 Hydroblocks van 20 cm dik

De eerste inspectie in serie 6 met de 20 cm dikke blokken is uitgevoerd na de ingolfproef P4160. Net als bij alle vorige proeven traden de grotere veranderingen op tussen het stilwaterniveau en de laagste golfterugloop aan de halzijde van de letterraai op het talud. Het talud onder R ($d/H_s > 1,48$) en aan de meetcabinezijde was na de proef nog goed gevuld (vol), zie ook figuur D4 en D5.

Het talud aan de *halzijde* boven J ($d/H_s < 0,20$) was ook nog goed gevuld met een uitspoeling van slechts 2 cm uit de spleten. Van J tot M ($0,20 < d/H_s < 0,68$) nam de uitspoeling geleidelijk toe tot 7 à 8 cm. Daarna nam de uitspoeling snel toe tot 20 cm (spleet leeg) in het gebiedje tussen N en O/P ($0,84 < d/H_s < 1,08$). Daarna nam de mate van uitspoeling weer snel af tot 5 cm bij Q ($d/H_s = 1,32$) en nihil onder R ($d/H_s = 1,48$).

Ter hoogte van M ($d/H_s = 0,68$) en tussen O en P ($1,00 < d/H_s < 1,16$) werd weer accumulatie van uitgespoeld inwasmateriaal gevonden op het talud aan de meetcabinekant.

Na de inspectie is het talud opnieuw ingewassen en getrild.

Na 3,5 uur golven is de tweede inspectie uitgevoerd na proef P4261. Het shadebeeld was in grote lijnen hetzelfde als hiervoor, alleen is de mate van uitspoeling van inwasmateriaal toegenomen. Bovendien heeft de uitspoeling in het aangevallen gebied zich ook uitgebreid naar het talud aan de meetcabinezijde. Aan de halzijde was het talud goed gevuld boven J en onder T ($d/H_s < 0,25$; $d/H_s > 1,49$). Aan de andere zijde was dit boven K en onder Q ($d/H_s < 0,38$; $d/H_s > 1,12$). De grootste uitspoeling trad daar op tussen N en P (7,5 à 9 cm met twee uitschieters van 19 en 20 cm) ($0,75 < d/H_s < 1,00$). Aan de halzijde bedroeg de uitspoeling in dat gebied gemiddeld 15 tot 20 cm met een uitschieter van 23 cm. Naar boven en naar beneden toe nam dit weer af. Tussen R en Q ($1,12 < d/H_s < 1,25$) waren nog enkele spleten uitgespoeld tot 15 cm (2x) en 20 cm (3x). Ook ter hoogte van M ($d/H_s = 0,63$) werd een volledig uitgespoelde spleet gevonden.

Na nog eens 3,5 uur golven met een 20 cm hogere waterstand werd na proef P4461 het volgende shadebeeld opgenomen. Na totaal 7 uur golven was er nog geen bolling ontstaan. De belangrijkste uitspoeling had plaatgevonden tussen L en R ($0,50 < d/H_s < 1,25$). Daarbuiten was de uitspoeling minder dan 4 cm tot nihil. Het verschil tussen de gemiddelde uitspoeling aan de halzijde en aan de andere zijde van het talud was duidelijk minder geworden dan in de voorgaande proeven. Aan de halzijde bedroeg de grootste gemiddelde uitspoeling 8 tot 10 cm en trad op tussen N en R ($0,75 < d/H_s < 1,25$). Aan de andere kant van de letterraai was dit 7 tot 9 cm tussen M/N en O ($0,69 < d/H_s < 0,88$). Aan de halzijde werden in het gebied met maximum uitspoeling wel meerdere lege spleten waargenomen (orde 20x).

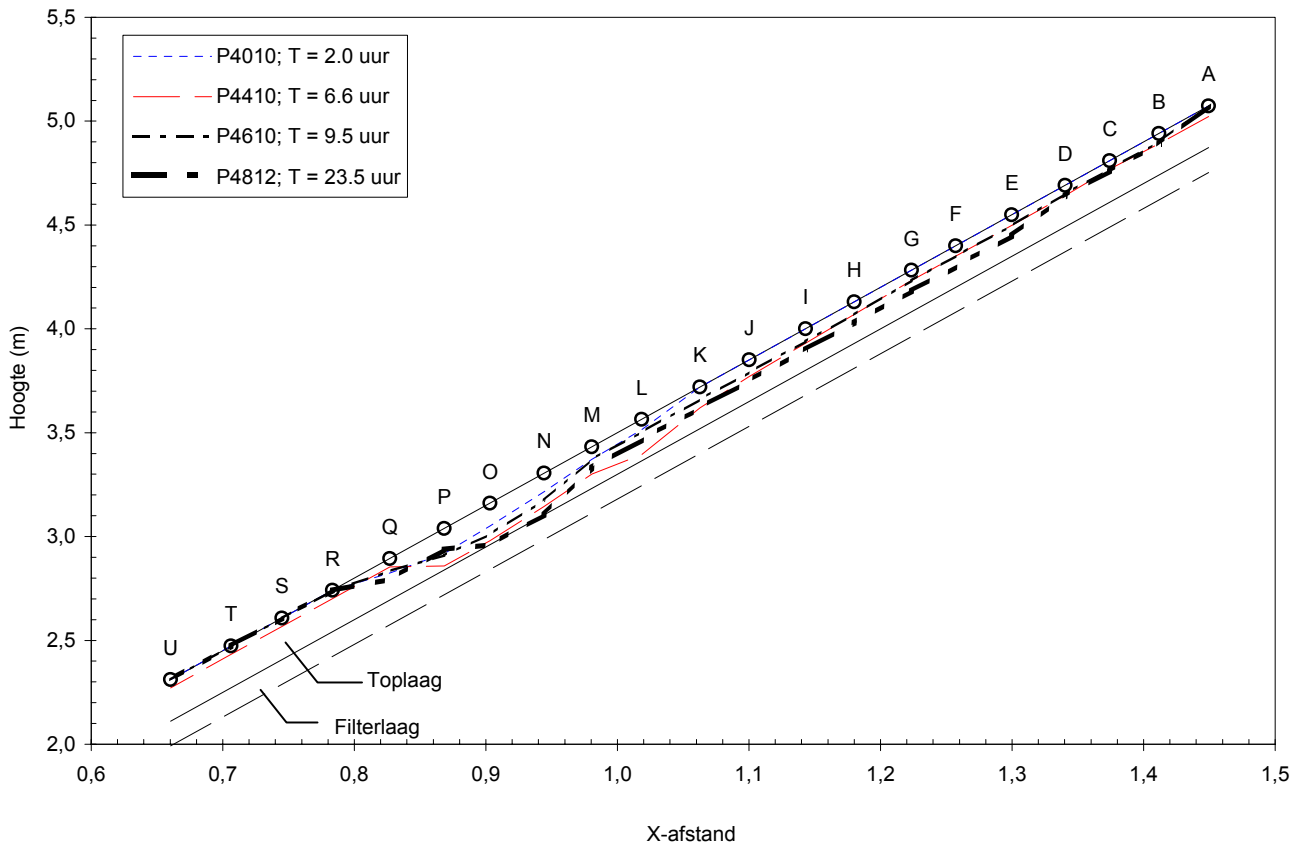
Na proef P4660 was het shadebeeld vergelijkbaar, maar met toegenomen uitspoeling (zie figuur C14). De uitspoeling lijkt in het algemeen enkele centimeters te zijn toegenomen en bovendien was het gebied met grote uitspoeling naar boven toe uitgebreid door de nog eens 20 cm hogere waterstand tijdens de proef. Het gebied met geringe uitspoeling aan de bovenzijde is kleiner geworden en liep niet verder dan D of E ($d/H_s \approx 0,22$). Aan de onderzijde van het talud lag deze grens nog steeds bij Q/R ($d/H_s \approx 1,39$). Aan de *meetcabinezijde* werden nu ook een drietal lege spleten waargenomen. Tussen I en O ($0,33 < d/H_s < 1,08$) was wel duidelijk iets gebeurd met het filter; er werden over de hele breedte

drie trapsgewijze hoogteverschillen van circa 1 cm tussen opvolgende blokkenrijen gesignaleerd. De grootste verandering lag tussen M en O ($0,83 < d/H_s < 1,08$).

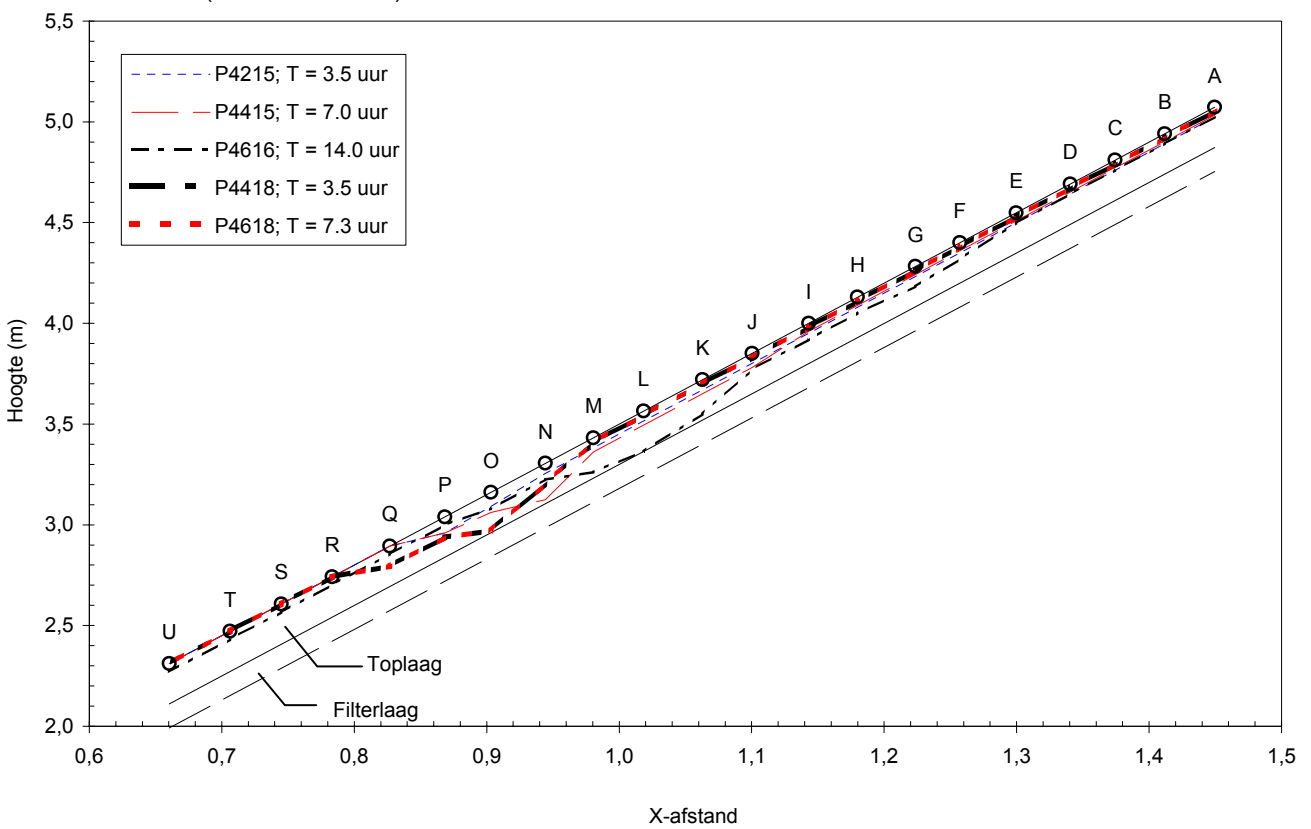
Tijdens de volgende proef (P4860) ontstond er na 5 uur en 44 minuten schade aan het talud (zie figuur C14 en 3.18). Eerst werd er één blok uitgeslagen ter hoogte van J ($d/H_s = 0,79$) en na een paar golven de tweede tussen J en L. In de periode kort na het uitzetten van de golfmachine zijn er vervolgens nog twee blokken uitgeslagen voordat het water rustig werd. Circa een uur voor het tijdstip van de schade werd al geconstateerd dat het talud slechter werd (begon op te bollen). De uitgeslagen blokken kwamen ter hoogte van J (1x) ($d/H_s = 0,79$), tussen J en K (2x) ($0,79 < d/H_s < 0,92$) en tussen K en L (1x) ($d/H_s = 0,98$) uit het talud. Bij de inspectie van het talud na het afpompen bleek dat er over een groot gebied veel inwasmateriaal was uitgespoeld. Aan de halzijde van de letterraai waren de spleten tussen G en N ($0,42 < d/H_s < 1,29$) helemaal leeg (20 cm). Aan de andere kant van het talud bedroeg de maximum uitspoeling 15 tot 20 cm in het vak tussen J en L ($0,79 < d/H_s < 1,04$).

Aan de *halzijde* nam de uitspoeling van N naar O ($1,29 < d/H_s < 1,41$) snel af tot 10 à 12 cm en verder tot slechts 4 à 5 cm bij P ($d/H_s = 1,54$). Onder Q ($d/H_s > 1,66$) was het talud goed gevuld tot vol. Ook aan de bovenzijde van het uitgespoelde vak aan de halzijde nam de uitspoeling van G tot F ($0,29 < d/H_s < 0,42$) snel af tot 8 à 10 cm. Bij B ($d/H_s = -0,21$) is de uitspoeling over de hele breedte van het talud nog 4 cm en daarboven blijft het 3 à 4 cm. Aan de *meetcabinezijde* nam de uitspoeling naar beneden toe geleidelijk toe tot 7 à 8 cm bij G ($d/H_s = 0,42$) en daarna sneller tot 15 à 20 cm bij J ($d/H_s = 0,79$). Verder naar beneden nam de uitspoeling van L naar N ($1,04 < d/H_s < 1,29$) snel weer af tot 10 à 12 cm en 6 à 7 cm bij N. Daarna nam de uitspoeling geleidelijk verder af tot minder dan 3 cm onder Q ($d/H_s > 1,66$).

BASALT (ingolven + Serie 1)



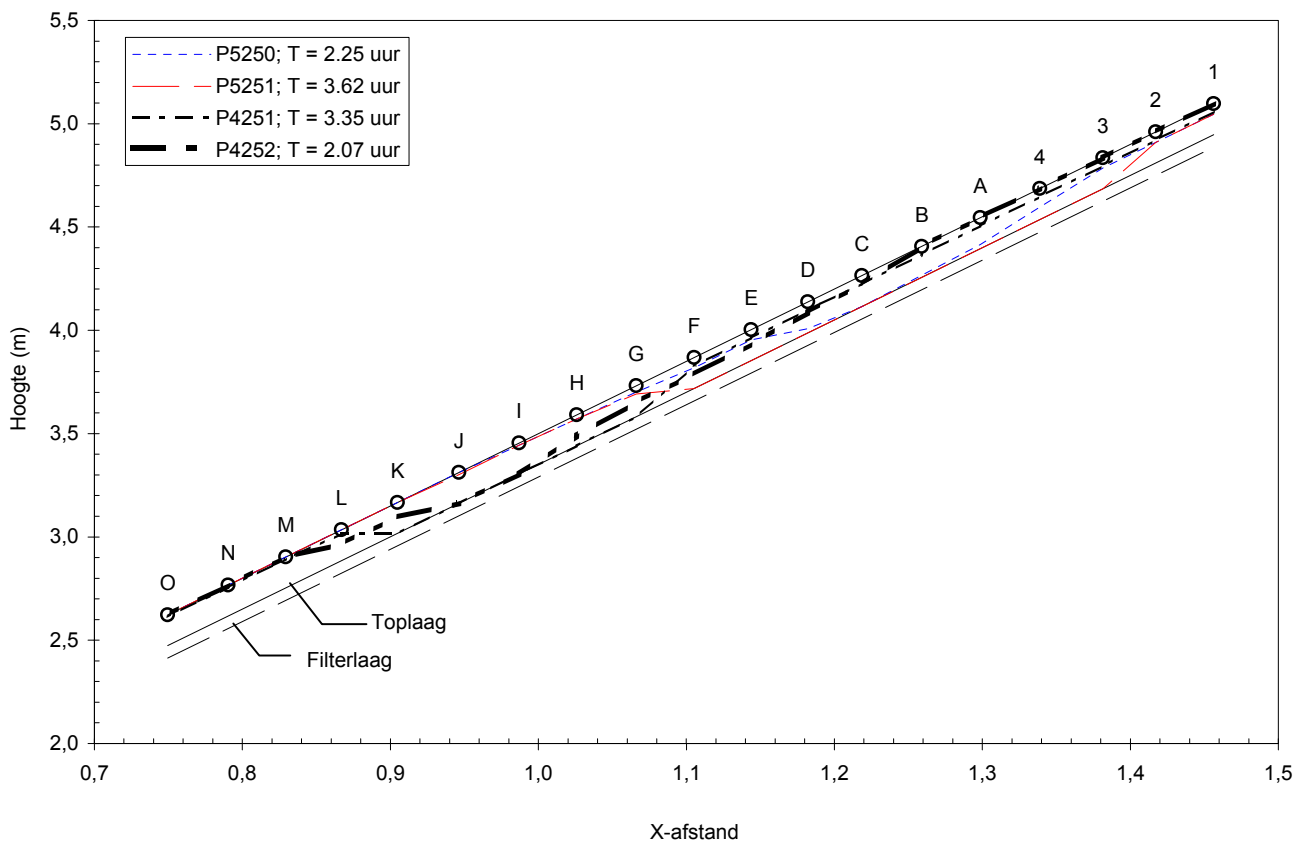
BASALT (Serie 2 + Serie 3)



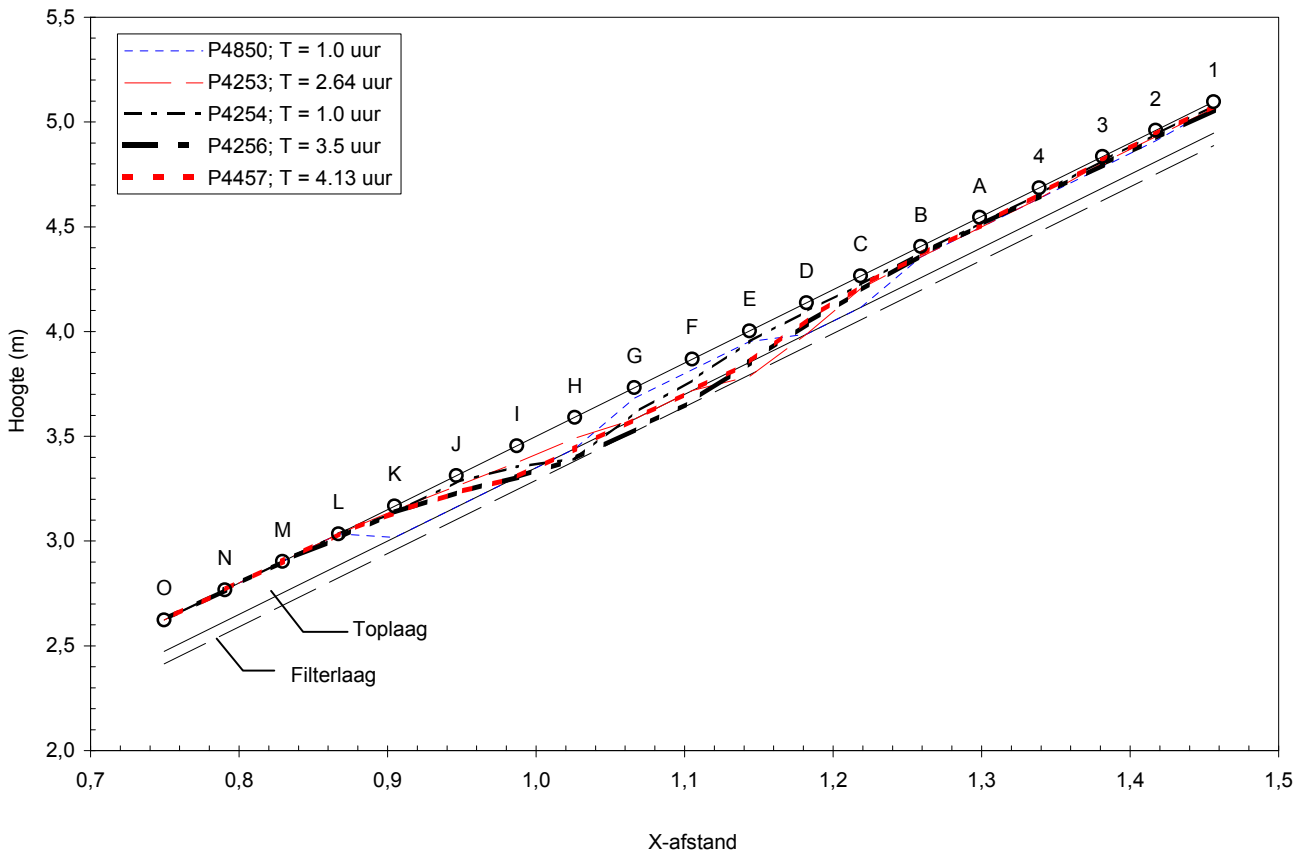
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Waargenomen uitspoeling van het inwasmateriaal

Westzijde (hal)

HYDROBLOCKS D = 0.15 m (Serie 1 t/m Serie 3)



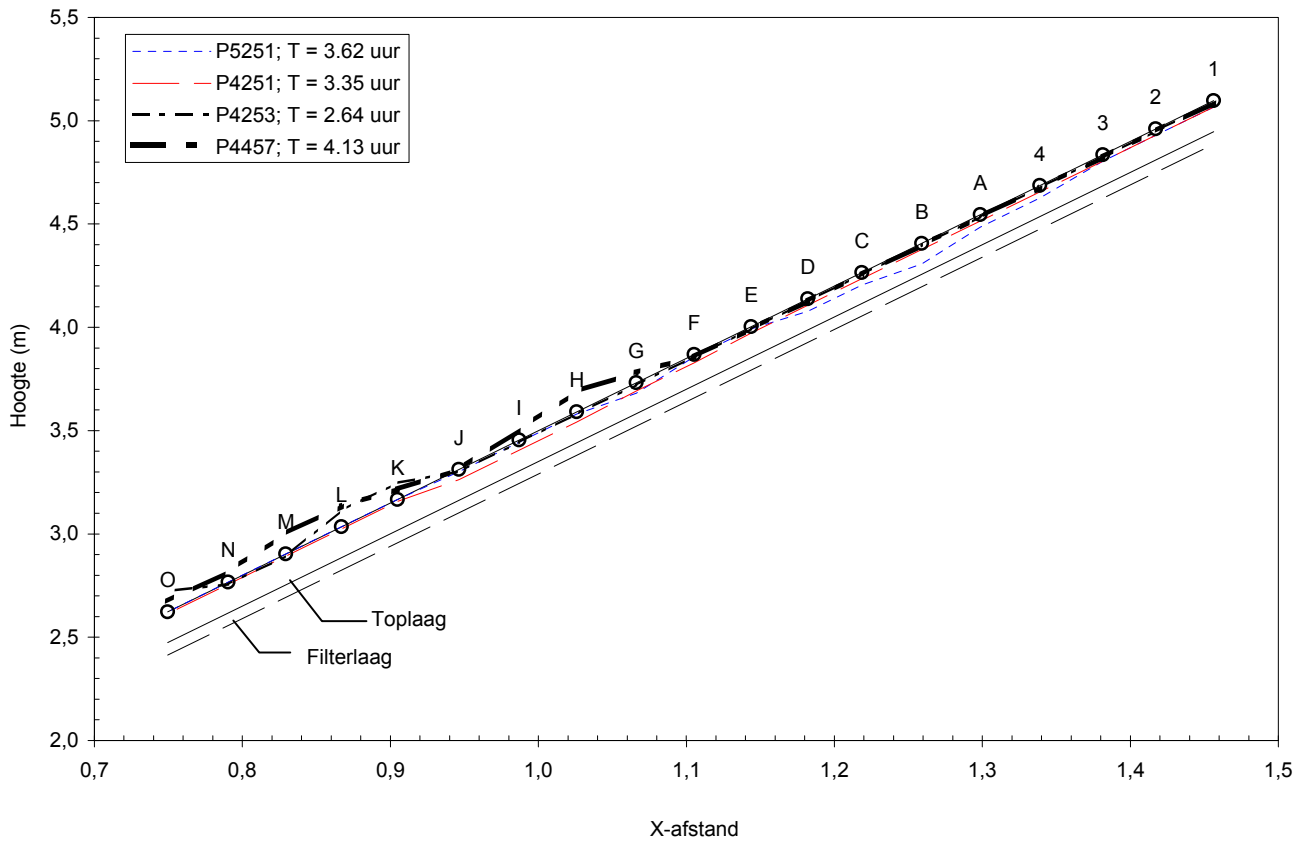
HYDROBLOCKS D = 0.15 m (Serie 4 + Serie 5)



Langeduur proeven in de Deltagoot
 Waargenomen uitspoeling van het inwasmateriaal

Westzijde (hal)

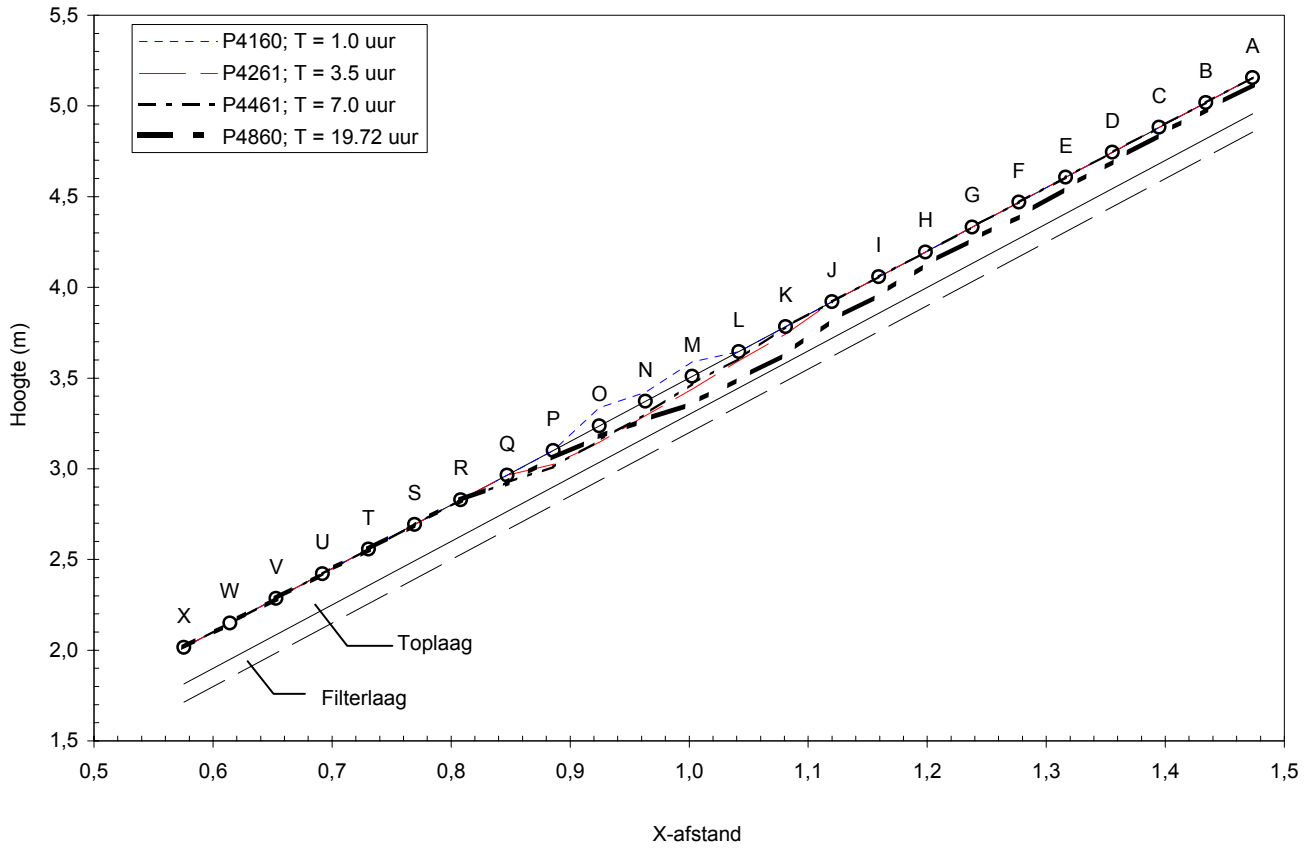
HYDROBLOCKS D = 0.15 m



Langeduur proeven in de Deltagoot
 Waargenomen uitspoeling van het inwasmateriaal

Oostzijde (meetcabine)

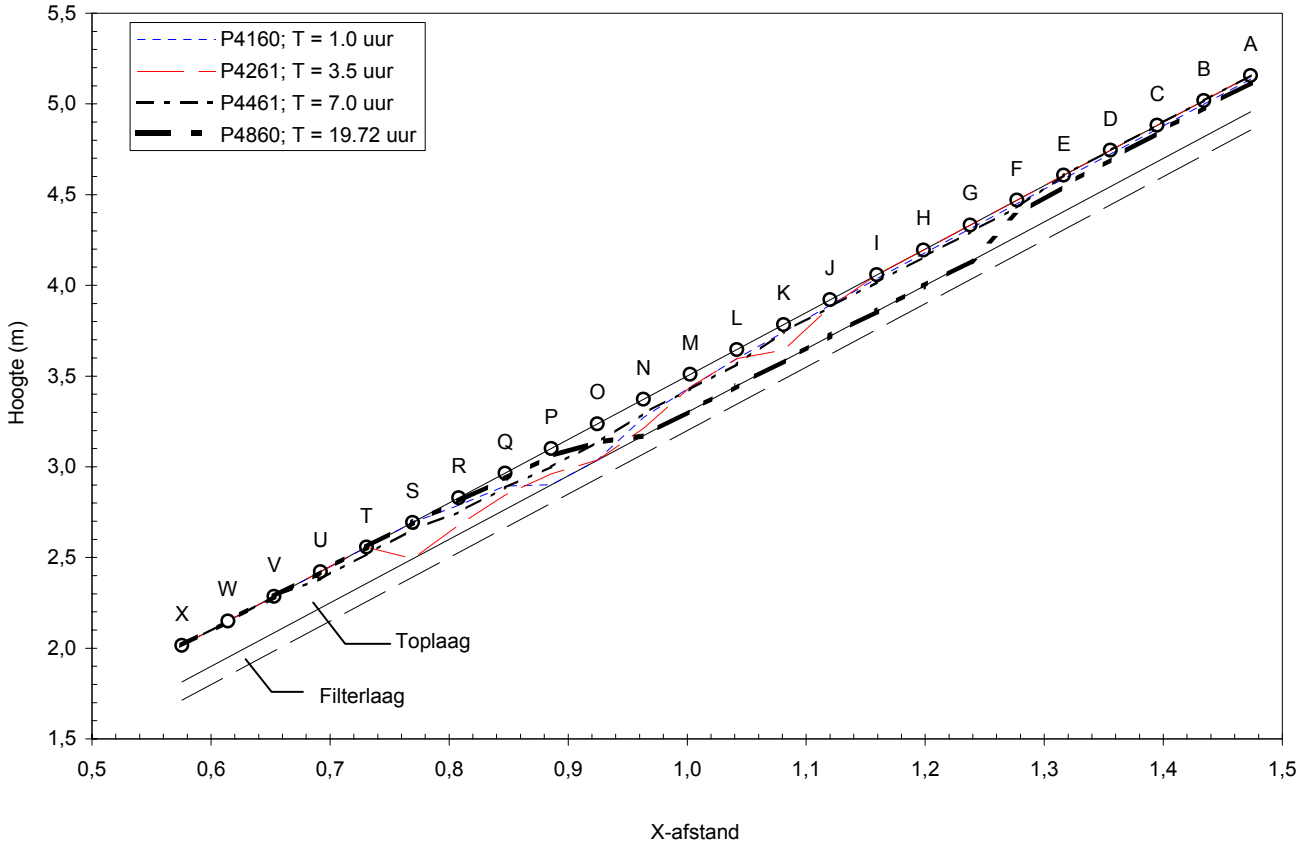
HYDROBLOCKS D = 0.20 m



Langeduur proeven in de Deltagoot
 Waargenomen uitspoeling van het inwasmateriaal

Oostzijde (meetcabine)

HYDROBLOCKS D = 0.20 m



Langeduur proeven in de Deltagoot
 Waargenomen uitspoeling van het inwasmateriaal

Westzijde (hal)

E Grootchalige vervorming

E Grootschalige vervorming

De grootschalige vervorming van het talud onder invloed van de golfbelasting is tijdens het onderzoek gemeten door de hoogte van het talud op ca. 20 locaties te meten met een waterpastoestel, en van deze punten op het talud ook de afstand langs het talud ten opzichte van een vaste referentie op het betontalud (op een niveau van +6,0 m boven de gootbodem) te meten. De ingemeten locaties bevonden zich op 4 lijnen evenwijdig aan de gootas (raaien) met een onderlinge afstand van 1 m, namelijk op ca 1, 2, 3 en 4 m van de gootwand. De punten waren midden op de stenen geplaatst, waardoor de exacte locatie van de raaien per proefopstelling iets varieerde. Raai 1 bevond zich aan de westzijde van de goot (halzijde) en raai 4 aan de oostzijde (meetcabinezijde).

De gemeten waarden zijn weergegeven in figuur E1 t/m E28. In de figuren is op de horizontale as de tijd uitgezet t.o.v. de start van de proeven op de betreffende opstelling, waarmee we niet willen suggereren dat er een doorlopend proces van vervorming is. Als na een serie de bekleding hersteld is, zijn vervolgens alle verplaatsingen uitgezet t.o.v. het begin van de betreffende proevenserie. Dit is echter bij basalt niet gedaan, omdat de schade zo lokaal optrad dat slechts een paar vierkante meter hersteld hoefde te worden.

In de figuren is een positieve verplaatsing altijd omhoog gericht. Hoewel de verplaatsingen haaks op het talud relevanter zijn dan de verticale verplaatsing, is toch de zuiver verticale verplaatsing gemeten. Het verschil is echter slechts 4% en is dus verwaarloosbaar in het licht van het doel van deze metingen.

Er zijn steeds figuren gemaakt van de verplaatsing op een bepaalde hoogte boven de gootbodem ter plaatse van de vier raaien. De bovenste grafiek betreft de hoogste locatie waar de verplaatsingen zijn gemeten.

Gezien het feit dat de meetpunten op de stenen waren gemonteerd, zijn de verticale verplaatsingen de som van de grootschalige vervorming en de lokale vervorming.

In de tekst is verder de locatie vertaald naar een dimensieloze diepte onder de stilwaterlijn:

$$d/H_s = (h - z)/H_s$$

met:

d = diepte onder de stilwaterlijn (m)

H_s = significante golfhoogte (m)

h = waterdiepte (m)

z = niveau t.o.v. de gootbodem (m)

E.1 Verticale verplaatsing

Basalton

De gemeten verticale verplaatsingen tijdens de proeven op Basalton zijn als functie van de tijd gegeven in figuur E1 t/m E2. Tijdens deze proevenserie is de waterstand in 4 stappen verhoogd van +4,2 m naar +5,0 m en vervolgens weer verlaagd naar +4,8 m.

Uit de figuren blijkt dat ter plaatse van raai 2 er op +3,8 m al na de eerste vijf uur golven een verzakking is opgetreden van 10 mm. Ter hoogte van +4,0 m ($d/H_s = 0,15$) is dat in deze raai 5 mm en ter hoogte van +3,6 m is dat 3 mm ($d/H_s = 0,46$). Later neemt deze vervorming nauwelijks meer verder toe. Een vergelijkbare vervorming is te zien in raai 4 ter hoogte van +3,6 m. Na 5 uur is een verzakking van 8 mm ontstaan, die vervolgens nauwelijks meer toeneemt.

De belangrijkste verzakking na de eerste 5 uur golven is opgetreden ter hoogte van +3,6 m en +3,2 m en bedroeg daar gemiddeld slechts 3 mm. Dit betekent dat na de initiële verzakking (verdichting van het filter?) vrijwel geen verdere verzakking van de Basalton is opgetreden.

Basalt

De verticale verplaatsingen van de basalt zijn te zien in figuur E3 t/m E5. In deze figuur is de verplaatsing steeds ten opzichte van het niveau voor het ingolven bepaald, omdat de bekleding na de schades slechts zeer lokaal hersteld is.

Tijdens serie 1 is de waterstand in twee stappen verhoogd van +4,4 m naar +4,8 m. Tijdens serie 2 was de waterstand in twee stappen verhoogd van +4,2 m naar +4,6 m.

Tijdens het ingolven zijn de verticale verplaatsingen over het algemeen gering, slechts een paar mm. Alleen ter hoogte van +3,6 m is in raai 4 het talud ongeveer 5 mm omhoog gekomen. Dit is op een relatieve diepte onder de stilwaterlijn van $d/H_s = 0,44$ à $0,62$.

Tijdens serie 1 valt het op dat ter hoogte van +4,1 m raai 1 ongeveer 4 mm omhoog is gekomen, tot totaal 5 mm, terwijl raai 2 ongeveer 3 mm omlaag is gegaan. Op deze locatie is tijdens proef 4811 en 4812 aan de gootwand aan de halzijde (bij raai 1) ter hoogte van +4,13 m een zuil uit het talud geslagen op een relatieve diepte van $d/H_s = 0,56$.

Iets lager op het talud, op +3,8 m, is raai 2 maar liefst 17 mm omlaag gegaan, vooral tijdens proef 4811 en 4812. Daar is raai 4 bijna 3 mm omhoog gekomen tot totaal 5 mm opwaartse verplaatsing ten opzichte van het begin van de proeven. Dit deel van het talud lag tijdens deze proeven ongeveer 1 m onder water ($d/H_s = 0,8$).

Nog lager, ter hoogte van +3,4 m, zijn raai 2 en 3 ongeveer 7 mm omhoog gekomen, vooral tijdens proef 4811 en 4812, toen dit op een relatieve diepte lag van $d/H_s = 1,13$.

In figuur E29 is een driedimensionale impressie gegeven van de vervorming na P4812. De geringe ruimtelijke resolutie van de metingen maakt dat ook deze figuur een vrij grove impressie geeft.

Tijdens serie 2 is in de figuur te zien dat de verzakking ter hoogte van +3,8 m in raai 2 gewoon doorgaat ($d/H_s = 0,57$), resulterend in een totale verzakking van 22 mm.

De verhoging in raai 2 en 3 ter hoogte van +3,4 m, die ontstaan was tijdens serie 1, is tijdens serie 2 niet toegenomen, maar zelfs afgenomen.

Tijdens serie 3 is er weinig vervorming opgetreden.

Hoewel de vervorming van deze basaltbekleding aanzienlijk meer is dan de Basalton, kan de geconstateerde vervorming toch gering genoemd worden en is het geen bedreiging geweest voor de samenhang in de steenzetting.

Blokken op hun kant

In figuur E6 t/m E8 zijn de gemeten verticale verplaatsingen van het talud met blokken op hun kant weergegeven. Het valt direct op dat de verticale verplaatsingen veel groter zijn dan van de basalt en Basalton.

Tijdens serie 1 is in korte tijd ter hoogte van +3,65 m het talud 5 tot 32 mm verzakt. De waterstand was tijdens deze proeven +4,10 m, waardoor deze verzakking op een relatieve diepte van $d/H_s = 0,54$ plaatsvond. Aan de meetcabinezijde (bij raai 3 en 4) is geconstateerd dat de verzakking lokaal zelfs nog veel meer was, tot 67 mm direct na de eerste proef van serie 1 (P4120).

Iets lager, op +3,48 m, zijn raai 2 en 4 ongeveer 14 mm omhoog gekomen ($d/H_s = 0,75$). Ook ter hoogte van +3,3 m is het talud omhoog gekomen, namelijk 4 tot 10 mm. Aan het eind van de serie is op +3,4 m een steen bij raai 1 uit de bekleding geslagen ($d/H_s = 0,84$).

Tijdens serie 2 is ter hoogte van +4,48 m het talud in raai 1 en 2 ongeveer 17 mm verzakt en op +4,32 m in raai 1 ongeveer 18 mm omhoog gekomen. De waterstand was tijdens deze proeven +4,90 m. De relatieve diepte ter plaatse van de verzakking was $d/H_s = 0,63$ en ter plaatse waar het talud omhoog kwam $d/H_s = 0,87$. De relatieve diepte van het S-profiel was tijdens serie 2 dus wat dieper dan tijdens serie 1.

Aan het eind van de serie is in raai 1 op +4,37 m een blok uit het talud geslagen ($d/H_s = 0,77$).

De grootschalige vervorming tijdens serie 3 was betrekkelijk gering. Het bleef beperkt tot orde 5 mm verzakking of verhoging, behalve bij raai 2 ter hoogte van +3,82 m. Vanaf proef 4240, toen de waterstand verhoogd was naar +4,21 m, begint een blok hier omhoog te komen. Het betreft een afzonderlijk blok dat uiteindelijk 30 mm boven zijn omgeving uitsteekt.

In figuur E30 is een driedimensionale impressie gegeven van de vervorming na P4341.

Hydroblocks

Aan het eind van serie 1 staan er in figuur E9 t/m E11 erg veel meetpunten bij elkaar omdat proef 5252 zeer kort geduurd heeft (een paar minuten). Er is toen in die paar minuten bijvoorbeeld ter hoogte van +5,0 m in raai 1 een verplaatsing van 22 mm ontstaan.

Een grote bolling was al ontstaan tijdens proef 5251, zoals te zien is in de metingen ter hoogte van +4,5 m tot en met +4,1 m. In raai 1 is ter hoogte van +4,34 m de grootste opwaartse verplaatsing gemeten, namelijk 55 mm. De grootste verplaatsing was echter net naast de meetpunten ontstaan en bedroeg 90 mm tussen raai 1 en de gootwand ter hoogte van +4,35 m ($d/H_s = 0,79$).

Tijdens serie 2 was er zo'n groot gat in de bekleding ontstaan, dat op vele punten de hoogte niet meer kon worden gemeten.

Na afloop van serie 3 was de bekleding verzakt ter hoogte van +3,74 m ($d/H_s = 0,52$), namelijk 23 mm in raai 1 en 15 mm in raai 2. De dimensieloze locatie van de verzakking t.o.v. de stilwaterlijn is ongeveer gelijk aan die van serie 1 van de blokken op hun kant.

Iets lager, namelijk bij +3,52 m ($d/H_s = 0,76$), is de bekleding in raai 1 29 mm omhoog gekomen. De grootste verplaatsing was echter weer net naast de meetpunten ontstaan en bedroeg 40 mm tussen raai 1 en de gootwand ter hoogte van +3,40 m ($d/H_s = 0,90$).

In figuur E31 is een driedimensionale impressie gegeven van de vervorming na P4252.

Ook tijdens serie 4 is met een vrij lage waterstand (+4,21 m) gewerkt en zijn de verplaatsingen dus ook erg laag op het talud. Ter hoogte van +3,94 m is in raai 1 een verzakking ontstaan van 24 mm ($d/H_s = 0,36$), ter hoogte van +3,74 m was in deze raai vrijwel geen verticale verplaatsing waargenomen, terwijl ter hoogte van +3,52 m er een bolling was ontstaan van maar liefst 90 mm ($d/H_s = 0,92$). Het meetpunt zat nu toevallig precies op het hoogste punt van de bolling.

De bolling was in deze serie op dezelfde relatieve diepte opgetreden als in serie 3.

Tijdens serie 5 is de verzakking weer in raai 1 opgetreden ter hoogte van +3,94 m ($d/H_s = 0,41$). De opbolling is na proef 4256 maximaal ter hoogte van +3,52 m ($d/H_s = 1,08$), maar omdat proef 4457 is uitgevoerd met een 20 cm hogere waterstand verschuift dit maximum naar +3,74 m ($d/H_s = 1,03$). De grootste verticale verplaatsing ligt zelfs nog iets lager op het talud ($d/H_s = 1,13$) en bedroeg ongeveer 110 mm. De bolling trad dus iets dieper op dan in serie 3 en 4.

De verticale verplaatsingen tijdens de zesde serie, die uitgevoerd is met Hydroblocks van 20 cm, zijn weergegeven in figuur E12 t/m E14. Tot en met proef 4461 ($t = 8$ uur) blijven de verticale verplaatsingen beperkt tot een paar mm, maar tijdens proef 4660 begint het talud in de zone $3,4 < z < 4,0$ m omhoog te komen ($0,57 < d/H_s < 1,12$). Raai 2 geeft de grootste verplaatsingen, van 7 mm op +4,0 m tot 12 mm op +3,4 m. Tijdens de laatste proef ontstond er een grote bolling in het talud met een maximale hoogte in raai 2 van 97 mm ter hoogte van +3,8 m ($d/H_s = 0,92$). Het hoogste punt van de bolling zat tussen raai 2 en 3 op een hoogte van +3,8 m. De maximale hoogte van de bolling is niet goed te bepalen omdat enkele blokken uit de bekleding zijn geslagen en er nog twee net zijn blijven zitten met een maximale verplaatsing van ongeveer 19 cm.

In figuur E32 is een driedimensionale impressie gegeven van de vervorming na P4860.

De metingen laten zien dat de bolling zich nu uitstrekt over vrijwel de volle breedte van de goot, in tegenstelling tot de Hydroblock van 15 cm, toen de bolling zich uitstreekte over slechts een halve gootbreedte.

E.2 Verplaatsing langs het talud

Basalton

De gemeten verplaatsingen in het vlak van het talud naar beneden (afschuiving van de toplaag) tijdens de proeven op Basalton zijn als functie van de tijd gegeven in figuur E15 en E16. In de figuren wordt deze verplaatsing de 'horizontale' verplaatsing genoemd, hoewel het in feite langs het talud is gemeten.

Uit de figuren blijkt dat de Basalton slechts enkele millimeters langs het talud is verschoven. Ter plaatse van raai 1 op $z = +3,8$ m was de verplaatsing aan het eind van de proeven het grootst: 5 mm naar beneden.

Basalt

De meetresultaten op de basalt zijn gegeven in figuur E17 t/m E19.

Het valt op in deze figuren dat een deel van de bekleding omlaag schuift (negatief), maar een ander deel omhoog (positieve waarden). Op het niveau $z = +4,5$ m bijvoorbeeld schuift de bekleding over de volle breedte omhoog, maar vooral in raai 1. Daar gaat de bekleding in serie 1 maar liefst 7 mm omhoog, en in serie 2 nog eens 1 mm extra.

Laag op het talud, namelijk op $z = +3,3$ m t/m $z = +3,8$ m, gaat de bekleding over de volle breedte omlaag, namelijk 5 à 10 mm, behalve in raai 2 op $z = +3,6$ m. In raai 3 op $z = 3,4$ m was de afschuiving zelfs 15 mm.

De verticale verplaatsing was niet zodanig dat het bol gaan staan van de bekleding spatkrachten geeft in het vlak van het talud waardoor het bovenste deel van het talud omhoog gedrukt zou kunnen gaan worden. De verticale verplaatsingen waren daarvoor te klein. Voorlopig is er dus nog geen verklaring voor de omhoog gerichte beweging hoog op het talud.

Blokken op hun kant

De meetresultaten op de blokken op hun kant basalt zijn gegeven in figuur E20 t/m E22.

In de figuren is te zien dat vooral tijdens serie 1 er in korte tijd een verschuiving naar beneden van orde 5 mm is opgetreden. Deze afschuiving is vooral hoger op het talud te zien ($3,8 \leq z \leq 4,3$ m).

Daarna blijven de verplaatsingen beperkt tot een paar mm (in dezelfde orde van grote als de nauwkeurigheid van de metingen).

Op $t = 20$ uur op $z = 4,2$ m geeft raai 3 een vreemde uitschieter, die waarschijnlijk berust op een meetfout.

In de tweede helft van serie 3 is er laag op het talud ($z = +3,2$ m) een aanzienlijke verplaatsing naar beneden van omstreeks 10 mm te zien. Het is onduidelijk waar dit door veroorzaakt is.

Hydroblocks

De gemeten verschuivingen van de Hydroblocks van 15 cm dikte zijn gegeven in figuur E23 t/m E25, en van die van 20 cm dikte in figuur E26 t/m E28.

Aan het eind van serie 1 is ter hoogte van $4,3 < z < 4,5$ m in raai 1 een aanzienlijke bolling ontstaan. In de metingen is te zien dat ter hoogte van $z = 4,5$ m de Hydroblocks 5 mm langs het talud omhoog geschoven zijn, waarschijnlijk als gevolg van de spatkrachten in deze bolling. Het meetpunt in raai 1 op $z = +4,8$ m op $t = 3,6$ uur zit net iets boven het gat in de bekleding en is waarschijnlijk daarom 8 mm omlaag geschoven.

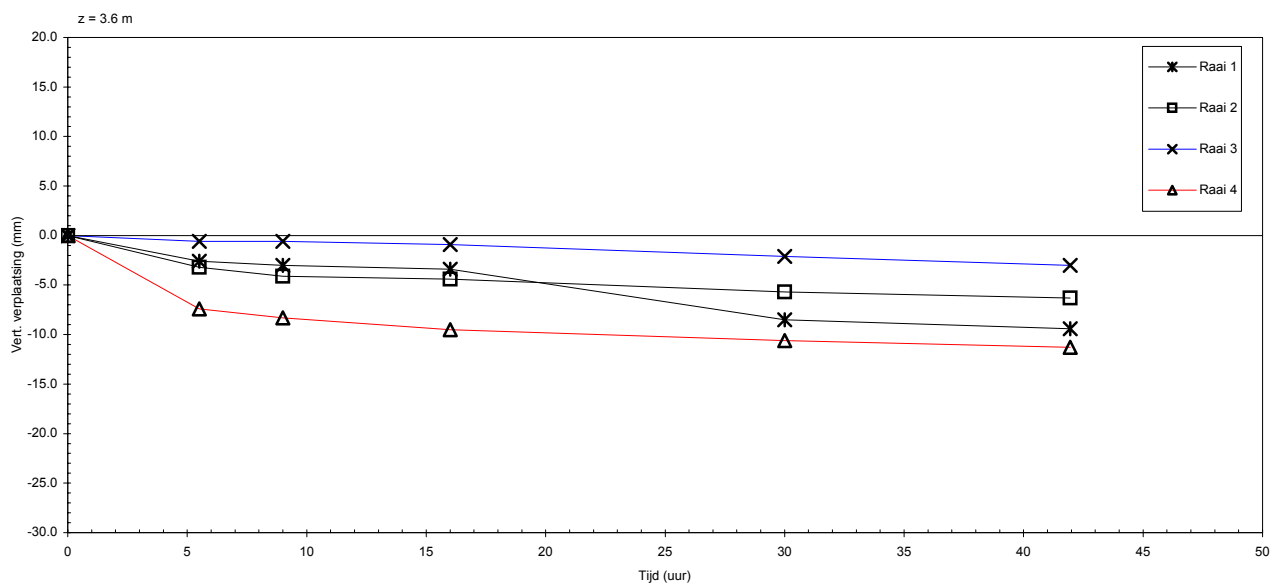
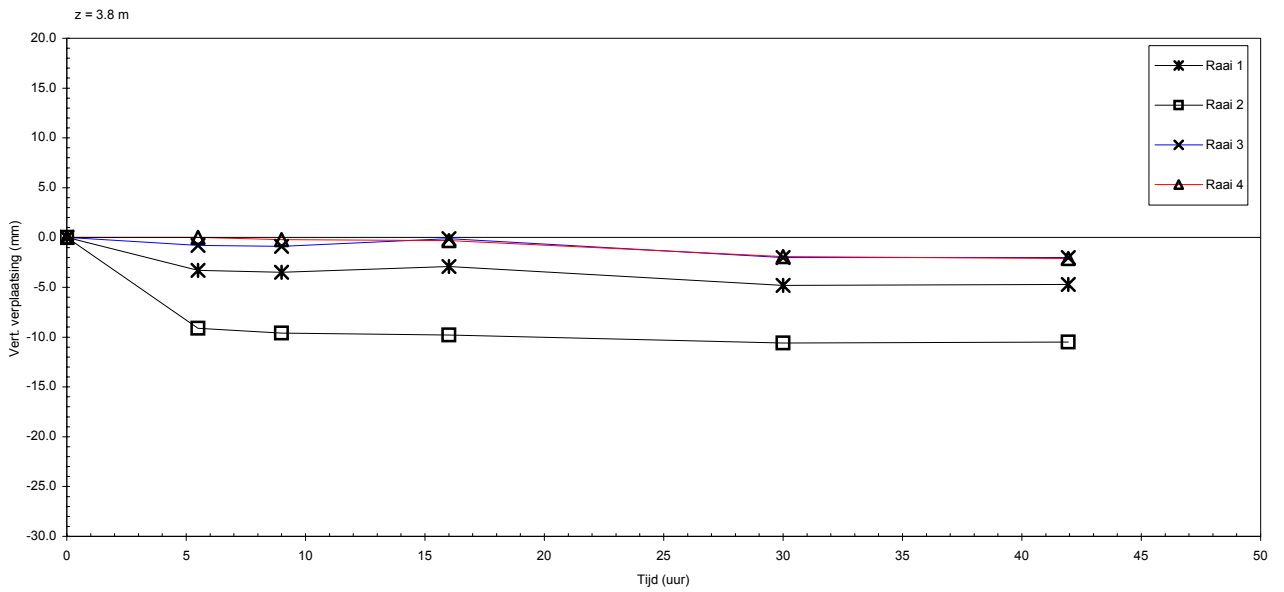
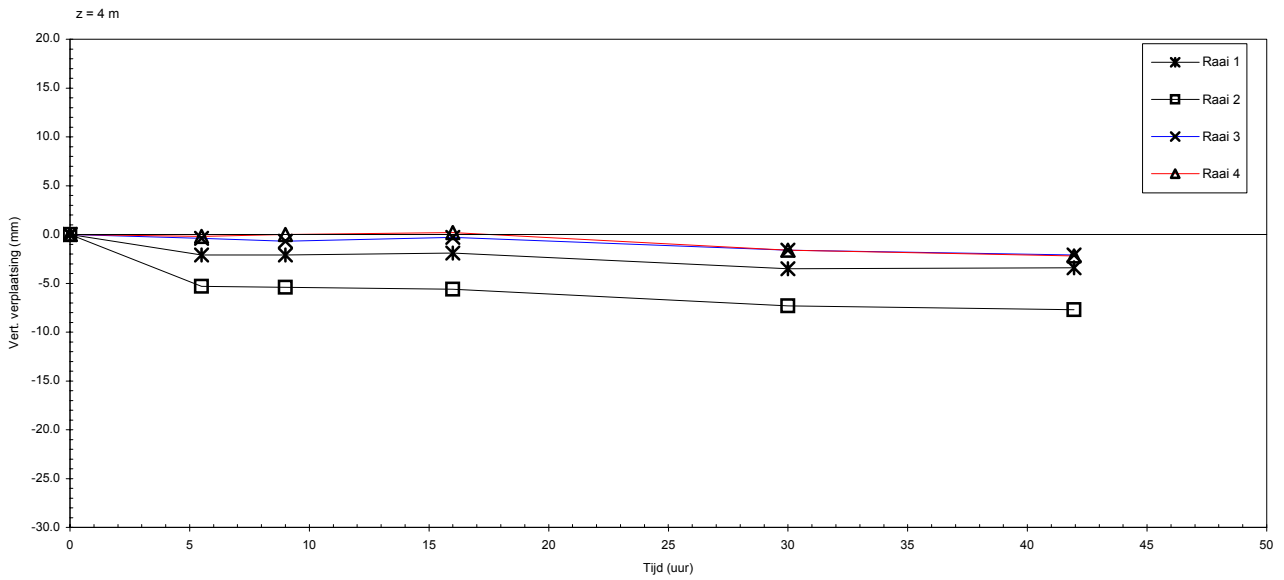
Aan het eind van serie 2 is er enige verschuiving te zien in raai 1 en 2 ter hoogte van $z = 3,9$ m en $z = 4,1$ m. Hier is de bekleding 5 à 10 mm naar beneden verschoven. Deze meetpunten zaten iets boven het gat dat toen in de bekleding is geslagen.

In serie 4 is de grote opwaartse verplaatsing in raai 1 ter hoogte van $z = 3,5$ m en $z = 3,7$ m opmerkelijk. Er is toen een bolling en vervolgens een gat in de bekleding ontstaan in het gebied hier vlak onder. De bolling kan ervoor gezorgd hebben dat de erboven liggende stenen iets omhoog zijn gedrukt.

Aan het eind van serie 5 is een bolling ontstaan ter hoogte van $z = 3,5$ à $3,8$ m in de raai 1. In de metingen zien we ter hoogte van $z = +3,5$ m een verzakking van ruim 10 mm en ter

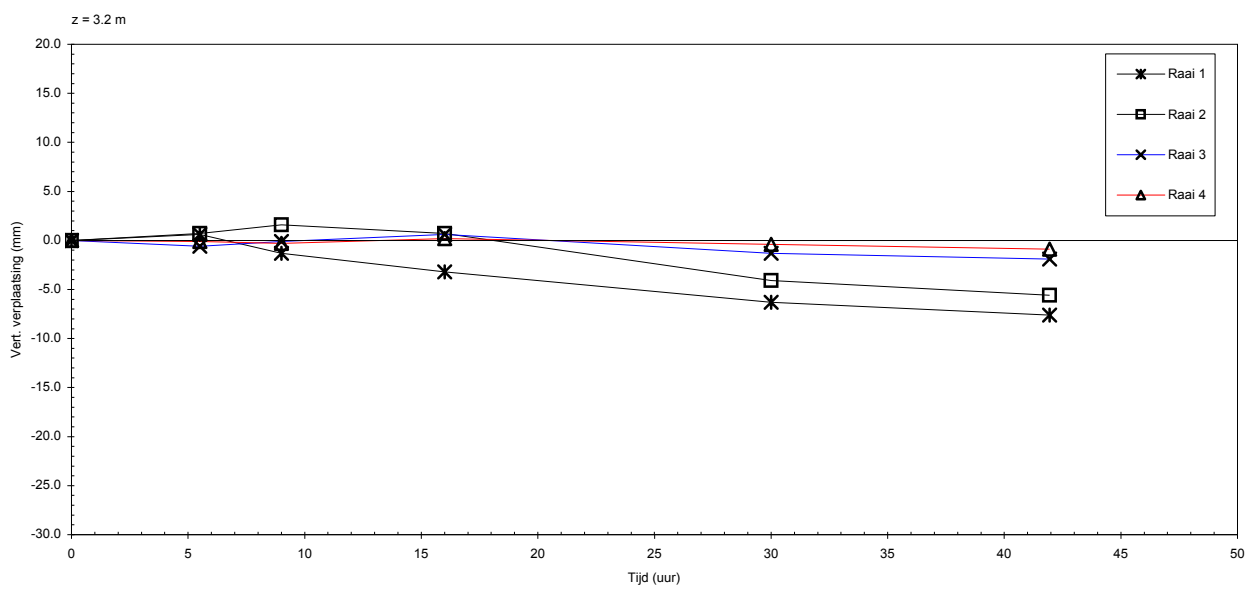
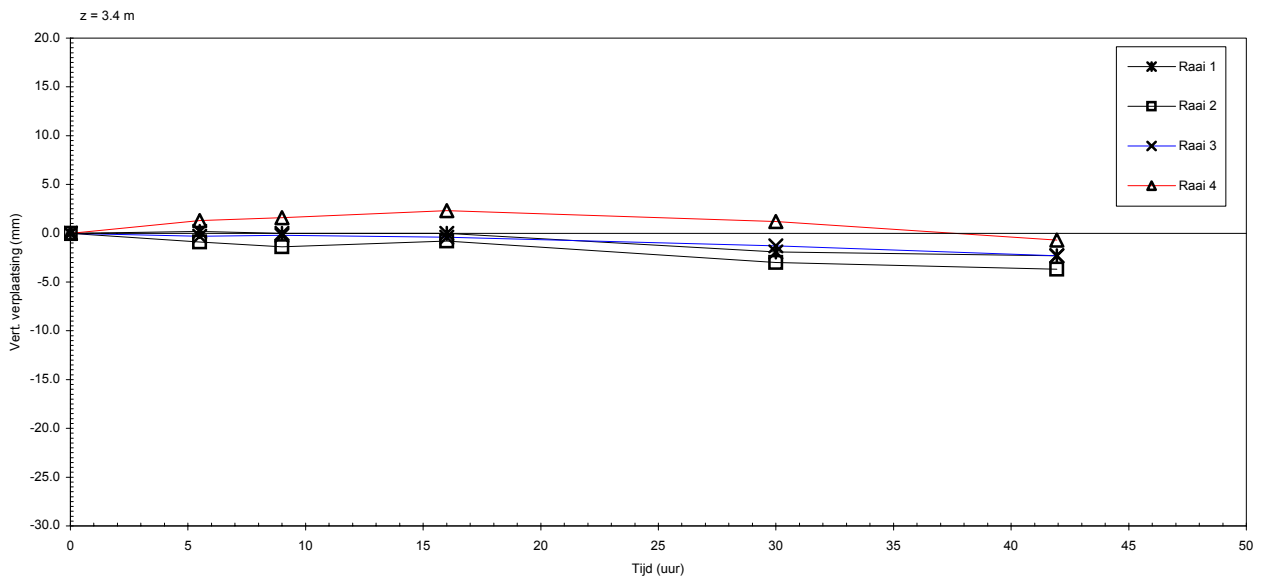
hoogte van $z = +4,3$ mm is de bekleding 8 mm omhoog gegaan. Dat laatste is wel vreemd, omdat dit ruim boven het schadegebied is en ter hoogte van bijvoorbeeld $z = +4,1$ mm er geen bewegingen te zien zijn.

Series 6 is uitgevoerd met Hydroblock van 20 cm dikte. Aan het eind van deze serie is er een bolling ontstaan in de raai 2 en 3 ter hoogte van $z = 3,7$ à $3,9$ m. Later is hier ook een gat in de bekleding ontstaan. In de metingen zien we dat net boven deze bolling op $z = 4,0$ m de bekleding orde 5 mm omhoog gegaan is, en net eronder ($z = 3,6$ m) 5 à 13 mm omlaag. Deze verschuivingen hebben waarschijnlijk te maken met het ontstaan van spatkrachten tijdens het opbollen van de bekleding.



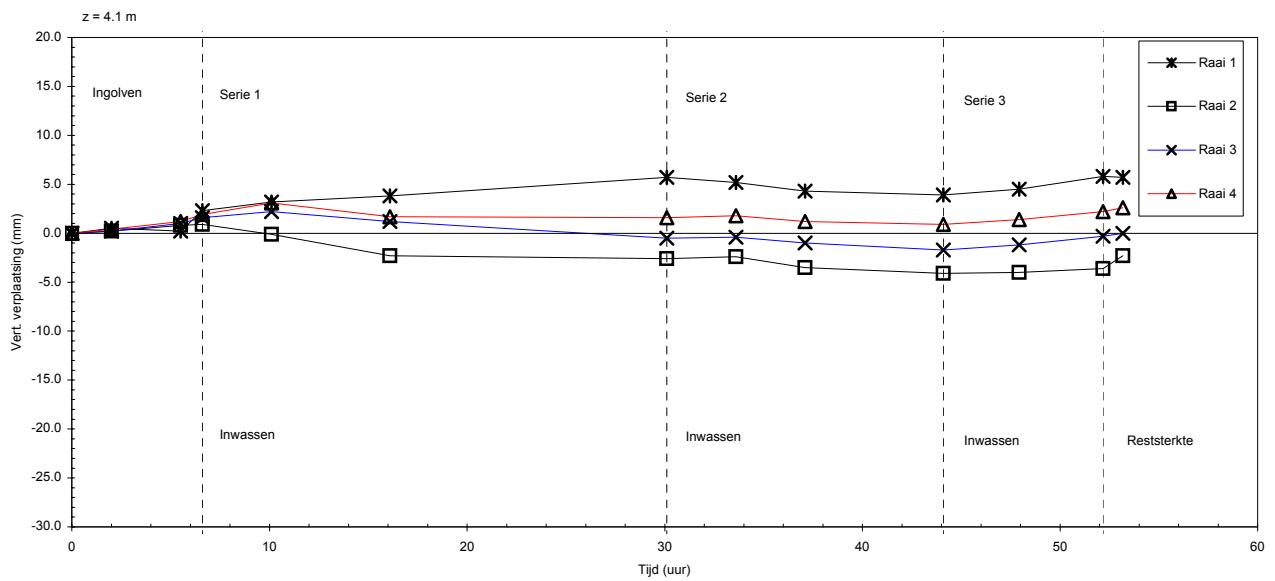
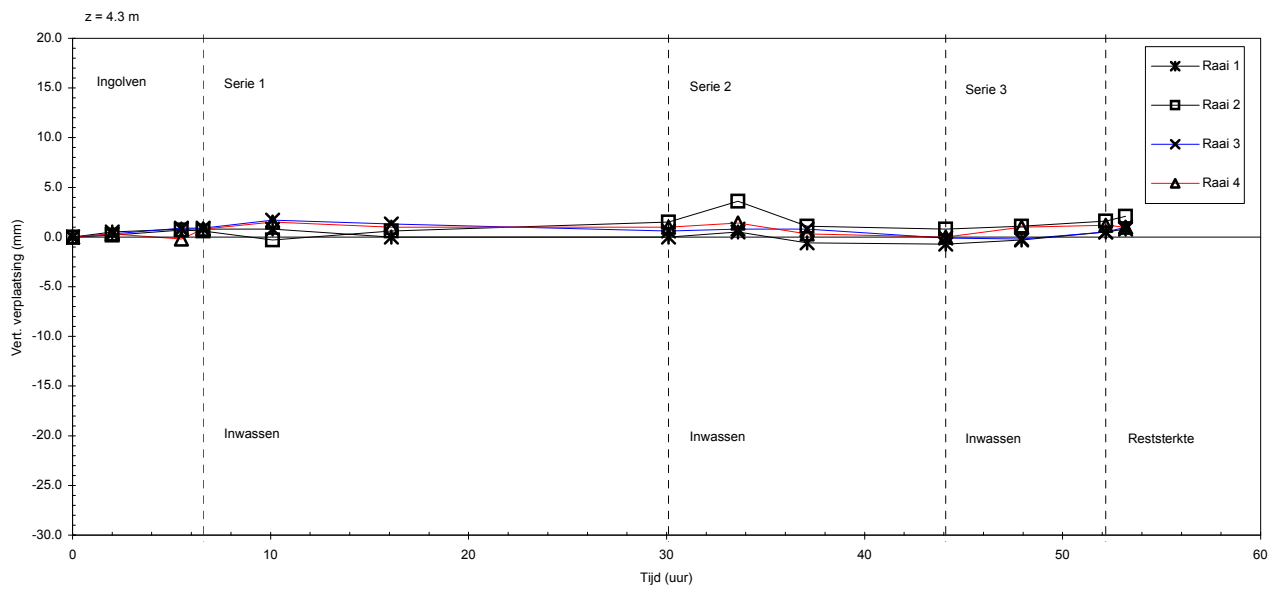
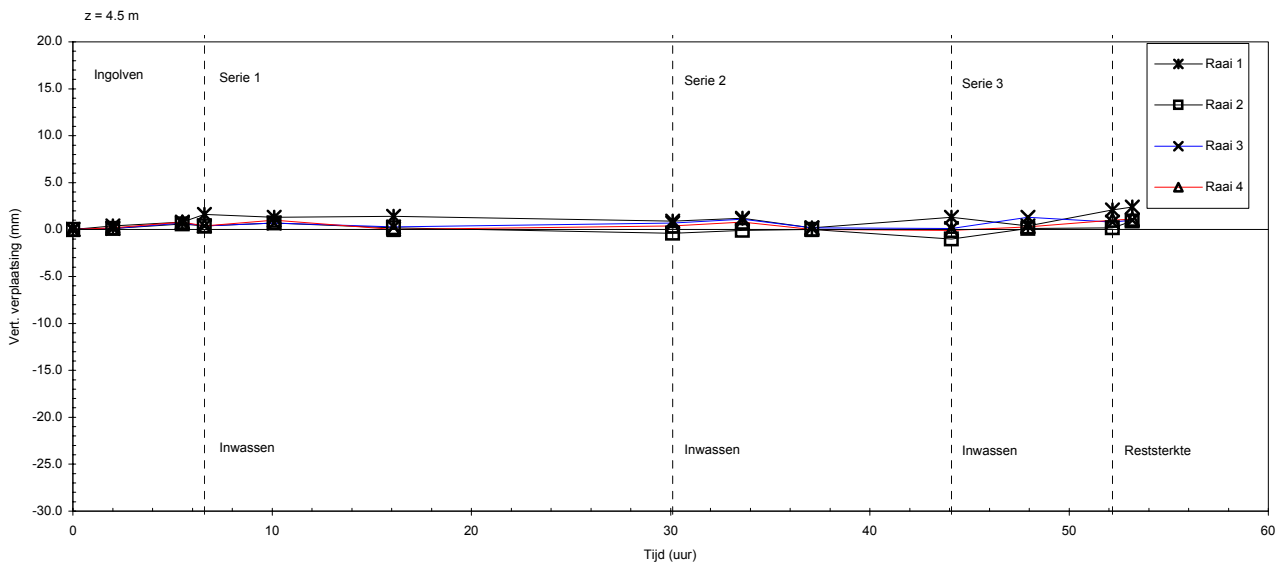
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten verticale verplaatsing (gemeten vanaf P4201)

Basalton bekleding



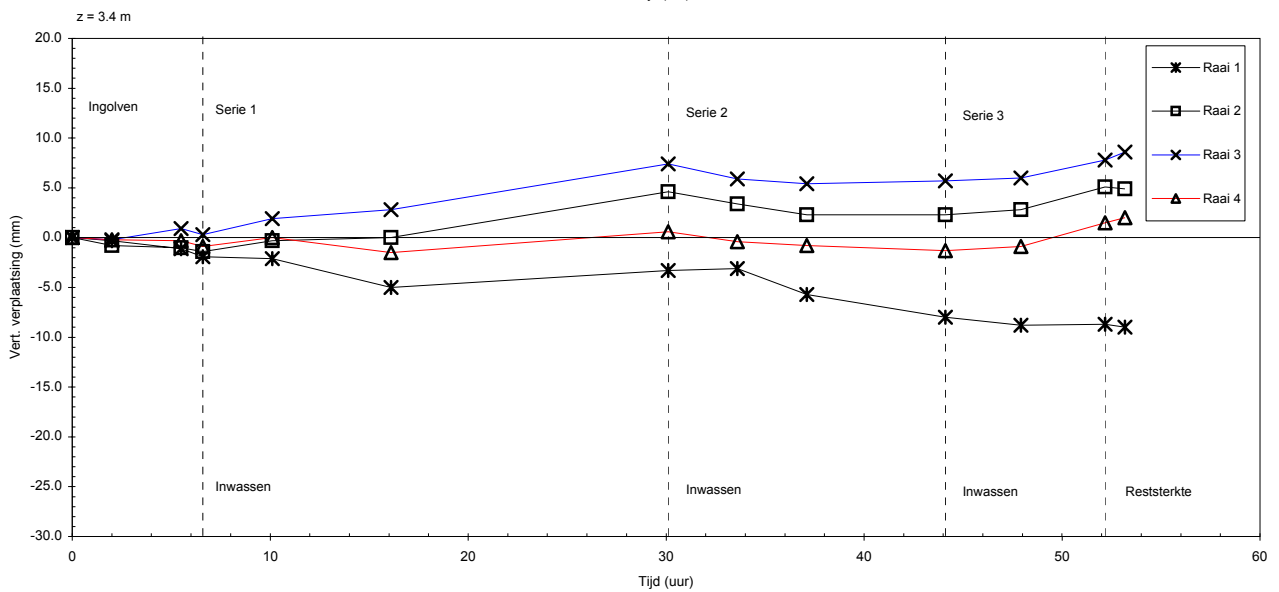
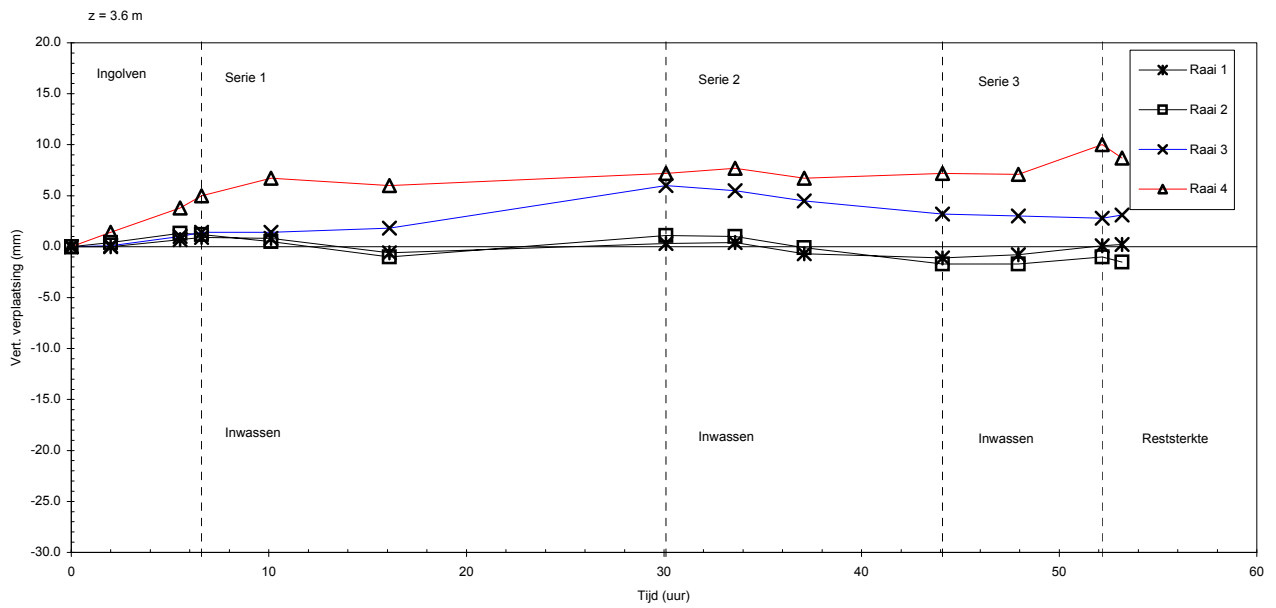
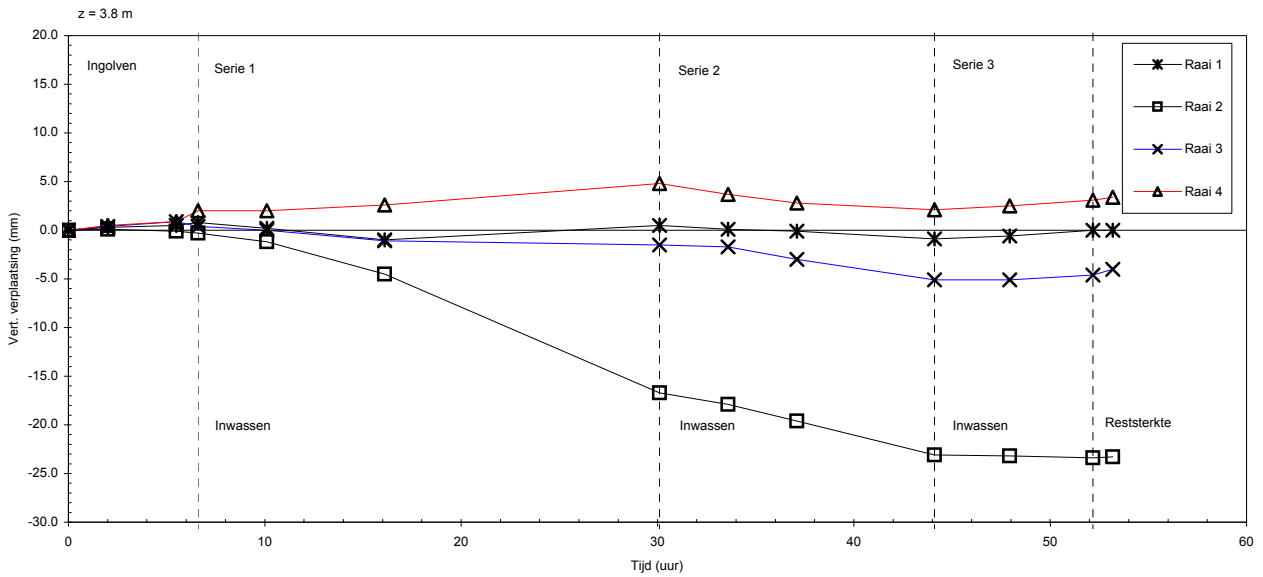
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten verticale verplaatsing (gemeten vanaf P4201)

Basalton bekleding



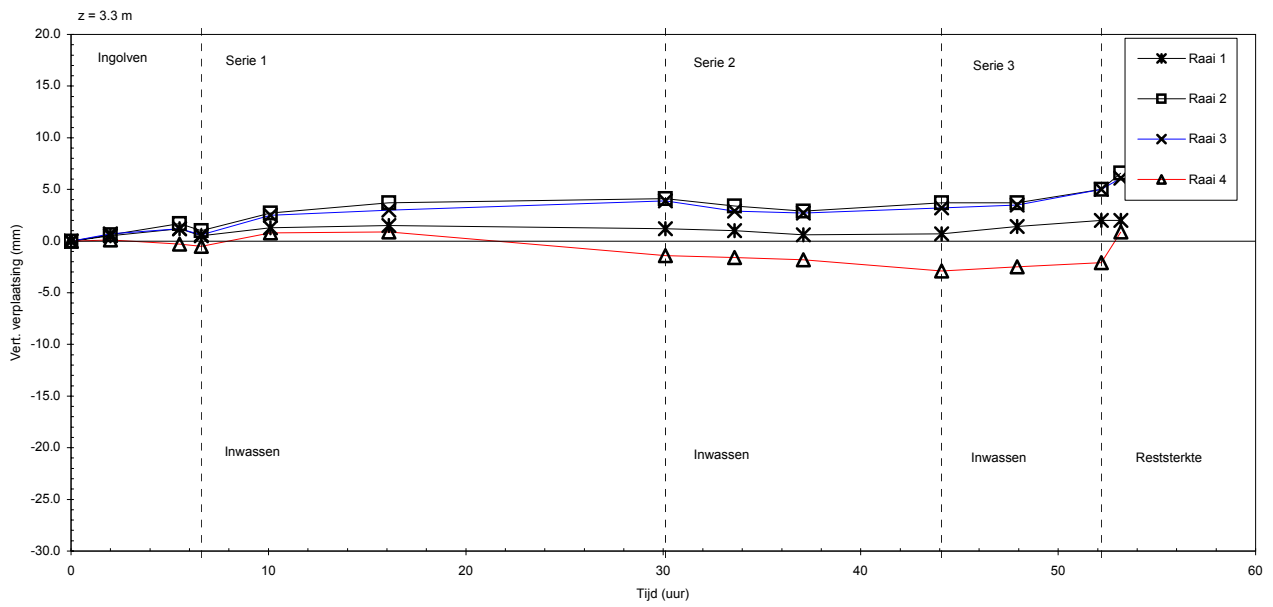
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Basalt bekleding



Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Basalt bekleding



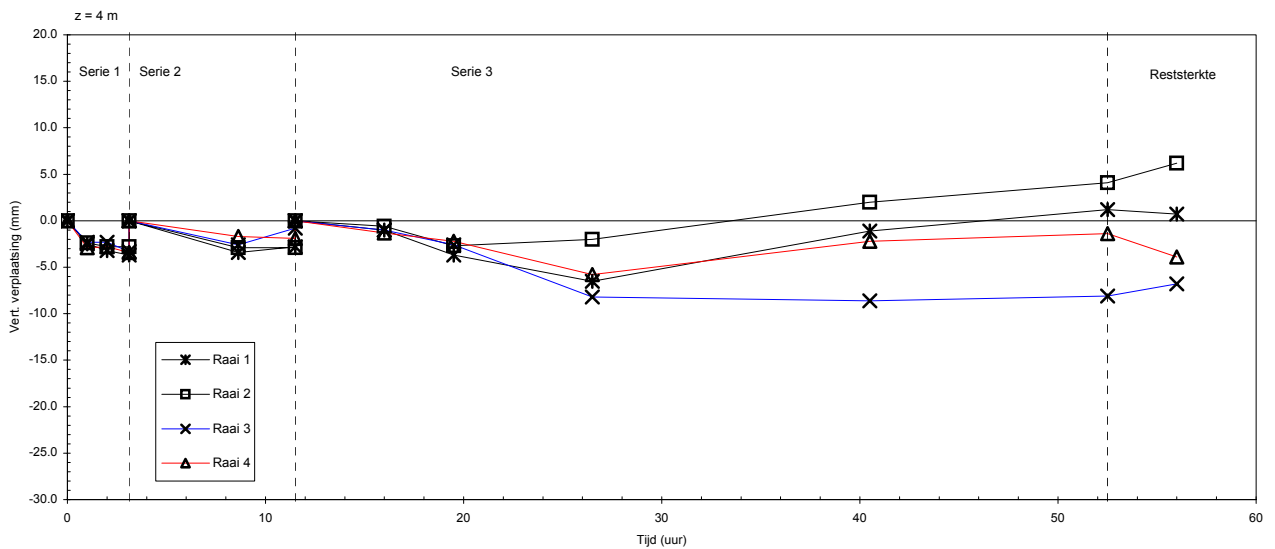
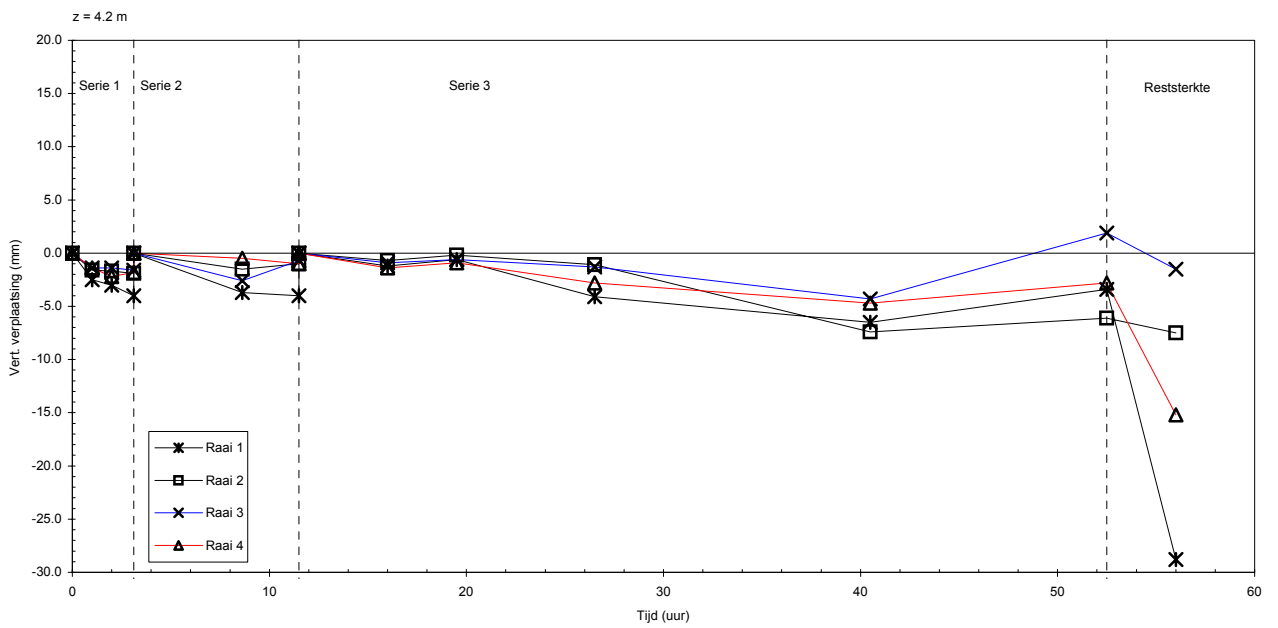
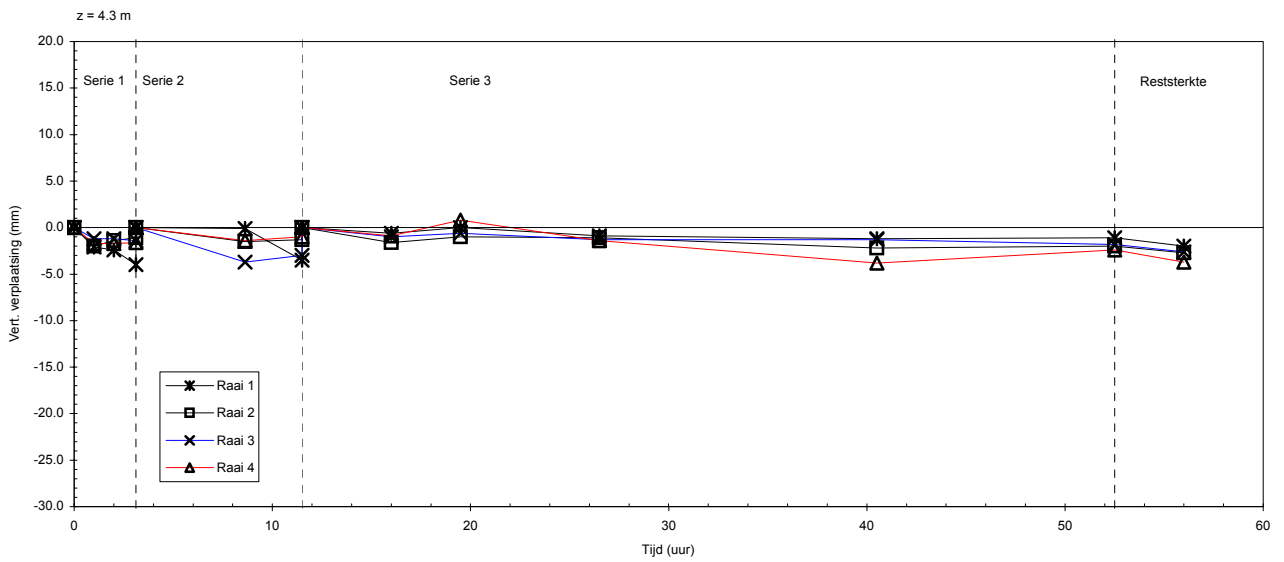
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Basalt bekleding

WL | Delft Hydraulics

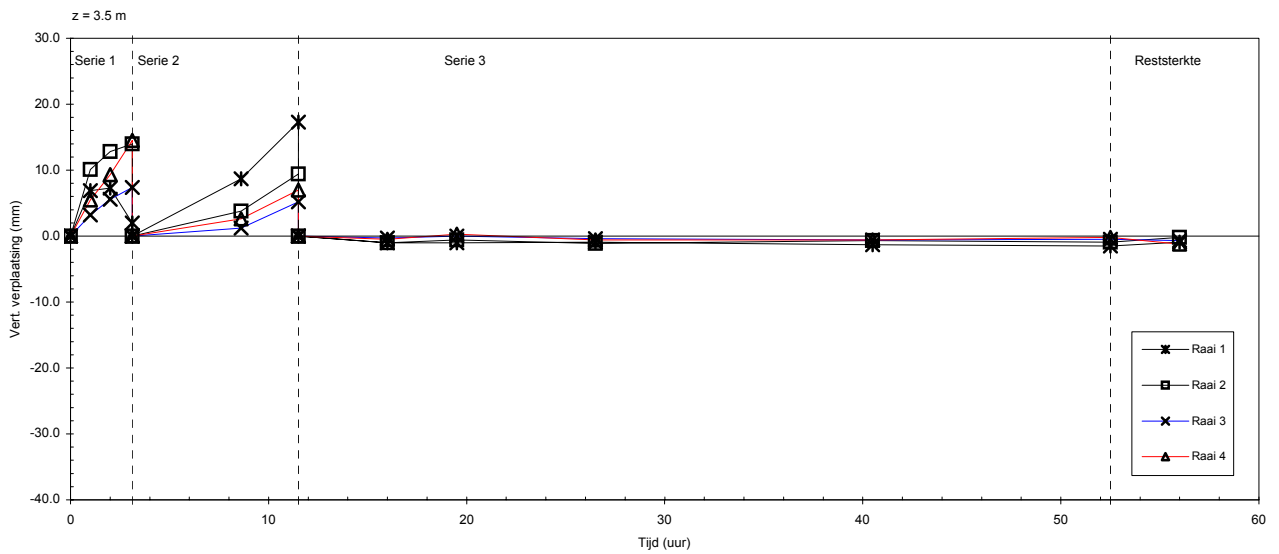
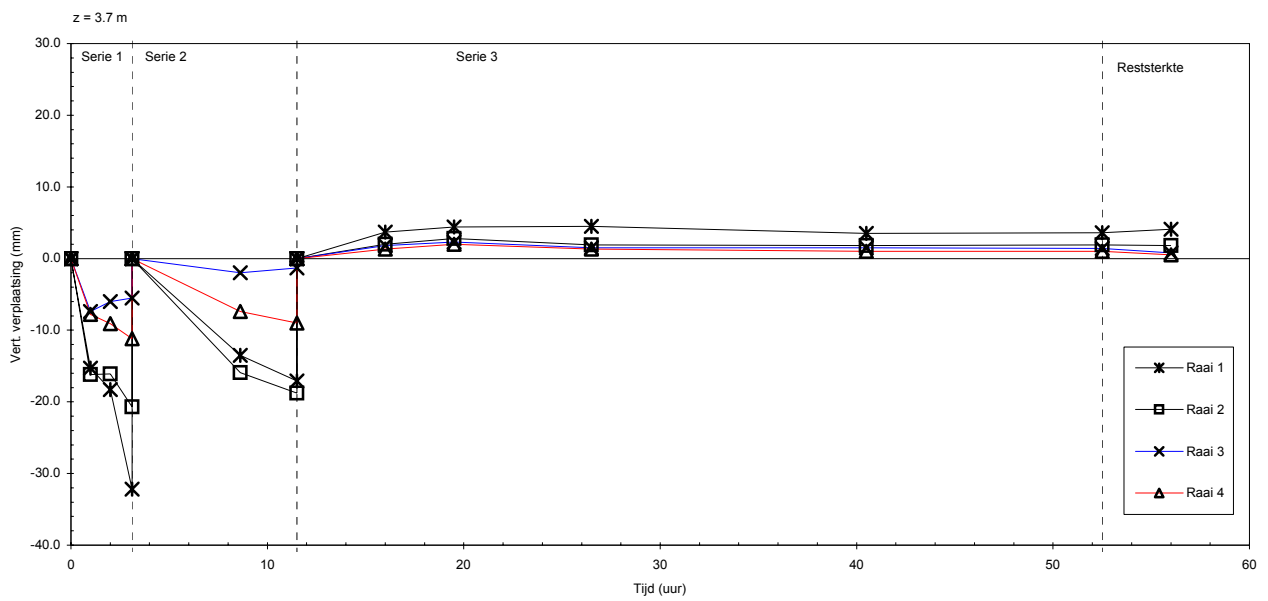
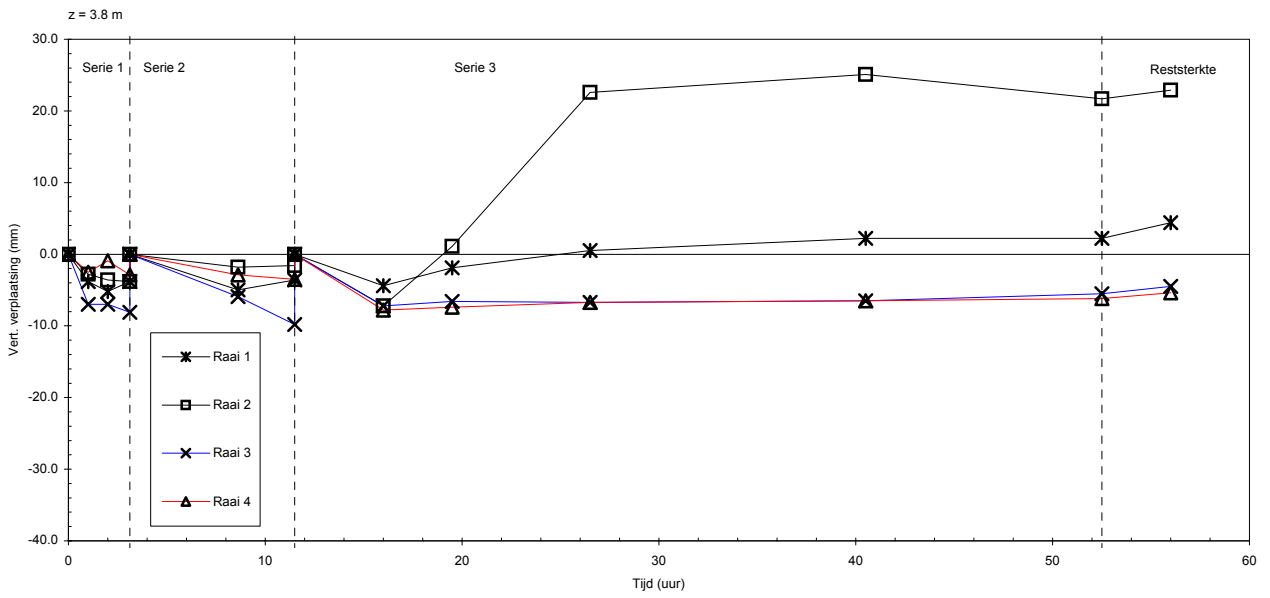
H4475

FIG. E5



Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Blokken op kant



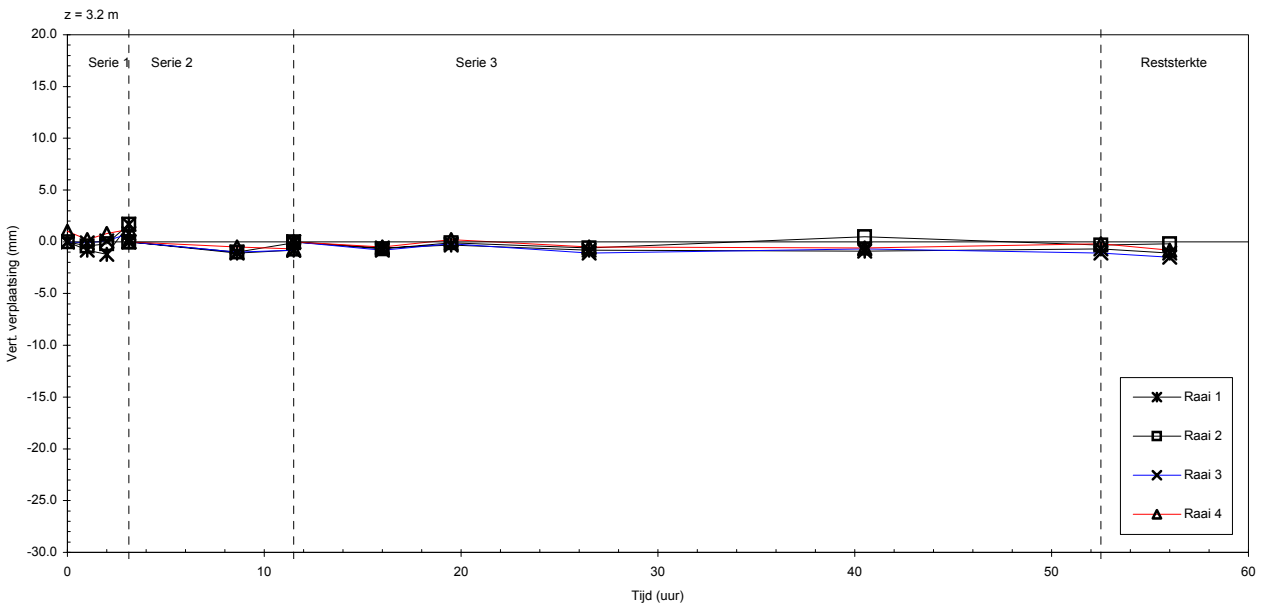
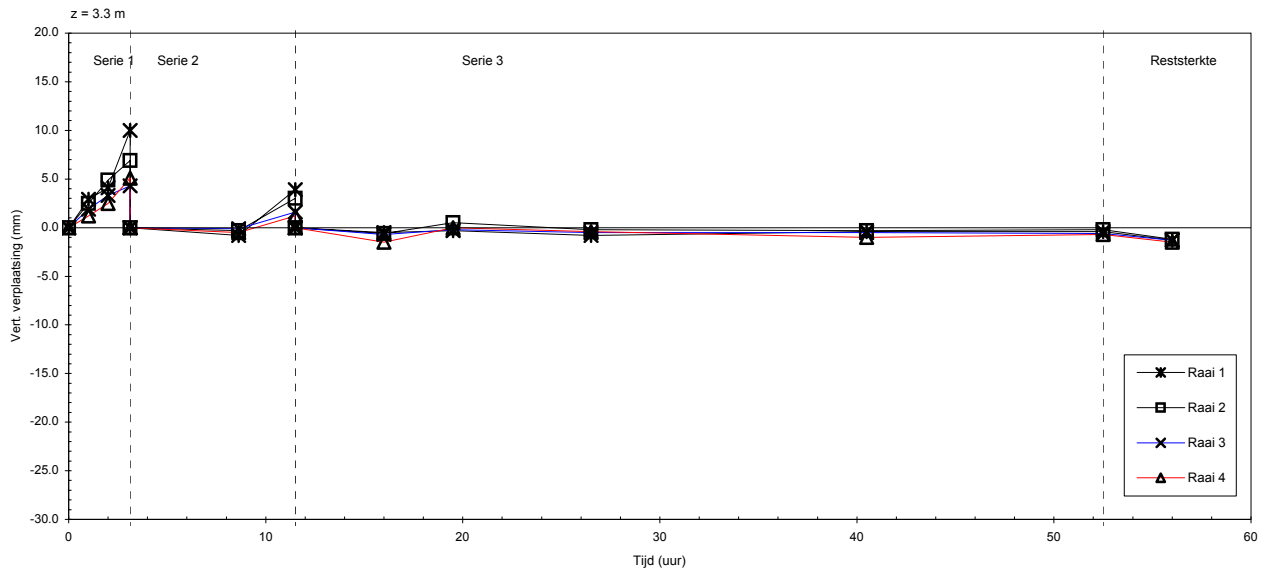
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Blokken op kant

WL | Delft Hydraulics

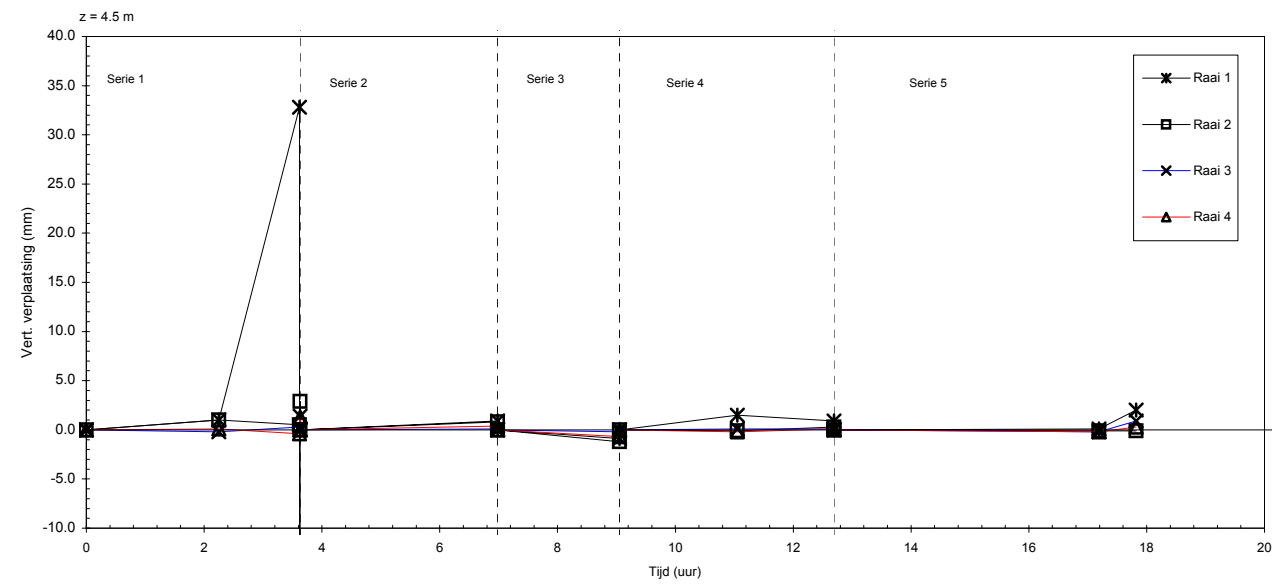
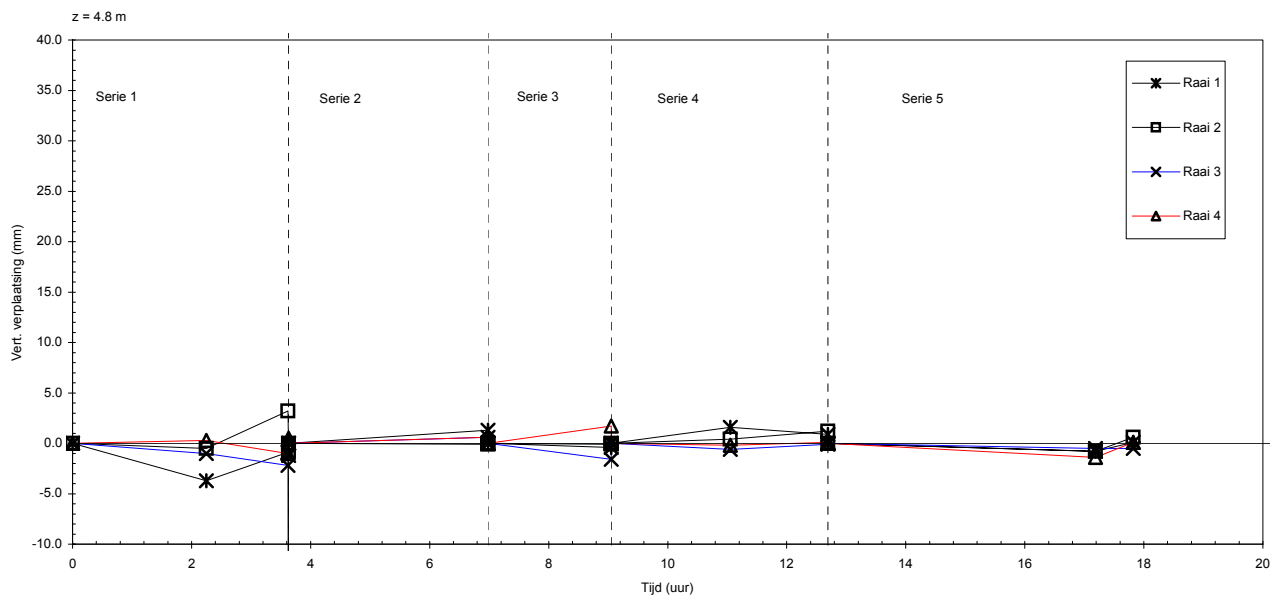
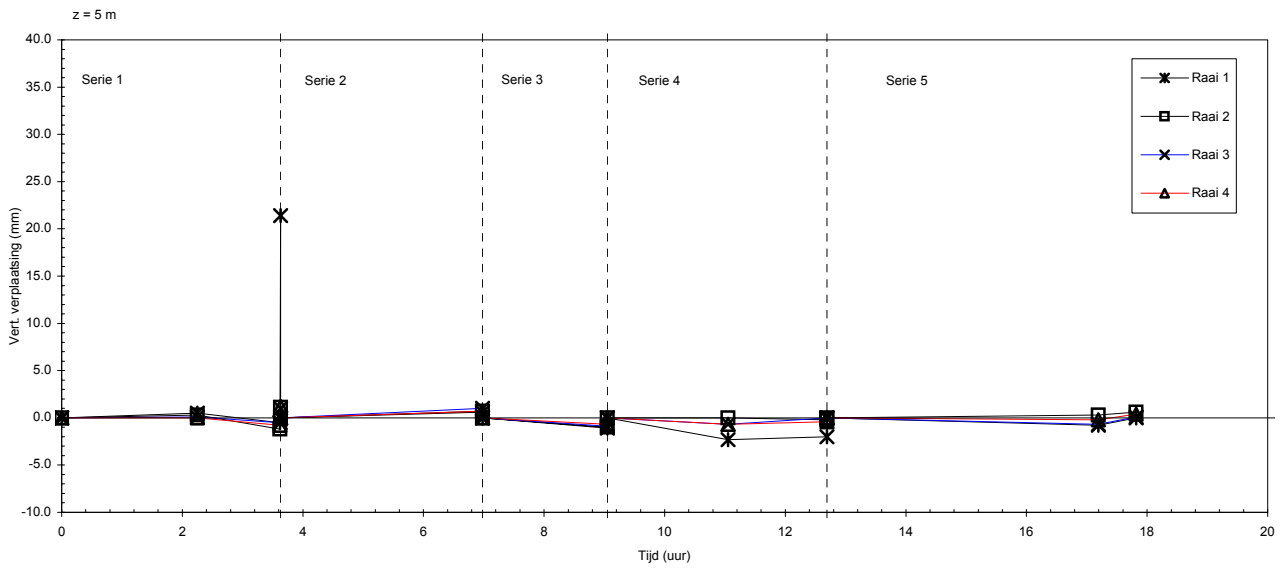
H4475

FIG. E7



Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Blokken op kant



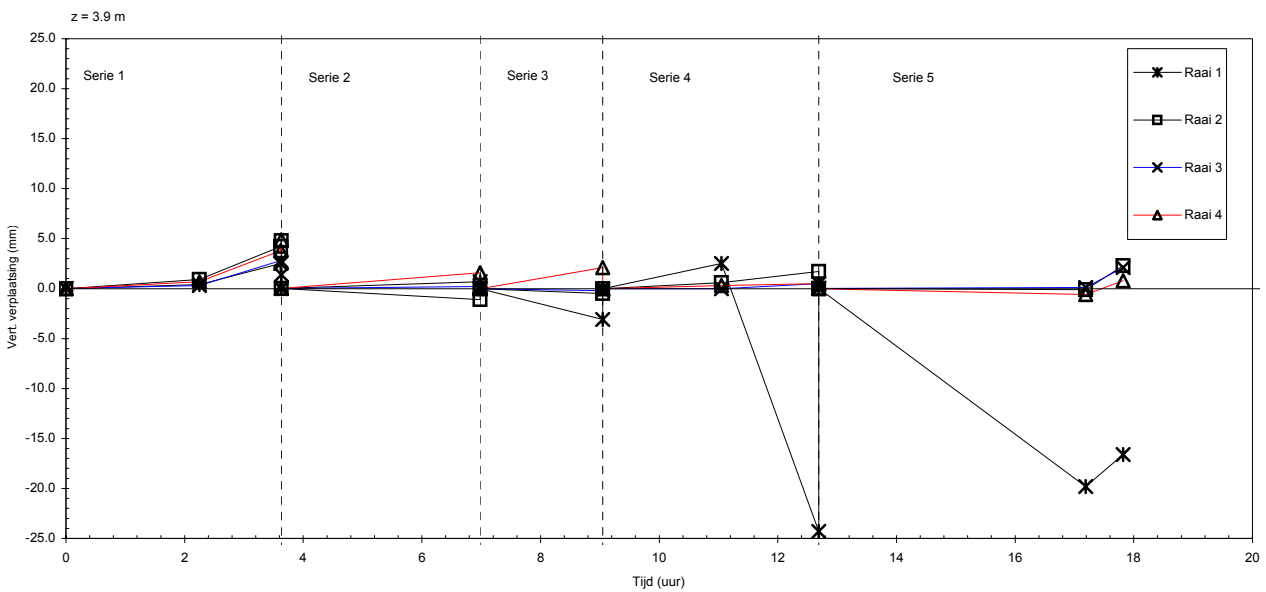
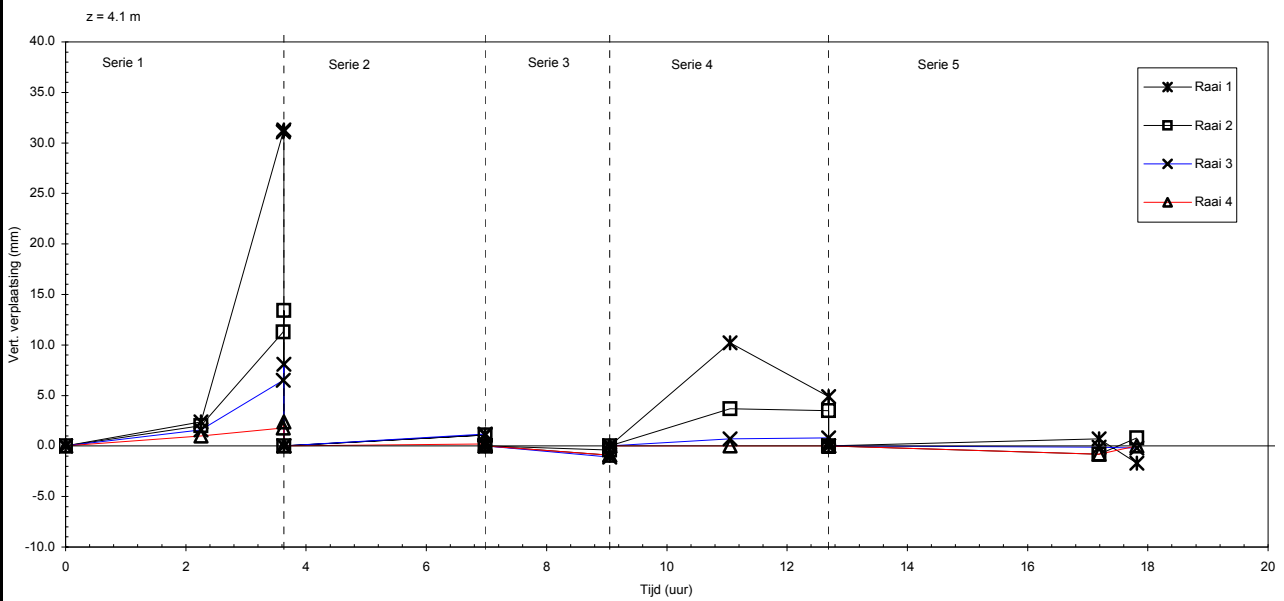
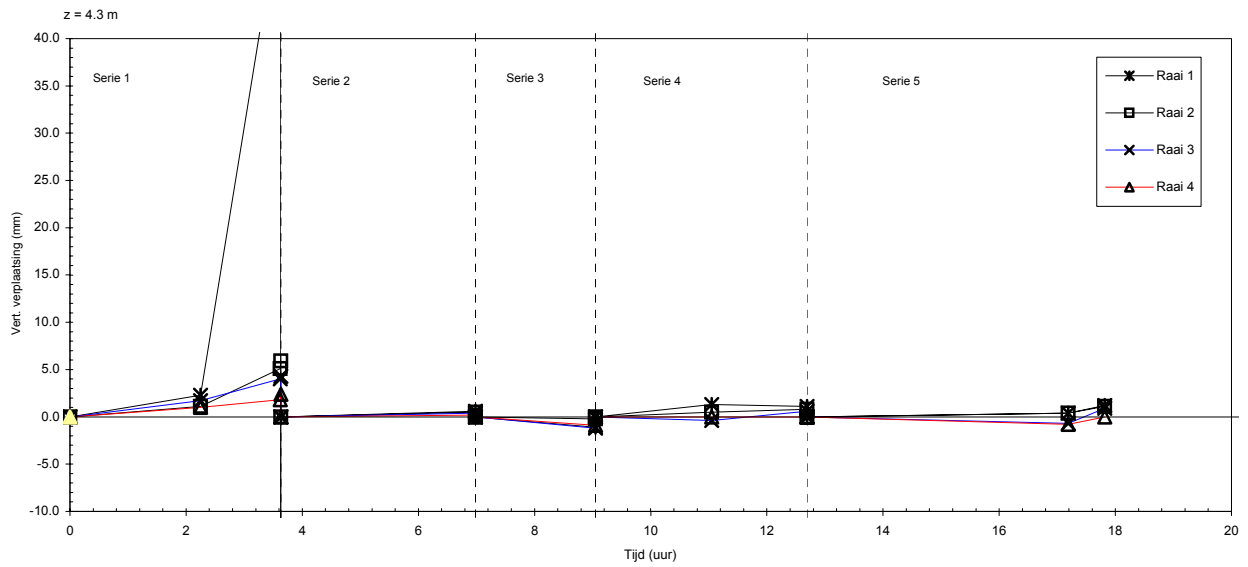
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,15 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E9



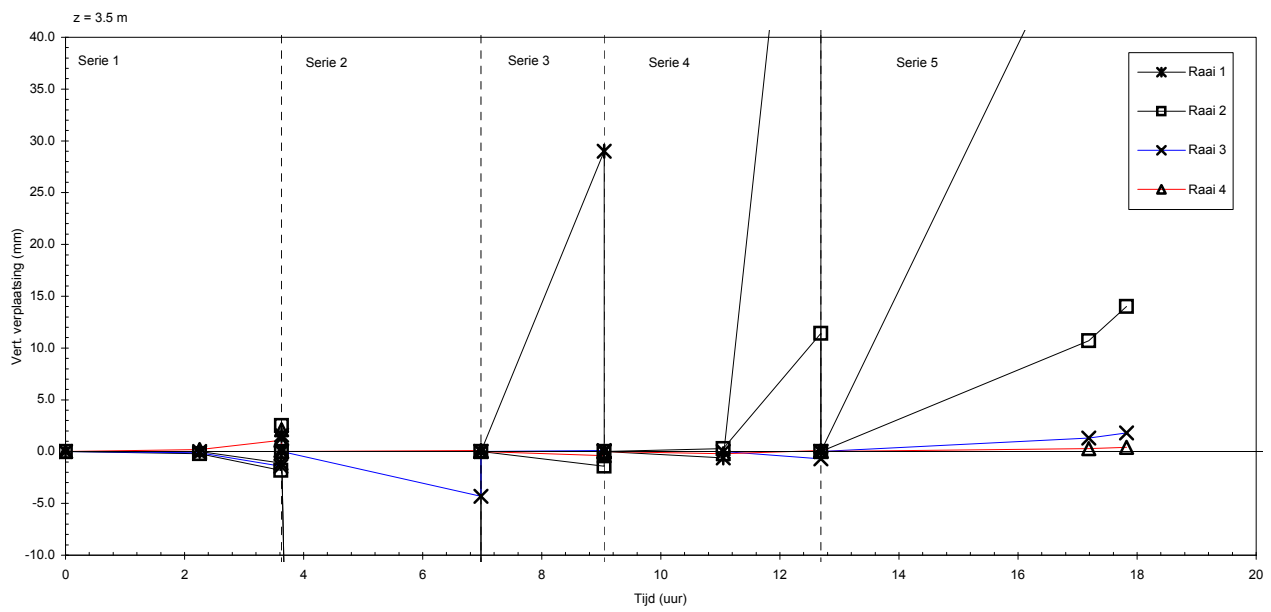
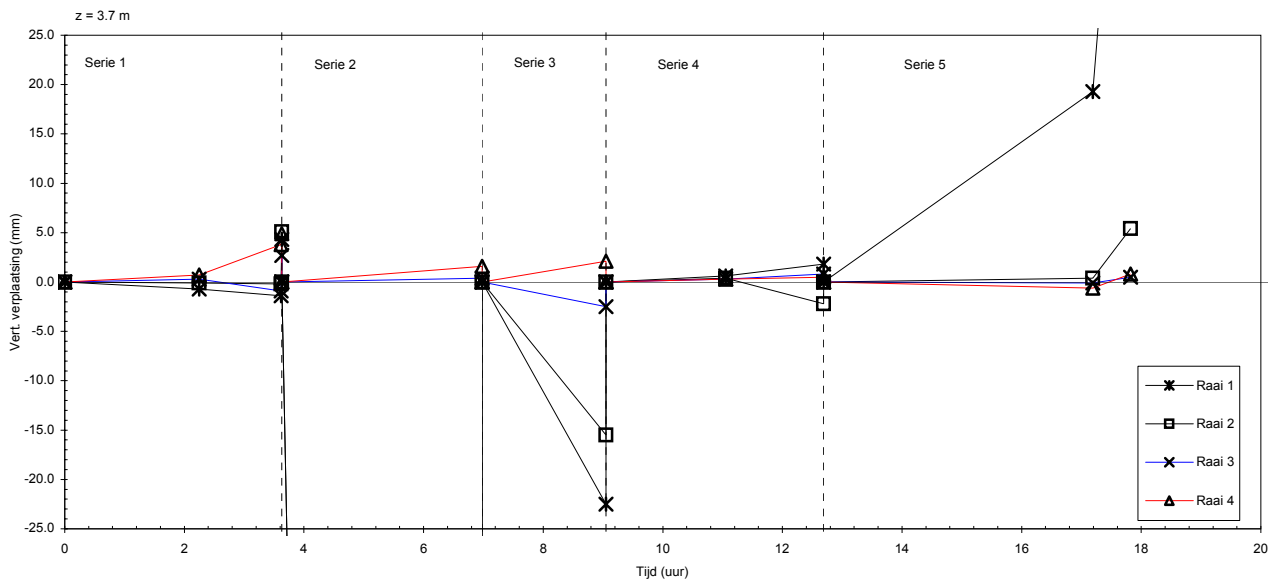
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,15 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E10



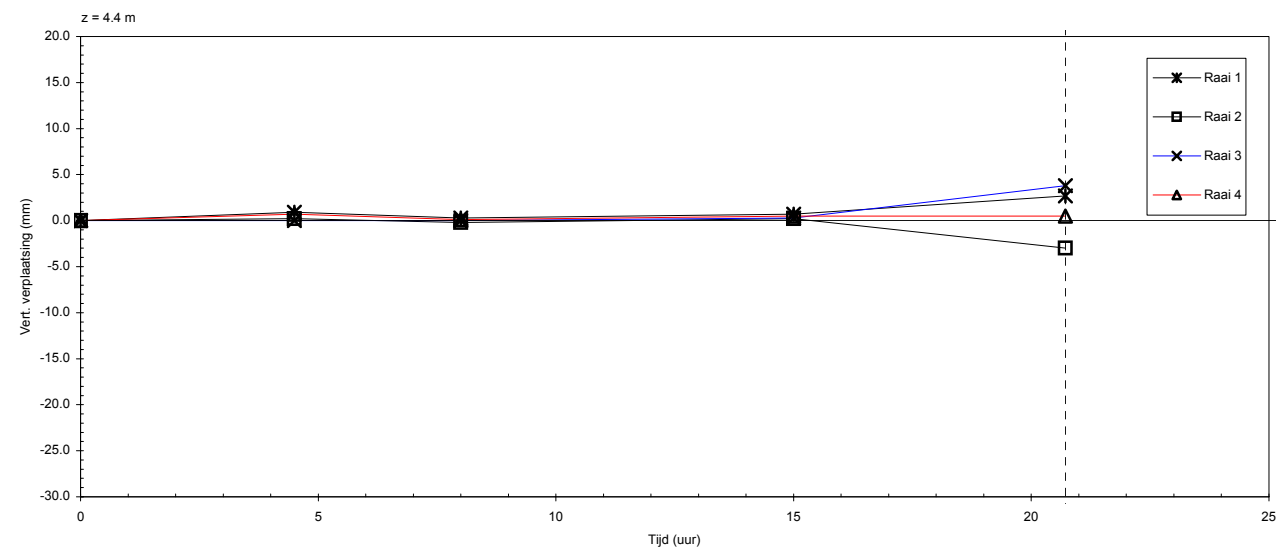
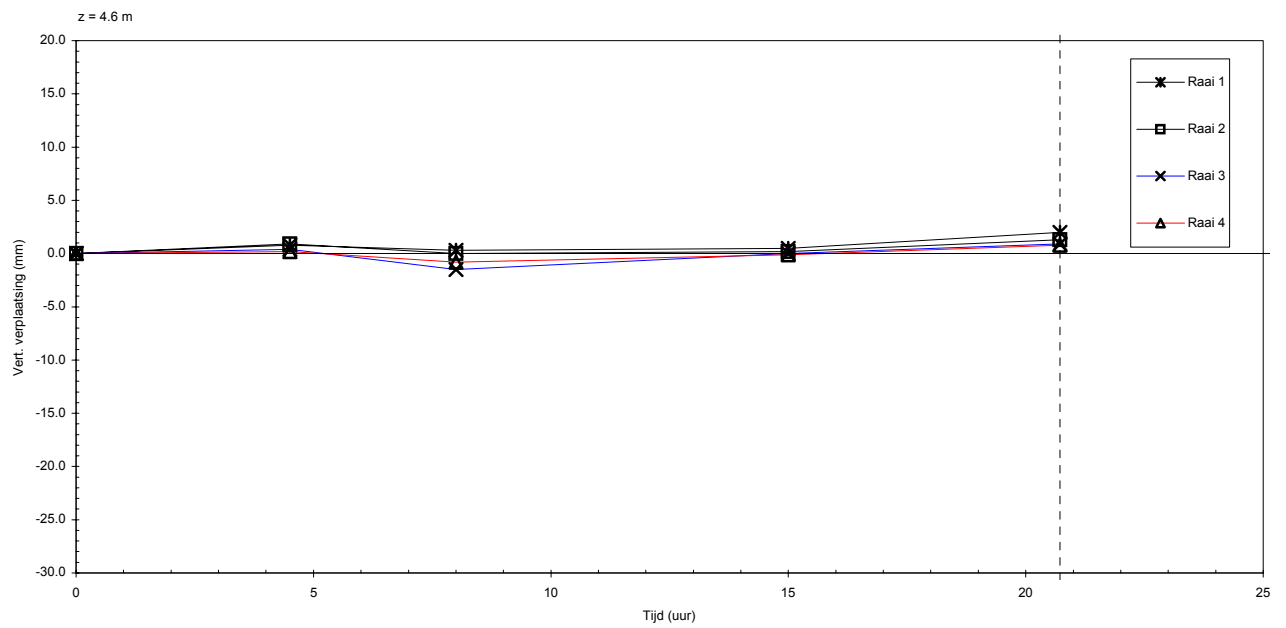
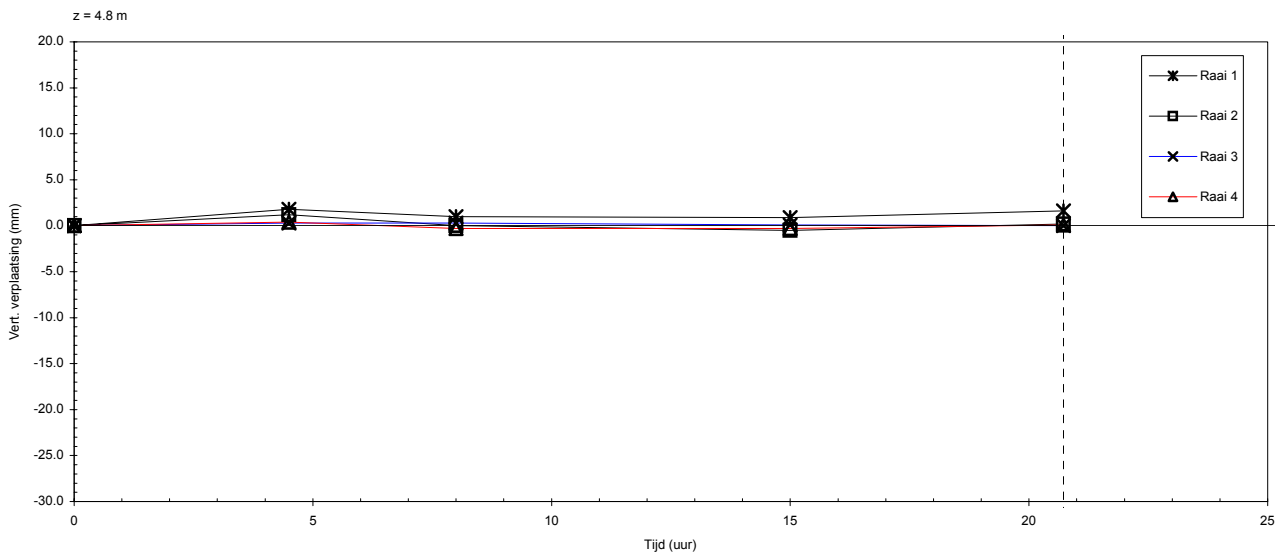
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,15 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E11



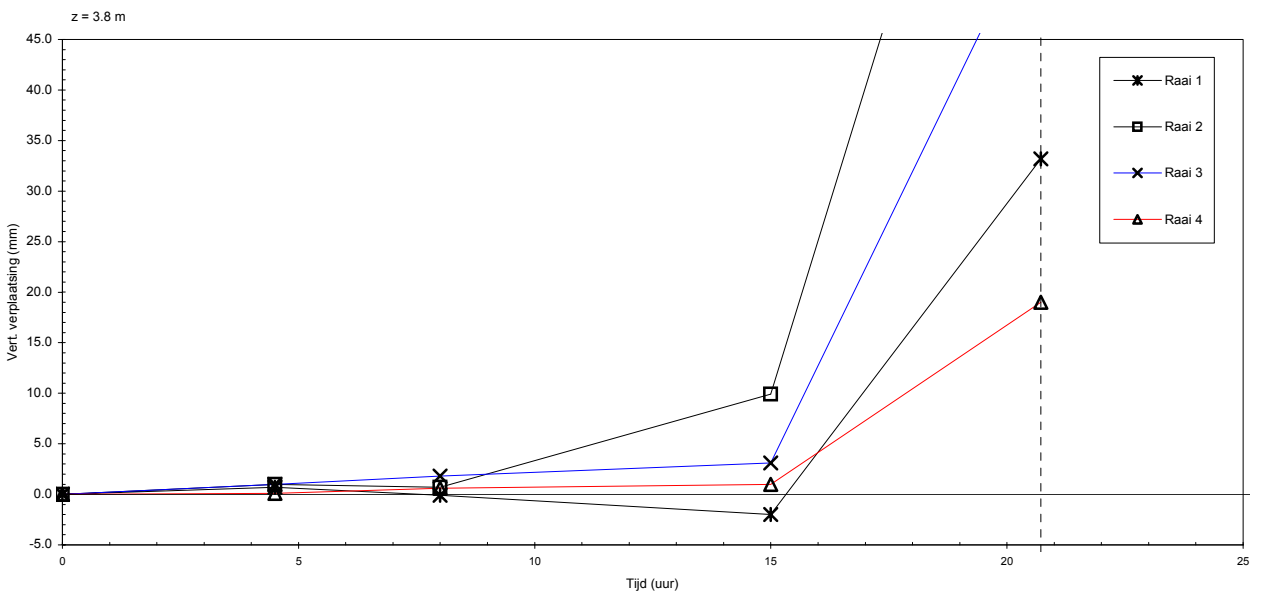
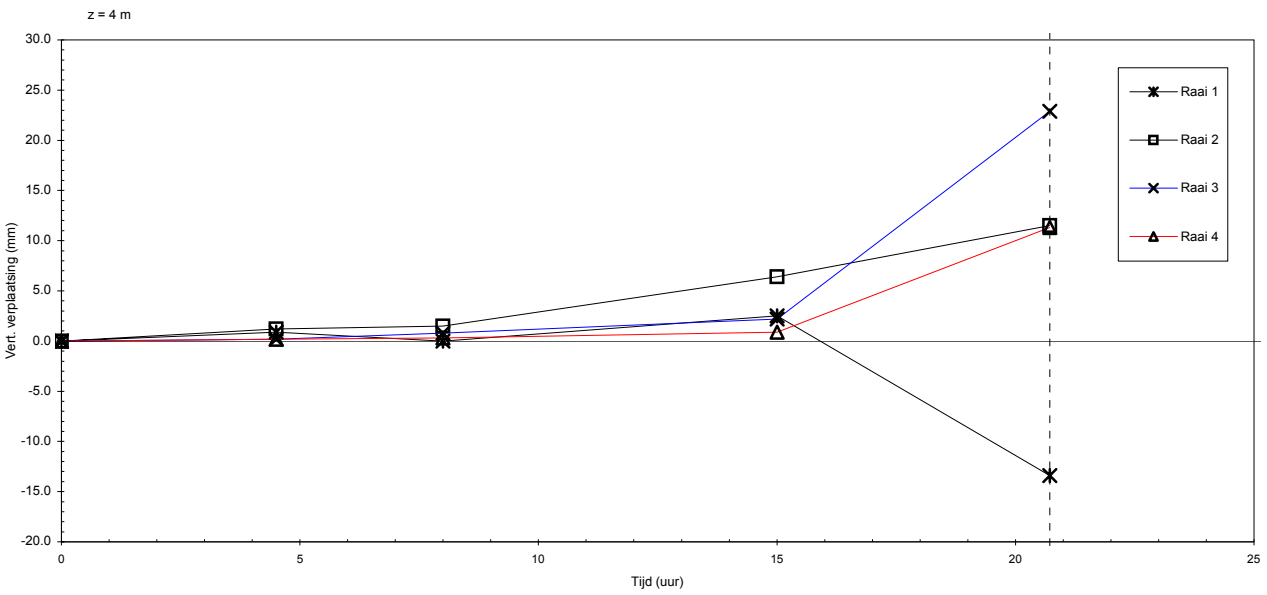
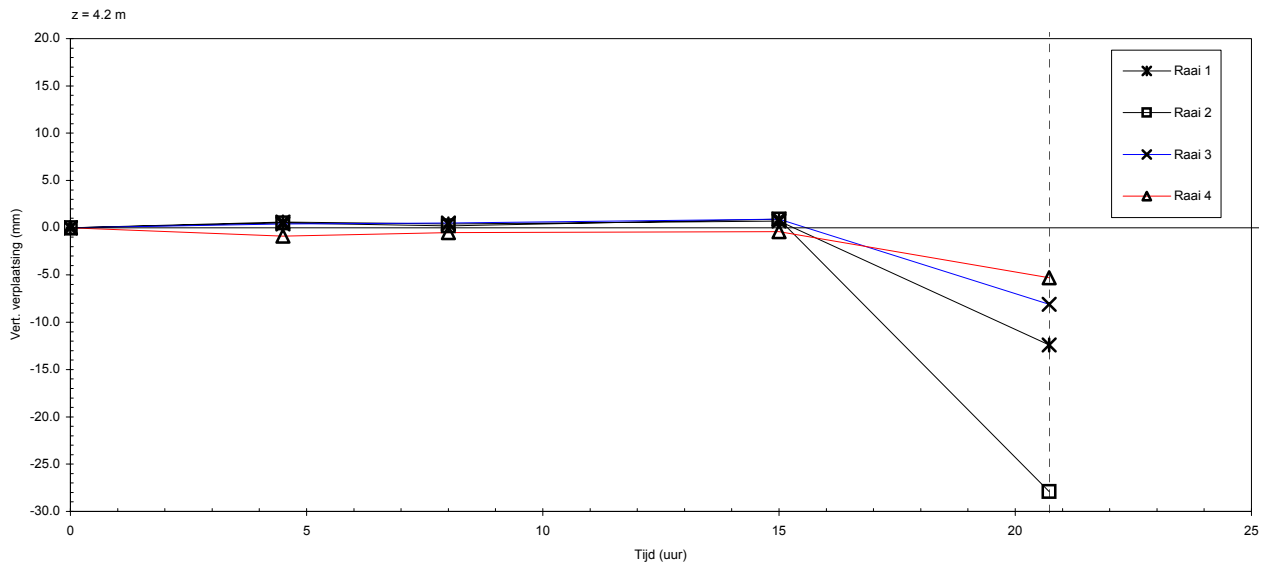
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E12



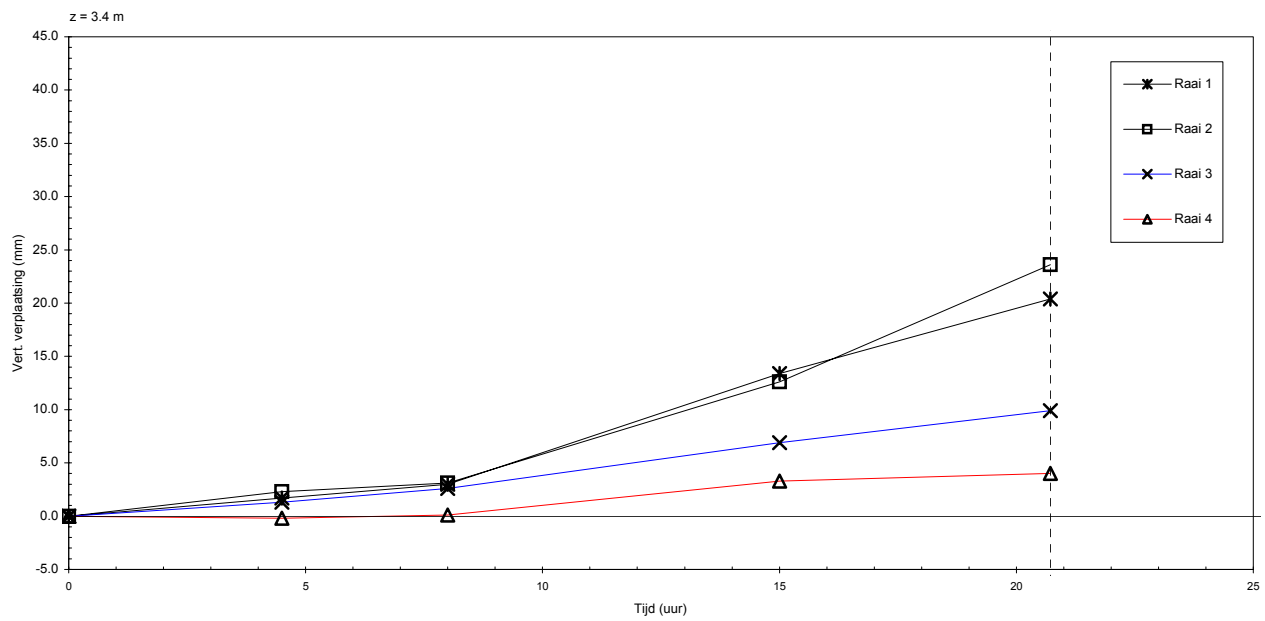
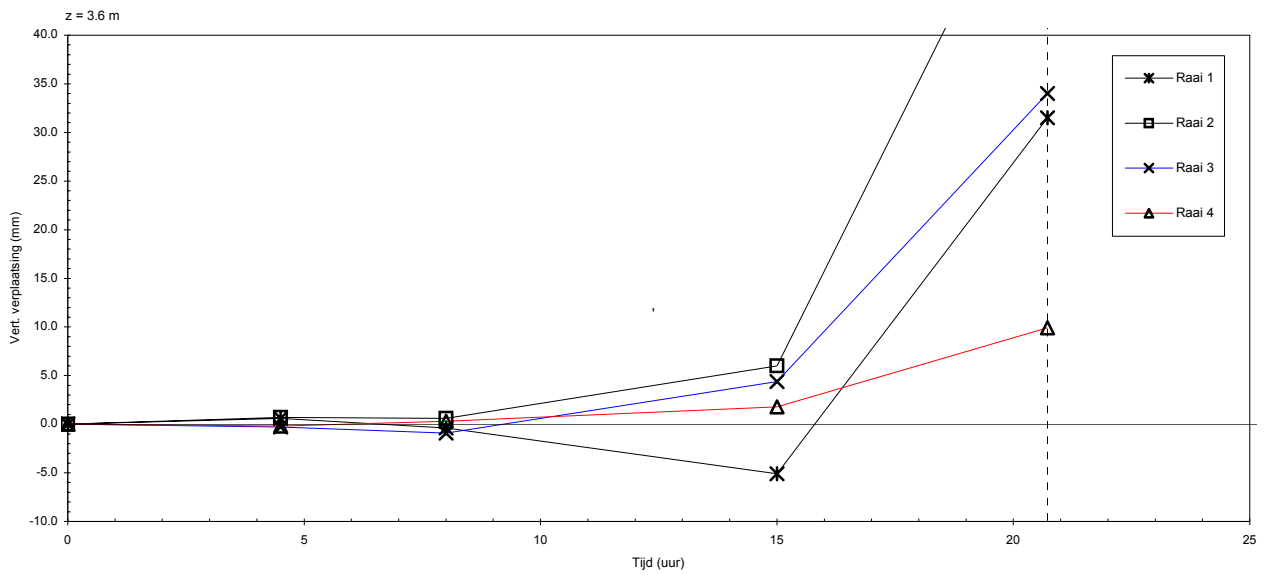
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E13



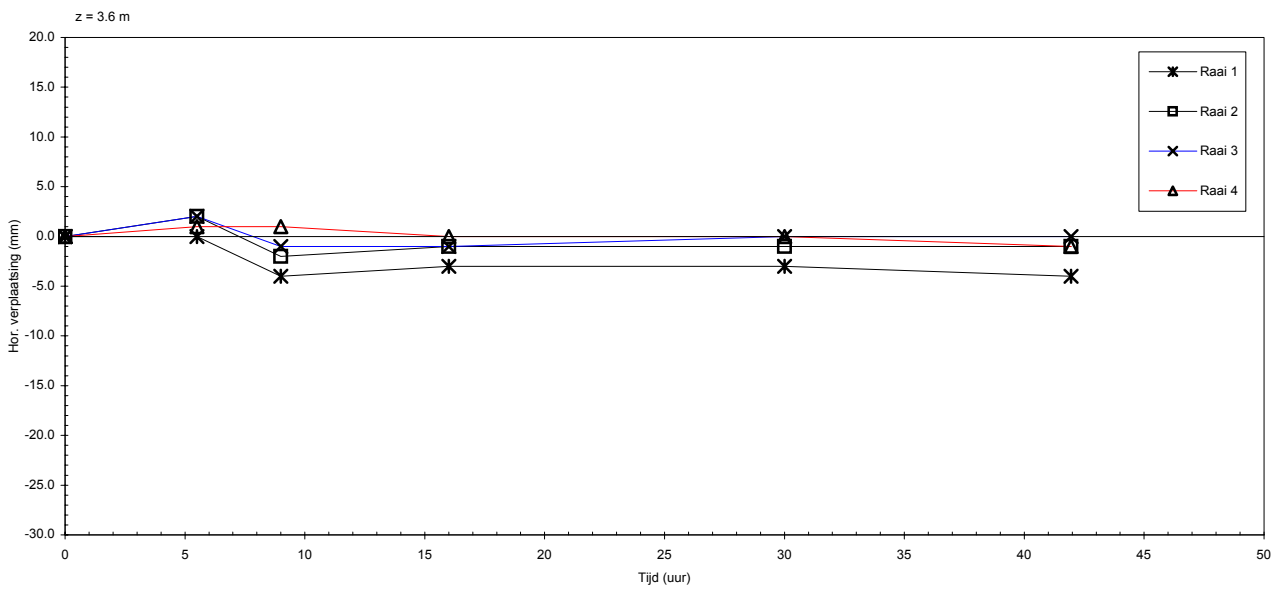
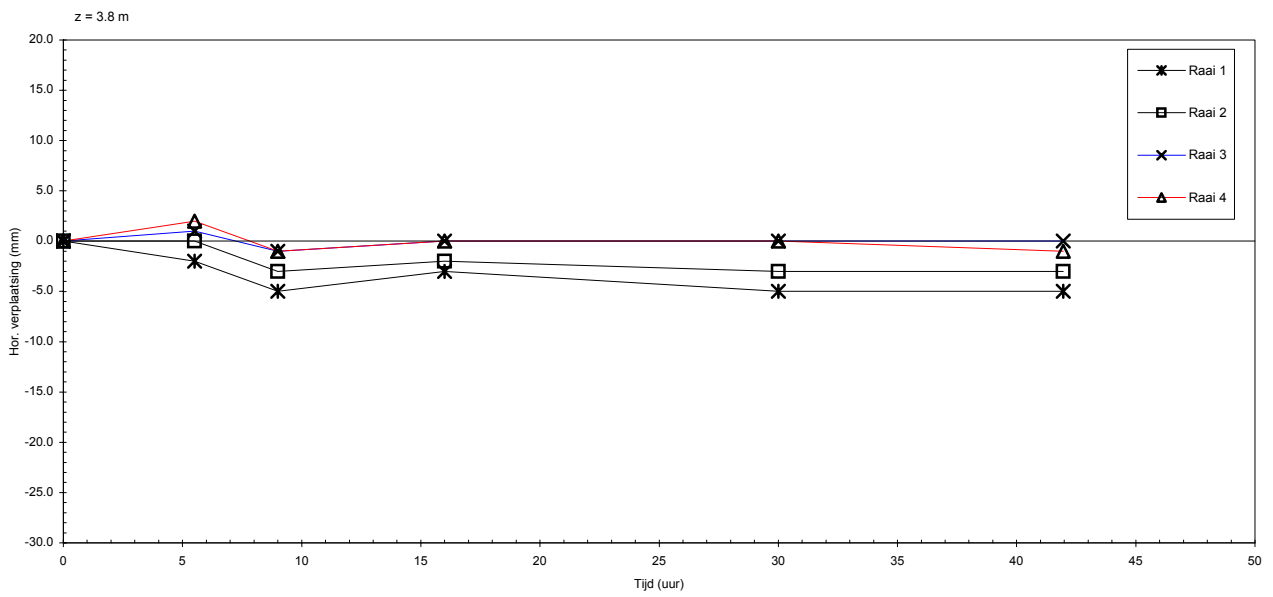
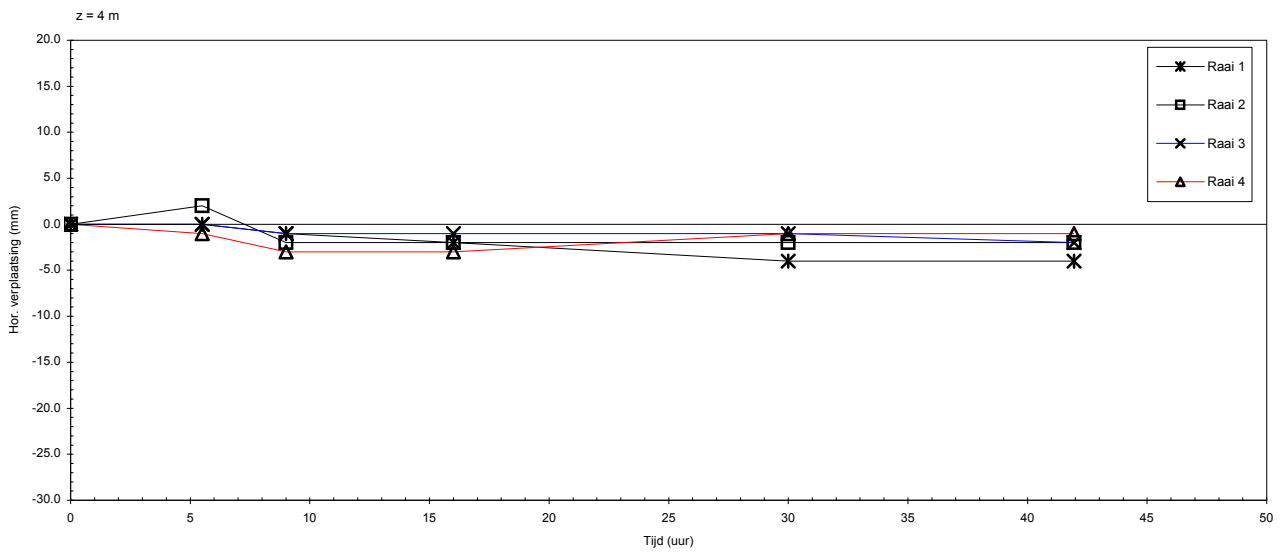
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten verticale verplaatsing

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

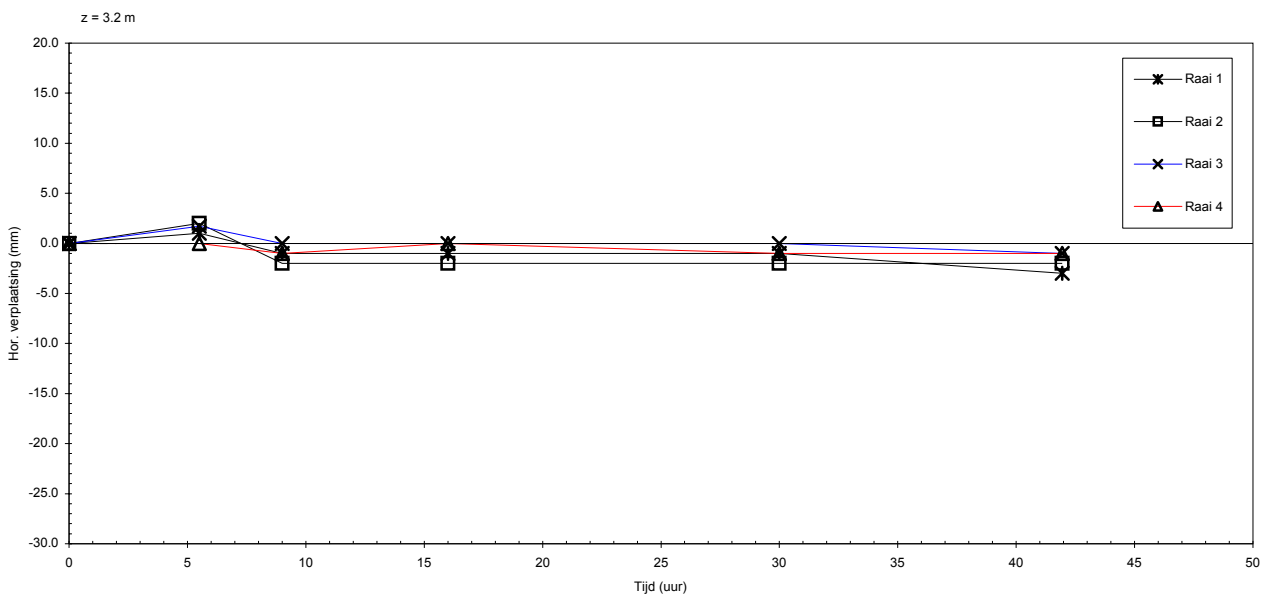
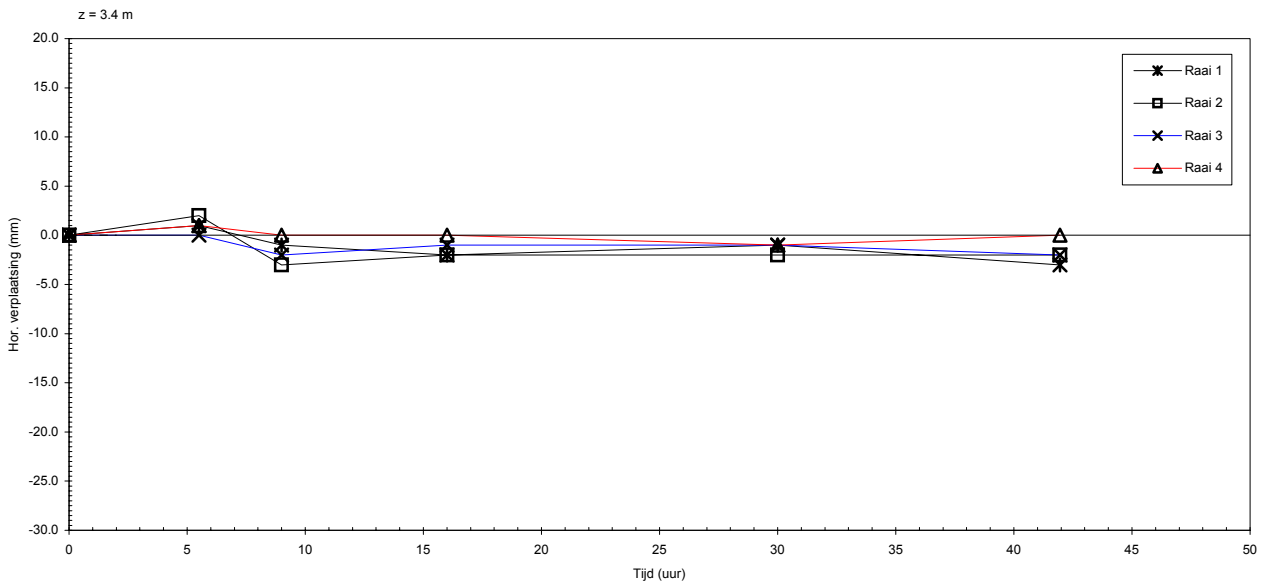
H4475

FIG. E14



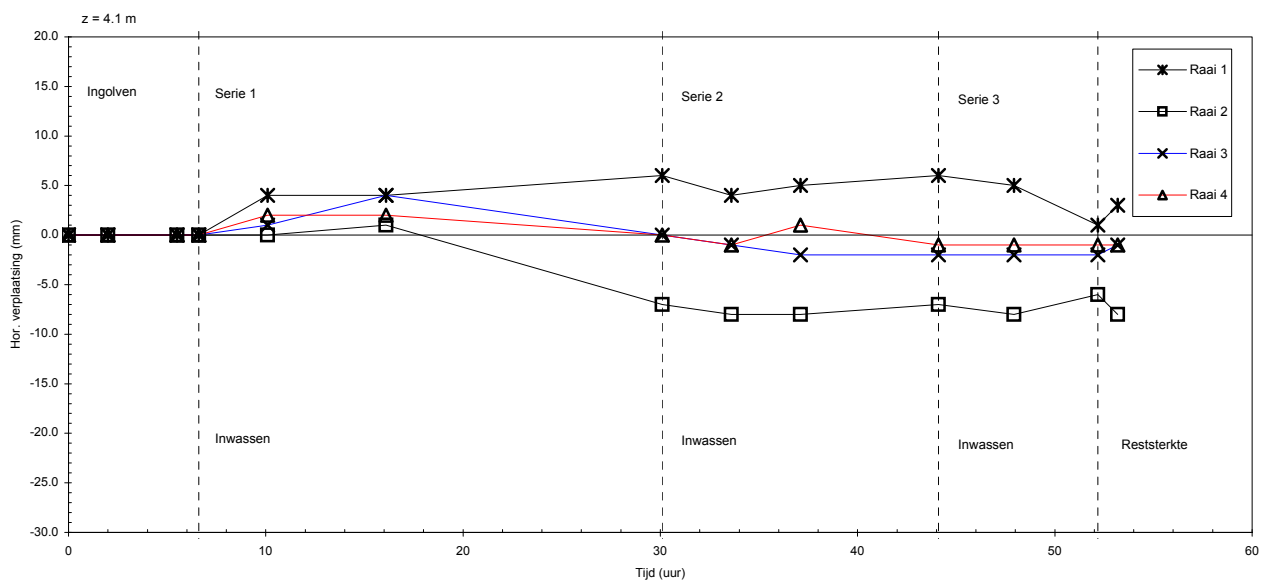
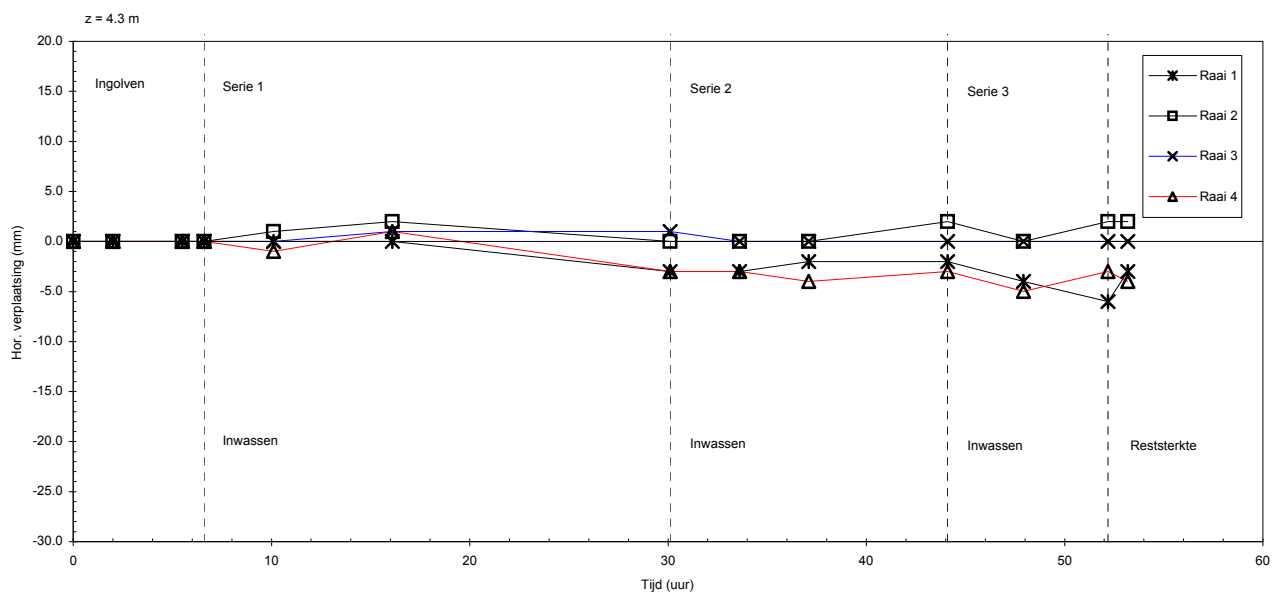
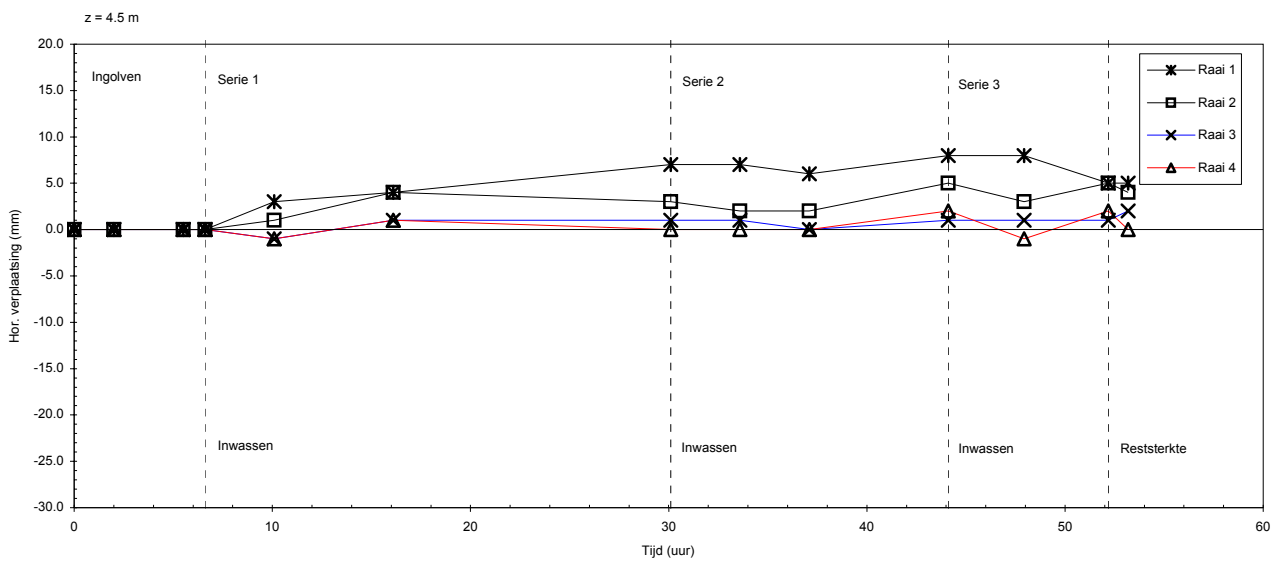
Langeduur proeven in de Deltagoot; Gemeten horizontale verplaatsing langs het talud (gemeten vanaf P4201)

Basalton bekleding



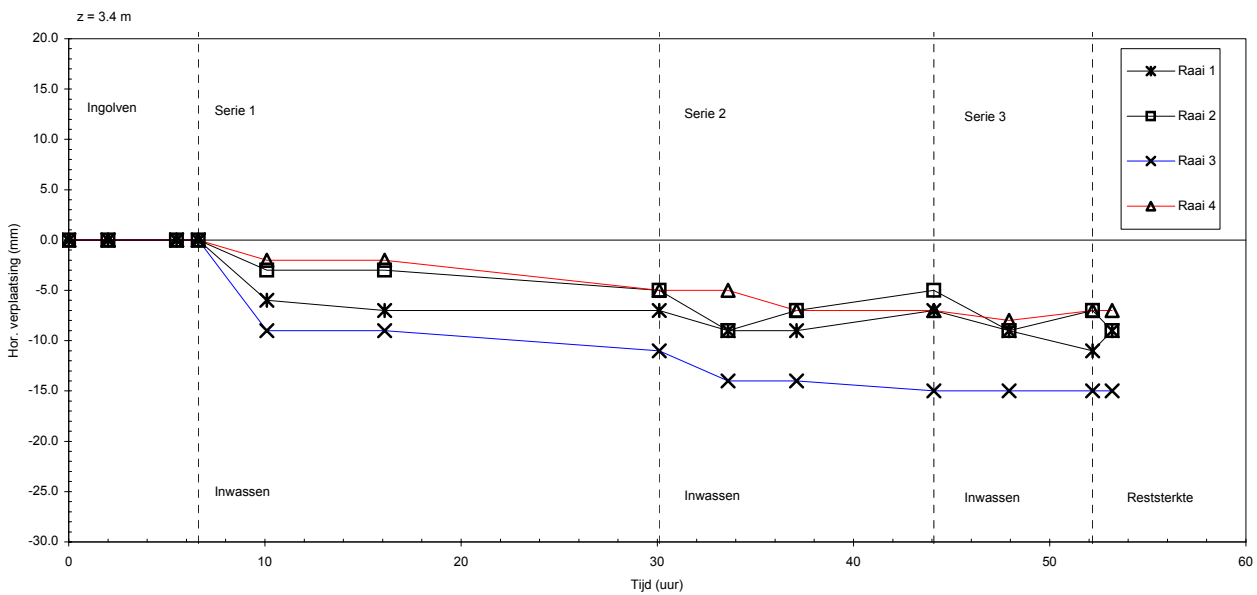
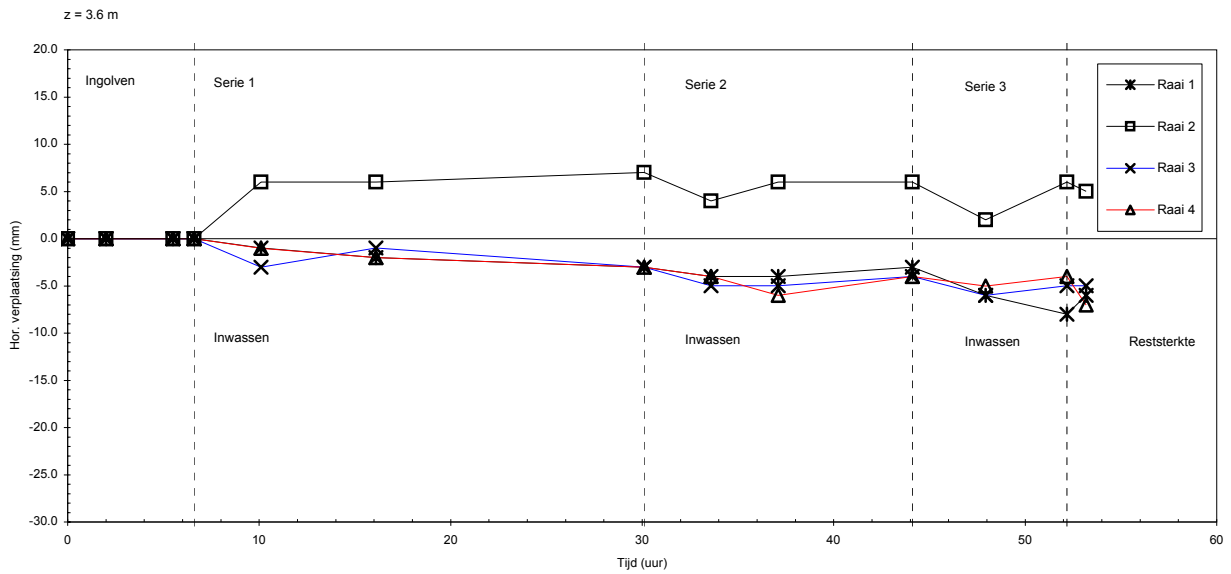
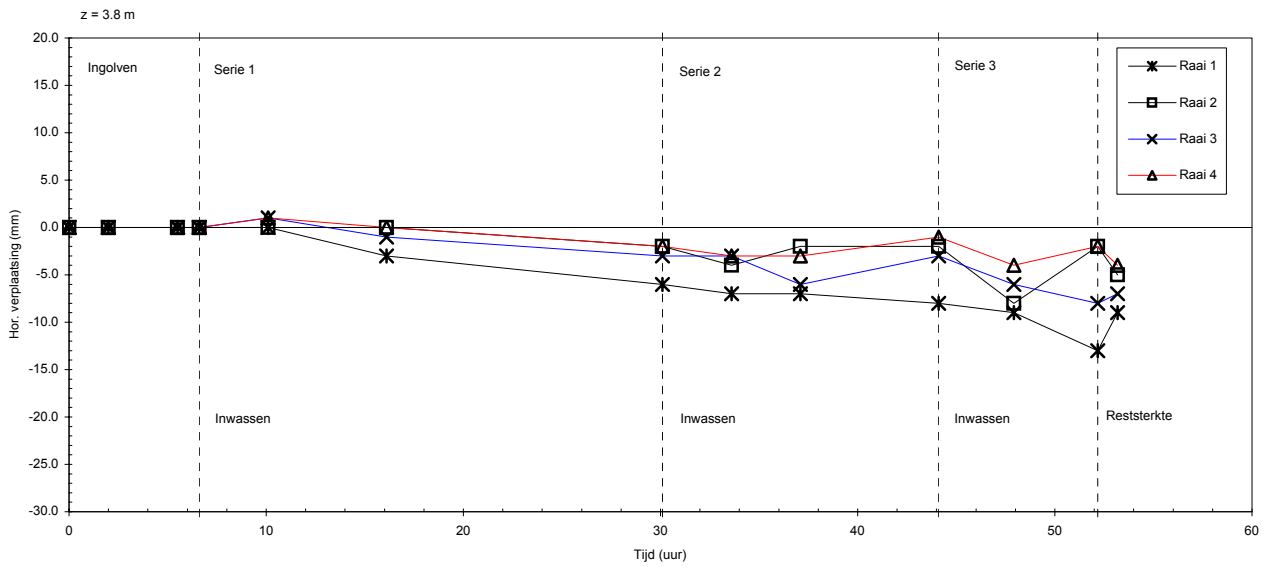
Langeduur proeven in de Deltagoot; Gemeten horizontale verplaatsing langs het talud (gemeten vanaf P4201)

Basalton bekleding



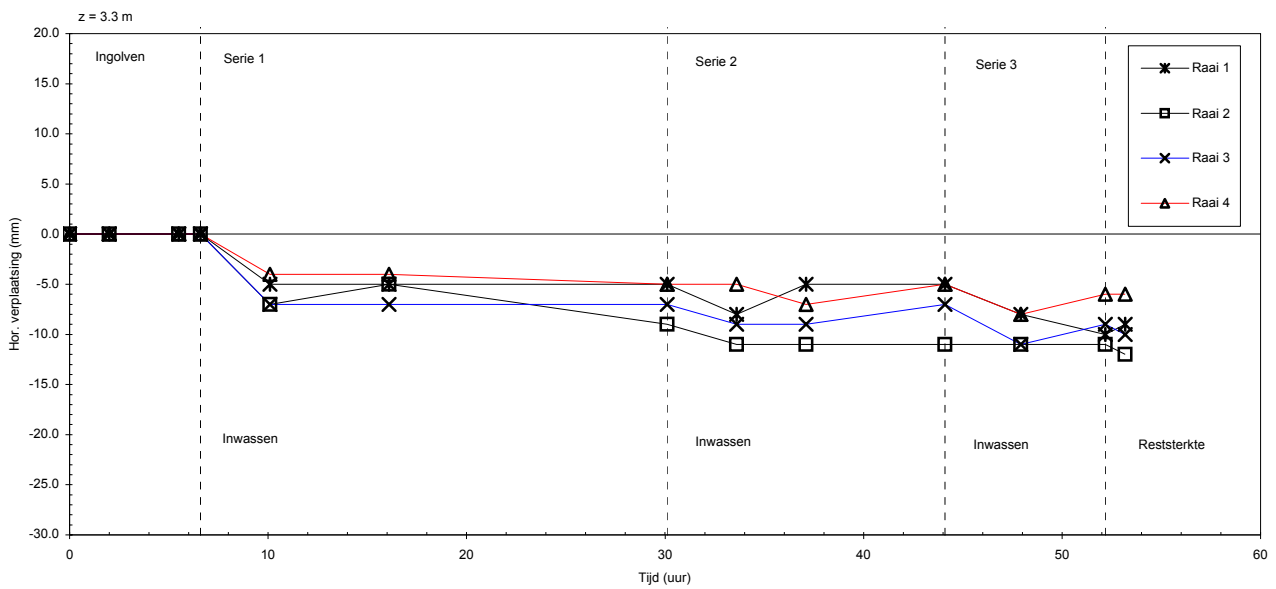
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten horizontale verplaatsing (langs talud)

Basalt bekleding



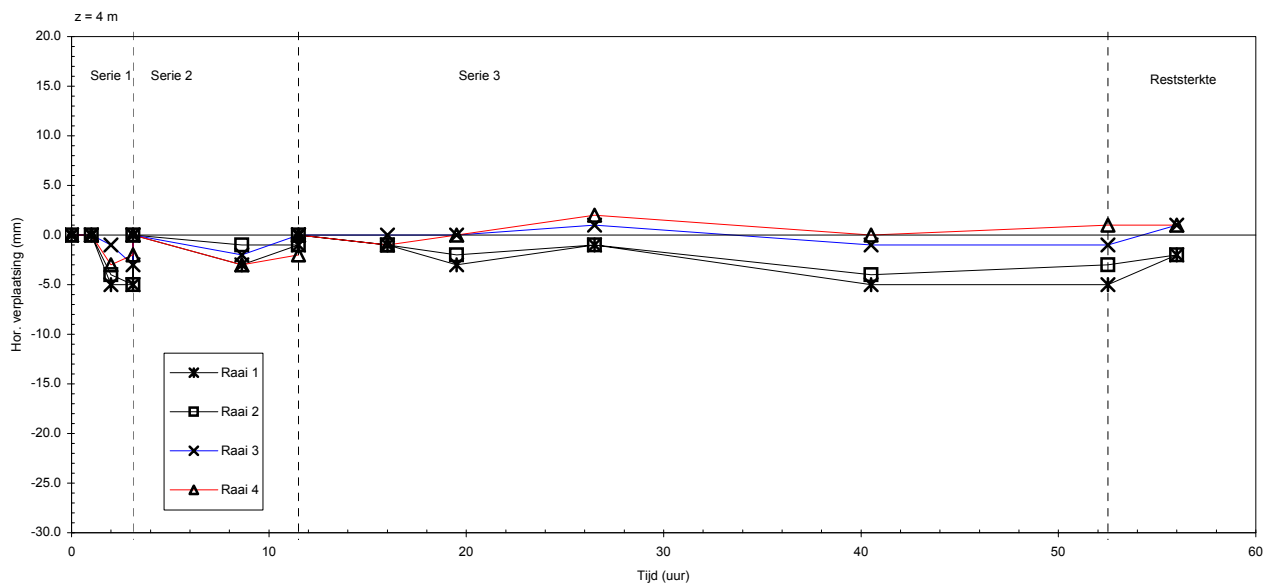
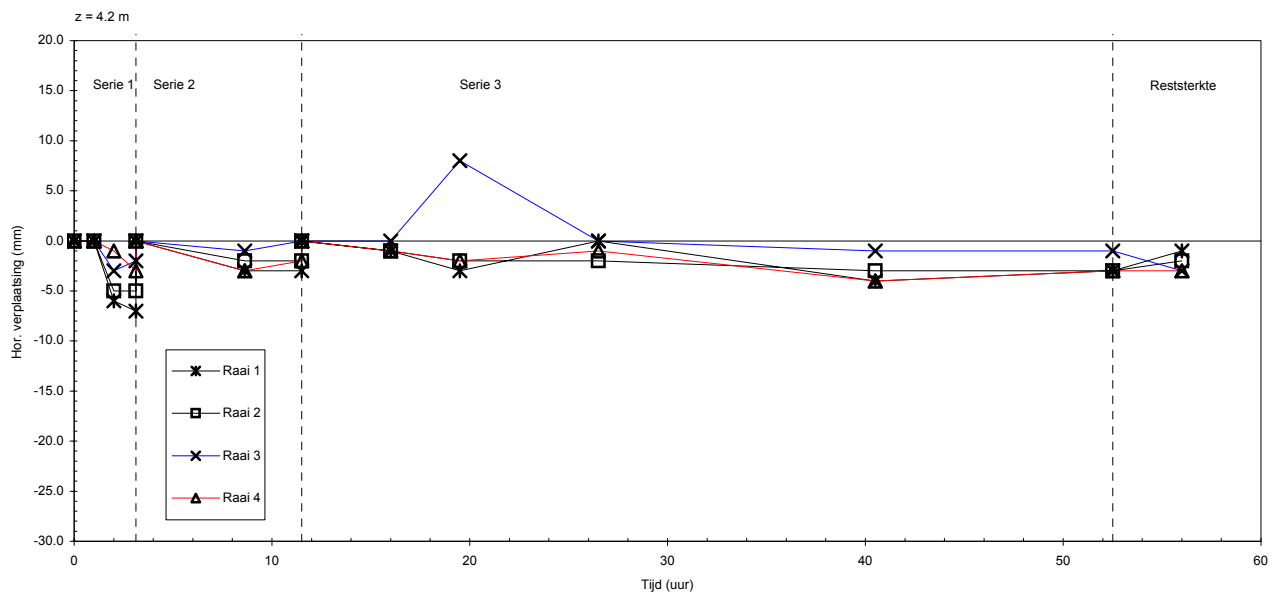
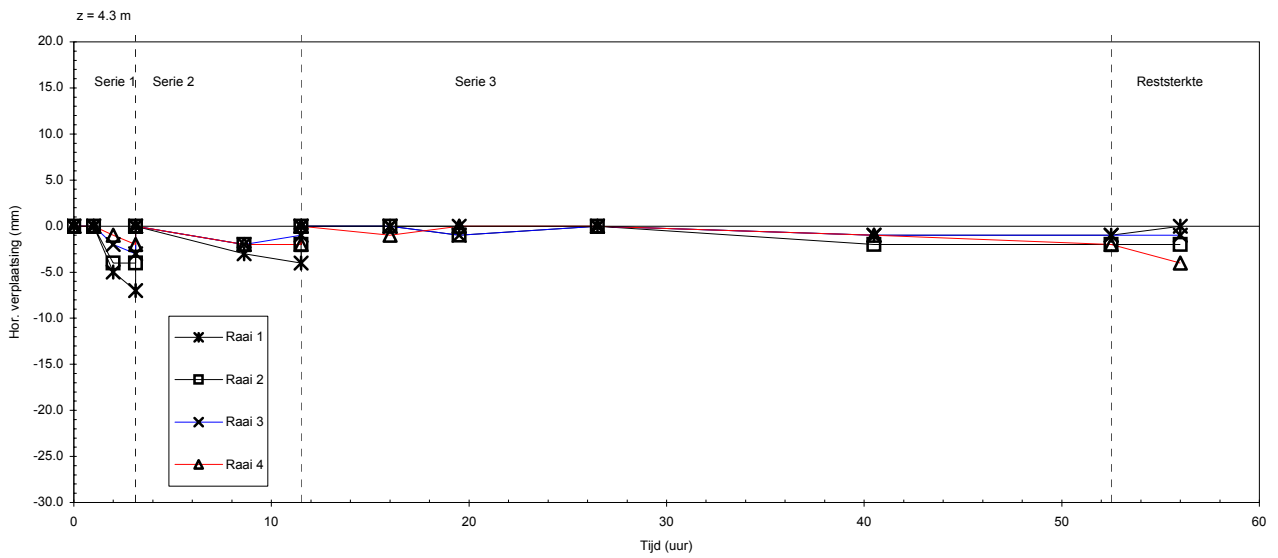
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten horizontale verplaatsing (langs talud)

Basalt bekleding



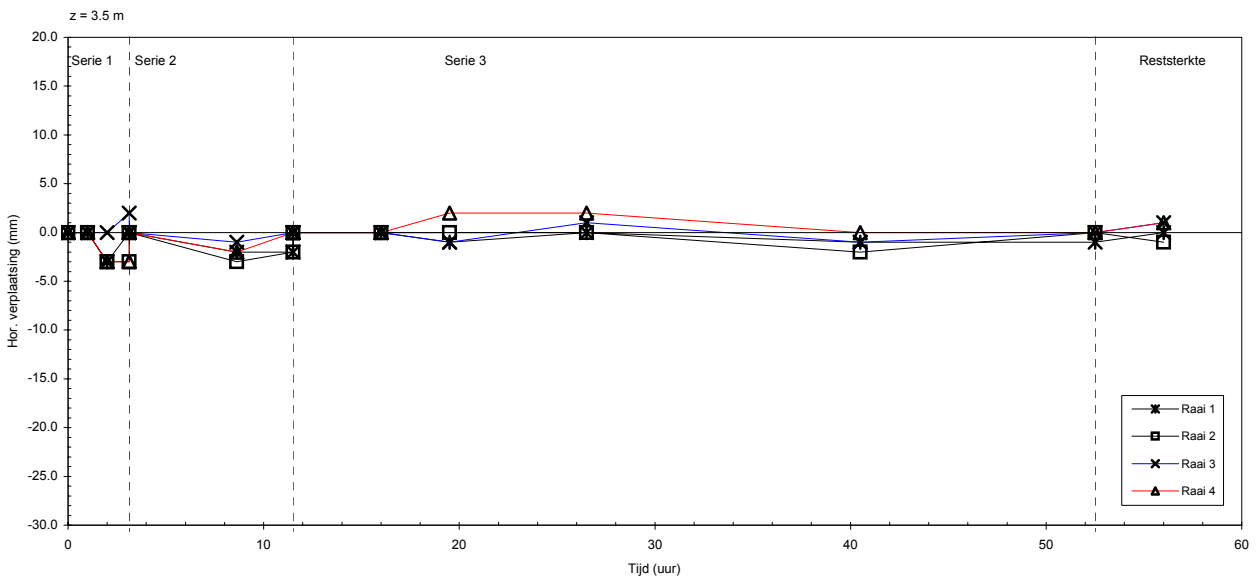
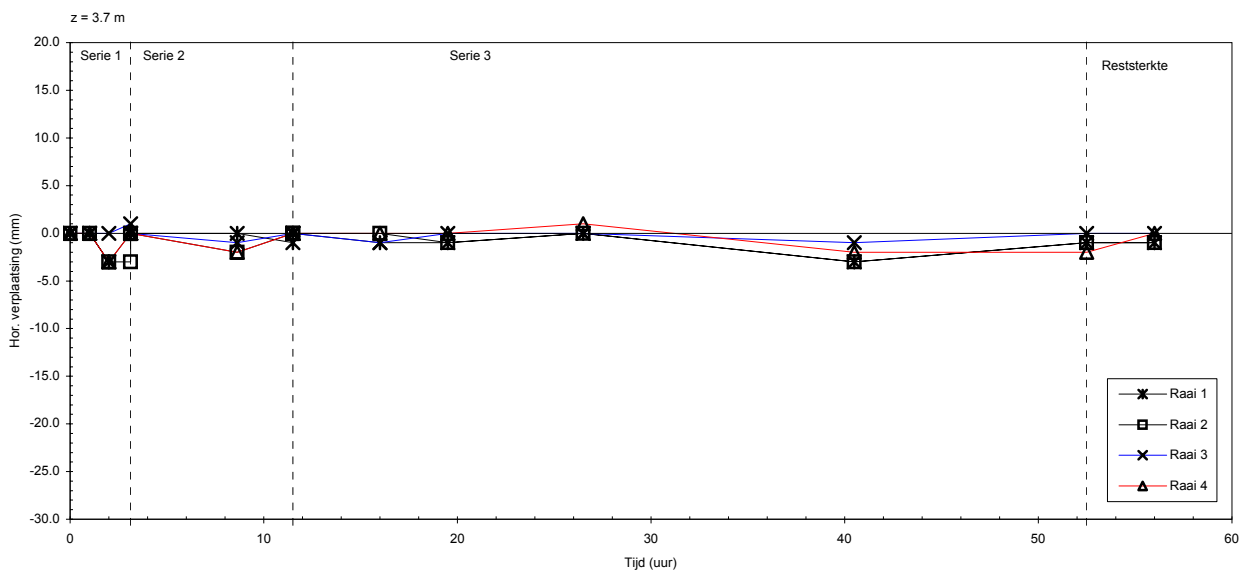
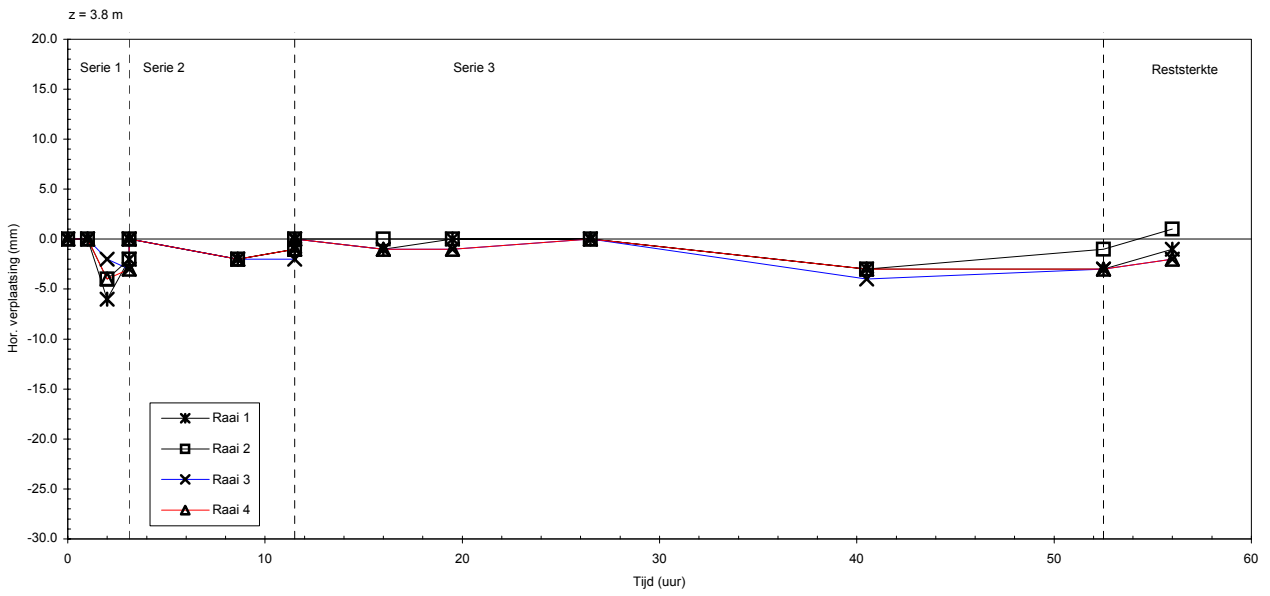
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (langs talud)

Basalt bekleding



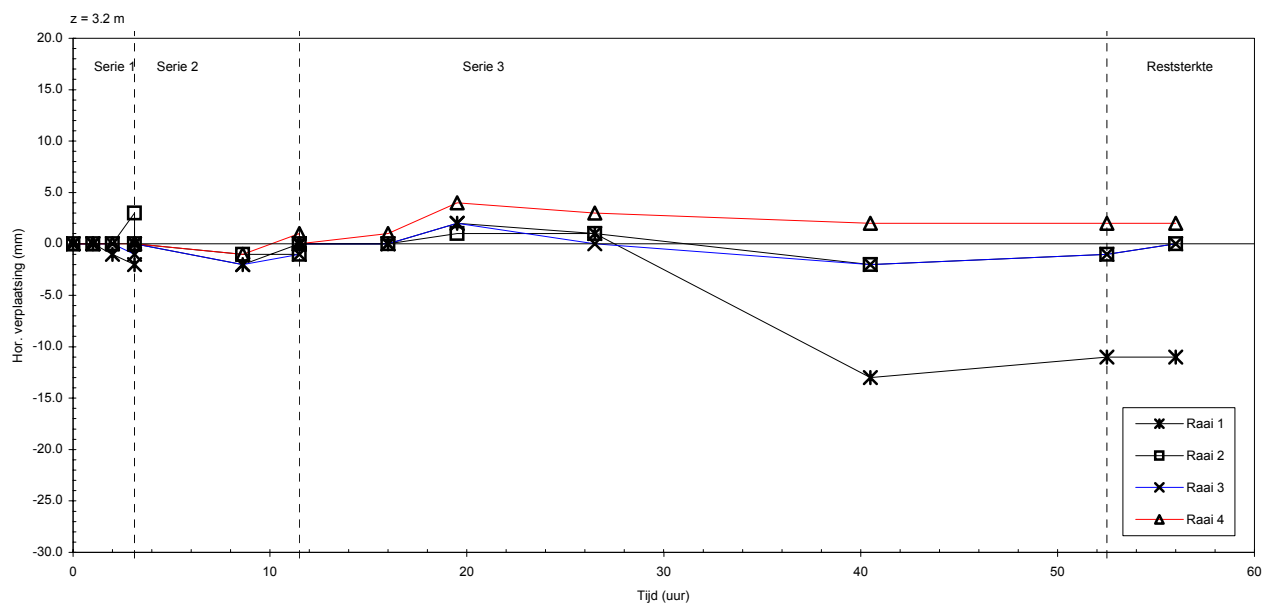
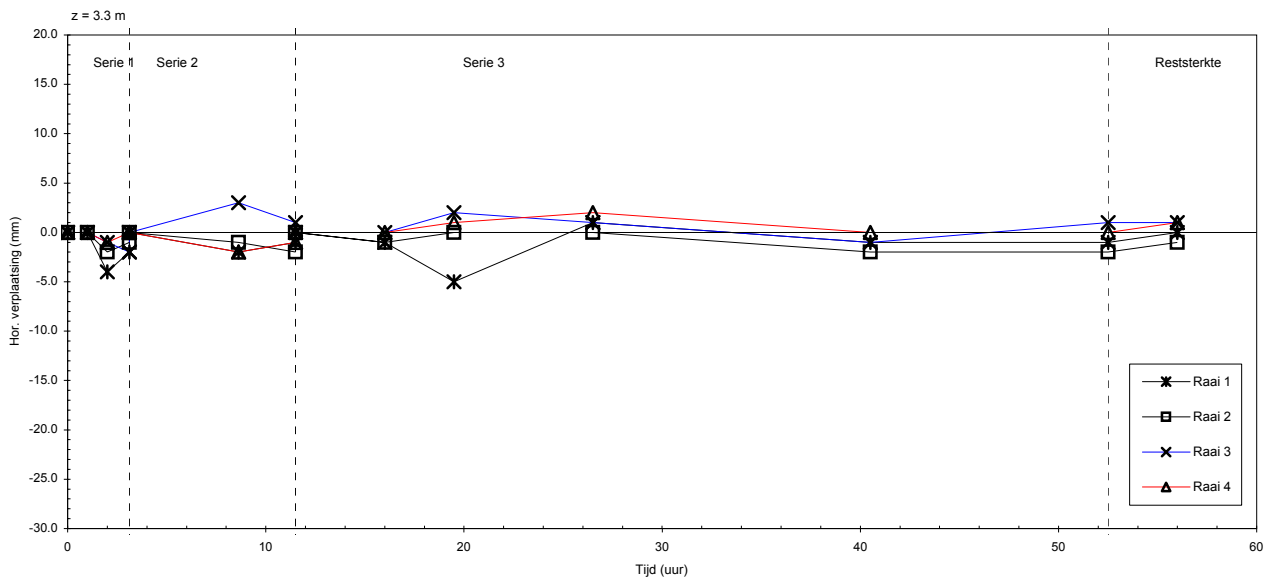
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Blokken op kant



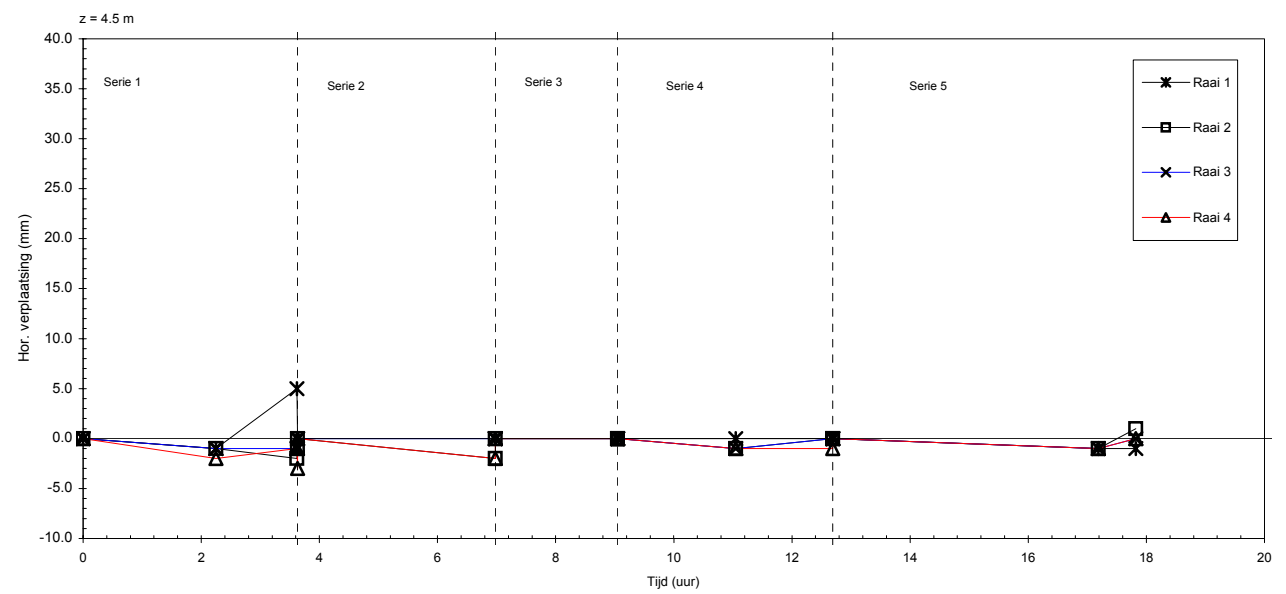
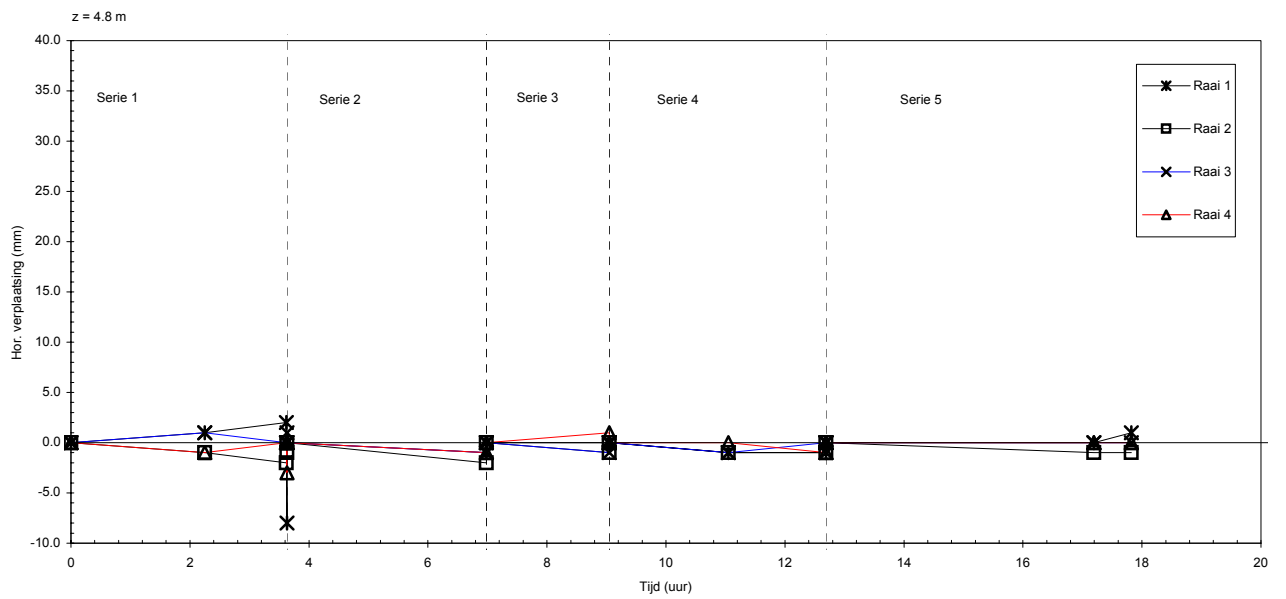
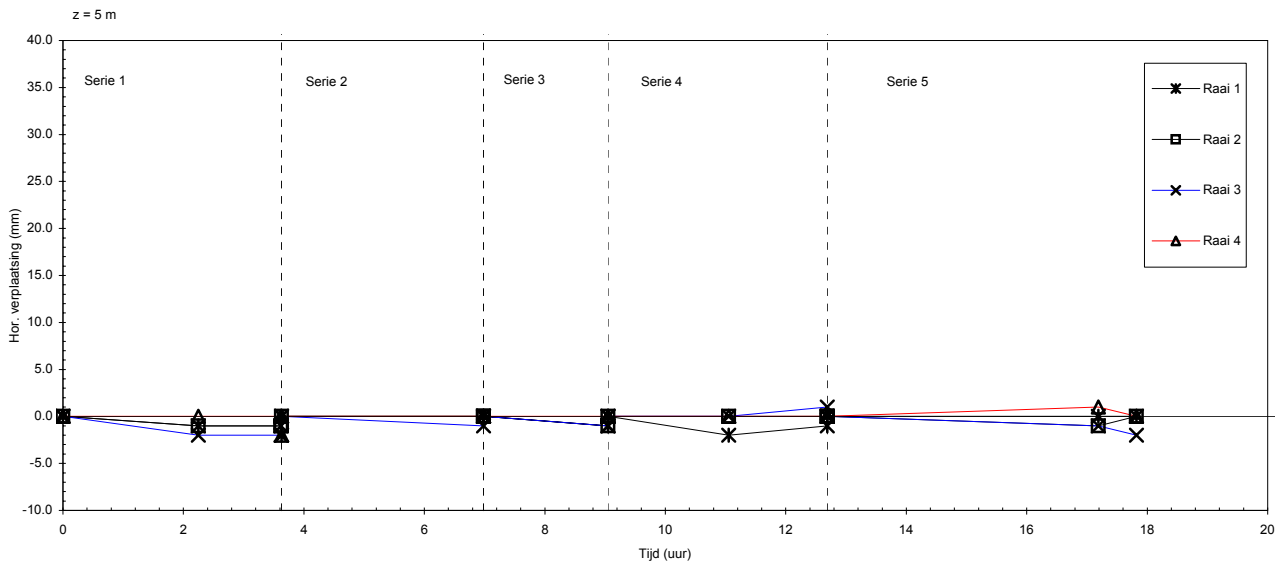
Langeduur proeven in de Deltagoot
Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Blokken op kant



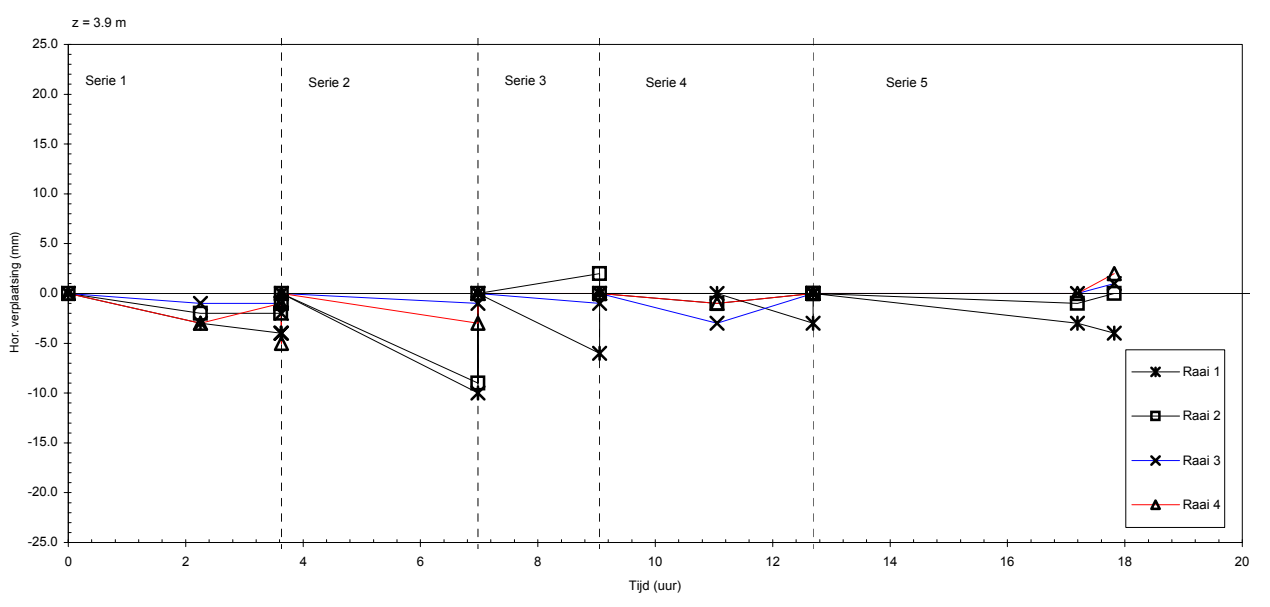
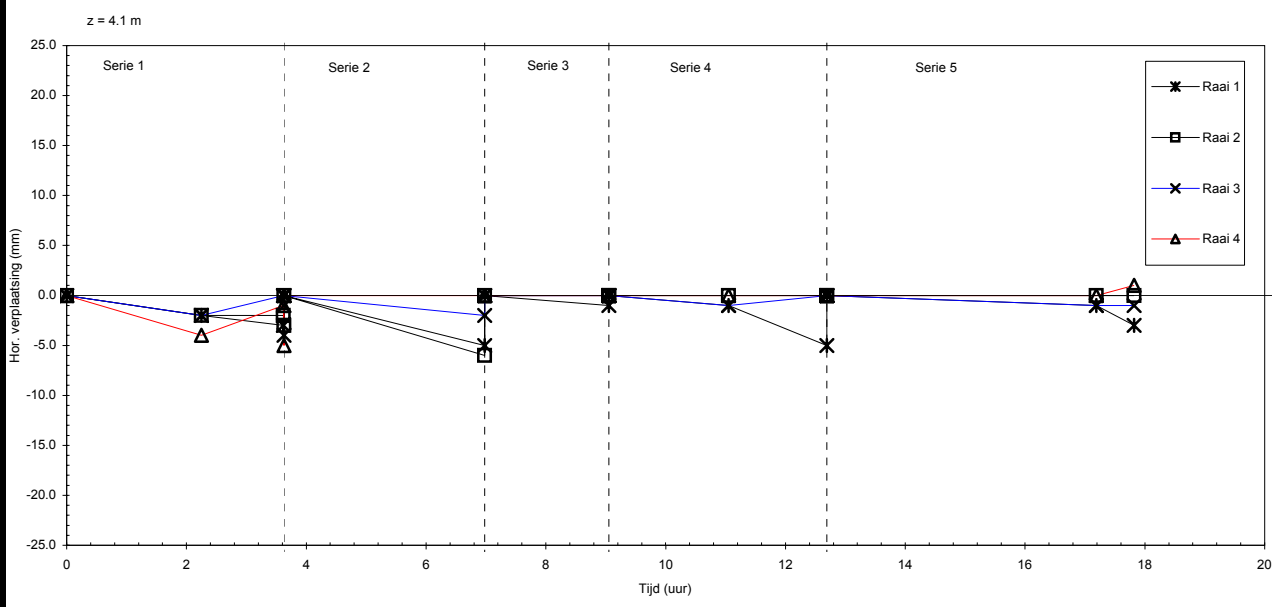
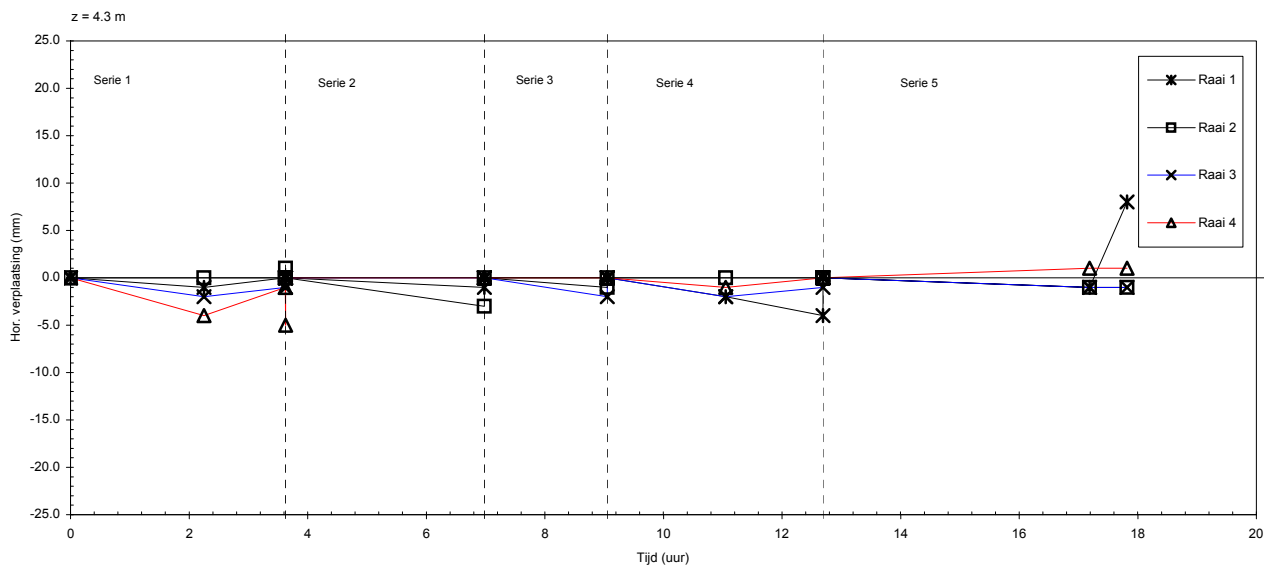
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Blokken op kant



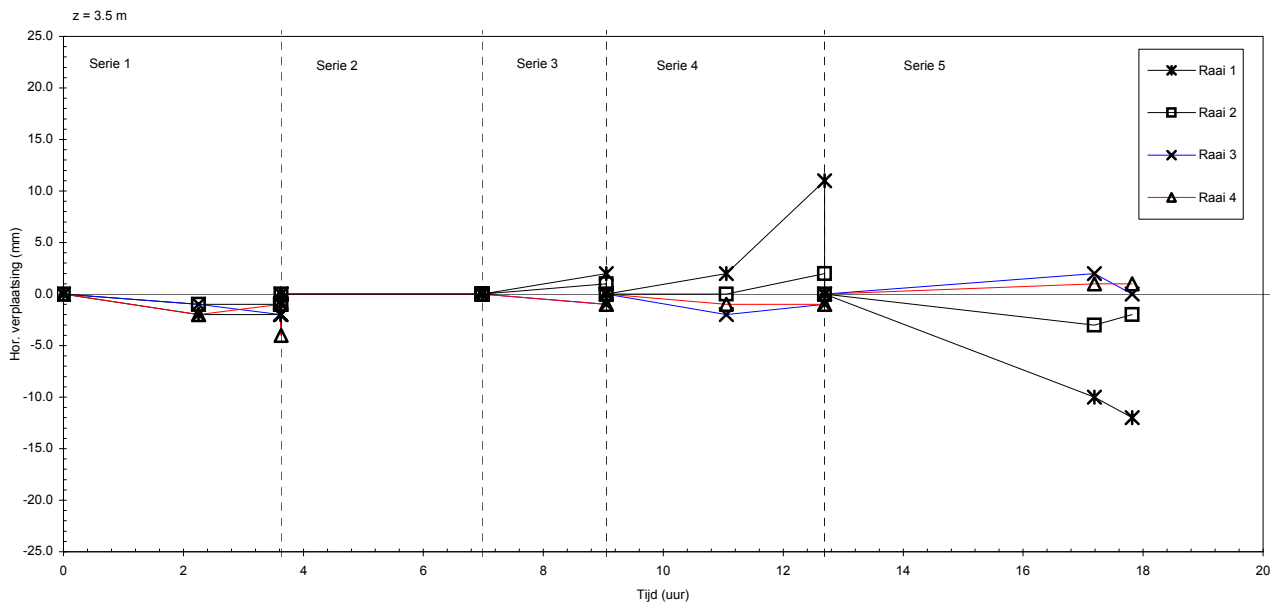
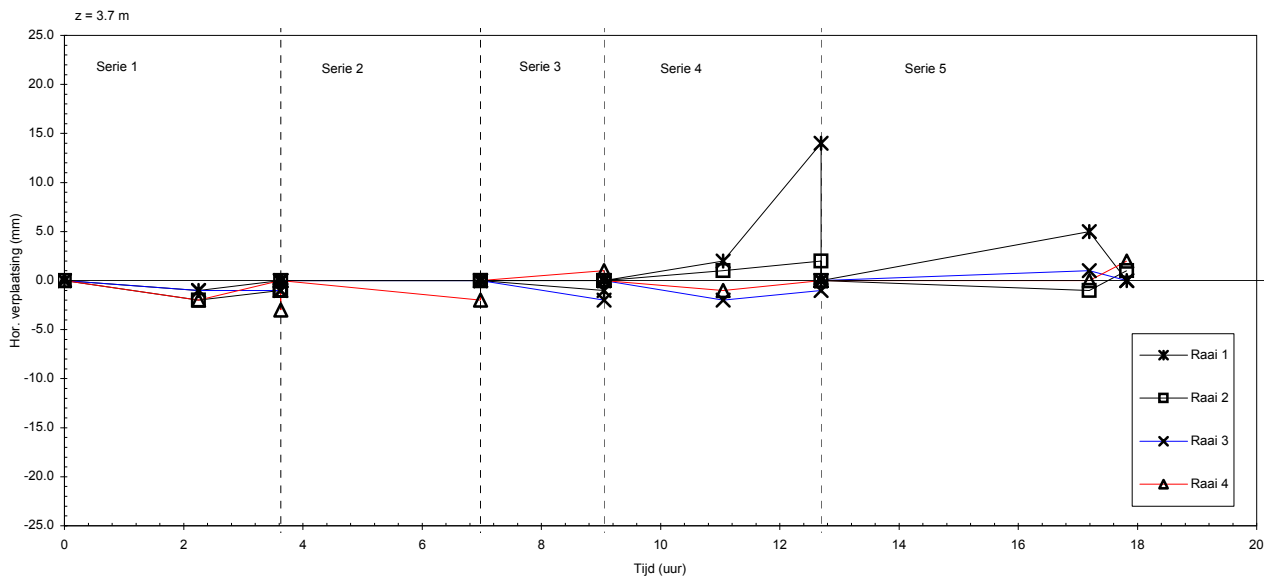
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,15 m)



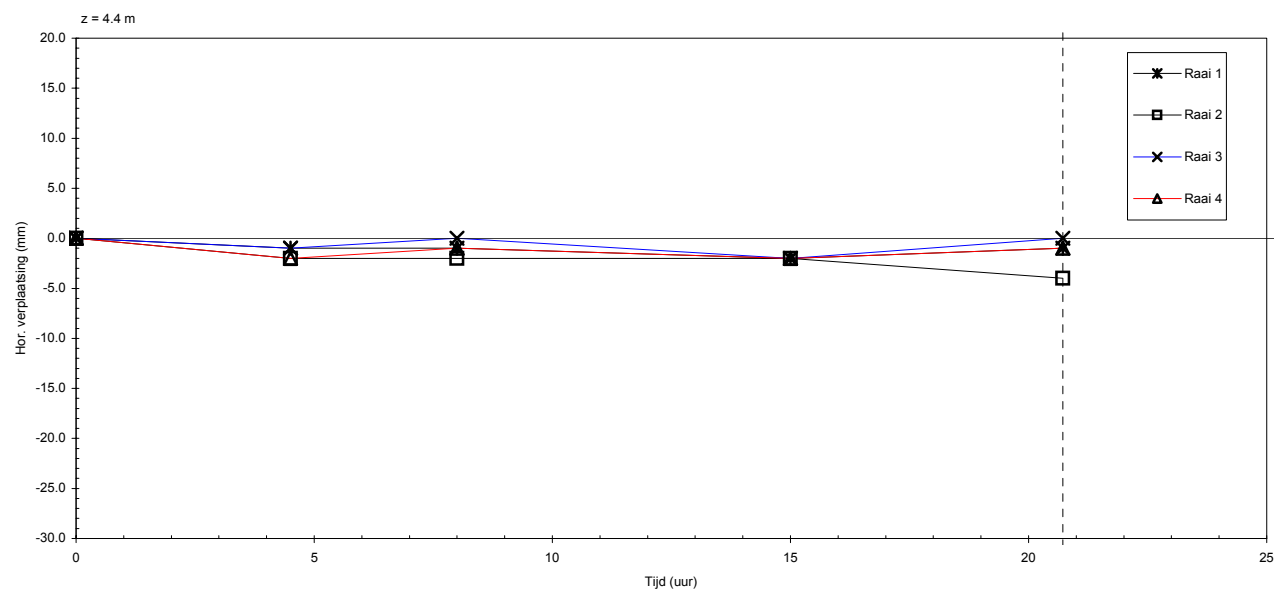
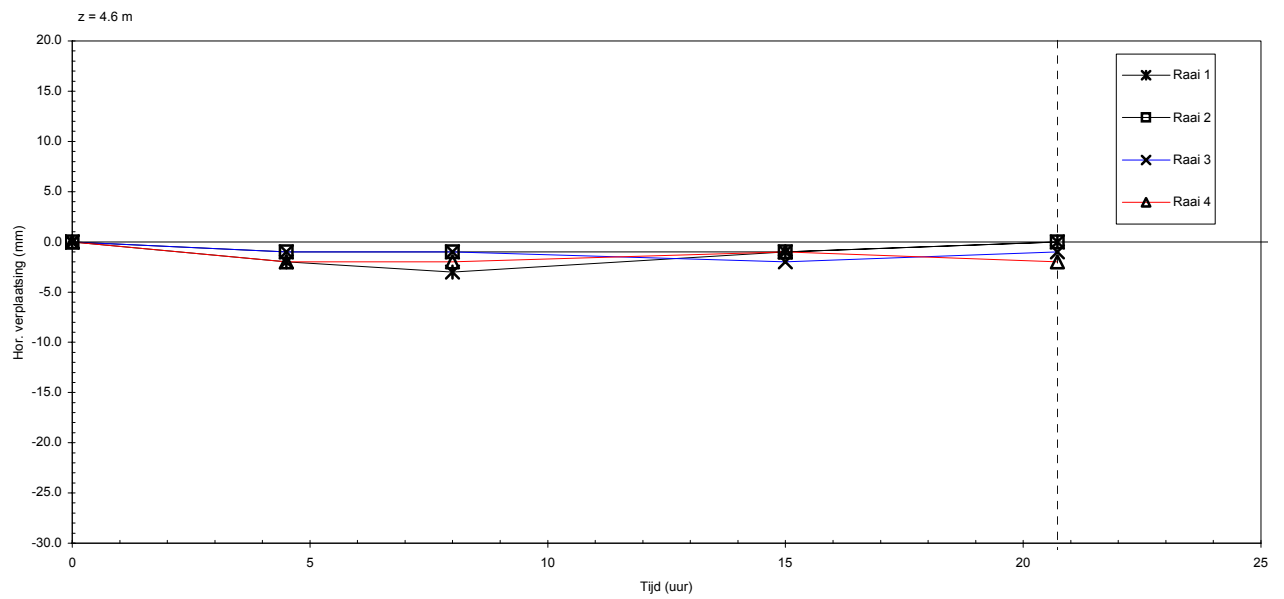
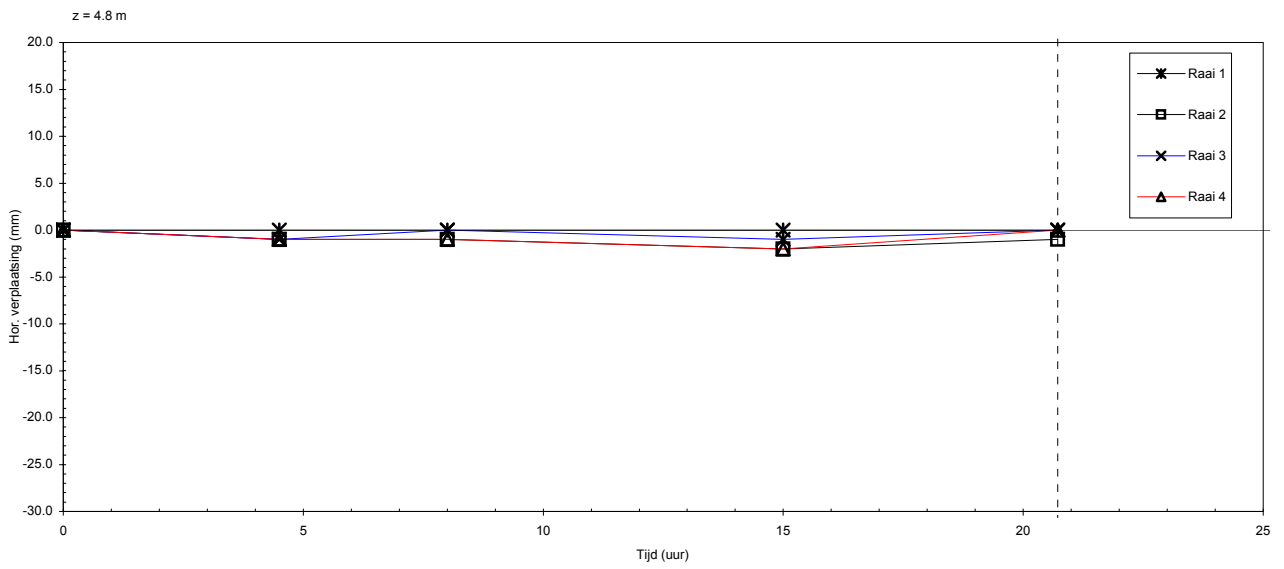
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,15 m)



Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,15 m)



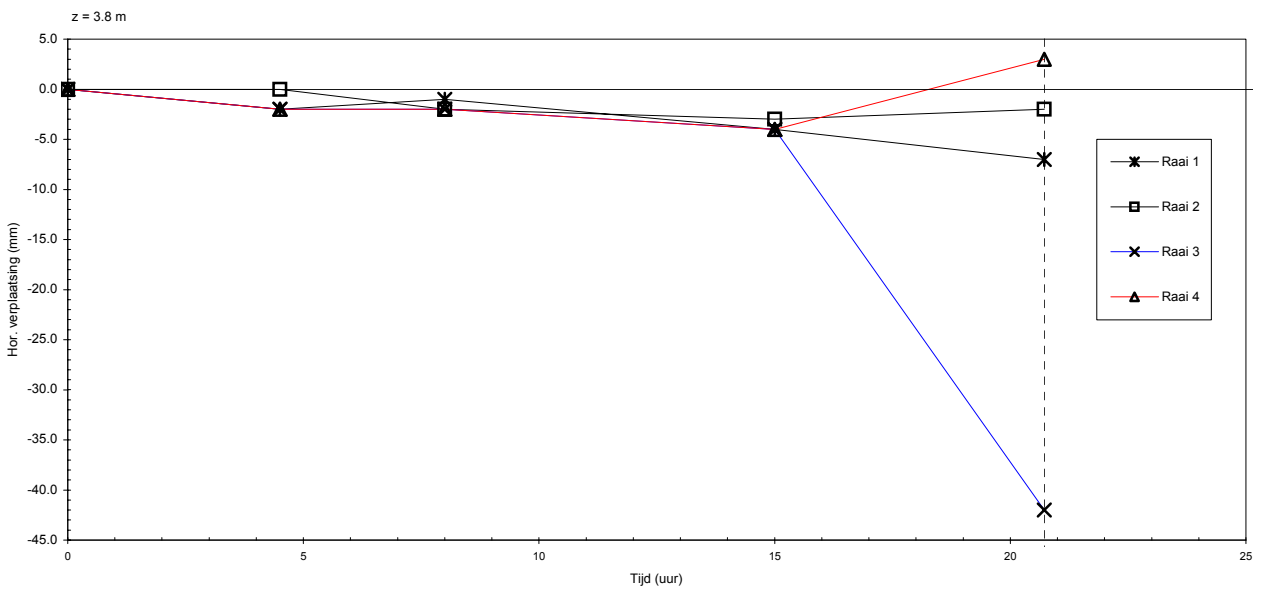
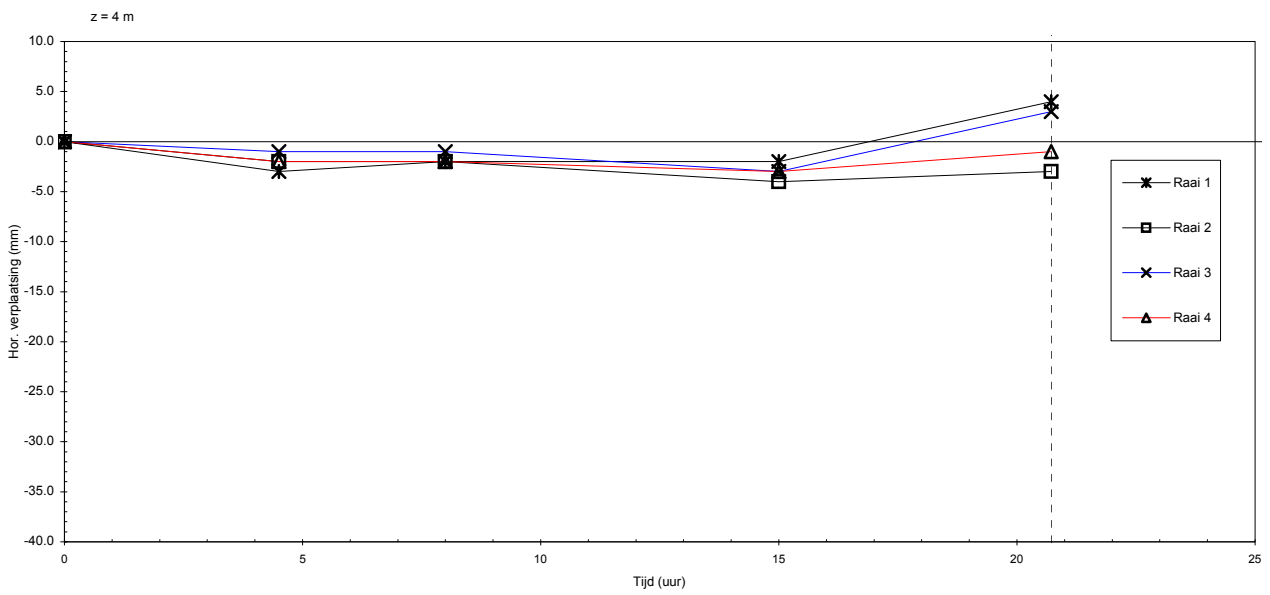
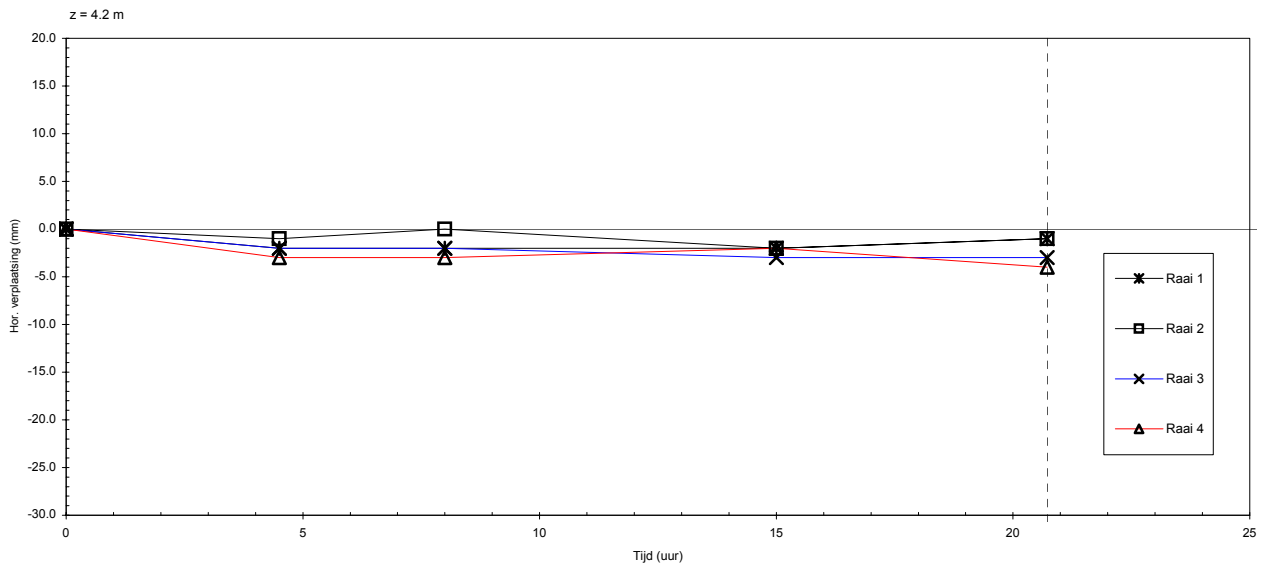
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E26



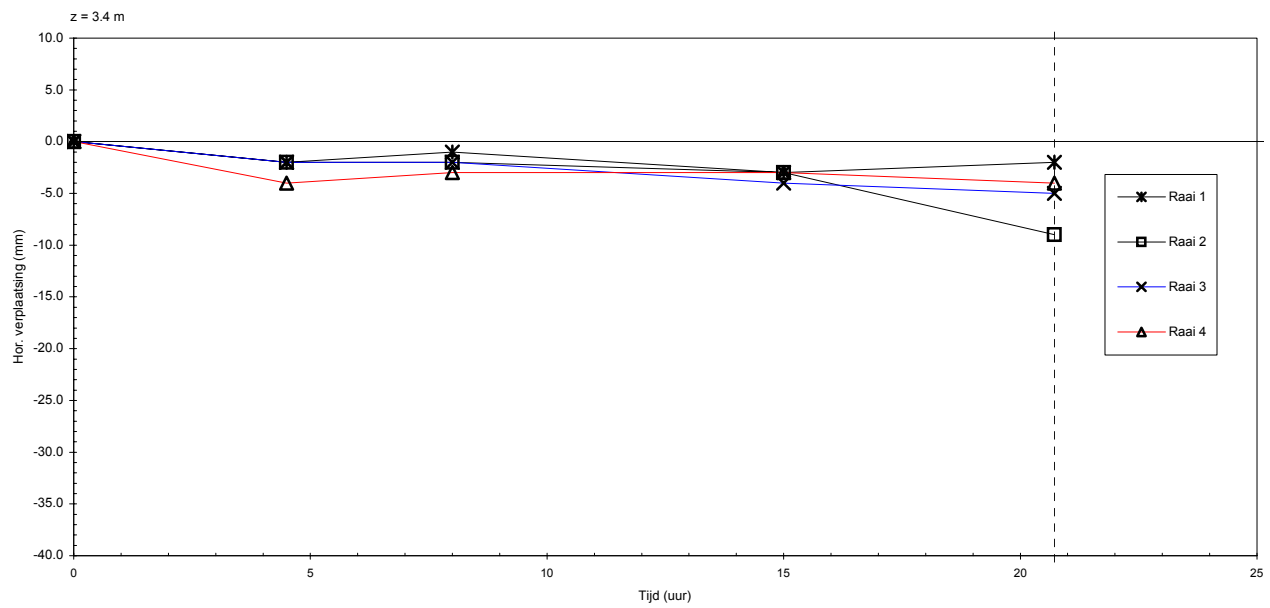
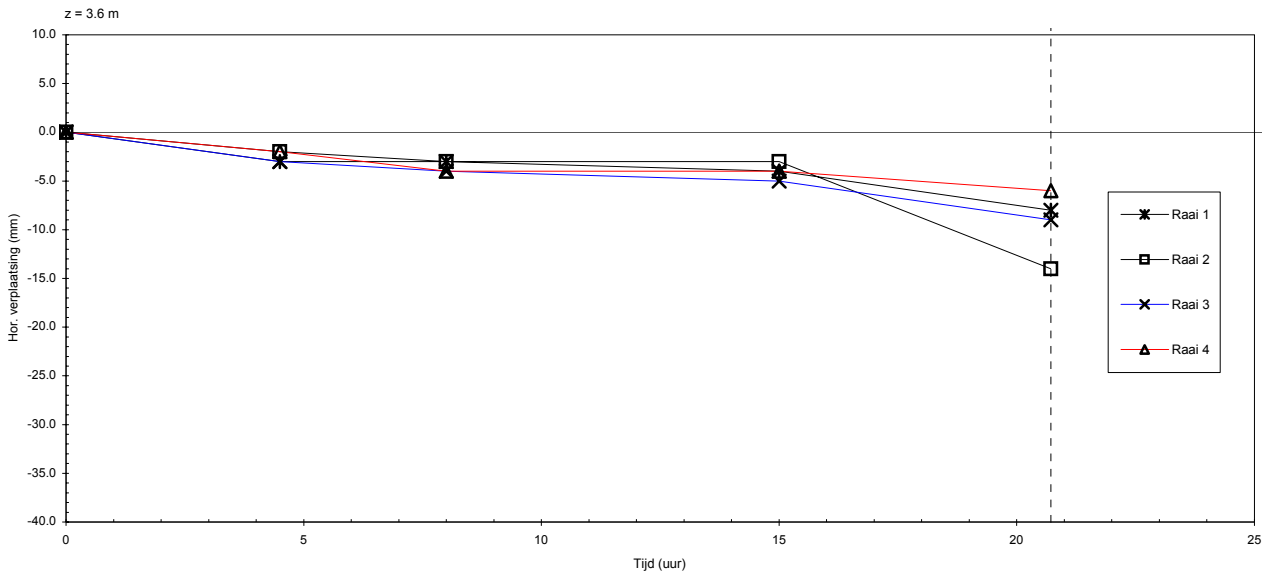
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

FIG. E27



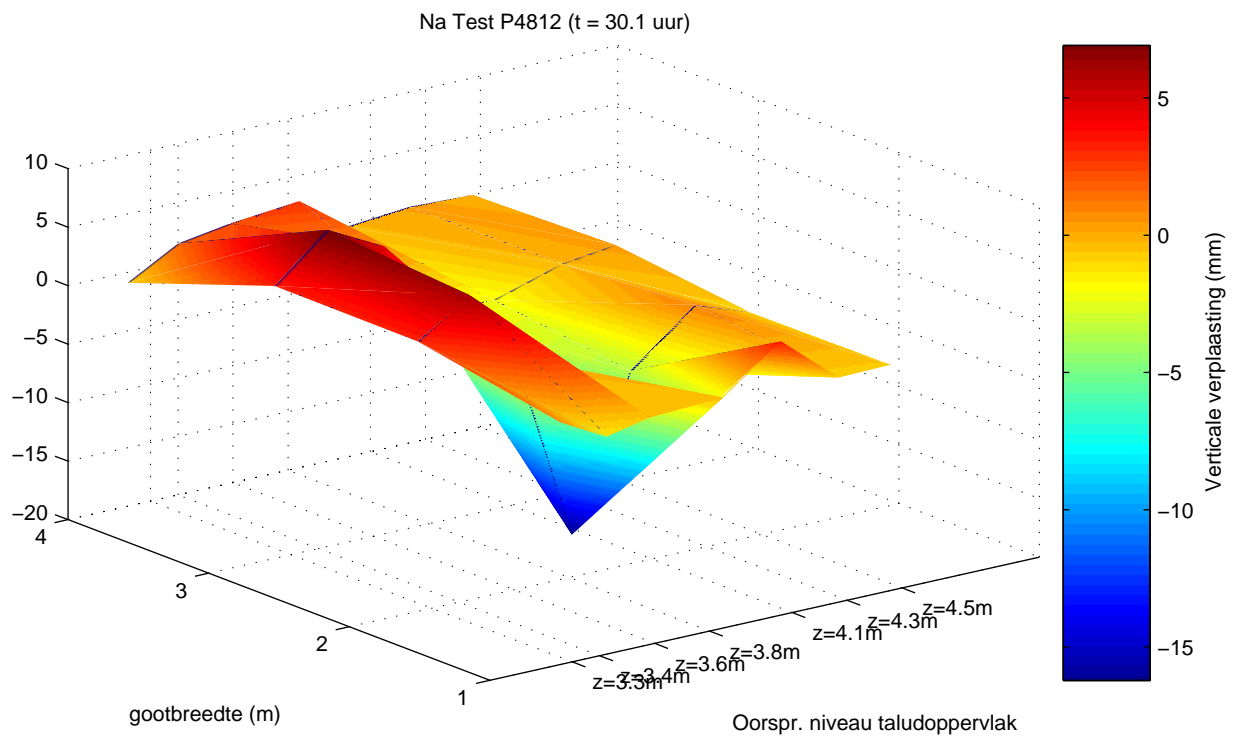
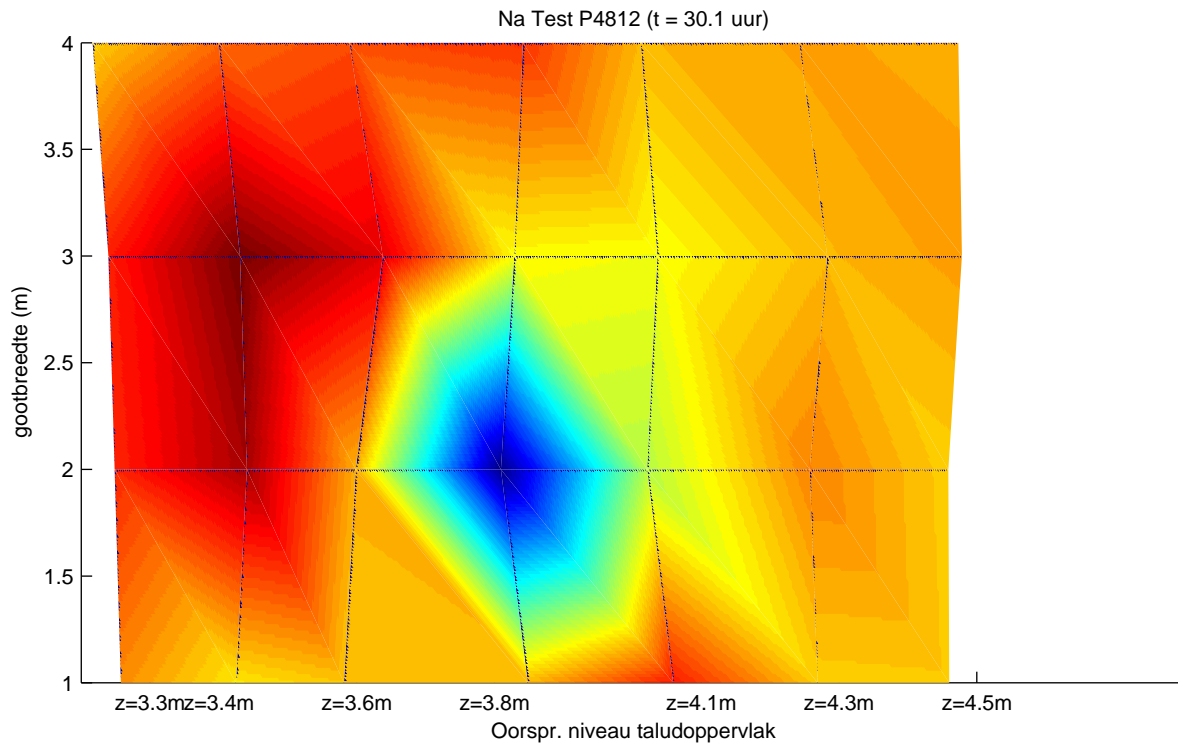
Langeduur proeven in de Deltagoot
 Gemeten horizontale verplaatsing (gemeten langs talud)

Hydroblocks (D = 0,20 m)

WL | Delft Hydraulics

H4475

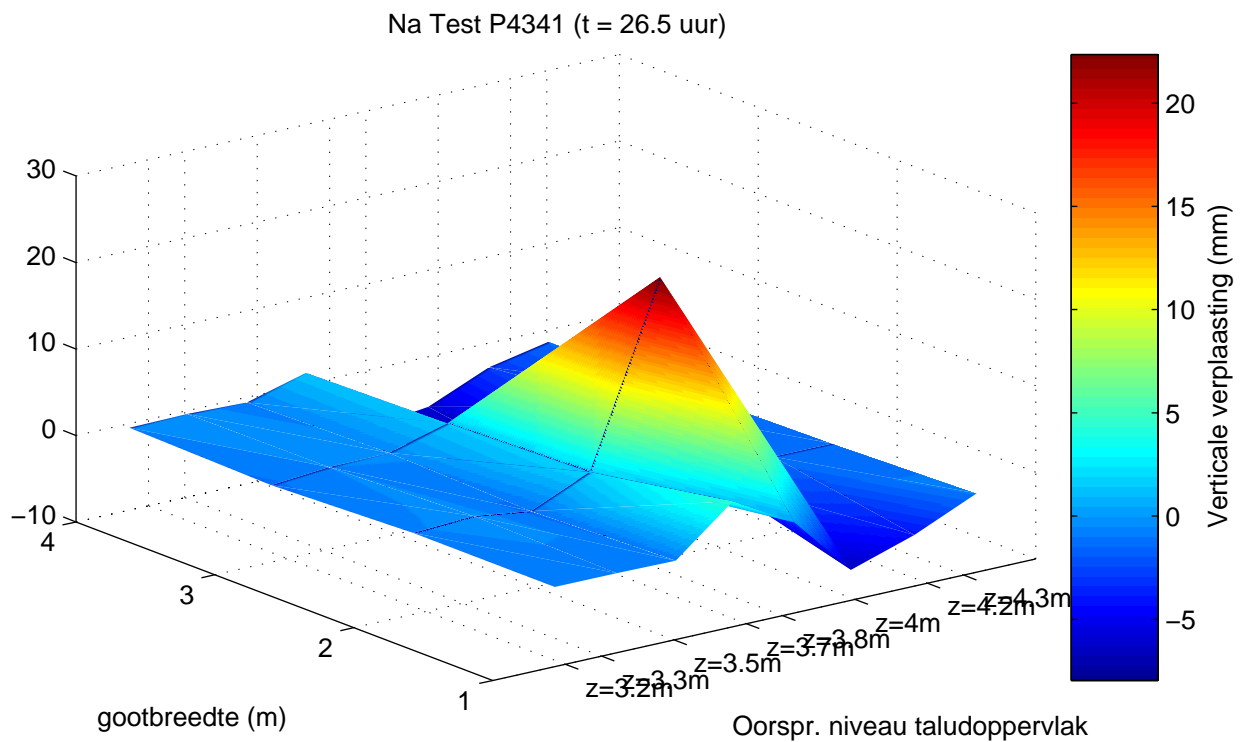
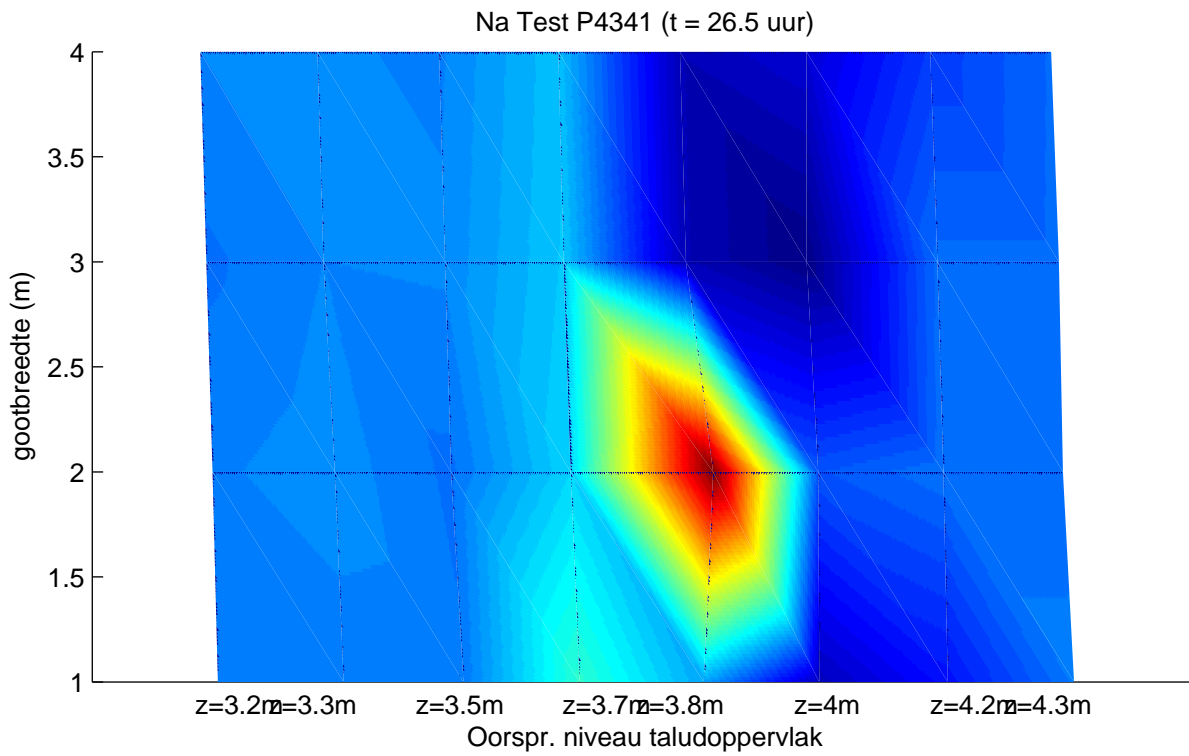
FIG. E28



Contourlijnen van de gemeten verticale verplaatsing

Na P4812

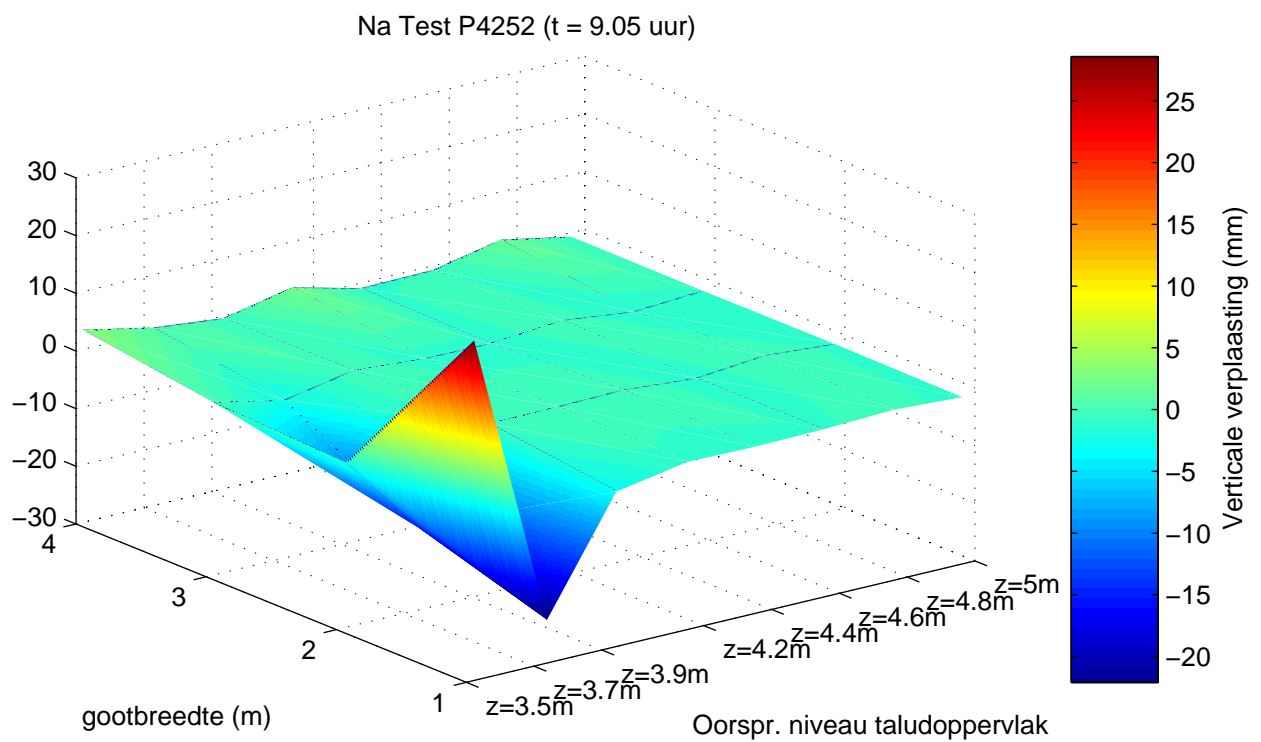
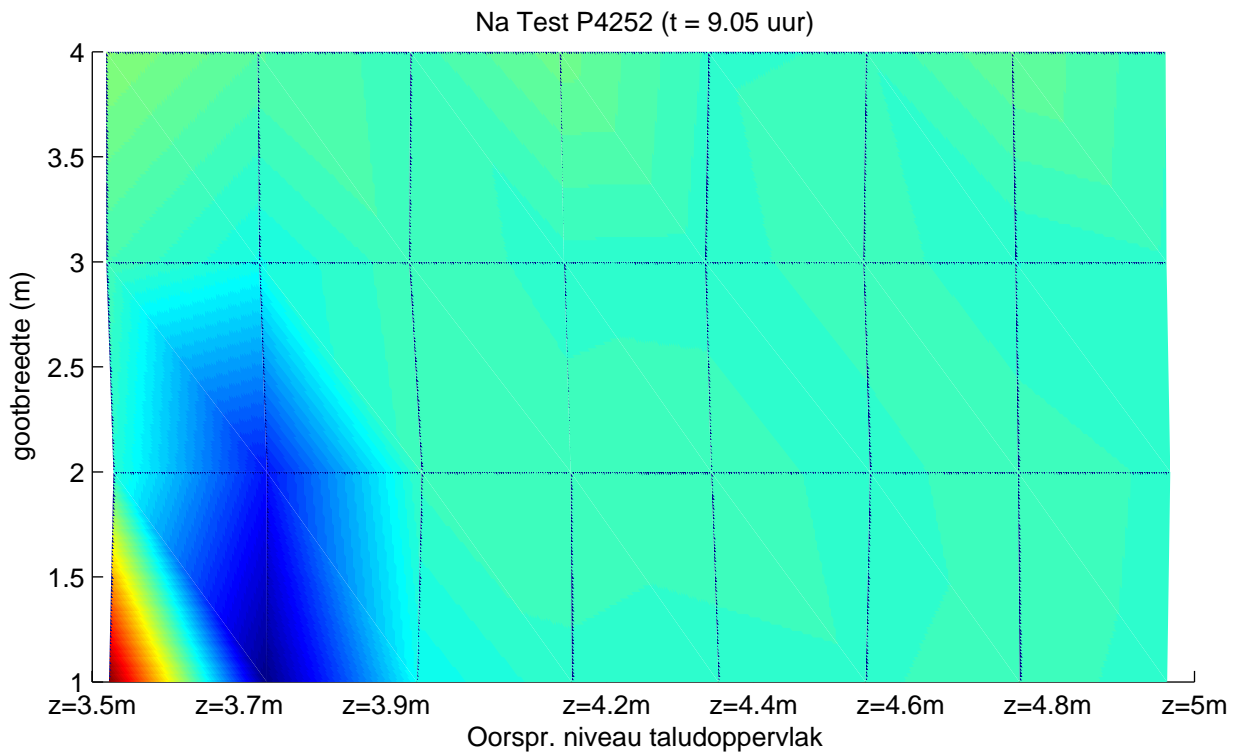
Basalt



Contourlijnen van de gemeten verticale verplaatsing

Na P4341

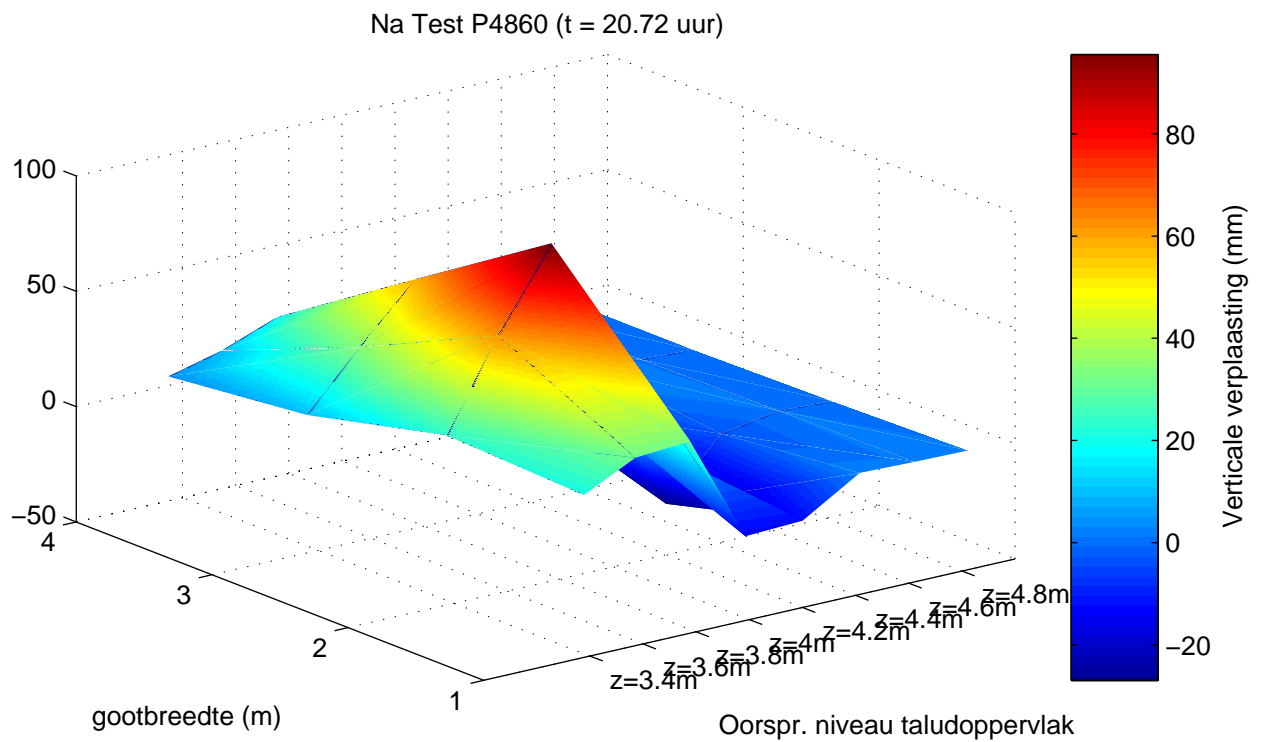
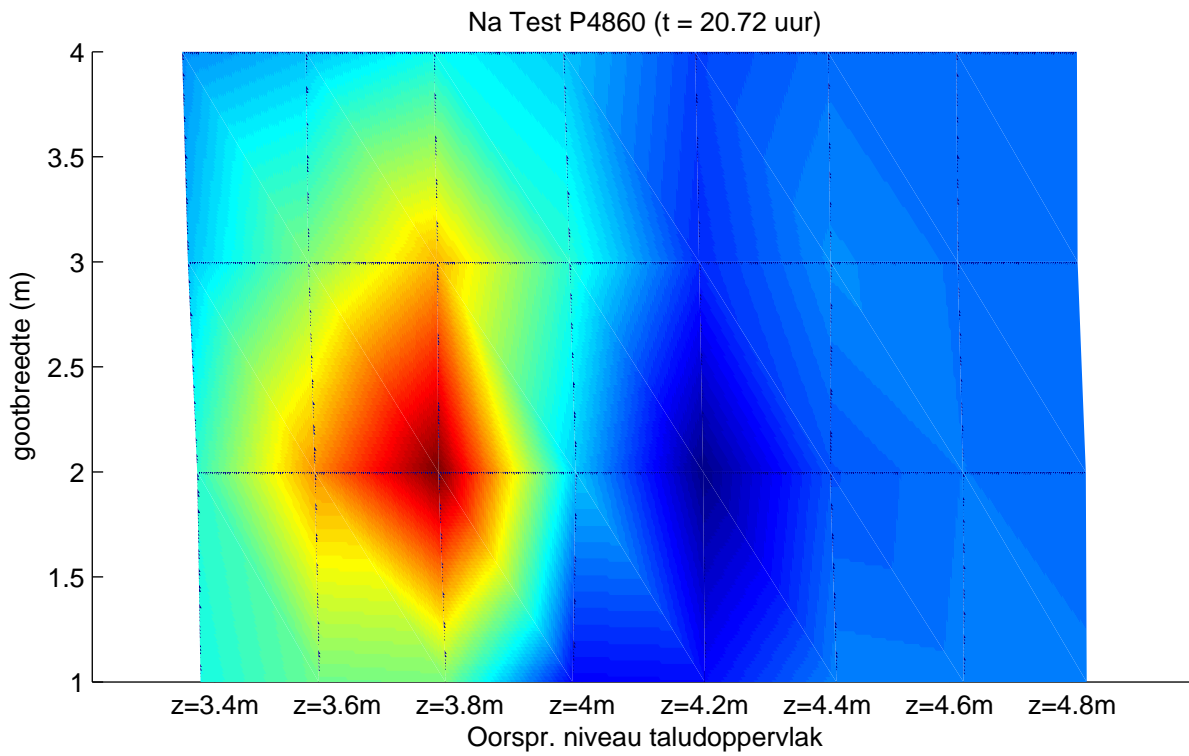
Blokken op kant



Contourlijnen van de gemeten verticale verplaatsing

Na P4252

Hydroblocks D = 0.15m



Contourlijnen van de gemeten verticale verplaatsing

Na P4860

Hydroblocks D = 0.20m

WL | DELFT HYDRAULICS

H4475

Fig. E32

F Scheefheid van talud

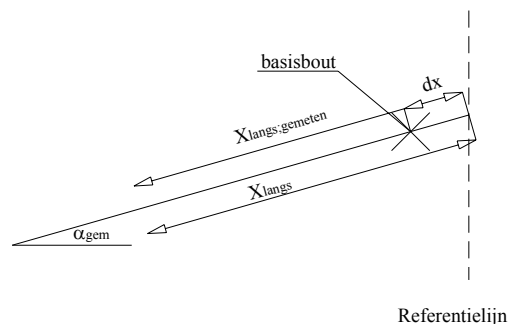
F Scheefheid van het talud

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de dijk in de Deltagoot niet helemaal haaks op de gootas is aangelegd. De golven komen daarom niet helemaal loodrecht op het talud aan, maar met een kleine hoek van orde 1° . Dit zou de oorzaak kunnen zijn van het feit dat aan de halzijde het inwasmateriaal wat sneller uitspoelde dan aan de meetcabine zijde, en soms ook aan de meetcabine zijde zich onder de golfaanvalzone ophoopte.

Vele video-opnamen van de brekende golven op het talud zijn tot in detail bestudeerd door ze vertraagd af te spelen en te kijken of de golfklap aan de ene zijde eerder op het talud komt dan aan de andere zijde. Er is geconcludeerd dat hier geen systematisch verschil is. De golfklap komt net zo vaak aan de ene zijde eerder op het talud als aan de andere zijde, en komt vaak aan beide zijden tegelijk neer.

De scheefheid van het talud is voor elke geteste constructie bepaald op de volgende wijze:

- Bij de gemeten afstand langs het talud ($X_{\text{langs;gemeten}}$) is de afstand tot de referentie lijn (dx) bij opgeteld, zodat een totale langsafstand verkregen wordt (X_{langs});



- Voor elke raai is de gemiddelde taludhelling (α_{gem}) bepaald volgens onderstaande formule:

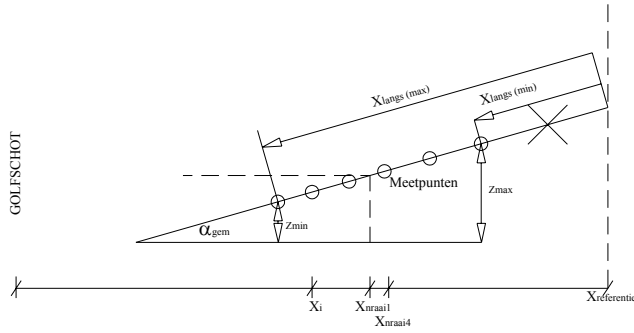
$$\alpha_{\text{gem}} = \tan(\arcsin((X_{\text{langs}}(\text{max}) - X_{\text{langs}}(\text{min})) / (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}})))$$

- Vervolgens is voor elk meetpunt i de X-positie ten opzichte van het golfschot bepaald (X_i) met als vastpunt de referentielijn ($X_{\text{referentie}} = 192.245\text{m}$)

$$X_i = X_{\text{referentie}} - \cos(\arctan(\alpha_{\text{gem}})) * X_{\text{langs}}$$

- Tenslotte is voor elke raai voor verschillende niveau's d.m.v. interpolatie de bijbehorende X-positie (X_n) bepaald.
- De gemiddelde scheefheid van het talud is bepaald door het verschil te nemen tussen de X-positie van raai 1 en de X-positie van raai 4 van het gekozen niveau. De afstand tussen raai 1 en Raai 4 bedraagt 3,0 m. Zo kan je de gemiddelde scheefheid van het talud, ϕ , bepalen op elk niveau. Overigens bestaan tussen de raaien onderling nog wel redelijke verschillen

$$\phi = \arctan(\text{abs}(X_{\text{raai1}} - X_{\text{raai4}}) / 3,0)$$



De gemiddelde scheefheid per bekledingstype voor de gekozen niveau's is weergegeven in onderstaande tabel.

Niveau [m + bodem]	Hydroblocks D=20 [°]	Hydroblocks D=15 [°]	Basalt [°]	Basalton [°]	Blokken op kant [°]
3.4	1.7		1.6	1.3	1.1
3.5	1.2		0.6	1	1
3.6	0.9	0.1	0.4	0.9	1.1
3.7	1	0.1	0	1.2	1.3
3.8	0.9	0.2	0.4	1.3	1.6
3.9	0.8	0.2	0.3	1.2	1.7
4.0	0.7	0.2	0.2		1.6
4.1	0.7	0.2	0.7		2.1
4.2	0.7	0.1	1		2.2
4.3	0.6	0.5	0.8		
4.4	0.6	0.6	0.2		
4.5	0.5	0.6			
4.6	0.4	0.3			
4.7	0.6	0.2			
4.8	0.7	0.5			
Gem. Scheefheid	0.8	0.3	0.6	1.2	1.5
Min	0.4	0.1	0.0	0.9	1.0
Max	1.7	0.6	1.6	1.3	2.2

Tabel F1, scheefheid van dijk in Deltagoot

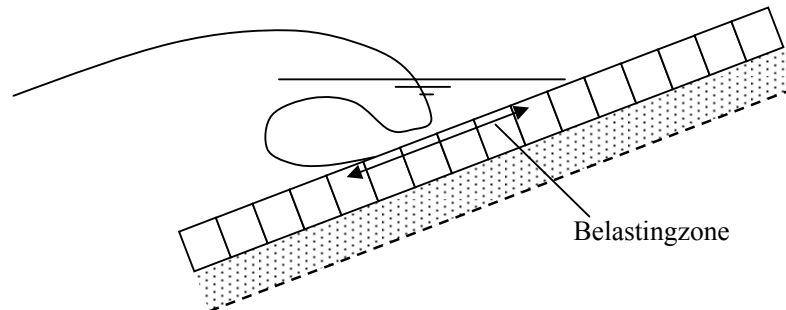
G Zone met grote golfbelasting

G Zone met grote golfbelasting

G.1 Inleiding

Het rekenmodel dat thans gebruikt wordt voor het toetsen van steenzettingen, namelijk ANAMOS, berekent de locatie waar de belasting op de steenzetting maximaal is en geeft een oordeel over de stabiliteit van die steenzetting. Dit geeft de suggestie dat, bij een vaste waterstand en constante golfcondities, de steenzetting op één niveau t.o.v. de stilwaterlijn door de golven belast wordt. In werkelijkheid is er echter sprake van een brede strook onder de waterlijn die onderhevig is aan een grote golfbelasting. Deze strook wordt de belastingzone genoemd.

Kennis omtrent deze belastingzone is relevant, omdat deze bepalend is voor de breedte van de strook gezette steen die minimaal gerenoveerd moet worden als deze volgens ANAMOS instabiel is. Daarnaast is de breedte van de belastingzone bepalend voor de belastingduur. Dit laatste is belangrijk in verband met de reststerkte van de steenzetting en voor steenzettingen die een kleinere sterkte hebben bij een langdurige belasting.



Figuur G.1, belastingzone

G.2 Belastingzone

In het verleden is er nauwelijks aandacht geweest voor de zone die belast wordt door de golven. De locatie waar de maximale belasting optreedt, is wel nauwkeurig onderzocht en dat heeft geleid tot de volgende formule die opgenomen is in ANAMOS:

$$\frac{d_s}{H_s} = -0,11 \left(\min \left\{ 26,0; \frac{\tan \alpha}{s_{op}} \right\} \right)^{0,8} \quad (G.1)$$

$$s_{op} = \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \quad (G.2)$$

met:

d_s = niveau t.o.v. de stilwaterlijn waar de belasting maximaal is (m)

H_s = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

T_p = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

s_{op} = golfsteilheid (-)

- g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)
 α = taludhelling ($^\circ$)

Rond dit niveau, waar de belasting maximaal is, is er een zone (strook) waar de belasting zeer aanzienlijk is en er mogelijk ook schade aan de bekleding kan ontstaan.

Ten behoeve van de beoordeling van de de reststerkte is in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) (TAW 2004) een schatting gegeven van de grenzen van de belastingzone. De belastingzone zou voor loodrechte golfaanval tussen $SWL-0,7 \cdot H_s \xi_{op}$ en $SWL-0,1 \cdot H_s \xi_{op}$ liggen. Aan deze schatting van de belastingzone ligt echter geen onderzoek ten grondslag. Om dit te kunnen vergelijken met bovenstaande formule uit ANAMOS, wordt die formule omgeschreven naar een benadering, die redelijke waarden oplevert voor de meest gebruikelijke omstandigheden ($1/4 \leq \tan \alpha \leq 1/3$ en $0,02 \leq s_{op} \leq 0,04$):

$$d_s \approx -(0,35 \text{ à } 0,50) \cdot H_s \xi_{op} \quad (G.3)$$

Hieruit blijkt dat de maximale belasting volgens ANAMOS ongeveer middenin de belastingzone ligt volgens de VTV.

Ten einde enige onderbouwing te krijgen voor de kwantificering van de belastingzone is gebruik gemaakt van 3 typen onderzoeken:

- Deltagootonderzoek met steenzettingen, waarbij op diverse niveaus t.o.v. de stilwaterlijn de stijghoogteverschillen over de toplaag zijn gemeten. Met deze metingen wordt de aandacht gericht op de belastingzone in verband met het mogelijk ontstaan van initiële schade.
- Enkele proeven uit groot- en kleinschalig modelonderzoek waarbij de stijghoogte op het talud gemeten is en waarvoor de gediptheid (maat voor het stijghoogteverschil tijdens de golfklap) is bepaald
- Kleinschalig modelonderzoek waarbij de uitspoeling van filtermateriaal door een gat in de toplaag is onderzocht, ten behoeve van de kwantificering van de reststerkte van de toplaag.

Belastingzone i.v.m. initiële schade op basis van gemeten stijghoogteverschillen

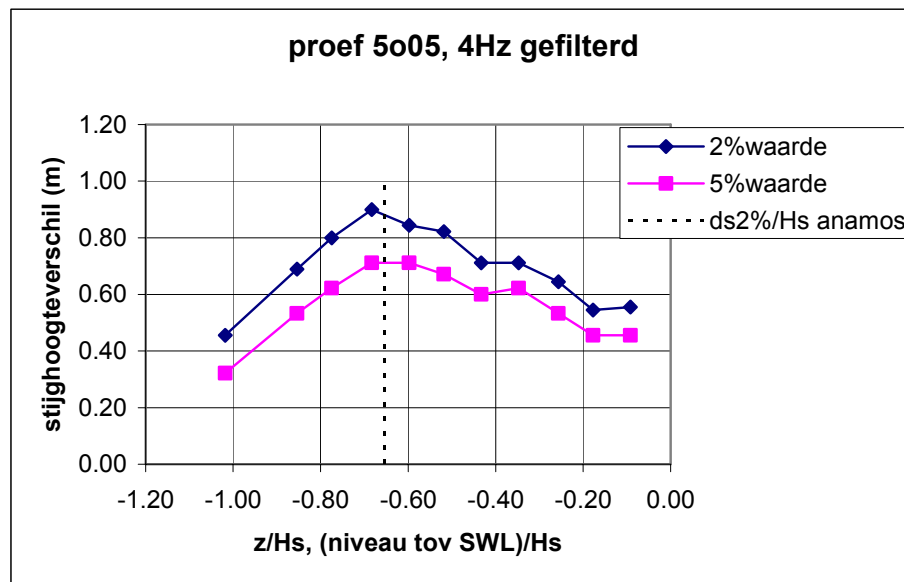
Voor het kwantificeren van de belastingzone die relevant is voor het ontstaan van initiële schade aan de toplaag, zijn 3 proeven uit het Deltagootonderzoek van 1997 en 1998 uitgewerkt (Klein Breteler, 2000). Enkele belangrijke eigenschappen van de proeven zijn gegeven in onderstaande tabel:

omschrijving toplaag	talud	proef	H_s (m)	T_p (s)	ξ_{op} (-)	Λ (m)
plat gezette Haringmanblokken	1:3,5	5o05	1,64	5,60	1,56	0,57
koud tegen elkaar geplaatste blokken op hun kant	1:3,5	12ao05	1,40	4,70	1,42	0,42
plat gezette blokken met brede stootvoegen	1:3,5	20a08	0,84	4,57	1,78	0,47

Tabel G.1, geanalyseerde proeven (ξ_{op} = brekerparameter = $\tan \alpha / \sqrt{s_{op}}$; Λ = gemeten lek lengte)

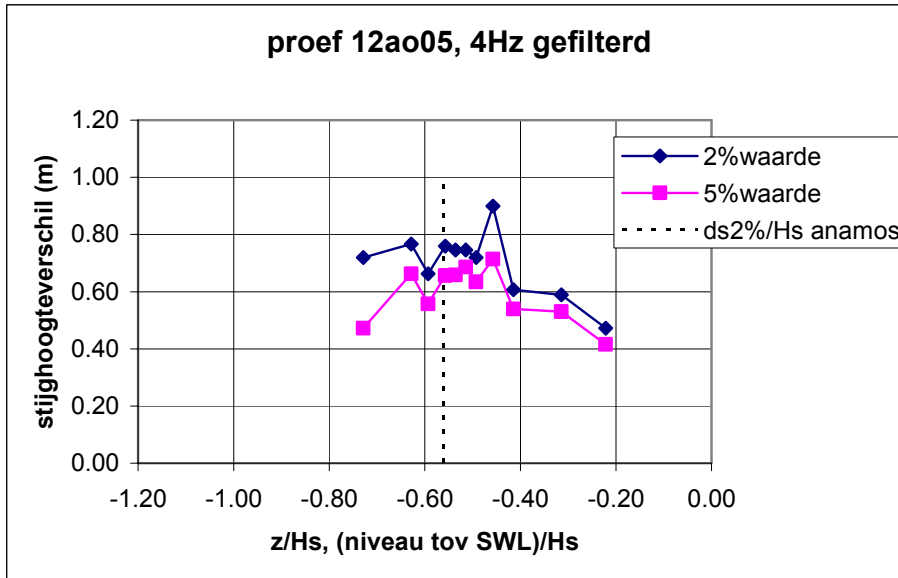
Voor elk van deze proeven is door Klein Breteler (2000) het stijghoogteverschil beschouwd op een aantal locaties op het talud. Dit stijghoogteverschil is gefilterd met een 4 Hz low-pass filter, zodat de zeer korte piekjes eruit zijn die toch niet relevant zijn voor de stabiliteit van de steenzetting. Uit de overschrijdingskrommen van de stijghoogteverschillen zijn de 2%- en 5%-overschrijdingswaarden geselecteerd en als functie van de locatie op het talud getekend in figuur G.2 t/m G.4. Op de horizontale as staat het niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn, dimensieloos gemaakt door te delen door H_s . In deze figuren is tevens aangegeven waar de belasting, met 2% overschrijdingsfrequentie, volgens ANAMOS ligt.

In de figuren is te zien dat er een brede zone is waar een aanzienlijk stijghoogteverschil optreedt. Deze zone is in proef 20a08 het breedst. Gezien het feit dat deze proef ook een grotere waarde van ξ_{op} heeft, was dit te verwachten op basis van de VTV, die aangeeft dat de zonebreedte evenredig is met ξ_{op} .

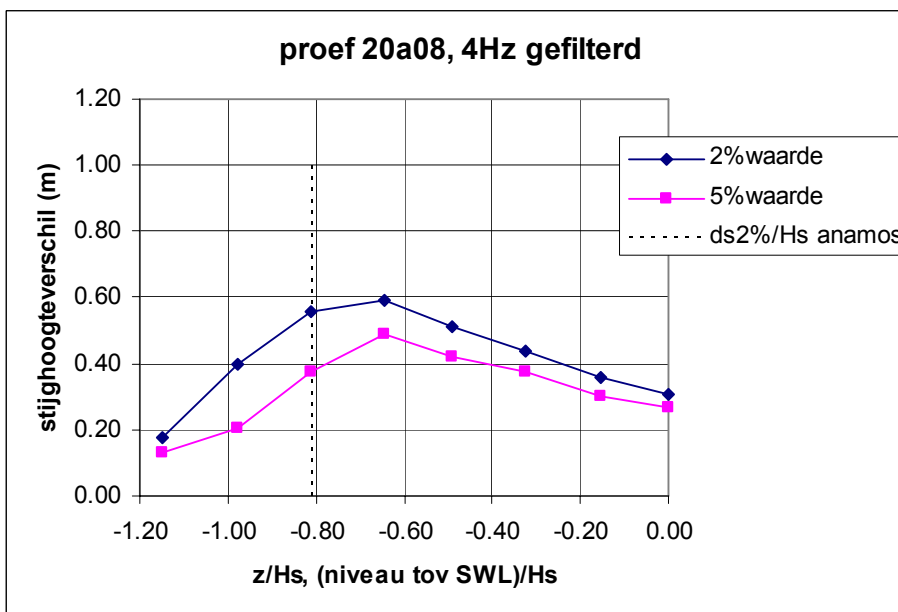


Figuur G.2, Stijghoogteverschil als functie van het niveau op het talud voor proef 5o05

De resultaten van proef 12a05 laten een zeer springerig verloop van het stijghoogteverschil zien (figuur G.3). Dit is een indicatie van het feit dat het stijghoogteverschil wellicht niet zo exact voorspelbaar is en afhankelijk is van toevalligheden. Ten aanzien van het stijghoogteverschil ter plaatse van de maximaal belaste locatie wordt er binnen het steenzettingonderzoek naar gestreefd deze vooral niet te onderschatten. Door toevalligheden kan echter deze maximaal belaste locatie soms wat dieper en soms wat ondieper liggen. In proef 12a05 is te zien dat bij $z/H_s = -0,46$ een maximum optreedt, terwijl dit volgens ANAMOS te verwachten was bij $z/H_s = -0,56$. Ook als het algehele verloop vergeleken wordt met die van proef 5o05 en 20a08, dan valt op dat bij die andere proeven het stijghoogteverschil sterk afneemt onder het maximum (in de figuur links van het maximum) terwijl dat bij proef 12a05 niet gebeurt. Het lijkt alsof door toevalligheden de maximale belasting hier een relatief ondiepe locatie heeft gekregen.



Figuur G.3, Stijghoogteverschil als functie van het niveau op het talud voor proef 12a05



Figuur G.4, Stijghoogteverschil als functie van het niveau op het talud voor proef 20a08

Redenerend vanuit een gemiddeld voorloop van het stijghoogteverschil als functie van het niveau t.o.v. de stilwaterlijn (zoals bijvoorbeeld gemeten is in proef 5o05 en 20a08) wordt het nu zaak te schatten of toevalligheden in staat zijn op een andere locatie een maximum te realiseren. Het moge duidelijk zijn dat, als het verwachte stijghoogteverschil zeer klein is t.o.v. het verwachte maximum (bijvoorbeeld bij $z/H_s = -1,5$), het zeer onwaarschijnlijk is dat er door toevalligheden toch zo'n hoog stijghoogteverschil optreedt, dat dit boven het verwachte maximum uitkomt. M.a.w.: waarschijnlijk is de variatie als gevolg van toevalligheden kleiner dan de verwachtingswaarde van het stijghoogteverschil op de betreffende locatie. Dit zou nader gekwantificeerd kunnen worden door vele proeven te

analyseren en daar voor elke locatie de verwachtingswaarden en spreiding vast te stellen. Dit valt echter buiten het kader van deze studie.

Voorlopig wordt er van uitgegaan dat toevalligheden in staat zijn een lokaal maximum op een bepaalde locatie te geven, als de verwachtingswaarde van het stijghoogteverschil daar meer dan 70% is ten opzichte van de maximaal belaste locatie. Daardoor wordt de belastingzone gedefinieerd als de zone waarin de verwachtingswaarde van het stijghoogteverschil ten minste 70% is ten opzichte van de maximaal belaste locatie.

Met deze definitie is in tabel G.2 de belastingzone voor de drie geanalyseerde proeven gegeven.

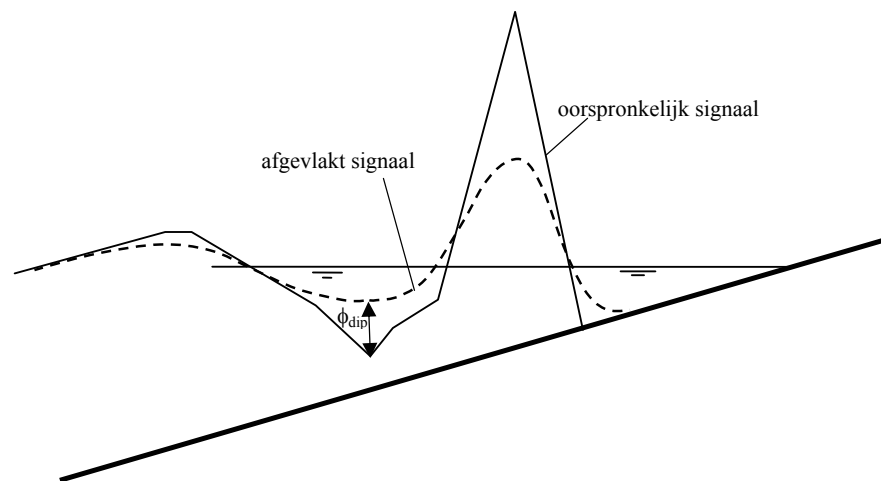
proef	H_s	ξ_{op}	ondergrens		bovengrens	
			z_o/H_s	$z_o/H_s/\xi_{op}$	z_o/H_s	$z_o/H_s/\xi_{op}$
5o05	1,64	1,56	-0,90	-0,58	-0,25	-0,16
12ao05	1,40	1,42	?		?	
20a08	0,84	1,78	-0,97	-0,55	-0,30	-0,17

Tabel G.2, de belastingzone voor de geanalyseerde proeven

Op basis hiervan wordt een geschatte belastingzone m.b.t. het ontstaan van initiële schade gevonden van: $-0,6 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,15 \cdot H_s \xi_{op}$. Deze wijkt maar weinig af van die uit de VTV.

Belastingzone i.v.m. initiële schade op basis van gediptheid

De gediptheid (ϕ_{dip}) is gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop op het talud en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment en is vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde leklengte.

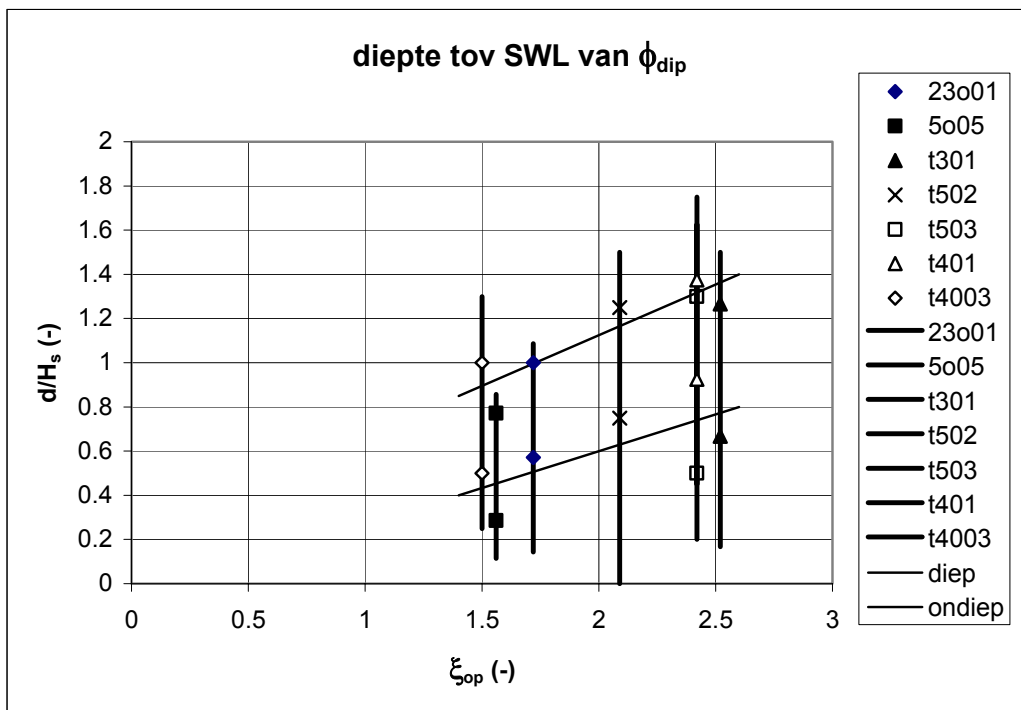


Figuur G.5 Definitie van gediptheid tijdens de golfklap

De gediptheid wordt bepaald door eerst met een gekozen voortschrijdend gemiddelde het verloop van de stijghoogte op het talud vloeiend te maken (zie fig. G.5: afgevlakt signaal).

Dit vloeiend gemaakte stijghoogteverloop is een grove benadering van het stijghoogteverloop in het filter bij een bepaalde lek lengte. Vervolgens is de gediptheid gelijk aan het maximale verschil tussen de vloeiend gemaakte stijghoogte en de werkelijke stijghoogte op het talud. Dit maximale verschil is een grove schatting van het maximale opwaartse stijghoogteverschil over de toplaag (zie ook Wenneker e.a. 2004).

In figuur G.6 is de dimensieloze locatie onder SWL van de maximale gediptheid tijdens de golfklap, $d_{\phi_{dip}}/H_s$, als functie van de brekerparameter ξ_{op} gegeven voor enkele proeven uit het verleden. In de figuur zijn de meetresultaten van grootschalige proeven (23o01 en 5o05, met talud 1:3,5; Smith e.a. 2000) en kleinschalige proeven gegeven (t301 met talud 1:3, en t502, t503 en 401 met talud 1:4; Kuiper e.a. 2003) (t4003 met talud 1:4; vd Meer e.a. 1993). De meetresultaten zijn per proef weergegeven in figuur 2 tot en met 8 in bijlage A.



Figuur G.6, locatie van de maximale gediptheid (\approx stijghoogteverschil over de toplaag) als functie van de brekerparameter

In figuur G.6 zijn verticale lijnen getekend die weergeven in welke zone de belasting tijdens de golfklap optreedt. De grootste waarden van de belasting vinden plaats tussen de twee punten op deze lijn.

Uit de figuur blijkt dat de locatie van de belastingzone afhankelijk is van de brekerparameter:

- Als $\xi_{op} \approx 1,5$: $0,4 < d_{\phi_{dip}}/H_s < 0,9$
- Als $\xi_{op} \approx 2,0$: $0,6 < d_{\phi_{dip}}/H_s < 1,1$
- Als $\xi_{op} \approx 2,5$: $0,7 < d_{\phi_{dip}}/H_s < 1,4$

De volgende formule voor de locatie van de belastingzone t.o.v. SWL sluit hierop aan:

$$-0,55 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,30 \cdot H_s \xi_{op} \tag{G.4}$$

Deze zone is wat smaller dan die afgeleid was uit de stijghoogteverschilmetingen. De grote stijghoogteverschillen blijken ook nog wat dichterbij de waterlijn plaats te vinden.

Belastingzone in verband met reststerkte

Door de Vroeg (1992) is een uitvoerig onderzoek uitgevoerd naar het uitspoelen van filtermateriaal door een gat in de toplaag. Dit uitspoelen wordt gezien als de eerste fase van het geleidelijk uitbreiden van de schade aan een steenzetting, nadat één steen uit de zetting is gelicht. In dat onderzoek is de aandacht gericht op de grootte van de ondermijning van de toplaag als gevolg van het uitspoelen van het filter. Als de ondermijning een bepaalde waarde overschrijdt, zal de toplaag instorten en volgt de tweede fase van het uitbreiden van de schade.

Op basis van kleinschalig modelonderzoek heeft hij de volgende formules opgesteld (voor loodrechte golfaanval):

- Als $H_s/B_g/\sqrt{s_{op}} > 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,49N^{0,14} + (0,16 + 5 \cdot 10^{-5}N) \left(\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}} - 3 \right) \exp \left(-0,08\sqrt{N} \left(\frac{d_g\sqrt{s_{op}}}{H_s} + 0,39 \right)^2 \right) \quad (G.5)$$

- Als $H_s/B_g/\sqrt{s_{op}} \leq 3$:

$$\frac{B_o}{B_g} = 0,28N^{0,14} \sqrt{\frac{H_s}{B_g\sqrt{s_{op}}}} \quad (G.6)$$

met:

B_o = ondermijningsdiameter (gemeten langs het talud) (m)

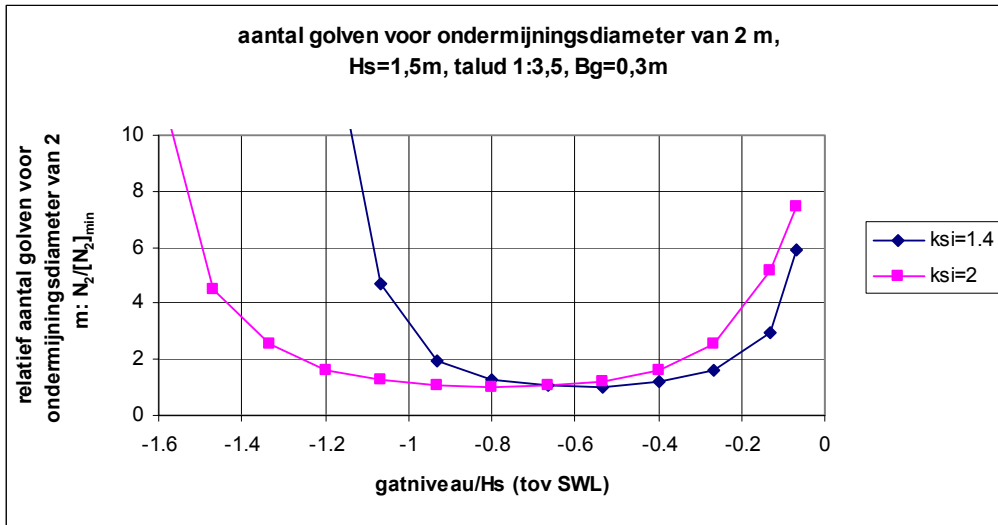
B_g = gatgrootte in de toplaag (m)

N = aantal golven sinds het ontstaan van het gat in de toplaag (-)

d_g = plaats van de onderzijde van het gat in de toplaag, langs het talud gemeten, ten opzichte van SWL (onder water: negatief) (m)

Door de locatie van het gat in de toplaag (d_g) te variëren, is het mogelijk om met de formules een indruk te krijgen van de relatieve grootte van de belasting als functie van de locatie ten opzichte van de stilwaterlijn. Met de formules is het aantal golven berekend die leiden tot een ondermijningsdiameter van 2 m: N_2 . Afhankelijk van de locatie van het gat zijn er meer of minder golven nodig om dit te bereiken. In onderstaande figuur G.5 zijn de resultaten weergegeven, waarbij het aantal golven gedeeld is door het aantal golven op de locatie met maximale belasting (kleinste aantal golven dat leidt tot een ondermijning diameter van 2 m: $[N_2]_{\min}$).

In de figuur is te zien dat vanaf een bepaald niveau het aantal golven dan nodig is om een ondermijning van twee meter te veroorzaken (N_2) exponentieel toeneemt. Rond het niveau van de maximale belasting is er een relatief breed gebied waar kennelijk de waarde van N_2 maar weinig afwijkt van $[N_2]_{\min}$.



Figuur G.7, aantal golven dat leidt tot een ondermijning van 2 m (N_2), dimensieloos gemaakt door het te delen door het aantal op de locatie met maximale belasting ($[N_2]_{\min}$).

Als de waterstand tijdens een zware belasting geleidelijk toeneemt, zal er een cumulatieve erosie optreden, die berekend kan worden door de bijdrage van de erosie op elk niveau op te tellen. Een dergelijke sommatie is uitgevoerd aan de hand van de verhouding $[N_2]_{\min}/N_2$, waardoor het mogelijk is een equivalente belastingzone te definiëren die een gelijke totale erosie oplevert bij een belastingniveau gelijk aan de maximale:

$$\frac{z_{\text{belasting}}}{H_s} = \int \frac{[N_2]_{\min}}{N_2} d\left(\frac{z}{H_s}\right) \tag{G.7}$$

met:

- $z_{\text{belasting}}$ = hoogte van de belastingzone op het talud (verticaal gemeten) die een gelijke totale erosie oplevert bij een belastingniveau gelijk aan de maximale (m)
- N_2 = aantal golven dat leidt tot een ondermijning van 2 m (-)
- $[N_2]_{\min}$ = kleinste waarde van N_2 (dit minimum wordt bereikt op de locatie waar de belasting maximaal is) (-)

Deze integraal levert het volgende op voor de twee gevallen die getekend zijn in figuur G.7:

- Als $\xi_{\text{op}} = 1,4$: $z_{\text{belasting}}/H_s = 0,70 = 0,50 \cdot \xi_{\text{op}}$
- Als $\xi_{\text{op}} = 2,0$: $z_{\text{belasting}}/H_s = 0,91 = 0,46 \cdot \xi_{\text{op}}$

Ook hier blijkt de belastingzone ongeveer evenredig te zijn met ξ_{op} .

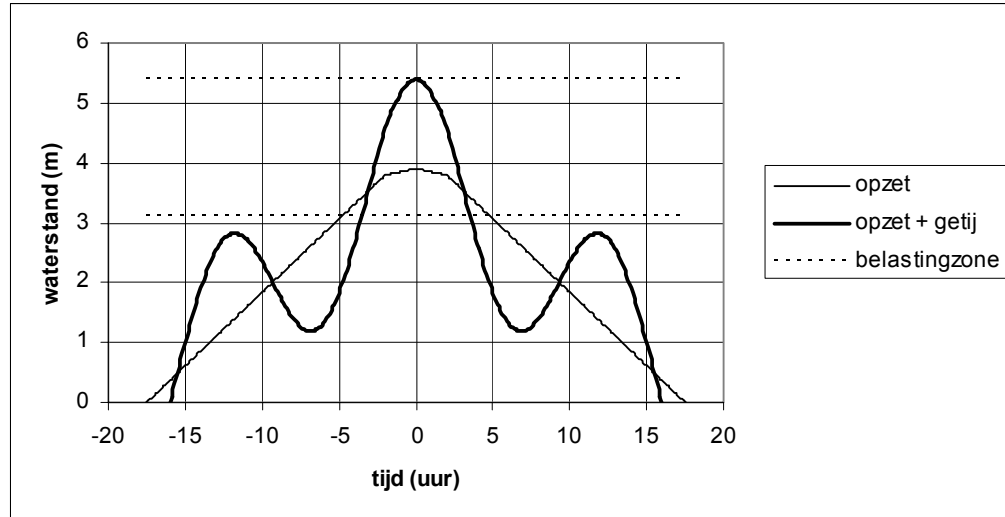
Door deze belastingzone te laten aansluiten bij het resultaat van figuur G.7, worden de volgende ondergrens en bovengrens van de belastingzone verkregen:

$$-0,65 \cdot H_s \xi_{\text{op}} < z < -0,15 \cdot H_s \xi_{\text{op}} \tag{G.8}$$

Deze wijkt maar weinig af van die uit de VTV en die is afgeleid op basis van de stijghoogteverschillen.

G.3 Belastingduur

Met de hoogte van de belastingzone kan eenvoudig de belastingduur berekend worden, als het waterstandsverloop bekend is. Het gaat hierbij om de totale duur waarbij de waterstand iets boven het te toetsen punt ligt, bijvoorbeeld ten minste $0,2 \cdot H_s \xi_{op}$, en maximaal $0,6 \cdot H_s \xi_{op}$ (zie par. G.4).



Figuur G.8, voorbeeld van waterstandsverloop tijdens storm met $P_{toets} = 5,4$ m, $t_{storm} = 35$ uur, $R_{getij} = 3,0$ m en $Z_{belasting} = 2,3$ m.

In figuur G.8 is een voorbeeld gegeven van het waterstandsverloop tijdens storm als het getij in fase is met de waterstandsopzet. Het waterstandsverloop is dan:

$$h = opzet + getij$$

- Als $0 \leq t \leq 2$ uur:

$$h = (P_{toets} - 0,5R_{getij} - 0,05t) + 0,5R_{getij} \cos\left(\frac{2\pi}{12,42}t\right) \quad (G.9)$$

- Als $2 < t < t_{storm}/2$:

$$h = (0,5t_{storm} - t) \frac{P_{toets} - 0,1 - 0,5R_{getij}}{0,5t_{storm} - 2} + 0,5R_{getij} \cos\left(\frac{2\pi}{12,42}t\right) \quad (G.10)$$

met:

h = waterstand (m)

t = tijd ($t = 0$ op top van storm) (uur)

t_{storm} = stormduur (Noordzee, Westerschelde en Oosterschelde: 35 uur; Waddenzee: 45 uur)

R_{getij} = getijrange (waterstandsverschil tussen GLW en GHW) (m)

P_{toets} = toetspeil (m)

Als de hoogte van de belastingzone ($Z_{belasting}$) kleiner is dan 70% van de opzet ($Z_{belasting} < 0,7 \cdot (P_{toets} - R_{getij}/2)$) en het getij in fase is met het standaard stormverloop, en het om een toetsing ruim onder het toetspeil gaat (op $P_{toets} - 0,6 \cdot H_s \xi_{op}$) dan is de belastingduur relatief eenvoudig te bepalen. Het waterstandsvoorlopig kan dan rond 3 uur na de top van de storm gelineariseerd worden:

$$h \approx (0,5t_{storm} - t) \frac{P_{toets} - 0,1 - 0,5R_{getij}}{0,5t_{storm} - 2} + \frac{\pi}{12,42} R_{getij} (3,1 - t) \quad \text{als } t > 2 \text{ uur} \quad (G.11)$$

Dit levert de volgende benaderende formule voor de belastingduur:

$$t_{belasting} \approx 2 \cdot \left(\frac{z_{belasting} - P_{toets} + 0,5c_{opzet}t_{storm} + 0,8R_{getij}}{c_{opzet} + 0,25R_{getij}} \right) \quad (G.12)$$

$$c_{opzet} = \frac{P_{toets} - 0,1 - 0,5R_{getij}}{0,5t_{storm} - 2} \quad (G.13)$$

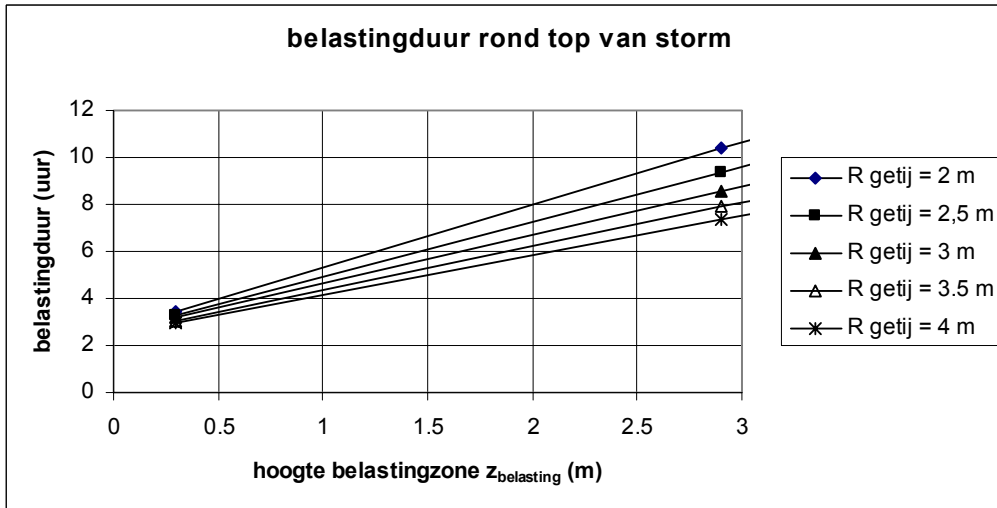
Met:

$z_{belasting}$ = hoogte van de belastingzone op het talud (verticaal gemeten) die een gelijke totale erosie oplevert bij een belastingniveau gelijk aan de maximale (m)

$t_{belasting}$ = belastingduur (uur)

c_{opzet} = component van de gradiënt van het waterstandsverloop betreffende de stormopzet op meer dan twee uur voor of na de top van de storm (m/uur)

In figuur G.9 is een grafiek getekend van het verband tussen de belastingduur en de hoogte van de belastingzone voor als het te toetsen punt ruim onder het toetspeil ligt op een niveau van $P_{toets} - 0,6 \cdot H_s \xi_{op}$. De belasting is dan maximaal als het toetspeil bereikt wordt, en daarnaast is er een zo lang mogelijke belastingduur.



Figuur G.9, Belastingduur als functie van de hoogte van de belastingzone voor het geval dat het te toetsen punt $0,6 \cdot H_s \xi_{op}$ onder het toetspeil ligt ($P_{toets} = 5,0$ m; $t_{storm} = 35$ uur).

Steeds is uitgegaan van de veronderstelling dat de golfcondities tijdens de storm constant blijven. Dit is conform de eenvoudige toetsing volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV '04), maar levert een overschatting van de belasting. In werkelijkheid zal tijdens de storm de golfhoogte geleidelijk aan toenemen tot een maximum dat ongeveer 4 uur aanhoudt, en daarna weer afnemen.

G.4 Conclusie

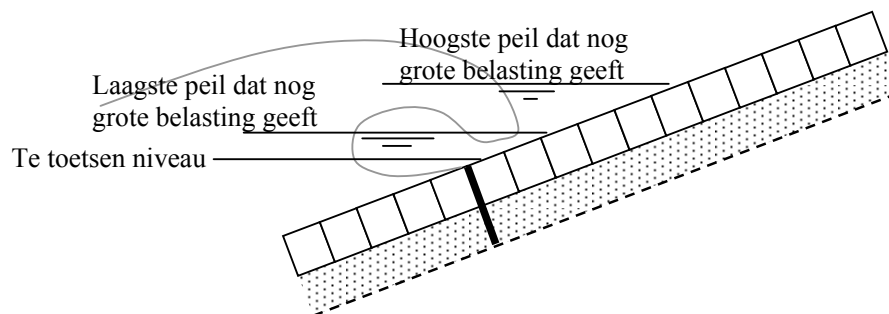
In deze bijlage is de grootte van de belastingzone bepaald m.b.t. de initiële schade aan de toplaag en m.b.t. de reststerkte:

- initiële schade:
 - Op basis van stijghoogteverschil metingen: $-0,6 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,15 \cdot H_s \xi_{op}$ (G.14)
 - Op basis van de gediptheid: $-0,55 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,30 \cdot H_s \xi_{op}$ (G.15)
- reststerkte: $-0,65 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,15 \cdot H_s \xi_{op}$ (G.16)

Hoewel deze belastingzones vanuit een totaal ander gezichtpunt zijn gekwantificeerd, blijkt het resultaat toch ongeveer gelijk te zijn. Alleen de extreme waarden van de gediptheid (maat voor het stijghoogteverschil) blijkt wat minder dicht onder de waterlijn plaats te vinden.

Geconcludeerd wordt dat de locatie van de belastingzone t.o.v. de stilwaterlijn geschat kan worden met:

$$-0,6 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,2 \cdot H_s \xi_{op} \quad (G.17)$$



Figuur G.9, range van waterstanden die een belasting geven op het te toetsen punt

Dit resultaat blijkt maar weinig af te wijken van de belastingzone voor loodrechte golfaanval die genoemd is in de VTV: $-0,7 \cdot H_s \xi_{op} < z < -0,1 \cdot H_s \xi_{op}$.

Op basis van de bepaalde hoogte van de belastingzone en het verloop van de waterstand tijdens storm, kan de belastingduur bepaald worden. Voor een voorbeeld is dit in hoofdstuk G.3 uitgewerkt. Het resultaat is gegeven in figuur G.9. Doordat de golfhoogte tijdens een storm niet constant is, wordt hiermee een overschatting van de belasting verkregen.

Aanbevolen wordt om dit zowel in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid als in deze methode de verdisconteren.

H Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

