

**Locatie maximale belasting op  
steenzettingen bij ondiepe  
voorlanden**





# **Locatie maximale belasting op steenzettingen bij ondiepe voorlanden**

G.C. Mourik

1202551-008



## Titel

Locatie maximale belasting op steenzettingen bij ondiepe voorlanden

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat, Waterdienst	1202551-008	1202551-008-HYE-0002	40

## Trefwoorden

Steenzetting, Steentoets, ondiep voorland, belastinglocatie

## Samenvatting

Het is gebleken dat onder sommige omstandigheden de belasting volgens Steentoets veel dieper onder water aangrijpt op een steenzetting, dan in werkelijkheid het geval is. Dit is het geval bij ondiepe voorlanden en relatief lange golven, zoals dat veel langs de Waddenzee kust voorkomt. Dat leidt ertoe dat de berekende maatgevende waterstand soms te hoog is, waardoor laaggelegen steenzettingen ten onrechte kunnen worden afgekeurd.

In Steentoets wordt de locatie met de maximale belasting vooralsnog berekend met formules die in het verleden zijn ontwikkeld voor diep water, waarbij golven niet beperkt werden door de waterdiepte. In de onderhavige rapportage wordt een factor ontwikkeld, waarmee de formules uit Steentoets kunnen worden uitgebreid, zodat de locatie met de maximale belasting ook berekend kan worden bij ondiep water, waarin golven wél beperkt worden door de waterdiepte. Het onderzoek werd uitgevoerd voor zowel golfklappen als golffronten.





Voor het onderzoek werd gebruik gemaakt van metingen die in 1992 door De Waal (1992) zijn uitgevoerd in de Scheldegoot van het Waterloopkundig Laboratorium (tegenwoordig Deltares). Hij deed onderzoek naar de belasting op steenzettingen met een ondiep, vrijwel horizontaal voorland.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

## Referenties

Contract 31037864 van 26-04-2010 (Contactpersoon RWS: ir. A. Bizzarri)

Contract 31054958 / 4500180616 van 7-06-2011 (Contactpersoon RWS: dhr. K. Saathof)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	nov. 2010	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
2.0	feb. 2011	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	
3.0	feb. 2012	G.C. Mourik		R. 't Hart		M.R.A. van Gent	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>Lijst van Tabellen</b>	<b>iii</b>
<b>Lijst van Figuren</b>	<b>iii</b>
<b>Lijst van Symbolen</b>	<b>v</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Problematiek locatie maximale belasting</b>	<b>3</b>
<b>3 Modelopstelling en proevenprogramma</b>	<b>5</b>
3.1 Geometrie modelopstelling	5
3.2 Metingen	5
3.2.1 Drukken	5
3.2.2 Golfcondities	6
3.3 Proevenprogramma	6
<b>4 Resultaten</b>	<b>7</b>
4.1 Drukmetingen	7
4.2 Metingen golfcondities	8
<b>5 Analyse</b>	<b>9</b>
5.1 Opzet analyse	9
5.2 Locatie maximaal stijghoogteverschil	9
5.3 Analyse meetdata met AnalyseWave	11
5.4 Selectie uitvoer AnalyseWave	12
5.5 Analyse golfklappen	12
5.5.1 Algemeen	12
5.5.2 Grens tussen brekende en niet brekende golven	13
5.5.3 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}/H_s}$ en $s_{op}$	13
5.5.4 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}/H_{2\%}}$ en $s_{op}$	14
5.5.5 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}/h_{0,5L}}$ en $s_{op}$	15
5.5.6 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}/H_s}$ en Ursell-parameter	16
5.5.7 Relatie tussen $x_{\phi_{dip,5\%}/H_s}$ en $s_{op}$	18
5.5.8 Gekozen dimensieloze parameter: $x_{\phi_{\max,5\%}/H_s}$	19
5.5.9 Implementatie resultaten golfklappen in Steentoets	20
5.5.10 Check 3300- en 4300-serie	22
5.6 Analyse golffronten	23
5.6.1 Algemeen	23
5.6.2 Relatie tussen $(x_{\phi_{dip,5\%}/H_s})\tan\alpha$ en $s_{op}$	24
5.6.3 Implementatie resultaten golffronten in Steentoets	26
5.6.4 Check 3300- en 4300-serie	28
5.7 Belastingintensiteit bij diep en ondiep water	28
5.7.1 Belastingaantal	29
5.7.2 Belastinggrootte	29
5.8 Implementatie in Steentoets	30

<b>6 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>33</b>
6.1 Golfklappen	33
6.2 Golffronten	34
<b>Bijlagen</b>	
<b>A Tabellen</b>	<b>37</b>
<b>B Figuren</b>	<b>39</b>



## Lijst van Tabellen

Tabel 3.1	Waterdiepten op diep water ( $h_{\text{diep}}$ ) en bij de teen van de constructie ( $h_{\text{teen}}$ ).....	6
-----------	---	---

## Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Steenzetting onder het maaiveld (met eventuele gronddekking).....	3
Figuur 2.2	Belastingzones die resulteren uit de resultaten van het modelonderzoek van De Waal (1992) met een horizontaal voorland.....	4
Figuur 5.1	Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 1.....	10
Figuur 5.2	Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 2.....	10
Figuur 5.3	Stijghoogteverloop tijdens een golffront.....	11
Figuur 5.4	Verdeling van het aantal proeven over $h_{0,5L}/H_s$ (4300-serie).....	13
Figuur 5.5	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_s$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golfklappen).....	14
Figuur 5.6	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_{2\%}$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golfklappen).....	15
Figuur 5.7	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/h_{0,5L}$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golfklappen).....	16
Figuur 5.8	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_s$ en $U$ (serie 4300, golfklappen).....	17
Figuur 5.9	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_s$ en $U \cdot s_{\text{op}}^2$ voor golfklappen (serie 4300 en data waarop de oude formule is gebaseerd).....	17
Figuur 5.10	Relatie $x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golfklappen).....	18
Figuur 5.11	Lineaire trendlijnen bij relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_s$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golfklappen).....	19
Figuur 5.12	Dieptebeperkeheidsfactoren (serie 4300, golfklappen).....	21
Figuur 5.13	Relatie $x_{\phi_{\text{max},5\%}}/H_s$ en $s_{\text{op}}$ (serie 3300, golfklappen).....	22
Figuur 5.14	Relatie $(x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s) \tan \alpha$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golffronten).....	25
Figuur 5.15	Lineaire trendlijnen bij relatie $(x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s) \tan \alpha$ en $s_{\text{op}}$ (serie 4300, golffronten).....	25
Figuur 5.16	Dieptebeperkeheidsfactoren (serie 4300, golffronten).....	27
Figuur 5.17	Relatie $(x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s) \tan \alpha$ en $s_{\text{op}}$ (serie 3300, golffronten).....	28
Figuur 5.18	Belastinggroottes bij diep en ondiep water, voor golfklappen en golffronten (4300-serie).....	29
Figuur 5.19	Stijghoogteverloop tijdens het stijghoogtefront (zwarte lijn: bij diep water ; rode lijn: bij ondiep water, na uitsluitend correctie van $x_s$ met $f_{\text{od}}$ ).....	30
Figuur 5.20	Niveau van punt 7 ( $\phi_{\text{min}}$ ) in het stijghoogteverloop als functie van de golfsteilheid en het niveau van het taludoppervlak.....	30
Figuur 5.21	Stijghoogteverloop tijdens het front bij diep water (blauw) en voorstel voor ondiep water (groen).....	31



## Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
$\alpha$	-	Taludhelling
$\phi_b$	m	Hoogte van het stijghoogtefront
$\phi_{dip}$	m	Maximale gediptheid
$\phi_{dip,5\%}$	m	Gemiddelde $\phi_{dip}$ van 5 procent zwaarste golven (zwaarste op basis van $\phi_{dip}$ )
$\phi_{max}$	m	Maximale stijghoogte
$\theta_f$	°	Helling van het stijghoogtefront
$\xi_{op}$	-	Brekerparameter
$f_d$	-	Dieptebeperktheidsfactor voor diep water
$f_o$	-	Dieptebeperktheidsfactor voor ondiep water
$f_{o,d}$	-	Dieptebeperktheidsfactor
$g_d$	-	Grens tussen diep water en overgangsgebied
$g_o$	-	Grens tussen ondiep water en overgangsgebied
$h_{0,5L}$	m	Maatgevende waterdiepte op een halve diepwatergolflengte van de teen van de dijk
$H_{2\%,teen}$	m	Golfhoogte met 2% overschrijdingsfrequentie bij teen van constructie
$h$	m	Waterdiepte bij teen van constructie
$h_{diep}$	m	Waterdiepte bij diep water
$H_s$	m	Significante golfhoogte
$H_{s,diep}$	m	Significante golfhoogte op diep water
$H_{s,teen}$	m	Significante golfhoogte bij teen van constructie
$h_{teen}$	m	Waterdiepte bij teen van constructie (t.p.v. snijlijn talud en voorland)
$L_{op}$	m	Fictieve golflengte, berekend met $T_p$ bij de teen van het talud, alsof de waterdiepte oneindig is ( $\approx 1,56T_p^2$ )
$L_{gp}$	m	Golflengte bij de waterdiepte aan de teen van het talud [m]
$N_{front}$	-	Aantal golffronten gedurende een proef
$N_{front,5\%}$	-	5% van totaal aantal golffronten gedurende een proef
$N_{klap}$	-	Aantal golfklappen gedurende een proef
$S_{op}$	-	Golfsteilheid, gedefinieerd als $H_s/L_{op}$
$T_p$	s	Golfperiode bij piek van spectrum
$U$	-	Ursell-parameter op basis van golfhoogte en golflengte bij heersende waterdiepte aan de teen van het talud
$x_{\phi dip}$	m	Horizontale afstand van de locatie met het grootste stijghoogteverschil tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde)
$x_{\phi dip,5\%}$		Gemiddelde $x_{\phi dip}$ van 5 procent zwaarste golven (zwaarste op basis van $\phi_{dip}$ )
$x_{\phi max}$	m	Horizontale afstand van de locatie met de grootste stijghoogte tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde)
$x_{\phi max,5\%}$		Gemiddelde $x_{\phi max}$ van 5 procent zwaarste golven (zwaarste op basis van $\phi_{dip}$ )

<b>Symbol</b>	<b>Eenheid</b>	<b>Betekenis</b>
$x_i$	m	Horizontale coördinaat (ten opzichte van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud) van het punt waar de stijghoogte berekend wordt (landwaarts is positief)
$x_s$	m	Horizontale afstand van de voet van het stijghoogtefront tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde)
$y$	-	Piekfactor voor het JONSWAP-spectrum

# 1 Inleiding

Tijdens het toetsen van Friese steenzettingen in het verleden is gebleken dat onder sommige omstandigheden de belasting volgens Steentoets veel dieper onder water aangrijpt op een steenzetting, dan in werkelijkheid het geval is. Dit is het geval bij ondiepe voorlanden en relatief lange golven, zoals dat veel langs de Waddenzeekust voorkomt. Dat leidt ertoe dat de berekende maatgevende waterstand soms te hoog is, waardoor laaggelegen steenzettingen ten onrechte kunnen worden afgekeurd.

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

De waterdiepte kan invloed hebben op de locatie waar de maximale belasting optreedt, maar ook op de grootte en het aantal belastingen. Het grootste deel van dit rapport gaat over de locatie, maar in paragraaf 5.7.1 en 5.7.2 is specifieke aandacht geschonken aan de grootte en het aantal belastingen.

De Waal (1992) heeft modelonderzoek uitgevoerd naar de belasting op steenzettingen met een ondiep, vrijwel horizontaal voorland. Uit zijn onderzoeksresultaten blijkt dat de maximale belasting op steenzettingen nooit dieper optreedt dan de halve waterdiepte. Onder dit punt met maximale belasting neemt de belasting snel af.

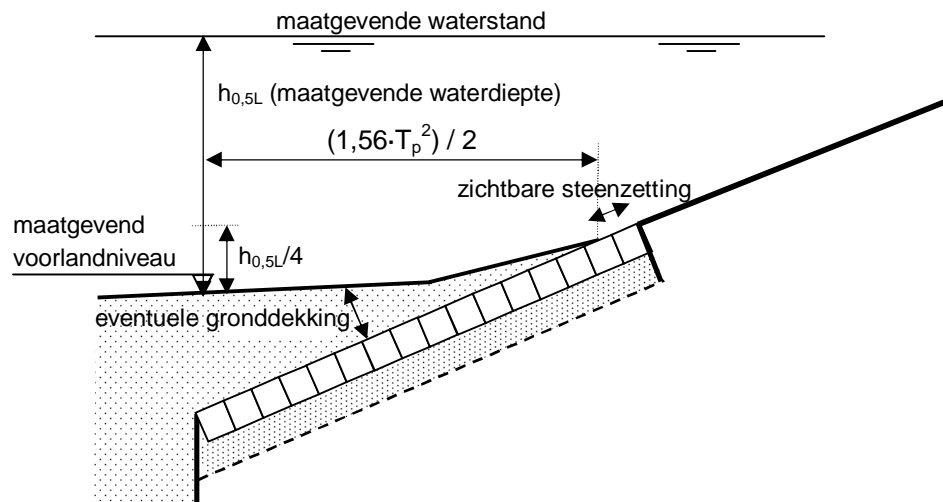
In dit rapport worden de metingen uit 1992 nogmaals geanalyseerd, specifiek gericht op deze problematiek. Gedeeltelijk wordt daarbij gebruik gemaakt van de door Deltares ontwikkelde analysesoftware 'AnalyseWave'. De resultaten van het onderzoek worden gebruikt om Steentoets te verbeteren.

In Steentoets wordt de locatie met de maximale belasting vooralsnog berekend met formules die in het verleden zijn ontwikkeld voor diep water, waarbij golven niet beperkt werden door de waterdiepte. In de onderhavige rapportage wordt toegewerkt naar een manier om Steentoets op een efficiënte wijze uit te breiden, zodat de locatie met de maximale belasting ook berekend kan worden bij ondiep water, waarin golven wél beperkt worden door de waterdiepte. Het onderzoek wordt uitgevoerd voor zowel golfklappen als golffronten.



## 2 Problematiek locatie maximale belasting

Bij het toetsen van steenzettingen met een ondiep voorland blijkt dat Steentoets soms de belasting laat aangrijpen op een te laag niveau op de steenzetting. Dat kan ertoe leiden dat een steenzetting wordt afgekeurd, terwijl er in werkelijkheid helemaal geen belasting van betekenis te verwachten is. Deze situatie treedt op als de golven dieptebeperkt zijn, de golfsteilheid klein is, en de steenzetting maar weinig boven het voorland uitsteekt. Diepte beperkte golven komen vooral voor bij flauwe en ondiepe voorlanden. De golfsteilheid is klein als de golfperiode groot is. Dit komt voor in de Waddenzee en mogelijk ook elders. De situatie wordt schematisch weergegeven in Figuur 2.1, met de maatgevende waterstand volgens de huidige Steentoets.



Figuur 2.1 Steenzetting onder het maaiveld (met eventuele gronddekking).

Het begrip 'maatgevend voorlandniveau' uit Figuur 2.1 wordt gedefinieerd als het niveau van het voorland op een afstand  $(1,56 \cdot T_p^2)/2$  van de teen van de dijk (CUR 1992). Deze afstand komt overeen met de denkbeeldige halve golfenlengte op diep water als deze berekend wordt met de  $T_p$  van bij de teen van de dijk. Deze afstand geeft een redelijke (conservatieve) schatting van de locatie die bepalend is voor het breken van de golven en het optreden van de significante golfhoogte bij de dijk. Het is gebaseerd op numerieke berekeningen met een eendimensionaal golfvoortplantingsmodel.

Dit maatgevende voorlandniveau is bepalend voor de golfbelasting bij de teen van de dijk. De 'maatgevende waterstand' is de waterstand waarbij de steenzetting volgens Steentoets het zwaarste belast wordt. De 'maatgevende waterdiepte'  $h_{0,5L}$  is het verschil tussen de maatgevende waterstand en het maatgevende voorlandniveau.

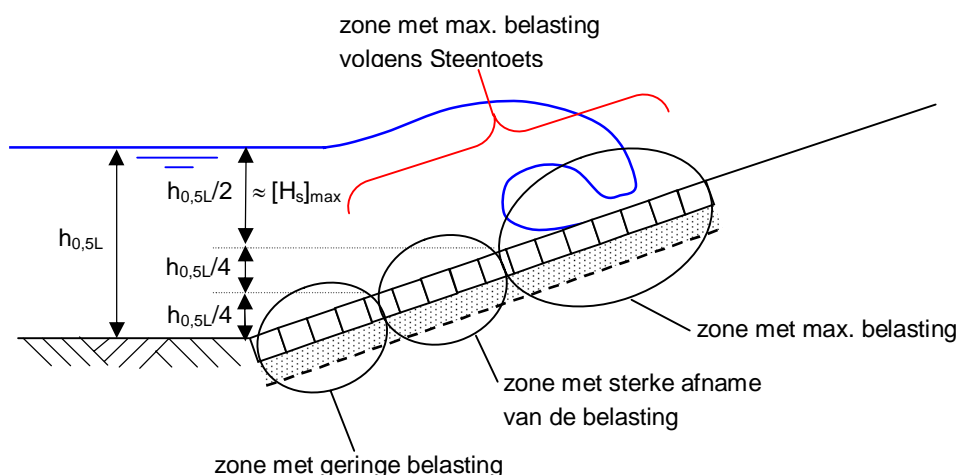
Er is sprake van diepte beperkte golven als de verhouding tussen de waterdiepte ( $h$ ) en de significante golfhoogte ( $H_s$ ) zodanig is dat er golven in het golfveld zijn gaan breken vanwege de beperkte diepte. Dit is het geval als  $h/H_s \approx 2$  à  $3$ . Naarmate de waterdiepte kleiner wordt, gaan eerst de allergrootste golven breken (bij  $h/H_s \approx 3$ ), en vervolgens gaan bij het steeds kleiner worden van de waterdiepte steeds lagere golven breken. Dat maakt dat aanvankelijk één op de 100 à 1000 golven breekt, en dat bij een kleinere waterdiepte dit oploopt tot één op

de 10 tot één op de drie golven. Dat leidt ertoe dat de golfhoogteverdeling niet meer overeenkomt met die volgens Rayleigh, omdat het aandeel hoge golven sterk is afgenomen. Als eerste benadering kan gesteld worden dat de golfperiode niet beïnvloed wordt door het breken van de golven of het ondieper worden van het voorland.

De Waal (1992) heeft modelonderzoek uitgevoerd naar de belasting op steenzettingen met een ondiep, vrijwel horizontaal voorland. Op basis van zijn onderzoeksresultaten zijn drie belastingzones te onderscheiden, zoals weergegeven in Figuur 2.2. Uit zijn metingen blijkt dat de maximale belasting op steenzettingen nooit dieper optreedt dan de halve waterdiepte (Figuur 2.2, 'zone met max. belasting'). Daaronder ligt een zone waarin de belasting snel afneemt ('zone met sterke afname van de belasting'). Het onderste gedeelte van de steenzetting wordt nauwelijks belast ('zone met geringe belasting').

Deze bevindingen zijn vooralsnog niet verwerkt in Steentoets, waardoor de situatie kan ontstaan waarin de locatie met de maximale belasting volgens Steentoets onrealistisch diep onder water kan liggen. In Steentoets wordt de locatie met de maximale belasting vooralsnog berekend met formules die in het verleden zijn ontwikkeld voor diep water, waarbij golven niet beperkt werden door de waterdiepte. Volgens Steentoets zal, afhankelijk van de taludhelling en golfsteilheid, de grootste belasting optreden in de zone van  $0,5H_s$  à  $1,5H_s$  onder water. Die zone overlapt met de zone die in Figuur 2.2 is aangeduid als 'zone met sterke afname van de belasting'.

In de onderhavige rapportage wordt toegewerkt naar een uitbreiding van Steentoets, zodat de locatie met de maximale belasting ook berekend kan worden wanneer golven wél beperkt worden door de waterdiepte. Er wordt onderzocht op welke locatie de maximale belasting op het talud optreedt, afhankelijk van parameters zoals waterdiepte, golfhoogte en golfperiode. Dit verband wordt afgeleid uit de metingen van 1992. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen golfklappen en golffronten.



Figuur 2.2 Belastingzones die resulteren uit de resultaten van het modelonderzoek van De Waal (1992) met een horizontaal voorland.

De locatie van de belasting is van groot belang voor het bepalen van de maatgevende waterstand als de bovenste overgangsconstructie van de steenzetting relatief laag ligt. Als Steentoets de diepte van de belasting overschat, zal de maatgevende waterstand te hoog zijn, waardoor doorgaans ook de golfcondities worden overschat. Dat kan ertoe leiden dat Steentoets een bekleding ten onrechte afkeurt.



### 3 Modelopstelling en proevenprogramma

In het modelonderzoek van 1992 is voor diverse geometrieën onderzoek gedaan naar onder andere het drukverloop op het talud, golfloop en golfoverslag. Wat betreft de geometrie van de constructies werd gevarieerd in de taludhelling (1:3 of 1:4), de berm breedte (0,4 m, 1,0 m of geen berm) en de aanwezigheid van een voorland (wel of niet aanwezig). Een voorland was aanwezig bij twee proevenseries. Uitsluitend deze twee series worden in deze rapportage beschouwd. Alle andere proevenseries blijven buiten beschouwing. Tevens blijven de golfloop- en golfoverslagmetingen buiten beschouwing. Het onderhavige onderzoek richt zich uitsluitend op de golf- en drukmetingen.

Het modelonderzoek van De Waal (1992) is uitgevoerd in de Scheldegoot van het voormalige Waterloopkundig Laboratorium (tegenwoordig Deltares). Deze golfgoot voor 2-dimensionaal onderzoek heeft een lengte van 55 m, een breedte van 1,00 m en een hoogte van 1,20 m. Alle in dit rapport vermelde afmetingen zijn modelwaarden tenzij uitdrukkelijk anders vermeld wordt.

#### 3.1 Geometrie modelopstelling

Het voorland was aanwezig in de 3300-serie en de 4300-serie. De geometrieën in die proevenseries verschilden van elkaar wat betreft de taludhelling.

- 3300-serie: met een taludhelling van 1:3
- 4300-serie: met een taludhelling van 1:4

In beide series had het voorland een hoogte van 0,35 m ten opzichte van de gootbodem, ter plaatse van de snijlijn van het voorland en het talud (in het vervolg aangeduid als 'teen van de constructie'). Het voorland heeft in beide series een helling van 1:100 en is dus 35 m lang (zie bijlage B.1). Afwijkingen in de geometrie bedragen minder dan 1 mm.

#### 3.2 Metingen

In het onderzoek van De Waal (1992) werden zowel drukken, golfeigenschappen, golfloop en golfoverslag gemeten. In het kader van het onderhavige onderzoek worden uitsluitend de drukmetingen en de metingen van de golfparameters beschouwd.

##### 3.2.1 Drukken

Het verloop van de stijghoogte over het talud werd gemeten met drukopnemers (DRO's). De drukopnemers bevonden zich in kokers, welke verzonken in het talud waren geplaatst: één in het voorland en één in het talud van de constructie. De kokers waren zodanig geplaatst dat ze in elkaars verlengde in de hartlijn van de goot lagen. De kokers vormden tezamen de leiding voor de kabels tussen de drukopnemers en de registratie-apparatuur.

De kokers werden afgedekt met afdekplaten, die precies in het vlak van het voorland en het talud lagen. In deze afdekplaten waren de drukopnemers gemonteerd. Er werden diverse voorgeboorde meetplaten gebruikt, met gaten h.o.h. 40 mm. De gaten hadden een diameter van 16 mm. Vanwege het beperkte aantal meetversterkers, kon van hoogstens 35 drukopnemers het signaal geregistreerd worden. De drukopnemers werden geplaatst in de 35 meest relevant geachte gaten. In de gaten waarin geen drukopnemers werden gemonteerd, werden zogenaamde dummy's geplaatst, zodat alle gaten nauwkeurig waren opgevuld.

In de bijlagen B.2 en B.3 (dichte groene en rode stippen) wordt van beiden proevenseries voor elke onderzochte waterstand weergegeven op welke locaties de drukopnemers gemonteerd waren.

Voor elke proef werd bij stil water iedere drukopnemer op nul gezet. Hierdoor wordt in principe de relatieve stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (SWL) gegeven. De combinaties drukopnemer-meetversterker zijn zodanig geïjkt dat bij verschillende waterstanden de verschillen in de meetsignalen voor alle kanalen even groot waren. In alle proeven werd bemonsterd met een frequentie van 50 Hz.

### 3.2.2 Golfcondities

Er is gebruik gemaakt van 2 golfhoogtemeters (GHM's) om de golfcondities tijdens de proevenseries te meten op diep water. Deze waren op ongeveer 7 meter vanaf het golfschot geplaatst. Het verloop van de golfhoogte over het voorland werd gemeten in een aparte serie calibratieproeven, waarbij op 18 locaties op het voorland golfhoogtemeters werden geplaatst. Bij het begin van het voorland (diep water) en bij de teen van de constructie werden kruisspectra bepaald. Alle proeven werden uitgevoerd met een standaard JONSWAP-spectrum ( $y = 3,3$ ).

Afwijkingen in de golfhoogte zijn kleiner dan 5 mm. Afwijkingen in de golfperiode bedragen minder dan 0.1 sec. Bij grotere afwijkingen werd de proef herhaald met verbeterde instellingen van het golfschot.

### 3.3 Proevenprogramma

De metingen met een ondiep voorland werden uitgevoerd in twee proevenseries: de 3300-serie met een talud van 1:3 en de 4300-serie met een talud van 1:4. Binnen de proevenseries werd gevarieerd in de waterdiepte. De waterdiepte bij de teen van de constructie werd gevarieerd tussen 0,18 m en 0,60 m. De waterdiepten op diep water zijn steeds 0,35 m groter. Een overzicht van de gehanteerde waterdiepten wordt gegeven in Tabel 3.1.

Proeven		$h_{\text{diep}}$ [m]	$h_{\text{teen}}$ [m]
(3300-serie)	(4300-serie)		
3301-3304, 3317	4301-4304, 4317	0,53	0,18
3305-3308	4305-4308	0,64	0,29
3309	4309	0,68	0,33
3310-3313	4310-4313	0,76	0,41
3314-3316, 3318-3322	4314-4316, 4318-4321	0,95	0,60

Tabel 3.1 Waterdiepten op diep water ( $h_{\text{diep}}$ ) en bij de teen van de constructie ( $h_{\text{teen}}$ ).

Binnen de proevenseries werd gevarieerd in de golfhoogte. De golfhoogten waren zodanig gekozen dat bij ongeveer de helft van de proeven dieptebeperking van de golven optrad. In dat geval breekt een deel van de golven boven het voorland en is de significante golfhoogte daardoor bij de teen van de dijk kleiner dan op diep water. Uiteraard breken de golven uiteindelijk ook op de dijk zelf.

Door tevens de golfperiode te variëren, lag de golfsteilheid bij de teen vrij gelijkmatig verspreid tussen 0,009 en 0,044. Een overzicht van het totale proevenprogramma is gegeven in de bijlagen A.1 en A.2 in de kolommen onder 'Randvoorwaarden'.

## 4 Resultaten

De meetdata van de proeven van 1992 is in de loop der tijd opgeslagen en gearhiveerd op enkele cd-rom's. De data van een deel van de proeven uit de 3300-serie bleek beschadigd en niet meer volledig inleesbaar. Diverse pogingen om de data toch weer zichtbaar te maken, leverden uiteindelijk niet het gewenste resultaat op. Daarom is besloten die proeven buiten beschouwing te laten. Het gaat om de proeven: 3303, 3308 en 3310 tot en met 3320. De betreffende proeven zijn rood gemarkeerd in de bijlagen A.1 en A.2. Van de overige proeven uit de 3300-serie is de data wel volledig te gebruiken. Dit geldt eveneens voor de gehele 4300-serie.

### 4.1 Drukmetingen

De meetdata uit 1992 wordt in dit onderzoek geanalyseerd met de door Deltares ontwikkelde analysesoftware 'AnalyseWave'. Dit programma is in staat de meetgegevens van een serie drukopnemers te vertalen naar een groot aantal karakteristieke parameters voor zowel golfklappen als golffronten. Deze parameters worden gegeven voor elke afzonderlijke golf. De analyse van de meetdata met AnalyseWave wordt toegelicht in paragraaf 5.3.

Voorafgaand aan de analyse met AnalyseWave waren enkele voorbereiding van de ruwe meetdata noodzakelijk:

- In 1992 werden de posities van de meetinstrumenten vastgelegd in een coördinatenstelsel met de oorsprong bij de voet van het voorland in de hartlijn van de goot. Ten behoeve van de analyse met AnalyseWave zijn de coördinaten omgezet naar een coördinatenstelsel met de oorsprong bij de teen van de constructie, in de hartlijn van de goot. Zie bijlagen B.2 en B.3.
- In AnalyseWave kan uitsluitend gerekend worden met drukopnemers onder de stilwaterlijn (SWL). Alle drukopnemers boven de SWL zijn daarom uit de datafiles verwijderd. In de bijlagen B.2 en B.3 zijn de verwijderde drukopnemers boven de SWL aangegeven met dichte rode stippen.
- In AnalyseWave kan uitsluitend gerekend worden met drukopnemers op een recht talud. De taluds van de constructie en van het voorland hebben in werkelijkheid verschillende hellingen. Om de drukopnemers op één lijn te krijgen, zijn aan de drukopnemers van het voorland fictieve locaties toegekend. De x-coördinaat blijft hetzelfde, maar de y-coördinaat wordt verlaagd tot het denkbeeldig doorgetrokken talud van de constructie. Zie bijlagen B.2 en B.3 (open groene stippen). Dit heeft geen consequenties voor de meetdata van de betreffende drukopnemers. Doordat de drukopnemers tijdens de ijking op nul zijn gezet bij de SWL, wordt de stijghoogte ten opzichte van SWL gemeten.
- Ondanks nauwkeurige ijking van de drukopnemers komt het soms voor dat drukopnemers kleine structurele afwijkingen vertonen gedurende de totale proefduur. Tevens komt het in enkele gevallen voor dat een goed geijkte drukopnemer na verloop van tijd een afwijking vertoont die in de loop van de proef steeds groter wordt. Omdat in AnalyseWave wordt gezocht naar maximale stijghoogteverschillen is het belangrijk dat de drukopnemers ten opzichte van elkaar niet afwijken. De afwijkingen zijn met visualiserende software opgespoord, waarna de ruwe data werd gecorrigeerd. Bijlage B.4 geeft voor een willekeurig tijdstip uit een willekeurige proef het verloop van de stijghoogte, voor (boven) en na (onder) correctie van de ruwe meetdata.

## 4.2 Metingen golfcondities

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de golfeigenschappen zoals die reeds in 1992 zijn bepaald. Per proef is de significante golfhoogte  $H_s$  en golfperiode  $T_p$  gemeten op diep water.

Voor de golfcondities op het voorland is een aparte serie proeven uitgevoerd, waarbij dezelfde golfschotsturing is gehanteerd als de proeven uit de 3300 en 4300 serie, maar er geen dijkwalud in de goot aanwezig was. Aan het uiteinde van de goot was er een golfdempend talud. Op basis van deze metingen is destijds de golfhoogte ter hoogte van de teen van de constructie bepaald.

De significante golfhoogte  $H_s$  op diep water en bij de teen en de golfperiode  $T_p$  op diep water worden per proef gegeven in de bijlagen A.1 (3300-serie) en A.2 (4300-serie) in de kolommen onder 'Randvoorwaarden'.

## 5 Analyse

### 5.1 Opzet analyse

In deze analyse wordt zowel voor golfklappen als golffronten gezocht naar een verband tussen de locatie van de maximale belasting op het talud enerzijds, en de golfsteilheid, waterdiepte en golfhoogte anderzijds. De locatie van de maximale belasting op het talud wordt in Steentoets vooralsnog berekend met een formule, die gebaseerd is op modelproeven met diep water. In de onderhavige analyse wordt toegewerkt naar een manier om deze formule uit te breiden zodat hij tevens gebruikt kan worden voor ondiep water.

De eerste stap van de analyse wordt uitgevoerd met de door Deltares ontwikkelde analysesoftware AnalyseWave. Het programma bepaalt voor elke golf of er behalve een golfhoogte tevens een golfklap is. Voor elke afzonderlijke golf bepaalt AnalyseWave vervolgens de karakteristieke parameters van het front en de klap. Uit de grote uitvoertabellen van AnalyseWave worden slechts de relevante waarden geselecteerd. Uiteindelijk levert dat per proef één waarde op per parameter. Deze waarden worden als uitgangspunt gebruikt bij de verdere analyse, waarbij voor golfklappen en golffronten gezocht wordt naar het verband tussen de locatie van de maximale belasting, de golfsteilheid, waterdiepte en golfhoogte.

Doordat van de 3300-serie een gedeelte van de proeven niet gebruikt kan worden, wordt de analyse in eerste instantie gebaseerd op de 4300-serie. De 3300-serie zal gebruikt worden om te vast te stellen of de metingen van de 3300-serie niet strijdig zijn met de op de 4300-serie gebaseerde conclusies.

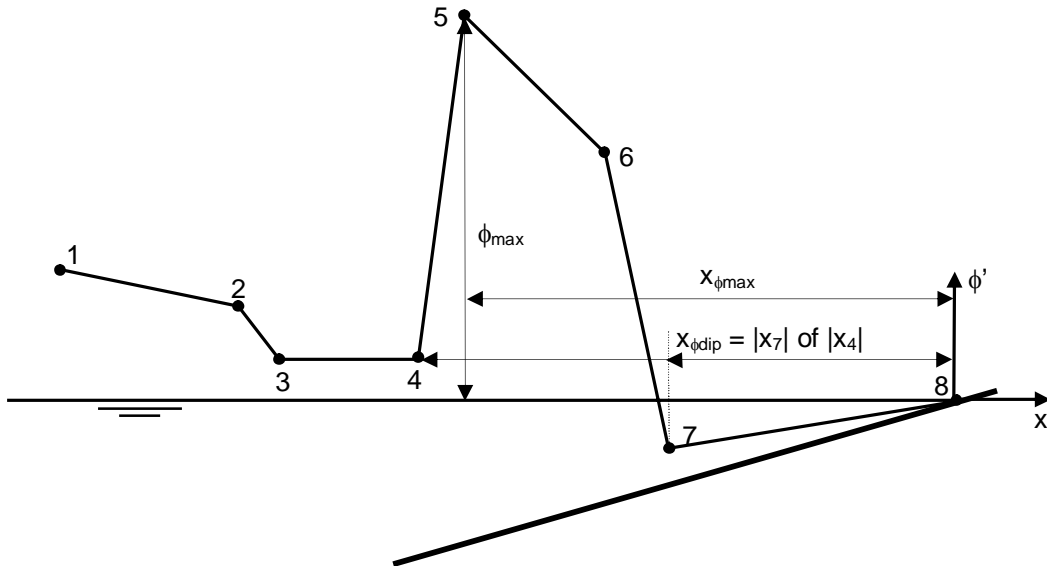
In dit hoofdstuk wordt gebruik gemaakt van drie begrippen, die als volgt verklaard worden:

- **Maatgevend voorlandniveau**  
Het maatgevende voorlandniveau is het niveau op een afstand van  $1,56 \cdot T_p^2 / 2$  van de dijk en is bepalend voor de golfbelasting bij de teen van de dijk. Als dit niveau meer dan  $3H_s$  onder water ligt, dan zullen de golven de dijk zonder te breken kunnen bereiken, waardoor bij loodrechte golfaanval de significante golfhoogte op diep water gelijk is als bij de teen van de dijk (bij benadering). Bij benadering is de maximale significante golfhoogte bij de teen van de dijk gelijk aan de helft van de maatgevende waterdiepte (CUR 1992).
- **Maatgevende waterstand**  
De 'maatgevende waterstand' is de waterstand waarbij de steenzetting volgens Steentoets het zwaarste belast wordt.
- **Maatgevende waterdiepte**  
De 'maatgevende waterdiepte'  $h_{0,5L}$  is het verschil tussen de maatgevende waterstand en het maatgevende voorlandniveau.

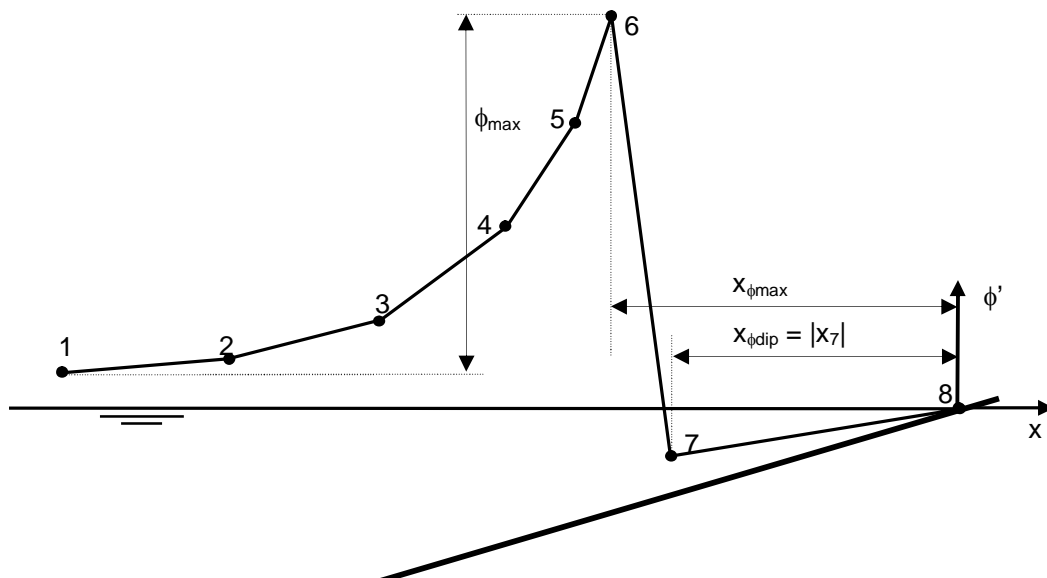
### 5.2 Locatie maximaal stijghoogteverschil

Tijdens golfaanval is niet de grootste golfklap maatgevend, maar het maximale stijghoogteverschil in de filterlaag onder de steenzetting. Omdat in de modelopstelling geen steenzetting en filterlaag aanwezig is, wordt het maximale stijghoogteverschil in de filterlaag theoretisch benaderd door AnalyseWave. Dit theoretisch benaderde maximale

stijghoogteverschil wordt aangeduid met de parameter  $\phi_{dip}$ . De locatie van  $\phi_{dip}$  wordt aangeduid met de parameter  $x_{\phi dip}$ .  $x_{\phi dip}$  is de horizontale afstand van de locatie met het maximale stijghoogteverschil tot de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud.



Figuur 5.1 Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 1.

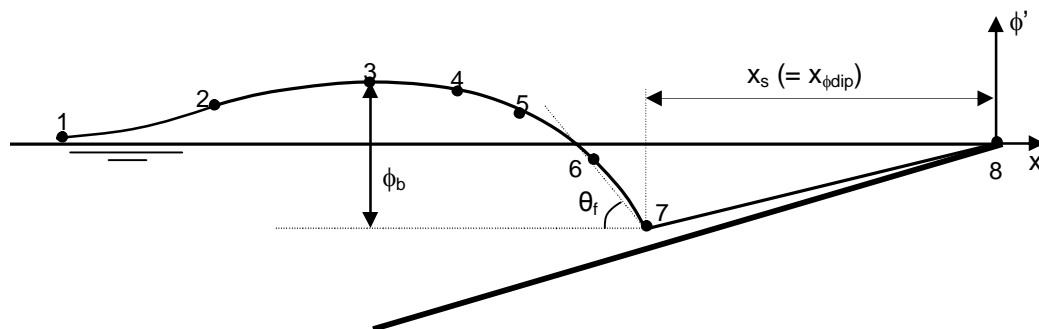


Figuur 5.2 Stijghoogteverloop tijdens golfklap type 2.

Het maximale stijghoogteverschil kan optreden op de volgende locaties:

- Aan de zeezijde van golfklap type 1. Dit is in punt  $x_4$  van Figuur 5.1.
- Aan de landzijde van golfklap type 1. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 5.1.
- Aan de landzijde van golfklap type 2. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 5.2.
- Aan de landzijde van een hoog stijghoogtefront. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 5.3.
- Aan de landzijde van een steil stijghoogtefront. Dit is in punt  $x_7$  van Figuur 5.3.

Het stijghoogteverloop van golfklap type 1 is het gevolg van een overstortende breker, die op enige afstand van het front neerkomt. Het stijghoogteverloop van golfklap type 2 is het gevolg van een golfklap op de voet van het front. Binnen golffronten wordt onderscheid gemaakt tussen een hoog en een steil stijghoogtefront. Een hoog stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een grote waarde van  $\phi_b$  en een niet al te grote waarde van  $\theta_f$ . Een steil stijghoogtefront wordt gekenmerkt door een niet al te grote waarde van  $\phi_b$  en een grote waarde van  $\theta_f$ .



Figuur 5.3 Stijghoogteverloop tijdens een golfklap.

### 5.3 Analyse meetdata met AnalyseWave

De meetdata van de proevenseries is geanalyseerd met de analysesoftware AnalyseWave. Deze software bepaalt per proef allereerst het totale aantal golven ter plaatse van de constructie. Het programma bepaalt voor elke golf of er behalve een golf front tevens een golfklap is. Voor elke afzonderlijke golf bepaalt AnalyseWave vervolgens de karakteristieke parameters. De parameters worden gegeven in enkele grote uitvoertabellen. Voor een gedetailleerde beschrijving van het rekenproces van AnalyseWave wordt verwezen naar bijlage G van Klein Breteler (2006).

Als invoer werd de meetdata gebruikt, die reeds was voorbereid en gecorrigeerd zoals beschreven in paragraaf 4.1.

Het programma is geschikt voor de analyse van data uit diverse golf faciliteiten van Deltares. Voor dit onderzoek in de Scheldegoot worden de volgende instellingen gebruikt.

- Goot: Het programma wordt ingesteld op 'Scheldegoot', zodat specifieke Scheldegoot-instellingen gebruikt worden. Voor het bepalen van  $\phi_{dip}$  gebruikt het programma een 'fictieve' leklengte van 0,37 m. Omdat in de modelopstelling uitsluitend een betonnen talud aanwezig was en geen steenzetting en filterlaag wordt voor het berekenen van  $\phi_{dip}$  gerekend met deze fictieve leklengte. Deze fictieve leklengte komt overeen met een leklengte van ongeveer een halve meter in werkelijkheid, en dat sluit aan op de wens om de aandacht vooral te richten op de relatief open steenzettingen die gevoelig zijn voor golfklappen. De waarde is echter zo gekozen dat ook een analyse met golf fronten goed mogelijk is.
- Intervallen: Voor het bepalen van het moment waarop de golfklap plaatsvindt, worden golven verdeeld in een aantal intervallen (zie paragraaf G.5.1 van Klein Breteler, 2006). In deze analyse worden golven verdeeld in 20 intervallen per golf.

Per proef geeft AnalyseWave drie uitvoerbestanden:

- overzicht van het aantal golf fronten en golfklappen.
- tabel met 69 karakteristieke parameters voor golfklappen
- tabel met 18 karakteristieke parameters voor golf fronten.

Merk op dat elke golf een front heeft, maar dat niet bij elk front sprake is van een klap. In de uitvoertabel voor golfklappen wordt dus een selectie beschouwd van de golven uit de uitvoertabel voor golffronten. Golven met zowel een front als een klap, hebben overigens niet per definitie gelijke waarden voor dezelfde parameters. Binnen één golf is de  $x_{\phi_{dip}}$  van de klap veelal anders dan de  $x_{\phi_{dip}}$  van het front.

## 5.4 Selectie uitvoer AnalyseWave

In dit onderzoek wordt als uitgangspunt genomen dat zowel bij golffronten als golfklappen de 5% zwaarste golven (op basis van  $\phi_{dip}$ ) maatgevend zijn. In de golffronten- en golfklappen-tabellen worden de golven daarom gesorteerd op  $\phi_{dip}$ , waarna de 5% golven met de grootste  $\phi_{dip}$  geselecteerd worden. Van de geselecteerde golven wordt voor golfklappen vervolgens het gemiddelde bepaald van  $x_{\phi_{max}}$  en  $x_{\phi_{dip}}$ . Deze werkwijze sluit aan op de methode die gebruikt is in eerder onderzoek (zoals Klein Breteler, 2006), dat geleid heeft tot de huidige formules in Steentoets. Voor golffronten wordt het gemiddelde alleen bepaald van  $x_{\phi_{dip}}$ .

### Voorbeeld: proef 4301

In proef 4301 worden 833 golven geteld. Er zijn dus 833 golffronten ( $n_{front}$ ). Van die 833 golven is bij 256 golven tevens sprake van een golfklap ( $n_{klap}$ ). 5% van 833 golven, is 41 golven ( $n_{front,5\%}$ ). Van de 41 golfklappen met de grootste  $\phi_{dip}$  is de gemiddelde  $x_{\phi_{dip}}$  0,132 m ( $x_{\phi_{dip,5\%}}$ ) en de gemiddelde  $x_{\phi_{max}}$  is 0,101 m ( $x_{\phi_{max,5\%}}$ ). Van de 41 golffronten met de grootste  $\phi_{dip}$  is de gemiddelde  $x_{\phi_{dip}}$  0,288 m ( $x_{\phi_{dip,5\%}}$ ).

Per proef worden de waarden van  $n_{front}$ ,  $n_{front,5\%}$ ,  $n_{klap}$ ,  $x_{\phi_{max,5\%}}$  en  $x_{\phi_{dip,5\%}}$  gegeven in de bijlagen A.1 en A.2 onder 'Analyse meetgegevens'.

## 5.5 Analyse golfklappen

### 5.5.1 Algemeen

De locatie op het talud met de maximale druk bij golfklappen wordt in Steentoets berekend volgens de onderstaande formule. De formule is ontwikkeld voor diep water. De waarde voor  $x_{\phi_{max}}$  die uit de formule volgt, wordt in Steentoets vervolgens gebruikt om  $x_{\phi_{dip}}$  te berekenen.

$$\frac{x_{\phi_{max}}}{H_s} = \min \left( \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9 ; 6,5 \right)$$

Daarin is:

$x_{\phi_{max}}$  = horizontale afstand van de locatie met de grootste stijghoogte tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde) [m]

$H_s$  = significante golfhoogte [m]

$s_{op}$  = golfsteilheid [m]

Gezien de oorsprong van de formule geldt:  $x_{\phi_{max}} = x_{\phi_{max,5\%}}$   
 $H_s = H_{s,teen}$

In verband met de implementatie van de onderzoeksresultaten in Steentoets wordt van de metingen van 1992 in eerste instantie  $x_{\phi_{max,5\%}}/H_s$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-] (zoals weergegeven in Figuur 5.5, welke wordt toegelicht in paragraaf 5.5.3). Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep water waarin golven breken en diep water waarin golven niet breken. Op basis van de verhouding tussen de trendlijnen door de meetpunten voor diep en ondiep water, kan



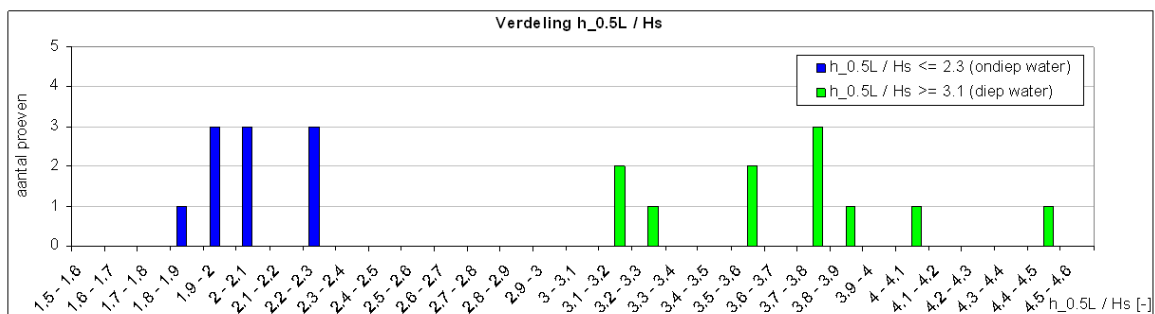
relatief eenvoudig een factor ontwikkeld worden (paragraaf 5.5.9), die aan de formule voor diep water kan worden toegevoegd, zodat die behalve voor diep water tevens geschikt wordt voor ondiep water.

Hoewel het verband tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  [-] en  $s_{op}$  de minst gecompliceerde implementatie in Steentoets tot gevolg heeft, werden de meetresultaten van 1992 tijdens het onderzoek ook op vele andere manieren tegen elkaar uitgezet om vast te stellen of dat andere relevante resultaten zou geven. Enkele voor de hand liggende verbanden worden in de volgende paragrafen toegelicht. In de grafieken worden op de assen uitsluitend dimensieloze parameter(combinatie)s geplaatst.

### 5.5.2 Grens tussen brekende en niet brekende golven

De geselecteerde gegevens uit de output van AnalyseWave zijn op diverse manieren tegen elkaar uitgezet. In de grafieken wordt bij de metingen van 1992 onderscheid gemaakt tussen diep en ondiep water. Het onderscheid tussen wel en niet breken van golven wordt bepaald door de verhouding tussen  $h_{0,5L}$  en  $H_s$ . Vele afzonderlijke golven zullen breken als  $h_{0,5L}/H_s \leq 2$  en vrijwel geen enkele golf in het golfveld breekt als  $h_{0,5L}/H_s \geq 3$ . Daartussen ligt een overgangsgebied, waarin sommige golven breken.

Voor alle proeven is de grootte bepaald van  $h_{0,5L}/H_s$ . Voor de 4300-serie wordt de verdeling van  $h_{0,5L}/H_s$  gegeven in Figuur 5.4. Merk op dat gebruik wordt gemaakt van de waterdiepte op een afstand van  $h_{0,5L} = 1,56T_p^2/2$  vanaf de teen van het talud (zie Hoofdstuk 2). Een volledig overzicht van de waarden van  $h_{0,5L}/H_s$  is gegeven in de bijlagen A.1 en A.2.



Figuur 5.4 Verdeling van het aantal proeven over  $h_{0,5L}/H_s$  (4300-serie)

Voor de proeven waarin  $h_{0,5L}/H_s \geq 3,1$  wordt aangenomen dat er geen golven breken. Immers, in alle gevallen geldt dat  $h_{0,5L}/H_s \geq 3$ . Bij de proeven waarin  $h_{0,5L}/H_s \leq 2$  wordt aangenomen dat vele golven breken.

Bij de proeven waarin  $2 < h_{0,5L}/H_s < 2,3$  ligt het iets gecompliceerder. Deze proeven liggen in het overgangsgebied, aan de kant van 'breken'. Het grootste gedeelte van de golven zal breken, waarbij het breken het eerst zal optreden bij de golven met de grootste golfhoogten. Ten behoeve van deze analyse zijn de 5% zwaarste golven (op basis van de  $\phi_{dip}$ ) geselecteerd. Omdat deze individuele zware golven veelal een relatief grote golfhoogte hebben ten opzichte van  $H_s$  zal in het overgangsgebied van de beschouwde 5% zwaarste golven in werkelijkheid een groter percentage breken dan op basis van  $H_s$  vermoed wordt. De proeven waarin  $2 < h_{0,5L}/H_s \leq 2,3$  worden daarom beschouwd als proeven met brekende golven.

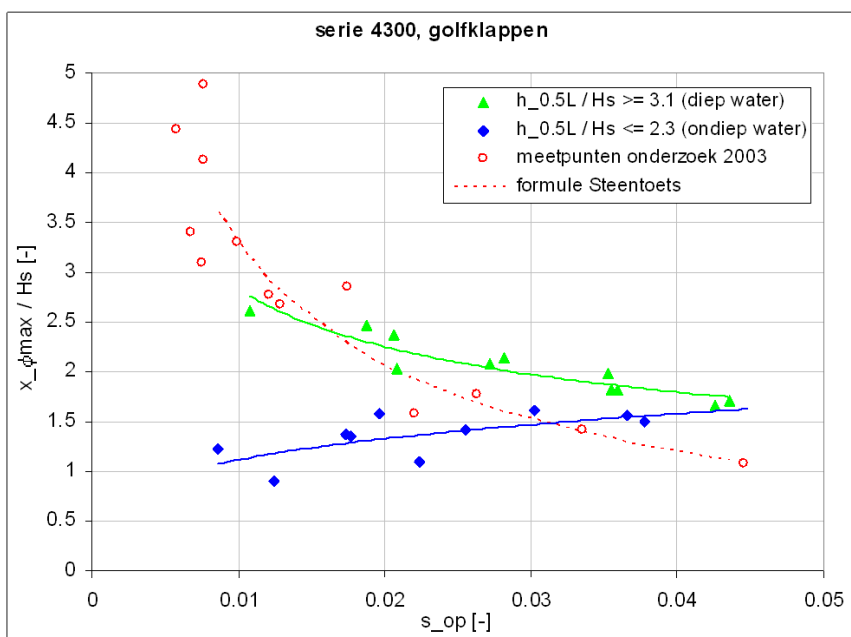
### 5.5.3 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$ en $s_{op}$

In Figuur 5.5 wordt  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-]. De grafiek toont een opvallend onderscheid tussen de proeven waarin  $h_{0,5L}/H_s \leq 2,3$  (blauwe meetpunten en trendlijn) en

$h_{0,5L}/H_s \geq 3,1$  (groene meetpunten en trendlijn). De punten voor diep water liggen hoger dan de punten voor ondiep water. Bij een lage golfsteilheid liggen de punten voor diep water ongeveer tweemaal zo hoog als de punten voor ondiep water. De verschillen tussen diep en ondiep water worden kleiner naarmate de golfsteilheid toeneemt.

Er is gebruik gemaakt van machtstrendlijnen, om aan te sluiten op de formule voor diep water die reeds in Steentoets wordt gebruikt (paragraaf 5.5.1). De formule uit Steentoets is in de grafiek geplot (rode stippellijn) om de metingen van 1992 te kunnen vergelijken met de huidige formule van Steentoets. De metingen bij diep water geven in hoofdlijnen dezelfde trend als de formule van Steentoets. Hoewel de richtingscoëfficiënten enigszins afwijken, tonen zowel de formule als de metingen een dalend verloop bij een vergelijkbare orde van grootte. De metingen bij ondiep water tonen daarentegen een tegengesteld verloop.

In Figuur 5.5 worden tevens de meetpunten weergegeven waarop de formule van Steentoets is gebaseerd (open rode stippen). Deze meetpunten zijn het resultaat van een proevenserie uit 2003 met diep water. De meetpunten, voor diep water, uit de proeven van 1992 en 2003 tonen een vergelijkbare trend. Opgemerkt moet worden dat de resultaten uit 2003 nauwkeuriger zijn dan die van 1992, omdat toen meer drukopnemers in de modelopstelling waren geplaatst en er met een hogere frequentie bemonsterd is.

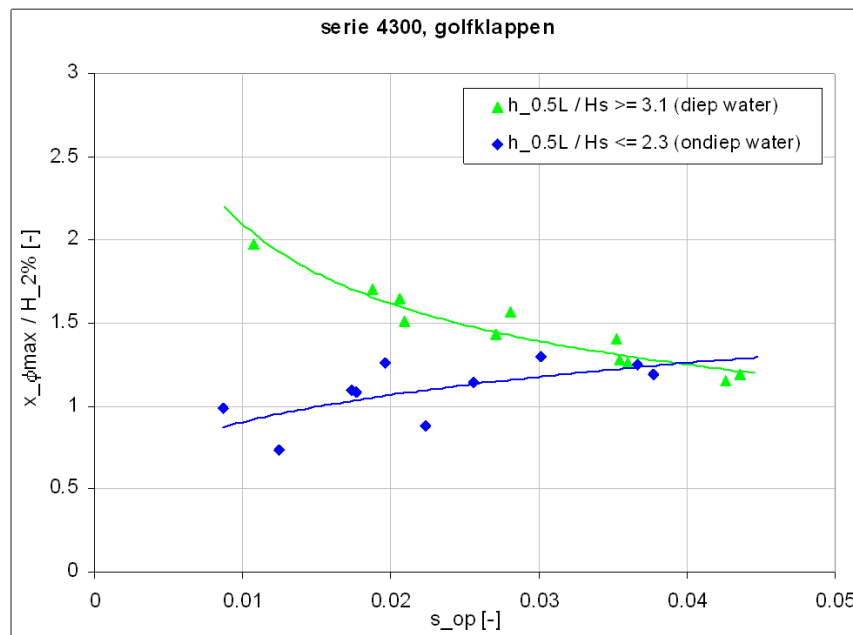


Figuur 5.5 Relatie  $x_{\phi\max,5\%}/H_s$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golfklappen)

#### 5.5.4 Relatie tussen $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$ en $s_{op}$

Het is realistischer om  $x_{\phi\max,5\%}$  te normeren met  $H_{2\%}$  in plaats van met  $H_s$ . In dit onderzoek zijn de 5% zwaarste golven, op basis van de  $\phi_{dip}$ , geselecteerd. Omdat die golven een relatief grote golfhoogte hebben, is het realistischer om  $x_{\phi\max,5\%}$  te delen door een golfhoogte die representatief is voor die zwaarste 5% golven.  $H_{2\%}$  is daarvoor een goede benadering.

De waarden voor  $H_{2\%}$  werden, op basis van gegevens uit bijlagen A.1 en A.2, berekend met de door Deltares ontwikkelde software BREAKWAT 3.3. Daarin wordt  $H_{2\%}$  berekend volgens de methode van Battjes en Groenendijk (2000).



Figuur 5.6 Relatie  $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golfklappen)

In Figuur 5.6 wordt  $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-]. Doordat  $H_{2\%}$  1,23 tot 1,45 maal groter is dan  $H_s$  liggen de waarden van  $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$  lager dan  $x_{\phi\max,5\%}/H_s$ . De verhouding tussen de meetpunten bij diep en ondiep water is in Figuur 5.6 daarentegen niet significant anders dan in Figuur 5.5.

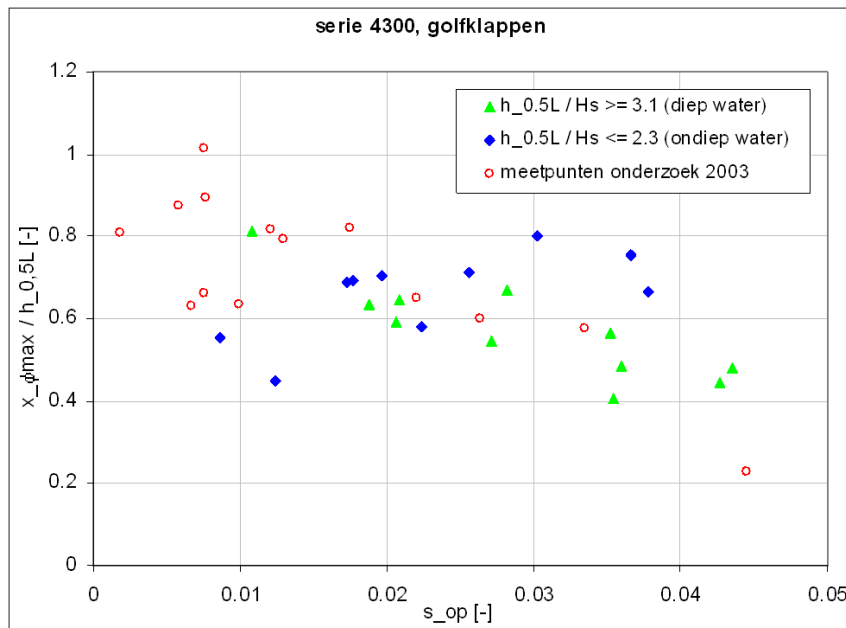
In Steentoets wordt reeds gebruik gemaakt van een formule met de factor  $x_{\phi\max}/H_s$  (paragraaf 5.5.1). In combinatie met het geringe verschil tussen  $x_{\phi\max,5\%}/H_s$  en  $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$  wordt in de analyse  $x_{\phi\max,5\%}/H_{2\%}$  niet verder beschouwd.

#### 5.5.5 Relatie tussen $x_{\phi\max,5\%}/h_{0,5L}$ en $s_{op}$

In Figuur 5.7 wordt de factor  $x_{\phi\max,5\%}/H_s$  uit Figuur 5.5 gedeeld door de factor  $h_{0,5L}/H_s$  met als resultaat de factor  $x_{\phi\max,5\%}/h_{0,5L}$ .

$$\frac{\left(\frac{x_{\phi\max}}{H_s}\right)}{\left(\frac{h_{0,5L}}{H_s}\right)} = \frac{x_{\phi\max}}{h_{0,5L}}$$

Het verband tussen  $x_{\phi\max,5\%}/h_{0,5L}$  [-] en  $s_{op}$  [-] is uitgezet in Figuur 5.7. In de grafiek zijn zowel de metingen uit 1992 voor diep (blauwe  $\diamond$ ) en ondiep (groene  $\Delta$ ) water als de metingen uit 2003 (open rode stippen) weergegeven. De diverse type meetpunten vertonen minder samenhang dan in Figuur 5.5. Het verband tussen  $x_{\phi\max,5\%}/h_{0,5L}$  en  $s_{op}$  zal in de analyse niet verder beschouwd worden.



Figuur 5.7 Relatie  $x_{\phi_{\max,5\%}}/h_{0,5L}$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golfklappen)

## 5.5.6 Relatie tussen $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$ en Ursell-parameter

Als alternatief op bovenstaande analyse is de relatie gezocht tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en de Ursell-parameter. De Ursell-parameter is als volgt gedefinieerd:

$$U = \frac{H_s L_{gp}^2}{h_{teen}^3}$$

Daarin is:

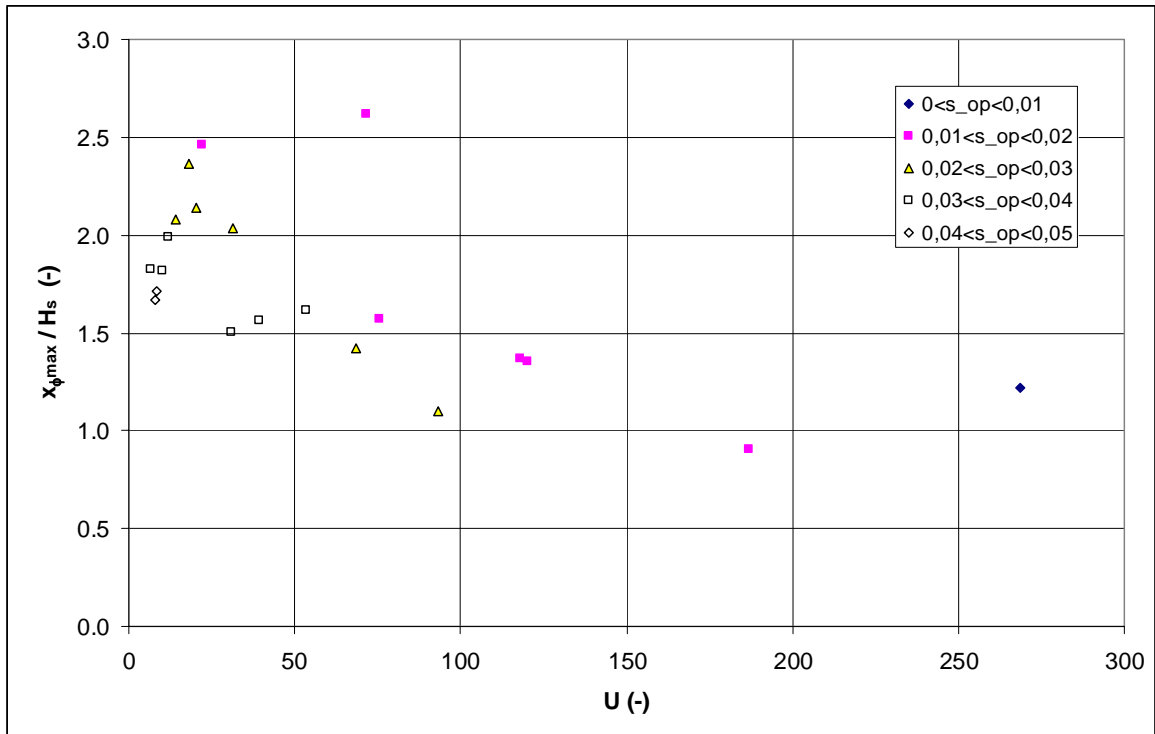
- $H_s$  = significante golfhoogte bij de teen van het talud [m]
- $L_{gp}$  = golflengte bij de waterdiepte aan de teen van het talud [m]
- $h_{teen}$  = waterdiepte bij de teen van het talud [m]
- $U$  = Ursell-parameter op basis van golfhoogte en golflengte bij heersende waterdiepte aan de teen van het talud [-]

Deze dimensieloze parameter is onder andere een maat voor de vorm van de golven. Als  $U \approx 0$  dan zijn de golven sinusvormig met even hoge toppen als dat de dalen diep zijn. Naarmate  $U$  toeneemt worden de toppen van de golven relatief hoog ten opzichte van de diepte van de dalen. Als  $U = 25$  steekt de top van de golf ongeveer 60% van de golfhoogte boven water uit, terwijl dit bij  $U = 50$  al is toegenomen tot bijna 70%. Bij  $U = 150$  is dit 81%. De diepte van de golfdalen is het complement hiervan, dus respectievelijk 40%, 30% en 19%.

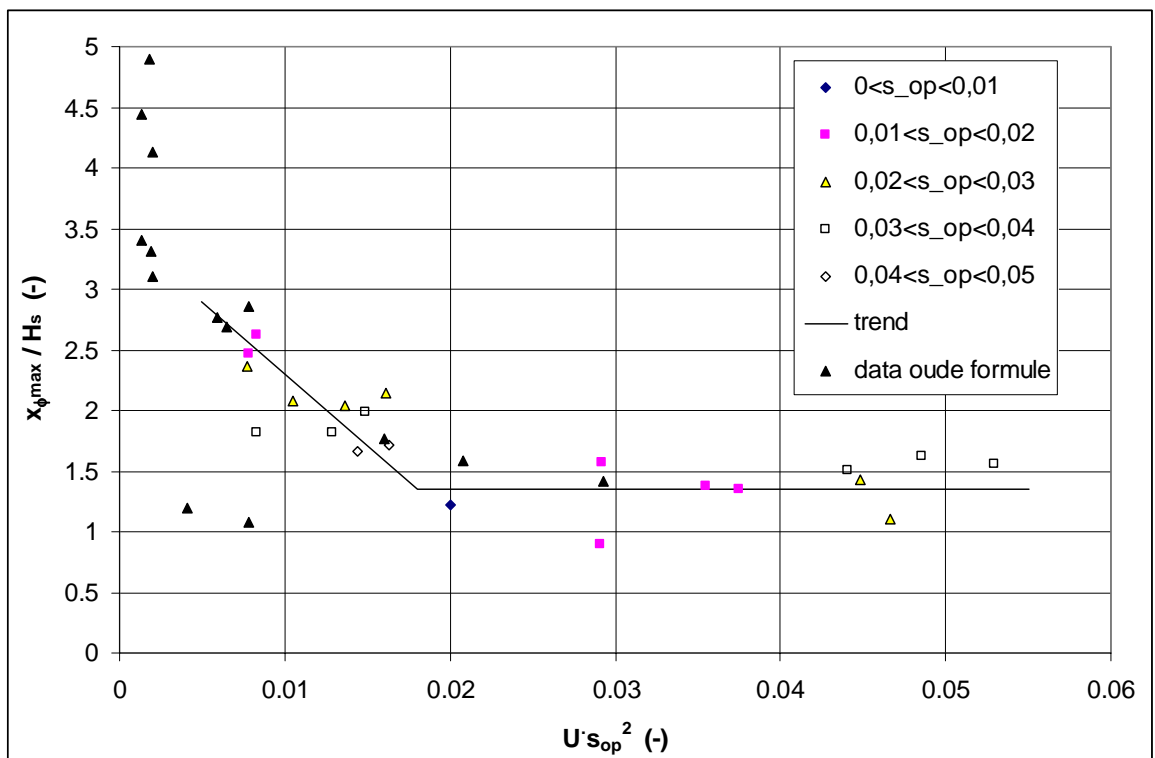
Men kan zich voorstellen dat naarmate de golfdalen minder diep zijn, ook de golfklappen minder diep onder water terechtkomen. Daarom lijkt het zinnig om de metingen uit te zetten tegen  $U$ .

De relatie tussen de dimensieloze locatie van de golfklap ( $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$ ) en de Ursell-parameter ( $U$ ) is te zien in Figuur 5.8. De verschillende symbolen geven de verschillende waarden van de golfsteilheid weer. Het blijkt dat punten met de grootste golfsteilheid links in puntenwolk liggen, en de punten met de kleinste golfsteilheid rechts. Daardoor kan de spreiding in de figuur verkleind worden door de golfsteilheid mee te nemen in de parameter op de x-as. Het

beste resultaat blijkt te kunnen worden gerealiseerd door op de horizontale as  $U \cdot s_{op}^2$  uit te zetten.



Figuur 5.8 Relatie  $x_{\phi,max,5\%}/H_s$  en  $U$  (serie 4300, golfklappen)



Figuur 5.9 Relatie  $x_{\phi,max,5\%}/H_s$  en  $U \cdot s_{op}^2$  voor golfklappen (serie 4300 en data waarop de oude formule is gebaseerd)

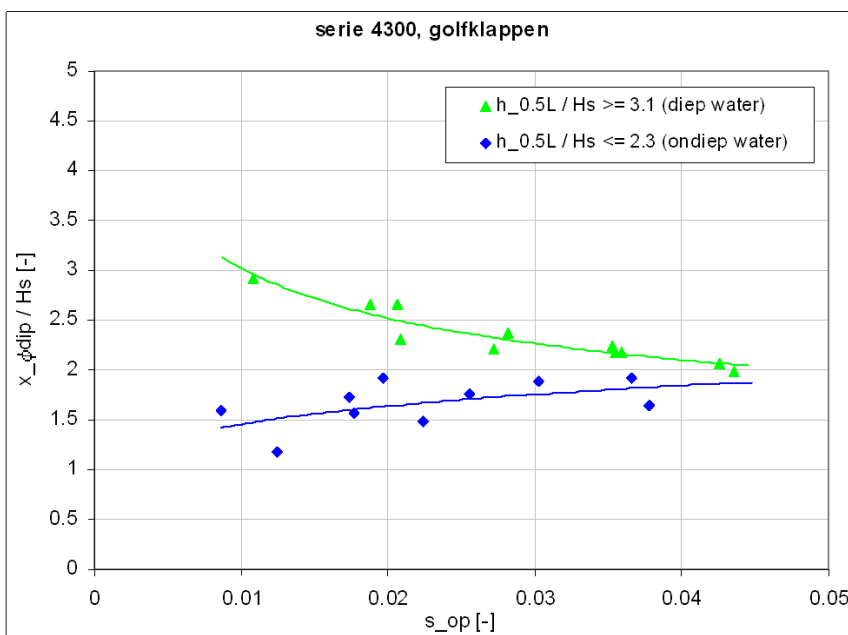
De combinatie van  $U$  en  $s_{op}$  is eigenlijk wat vreemd, omdat in  $U$  de golflengte bij de heersende waterdiepte is opgenomen, terwijl  $s_{op}$  gedefinieerd is als de verhouding tussen de significante golfhoogte aan de teen van het talud en de golflengte op diepwater op basis van de piekperiode bij de teen van het talud:

$$s_{op} = \frac{H_s}{L_{op}} = \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2}$$

Met:

- $H_s$  = significante golfhoogte bij de teen van het talud [m]
- $T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum bij de teen van het talud [m]
- $L_{op}$  = fictieve golflengte, berekend met  $T_p$  bij de teen van het talud, alsof de waterdiepte oneindig is ( $\approx 1,56T_p^2$ ) [m]
- $g$  = versnelling van de zwaartekracht [ $m/s^2$ ]

In Figuur 5.9 is het resultaat te zien, waarbij tevens de meetpunten zijn gegeven waarop de oorspronkelijke formule is gebaseerd. Merk op dat  $U \cdot s_{op}^2$  gelijk is aan  $(H_s/h_{teen})^3$  bij relatief diep water, en bij ondiep water hebben  $U \cdot s_{op}^2$  en  $(H_s/h_{teen})^3$  een hoge correlatie.



Figuur 5.10 Relatie  $x_{\phi dip,5\%}/H_s$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golfklappen)

Uit de figuur blijkt dat de meeste punten netjes in een trend passen. Helaas zijn er een aantal punten die er helemaal buiten vallen, namelijk bij kleine waarden van  $U \cdot s_{op}^2$ , terwijl in Figuur 5.5 alle meetpunten beter bij de trend aansluiten.

Daarom wordt er van afgezien om de Ursell-parameter te gebruiken in de beoogde formule.

### 5.5.7 Relatie tussen $x_{\phi dip,5\%}/H_s$ en $s_{op}$

Het is wellicht nauwkeuriger om uit te gaan van  $x_{\phi dip}$  in plaats van  $x_{\phi max}$ . In Figuur 5.10 wordt  $x_{\phi dip,5\%}/H_s$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-]. Doordat  $x_{\phi dip,5\%}$  groter is dan  $x_{\phi max,5\%}$  liggen de waarden van  $x_{\phi dip,5\%}/H_s$  enigszins hoger dan  $x_{\phi max,5\%}/H_s$ . De verhouding tussen de trendlijnen van diep en ondiep water is daarentegen in Figuur 5.10 niet significant anders dan in Figuur 5.5.

In Steentoets wordt reeds gebruik gemaakt van een formule met de factor  $x_{\phi_{\max}}/H_s$ . In combinatie met het geringe verschil tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en  $x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s$  wordt in de analyse  $x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s$  niet verder beschouwd.

### 5.5.8 Gekozen dimensieloze parameter: $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$

In het vervolg van deze analyse voor golfklappen wordt uitsluitend het verband tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en  $s_{op}$  beschouwd.

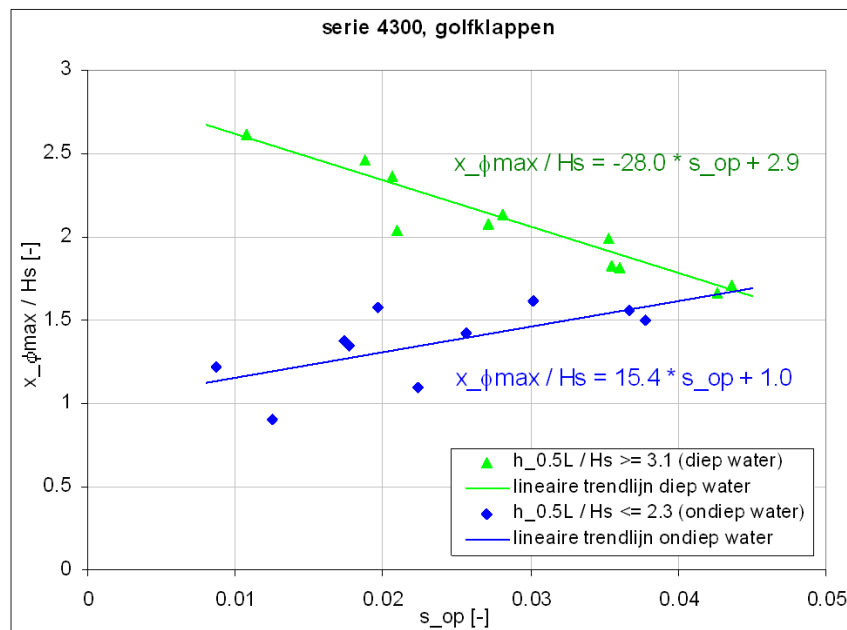
De figuren waarin  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$ ,  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_{2\%}$  en  $x_{\phi_{\text{dip},5\%}}/H_s$  zijn uitgezet tegen  $s_{op}$  vertonen een vergelijkbaar beeld wat betreft de verhouding tussen de trendlijnen voor diep en ondiep water. Het verband tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en  $s_{op}$  geeft de minst gecompliceerde implementatie van de onderzoeksresultaten in Steentoets. Het verband tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/h_{0,5L}$  en  $s_{op}$  vertoont meer spreiding dan de andere verbanden en wordt daarom niet verder beschouwd.

Figuur 5.11 geeft nogmaals het verband tussen  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en  $s_{op}$ . De machtstrendlijnen uit Figuur 5.5 zijn vervangen door lineaire trendlijnen. Hoewel de formule uit Steentoets (paragraaf 5.5.1) een machtsfunctie betreft, is op basis van de meetpunten uit 1992 evenzeer een lineaire trendlijn mogelijk. Het voordeel is dat hierdoor eenvoudigere formules verkregen worden.

De lineaire trendlijnen worden gegeven door de volgende formules:

$$\text{Diep water: } \frac{x_{\phi_{\max}}}{H_s} = -28,0 \cdot s_{op} + 2,9$$

$$\text{Ondiep water: } \frac{x_{\phi_{\max}}}{H_s} = 15,4 \cdot s_{op} + 1,0$$



Figuur 5.11 Lineaire trendlijnen bij relatie  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golfklappen)

Extrapolatie van de trend naar zeer grote golfsteilheden ( $s_{op} \gg 0,045$ ) zou kunnen leiden tot de conclusie dat de  $x_{\phi_{\max}}$  bij ondiep water in zo'n geval kleiner wordt dan bij diep water.

Hiervoor is echter geen bevestiging beschikbaar vanuit de ligging van de meetpunten. Gecombineerd met het feit dat veel steenzettingen in Zeeland thans ontworpen worden met maatgevende hydraulische belastingen met vrij grote golfsteilheid (zelfs groter dan 0,06), maakt dat het voortzetten van de trend in Figuur 5.11 naar grote golfsteilheden ongewenste consequenties voor de ontwerpen kan geven.

Vanwege het ontbreken van meetpunten met  $s_{op} > 0,045$  en het ontbreken van theoretische overwegingen over het verloop van de lijnen in Figuur 5.11 voor  $s_{op} > 0,045$ , wordt voorlopig gesteld dat voor grote golfsteilheden er geen invloed is van de diepte van het voorland.

De meetpunten uit 2003 worden in de verdere analyse niet beschouwd. In het kader van de analyse is het belangrijk uitsluitend de meetresultaten te gebruiken van vergelijkbare proevenseries. Eventuele afwijkingen als gevolg van het gebruikte type golfgoot, de dataverwerkingsmethode en de gebruikte meetinstrumentatie blijven daardoor buiten beschouwing.

### 5.5.9 Implementatie resultaten golfklappen in Steentoets

De locatie op het talud met de maximale stijghoogte wordt in Steentoets vooralsnog berekend volgens de formule zoals gegeven in paragraaf 5.5.1. Die formule is geldig voor diep water. De formule wordt uitgebreid met een factor  $f_{o,d}$ , die de formule behalve voor diep water tevens geschikt maakt voor ondiep water. De factor wordt afgeleid op basis van Figuur 5.11.

$$\frac{x_{\phi \max}}{H_s} = \min \left( \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9 ; 6,5 \right) \cdot f_{o,d}$$

Daarin is:

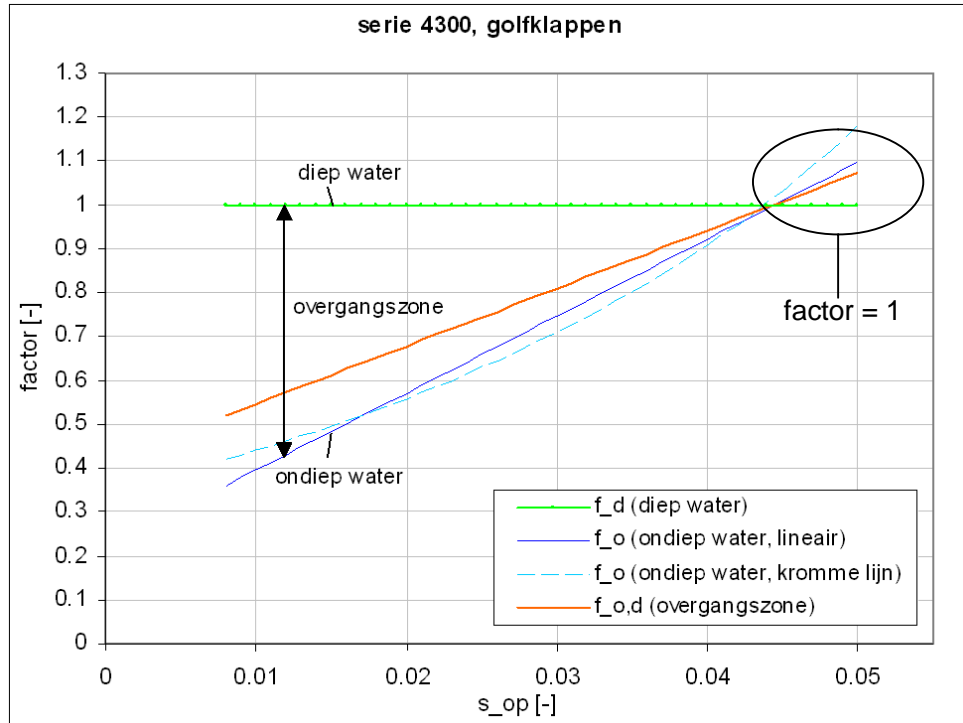
- $x_{\phi \max}$  = horizontale afstand van de locatie met de grootste stijghoogte tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud [m]
- $H_s$  = significante golfhoogte [m]
- $s_{op}$  = golfsteilheid [m]
- $f_{o,d}$  = dieptebeperktheidsfactor [-]

De factor  $f_{o,d}$  wordt voor alle waarden van  $h_{0,5L}/H_s$  gegeven door de onderstaande formules. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep water, diep water en het overgangsgebied daartussen. Voor diep water wordt gesteld dat  $f_{o,d} = 1$ .

Voor ondiep water wordt  $f_{o,d}$  bepaald door het quotiënt van de trendlijnen voor ondiep en diep water (respectievelijk blauwe en groene lijn in Figuur 5.11) mits  $s_{op} < 0,045$ . Dit quotiënt levert een licht gekromde lijn op (blauwe stippellijn in Figuur 5.12). Gezien de spreiding van de meetpunten waarop dit gebaseerd is, en de daaruit voortvloeiende beperkte nauwkeurigheid, wordt die vereenvoudigd tot een lineaire functie (blauwe ononderbroken lijn in Figuur 5.12). In het overgangsgebied wordt de dieptebeperktheidsfactor bepaald door lineair te interpoleren tussen diep en ondiep water.

Het verloop van de trend is opmerkelijk bij grote golfsteilheid (zie Figuur 5.12 voor  $s_{op} > 0,045$ ). Het blijkt dat de factor dan groter dan 1 dreigt te worden. Dat betekent dat bij grote golfsteilheid en ondiep water de golfklappen nog dieper onder water neerkomen dan bij diep water. Helaas zijn er geen metingen beschikbaar in deze range van golfsteilheden. Omdat dit fysisch niet logisch lijkt, wordt ervoor gekozen om de factor nooit groter te laten zijn dan 1.





Figuur 5.12 Dieptebeperktheidsfactoren (serie 4300, golfklappen)

Hiermee worden de formules als volgt:

$$\text{Ondiep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \leq g_o \text{):} \quad f_{o,d} = f_o = \frac{\frac{x_{\phi\max}}{H_s} (\text{ondiep water})}{\frac{x_{\phi\max}}{H_s} (\text{diep water})} = \frac{15,4 \cdot s_{op} + 1,0}{-28,0 \cdot s_{op} + 2,9}$$

Vereenvoudiging tot lineaire functie en de aanname dat de factor nooit groter wordt dan 1 bij grote golfsteilheid, geeft:

$$f_{o,d} = f_o = \min(17,55 \cdot s_{op} + 0,22; 1)$$

$$\text{Diep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \geq g_d \text{):} \quad f_{o,d} = f_d = 1$$

$$\text{Overgangsgebied (als } g_o < \frac{h_{0,5L}}{H_s} < g_d \text{):} \quad f_{o,d} = f_d - \frac{\left(g_d - \frac{h_{0,5L}}{H_s}\right)(f_d - f_o)}{(g_d - g_o)}$$

Daarin is:

$f_o$  = dieptebeperktheidsfactor voor ondiep water [-]

$f_d$  = dieptebeperktheidsfactor voor diep water (= 1) [-]

$f_{o,d}$  = dieptebeperktheidsfactor [-]

$g_o$  = grens tussen ondiep water en overgangsgebied [-]

$g_d$  = grens tussen diep water en overgangsgebied [-]

De dieptebeperktheidsfactoren voor diep en ondiep water en voor het overgangsgebied worden weergegeven in Figuur 5.12.

Tenslotte worden de grenzen  $g_o$  en  $g_d$  nader vastgesteld. Wanneer  $h_{0,5L}/H_s$  kleiner is dan ongeveer 2,0 dan breken vrijwel alle golven. Om ook golven met een waarde van  $h_{0,5L}/H_s$  rond die grens als brekende golven te beschouwen, wordt voor  $g_o$  een enigszins grotere waarde aangehouden. Wanneer  $h_{0,5L}/H_s$  groter is dan ongeveer 3,0 dan breken er vrijwel geen golven meer. Om ook golven met een waarde van  $h_{0,5L}/H_s$  rond die grens te beschouwen als niet-brekende golven, wordt voor  $g_d$  een enigszins kleinere waarde aangehouden.

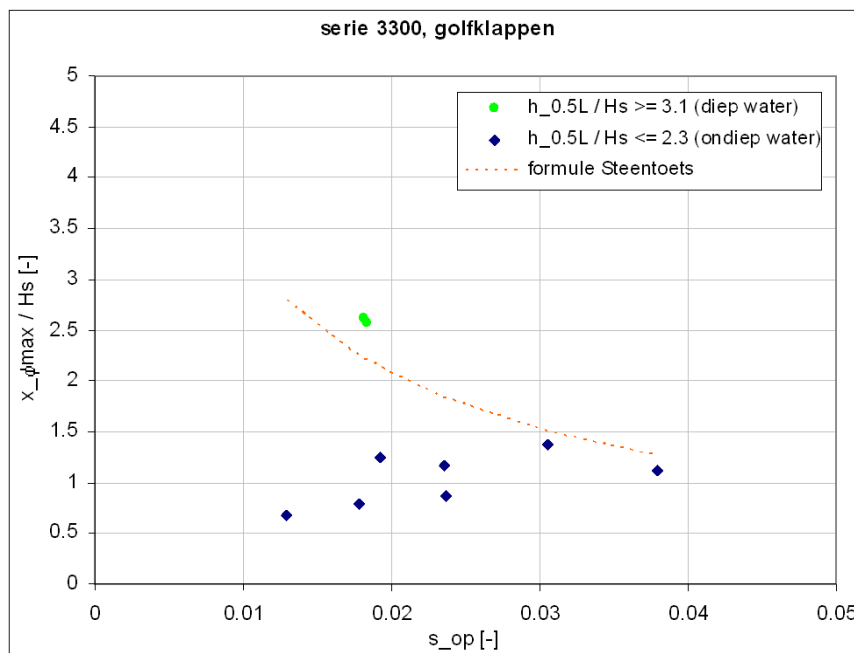
De onderstaande waarden van  $h_{0,5L}/H_s$  worden vastgesteld als grens tussen ondiep water en het overgangsgebied ( $g_o$ ) en tussen het overgangsgebied en diep water ( $g_d$ ):

$$g_o = 2,2 [-]$$

$$g_d = 2,8 [-]$$

## 5.5.10 Check 3300- en 4300-serie

Van de 3300-serie is slechts een gedeelte van de meetpunten beschikbaar. De analyse is daarom in eerste instantie gebaseerd op de 4300-serie. De 3300-serie wordt gebruikt om vast te stellen of de metingen van de 3300-serie niet strijdig zijn met de op de 4300-serie gebaseerde conclusies.



Figuur 5.13 Relatie  $x_{\phi max,5\%}/H_s$  en  $s_{op}$  (serie 3300, golfklappen)

In Figuur 5.13 is  $x_{\phi_{\max,5\%}}/H_s$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-] voor de 3300-serie. Ondanks dat het aantal meetpunten voor diep water beperkt is, toont Figuur 5.13 geen significant afwijkend beeld ten opzichte van Figuur 5.5. Wel wordt opgemerkt dat de meetpunten van de 3300-serie iets verder uit elkaar lijken te liggen dan de meetpunten van de 4300-serie. Het aantal meetpunten is echter te beperkt om vast te kunnen stellen of die afwijking buiten de gewone spreiding van de meetpunten valt. Wanneer echter toch gesteld wordt dat de punten voor diep en ondiep water bij de 3300-serie daadwerkelijk verder uit elkaar liggen, dan heeft dat voor de 3300-serie een kleinere factor  $f_{o,d}$  en een kleinere  $x_{\phi_{\max,5\%}}$  tot gevolg. Het is dus veiliger om de resultaten van de 4300-serie niet te corrigeren op basis de 3300-serie.

## 5.6 Analyse golffronten

### 5.6.1 Algemeen

Voor golffronten wordt in de onderhavige analyse een dieptebeperktheidsfactor ontwikkeld, zoals ook gedaan is voor golfklappen. Bij golffronten wordt onderscheid gemaakt tussen golven met een hoog en een steil stijghoogtefront (paragraaf 5.2). De locatie op het talud met het maximale stijghoogteverschil wordt in Steentoets voor de twee typen stijghoogtefronten berekend met de onderstaande formules. De formules zijn in het verleden ontwikkeld voor diep water.

Hoog stijghoogtefront:

$$\frac{x_s}{H_s} \tan \alpha = \min \left( 0,25 + 0,11 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 2,0 \right)$$

Steil stijghoogtefront:

$$\frac{x_s}{H_s} \tan \alpha = \min \left( 0,2 + 0,06 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 0,9 \right)$$

Daarin is:

- $x_s$  = horizontale afstand van de voet van het stijghoogtefront tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde) [m]
- $H_s$  = significante golfhoogte [m]
- $\xi_{op}$  = brekerparameter [m]
- $\alpha$  = taludhelling [-]

De te ontwikkelen dieptebeperktheidsfactor voor het hoge stijghoogtefront komt naar verwachting overeen met die voor het steile stijghoogtefront. Beide typen golffronten worden daarom gezamenlijk beschouwd. In het vervolg van deze analyse wordt als voorbeeld alleen de formule voor het hoge stijghoogtefront gebruikt.

In de formules wordt een parameter  $x_s$  gegeven. Deze parameter geeft de horizontale afstand van de voet van het stijghoogtefront tot de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud. Omdat het maximale stijghoogteverschil op zal treden bij de voet van het stijghoogtefront, kan  $x_s$  ook geschreven worden als  $x_{\phi_{dip}}$ .

In de formules is achter  $x_{\phi_{dip}}/H_s$  de factor  $\tan \alpha$  opgenomen. Door deze factor toe te voegen wordt niet de horizontale afstand berekend tussen de locatie met het maximale

stijghoogteverschil en de snijlijn van het talud en stilwaterlijn (zoals bij golfklappen), maar de verticale afstand tussen het talud en de stilwaterlijn ter plaatse van het maximale stijghoogteverschil.

Hoewel de factor  $\tan\alpha$  geen invloed heeft op de eindresultaten van deze analyse, wordt de factor wel in de analyse beschouwd om zoveel mogelijk op Steentoets aan te sluiten.

Om aan te sluiten op de analyse van de golfklappen (paragraaf 5.5) wordt de factor  $\xi_{op}/\tan\alpha$  omgeschreven tot  $1/\sqrt{s_{op}}$ .

De formule uit Steentoets voor het hoge stijghoogtefront kan omgeschreven worden tot:

$$\frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha = \min \left( 0,25 + \frac{0,11}{\sqrt{s_{op}}}; 2,0 \right)$$

Daarin is:

- $x_{\phi dip}$  = horizontale afstand tussen snijpunt talud/SWL en locatie met de maximale druk [m]
- $s_{op}$  = golfsteilheid [m]

In verband met de implementatie van de onderzoeksresultaten in Steentoets wordt in eerste instantie  $(x_{\phi dip,5\%}/H_s)\tan\alpha$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-] (Figuur 5.14). In de grafiek wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep water waarin golven breken en diep water waarin golven niet breken (zie paragraaf 5.5.2). Door de meetpunten tegen elkaar uit te zetten zoals in Figuur 5.14 kan relatief eenvoudig een factor ontwikkeld worden, die aan de bovenstaande formule kan worden toegevoegd, zodat de formule behalve voor diep water tevens geschikt wordt voor ondiep water. De factor is afhankelijk van de verhouding tussen de trendlijnen door de meetpunten voor diep en ondiep water.

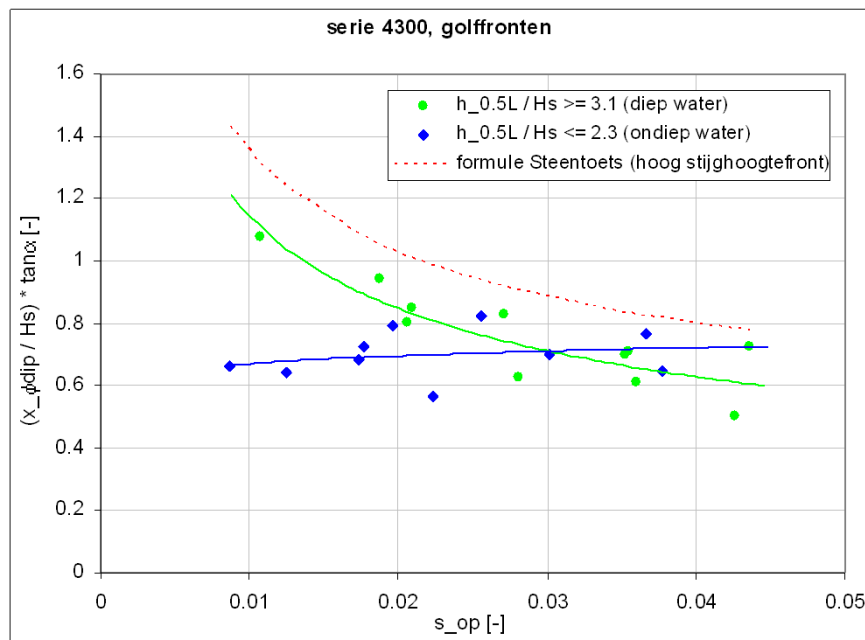
Hoewel het verband van Figuur 5.14 de minst gecompliceerde implementatie in Steentoets geeft, werden de metingen uit 1992 tijdens het onderzoek ook op vele andere manieren tegen elkaar uitgezet om vast te stellen of dat andere relevante resultaten zou geven. Evenals bij golfklappen leverde dat geen significante verschillen op. In deze analyse voor golffronten wordt uitsluitend het verband tussen  $(x_{\phi dip,5\%}/H_s)\tan\alpha$  en  $s_{op}$  toegelicht.

## 5.6.2 Relatie tussen $(x_{\phi dip,5\%}/H_s)\tan\alpha$ en $s_{op}$

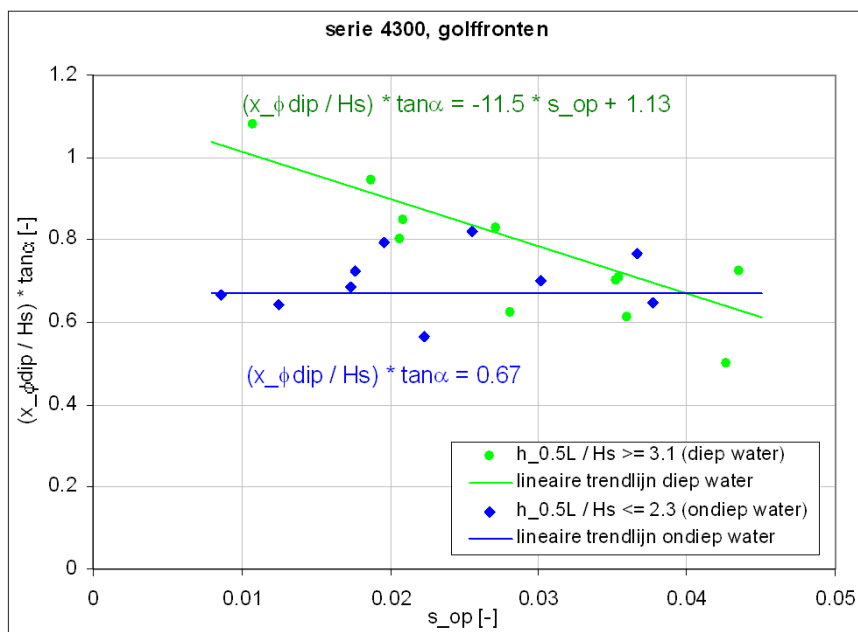
In Figuur 5.14 wordt  $(x_{\phi dip,5\%}/H_s)\tan\alpha$  [-] uitgezet tegen  $s_{op}$  [-]. De grafiek toont net als bij golfklappen onderscheid tussen de proeven waarin  $h_{0,5L}/H_s \leq 2,3$  (blauwe meetpunten en trendlijn) en  $h_{0,5L}/H_s \geq 3,1$  (groene meetpunten en trendlijn). Bij lagere golfsteilheden ligt de trendlijn voor diep water hoger dan die voor ondiep water. Bij hogere golfsteilheden ligt de trendlijn voor diep water enigszins lager dan die voor ondiep water. Om aan te sluiten op de formule die voor diep water reeds in Steentoets wordt gebruikt, is gebruik gemaakt van machtstrendlijnen.

De formule uit Steentoets voor diep water is in de grafiek geplot (rode stippellijn) om de uitkomsten van de metingen uit 1992 te kunnen vergelijken met de huidige formule van Steentoets voor het hoge stijghoogtefront. De trendlijn voor diep water ligt enigszins lager dan de formule uit Steentoets, maar geeft wel hetzelfde verloop. Dit verschil komt doordat in de metingen zowel de hoge als de steile fronten zijn beschouwd. De metingen bij ondiep water tonen een ander verloop.

Figuur 5.15 geeft nogmaals het verband tussen  $(x_{\phi\text{dip},5\%}/H_s)\tan\alpha$  en  $s_{op}$ . De machtstrendlijnen uit Figuur 5.14 zijn vervangen door lineaire trendlijnen. Hoewel de formule uit Steentoets (paragraaf 5.6.1) een machtsfunctie betreft, kunnen op basis van de meetpunten uit 1992 evenzeer lineaire trendlijnen gebruikt worden, zoals weergegeven in Figuur 5.15. Het voordeel is de vereenvoudiging van de formules.



Figuur 5.14 Relatie  $(x_{\phi\text{dip},5\%}/H_s)\tan\alpha$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golffronten)



Figuur 5.15 Lineaire trendlijnen bij relatie  $(x_{\phi\text{dip},5\%}/H_s)\tan\alpha$  en  $s_{op}$  (serie 4300, golffronten)

De lineaire trendlijnen worden gegeven door de volgende formules:

$$\text{Diep water: } \frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha = -11,5 \cdot s_{op} + 1,13$$

$$\text{Ondiep water: } \frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha = 0,67$$

Net als bij de golfklappen zou een extrapolatie van de trend naar zeer grote golfsteilheden ( $s_{op} \gg 0,04$ ) kunnen leiden tot de conclusie dat de  $x_{\phi max}$  bij ondiep water in zo'n geval kleiner wordt dan bij diep water. Vanwege het ontbreken van meetpunten met  $s_{op} > 0,045$  en het ontbreken van theoretische overwegingen over het verloop van de lijnen in Figuur 5.15 voor  $s_{op} > 0,045$ , wordt voorlopig gesteld dat voor grote golfsteilheden er geen invloed is van de diepte van het voorland.

### 5.6.3 Implementatie resultaten golffronten in Steentoets

De locatie op het talud met het maximale stijghoogteverschil wordt in Steentoets voornamelijk berekend volgens de formules zoals gegeven in paragraaf 5.6.1. Die formules zijn geldig voor diep water. De formules worden uitgebreid met een factor  $f_{o,d}$ , die de formules behalve voor diep water tevens geschikt maken voor ondiep water. Zie als voorbeeld de onderstaande formule voor het hoge stijghoogtefront. De factor  $f_{o,d}$  wordt afgeleid uit Figuur 5.15.

$$\frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha = \min \left( 0,25 + \frac{0,11}{\sqrt{s_{op}}}; 2,0 \right) \cdot f_{o,d}$$

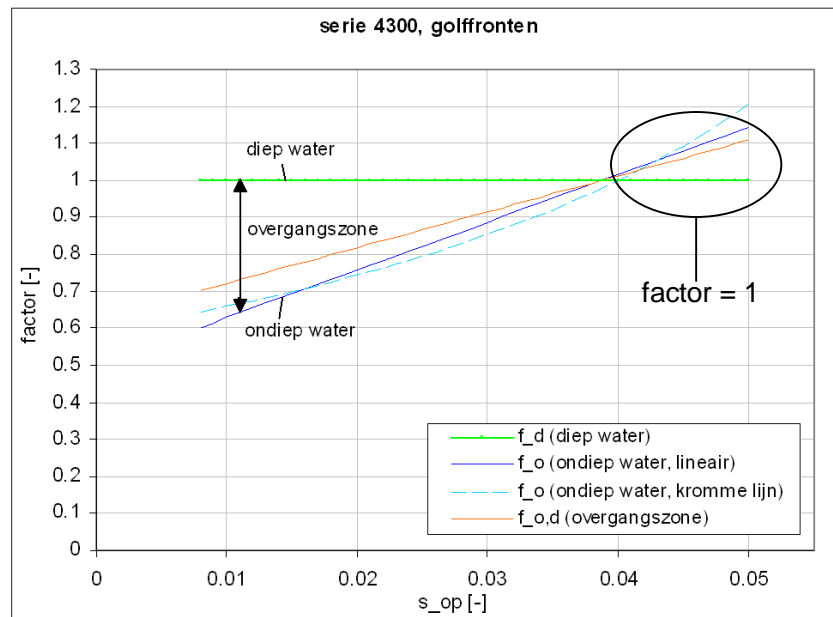
Daarin is:

- $x_{\phi dip}$  = horizontale afstand van de locatie met het grootste stijghoogteverschil tot de snijlijn van stilwaterlijn en talud (altijd een positieve waarde) [m]
- $H_s$  = significante golfhoogte [m]
- $\alpha$  = taludhelling [°]
- $s_{op}$  = golfsteilheid [m]
- $f_{o,d}$  = dieptebeperktheidsfactor [-]

De factor  $f_{o,d}$  wordt voor alle waarden van  $h_{0,5L}/H_s$  gegeven door de onderstaande formules. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen ondiep water, diep water en het overgangsgebied daartussen. Voor diep water wordt gesteld dat  $f_{o,d} = 1$ .

Voor ondiep water wordt  $f_{o,d}$  bepaald door het quotiënt van de trendlijnen voor ondiep en diep water (respectievelijk blauwe en groene lijn in Figuur 5.15). Dit quotiënt levert een licht gekromde lijn op (blauwe stippellijn in Figuur 5.16). Gezien de spreiding van de meetpunten waarop dit gebaseerd is, en de daaruit voortvloeiende beperkte nauwkeurigheid, wordt die vereenvoudigd tot een lineaire functie (blauwe ononderbroken lijn in Figuur 5.16).

In het overgangsgebied wordt de dieptebeperktheidsfactor bepaald door lineair te interpoleren tussen diep en ondiep water.



Figuur 5.16 Dieptebeperktheidsfactoren (serie 4300, golffronten)

De formules worden hiermee:

$$\text{Ondiep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \leq g_o \text{): } f_{o,d} = f_o = \frac{\frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha \text{ (ondiep water)}}{\frac{x_{\phi dip}}{H_s} \tan \alpha \text{ (diep water)}} = \frac{0,67}{-11,5 \cdot s_{op} + 1,13}$$

Vereenvoudiging tot lineaire functie en toepassen van de stelling dat de factor nooit groter wordt dan 1 bij grote golfsteilheid (net als bij golfklappen), geeft:

$$f_{o,d} = f_o = \min(12,9 \cdot s_{op} + 0,5; 1)$$

$$\text{Diep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \geq g_d \text{): } f_{o,d} = f_d = 1$$

$$\text{Overgangsgebied (als } g_o < \frac{h_{0,5L}}{H_s} < g_d \text{): } f_{o,d} = f_d - \frac{\left(g_d - \frac{h_{0,5L}}{H_s}\right)(f_d - f_o)}{(g_d - g_o)}$$

Daarin is:

$f_o$  = dieptebeperktheidsfactor voor ondiep water [-]

$f_d$  = dieptebeperktheidsfactor voor diep water (= 1) [-]

$f_{o,d}$  = dieptebeperktheidsfactor [-]

$g_o$  = grens tussen ondiep water en overgangsgebied [-]

$g_d$  = grens tussen diep water en overgangsgebied [-]

De dieptebeperktheidsfactoren voor diep en ondiep water en voor het overgangsgebied worden weergegeven in Figuur 5.16.

Net als bij golfklappen worden de onderstaande grenzen tussen het overgangsgebied en ondiep water ( $g_o$ ) en diep water ( $g_d$ ) vastgesteld.

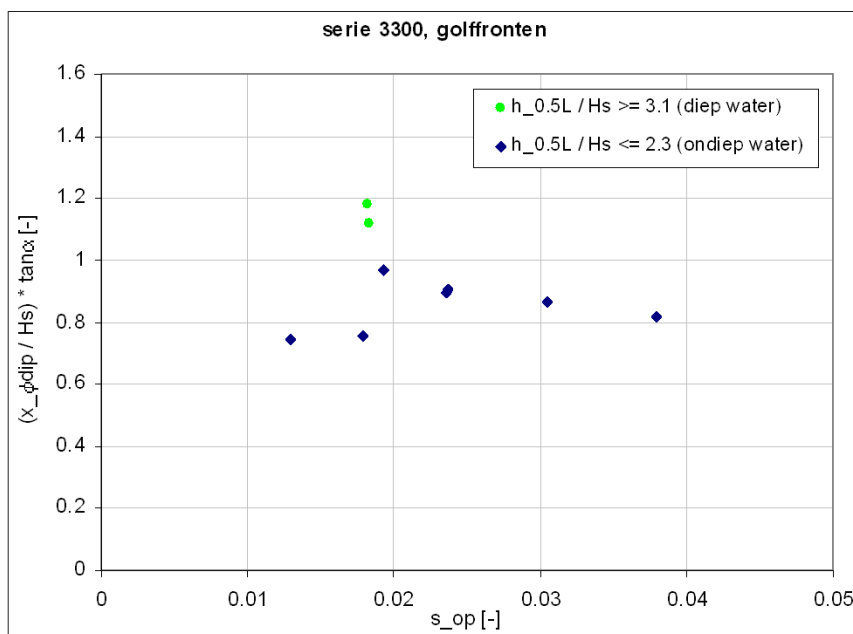
$$g_o = 2,2 [-]$$

$$g_d = 2,8 [-]$$

#### 5.6.4 Check 3300- en 4300-serie

Van de 3300-serie is slechts een gedeelte van de meetpunten beschikbaar. De analyse is daarom in eerste instantie gebaseerd op de 4300-serie. De 3300-serie wordt gebruikt om vast te stellen of de metingen van de 3300-serie niet strijdig zijn met de op de 4300-serie gebaseerde conclusies.

In Figuur 5.17 is  $(x_{\phi\text{dip},5\%}/H_s)\tan\alpha [-]$  uitgezet tegen  $s_{op} [-]$  voor de 3300-serie. Ondanks dat het aantal meetpunten voor diep water beperkt is, toont Figuur 5.17 geen significant afwijkend beeld ten opzichte van Figuur 5.14. De meetpunten liggen weliswaar enigszins lager dan in Figuur 5.14, maar de verhouding tussen de meetpunten voor diep en ondiep water is gelijk. De, op basis van de 4300-serie, ontwikkelde dieptebeperktheidsfactor komt dus overeen met de metingen van de 3300-serie.



Figuur 5.17 Relatie  $(x_{\phi\text{dip},5\%}/H_s)\tan\alpha$  en  $s_{op}$  (serie 3300, golffronten)

## 5.7 Belastingintensiteit bij diep en ondiep water

Naast het onderzoeken van de locatie waar de maximale belasting optreedt (paragrafen 5.5 en 5.6), werd onderzocht hoe de belastingaantallen en belastinggroottes bij diep en ondiep water zich tot elkaar verhouden.



### 5.7.1 Belastingaantal

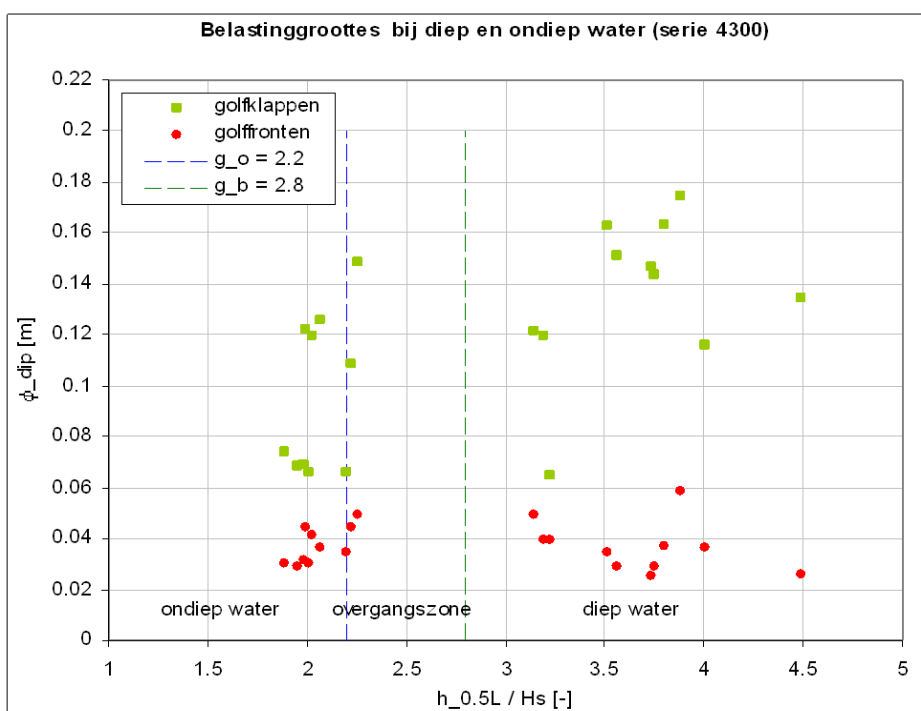
Doordat de golfperiode gelijk blijft als diep water overgaat in ondiep water, is het aantal golven, en daarmee het aantal belastingen op het talud, per tijdseenheid niet verschillend voor diep en ondiep water.

### 5.7.2 Belastinggrootte

In deze paragraaf wordt gecontroleerd of de belastinggrootte beïnvloed wordt door de aanwezigheid van een ondiep voorland waar de golven op breken. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van een benadering van het te verwachten stijghoogteverschil, namelijk de gediptheid  $\phi_{dip}$  [m].

In Figuur 5.18 wordt voor de 4300 serie het theoretisch benaderde maximale stijghoogteverschil  $\phi_{dip}$  [m] uitgezet tegen  $h_{0,5L}/H_s$  [-]. Elk punt in de figuur heeft betrekking op één proef en geeft de gemiddelde  $\phi_{dip}$  van de zwaarste 5 procent golven. De waarden van deze  $\phi_{dip,5\%}$  worden gegeven in de bijlagen A.1 en A.2.

Het verband wordt uitgezet voor zowel golfklappen (groene  $\square$ ) als golffronten (rode  $\circ$ ). In de figuur geven de blauwe en groene stippellijnen de grenzen tussen ondiep water, het overgangsgedebied en diep water, zoals die in de paragrafen 5.5.9 en 5.6.3 zijn vastgesteld.



Figuur 5.18 Belastinggroottes bij diep en ondiep water, voor golfklappen en golffronten (4300-serie)

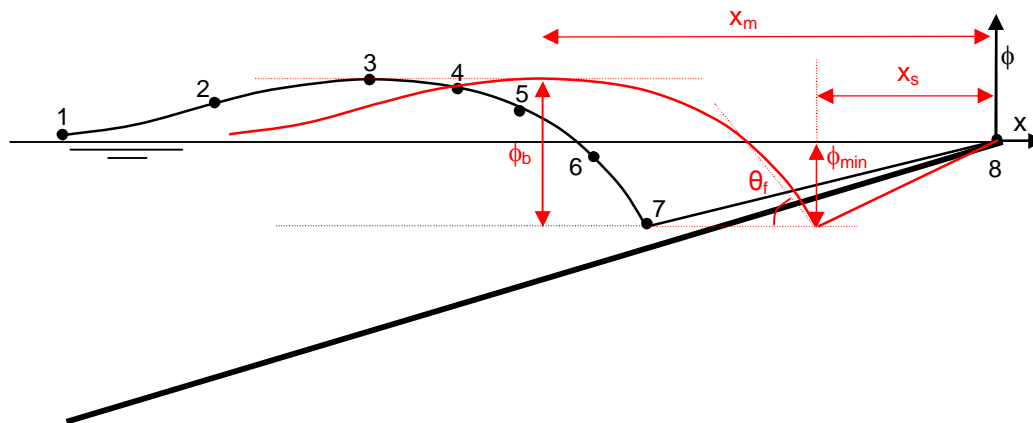
Tijdens de golfklappen is bij het grootste deel van de proeven de belastinggrootte bij ondiep water vergelijkbaar met die bij diep water. Bij een aantal proeven is de belasting bij ondiep water kleiner dan bij diep water.

Bij golffronten is in alle gevallen de belastinggrootte bij ondiep water vergelijkbaar met die bij diep water. Gezien de korte lek lengte die bij deze analyse is gehanteerd, zegt dit wel iets over de fronthelling, maar niet over de fronthoogte.

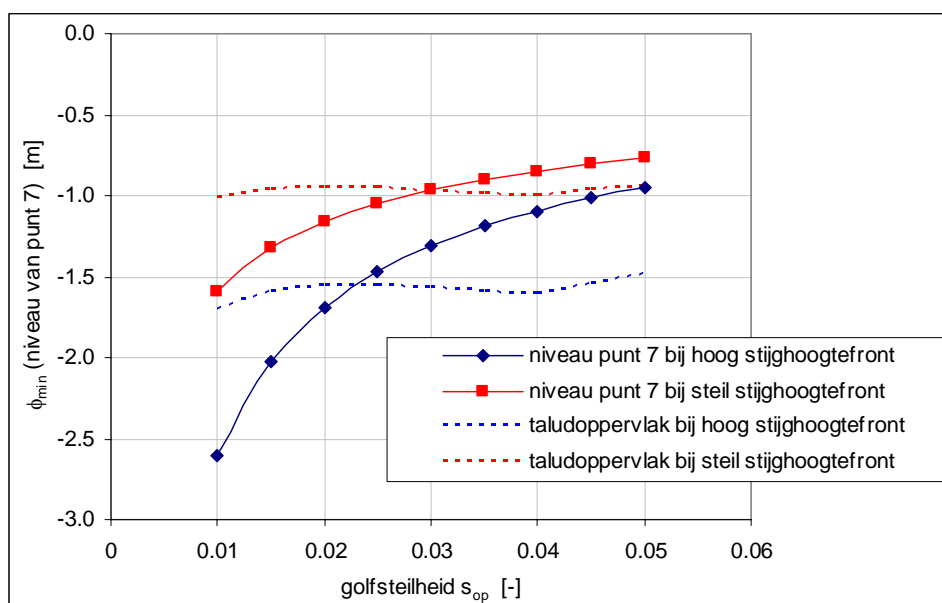
Hieruit kan geconcludeerd worden dat de invloed van de diepte op de belastinggrootte bij golfklappen kennelijk te verwaarlozen is, en bij de golffronten geen invloed heeft op de fronthelling. In sommige gevallen is bij ondiep water de belasting iets kleiner, waardoor deze verwaarlozing een conservatief resultaat geeft (veilig).

## 5.8 Implementatie in Steentoets

Bij de implementatie in Steentoets van deze invloed van ondiepwater op de locatie van de maximale belasting ontstaat het probleem dat het stijghoogtefront deels onder het taludoppervlak terecht dreigt te komen. Dit is een gevolg van het feit dat het stijghoogtefront in horizontale richting dichterbij het snijpunt van talud en waterlijn komt te liggen, zoals getekend in Figuur 5.19.

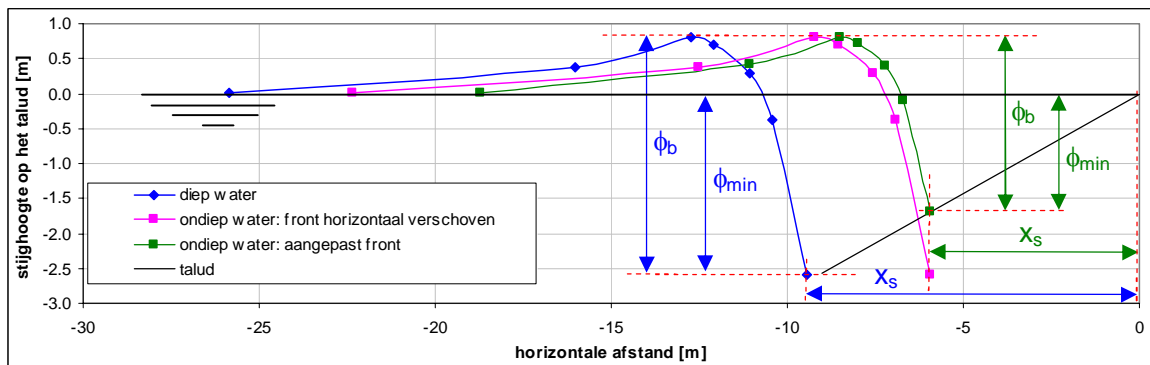


Figuur 5.19 Stijghoogteverloop tijdens het stijghoogtefront (zwarte lijn: bij diep water ; rode lijn: bij ondiep water, na uitsluitend correctie van  $x_s$  met  $f_{od}$ )



Figuur 5.20 Niveau van punt 7 ( $\phi_{min}$ ) in het stijghoogteverloop als functie van de golfsteilheid en het niveau van het taludoppervlak

Dit probleem ontstaat vooral als de golfsteilheid klein is, zoals te zien is in Figuur 5.20. Het kan opgelost worden door het gehele stijghoogtefront omhoog te verplaatsen totdat punt 7 op het taludoppervlak zit, of door  $\phi_{\min}$  te vergroten (let wel:  $\phi_{\min} < 0$ ) en  $\phi_b$  met eenzelfde waarde te verkleinen. In het eerste geval komt de top van het stijghoogtefront merkwaardig hoog te liggen, en daarom wordt deze oplossingsrichtingen niet gekozen. In het tweede geval wordt in feite alleen punt 7 zodanig verplaatst dat dit punt op het taludoppervlak ligt, maar de top van het stijghoogtefront blijft op hetzelfde niveau. Dit is geschetst in Figuur 5.21.



Figuur 5.21 Stijghoogteverloop tijdens het front bij diep water (blauw) en voorstel voor ondiep water (groen)

Direct na de uitvoering van de proeven in 1992 is al een eerste analyse van de metingen uitgevoerd. Toen is ook de invloed van de lokale waterdiepte op de hoogte van het stijghoogtefront  $\phi_b$  bepaald (De Waal, 1992), leidend tot de volgende formules:

$$\text{Diep water: } \frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,3 \frac{(\tan \alpha)^{0,25}}{\sqrt{s_{op}}}$$

$$\text{Ondiep water: } \frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 1,8 \cdot (\tan \alpha)^{0,25}$$

Deze formules zijn uiteindelijk niet in Steentoets gebruikt, omdat door de verbeterde analyse-technieken later onderscheid kon worden gemaakt tussen steile en hoge stijghoogtefronten. Maar uit deze formules blijkt wel dat het stijghoogtefront op ondiep water bij kleine golfsteilheid ( $s_{op} < 0,028$ ) inderdaad kleiner is dan op diep water. Dit is een aanwijzing dat de aanpassing van het front volgens Figuur 5.21 de juiste is.

Bij golfklappen speelt dit probleem niet.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Het is gebleken dat onder sommige omstandigheden de belasting volgens Steentoets veel dieper onder water aangrijpt op een steenzetting, dan in werkelijkheid het geval is. Dit is het geval bij ondiepe voorlanden en relatief lange golven, zoals dat veel langs de Waddenzeekust voorkomt. Het heeft als consequentie dat laaggelegen steenzettingen soms ten onrechte worden afgekeurd.

In Steentoets wordt de locatie met de maximale belasting vooralsnog berekend met formules die in het verleden zijn ontwikkeld voor diep water, waarbij golven niet beperkt werden door de waterdiepte. In de onderhavige rapportage werd een factor ontwikkeld, waarmee de formules uit Steentoets kunnen worden uitgebreid, zodat de locatie met de maximale belasting ook berekend kan worden bij ondiep water, waarin golven wél beperkt worden door de waterdiepte. Het onderzoek werd uitgevoerd voor zowel golfklappen als golffronten.

Naast het onderzoeken van de belastinglocatie bij diep en ondiep water werd onderzocht hoe de belastinggroottes en belastingaantallen bij diep en ondiep water zich tot elkaar verhouden. Het aantal golven, en daarmee het aantal belastingen, is voor zowel diep als ondiep water gelijk. De maximale belastinggroottes zijn bij golfklappen bij ondiep water kleiner dan of vergelijkbaar met die bij diep water. Bij golffronten zijn de maximale belastinggroottes bij diep en ondiep water vergelijkbaar. Op basis daarvan kan gesteld worden dat de afgeleide invloedsfactor verantwoord in Steentoets kan worden toegepast.

In het onderzoek werd gebruik gemaakt van metingen die in 1992 door De Waal zijn uitgevoerd in de Scheldegoot van het Waterloopkundig Laboratorium (tegenwoordig Deltares). Hij deed onderzoek naar de belasting op steenzettingen met een ondiep voorland met een helling van 1:100.

Van de metingen van 1992 werden de stijghoogteverlopen geanalyseerd met de analysesoftware AnalyseWave. Dat programma geeft voor elke afzonderlijke golf een groot aantal karakteristieke parameters, voor zowel golfklappen als -fronten.

Zowel met betrekking tot golfklappen als golffronten werden de relevante parameters uit de uitvoer van AnalyseWave geselecteerd en gebruikt voor het ontwikkelen van invloedsfactoren, die toegevoegd kunnen worden aan de huidige formules van Steentoets.

### 6.1 Golfklappen

Het wordt aanbevolen de huidige formule voor golfklappen uit Steentoets, voor het berekenen van de locatie met de maximale stijghoogte, als volgt uit te breiden met de dieptebeperktheidsfactor  $f_{o,d}$ .

$$\frac{x_{\phi \max}}{H_s} = \min \left( \frac{0,42}{\sqrt{s_{op}}} - 0,9 ; 6,5 \right) \cdot f_{o,d}$$

De dieptebeperktheidsfactor  $f_{o,d}$  is afhankelijk van de verhouding tussen de waterdiepte op een afstand van  $h_{0,5L} = 1,56T_p^2/2$  vanaf de teen van de dijk en de significante golfhoogte,  $h_{0,5L}/H_s$ .

$$\text{Ondiep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \leq 2,2): \quad f_{o,d} = f_o = \min(17,55 \cdot s_{op} + 0,22; 1)$$

$$\text{Diep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \geq 2,8): \quad f_{o,d} = f_d = 1$$

$$\text{Overgangsgebied (als } 2,2 < \frac{h_{0,5L}}{H_s} < 2,8): \quad f_{o,d} = 1 - \frac{\left(2,8 - \frac{h_{0,5L}}{H_s}\right)(1 - f_o)}{0,6}$$

## 6.2 Golffronten

Het wordt aanbevolen de huidige formules voor golffronten (zowel hoog als steil stijghoogtefront) uit Steentoets, voor het berekenen van de locatie met het maximale stijghoogteverschil, als volgt uit te breiden met de dieptebeperktheidsfactor  $f_{o,d}$ .

Hoog stijghoogtefront:

$$\frac{x_s}{H_s} \tan \alpha = \min\left(0,25 + 0,11 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 2,0\right) \cdot f_{o,d}$$

Steil stijghoogtefront:

$$\frac{x_s}{H_s} \tan \alpha = \min\left(0,2 + 0,06 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha}; 0,9\right) \cdot f_{o,d}$$

De dieptebeperktheidsfactor  $f_{o,d}$  is afhankelijk van de verhouding tussen de waterdiepte op een afstand van  $h_{0,5L} = 1,56T_p^2/2$  vanaf de teen van de dijk en de significante golfhoogte,  $h_{0,5L}/H_s$ .

$$\text{Ondiep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \leq 2,2): \quad f_{o,d} = f_o = \min(12,9 \cdot s_{op} + 0,5; 1)$$

$$\text{Diep water (als } \frac{h_{0,5L}}{H_s} \geq 2,8): \quad f_{o,d} = f_d = 1$$

$$\text{Overgangsgebied (als } 2,2 < \frac{h_{0,5L}}{H_s} < 2,8): \quad f_{o,d} = 1 - \frac{\left(2,8 - \frac{h_{0,5L}}{H_s}\right)(1 - f_o)}{0,6}$$

Bij de implementatie van deze factor in Steentoets is gebleken dat het nodig is om bij kleine golfsteilheid en ondiep water ook de grootte van  $\phi_{\min}$  en  $\phi_b$  aan te passen (zie paragraaf 5.8). De doorgevoerde aanpassing is in lijn met de conclusies van de Waal (1992).

## Referenties

Battjes, J.A., en Groenendijk, H.W. (2000), *Wave height distributions on shallow foreshores*, *Coastal Engineering* 40, pp 161-182, Elsevier Science BV

BREAKWAT 3.3 (2010), *User and Technical Manual, Version 3.3*, Deltares, maart 2010

CUR (1992). *Handboek voor dimensionering van gezette taludbekledingen*, rapport 155, CUR/TAW 1992

De Waal, J.P. (1992), *Taludbekledingen van gezette steen*, *Golfdruk op het talud*, Deltares, Rapport H195, december 1992

Klein Breteler, M. (2006), *Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven*, *Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*, Deltares, Rapport H4421, juni 2006

Klein Breteler, M. (2009), *Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*, *Documentatie STEENTOETS2008 en STEENTOETS2010*, Deltares, Rapport 1200193-001, november 2009





## A Tabellen

<i>Tabel A.1</i>	<i>Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten 3300-serie</i>
<i>Tabel A.2</i>	<i>Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten 4300-serie</i>



Proef	Randvoorwaarden											Analyse meetgegevens												
	diep water						teen					algemeen						klappen					fronten	
	$h_{\text{diep}}$	$H_{\text{s,diep}}$	$T_{\text{p,diep}}$	$h_{\text{teen}}$	$H_{\text{s,teen}}$	$S_{\text{op,teen}}$	$h_{0,5L}/H_{\text{s,teen}}$	$\eta_{\text{front}}$	$\eta_{\text{front},5\%}$	$\eta_{\text{klap}}$	$\phi_{\text{dip},5\%}$	$X_{\eta\text{max},5\%}$	$X_{\eta\text{dip},5\%}$	$\phi_{\text{dip},5\%}$	$X_{\eta\text{dip},5\%}$									
3301	0.33	0.53	0.181	2.36	0.18	0.112	2.00	889	44	197	0.062	0.076	0.115	0.042	0.250									
3302	0.33	0.53	0.186	1.71	0.18	0.108	1.88	782	39	221	0.073	0.094	0.137	0.034	0.293									
3303	0.33	0.53	0.121	2.80	0.18	0.111	2.17																	
3304	0.33	0.53	0.134	1.97	0.18	0.108	1.95	842	42	230	0.067	0.085	0.122	0.038	0.246									
3305	0.33	0.64	0.193	2.09	0.29	0.161	2.01	826	41	363	0.114	0.188	0.221	0.054	0.432									
3306	0.33	0.64	0.196	1.81	0.29	0.156	2.02	820	41	470	0.115	0.215	0.250	0.047	0.405									
3307	0.33	0.64	0.148	2.21	0.29	0.147	2.23	848	42	276	0.102	0.183	0.195	0.058	0.427									
3308	0.33	0.64	0.095	2.52	0.29	0.105	3.23																	
3309	0.33	0.68	0.22	1.70	0.33	0.171	2.06	822	41	598	0.137	0.190	0.237	0.043	0.420									
3310	0.33	0.76	0.215	1.79	0.41	0.193	2.25																	
3311	0.33	0.76	0.138	2.10	0.41	0.141	3.15																	
3312	0.33	0.76	0.146	1.72	0.41	0.136	3.18																	
3313	0.33	0.76	0.112	1.80	0.41	0.109	3.99																	
3314	0.33	0.95	0.19	1.86	0.60	0.178	3.52																	
3315	0.33	0.95	0.194	1.66	0.60	0.174	3.57																	
3316	0.33	0.95	0.154	1.61	0.60	0.138	4.49																	
3317	0.33	0.53	0.121	1.97	0.18	0.106	1.98																	
3318	0.33	0.95	0.178	1.53	0.60	0.166	3.72																	
3319	0.33	0.95	0.18	1.70	0.60	0.166	3.75																	
3320	0.33	0.95	0.18	2.00	0.60	0.166	3.80																	
3321	0.33	0.95	0.179	2.42	0.60	0.166	3.89	878	43	452	0.204	0.435	0.430	0.076	0.587									
3322	0.33	0.95	0.176	2.41	0.60	0.166	3.89	876	43	447	0.205	0.428	0.408	0.076	0.557									

Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten 3300-serie  
 Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiepe voorlanden

3300-serie

Proef	Randvoorwaarden											Analyse meetgegevens															
	diep water						teen					algemeen						klappen					fronten				
	$h_{\text{diep}}$	$H_{\text{s,diep}}$	$T_{\text{p,diep}}$	$h_{\text{teen}}$	$H_{\text{s,teen}}$	$S_{\text{op,teen}}$	$\xi_{\text{op,teen}}$	$h_{0,5L}/H_{\text{s,teen}}$	$\eta_{\text{front}}$	$\eta_{\text{front},5\%}$	$\eta_{\text{klap}}$	$\phi_{\text{dip},5\%}$	$X_{\eta\text{max},5\%}$	$X_{\eta\text{dip},5\%}$	$\phi_{\text{dip},5\%}$	$X_{\eta\text{dip},5\%}$	$X_{\eta\text{dip},5\%}$										
4301	0.25	0.53	0.183	2.40	0.18	0.112	0.012	2.24	2.01	833	41	256	0.066	0.101	0.132	0.030	0.288										
4302	0.25	0.53	0.184	1.76	0.18	0.108	0.022	1.67	1.89	787	39	406	0.074	0.119	0.160	0.030	0.244										
4303	0.25	0.53	0.12	2.87	0.18	0.111	0.009	2.69	2.20	943	47	245	0.066	0.136	0.177	0.034	0.295										
4304	0.25	0.53	0.134	1.98	0.18	0.108	0.018	1.88	1.95	869	43	352	0.068	0.146	0.169	0.029	0.313										
4305	0.25	0.64	0.195	2.01	0.29	0.161	0.026	1.56	2.00	846	42	560	0.122	0.229	0.282	0.044	0.530										
4306	0.25	0.64	0.196	1.82	0.29	0.156	0.030	1.44	2.02	825	41	597	0.12	0.253	0.293	0.041	0.437										
4307	0.25	0.64	0.145	2.19	0.29	0.147	0.020	1.78	2.23	864	43	427	0.108	0.231	0.282	0.045	0.467										
4308	0.25	0.64	0.096	2.50	0.29	0.105	0.011	2.41	3.23	903	45	208	0.065	0.275	0.307	0.039	0.453										
4309	0.25	0.68	0.219	1.73	0.33	0.171	0.037	1.31	2.07	817	40	626	0.126	0.267	0.328	0.037	0.524										
4310	0.25	0.76	0.213	1.81	0.41	0.193	0.038	1.29	2.26	837	41	698	0.149	0.290	0.316	0.049	0.499										
4311	0.25	0.76	0.14	2.08	0.41	0.141	0.021	1.73	3.15	866	43	536	0.121	0.287	0.324	0.049	0.478										
4312	0.25	0.76	0.145	1.76	0.41	0.136	0.028	1.49	3.19	888	44	664	0.119	0.291	0.324	0.039	0.340										
4313	0.25	0.76	0.113	1.84	0.41	0.109	0.021	1.74	4.00	860	43	582	0.116	0.258	0.290	0.037	0.350										
4314	0.25	0.95	0.193	1.80	0.60	0.178	0.035	1.33	3.51	873	43	600	0.163	0.354	0.400	0.035	0.498										
4315	0.25	0.95	0.194	1.60	0.60	0.174	0.044	1.20	3.56	840	42	581	0.151	0.298	0.346	0.029	0.503										
4316	0.25	0.95	0.151	1.58	0.60	0.138	0.035	1.33	4.49	819	40	551	0.134	0.252	0.300	0.026	0.391										
4317	0.25	0.53	0.121	1.98	0.18	0.106	0.017	1.90	1.99	884	44	376	0.069	0.145	0.183	0.031	0.290										
4318	0.25	0.95	0.179	1.58	0.60	0.166	0.043	1.21	3.73	830	41	577	0.146	0.276	0.343	0.025	0.333										
4319	0.25	0.95	0.183	1.72	0.60	0.166	0.036	1.32	3.75	845	42	590	0.144	0.301	0.361	0.029	0.405										
4320	0.25	0.95	0.178	1.98	0.60	0.166	0.027	1.52	3.80	835	41	610	0.163	0.345	0.368	0.037	0.549										
4321	0.25	0.95	0.18	2.38	0.60	0.166	0.019	1.82	3.88	873	43	619	0.174	0.409	0.441	0.059	0.627										

Overzicht randvoorwaarden en meetresultaten 4300-serie  
Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiepe voorlanden

4300-serie

## **B Figuren**

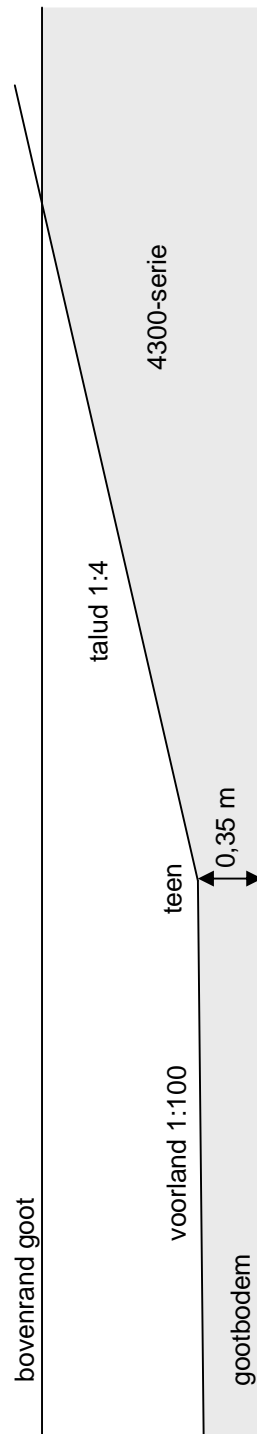
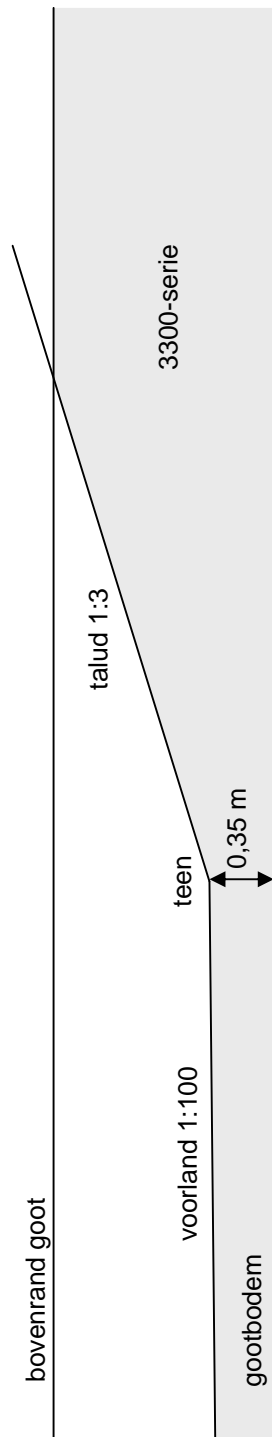
*Figuur B.1 Geometrie modelopstelling (3300-serie en 4300-serie)*

*Figuur B.2 Locaties drukopnemers 3300-serie*

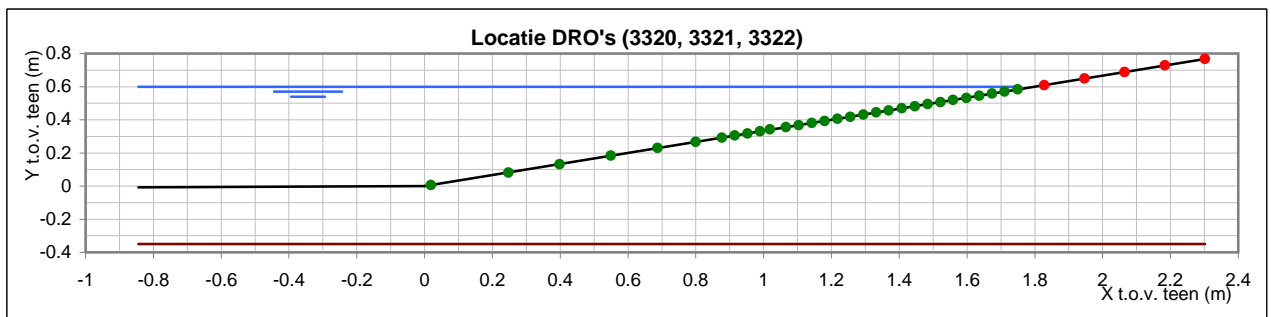
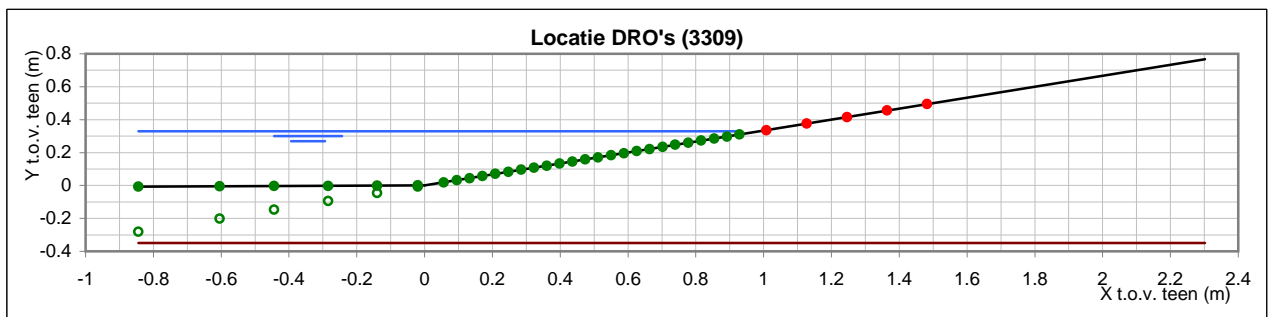
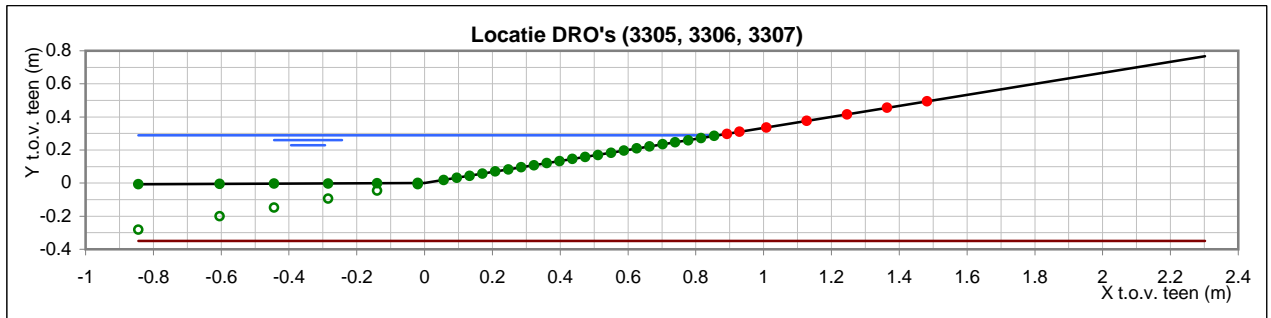
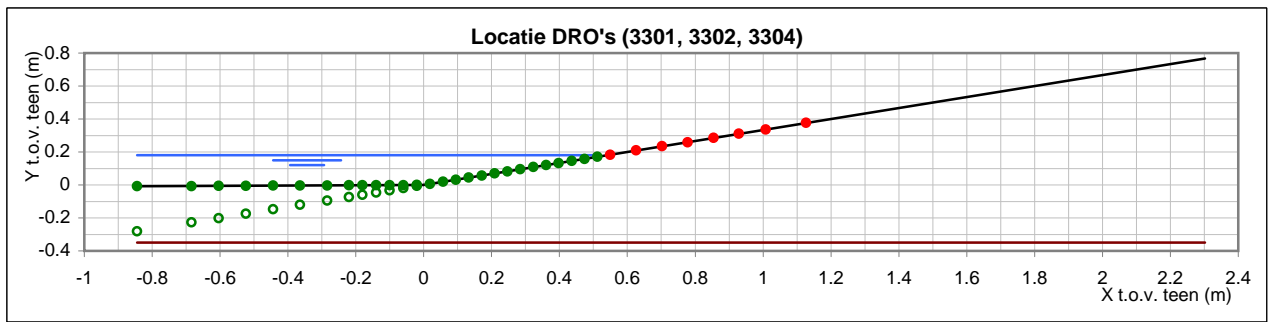
*Figuur B.3 Locaties drukopnemers 4300-serie*

*Figuur B.4 Correctie meetdata drukopnemers*





Geometrie modelopstelling (3300-serie en 4300-serie)  
 Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiep voorland



Locaties drukopnemers 3300-serie  
 Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiepe voorlanden

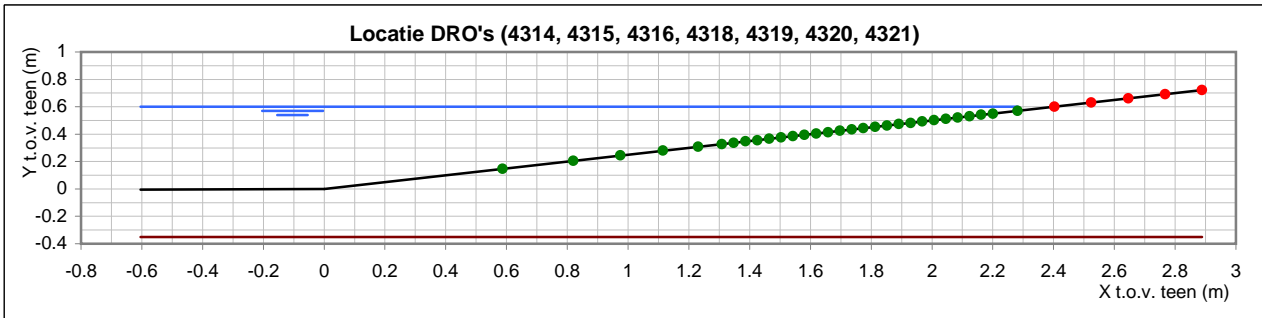
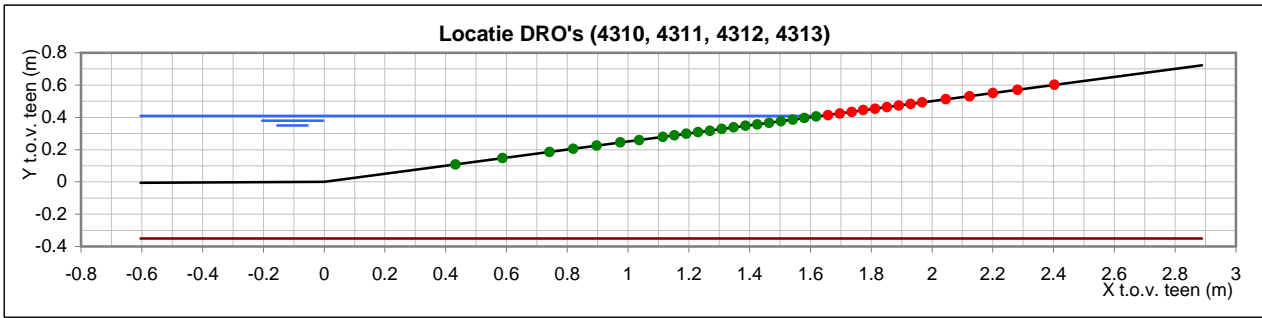
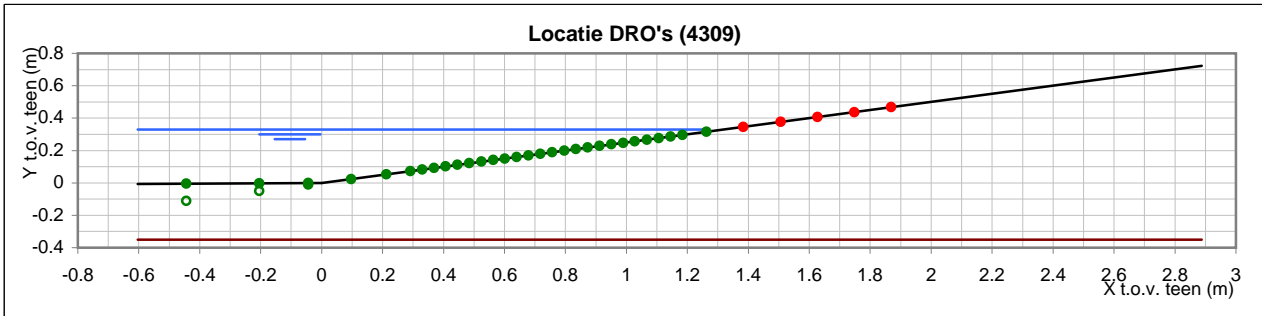
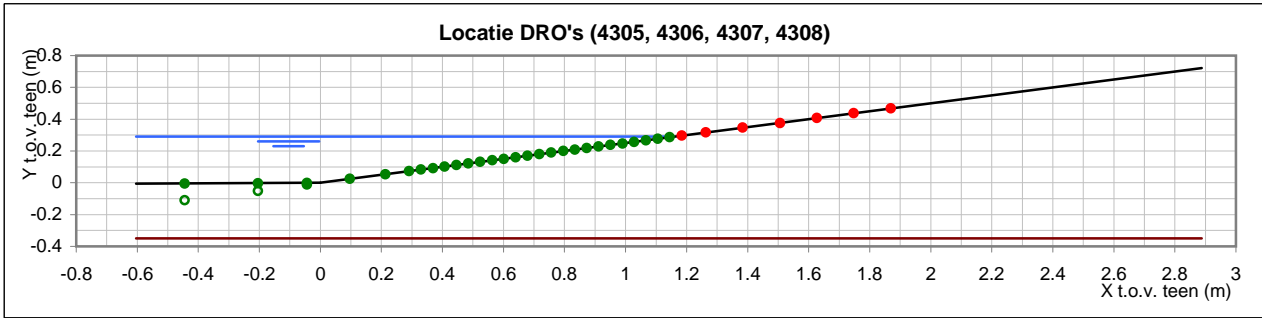
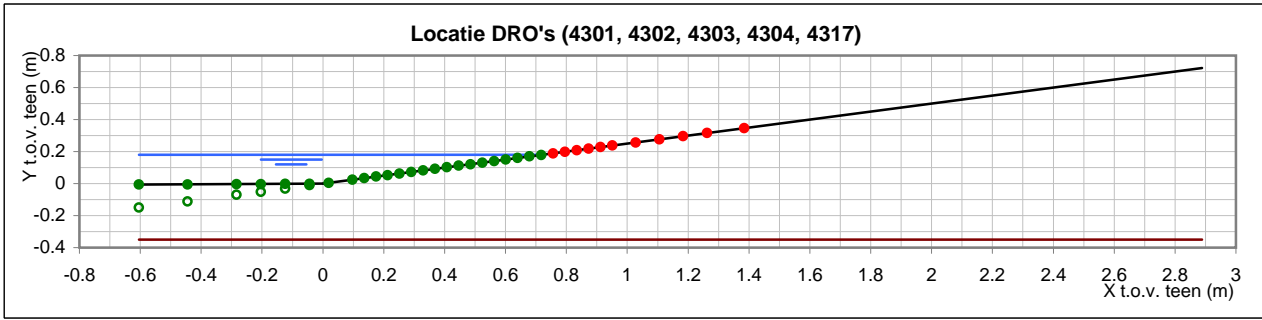
3300-serie

DELTAIRES

1202551-008

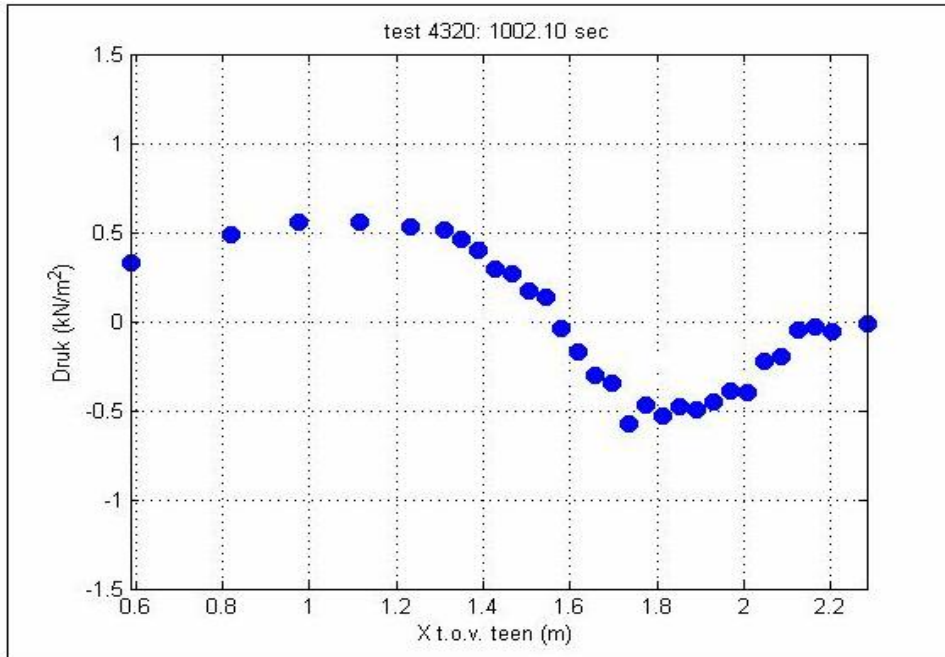
FIG B.2



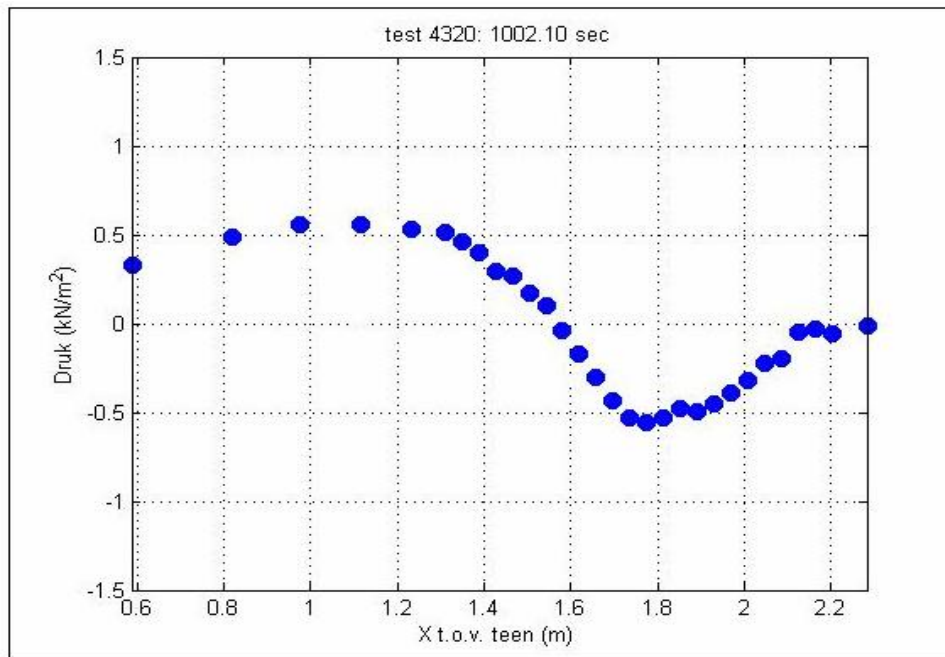


Locaties drukopnemers 4300-serie Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiepe voorlanden		4300-serie
DELTAIRES	1202551-008	FIG B.3

Meetdata drukopnemers (ruwe data)



Meetdata drukopnemers (gecorrigeerd)



Correctie meetdata drukopnemers Locatie maximale belasting op steenzetting bij ondiepe voorlanden		proef 4320
	DELTAIRES	1202551-008
		FIG B.4