

**Invloed van dubbeltoppige
golfspectra op de stabiliteit
van steenzettingen**



Invloed van dubbeltoppige golfspectra op de stabiliteit van steenzettingen

G.C. Mourik

1204727-005

Titel

Invloed van dubbeltoppige golfspectra op de stabiliteit van steenzettingen

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1204727-005

Kenmerk

1204727-005-HYE-0004

Pagina's

23

Trefwoorden

Dubbeltoppige golfspectra, steenzetting, stabiliteit

Samenvatting

Bij het toetsen of ontwerpen van steenzettingen loopt men in specifieke gebieden tegen het probleem aan dat de piekperiode T_p erg groot is ten opzichte van de spectrale periode $T_{m-1,0}$ (een normale verhouding is $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$). Het vermoeden bestaat dat het berekenen van de stabiliteit met de piekperiode T_p (de standaard gebruikte periodemaat bij de beoordeling van de stabiliteit) in zo'n geval niet tot de juiste resultaten leidt. Het verschil tussen de periodematen is vooral groot wanneer sprake is van een dubbeltoppig spectrum of een zeer breed spectrum.

Waarschijnlijk is $T_{m-1,0}$ een betere periodemaat voor het kwantificeren van de golfperiode dan de T_p . Omdat nu echter geen overstap van de T_p naar $T_{m-1,0}$ voorzien is, wordt voorgesteld een tussenstap te maken. Daarbij is het doel om in de extreme situaties (dubbeltoppige spectra met orde $T_p/T_{m-1,0} > 1,3$ of $T_p/T_{m-1,0} < 0,9$) een correctie toe te passen op de T_p . Dat moet een rekenwaarde voor de T_p opleveren waarmee de stabiliteit op de gebruikelijke wijze bepaald kan worden.




Het resultaat van dit onderzoek is een eenvoudige vuistregel waarmee op basis van de T_p en de $T_{m-1,0}$ een representatieve maatgevende golfperiode kan worden bepaald, voor het geval dat T_p sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. De opzet is deze representatieve periodemaat te gebruiken in plaats van de T_p in formules voor de stabiliteit van steenzettingen. De vuistregel is erop gericht dat wanneer deze twee wel een normale verhouding hebben, er vanzelf op de gebruikelijke wijze wordt gerekend met T_p .

Voor het bepalen van de vuistregel zijn in het onderhavige rapport enkele Deltagootproeven uit 1997 (zeer brede spectra) en Scheldegootproeven uit 2003 (dubbeltoppige spectra) opnieuw geanalyseerd met behulp van de enkele jaren geleden ontwikkelde golfanalyse-software AnalyseWave. De vuistregel is bepaald door de meetdata van de opnieuw geanalyseerde proeven te vergelijken met meetdata van een groot aantal proeven (met smalle enkeltoppige spectra) die reeds geanalyseerd waren in Klein Breteler e.a. (2006). De vuistregel is gebaseerd op de Scheldegootproeven.

Referenties

Zaaknummer 31054958/4500180616, van 07-06-2011

Contactpersoon RWS: K. Saathof

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

Status

definitief

Inhoud

| | |
|---|------------|
| Lijst van Symbolen | iii |
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Problematiek en doel | 1 |
| 1.2 Opzet van het onderzoek | 2 |
| 2 Meetdata brede en dubbeltoppige spectra | 5 |
| 2.1 Modelopstelling en bemonstering | 5 |
| 2.1.1 Deltagootproeven | 5 |
| 2.1.2 Scheldegootproeven | 5 |
| 2.2 Inkomende golfspectra | 6 |
| 2.2.1 Deltagootproeven | 6 |
| 2.2.2 Scheldegootproeven | 7 |
| 2.3 Hydraulische condities | 7 |
| 3 Analyse | 9 |
| 3.1 Nauwkeurigheid van de proeven | 9 |
| 3.2 Gebruikte grafieken uit Klein Breteler (2006) | 10 |
| 3.3 Meetpunten brede en dubbeltoppige spectra | 11 |
| 3.4 Vuistregel | 12 |
| 3.4.1 Vuistregel als T_p groter is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ | 12 |
| 3.4.2 Randvoorwaarden voor uitbreiding van de vuistregel als T_p kleiner is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ | 13 |
| 3.4.3 Totale vuistregel | 15 |
| 3.4.4 Alternatieve vuistregel | 18 |
| 4 Conclusies en aanbevelingen | 21 |
| 5 Referenties | 23 |
| Bijlage(n) | |
| A Definitie periodematen | A-1 |
| B Figuren | B-1 |

Lijst van Symbolen

| Symbol | Eenheid | Betekenis |
|----------------------------------|------------------------|---|
| a | - | Factor Weber-schaling |
| $B_{\text{klap}50\%}$ | m | Klapbreedte, evenwijdig aan het talud gemeten, van de golfklap behorend bij 50% van de belasting p_{max} |
| C_{top} | - | Verhouding tussen de hoogte van de twee toppen van een dubbeltoppig spectrum |
| d_{dro} | m | Onderlinge afstand tussen drukopnemers langs het talud (h.o.h.) |
| E | m^2/Hz | Energiedichtheid |
| f | Hz | Frequentie |
| g | m/s^2 | Versnelling van de zwaartekracht |
| $H_{\text{m}0}$ | m | Spectrale significante golfhoogte (wordt in dit rapport ook wel aangeduid als H_s) |
| H_s | m | Significante golfhoogte |
| h | m | Waterdiepte |
| I_{dip} | m^2s | Dipimpuls, gedefinieerd als de geïntegreerde dipkracht, die gelijk is aan het oppervlak onder het verloop van de dipkracht als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging) |
| m_n | m^2 | n-de moment van het energiedichtheidsspectrum (golfspectrum) |
| N | - | Aantal golven |
| N_{front} | - | Aantal golffronten |
| N_{klap} | - | Aantal golfklappen |
| p_{max} | m | Druk ten opzichte van het talud tijdens een golfklap, op het moment dat ϕ_{max} optreedt |
| $T_{\text{m-1,0}}$ | s | Spectrale golfperiode |
| T_{pb} | s | Blok-piekperiode |
| T_{pbeq} | s | Equivalentente blok-piekperiode |
| T_{pD} | s | Dominante piekperiode |
| T_{pm} | s | Gemiddelde (mean) piekperiode |
| T_{p} | s | Piekperiode (golfperiode bij de piek van het spectrum) |
| T_{ps} | s | Smoothed piekperiode (golfperiode bij de piek van het gesmoothe spectrum) |
| $T_{\text{p,r}}$ | s | Representatieve 'piekperiode' voor spectra waarin T_{p} sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{\text{m-1,0}}$ |
| x_s | m | Horizontale afstand tussen de waterlijn en de locatie waar ϕ_{min} optreedt |
| α | - | Taludhelling |
| Y_{berm,ϕ_k} | - | Factor die de invloed van de berm op ϕ_k tijdens de golfklap weergeeft |
| $Y_{\text{berm},p_{\text{max}}}$ | - | Factor die de invloed van de berm op p_{max} tijdens de golfklap weergeeft |
| θ_f | $^\circ$ | Helling van het golffront (gemiddelde tussen $0,9\phi_{\text{min}}$ en stilwaterlijn) |
| ξ_{op} | - | Brekerparameter |
| ρ | kg/m^3 | Soortelijke massa van water |
| σ_w | N/m | Oppervlaktespanning van water (0,073 N/m, bij 20 °C) |
| ϕ_{dip} | ms | Geïntegreerde gediptheid, gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor blokbeweging) |
| ϕ_b | m | Hoogte van het golffront |

| | | |
|---------------------|---|--|
| ϕ_{dip} | m | Gediptheid, gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijgheighteverloop en het werkelijke stijgheighteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijgheightevershil over de toplaag bij een bepaalde leklengte) |
| ϕ_{k} | m | Maximale stijgheighte op het talud tijdens de golfklap ten opzichte van de minimale stijgheighte in de trog tussen de golfklap en het golffront, op het moment dat ϕ_{max} optreedt |
| ϕ_{min} | m | Minimale stijgheighte in de trog aan de voet van het front |

1 Inleiding

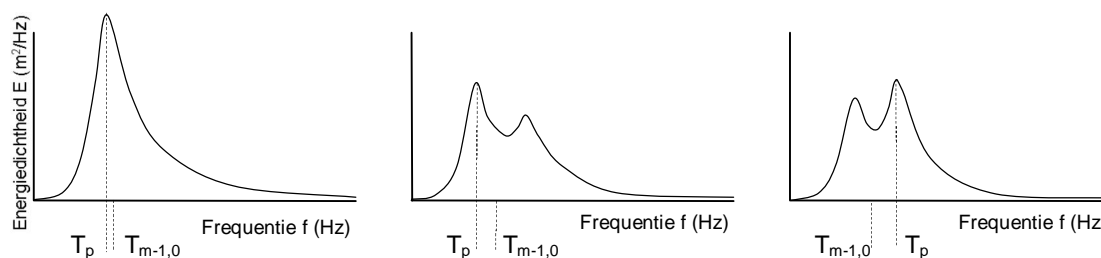
1.1 Problematiek en doel

De stabiliteit van een steenzetting is, naast constructieve en geometrische eigenschappen van de steenzetting, onder meer afhankelijk van het optredende golfspectrum. Voor het berekenen van de stabiliteit wordt het spectrum gekarakteriseerd met een golfhoogte en een maat voor de golfperiode. De standaard gebruikte periodemaat in de huidige formules voor de beoordeling van de stabiliteit is de piekperiode T_p (zie bijlage A voor de definities van de in dit rapport genoemde periodematen).

Bij het toetsen en ontwerpen van steenzettingen loopt men in specifieke gebieden echter tegen het probleem aan dat de piekperiode T_p erg groot is ten opzichte van de spectrale periode $T_{m-1,0}$. Het vermoeden bestaat dat het berekenen van de stabiliteit met de piekperiode T_p in zo'n geval niet tot de juiste resultaten leidt. Het verschil tussen de periodematen is vooral groot wanneer sprake is van een dubbeltoppige golfspectrum of een zeer breed spectrum, zoals bijvoorbeeld in het oostelijke deel van de Waddenzee. Bij dubbeltoppige spectra heeft rekenen met de T_p het nadeel dat kleine veranderingen in het spectrum ertoe kunnen leiden dat de T_p van de ene top naar de andere top verspringt en daardoor tientallen procenten kan verspringen (zie ook Figuur 3.2).

Waarschijnlijk is de $T_{m-1,0}$ (min of meer een gewogen gemiddelde van het spectrum) een betere periodemaat voor het kwantificeren van de golfperiode dan de T_p . Omdat nu echter geen overstap van de T_p naar $T_{m-1,0}$ voorzien is, wordt voorgesteld een tussenstap te maken. Daarbij is het doel om in de extreme situaties (dubbeltoppige spectra met orde $T_p/T_{m-1,0} > 1,3$ of $T_p/T_{m-1,0} < 0,9$) een correctie toe te passen op de T_p . Dat moet een rekenwaarde voor de T_p opleveren waarmee de stabiliteit op de gebruikelijke wijze bepaald kan worden.

Een normale verhouding is $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$. Dit treedt op bij lokaal opgewekte windgolven (geen deining) en relatief diep water (geen breking van golven op ondieptes). Zowel de T_p als de $T_{m-1,0}$ zijn in de tabellen van het WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium) per dijkvak beschikbaar.



Figuur 1.1 Verhouding tussen T_p en $T_{m-1,0}$ bij enkeltoppige en dubbeltoppige spectra (schematisch).

Bij smalle enkeltoppige spectra (Figuur 1.1, links) is T_p een goede representatieve waarde voor de maatgevende golfperiode. Wanneer echter sprake is van een dubbeltoppige spectrum heeft T_p het nadeel dat die bij één van de beide toppen ligt. Wanneer de linker top de hoogste is (Figuur 1.1, midden) dan resulteert dat in een relatief hoge waarde voor de maatgevende golfperiode (merk op dat de golfperiode T en de frequentie f omgekeerd evenredig zijn: $T = 1/f$). Wanneer de rechter top de hoogste is (Figuur 1.1, rechts) dan resulteert dat in een relatief kleine waarde voor de maatgevende golfperiode.

Voor smalle enkeltoppige spectra geldt bij benadering de verhouding $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$. In situaties waarin T_p sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ (Figuur 1.1, midden en rechts) is het naar

verwachting beter om te rekenen met een rekenwaarde voor de T_p die gelijk is aan $T_{m-1,0}$ maal een factor.

In het onderhavige rapport zijn enkele Deltagootproeven uit 1997 en Scheldegootproeven uit 2003 opnieuw geanalyseerd met behulp van de enkele jaren geleden ontwikkelde golf-analysesoftware AnalyseWave (Klein Breteler e.a., 2006). Die proeven zijn uitgevoerd met een dubbeltoppig of zeer breed spectrum. Bij brede spectra speelt een vergelijkbare problematiek als bij dubbeltoppige spectra.

Het doel van deze analyse is te komen tot een eenvoudige vuistregel waarmee op basis van de T_p en de $T_{m-1,0}$ een representatieve maatgevende golfperiode kan worden bepaald, voor het geval dat T_p sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. De vuistregel moet erin voorzien dat T_p alleen in extreme situaties wordt gecorrigeerd, maar dat wanneer deze twee wel een normale verhouding hebben, er vanzelf op de gebruikelijke wijze wordt gerekend met T_p .

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.

1.2 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek wordt uitgevoerd door meetdata van de proeven met brede en dubbeltoppige spectra te vergelijken met meetdata van proeven met gebruikelijke smalle enkeltoppige spectra. Het is te verwachten dat trends voor brede en dubbeltoppige spectra in zekere mate afwijken van trends voor de gebruikelijke spectra.

Het uitgangspunt voor het onderhavige onderzoek wordt gevormd door Klein Breteler e.a. (2006): een uitgebreid onderzoek waarin op basis van een groot aantal proeven met smalle enkeltoppige spectra een groot aantal trends is bepaald voor golfparameters die relevant zijn voor de stabiliteit van steenzettingen. Dat onderzoek is gebaseerd op zowel groot- als kleinschalige proeven (respectievelijk in de Deltagoot en Scheldegoot). In Klein Breteler e.a. (2006) zijn karakteristieke golfparameters op vele manieren in grafieken uitgezet, waarop de huidige stabiliteitsformules gebaseerd zijn. In de grafieken is als periodemaat steeds gebruik gemaakt van de piekperiode T_p .

In het onderhavige onderzoek is een deel van de grafieken uit Klein Breteler e.a. (2006) gebruikt als onderlegger, waar nieuwe meetpunten van de proeven met brede en dubbeltoppige spectra overheen geplott zijn. Gelet op het doel van het onderzoek zijn uitsluitend grafieken gebruikt waarin een relatief duidelijke trend zichtbaar is en waarin T_p (of daarvan afgeleide parameters) op minimaal één van de assen is uitgezet. In de geselecteerde grafieken is T_p op de horizontale as steeds indirect verwerkt in de brekerparameter ξ_{op} .

Volgens de genoemde methode is bepaald hoe de nieuwe meetpunten zich verhouden tot bestaande trends en welke vertaalslag (vuistregel) nodig is om de nieuwe meetpunten beter op de trends te laten aansluiten.

Er is gezocht naar een eenvoudige vuistregel waarmee op basis van de T_p en de $T_{m-1,0}$ een representatieve maatgevende golfperiode kan worden bepaald, voor het geval dat T_p sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. De vuistregel is erop gericht dat wanneer deze twee wel een normale verhouding hebben, er vanzelf wordt gerekend met T_p (zoals gebruikelijk bij toetsing).

Het beperkte aantal metingen en de grote spreiding in de geanalyseerde processen maakt dat het niet haalbaar is om een erg geavanceerde formule voor de karakteristieke periode-maat op te stellen. Daarom wordt gezocht naar een eenvoudige omrekenfactor.

2 Meetdata brede en dubbeltoppige spectra

In het verleden zijn diverse proeven uitgevoerd met zeer brede en dubbeltoppige spectra. In 1997 vonden in de Deltagoot 4 proeven plaats met zeer brede spectra. En in 2003 zijn in de Scheldegoot 3 proeven uitgevoerd met dubbeltoppige spectra.

Dit hoofdstuk gaat voor de betreffende modelproeven in op de belangrijkste aspecten ten aanzien van de modelopstelling, bemonstering, het bepalen van de inkomende golfspectra en de gerealiseerde hydraulische condities.

Voor een uitgebreide beschrijving van de uitvoering en analyse van de Deltagootproeven wordt verwezen naar:

- Meetverslag: Smith e.a. (2000).
- Analyserapport (tekst): Klein Breteler (2000a)
- Analyserapport (figuren): Klein Breteler (2000b)

Voor een uitgebreide beschrijving van de Scheldegootproeven wordt verwezen naar Kuiper e.a. (2003).

2.1 Modelopstelling en bemonstering

2.1.1 Deltagootproeven

Als onderdeel van een uitgebreid onderzoek dat in 1997/1998 in de Deltagoot werd uitgevoerd (Smith e.a., 2000), werden 4 proeven uitgevoerd met een zeer breed spectrum: de proeven T6O19, T6O20, T6O21 en T6O22.

De proeven werden uitgevoerd op een steenzetting van plat gezette betonblokken (0,5 m x 0,5 m; D = 0,21 m). Het talud had een helling van 1:3,5. Om de brede spectra te genereren was het nodig de proeven uit te voeren bij een kleine waterdiepte h. De proeven werden uitgevoerd bij respectievelijk h = 2.03, 2.02, 2.23 en 2.22 m. Vanwege de kleine waterdiepte werd geen hinder ondervonden van de aanwezige berm op een hoogte van 5,0 m boven de gootbodem.

Voor de proeven zijn er 12 drukopnemers op en 11 onder de bekleding geïnstalleerd. Binnen het onderhavige onderzoek wordt uitsluitend gekeken naar de drukopnemers op de toplaag. De onderlinge afstand tussen de drukopnemers op het relevante deel van de bekleding was $d_{dro} = 0,50$ m (h.o.h.). Tijdens het analyseren van de meetdata bleek de drukopnemer op een niveau van 1,26 m boven de gootbodem defect te zijn, waardoor de afstand tussen de drukopnemers daar 1,00 m was. De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 40 Hz.

Voor het bepalen van de golfcondities werd gebruik gemaakt van een set van 2 golfhoogtemeters.

2.1.2 Scheldegootproeven

In het kader van een onderzoek naar de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit van steenzettingen is in 2003 een omvangrijk onderzoek op kleine schaal in de Scheldegoot uitgevoerd (Kuiper e.a., 2003). Tijdens dat onderzoek werden 3 proeven uitgevoerd met een dubbeltoppig spectrum: de proeven t501, t502 en t503.

De toplaag was geconstrueerd van dik hout dat stevig was bevestigd op de gootbodem teneinde een zo stijf mogelijke constructie te krijgen. Het talud had een helling van 1:4.

In het midden van het talud was een aluminium strook gemonteerd met 42 drukopnemers op rij. De drukopnemers waren in het vlak van het talud gemonteerd. In het gebied waar de grootste golfklappen verwacht werden, zijn de drukopnemers met een onderlinge afstand van $d_{\text{dro}} = 0,022$ m (h.o.h.) geïnstalleerd. Aan de randen van het interessegebied bedroeg de onderlinge afstand 0,042 tot 0,084 m vlak onder de stilwaterlijn en 0,042 tot 0,21 m diep onder water. De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 2000 Hz, maar zijn na filtering in het frequentiedomein (met de signaalverwerkingssoftware AUKE) opnieuw bemonsterd op 100 Hz.

Voor het bepalen van de golfcondities werd gebruik gemaakt van een set van 3 golfhoogtemeters.

2.2 Inkomende golfspectra

In het water voor de constructie bevindt zich een combinatie van zowel inkomende als gereflecteerde golven. In dit onderzoek worden alleen de inkomende golven beschouwd.

Bij modelproeven kunnen inkomende en gereflecteerde golven van elkaar worden gescheiden door de meetdata van meerdere dicht achter elkaar geplaatste golfhoogtemeters te analyseren met de door Deltares ontwikkelde signaalverwerkingssoftware AUKE.

In het verleden werd voor het scheiden van inkomende en gereflecteerde golven aanvankelijk gebruik gemaakt van 2 golfhoogtemeters. Het gebruik van 2 golfhoogtemeters heeft echter het nadeel dat niet het gehele inkomende spectrum bepaald kan worden. Vanwege het aliasing effect kunnen het eerste en het laatste deel van het spectrum (resp. lage en hoge frequenties) niet berekend worden. Na de ontwikkeling van een nieuwe methode, op basis van 3 golfhoogtemeters, was het wel mogelijk om het inkomende spectrum volledig te bepalen.

Ter illustratie en ter vergelijking zijn in bijlage B.18 drie willekeurige inkomende golfspectra met de bijbehorende overschrijdingskrommen toegevoegd van willekeurige Deltagootproeven met enkeltoppige spectra. Die golfspectra zijn bepaald op basis van 3 golfhoogtemeters.

2.2.1 Deltagootproeven

Bij de in dit rapport geanalyseerde Deltagootproeven zijn 2 golfhoogtemeters gebruikt, waardoor het eerste en laatste deel van de inkomende golfspectra (Smith e.a., 2000) niet bekend zijn. Omdat in het kader van het onderhavige onderzoek echter wel volledige spectra benodigd zijn, is het begin en het einde van de spectra geschat. De aangevulde golfspectra zijn gegeven in bijlage B.1. Daarin geven de getrokken lijnen de bekende delen van de spectra weer en de stippellijnen de geschatte delen.

Het schatten van het begin en einde van de spectra is als volgt gedaan:

Begin:

Het ontbrekende gedeelte aan het begin van het spectrum loopt van $f = 0$ tot circa $f = 0,06$ à $0,08$ Hz. Dat komt overeen met golfperioden groter dan respectievelijk 17 à 12 seconden. Omdat dergelijke lange golven over het algemeen vrijwel volledig reflecteren, is voor die lage frequenties aangenomen dat het inkomende spectrum de helft betreft van het gemiddelde

van de afzonderlijke spectra van de golfhoogtemeters 1 en 2. De zo geschatte beginstukjes sluiten goed aan op de bekende delen van de spectra.

Einde:

De laatste 0,02 à 0,04 Hz van de bekende spectra vertoont bij alle proeven een lichte stijging. Die stijging is waarschijnlijk een gevolg van het aliasing effect en dus niet werkelijk opgetreden. De laatste 0,02 tot 0,04 Hz zijn daarom uit het bestaande spectrum verwijderd. Het laatste punt van het zo verkregen spectrum wordt aangeduid als E_e , bij de frequentie f_e . De staart van het spectrum is vervolgens aangevuld volgens de formule:

$$E = f^{-4} \cdot \frac{E_e}{f_e^{-4}} \quad (2.1)$$

Het aanvullen van de ontbrekende staart met deze formule is conform de procedures binnen het WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium). Wanneer binnen het WTI bij het bepalen van randvoorwaarden de staart van een golfspectrum ontbreekt, wordt die eveneens aangevuld volgens formule (2.1).

2.2.2 Scheldegootproeven

Bij de Scheldegootproeven is gebruik gemaakt van 3 golfhoogtemeters, waardoor het inkomende spectrum volledig bekend is. Inkomende spectra zijn zowel vlak bij het golfschot als bij de teen van de constructie bepaald. Beide inkomende golfspectra van de Scheldegootproeven zijn weergegeven in bijlage B.2. In het onderhavige onderzoek wordt gebruik gemaakt van de inkomende spectra vlak bij het golfschot. Dat sluit aan op de grafieken uit Klein Breteler e.a. (2006). Daarin is bij vergelijkbare proevenseries van de Scheldegoot eveneens gerekend met de inkomende spectra bij het golfschot. Bij de teen wordt het onderscheiden van inkomende en gereflecteerde spectra immers bemoeilijkt door golfbreking en reflectie.

2.3 Hydraulische condities

Tabel 2.1 geeft de hydraulische condities van de proeven in de Deltagoot (Δ -goot) en Scheldegoot (S-goot).

| Goot | Proef | h (m) | H_s (m) | T_{ps} (s) | $T_{m-1,0}$ (s) | N (-) |
|----------------|-------|----------|--------------|-----------------|--------------------|----------|
| Δ -goot | T6O19 | 2,03 | 0,83 | 7,62 | 5,29 | 1032 |
| | T6O20 | 2,02 | 0,81 | 6,93 | 5,22 | 1171 |
| | T6O21 | 2,23 | 0,91 | 9,08 | 5,60 | 991 |
| | T6O22 | 2,22 | 0,88 | 7,08 | 5,28 | 1125 |
| S-goot | t501 | 0,74 | 0,142 | 3,03 | 1,86 | 1192 |
| | t502 | 0,74 | 0,147 | 4,19 | 2,33 | 1558 |
| | t503 | 0,77 | 0,157 | 5,43 | 2,79 | 1714 |

Tabel 2.1 Gerealiseerde hydraulische condities

In de tabel is h de waterdiepte in de goot en N het aantal golven dat is bepaald met de golfanalysesoftware AnalyseWave. T_{ps} is de smoothed piekperiode en $T_{m-1,0}$ de spectrale golfperiode. Zie bijlage A voor de definities van de in dit rapport genoemde periodematen en

de wijze waarop T_{ps} en $T_{m-1,0}$ zijn berekend. Omdat T_{ps} en T_p nauwelijks van elkaar verschillen, worden in deze rapportage zowel T_p als T_{ps} in het vervolg beide aangeduid als T_p .

De significante golfhoogte is bij de Deltagoot- en Scheldegootproeven in het verleden op verschillende manieren bepaald:

- Van de Deltagootproeven is uitsluitend H_s bekend. H_s is de gemeten significante golfhoogte (gemiddelde van $1/3^e$ deel hoogste golven). Om zo goed mogelijk aan te sluiten op de grafieken in Klein Breteler e.a. (2006) wordt gerekend met H_s . In die grafieken is voor vergelijkbare Deltagootproeven ook steeds gebruik gemaakt van H_s .
- Van de Scheldegootproeven zijn zowel H_{m0} als H_s bekend. H_{m0} is de significante golfhoogte op basis van het golfspectrum. Om zo goed mogelijk aan te sluiten op de grafieken in Klein Breteler e.a. (2006) wordt gerekend met H_{m0} . In die grafieken is voor vergelijkbare Scheldegootproeven ook steeds gebruik gemaakt van H_{m0} .

De significante golfhoogten H_s en H_{m0} komen gewoonlijk vrij goed overeen. Gebruik van H_s bij de Deltagootproeven en H_{m0} bij de Scheldegootproeven zal daarom geen significante invloed hebben op de resultaten van het onderzoek. H_s en H_{m0} worden in dit rapport voortaan beide aangeduid als H_s .

3 Analyse

In de onderhavige analyse is toegewerkt naar een vuistregel waarmee de T_p in extreme situaties (dubbeltoppige spectra met orde $T_p/T_{m-1,0} > 1,3$ of $T_p/T_{m-1,0} < 0,9$) op basis van de periodematen T_p en $T_{m-1,0}$ gecorrigeerd kan worden tot een praktisch bruikbare rekenwaarde. De correctie berust erop dat bij een normale verhouding tussen T_p en $T_{m-1,0}$ gewoon gerekend kan worden met T_p , maar dat in extreme situaties gerekend wordt met een gecorrigeerde (afgetopte) T_p : de zogenoemde representatieve piekperiode $T_{p,r}$.

Eerst is in paragraaf 3.1 van de beschikbare proeven de nauwkeurigheid van de meetresultaten onderzocht. Uitsluitend de proeven met een voldoende grote meetnauwkeurigheid (de Scheldegootproeven) zijn verder beschouwd.

Doordat in de dubbeltoppige spectra van de Scheldegootproeven steeds de linkertop groter is dan de rechter top (waardoor T_p steeds groter is dan $1,1T_{m-1,0}$) is de vuistregel in eerste instantie bepaald voor situaties waarin $T_p > 1,1T_{m-1,0}$. Voor het bepalen van de bovengrens waarop T_p afgetopt moet worden, is in paragraaf 3.3 de meetdata van de proeven met de dubbeltoppige spectra geplot in grafieken met de meetdata van proeven met gebruikelijke smalle enkeltoppige spectra (zie paragraaf 3.2 en Klein Breteler e.a., 2006 voor een beschrijving van de grafieken van de enkeltoppige spectra). Zonder aan de T_p een bovengrens te stellen, vallen de meetpunten van de dubbeltoppige spectra voornamelijk buiten de trends van de meetpunten van enkeltoppige spectra, maar door de toevoeging van een bovengrens zullen de meetpunten beter binnen de trends vallen. In paragraaf 3.3 wordt gezocht naar de bovengrens met het optimale resultaat.

In paragraaf 3.4 is de vuistregel vervolgens uitgebreid voor situaties waarin $T_p < 1,1T_{m-1,0}$.

3.1 Nauwkeurigheid van de proeven

De nauwkeurigheid van de meetresultaten wordt beïnvloed door de afstand tussen de drukopnemers op het talud (d_{dro}) en de bemonsteringsfrequentie (f) waarmee druksignalen worden gemeten. De fout als gevolg van de drukopnemerafstand en bemonsteringsfrequentie is afhankelijk van de relatieve drukopnemerafstand d_{dro}/H_s en de relatieve bemonsteringsfrequentie $f\sqrt{H_s/g}$.

Tabel 3.1 geeft een indruk van de nauwkeurigheid van de onderzochte proeven. De drukopnemerafstand in de Deltagoot was gewoonlijk 0,50 m, maar op ongeveer $(0,9 \text{ à } 1,1) \cdot H_s$ onder de waterlijn bleek achteraf een drukopnemer defect, waardoor de drukopnemerafstand daar 1,00 m was. Die drukopnemer lag weliswaar aan de onderzijde van het meest relevante gebied voor golfklappen, maar toch kunnen hier incidenteel maatgevende belastingen optreden. Het ontbreken van de drukopnemer heeft daarom een relatief grote invloed op de meetresultaten.

In de Scheldegoot was de drukopnemerafstand in het meest relevante gebied 0,022 m. Tussen circa $0,3H_s$ en $0,6H_s$ onder de stilwaterlijn was de drukopnemerafstand 0,042 m. Daarboven was de afstand 0,066 en 0,084 m. Vooral de afstanden $d_{dro} = 0,022$ en $d_{dro} = 0,042$ zijn van invloed op de nauwkeurigheid van de metingen.

| Goot | Proef | H _s (m) | d _{dro} (m) | d _{dro} /H _s (-) | f (Hz) | f√(H _s /g) (-) |
|--------|-------|-----------------------|-------------------------|---|-----------|------------------------------|
| Δ-goot | T6O19 | 0,83 | 0,50 – 1,00 | 0,6 – 1,2 | 40 | 12 |
| | T6O20 | 0,81 | 0,50 – 1,00 | 0,6 – 1,2 | 40 | 11 |
| | T6O21 | 0,91 | 0,50 – 1,00 | 0,5 – 1,1 | 40 | 12 |
| | T6O22 | 0,88 | 0,50 – 1,00 | 0,6 – 1,1 | 40 | 12 |
| S-goot | t501 | 0,142 | 0,022 – 0,042 | 0,2 – 0,3 | 100 | 12 |
| | t502 | 0,147 | 0,022 – 0,042 | 0,1 – 0,3 | 100 | 12 |
| | t503 | 0,157 | 0,022 – 0,042 | 0,1 – 0,3 | 100 | 13 |

Tabel 3.1 Nauwkeurigheid van de meetresultaten op basis van de relatieve drukopnemerafstand d_{dro}/H_s en de relatieve bemonsteringsfrequentie $f\sqrt{H_s/g}$.

De relatieve bemonsteringsfrequentie is voor zowel de Delta- als Scheldegootproeven circa 12. Op basis van deze maat voor de nauwkeurigheid zijn beide proevenseries gelijkwaardig. Wat betreft de relatieve drukopnemerafstand wordt de onnauwkeurigheid bij de Deltagootproeven waarschijnlijk vooral bepaald door $d_{dro} = 1,00$ m ($d_{dro}/H_s = 1,1$ à $1,2$) onderaan het meest relevante gebied en bij de Scheldegootproeven door $d_{dro} = 0,042$ ($d_{dro}/H_s = 0,3$) aan de bovenkant van het meest relevante gebied. Op basis van de relatieve drukopnemerafstand blijken de Scheldegootproeven beduidend nauwkeuriger. De onderhavige analyse richt zich daarom vooral op de meetresultaten van de Scheldegootproeven.

3.2 Gebruikte grafieken uit Klein Breteler (2006)

In Klein Breteler zijn de meetdata van een groot aantal groot- en kleinschalige modelproeven geplot in grafieken, teneinde trends te bepalen die de relatie beschrijven tussen karakteristieke golfparameters en de stabiliteit van steenzettingen. In dat onderzoek is gebruik gemaakt van series grootschalige Deltagootproeven uit 1991, 1992, 1997/1998 en 2004. En er is gebruik gemaakt van series kleinschalige Scheldegootproeven uit 1993 en 2003.

Een selectie van de grafieken is in het onderhavige rapport bijgevoegd in de bijlagen B.3 tot B.17. Gelet op het doel van het onderzoek zijn uitsluitend de grafieken geselecteerd waarin een relatief duidelijke trend zichtbaar is en waarin T_p op minimaal één van de assen is uitgezet. In de geselecteerde grafieken is T_p steeds indirect verwerkt in de brekerparameter ξ_{op} op de horizontale as. Er geldt immers de volgende benadering:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{1,56 \cdot T_p^2}}} \quad (3.1)$$

In de grafieken in de bijlagen komen de zwarte meetpunten exact overeen met die uit de grafieken van Klein Breteler e.a. (2006). De gekleurde meetpunten zijn in het onderhavige onderzoek toegevoegd en worden verderop in dit rapport toegelicht (paragraaf 3.3). In de grafieken is onderscheid gemaakt tussen meetpunten van Delta- en Scheldegootproeven en daarbinnen is onderscheid gemaakt in de taludhelling. In de grafieken in bijlagen B.3 en B.4 zijn per proef steeds twee meetpunten gegeven: één voor fronten en één voor klappen. In de overige grafieken zijn per proef drie meetpunten gegeven voor de drie overschrijdingsfrequenties 0% (max), 2% en 10%. Trends zijn destijds bepaald op basis van de meetpunten die betrekking hebben op 2%-waarden (dichte zwarte meetpunten).

Voor een uitgebreide beschrijving van de grafieken, de achterliggende modelproeven en de achterliggende rekenprocessen wordt verwezen naar Klein Breteler e.a. (2006). Met oog daarop is in de bijlagen van het onderhavige rapport tevens de nummering van Klein Breteler e.a. (2006) vermeld.

De meetdata van de proevenseries is destijds geanalyseerd met de enkele jaren geleden ontwikkelde golfanalysesoftware 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 klap en voor elk front bepaalt AnalyseWave vervolgens de karakteristieke parameters. De parameters worden gegeven in grote uitvoertabellen. Voor een uitgebreide beschrijving van het rekenproces in AnalyseWave wordt verwezen naar bijlage G van Klein Breteler e.a. (2006).

3.3 Meetpunten brede en dubbeltoppige spectra

Bij de dubbeltoppige spectra van de Scheldegootproeven is steeds de linker top de hoogste, waardoor T_p groter is dan $1,1T_{m-1,0}$. Op basis van die proeven kan in eerste instantie uitsluitend een vuistregel ontwikkeld worden voor het geval dat T_p groter is dan $1,1T_{m-1,0}$.

In de onderhavige paragraaf is voor het geval dat T_p veel groter is dan $1,1T_{m-1,0}$ gezocht naar een optimale bovengrens voor de $T_{p,r}$, met het doel te voorkomen dat in extreme situaties (orde $T_p > 1,3T_{m-1,0}$) met een te grote maatgevende golfperiode gerekend wordt. Wanneer T_p en $T_{m-1,0}$ wel een vrij normale verhouding hebben, dient op de gebruikelijke wijze gerekend te worden met T_p .

De gecorrigeerde (afgetopte) T_p wordt voor situaties waarin $T_p > 1,1T_{m-1,0}$ in formulevorm beschreven door:

$$T_{p,r} = \min(f_{T_{p,r}} \cdot T_{m-1,0} ; T_p) \quad (3.2)$$

Daarin is $T_{p,r}$ de zogenoemde representatieve piekperiode en $f_{T_{p,r}}$ een in deze paragraaf nader vast te stellen vermenigvuldigingsfactor.

De proeven met brede en dubbeltoppige spectra zijn op dezelfde wijze met AnalyseWave geanalyseerd als de proeven in Klein Breteler e.a. (2006). En vervolgens zijn op dezelfde wijze ook de 2%- en 10%-waarden van de golfkarakteristieken bepaald.

Per Delta- en Scheldegootproef is elke 2%- en 10%-waarde tweemaal geplot: een keer waarbij de waarde op de gebruikelijke manier is gebaseerd op de T_p (rode punten), en een keer waarbij T_p is vervangen door $f_{T_{p,r}} \cdot T_{m-1,0}$ (groene punten). In alle grafieken heeft het vervangen van T_p door $T_{p,r}$ invloed op de grootte van de brekerparameter ξ_{op} (horizontale as). Daarnaast heeft het voor de grafieken B.6, B.7, B.8 en B.13 ook invloed op de waarde in de verticale richting. De groene punten in de bijlagen zijn geplot uitgaande van $T_{p,r} = 1,3T_{m-1,0}$. Voor $f_{T_{p,r}}$ blijkt 1,3 de meest optimale waarde (zie verderop in deze paragraaf).

Om de nieuwe gekleurde punten goed te kunnen vergelijken met de oorspronkelijke zwarte punten zijn voor de nieuw toegevoegde proeven dezelfde typen markers gebruikt als bij vergelijkbare proeven in de oorspronkelijke grafieken (vergelijkbaar op basis van de gebruikte goot en cota). Bijvoorbeeld: zowel de gekleurde als de zwarte driehoekjes hebben betrekking op Scheldegootproeven waarbij $cota = 4$.

De blauwe cirkels geven per Scheldegootproef aan welke van het rode en groene punt volgt uit het criterium $T_{p,r} = \min(f_{T_{p,r}} \cdot T_{m-1,0} ; T_p)$.

Een overzicht van de verschillende periodematen en bijbehorende brekerparameters is gegeven in Tabel 3.2.

| Goot | Proef | $T_p/T_{m-1,0}$ (-) | T_p (s) | $\xi_{op,Tp}$ (-) | $1,3T_{m-1,0}$ (s) | $\xi_{op,1,3T_{m-1,0}}$ (-) | $T_{p,r}$ (s) | $\xi_{op,Tp,r}$ (-) |
|----------------|-------|------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------------|
| Δ -goot | T6O19 | 1,44 | 7,62 | 2,98 | 6,88 | 2,69 | 6,88 | 2,69 |
| | T6O20 | 1,33 | 6,93 | 2,75 | 6,78 | 2,69 | 6,78 | 2,69 |
| | T6O21 | 1,62 | 9,08 | 3,40 | 7,27 | 2,72 | 7,27 | 2,72 |
| | T6O22 | 1,34 | 7,08 | 2,69 | 6,87 | 2,61 | 6,87 | 2,61 |
| S-goot | t501 | 1,63 | 3,03 | 2,51 | 2,41 | 2,00 | 2,41 | 2,00 |
| | t502 | 1,80 | 4,19 | 3,41 | 3,03 | 2,47 | 3,03 | 2,47 |
| | t503 | 1,95 | 5,43 | 4,28 | 3,63 | 2,86 | 3,05 | 2,86 |

Tabel 3.2 Overzicht van de in de grafieken gebruikte periodematen en bijbehorende brekerparameters van beschouwde proeven met een breed of dubbeltoppig spectrum

De waarde van factor $f_{T_{p,r}}$ is bepaald door te onderzoeken voor welke $f_{T_{p,r}}$ de blauwe cirkels ($T_{p,r}$) zo goed mogelijk in de trend vallen van de vergelijkbare zwarte punten. Daarbij is specifiek gekeken naar de 2%-waarden, omdat daar het steenzettingenonderzoek voornamelijk op is gebaseerd. Per grafiek is een schatting gemaakt van de meest optimale $f_{T_{p,r}}$ (zie Tabel 3.3). Daarbij zijn de nieuwe meetpunten vooral vergeleken met Scheldegootproeven met dezelfde taludhelling ($cota = 4$).

| Figuur | $f_{T_{p,r}}$ | Figuur | $f_{T_{p,r}}$ | Figuur | $f_{T_{p,r}}$ | Figuur | $f_{T_{p,r}}$ | Figuur | $f_{T_{p,r}}$ |
|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|
| A.3 | 1,0 | A.6 | 1,3 | A.9 | 1,4 | A.12 | 1,2 | A.15 | 1,3 |
| A.4 | 1,0 | A.7 | 1,3 | A.10 | 1,3 | A.13 | 1,2 | A.16 | 1,5 |
| A.5 | 1,4 | A.8 | 1,3 | A.11 | 1,2 | A.14 | 1,2 | A.17 | 1,2 |

Tabel 3.3 Geschatte optimale $f_{T_{p,r}}$ per grafiek

De waarden uit Tabel 3.3 geven een gemiddelde $f_{T_{p,r}}$ van 1,3. De afzonderlijke waarden voor $f_{T_{p,r}}$ zijn vaak lastig in te schatten, vanwege veelal relatief flauwe trends en relatief grote spreidingen in de oorspronkelijke meetpunten. De waarde 1,3 is desalniettemin een reële waarde.

Voor het bepalen van $f_{T_{p,r}}$ konden de Deltagootproeven niet gebruikt worden. Als gevolg van de vrij grote onnauwkeurigheid van de meetdata van de Deltagootproeven (paragraaf 3.1) zijn in AnalyseWave de karakteristieke golfparameters mogelijk sterk onderschat. Daarnaast bevinden zich rond de gekleurde nieuwe Deltagoot-metpunten vrij weinig vergelijkbare meetpunten van Deltagootproeven met $cota = 4$.

3.4 Vuistregel

3.4.1 Vuistregel als T_p groter is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$

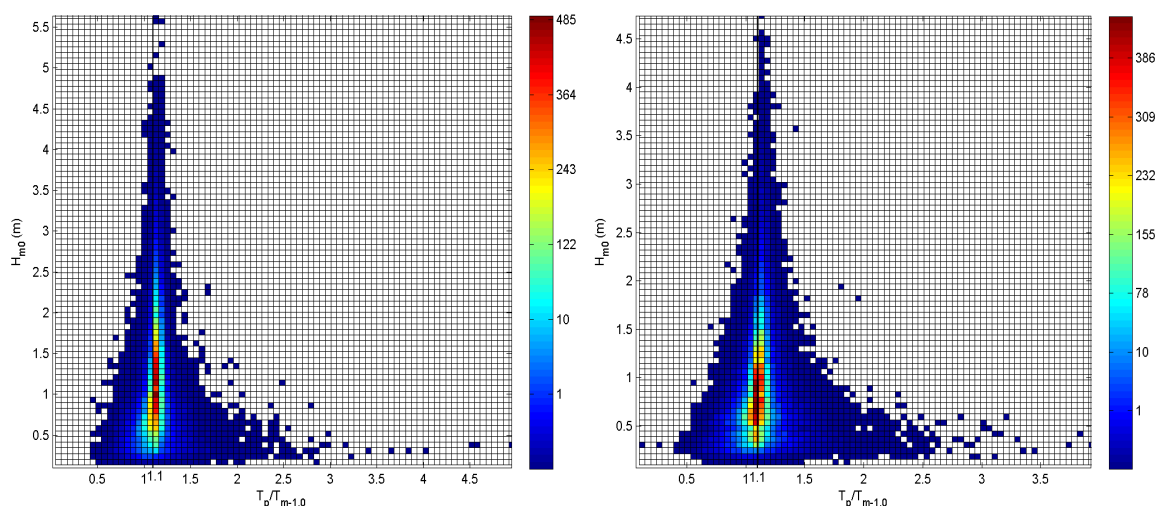
In de dubbeltoppige spectra van de onderzochte Scheldegootproeven was de linker top steeds de hoogste. Op basis van de metingen is daardoor in paragraaf 3.3 uitsluitend een vuistregel bepaald voor de situatie dat T_p beduidend *groter* is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$:

$$T_{p,r} = \min(1,3T_{m-1,0}; T_p) \quad (3.3)$$

Ofwel:

Als $1,1 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p \leq 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ dan $T_{p,r} = T_p$ (er wordt gewoon gerekend met T_p)
 Als $1,3 \cdot T_{m-1,0} < T_p$ dan $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ (er wordt gerekend met $1,3 \cdot T_{m-1,0}$)

Zoals paragraaf 1.1 al aangeeft, is het ook mogelijk dat T_p beduidend *kleiner* is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. Dat wordt bevestigd door Figuur 3.1 (Caires, 2011) waarin de verhouding gegeven is tussen T_p en $T_{m-1,0}$ vs H_{m0} voor twee meetlocaties in Zeeland. De kleur geeft aan hoeveel maal een bepaalde verhouding is opgetreden. Op de meetlocaties zijn zowel grotere als kleinere verhoudingen geregistreerd dan $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$.



Figuur 3.1 Verhouding tussen T_p en $T_{m-1,0}$ vs H_{m0} voor metingen bij Schouwenbank (links) en Scheur West (rechts) te Zeeland (Caires, 2011).

Vuistregel (3.3) wordt in de volgende paragrafen uitgebreid voor het geval $T_p/T_{m-1,0}$ beduidend *kleiner* is dan 1,1. Bij het uitbreiden van de vuistregel is het belangrijk te weten op welk type piekperiode de T_p , die in het WTI gegeven wordt, betrekking heeft. De in het WTI gegeven T_p blijkt voor veel watersystemen in het verleden in feite een T_{pm} (gemiddelde piekperiode) te zijn geweest (zie bijlage A voor de definities van de in dit rapport genoemde periodematen). Echter, recent is met ingang van de HR2011 voor veel watersystemen (waaronder de Waddenzee en Westerschelde waar relatief veel sprake is van dubbeltoppige spectra) overgestapt van de T_{pm} naar een T_{ps} (smoothed piekperiode). Bij het uitbreiden van de vuistregel wordt daarom als uitgangspunt aangehouden dat de T_p in feite een T_{ps} betreft. Omdat de T_{ps} en T_p nauwelijks van elkaar verschillen, worden in deze rapportage zowel T_p als T_{ps} beide aangeduid als T_p .

3.4.2 Randvoorwaarden voor uitbreiding van de vuistregel als T_p kleiner is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$

Voor het uitbreiden van vuistregel (3.3) kunnen enkele eisen worden afgeleid voor diverse vormen van dubbeltoppige spectra:

- 1 zeer grote en 1 zeer kleine top (zie Figuur 3.5, golfspectra A en E; toelichting op de figuur volgt in paragraaf 3.4.3)
Dit is bij benadering een enkeltoppig spectrum, waarbij de verhouding tussen $T_p/T_{m-1,0}$ ongeveer 1,1 is. Er kan gerekend worden met $T_{p,r} = T_p$.
- 2 (vrijwel) gelijke toppen (zie Figuur 3.2 en Figuur 3.5, golfspectrum C)
Of de linker of de rechter top is net de hoogste. $T_{m-1,0}$ blijft in beide gevallen vrijwel gelijk, maar T_p hoort bij of de ene of de andere top. Wanneer twee vrijwel even hoge toppen ver uit elkaar liggen, kan een gering verschil in het golfspectrum er toe leiden dat er gerekend wordt een met T_p die tientallen procenten kan verschillen.

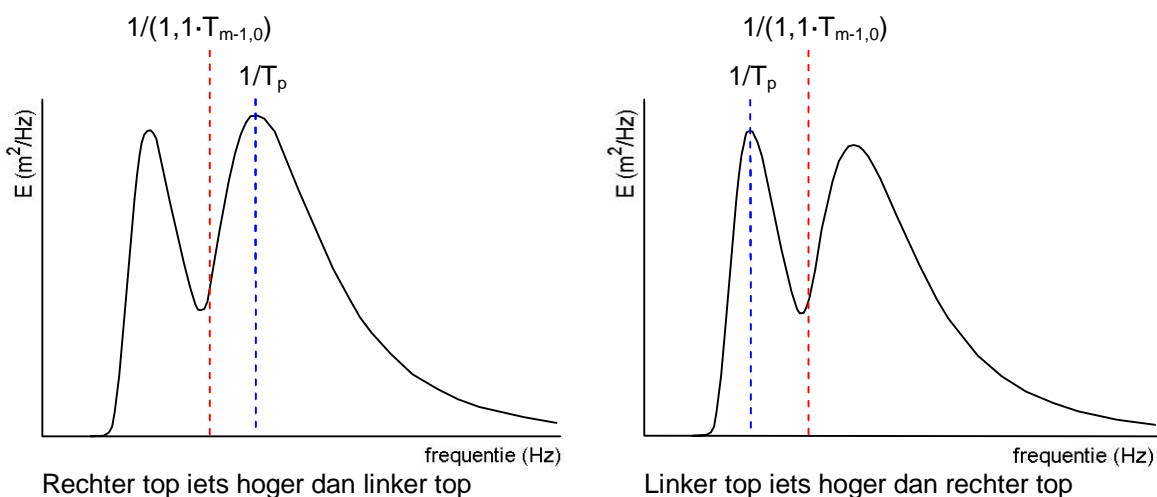
Er kunnen 2 gevallen onderscheiden worden:

- Toppen dicht bij elkaar:
Bij 2 vrijwel gelijke toppen, die dichtbij of vrijwel op elkaar liggen (dus een bijna enkeltoppig spectrum), zal T_p niet veel verschillen van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. In dat geval kan gerekend worden met $T_{p,r} = T_p$.
- Toppen ver uit elkaar:
Naarmate de twee toppen verder uit elkaar liggen, wordt het verschil tussen T_p en $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ steeds groter. Als de linker top net de grootste is, zal $T_p \gg 1,1 \cdot T_{m-1,0}$ en als de rechter top net de grootste is, zal $T_p \ll 1,1 \cdot T_{m-1,0}$. Omdat het spectrum in beide gevallen vrijwel gelijk is, is het optimaal als in beide gevallen met eenzelfde representatieve periode $T_{p,r}$ gerekend wordt. In paragraaf 3.3 is bepaald dat als $T_p > 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ (linker top net de hoogste) dat dan $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$. Volgens de bovenstaande redenering is het dan het beste als $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ ook aangehouden wordt voor het geval dat de rechter top net de hoogste is.

- De ene top duidelijk groter dan de andere top, vrij ver uit elkaar (zie Figuur 3.5, golfspectra B en D)

Bij deze spectra hangt de grootte van de $T_{m-1,0}$ af van twee belangrijke aspecten. Enerzijds weegt laagfrequente energie zwaarder mee dan hoogfrequente energie (dit volgt uit de vorm van de formule voor $T_{m-1,0}$). Anderzijds weegt een brede top (met een groot oppervlak) zwaarder mee dan een smalle top (met een klein oppervlak). Over het algemeen is de rechterside breder dan de linkerside. Het relatief grote oppervlak van de rechter top heeft over het algemeen een iets grotere invloed op de $T_{m-1,0}$ dan de relatief zware weging van de laagfrequente energie van de linkerside. De waarde $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ ligt daardoor in verhouding vaker iets dichterbij de rechter dan de linker top.

Ofwel, wanneer de linker top de grootste is, is T_p vaak beduidend groter dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$, maar wanneer de rechter top de grootste is, is T_p vaak slechts iets kleiner dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$.



Figuur 3.2 Door een kleine variatie in het golfspectrum treedt een groot verschil op in de grootte van T_p . De grootte van $T_{m-1,0}$ verandert nauwelijks.

3.4.3 Totale vuistregel

Vanuit de bovenstaande uitgangspunten en randvoorwaarden is gekomen tot de volgende vuistregel. Onderstaand wordt de vuistregel per subregel verder toegelicht. De vuistregel wordt in Figuur 3.4 gevisualiseerd. Toelichting op die figuur volgt later in deze paragraaf.

- | | | | |
|--------|---|-----|---|
| 1) Als | $T_p < 0,9 \cdot T_{m-1,0}$ | dan | $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ |
| 2) Als | $0,9 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p < 1,0 \cdot T_{m-1,0}$ | dan | $T_{p,r} = 4 \cdot T_{m-1,0} - 3 \cdot T_p$ |
| 3) Als | $1,0 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p \leq 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ | dan | $T_{p,r} = T_p$ |
| 4) Als | $1,3 \cdot T_{m-1,0} < T_p$ | dan | $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ |

Subregel 3

Om in de gevallen dat T_p in de buurt ligt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ zoveel mogelijk op de gebruikelijke wijze te rekenen, zal in het gebied rond $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$ gerekend worden met T_p . Zoals is uitgelegd in paragraaf 3.4.2, ligt de waarde $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ in verhouding vaker iets dichterbij de rechter dan de linker top. De bovengrens van het gebied zal daarom verder bij $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$ vandaan liggen dan de ondergrens. Als bovengrens volgde uit paragraaf 3.3 de grens $T_p/T_{m-1,0} = 1,3$. Als ondergrens wordt (enigszins arbitrair) $T_p/T_{m-1,0} = 1,0$ aangehouden.

Subregels 1 en 4

Uit de vorige paragraaf volgt dat zowel voor $T_p \gg 1,1 \cdot T_{m-1,0}$ als voor $T_p \ll 1,1 \cdot T_{m-1,0}$ gerekend dient te worden met $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$. Dat levert de subregels 1 en 4 van de vuistregel op. Subregel 4 sluit direct aan op subregel 3, maar voor subregel 1 geldt dat niet. Directe overgang van subregel 1 naar 3 zou een ongewenste discontinuïteit opleveren in het verloop van $T_{p,r}$. Er is een geleidelijke overgang nodig. Die overgang wordt beschreven met subregel 2.

Subregel 2

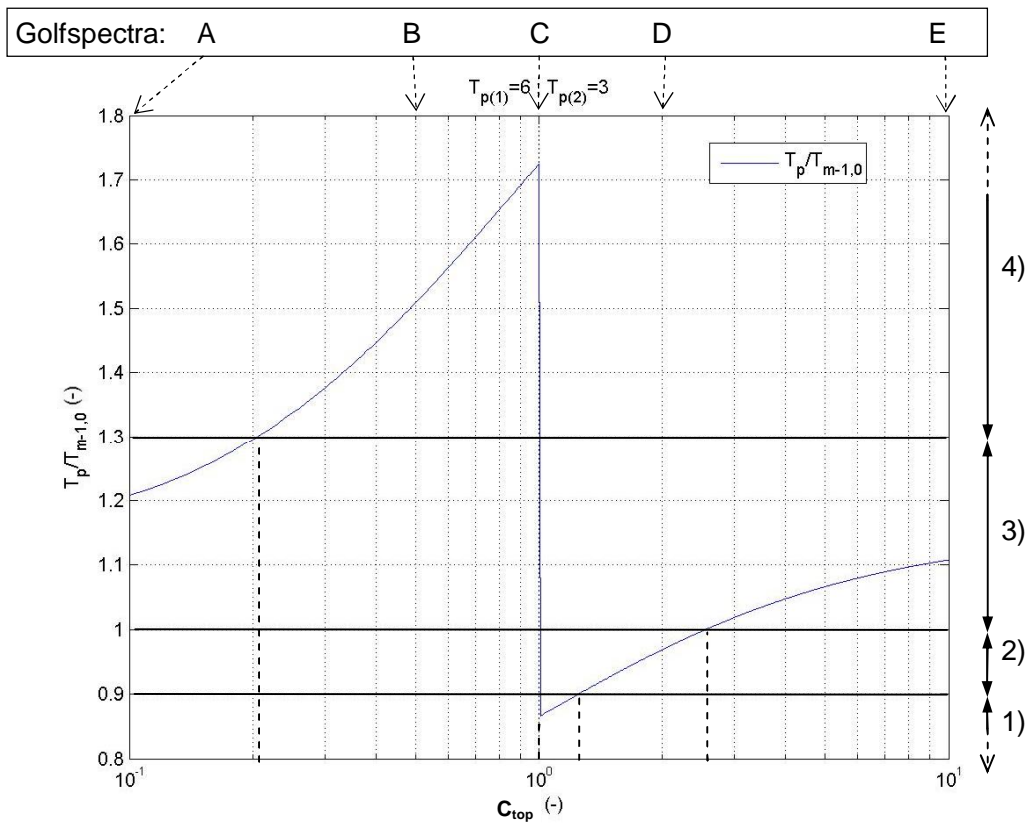
Het ontbrekende stuk van $T_p/T_{m-1,0} = 0,9$ tot $T_p/T_{m-1,0} = 1,0$ wordt opgevuld met subregel 2, welke een geleidelijke overgang oplevert tussen de subregels 1 en 3.

Visualisatie

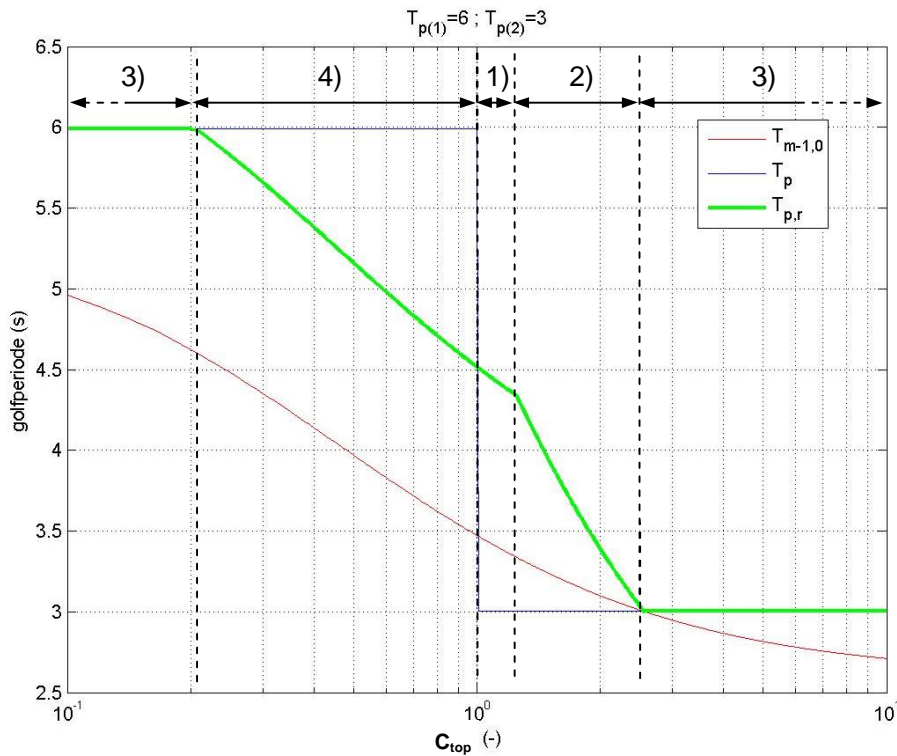
De vuistregel wordt gevisualiseerd in Figuur 3.4. Om Figuur 3.4 beter te begrijpen, zijn eveneens Figuur 3.3 en Figuur 3.5 toegevoegd. De figuren hangen nauw met elkaar samen.

Figuur 3.3 geeft de verhouding $T_p/T_{m-1,0}$ (op de verticale as) als functie van c_{top} (op de horizontale as). c_{top} is de verhouding tussen de hoogte van de twee toppen van een dubbeltoppige spectrum, waarvan $T_{p(1)} = 6$ s en $T_{p(2)} = 3$ s (zie Figuur 3.5; toelichting volgt verderop in de tekst). Daarbij is $T_{p(n)}$ de piekperiode van top n. Er geldt $c_{top} = E(f_{p(2)}) / E(f_{p(1)})$, waarin $E(f_{p(n)})$ de hoogte is van top n. Nauwkeuriger gezegd: $E(f_{p(n)})$ is de energiedichtheid E die hoort bij de piekfrequentie van top n.

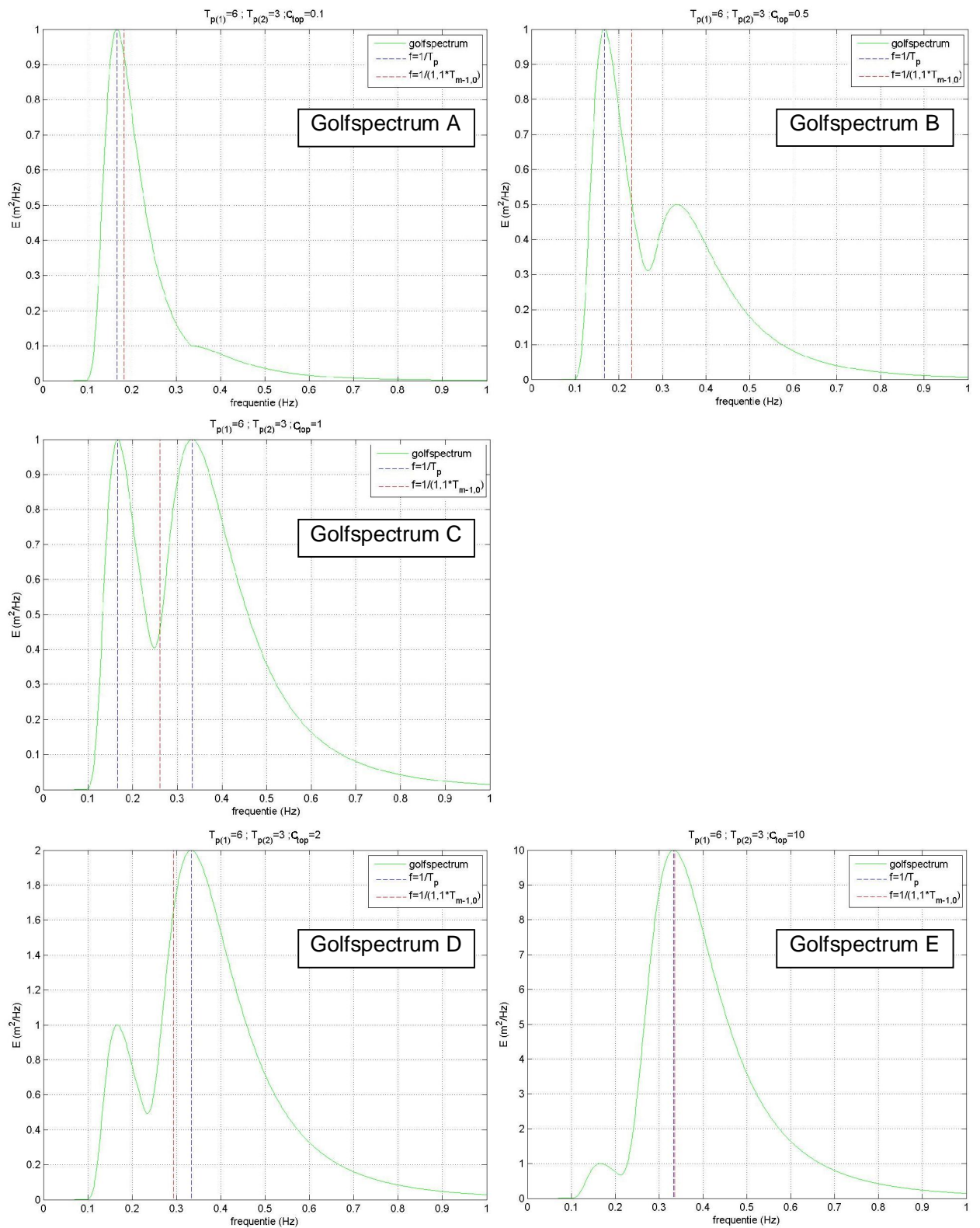
Om de betekenis van factor c_{top} te illustreren, zijn in Figuur 3.5 enkele dubbeltoppige spectra geplot, met $T_{p(1)} = 6$ s en $T_{p(2)} = 3$ s. De dubbeltoppige spectra betreffen de enigszins gesmoothere (is: afgevlakte) omhullende van 2 door elkaar heen geplote enkeltoppige JONSWAP-spectra. De aanduiding van de spectra in Figuur 3.5 (A, B, C, D en E) corresponderen met die in de balk bovenin Figuur 3.3. In de spectra (Figuur 3.5) is ter beeldvorming aangegeven waar T_p en $1,1 \cdot T_{m-1,0}$ liggen (resp. blauwe en rode stippellijnen).



Figuur 3.3 $T_p/T_{m-1,0}$ als functie van C_{top} .



Figuur 3.4 Periodematen $T_{m-1,0}$, T_p en $T_{p,r}$ als functie van C_{top} .



Figuur 3.5 Golfpectra A ($c_{top} = 0,1$), B ($c_{top} = 0,5$), C ($c_{top} = 1$), D ($c_{top} = 2$) en E ($c_{top} = 10$).

In Figuur 3.3 duiden de horizontale zwarte getrokken lijnen de grenzen aan tussen de verschillende ranges van de afzonderlijke subregels van de vuistregel. Die ranges worden in het vervolg ook wel aangeduid als subregelranges. Afhankelijk van de subregelrange waarbinnen de blauwe lijn $T_p/T_{m-1,0}$ valt, is een andere subregel van toepassing (zie bijbehorende subregelnummers aan de rechterzijde van de grafiek).

Door middel van de verticale zwarte stippellijnen worden de subregelranges van Figuur 3.3 doorgetrokken naar Figuur 3.4. Bovenin Figuur 3.4 is tussen de stippellijnen aangegeven welke subregel daar van toepassing is.

In Figuur 3.4 geeft de groene lijn uiteindelijk de uit diverse subregels samengestelde vuistregel voor $T_{p,r}$. De figuur geeft tevens het verloop van T_p (blauwe lijn) en $T_{m-1,0}$ (rode lijn). De figuur laat zien hoe $T_{p,r}$ geleidelijk verloopt van $T_p = 6$ naar $T_p = 3$.

Er wordt opgemerkt dat wanneer de toppen zodanig dicht bij elkaar liggen dat het verloop van $T_p/T_{m-1,0}$ in Figuur 3.3 binnen de grenzen van subregelrange 3 blijft, dat dan een discontinuïteit optreedt die niet door de vuistregel wordt gladgestreken. Als T_p bijvoorbeeld springt van $1,001 \cdot T_{m-1,0}$ naar $1,299 \cdot T_{m-1,0}$ dan is dat een discontinuïteit die niet door de vuistregel wordt weggewerkt. Deze vrij geringe discontinuïteit is echter onvermijdelijk en wordt geaccepteerd, omdat het voortvloeit uit het doel van de vuistregel om alleen in extreme gevallen de T_p te corrigeren.

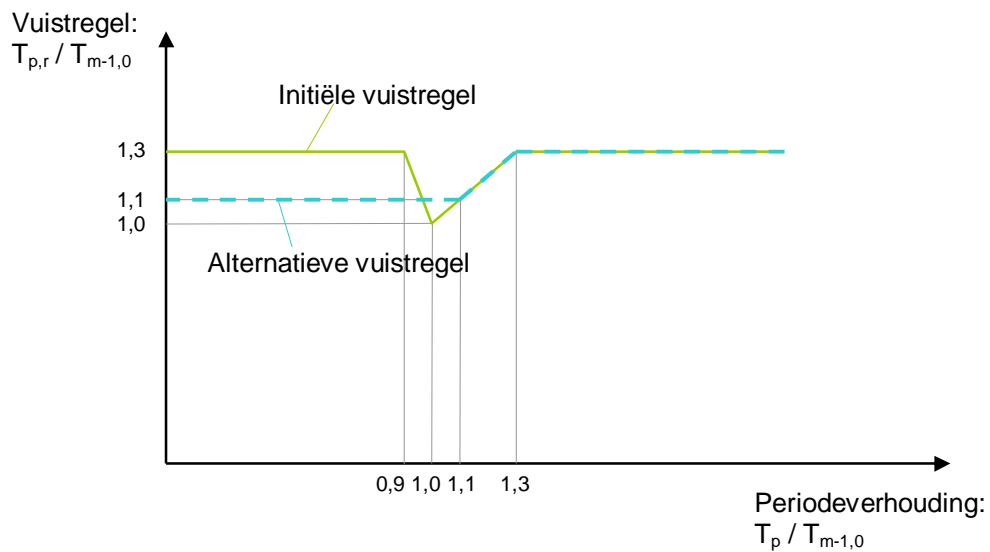
3.4.4 Alternatieve vuistregel

De vuistregel die in paragraaf 3.4.3 is gegeven, is in paragraaf 3.3 in eerste instantie ontwikkeld voor het geval $T_p/T_{m-1,0}$ groter is dan 1,1. Uitsluitend voor die gevallen waren metingen beschikbaar. Voor het geval $T_p/T_{m-1,0}$ kleiner is dan 1,1 waren er geen metingen beschikbaar en is de vuistregel uitgebreid op basis van een redenering. Hoewel het een onderbouwde aanname betreft, is de zekerheid daarvan beperkt. Voor de gevallen dat $T_p/T_{m-1,0} < 1,1$ kan ook uitgegaan worden van een eenvoudig alternatief: $T_{p,r} = 1,1 \cdot T_{m-1,0}$. Dat is een normale verhouding tussen T_p en $T_{m-1,0}$ bij enkeltoppige spectra, als sprake is van lokaal opgewekte windgolven en relatief diep water (zie paragraaf 1.1). De alternatieve vuistregel wordt dan:

- 1) Als $T_p < 1,1 \cdot T_{m-1,0}$ dan $T_{p,r} = 1,1 \cdot T_{m-1,0}$
- 2) Als $1,1 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p \leq 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ dan $T_{p,r} = T_p$
- 3) Als $1,3 \cdot T_{m-1,0} < T_p$ dan $T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0}$

De bovenstaande alternatieve vuistregel wordt in deze paragraaf voortaan aangeduid als 'alternatieve vuistregel'. De vuistregel uit paragraaf 3.4.3 als 'initiële vuistregel'. Beide vuistregels zijn gevisualiseerd in Figuur 3.6.

In Figuur 3.7 zijn de vuistregels nogmaals gevisualiseerd. De bovenste grafiek van Figuur 3.7 is dezelfde als Figuur 3.4 (met $T_{p(1)} = 6$ s en $T_{p(2)} = 3$ s), maar met toevoeging van de alternatieve vuistregel. De onderste grafiek is eveneens op dezelfde wijze gegenereerd, maar nu uitgaande van $T_{p(2)} = 4$ s.



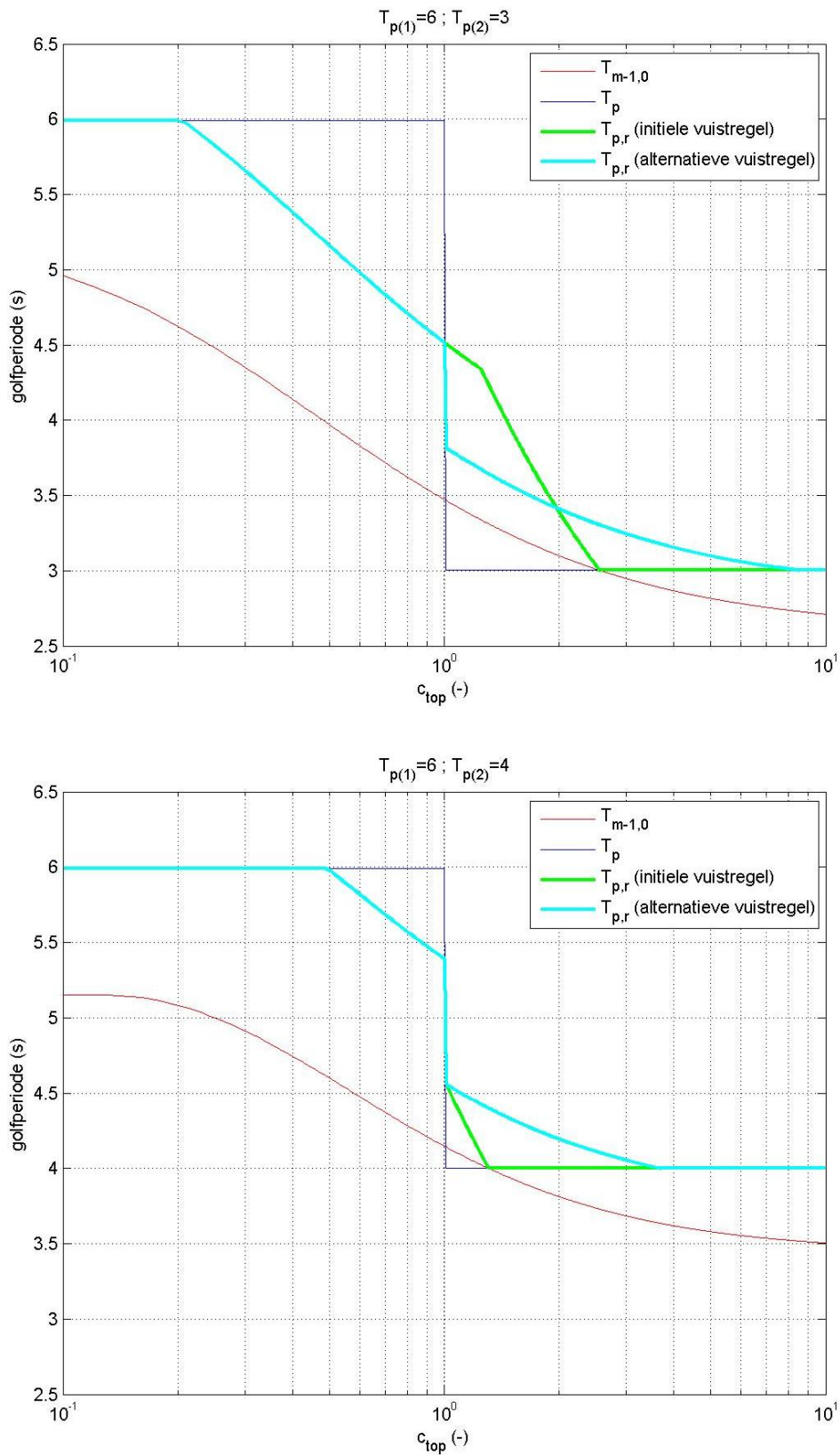
Figuur 3.6 Initiële en alternatieve vuistregel

De alternatieve vuistregel heeft als gunstige eigenschap dat het verloop ervan sterker gebaseerd is op de $T_{m-1,0}$ dan bij de initiële vuistregel het geval is. Daardoor heeft de alternatieve vuistregel een gelijkmatiger verloop voor gevallen waarin $T_p/T_{m-1,0} < 1,1$. Eveneens gunstig is de eenvoud van de alternatieve vuistregel. Die bestaat uit 3 regels in plaats van 4 bij de initiële vuistregel. Tevens is er geen interpolatieregeling nodig, zoals wel het geval is bij de initiële vuistregel (subregel 3). In de praktijk is het voordeel van die eenvoud overigens minder relevant. Als de vuistregel eenmaal in Steentoets is geprogrammeerd, merkt de gebruiker geen verschil.

Daarnaast is er ook een aantal ongunstige aspecten aan de alternatieve vuistregel verbonden. Er is een discontinuïteit rond de situatie waarbij het hoogste punt van het golfspectrum verspringt van de ene top naar de andere. Als de linkertop nog net de hoogste is, is $T_{p,r}$ gelijk aan $1,3 \cdot T_{m-1,0}$, maar zodra de rechertop net de hoogste wordt, dan springt de $T_{p,r}$ naar $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. Dit is een ongewenste discontinuïteit die in alle gevallen optreedt, zowel bij grote als kleine verschillen tussen T_p en $T_{m-1,0}$ (dus ook wanneer de toppen ver uit elkaar liggen). In de onderste grafiek van Figuur 3.7 is te zien dat bij de initiële vuistregel ook wel een discontinuïteit kan optreden, maar dat gebeurt uitsluitend bij kleine verschillen tussen T_p en $T_{m-1,0}$ (alleen wanneer de toppen zodanig dicht bij elkaar liggen dat $T_p/T_{m-1,0}$ binnen de grenzen van subregelrange 3 van de initiële vuistregel blijft). De geringe discontinuïteit die daardoor ontstaat, is beschreven in de laatste alinea van paragraaf 3.4.3. Die is onvermijdelijk en wordt geaccepteerd, omdat het voortvloeit uit het doel van de vuistregel om T_p alleen in extreme gevallen te corrigeren. Hoewel Figuur 3.6 in eerste instantie suggereert dat de alternatieve vuistregel een gelijkmatiger verloop heeft dan de initiële vuistregel, blijkt juist sprake te zijn van het tegendeel.

Daarnaast is er de ongunstige bijkomstigheid dat bij het gebruik van de alternatieve vuistregel een veel groter aantal steenzettingen doorgerekend zal worden met een aangepaste golfperiode, dan wanneer de initiële vuistregel gebruikt wordt. Bij de initiële vuistregel wordt uitsluitend gecorrigeerd in extreme gevallen. Bij de alternatieve vuistregel wordt bovenop die extreme gevallen ook gecorrigeerd in de vrij frequent voorkomende gevallen waarbij $1,0 < T_p/T_{m-1,0} < 1,1$. Gebruik van de alternatieve vuistregel zal dus voor een aanzienlijk aantal extra steenzettingen leiden tot andere toetsresultaten.

Wanneer de bovenstaande gunstige en ongunstige aspecten tegen elkaar worden afgewogen, blijkt de initiële vuistregel de meest optimale.



Figuur 3.7 Periodematen $T_{m-1,0}$, T_p en $T_{p,r}$ (zowel initiële als alternatieve vuistregel) als functie van c_{top} . $T_{p(1)} = 6$ s; $T_{p(2)} = 3$ (boven) en 4 s (onder).

4 Conclusies en aanbevelingen

Bij het toetsen of ontwerpen van steenzettingen loopt men in specifieke gebieden tegen het probleem aan dat de piekperiode T_p erg groot is ten opzichte van de spectrale periode $T_{m-1,0}$. Het vermoeden bestaat dat het berekenen van de stabiliteit met de piekperiode T_p (de standaard gebruikte periodemaat bij de beoordeling van de stabiliteit) in zo'n geval niet tot de juiste resultaten leidt. Het verschil tussen de periodematen is vooral groot wanneer sprake is van een dubbeltoppig spectrum of een zeer breed spectrum.

Waarschijnlijk is $T_{m-1,0}$ een betere periodemaat voor het kwantificeren van de golfperiode dan de T_p . Omdat nu echter geen overstap van de T_p naar $T_{m-1,0}$ voorzien is, wordt voorgesteld een tussenstap te maken. Daarbij is het doel om in de extreme situaties (dubbeltoppige spectra met orde $T_p/T_{m-1,0} > 1,3$ of $T_p/T_{m-1,0} < 0,9$) een correctie toe te passen op de T_p . Dat moet een rekenwaarde voor de T_p opleveren waarmee de stabiliteit op de gebruikelijke wijze bepaald kan worden.

Een normale verhouding is $T_p/T_{m-1,0} = 1,1$. Dit treedt op bij lokaal opgewekte windgolven (geen deining) en relatief diep water (geen breking van golven op ondieptes). Zowel de T_p als de $T_{m-1,0}$ zijn in de tabellen van het WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium) per dijkvak beschikbaar.

Het resultaat van dit onderzoek is een eenvoudige vuistregel waarmee op basis van de T_p en de $T_{m-1,0}$ een representatieve maatgevende golfperiode $T_{p,r}$ kan worden bepaald, voor het geval dat T_p sterk afwijkt van $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. De vuistregel is erop gericht dat als deze twee wel een normale verhouding hebben, er vanzelf op de gebruikelijke wijze wordt gerekend met T_p .

Voor het bepalen van de vuistregel zijn in het onderhavige rapport enkele Deltagootproeven uit 1997 (met een zeer breed spectrum) en Scheldegootproeven uit 2003 (dubbeltoppig spectrum) opnieuw geanalyseerd met behulp van de enkele jaren geleden ontwikkelde golfanalysessoftware AnalyseWave. De meetdata van de opnieuw geanalyseerde proeven is vergeleken met meetdata van een groot aantal proeven (smalle enkeltoppige spectra) die geanalyseerd zijn in Klein Breteler e.a. (2006). Op basis van de beschikbare Scheldegootproeven is in eerste instantie een vuistregel ontwikkeld voor het geval dat T_p groter is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. Die vuistregel is vervolgens uitgebreid voor het geval dat T_p kleiner is dan $1,1 \cdot T_{m-1,0}$. De totale vuistregel die daar uit volgde, is:

$$\text{Als } T_p < 0,9 \cdot T_{m-1,0} \quad \text{dan } T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0} \quad (4.1)$$

$$\text{Als } 0,9 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p < 1,0 \cdot T_{m-1,0} \quad \text{dan } T_{p,r} = 4 \cdot T_{m-1,0} - 3 \cdot T_p \quad (4.2)$$

$$\text{Als } 1,0 \cdot T_{m-1,0} \leq T_p \leq 1,3 \cdot T_{m-1,0} \quad \text{dan } T_{p,r} = T_p \quad (4.3)$$

$$\text{Als } 1,3 \cdot T_{m-1,0} < T_p \quad \text{dan } T_{p,r} = 1,3 \cdot T_{m-1,0} \quad (4.4)$$

Deze $T_{p,r}$ wordt ingevuld in de formules voor de stabiliteit van steenzettingen op de plek van T_p voor gevallen dat T_p kleiner is dan $1,0 \cdot T_{m-1,0}$ of groter dan $1,3 \cdot T_{m-1,0}$. De vuistregel is erop gericht dat als $1,0 \cdot T_{m-1,0} < T_p < 1,3 \cdot T_{m-1,0}$ er op de gebruikelijke wijze wordt gerekend met T_p .

Opgemerkt wordt dat de vuistregel gebaseerd is op slechts weinig meetpunten. Daarnaast werd bij de geanalyseerde proeven van Klein Breteler e.a. (2006) een vrij grote spreiding in de meetpunten geconstateerd. Eventueel kan overwogen worden om nader modelonderzoek uit te voeren, mits deze vuistregel heel bepalend blijkt te zijn voor vele steenzettingen.

5 Referenties

- Caires, S. (2011), *Maximale significante golfhoogte bij ondiep water en maximale golfsteilheid*, Deltares, conceptrapport 1204727-004-HYE-0001 v.1, november 2011
- Jacobse, J.J. en Kieftenburg, A.T.M.M. (2002), *Betrouwbaarheid SWAN, Een verkenning naar de betrouwbaarheid van de golfbelastingen uit Rand2001, berekend met SWAN*, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ/OS-2002.116, november 2002
- Klein Breteler, M., Van der Werf, I. en Wenneker, I. (2006), *Kwantificering golfbelasting en invloed lange golven, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*, WL | delft hydraulics, conceptrapport H4421 v.0, juni 2006
- Kuiper, C. en Van Vossen, B. (2003), *Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven, Fase 1 en Fase 2, Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*, WL | delft hydraulics, rapport H4329 v.2, december 2003
- Klein Breteler, M. (2000a), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Analyse van resultaten van Deltagootproeven, Band A: tekst*, WL | delft hydraulics, rapport H3272.75 v.1, mei 2000
- Klein Breteler, M. (2000b), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Analyse van resultaten van Deltagootproeven, Band B: figuren*, WL | delft hydraulics, rapport H3272.75 v.1, mei 2000
- Smith, G.M., Wouters, J., Klein Breteler, M. (2000), *Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen, Meetverslag van Deltagootproeven*, WL | delft hydraulics, rapport H3272.73 v.1, februari 2000

A Definitie periodematen

Deze bijlage geeft een definitie van de golfperiodematen die in deze rapportage genoemd worden, en beschrijft de wijze waarop deze voor het onderhavige onderzoek zijn berekend.

Spectrale periode $T_{m-1,0}$

De spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ is als volgt gedefinieerd:

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (1.1)$$

Met:

$$m_n = \int f^n E(f) df \quad (1.2)$$

Om aan te sluiten op een aanbeveling voor het omgaan met laagfrequente energie (Jacobse & Kieftenburg, 2002) zijn in dit rapport m_{-1} en m_0 bij enkeltoppige spectra berekend voor het frequentiedomein vanaf de helft van de frequentie behorend bij de smoothed piekperiode T_{ps} . Ook bij de zeer brede spectra van de Deltagootproeven is geïntegreerd vanaf de helft van de frequentie die bij T_{ps} hoort. Door de momenten te berekenen vanaf de helft van de piekfrequentie hebben (zeer) lange golven en waterstandsvariaties, die geen invloed hebben op de stabiliteit van steenzettingen, geen invloed op $T_{m-1,0}$. Bij dubbeltoppige spectra is in deze rapportage geïntegreerd vanaf de helft van de frequentie, die hoort bij het maximum van de linkertop.

Een uitzondering op het voorgaande wordt gevormd door de Scheldegootproeven. Voor de Scheldegootproeven is de $T_{m-1,0}$ reeds in het verleden bepaald, waarbij waarschijnlijk wel gerekend is over het totale frequentiedomein (i.t.t. vanaf de helft van de linkertop). Vanwege de zeer lage energiedichtheid bij dermate lage frequenties heeft dat geen significante invloed op de $T_{m-1,0}$. Voor de Scheldegootproeven zijn daarom de in het verleden bepaalde waarden van $T_{m-1,0}$ gebruikt.

Piekperiode T_p

De piekperiode T_p betreft de golfperiode behorend bij de piekfrequentie f_p van het ongesmoothere (is: niet afgevlakte) golfspectrum. Merk op dat de T_p bij een dubbeltoppig spectrum de piekperiode van òf de ene òf de andere top is. Er geldt:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (1.3)$$

Smoothed piekperiode T_{ps}

De smoothed piekperiode T_{ps} betreft de golfperiode behorend bij de piekfrequentie f_{ps} van het gesmoothere (is: afgevlakte) golfspectrum. Merk op dat de T_{ps} bij een dubbeltoppig spectrum de piekperiode van òf de ene òf de andere top is. Er geldt:

$$T_{ps} = \frac{1}{f_{ps}} \quad (1.4)$$

Dominante piekperiode T_{pD}

De dominante piekperiode T_{pD} is als volgt gedefinieerd:

$$T_{pD} = \frac{m_0^*}{m_1^*} \quad (1.5)$$

Met:

$$m_n^* = \int_{f_1}^{f_2} f^n E(f) df \quad (1.6)$$

Bij T_{pD} worden de momenten berekend voor het frequentiedomein waarvoor geldt dat de energiedichtheid E groter is dan 80% van de maximale energiedichtheid (van f_1 tot f_2). Wanneer bij een dubbeltoppig spectrum twee toppen hoger zijn dan 80% van de maximale energiedichtheid, dan worden de frequentiedomeinen van beide toppen in de berekening meegenomen.

Gemiddelde piekperiode T_{pm}

De gemiddelde (mean) piekperiode T_{pm} is als volgt gedefinieerd:

$$T_{pm} = \max(T_{pb}, T_{pbeq}) \quad (1.7)$$

Met:

$$T_{pb} = \frac{m_{-1}^*}{m_0^*} \quad (1.8)$$

waarin:

$$m_n^* = \int_{f_1}^{f_2} f^n E(f) df \quad (1.9)$$

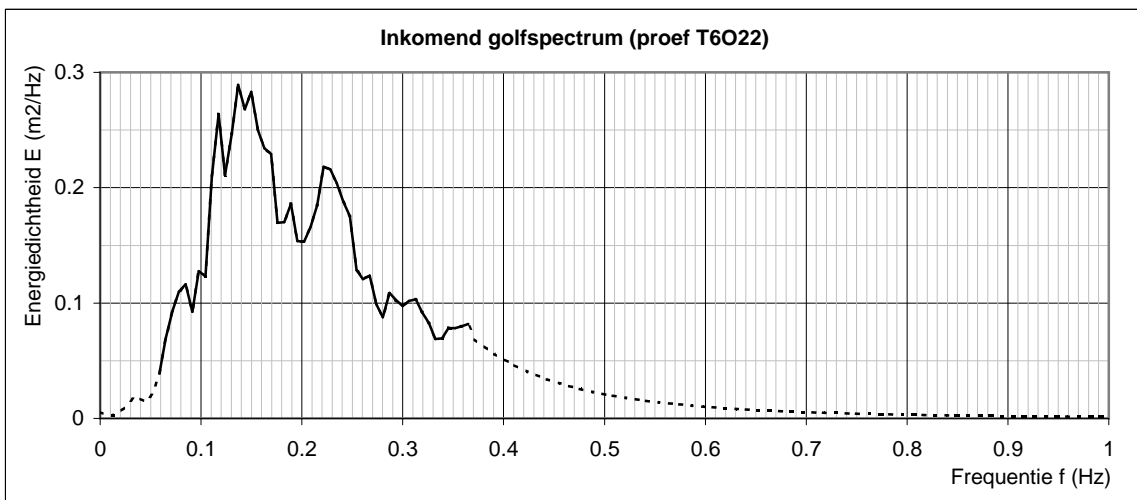
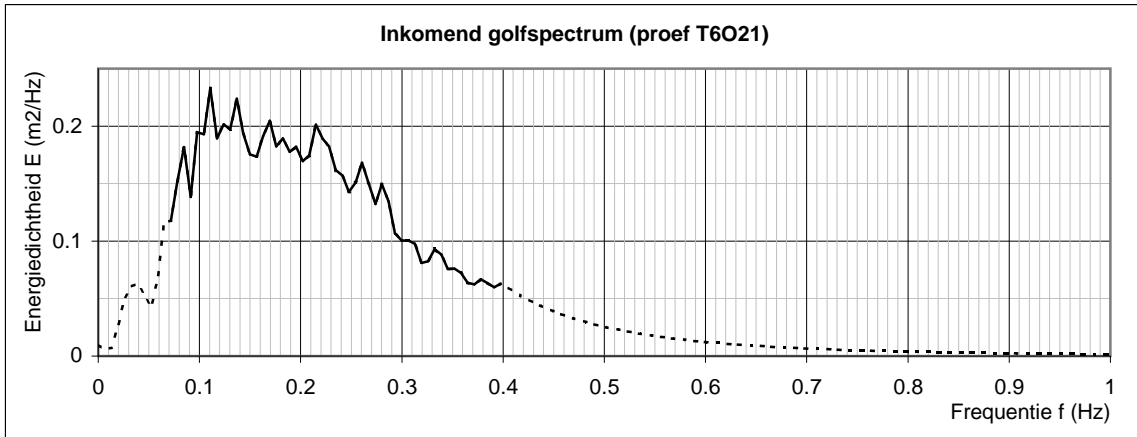
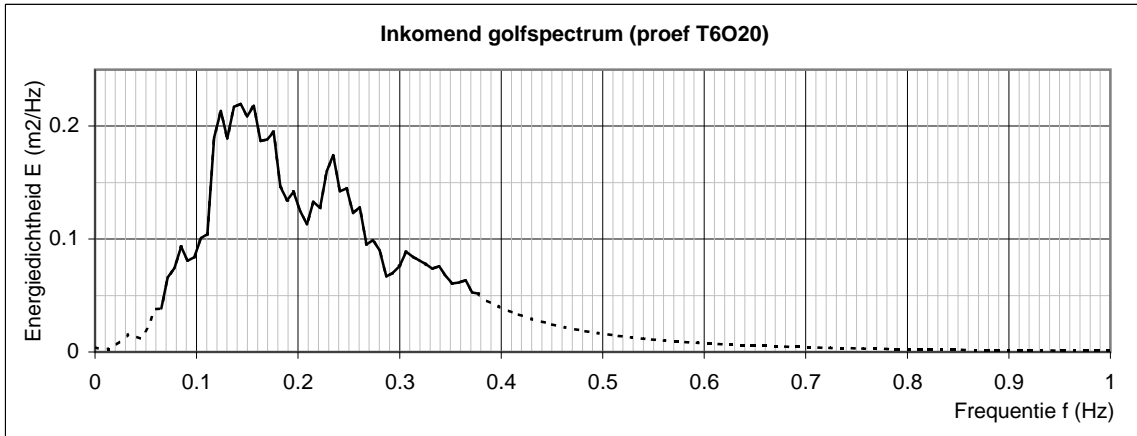
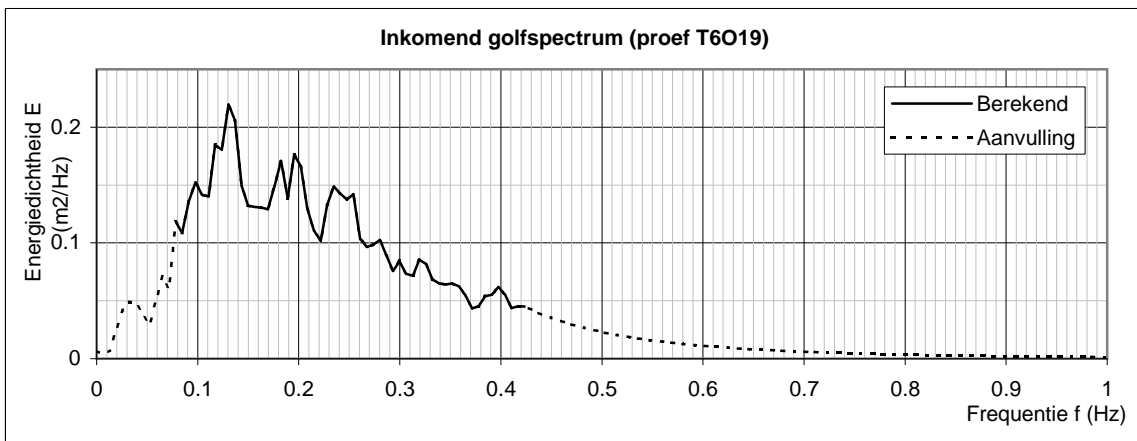
En:

$$T_{pbeq} = \sqrt[4]{T_{pb1}^4 \frac{m_0^{(1)}}{m_0} + T_{pb2}^4 \frac{m_0^{(2)}}{m_0}} \quad (1.10)$$

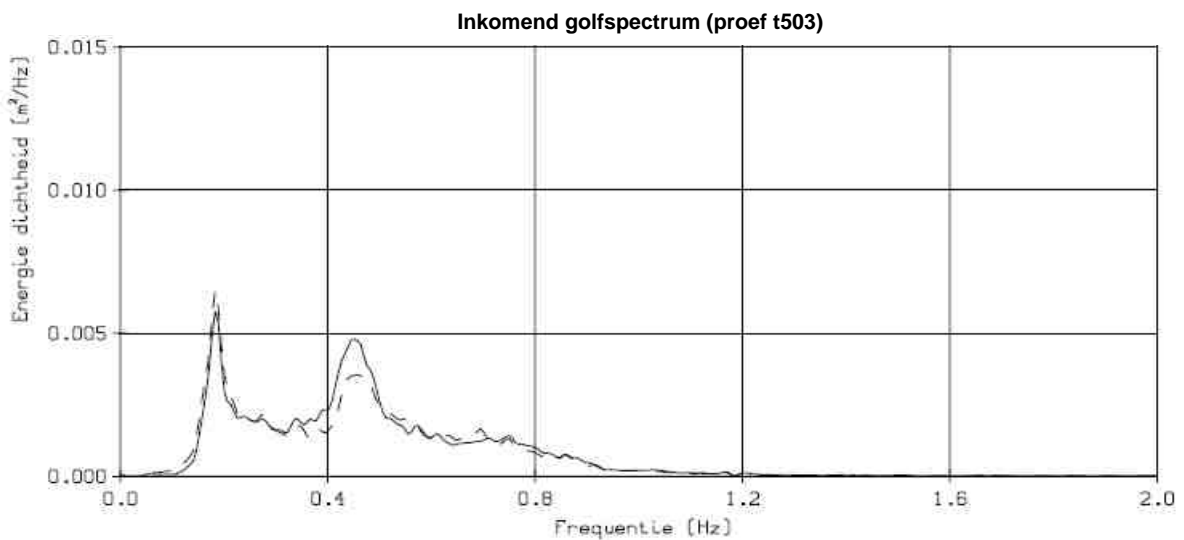
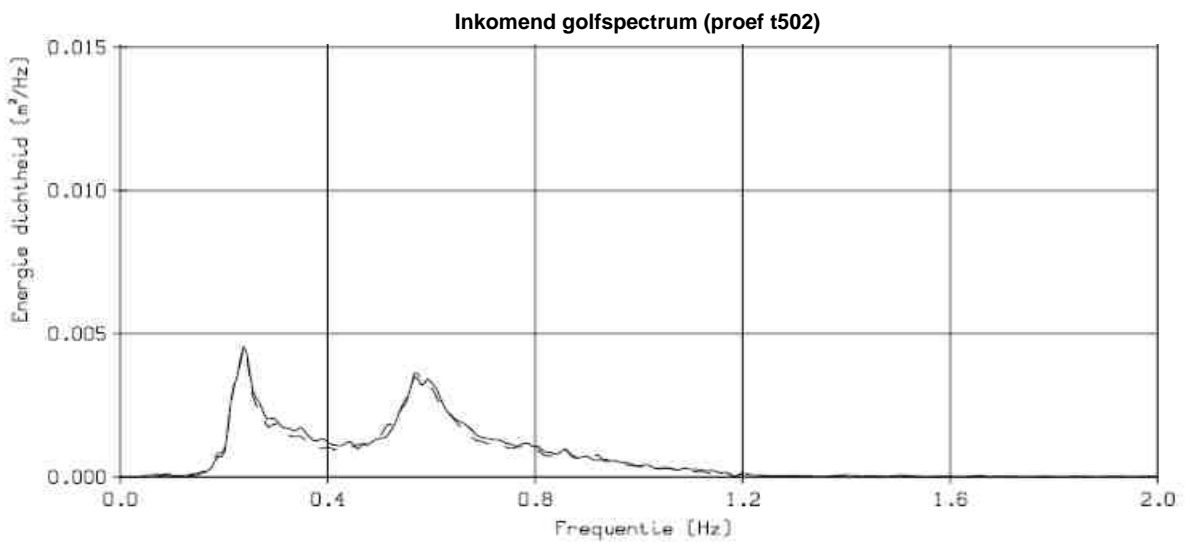
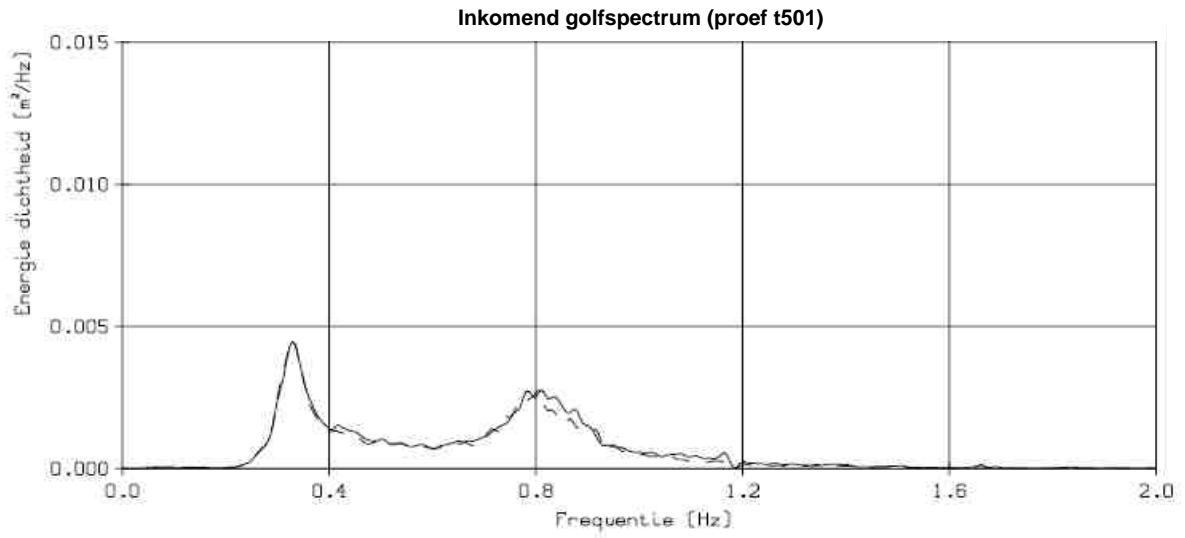
Bij de blok-piekperiode T_{pb} worden de momenten berekend voor het frequentiedomein waarvoor geldt dat de energiedichtheid E groter is dan 40% van de maximale energiedichtheid (van f_1 tot f_2). Wanneer sprake is van een dubbeltoppig spectrum wordt uitsluitend het frequentiedomein rond de hoogste top in de berekening meegenomen. Het gebied rond laagste top wordt dan niet beschouwd.

Bij het berekenen van de equivalente blok-piekperiode T_{pbeq} wordt bij dubbeltoppige spectra eerst het spectrum verdeeld in twee individuele subspectra. Daarna wordt T_{pbeq} berekend, waarin T_{pb1} en T_{pb2} de blok-piekperioden zijn van de afzonderlijke subspectra, m_0 het moment van het totale spectrum en $m_0^{(1)}$ en $m_0^{(2)}$ de momenten van de beide subspectra.

B Figuren

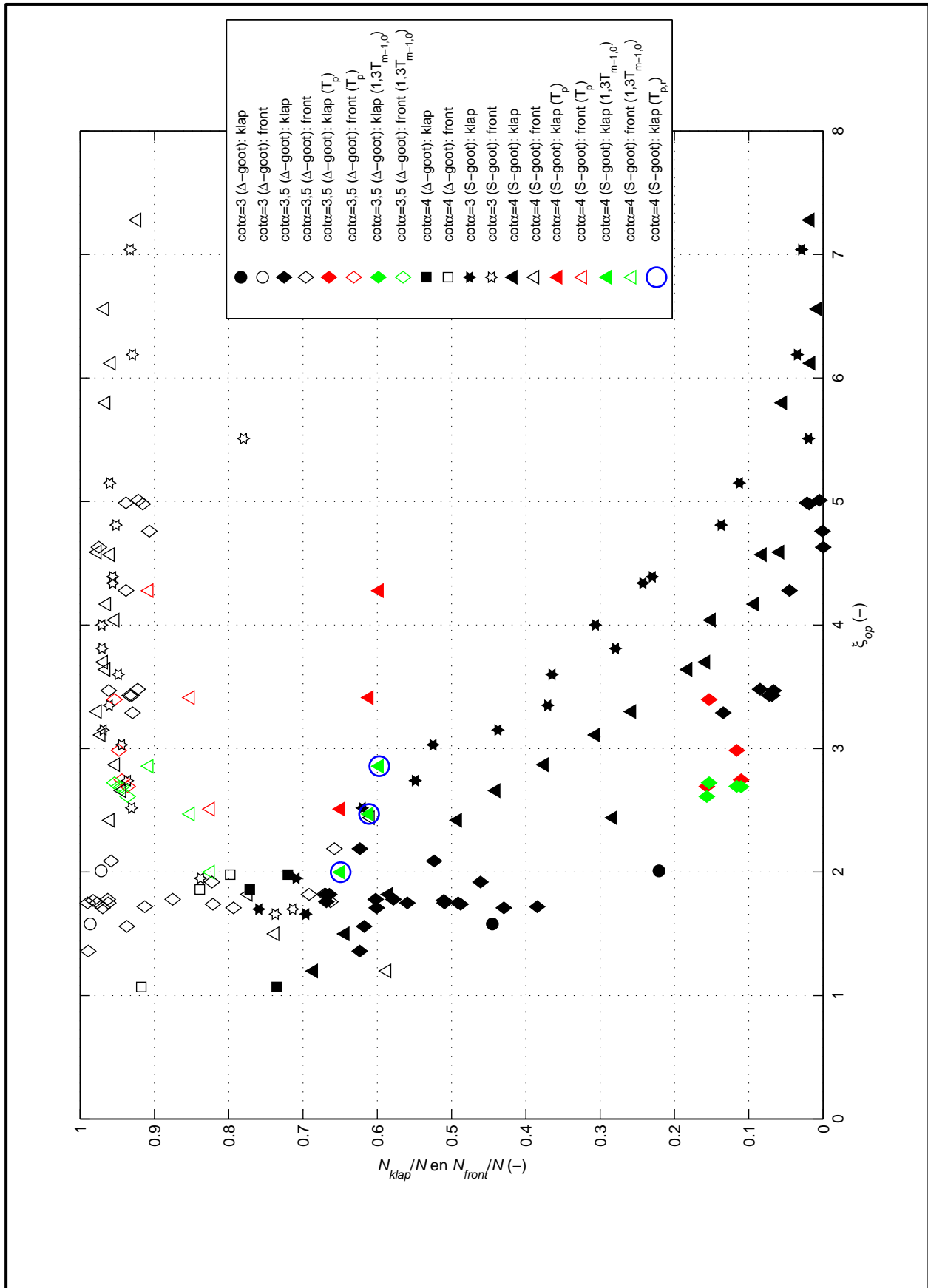


Inkomende golfspectra
Deltagootproeven: T6O19, T6O20, TO21 en T6O22



— Inkomend(golfsecht)
 - - - Inkomend(teen)

Inkomende golfspectra
 Scheldegootproeven: t501, t502 en t503

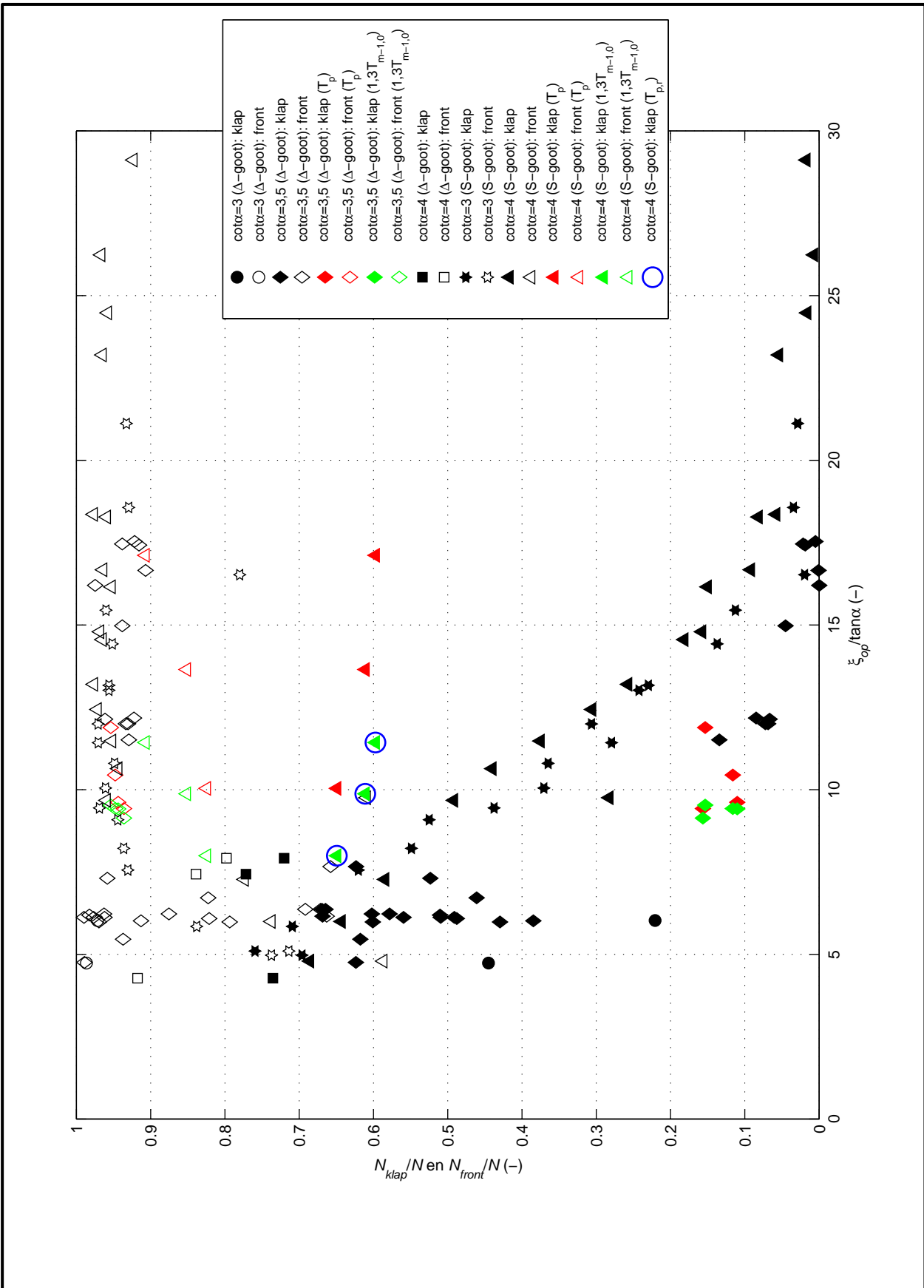


Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.27)

Deltares

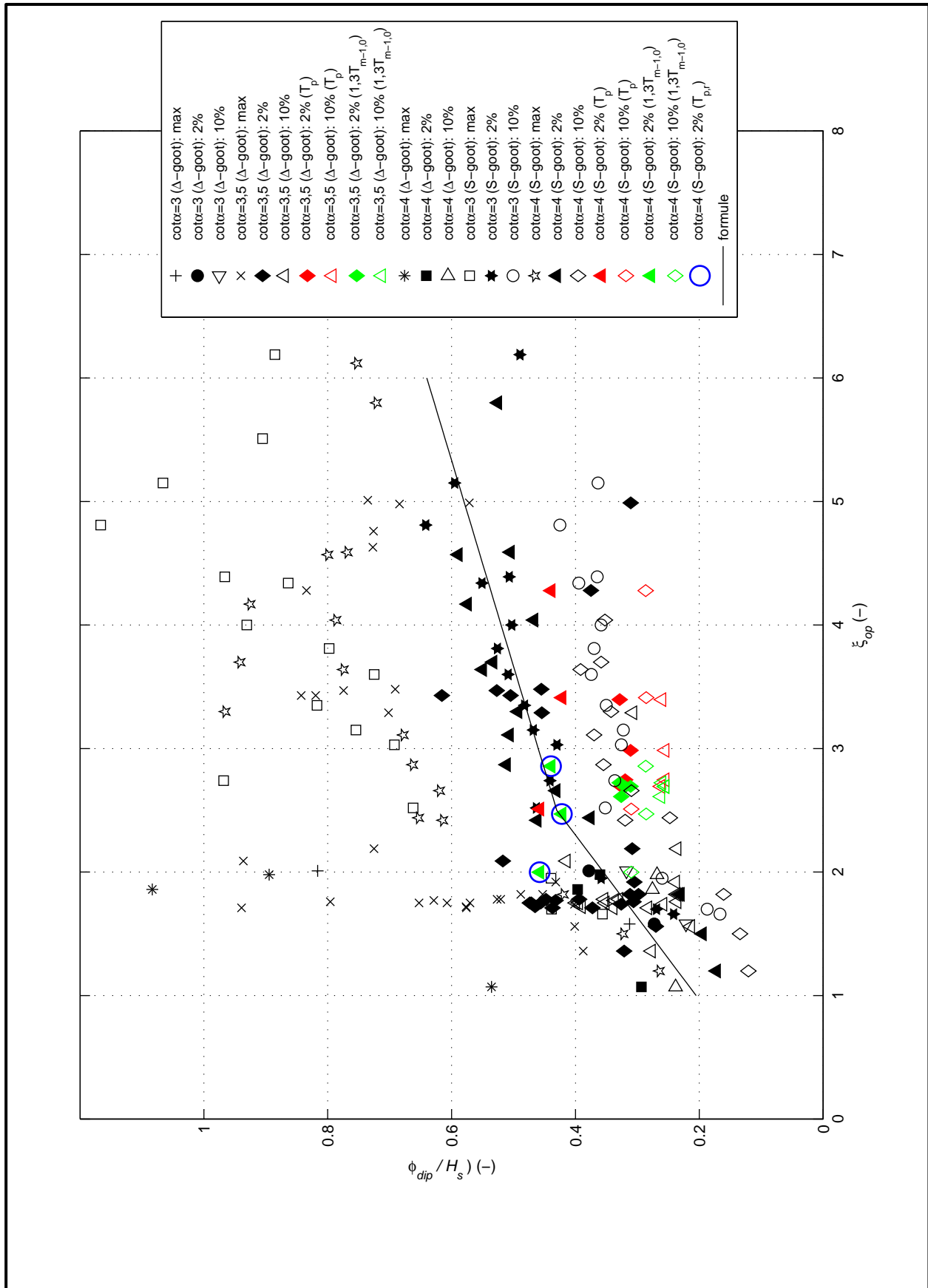
1204727.005

Fig. B.3

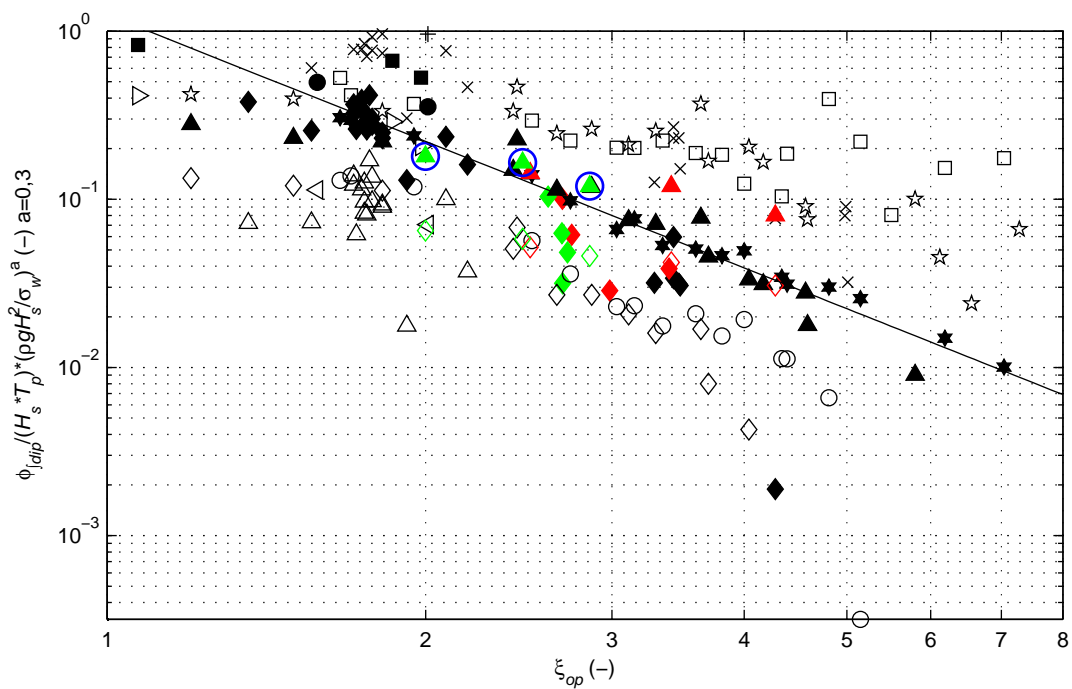
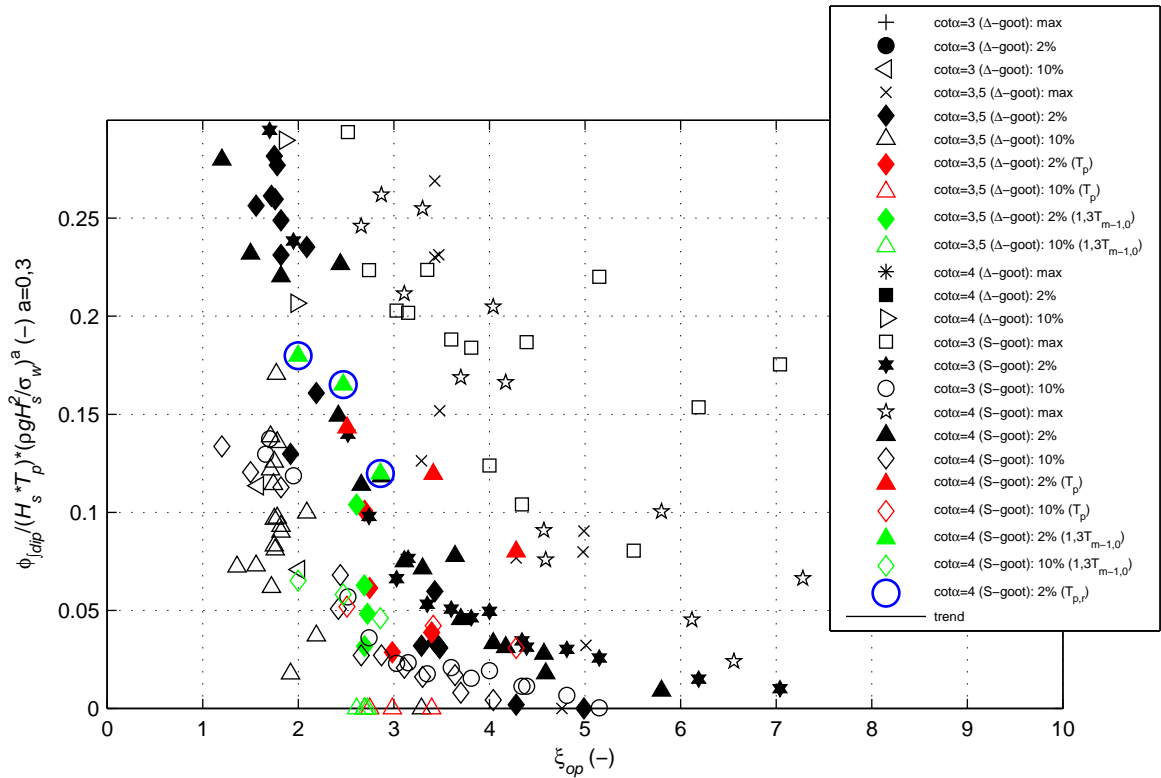


Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven tegen golfsteilheid (Nummering Klein Breleer e.a. (2006): A.28)

| | | |
|-----------------|-------------|----------|
| Deltares | 1204727.005 | Fig. B.4 |
| | | |



| | | |
|---|-----------------|-------------|
| Gediptheid tijdens golffront (ϕ_{dip}) (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.42) | | |
| | Deltares | 1204727.005 |



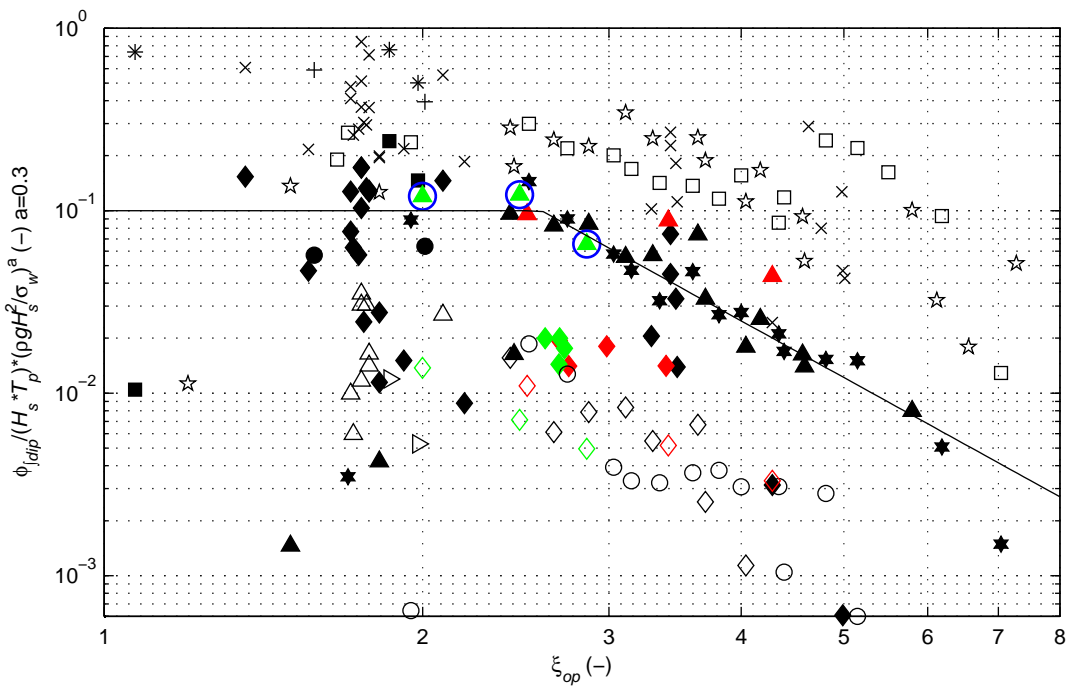
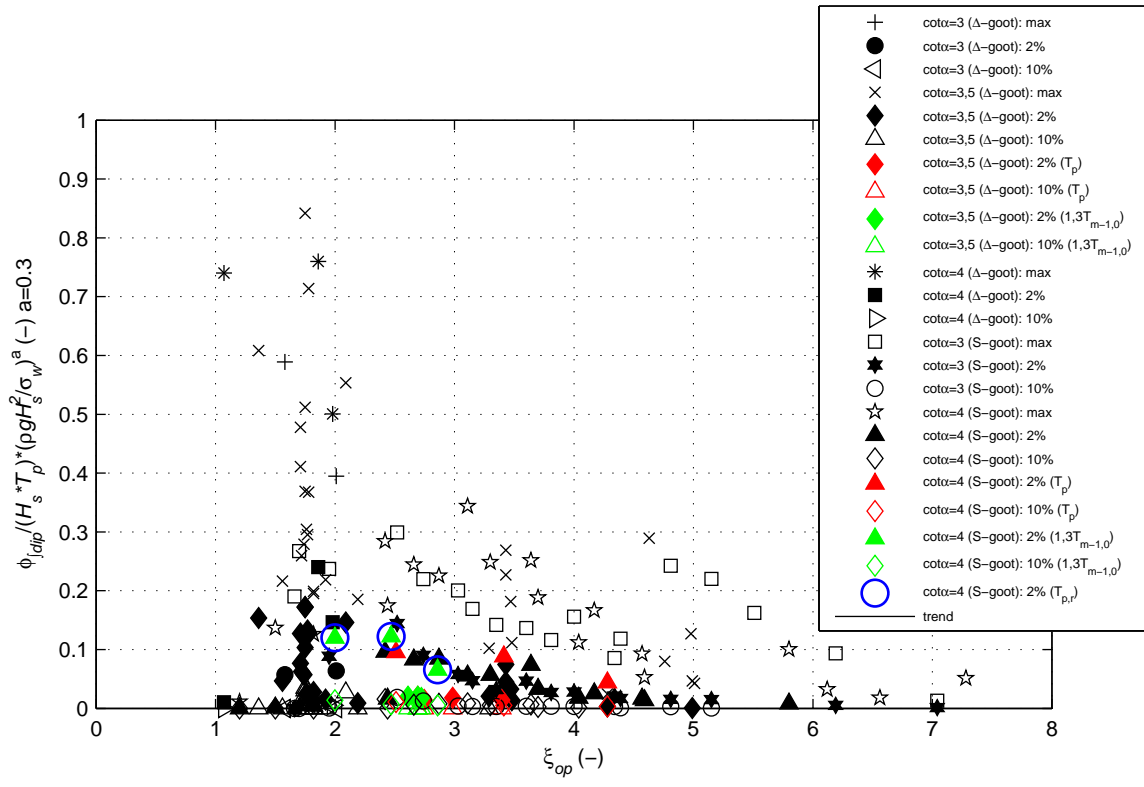
Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap ($\phi_{dip} / H_s T_p$)
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.46)

Weber schaling

Deltares

1204727.005

Fig. B.6



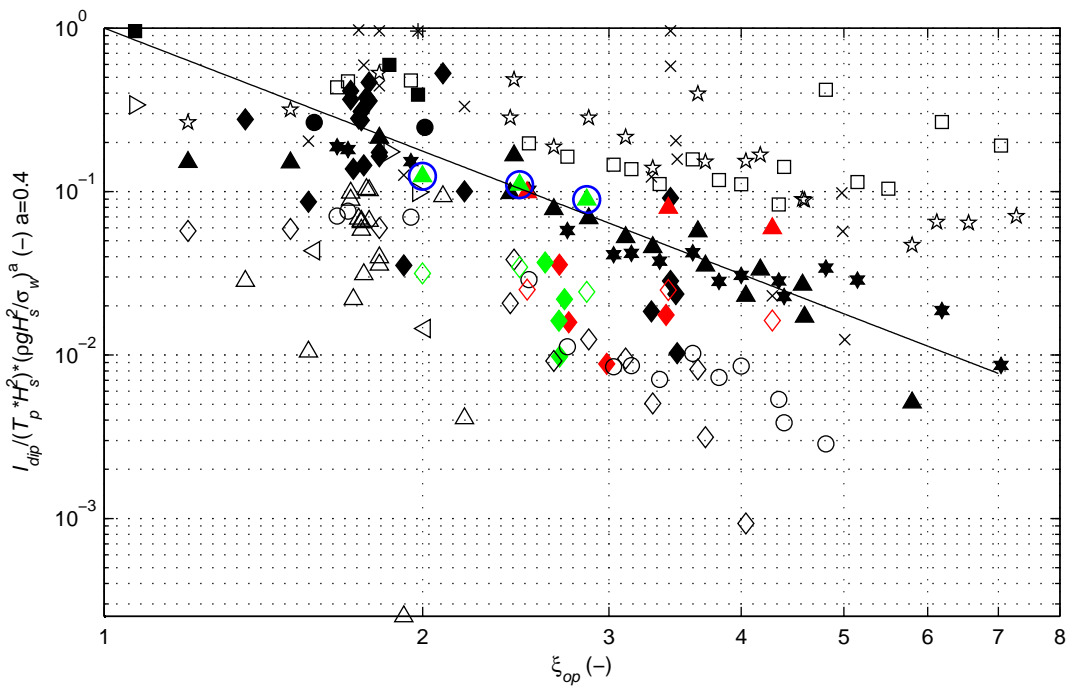
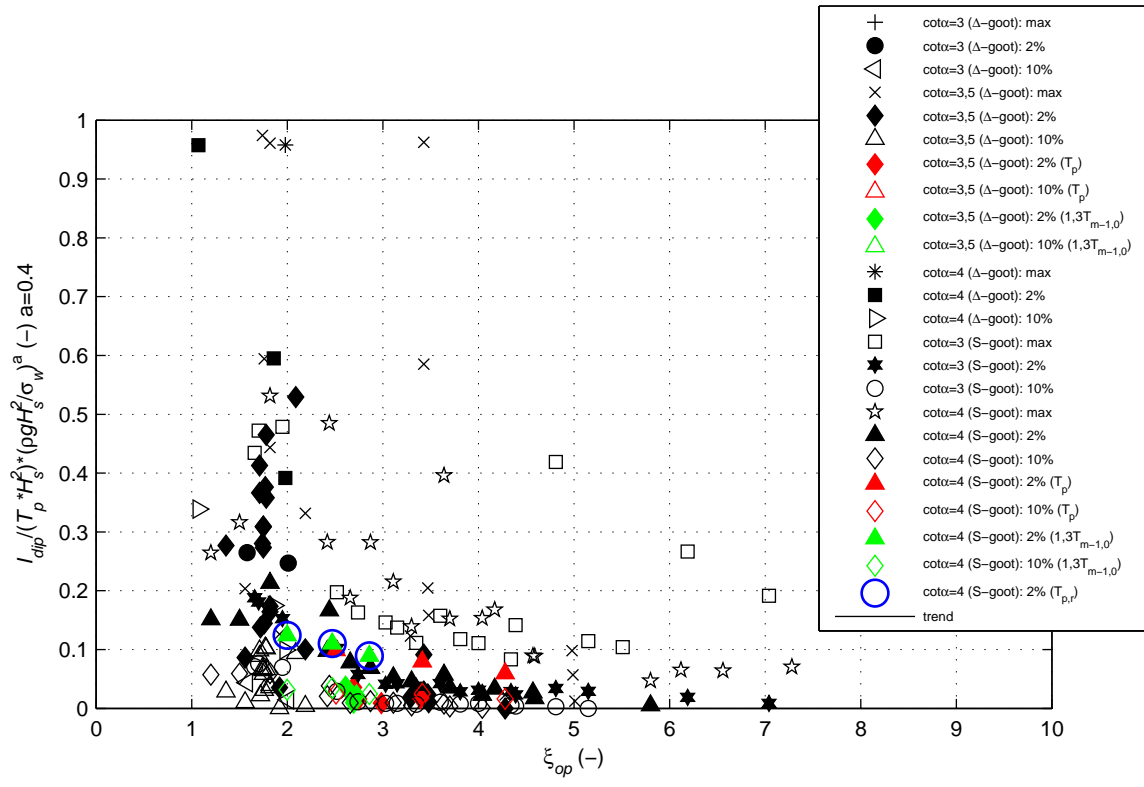
Geïntegreerde gediptheid tijdens golfvront ($\phi_{dip} / H_s T_p$)
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.48)

Weber-schaling

Deltares

1204727.005

Fig. B.7



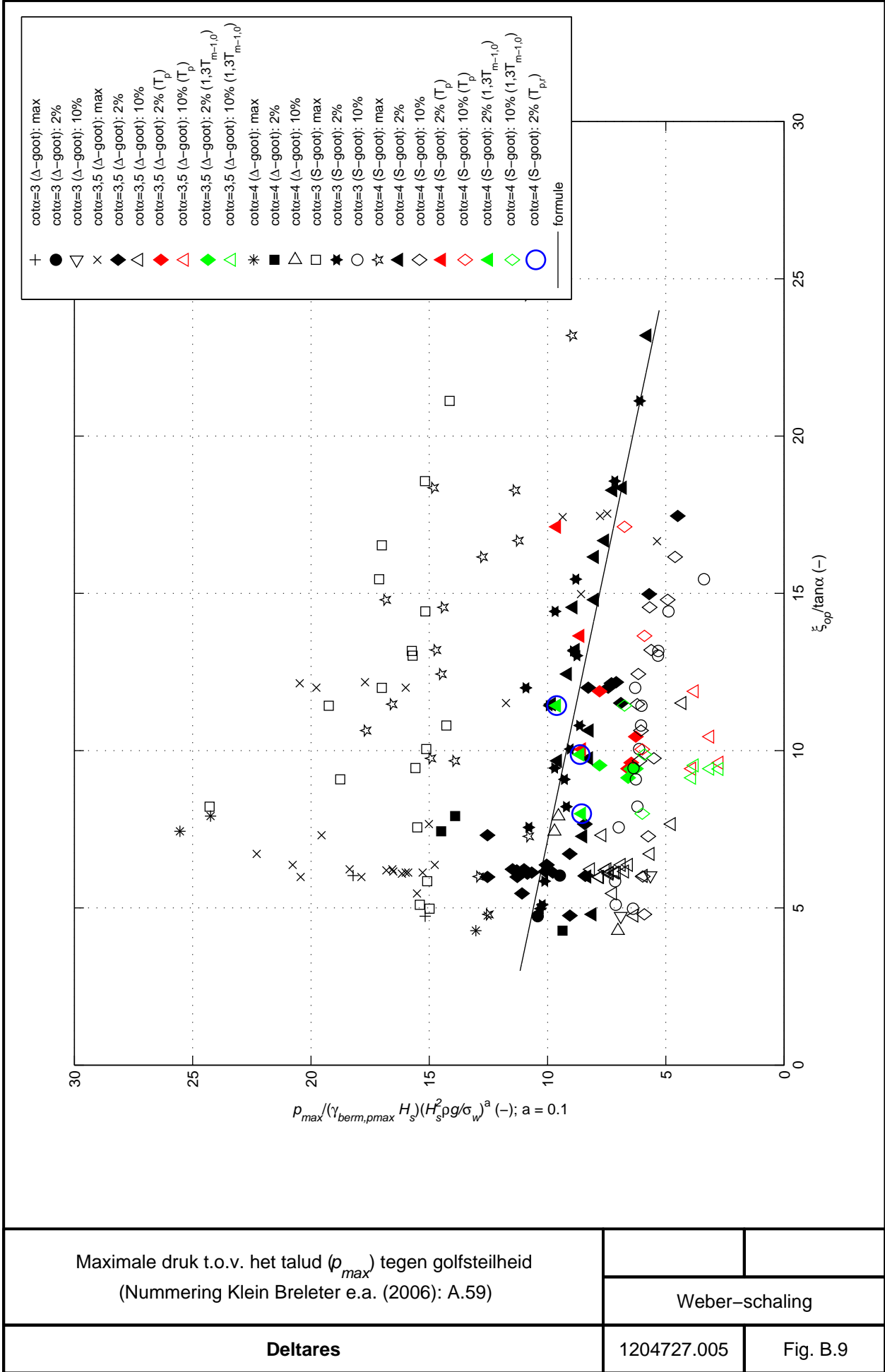
Dipimpuls tijdens golfklap (I_{dip})
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.55)

Weber-schaling

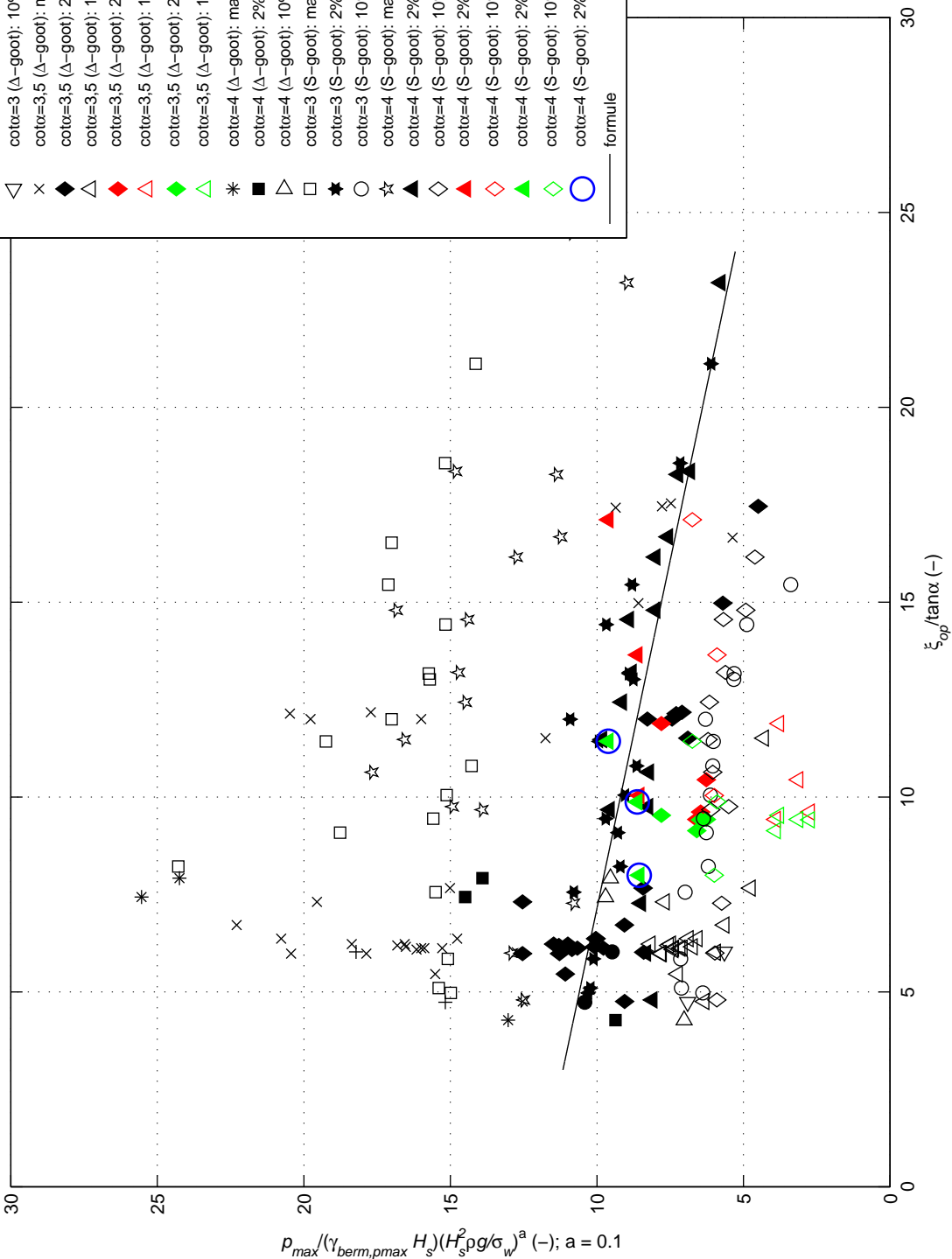
Deltares

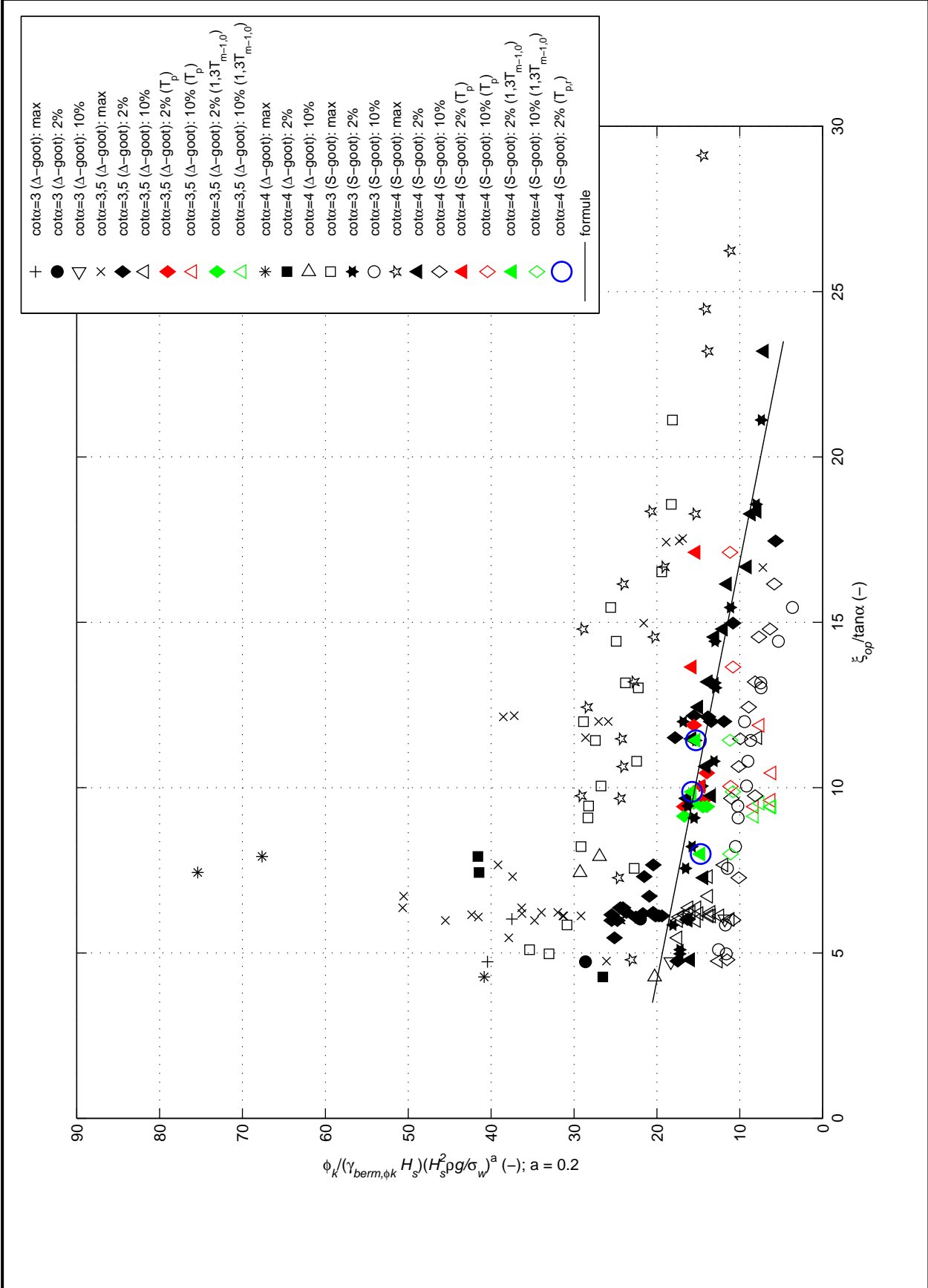
1204727.005

Fig. B.8

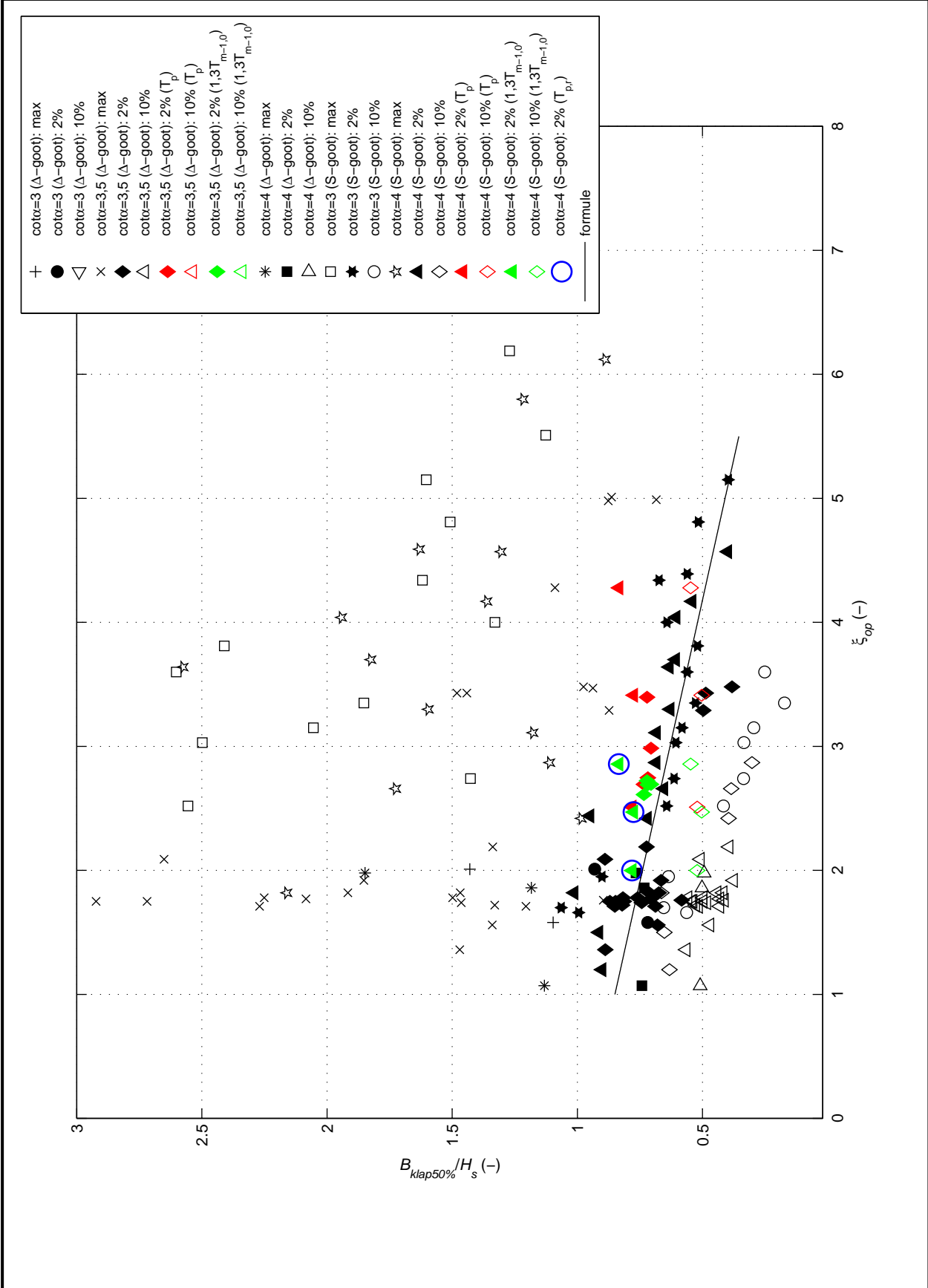


- + cot α =3 (Δ -goot): max
- cot α =3 (Δ -goot): 2%
- ▽ cot α =3 (Δ -goot): 10%
- × cot α =3,5 (Δ -goot): max
- ◆ cot α =3,5 (Δ -goot): 2%
- ◇ cot α =3,5 (Δ -goot): 10%
- ◀ cot α =3,5 (Δ -goot): 2% (T_p)
- ▶ cot α =3,5 (Δ -goot): 10% (T_p)
- ◆ cot α =3,5 (Δ -goot): 2% ($1,3T_{m-1,0}$)
- ◇ cot α =3,5 (Δ -goot): 10% ($1,3T_{m-1,0}$)
- * cot α =4 (Δ -goot): max
- cot α =4 (Δ -goot): 2%
- cot α =4 (Δ -goot): 10%
- ★ cot α =3 (S-goot): max
- cot α =3 (S-goot): 2%
- ☆ cot α =3 (S-goot): 10%
- ▲ cot α =4 (S-goot): max
- ◇ cot α =4 (S-goot): 2%
- ◀ cot α =4 (S-goot): 10%
- ▶ cot α =4 (S-goot): 2% (T_p)
- ◆ cot α =4 (S-goot): 10% (T_p)
- ◇ cot α =4 (S-goot): 2% ($1,3T_{m-1,0}$)
- ◇ cot α =4 (S-goot): 10% ($1,3T_{m-1,0}$)
- cot α =4 (S-goot): 2% ($T_{p,r}$)
- cot α =4 (S-goot): 10% ($T_{p,r}$)
- formule

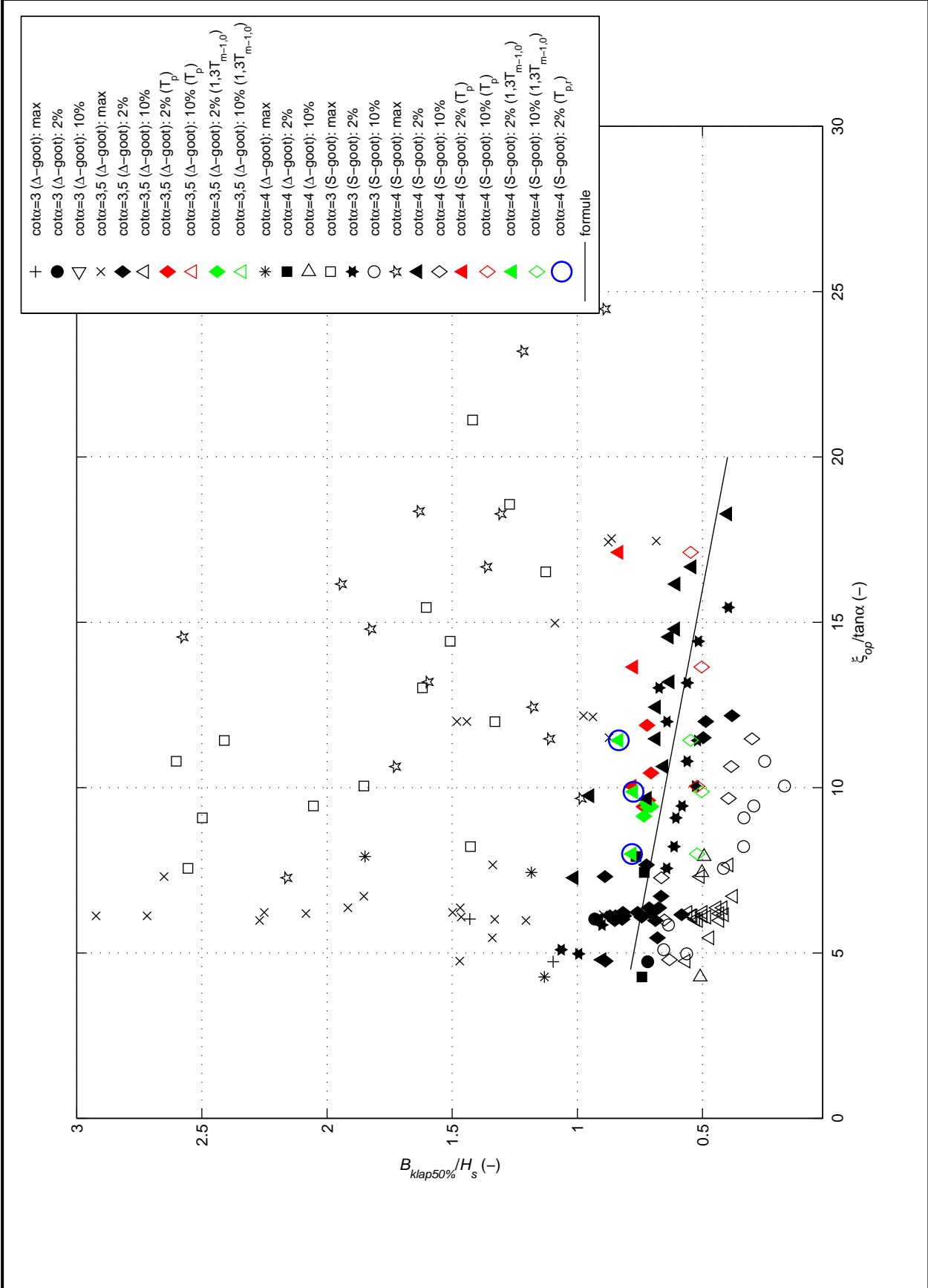




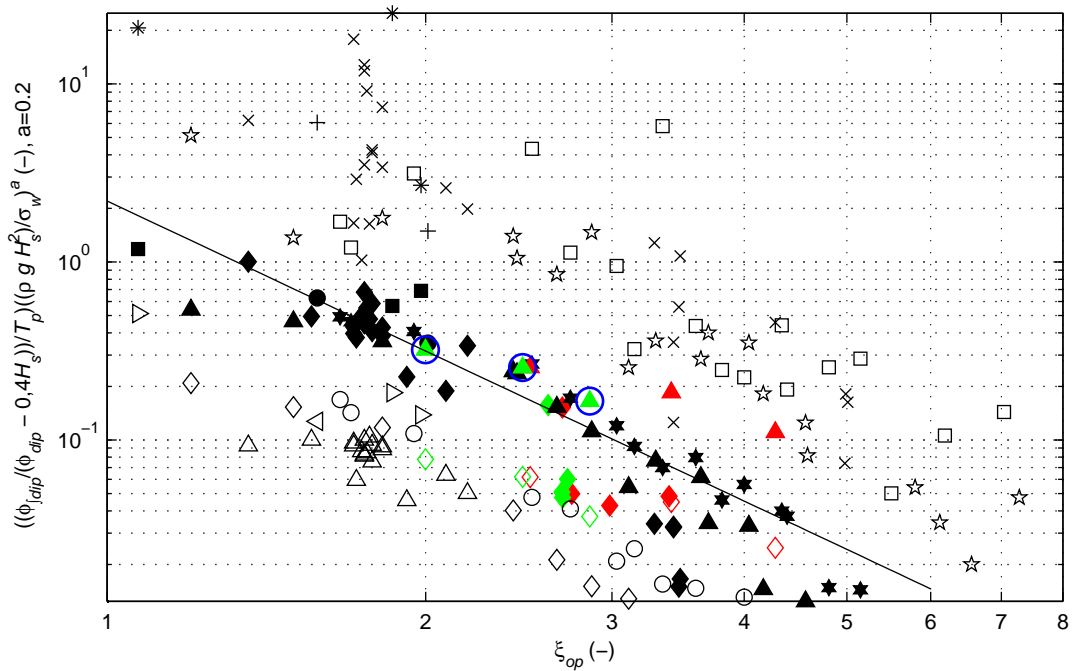
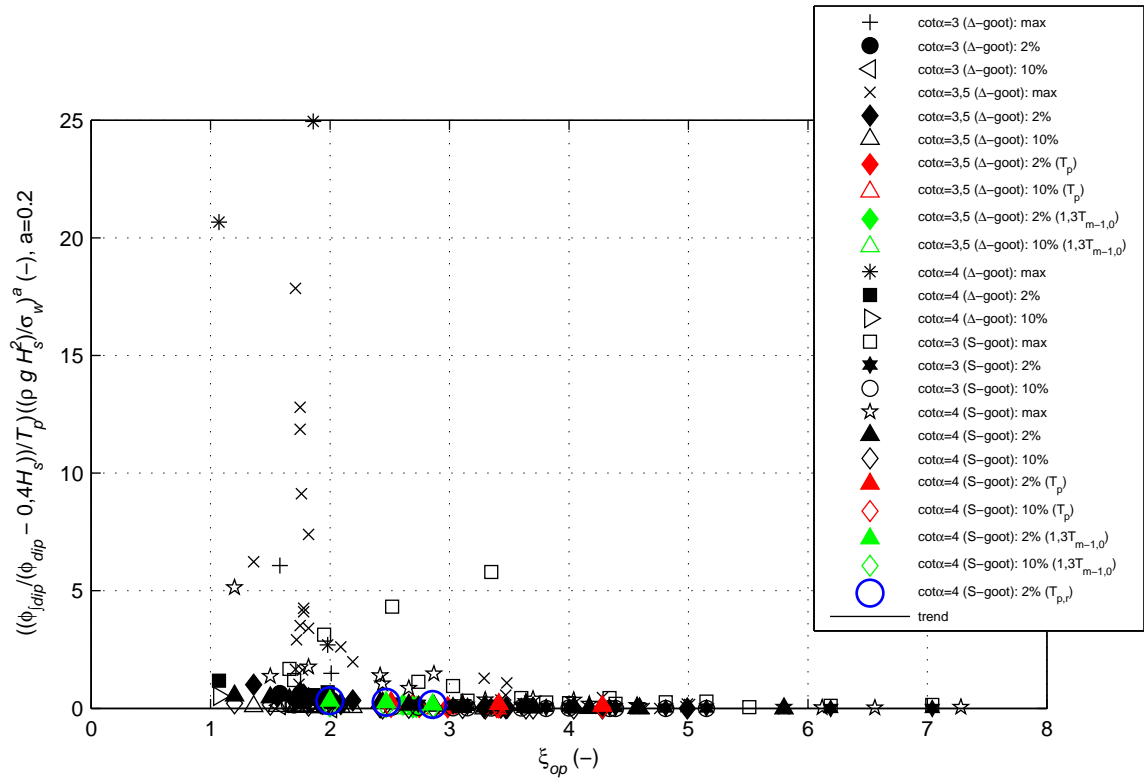
| | | |
|--|----------------|-------------|
| Maximale stijgheighte ten opzichte van trog (ϕ_k) tegen golfsteilheid (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.62) | Weber-schaling | |
| | Deltares | 1204727.005 |
| | | Fig. B.10 |



| | | |
|---|----------------------------|-----------|
| Golfklapbreedte ($B_{klap50\%}$) (Nummering Klein Breleer e.a. (2006): A.71) | | |
| | Grootste 33 % van ϕ_k | |
| Deltares | 1204727.005 | Fig. B.11 |



| | | |
|--|----------------------------|-----------|
| Golfklapbreedte ($B_{klap50\%}$) tegen golfsteilheid (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.72) | | |
| | Grootste 33 % van ϕ_k | |
| Deltares | 1204727.005 | Fig. B.12 |



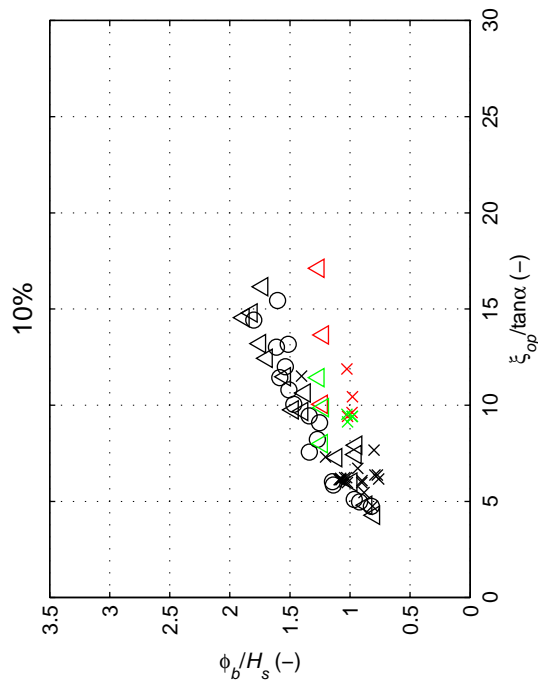
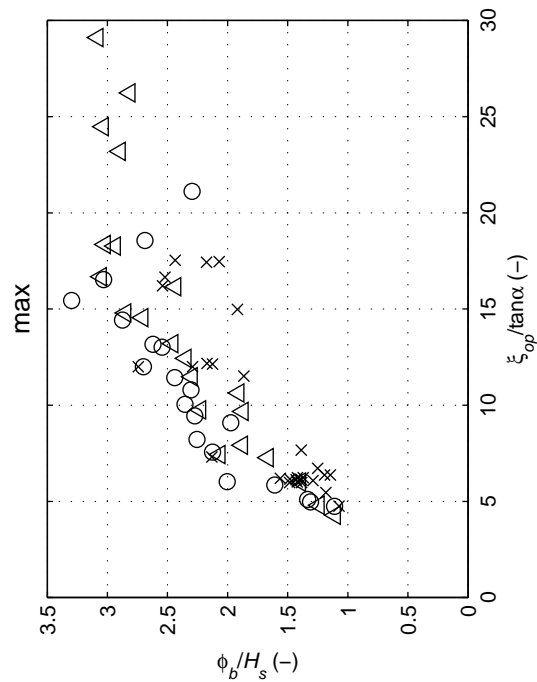
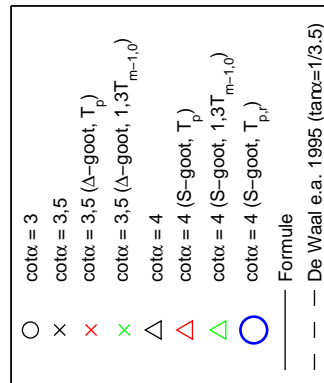
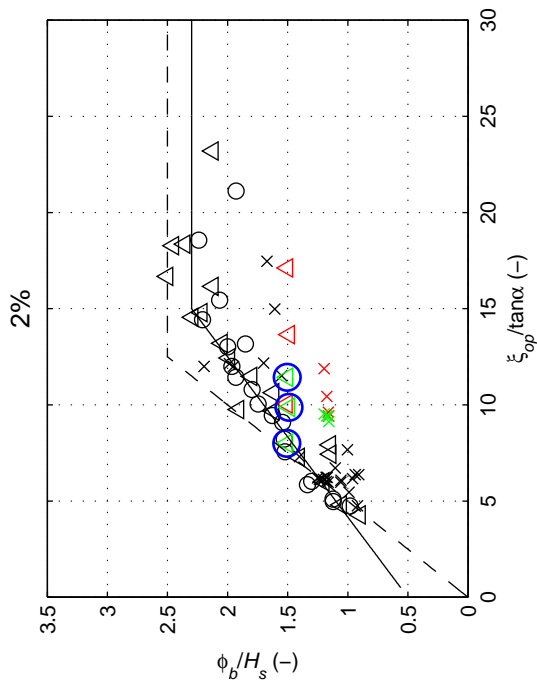
Belastingsduur $(\phi_{j,dip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s))$ tijdens golfklap, Weber-schaling
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.85)

Grootste 33 % van ϕ_k

Deltares

1204727.005

Fig. B.13

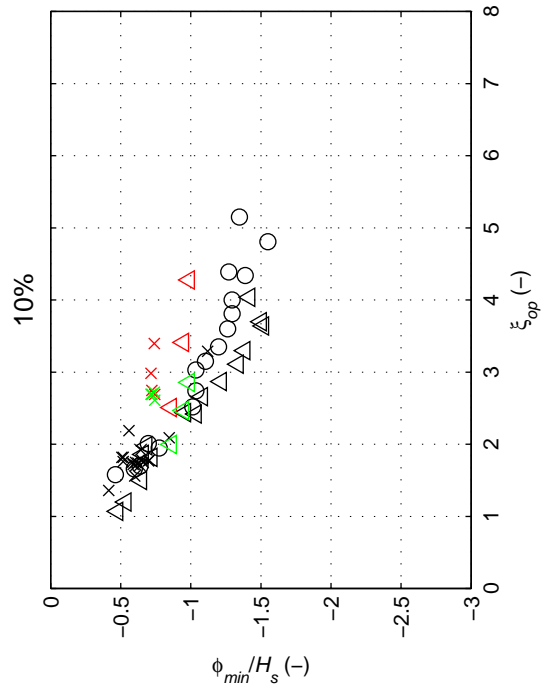
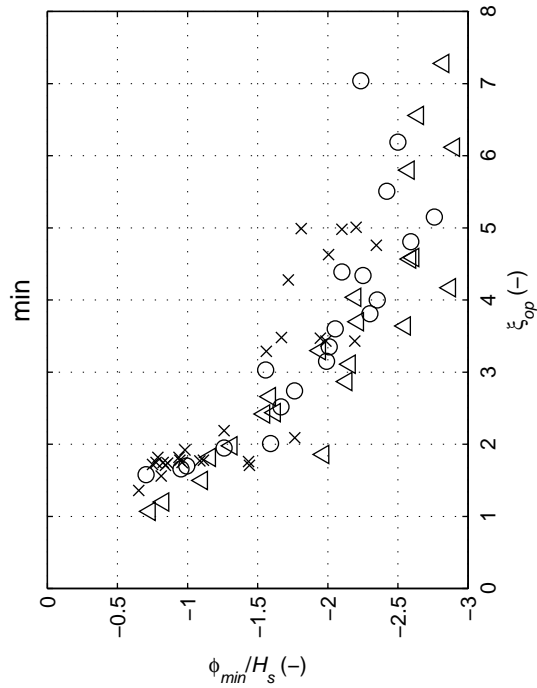
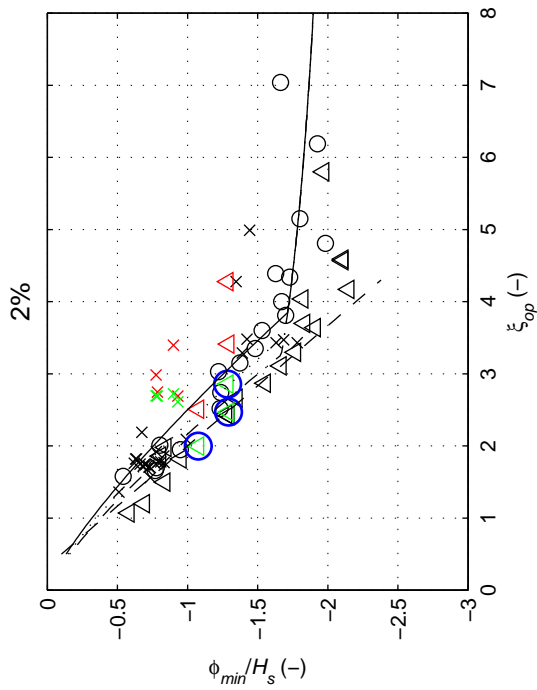


Hoogte van het golffront (ϕ_b) tegen golfsteilheid
(Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.90)

Deltares

1204727.005

Fig. B.14

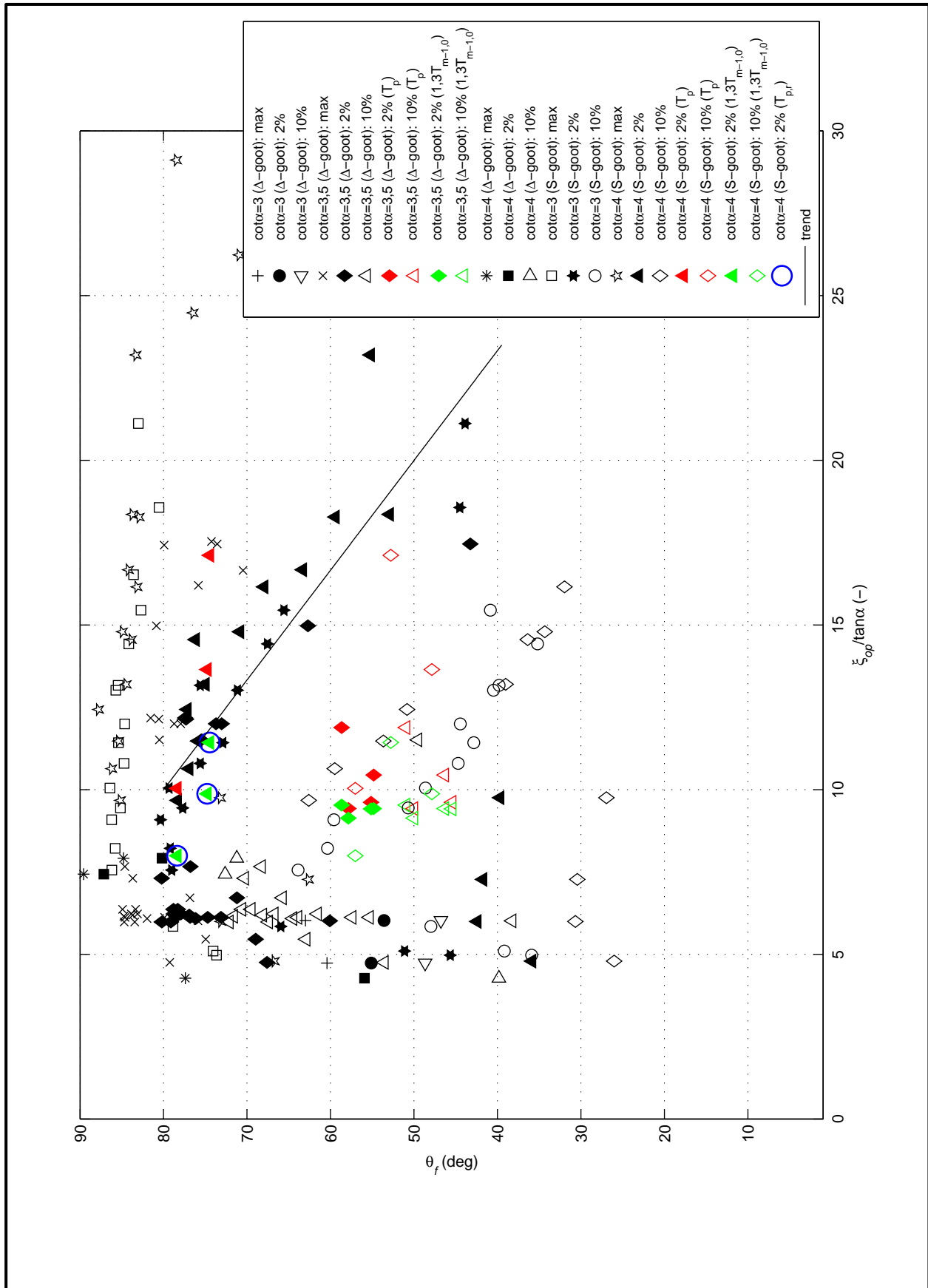


Diepte van het golffront (ϕ_{min})
 (Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.91)

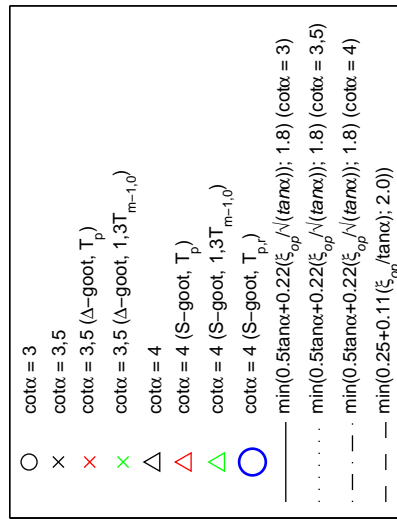
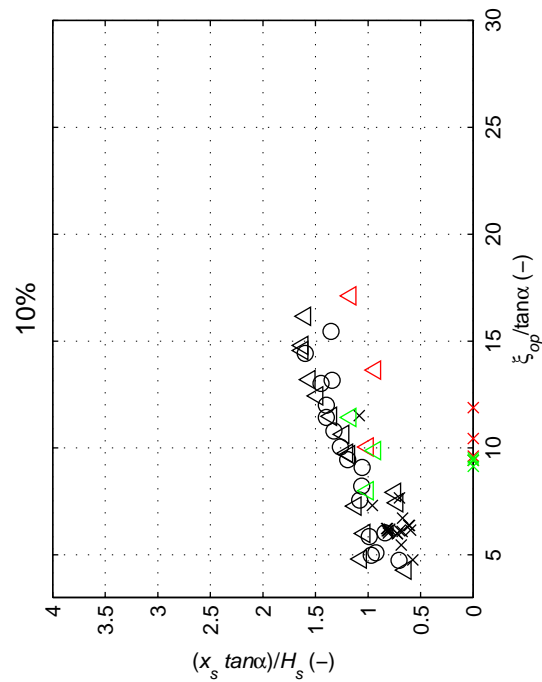
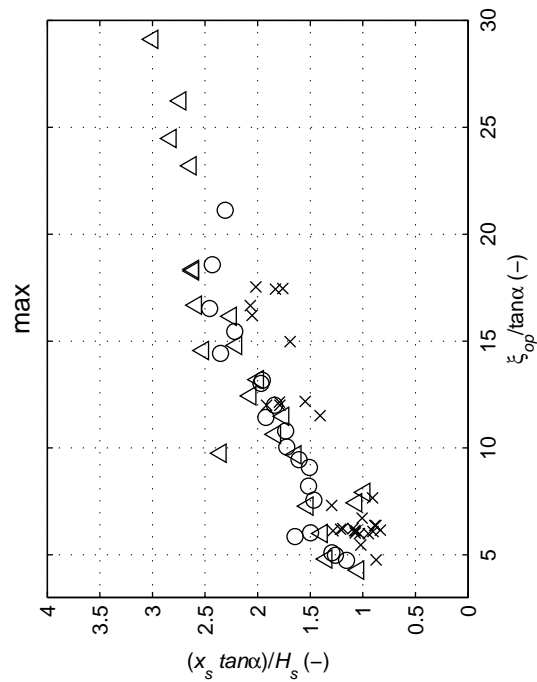
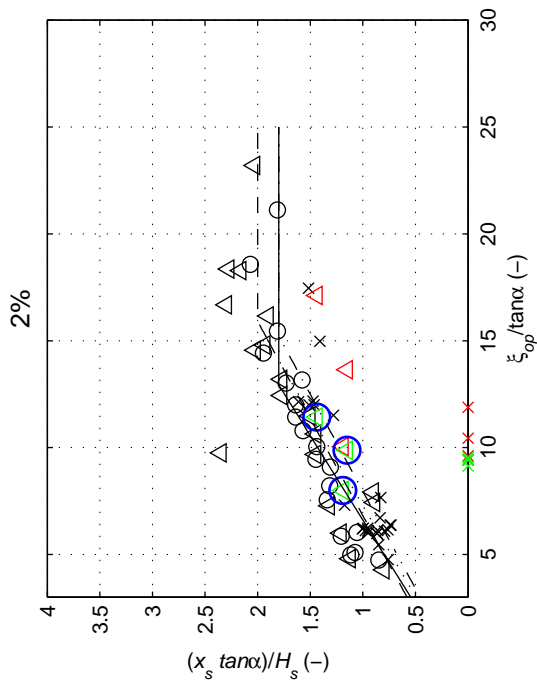
Deltares

1204727.005

Fig. B.15



| | | |
|---|----------------------------|-----------|
| Helling van het golffront (θ_f) tegen golfsteilheid (Nummering Klein Breleer e.a. (2006): A.92) | | |
| | Grootste 33 % van ϕ_b | |
| Deltares | 1204727.005 | Fig. B.16 |



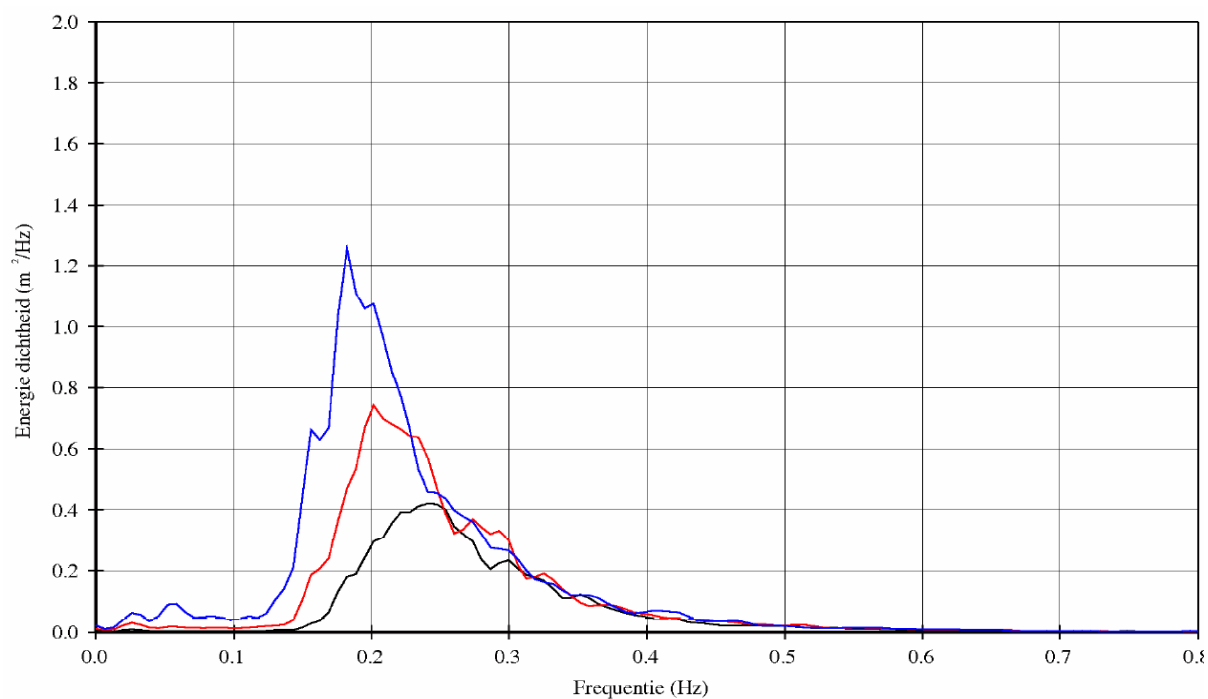
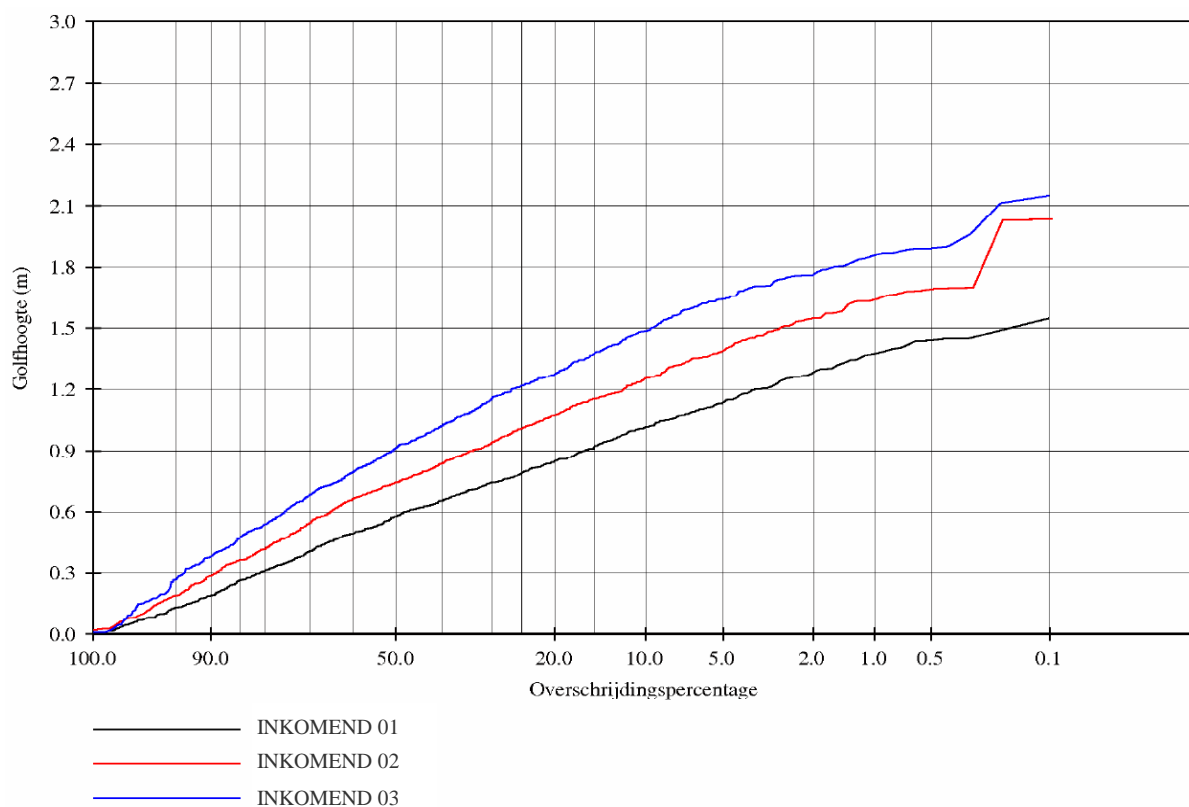
Locatie van het golffront (ϕ_b) tegen golfsteilheid
(Nummering Klein Breleter e.a. (2006): A.94)

Grootste 33% van ϕ_b

Deltares

1204727.005

Fig. B.17



Ter illustratie: enkele willekeurige enkeltoppige golfspectra en bijbehorende overschrijdskrommen voor inkomende golven in de Deltagoot