

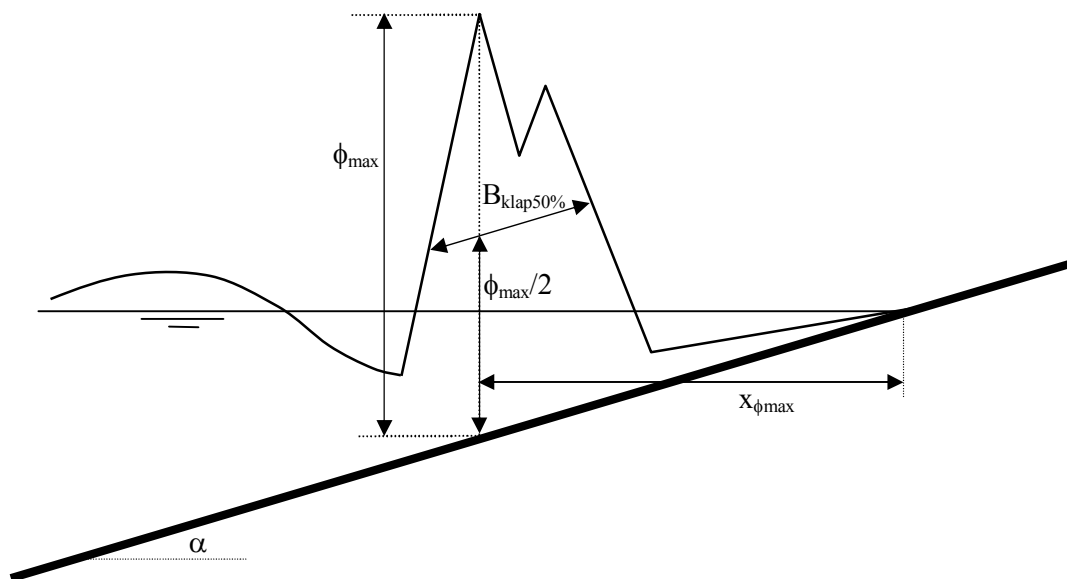
Golfklappen op asfalt

M. Klein Breteler

I Inleiding

Als bijdrage aan de validatie van het rekenmodel GOLFKLAP, dat gebruikt wordt voor de gedetailleerde toetsing van dijkbekledingen van asfalt, is in deze notitie een kwantificering gegeven van de grootte van golfklappen op een talud. Op basis van resultaten van kleinschalig en grootschalig modelonderzoek, waarbij de druk op het talud is gemeten, is de relatie gelegd tussen de golfcondities en taludhelling enerzijds, en de eigenschappen van de golfklappen anderzijds. Het gaat hierbij om de volgende eigenschappen (zie figuur 1):

- maximale druk op het talud tijdens de golfklap, weergegeven als stijghoogte ten opzichte van het taludoppervlak: ϕ_{\max}
- breedte van golfklappen: $B_{\text{klap}50\%}$ (ter hoogte van $\phi_{\max}/2$ in het stijghoogteverloop, zie figuur 1)
- locatie van golfklappen: $x_{\phi_{\max}}$



Figuur 1. Schematische weergave van golfklappen op het talud volgens Klein Breteler e.a. (2006a)

Omdat het percentage golven dat een golfklap geeft ook van belang is, is ook daar kort aandacht aan besteed.

De resultaten in deze notitie zijn voor een groot deel overgenomen uit Klein Breteler e.a. (2006a).

2 Modelonderzoek

Om de relatie tussen deze eigenschappen en golfcondities (H_s en T_p) te kunnen leggen zijn vele modelproeven, waarin de stijghoogte op het talud is gemeten, door Klein Breteler e.a. (2006a) geanalyseerd. Een aantal van deze onderzoeken zijn uitgevoerd met een talud van gezette steen. Voor de golfklappen op het talud maakt het echter niet veel uit of de toplaag uit asfalt of uit gezette steen bestaat. Naar verwachting zal er slechts een kleine invloed van de stijfheid van het talud merkbaar zijn, en die invloed wordt verondersteld verwaarloosbaar te zijn ten opzichte van de nauwkeurigheid en spreiding in de metingen.

In dit hoofdstuk is een beknopte beschrijving gegeven van alle onderzoeken die in de analyse meegenomen zijn. In de beschrijving komen telkens de volgende zaken aan de orde:

- de constructie (taludhelling en type bekleding),
- de bemonsteringsfrequentie, en
- de instrumentatiedichtheid.

De gemeten golfcondities in de proeven zijn in tabel 2 tot en met 7 weergegeven. In deze tabellen zijn de volgende variabelen gebruikt:

- de significante golfhoogte H_s (m) aan de teen van het talud, op basis van de energie (H_{m0}),
- de golfperiode T_p (s) bij de piek van het golfspectrum,
- de spectrale maat voor de golfperiode $T_{m-1,0}$ (s),
- de golfsteilheid $s_{op} = H_s/L_{op}$ (-), waarin $L_{op} = gT_p^2/(2\pi)$ (m) de golflengte op basis van de piek-golfperiode, teruggerekend naar diepwater, en g (m/s^2) versnelling van de zwaartekracht, en
- de brekerparameter $\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$ (-), waarin $\tan\alpha$ (-) de helling van het talud is.

In de beschrijving van de geanalyseerde proeven wordt onderstaand de onderlinge afstand tussen de drukopnemers in het relevante deel van het talud gegeven. Hiermee wordt het talud bedoeld tussen de stilwaterlijn (SWL) en het niveau $SWL - H_s \xi_{op}$. In dit deel van het talud zijn de golfklappen te verwachten (Klein Breteler en Eysink 2005).

Deltagoot 1991

Het Deltagootonderzoek van 1991 (Wouters, 1991) is uitgevoerd met een gezette steenbekleding met een talud van 1:3. Vanwege het type toplaag en de onderlinge afstand van de drukopnemers blijken er 2 proeven geschikt te zijn voor de analyse. De geselecteerde proeven zijn sz626 en sz627, waarbij betonblokken met een dikte van $D = 0,30$ m zijn toegepast.

De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 6. De proefduur was telkens ongeveer 4000 s (≈ 1000 golven). De proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap golfspectrum.

Op de toplaag waren 9 drukopnemers onder de stilwaterlijn aangebracht. De relatieve afstand tussen de drukopnemers was $d_{dro}/H_s \approx 0,5$ à $0,7$.

De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 50 Hz.



Figuur 2, Deltagootproeven met vierkante blokken (Wouters, 1991) (linker foto) en asfalt (Derks en Klein Breteler, 1992) (rechter foto)

Deltagoot 1992

Uit het onderzoek dat in 1992 in de Deltagoot is uitgevoerd (Derks en Klein Breteler, 1992) met een asfalttalud van 1:4 zijn 3 proeven geselecteerd om te gebruiken in de analyse, namelijk AS202, AS401 en AS601. De andere proeven waren uitgevoerd met regelmatige golven, hadden slechts een zeer korte duur of hadden dezelfde golfcondities en leveren dus geen additionele informatie voor het huidige onderzoek. De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 6. De proefduur varieert tussen 3600 s en 5400 s (700 à 1300 golven). De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz golfspectrum.

In alle proeven waren 28 drukopnemers aangebracht, maar tijdens proef AS401 en AS601 waren er drie kapot (DRO 13, 14 en 16). De gemiddelde onderlinge afstand langs het talud in het relevante deel van de bekleding was 21 à 26 cm. De relatieve afstand tussen de drukopnemers was $d_{dro}/H_s \approx 0,17$ à $0,28$.

De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 100 Hz.

Deltagoot 1997/1998

Uit het onderzoek dat in 1997/1998 in de Deltagoot is uitgevoerd (Klein Breteler, 2000) met een gezette steenbekleding met een talud van 1:3,5 zijn 25 proeven geselecteerd om te gebruiken in de analyse. In het talud was een 5 m brede berm aangebracht op een hoogte van 5 m boven de gootbodem. Van alle goed geïnstrumenteerde proevenseries zijn proeven geselecteerd met een zo'n breed mogelijk bereik van waarden van de brekerparameter ξ_{op} . Dit is aangevuld met 2 proeven uit serie 5, die wat minder goed geïnstrumenteerd waren, maar zijn uitgevoerd met een relatief lage waterstand waardoor de invloed van de berm kleiner is dan in de andere proevenseries.

In de proeven 5o** zijn plat gezette betonblokken ($D = 0,21$ m) toegepast, in de proeven 12ao** op hun kant geplaatste betonblokken ($D = 0,20$ m), in de proeven 21o** op hun kant geplaatste Haringmanblokken ($D = 0,20$ m) en in de proeven 23o** op hun kant geplaatste blokken ($D = 0,20$ m). De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 6. De proefduur

bedroeg telkens ongeveer 1000 golven. Vrijwel alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap golfspectrum. Alleen proef 21o06 is met een Pierson-Moskowitz golfspectrum uitgevoerd.



Figuur 3, Deltagootproeven met blokken op hun kant (Klein Breteler, 2000) (linker foto) en Hydroblocks (Klein Breteler e.a. 2006a) (rechter foto)

In de proeven 5o** zijn er 11 drukopnemers onder en 12 op de bekleding geïnstalleerd. De onderlinge afstand tussen de drukopnemers op de bekleding varieerde van 0,48 tot 0,98 m, met in het relevante deel van het talud gemiddeld: $d_{dro} \approx 0,6$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,37$.

In de proeven 12ao** zijn er 11 drukopnemers onder en 13 drukopnemers op de bekleding geïnstalleerd. De onderlinge afstand tussen deze drukopnemers was ongeveer 0,10 tot 0,50 m met in het relevante deel van het talud gemiddeld: $d_{dro} \approx 0,30$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,24$ à $0,36$.

De 23 drukopnemers op het talud in de proeven 21o** lagen ongeveer op dezelfde plaats als de drukopnemers in de proeven 23o**. De onderlinge afstand tussen de drukopnemers op de bekleding, gemeten in de lengterichting van de goot, varieerde van ongeveer 0,09 tot 0,40 m en was in het relevante deel van het talud gemiddeld: $d_{dro} \approx 0,19$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,11$ à $0,38$.

De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 40 Hz.

Deltagoot 2004

Door Klein Breteler e.a. (2006a) is in 2004 een Deltagootonderzoek uitgevoerd met een steenzetting van Hydroblocks op een talud van 1:3,5 met relatief lange golven.

In het onderzoek zijn 12 proeven uitgevoerd met relatief lange golven, waarvan er 11 gebruikt zijn in de huidige analyse. Proef P10 is niet gebruikt omdat deze is uitgevoerd met golven van slechts 27 cm hoogte, waardoor de relatieve afstand tussen de drukopnemers, d_{dro}/H_s , te groot is. De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 7. De proefduur was telkens ongeveer 1000 golven, behalve proef P26: 438 golven. De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz golfspectrum.

De druk is gemeten met 21 drukopnemers op de bekleding en 13 drukopnemers onder de bekleding. In het gebied waar de grootste golfklappen verwacht werden, zijn de drukopnemers met een onderlinge afstand van ongeveer 0,23 m geïnstalleerd. Aan de randen van het

interessegebied was de onderlinge afstand groter, tot 0,97 m. De gemiddelde afstand tussen de drukopnemers was in het relevante deel van het talud: $d_{dro} \approx 0,35$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,4$ à $0,7$. De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 200 Hz.

2.2 Kleinschalige proeven

Scheldegoot 1993

Begin jaren 90 is een uitvoerig onderzoek uitgevoerd in de Scheldegoot naar de belasting op taluds, golfloop en golfoverslag (Van der Meer en De Waal, 1993). De proeven zijn uitgevoerd met twee taludhellingen, namelijk 1:3 en 1:4, en een normale golfsteilheid ($0,01 < s_{op} < 0,04$). Verder zijn ook bijzondere taluds met een berm of een hoog voorland onderzocht. Het gladde, ondoorlatende talud was geconstrueerd van beton.

Voor de huidige analyse zijn 7 proeven geselecteerd met een talud zonder berm en een relatief diep voorland. Er zijn proeven op beide taluds geselecteerd met een brede range van brekerparameters.

Deze proeven zijn zo geselecteerd dat de golfsteilheid en brekerparameter vergelijkbaar zijn met die van de grootschalige proeven die in de Deltagoot in 1997/1998 uitgevoerd zijn. Hiermee kan een indicatie verkregen worden van de invloed van de schaal waarop de proeven uitgevoerd zijn.

De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 5. De proefduur was telkens ongeveer 1000 golven. De proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap golfspectrum.

De druk is gemeten met 29 à 30 drukopnemers (onder de stilwaterlijn) die in het vlak van het talud zijn gemonteerd. In het gebied waar de grootste golfklappen verwacht werden, zijn de drukopnemers met een onderlinge afstand van ca 0,039 m geïnstalleerd. Aan de randen van het interessegebied bedroeg de onderlinge afstand maximaal 0,24 m bij de proeven P3*** en 0,39 m bij de proeven P4***. De gemiddelde afstand tussen de drukopnemers was in het relevante deel van het talud: $d_{dro} \approx 0,041$ à $0,047$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,21$ à $0,40$.

De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 50 Hz.

Scheldegoot 2003

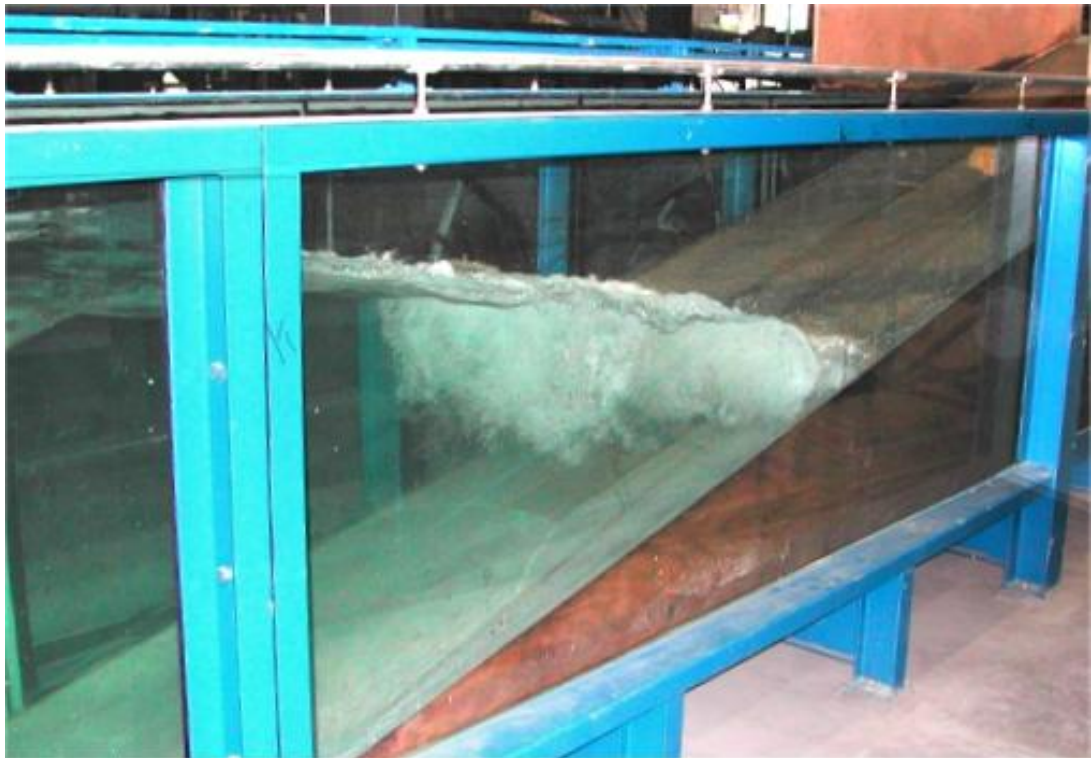
In het kader van het huidige onderzoek naar de invloed van de golfsteilheid op de stabiliteit van steenzettingen is in 2003 een omvangrijk onderzoek op kleine schaal in de Scheldegoot uitgevoerd naar de invloed van de golfsteilheid op het stijghoogteverloop op de toplaag. De toplaag was geconstrueerd van dik hout dat goed was afgesteund op de bodem van de goot teneinde een zo stijf mogelijke constructie te verkrijgen. In het midden van het talud was een aluminium plaat gemonteerd met de drukopnemers.

Tijdens dat onderzoek zijn 33 proeven uitgevoerd met relatief lange golven, waarbij de stijghoogte op het gladde talud is gemeten (Kuiper en Van Vossen, 2003). De proeven zijn

uitgevoerd met twee taludhellingen, namelijk 1:3 en 1:4. De gemeten golfcondities zijn gegeven in tabel 2 tot en met 4. De proefduur was telkens ongeveer 1000 golven.

In de huidige analyse zijn al deze proeven betrokken.

De proeven T3** en T4** zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz golfspectrum en de proeven T5** met dubbeltoppige golfspectra. Bij de analyse van de resultaten is vaak gebruik gemaakt van de piek-golfperiode T_p . Voor de dubbeltoppige spectra is in voorkomende gevallen uitgegaan van $T_p = 1,1T_{m-1,0}$.



Figuur 4, modelonderzoek in de Scheldegoet met lange golven (Kuiper en Van Vossen, 2003)

Het stijghoogteverloop op de toplaag is gemeten met 42 drukopnemers die in het vlak van het talud waren gemonteerd. In het gebied waar de grootste golfklappen verwacht werden, zijn de drukopnemers met een onderlinge afstand van 0,021 m geïnstalleerd. Aan de randen van het interessegebied bedroeg de onderlinge afstand maximaal 0,20 m. De gemiddelde afstand tussen de drukopnemers was in het relevante deel van het talud: $d_{dro} \approx 0,034$ m en $d_{dro}/H_s \approx 0,16$ à $0,34$ (behalve proef T413 tot en met T415: $d_{dro}/H_s \approx 0,45$).

De tijdens deze proeven gemeten drukken zijn opgeslagen in bestanden met een bemonsteringsfrequentie van 2000 Hz, maar de analyse is gericht op bestanden die na filtering opnieuw bemonsterd zijn op 100 Hz.

3 Analyse van proefresultaten

3.1 Aantal golfklappen

Het relatieve aantal golfklappen, gedefinieerd als de verhouding tussen het aantal golfklappen per proef en het aantal golven in de betreffende proef, is gegeven in figuur 8. Op de horizontale as is de brekerparameter gebruikt ($\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$).

In de legenda van de figuren staat “ Δ -goot” voor grootschalig onderzoek in de Deltagoot en S-goot voor kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoot. Verder is de taludhelling van het betreffende onderzoek in de legenda opgenomen ($\cot\alpha$). De volgende onderzoeken zijn in de figuur opgenomen:

- $\cot\alpha=3$ (Δ -goot): Wouters (1991) (met $1,6 < \xi_{op} < 2,0$)
- $\cot\alpha=3,5$ (Δ -goot): Klein Breteler (2000) (met $1,4 < \xi_{op} < 2,2$) en Klein Breteler e.a. (2006a) (met $3,3 < \xi_{op} < 5,0$)
- $\cot\alpha=4$ (Δ -goot): Derks en Klein Breteler (1992) (met $1,1 < \xi_{op} < 2,2$)
- $\cot\alpha=3$ (S-goot): Van der Meer en De Waal (1993) (met $1,6 < \xi_{op} < 2,0$) en Kuiper en Van Vossen (2003) (met $2,5 < \xi_{op} < 7,0$)
- $\cot\alpha=4$ (S-goot): Van der Meer en De Waal (1993) (met $1,1 < \xi_{op} < 2,0$) en Kuiper en Van Vossen (2003) (met $2,4 < \xi_{op} < 7,0$)

In de figuur zijn ook het relatieve aantal fronten weergegeven, waaruit blijkt dat tijdens vrijwel elke golf er een duidelijke golfneerloop plaatsvindt waarbij er vervolgens een golf aankomt met een min of meer steil waterfront. Ondanks dat, treedt er niet altijd een golfklap op. Bovendien is te zien dat het relatieve aantal golfklappen sterk afneemt met het toenemen van de brekerparameter.

In de figuur is verder te zien dat in sommige proeven het aantal golfklappen duidelijk minder is dan bij andere proeven. Dit is mede het gevolg van de instrumentatie dichtheid, waardoor het soms moeilijk is voor de software om in een individuele golf de klap te identificeren. Vooral als het een vrij zwakke klap is, wordt de golfklap wel eens over het hoofd gezien. Als gevolg van schaaleffecten (zie volgende paragraaf) zijn de golfklappen tijdens grootschalige proeven wat zwakker en daardoor wat minder makkelijk te identificeren dan tijdens kleinschalige proeven.

Voor de trend in de meetpunten uit de kleinschalige proeven (Scheldegoot) geldt ($\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$):

$$\frac{N_{klap}}{N} = 1 - \frac{0,057}{\sqrt{s_{op}}}; \quad \text{voor } 0,004 \leq s_{op} < 0,05 \quad (3.1)$$

met:

N_{klap} = aantal gedetecteerde golfklappen (-)

N = aantal golven (-)

3.2 Maximale drukhoogte op talud

De maximale drukhoogte op het talud, ϕ_{\max} , is gedefinieerd als de maximale druk in de golfklap gedeeld door ρg :

$$\phi_{\max} = \frac{p_{\max}}{\rho g} \quad (3.2)$$

met:

ϕ_{\max} = maximale drukhoogte op het talud tijdens de golfklap (m)

p_{\max} = maximale druk op het talud tijdens de golfklap (Pa)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

De maximale drukhoogte is een elke golf weer anders. Daarom is de analyse gericht op enkele statistische waarden uit de overschrijdingskromme:

$\phi_{\max, \max}$ = grootste waarde van ϕ_{\max} uit de betreffende proef (m)

$\phi_{\max, 2\%}$ = waarde van ϕ_{\max} met overschrijdingsfrequentie van 2% in de betreffende proef, gerelateerd aan het aantal golven (m)

$\phi_{\max, 10\%}$ = waarde van ϕ_{\max} met overschrijdingsfrequentie van 10% in de betreffende proef, gerelateerd aan het aantal golven (m)

In figuur 9 zijn de gemeten waarden als functie van de brekerparameter gegeven, waarbij de ϕ_{\max} dimensieloos is gemaakt door het te delen door de significante golfhoogte: ϕ_{\max}/H_s = stootfactor. Conform de verwachtingen is de spreiding in de maximale waarden van ϕ_{\max}/H_s zeer groot, maar is die met overschrijdingsfrequentie van 2% en 10% veel kleiner. In het vervolg van deze analyse wordt de aandacht gericht op de 2%-waarden (zwart gevulde symbolen in de figuur).

Een nadere bestudering van de meetpunten (Klein Breteler e.a. 2006a) heeft aan het licht gebracht dat de spreiding in de waarden van $\phi_{\max, 2\%}/H_s$ voor een deel veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van de berm in sommige proeven en door schaaleffecten.

In figuur 10 zijn de meetresultaten uit de Deltagoot, die verkregen zijn met een talud met een berm, uitgezet tegen de dimensieloze bermhoogte. Op de verticale as is $\gamma_{p\max} = \phi_{\max, 2\%}/[\phi_{\max, 2\%}]_{\text{zonder berm}}$ gezet, waarbij $[\phi_{\max, 2\%}]_{\text{zonder berm}}$ de geschatte waarde van $\phi_{\max, 2\%}$ is zonder berm (2%-overschrijdingswaarden). Deze waarde is geschat op basis van de metingen met een zeer hoge berm, waar verwacht mag worden dat de berm geen invloed meer heeft. De hoogte van de berm ten opzichte van de stilwaterlijn is h_b , waarbij h_b positief is bij een berm boven water. Hoewel de spreiding groot is, is er toch een tendens te zien. De proeven die zijn uitgevoerd met een berm rond de stilwaterlijn hebben een 15 tot 30% hogere $\phi_{\max, 2\%}/H_s$ (zwaardere golfklap) dan de proeven met een zeer hoge berm, of zonder berm. De trend kan weergegeven worden met de volgende formule:

$$\gamma_{berm,\phi_{max}} = 0,17 \left(\frac{h_b}{H_s} - 1,2 \right)^2 + 1 \quad \text{voor } -0,2 \leq \frac{h_b}{H_s} \leq 1,2$$

$$\gamma_{berm,\phi_{max}} = 1 \quad \text{voor } \frac{h_b}{H_s} > 1,2$$
(3.3)

Met:

- $\gamma_{berm,p_{max}}$ = factor die de invloed van de berm op p_{max} tijdens de golfklap weergeeft (-)
 ϕ_{max} = maximale stijghoogte ten opzichte van het talud tijdens de golfklap (m)
 h_b = diepte van de berm ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water = positief)(m)

Verder is door Klein Breteler e.a. (2006a) aannemelijk gemaakt dat de schaafeffecten voorkomen kunnen worden als gebruikgemaakt wordt van een gecombineerde Froude-Weberscaling. Dit betekent dat in de formules de volgende term moet worden toegevoegd:

$$\left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,1}$$

Met:

- σ_w = oppervlaktespanning van het water = 0,073 N/m

In figuur 11 is de grootte van ϕ_{max}/H_s weergegeven waarbij er gecorrigeerd is voor de invloed van de berm en voor de schaafeffecten. Verder is op de horizontale as niet de brekerparameter, maar de golfsteilheid gegeven ($\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$). Hierdoor bleek de spreiding nog weer verder af te nemen.

De globale trend van $\phi_{max,2\%}/H_s$ als functie van $\xi_{op}/\tan\alpha$ is als volgt met de Froude/Weberscaling te beschrijven ('best fit' door de metingen):

$$\left(\frac{\phi_{max,2\%}}{\gamma_{berm,\phi_{max}} H_s} \right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,1} = 12 - 0,28 \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} \quad \text{voor } \frac{\xi_{op}}{\tan\alpha} \leq 24$$
(3.4)

Gezien het feit dat slechts twee duidelijk verschillende schalen zijn gebruikt (grootschalig in de Deltagoot en kleinschalig in de Scheldegoet) is nog niet aangetoond dat de formule ook voor andere schalen toepasbaar is. De eventuele afwijking op prototypeschaal (met $H_s = 2$ à 3 m) zal echter niet zo groot zijn, omdat een belangrijk deel van de schaafeffecten al verdisconteerd is en de verhouding tussen de Deltagoetschaal en prototypeschaal niet zo groot is.

De onderlinge afstand tussen de drukopnemers en beperkte bemonsteringsfrequentie zorgt voor een onderschatting van de ϕ_{max} in de metingen. Door Klein Breteler e.a. (2006a) is deze onderschatting gekwantificeerd. Voor deze invloed is gecorrigeerd in de volgende formule (aanbevolen voor kwantificering):

$$\left(\frac{\phi_{max,2\%}}{\gamma_{berm,\phi_{max}} H_s} \right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,1} = 16 - \frac{0,36}{\sqrt{s_{op}}} \quad \text{voor } s_{op} > 0,002$$
(3.5)

met:

- $s_{op} = H_s/L_{op} =$ golfsteilheid (-).

3.3 Breedte van de golfklap

Ten aanzien van de breedte van golfklap wordt hier de aandacht gericht op de breedte van de stijghoogtefiguur halverwege de hoogte ervan, gemeten evenwijdig aan het talud (zie figuur 1). Deze waarde is over het algemeen tijdens de golfklappen goed te bepalen en wordt $B_{\text{klap}50\%}$ genoemd. De flanken van de stijghoogtefiguur zijn over het algemeen zeer steil (80 à 90°).

Bij de breedte van de golfklap ($B_{\text{klap}50\%}$) is gekeken naar de grootste 33% van de golfklappen, gelet op ϕ_{max} . Dit heeft als nadelige consequentie dat de analyse bij sommige proeven zich richt op zo weinig golfklappen, dat de metingen met een onderschrijdingsfrequenties van 10% (en soms zelfs van 2%) soms afwezig zijn. Voor de Deltagootproeven uitgevoerd in 2004 heeft dit tot gevolg dat slechts twee waarden voor de 2% onderschrijdingsfrequentie aanwezig zijn, namelijk proef P25 en P26.

De metingen van $B_{\text{klap}50\%}/H_s$ zijn als functie van de brekerparameter te zien in figuur 12. Voor de waarden met 2% overschrijdingsfrequentie geldt ongeveer de volgende trend:

$$\frac{B_{\text{klap}50\%2\%}}{H_s} = 0,96 - 0,11\xi_{op} \quad \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 5,5 \quad (3.6)$$

Met:

$B_{\text{klap}50\%2\%}$ = breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte (zie figuur 1) met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

3.4 Locatie van de golfklappen

Voor het bepalen van de maatgevende locatie van de golfklappen als functie van de golfcondities en taludhelling is gekeken naar de 50 grootste golfklappen in een geselecteerd aantal proeven (Klein Breteler en van der Werf, 2006b). Vervolgens is van die 50 golfklappen een statistische analyse van de locatie uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn gegeven in figuur 13.

De geanalyseerde proeven zijn gegeven in onderstaande tabel 1.

In de bovenste grafiek van figuur 13 is de dimensieloze locatie van de golfklap uitgezet tegen de brekerparameter. Naarmate de brekerparameter toeneemt, nemen ook de waarden van $x_{\phi_{\text{max}}}/H_s$ toe. In de onderste figuur is de dimensieloze waterdiepte ter plaatse van de golfklap uitgezet: $x_{\phi_{\text{max}}}\tan\alpha/H_s$. Deze diepte is fysisch wat logischer dan de horizontale afstand van de golfklappen tot de waterlijn. De volgende formule sluit aan op de trend van de gemiddelde waarden:

$$\frac{x_{\phi_{\text{max}}}\tan\alpha}{H_s} = \min \left\{ 0,45\xi_{op} - 0,3 ; 1,7 \right\} \quad \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 6 \quad (3.7)$$

met:

$x_{\phi_{\text{max}}}$ = horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap (m)

Figuur 13 geeft ook een indruk van de breedte van de zone waar grote golfklappen zoal plaatsvinden.

proef	H_s (m)	T_p (s)	$\tan\alpha$ (-)	S_{op} (-)	ξ_{Sop} (-)
as401	1,51	8,65	0,25	0,013	2,20
as601	0,76	2,98	0,25	0,055	1,07
sz627	1,06	3,90	0,33	0,045	1,58
5o05	1,64	5,60	0,29	0,034	1,56
5o06	1,64	6,90	0,29	0,022	1,92
21o15	1,70	6,43	0,29	0,026	1,76
P26	1,05	9,46	0,29	0,008	3,29
P25	0,89	9,21	0,29	0,007	3,48
t301	0,22	2,82	0,33	0,017	2,52
t303	0,22	3,42	0,33	0,012	3,03
t307	0,17	3,81	0,33	0,008	3,81
t310	0,15	4,05	0,33	0,006	4,39
t403	0,17	3,81	0,25	0,008	2,87
t412	0,10	5,78	0,25	0,002	5,79
t501	0,14	3,03	0,25	0,010	2,51

Tabel 1. Golfcondities en taludhelling van de geselecteerde proeven

3.5 Afhangelijkheid van ϕ_{max} en $B_{klap50\%}$

Teneinde antwoord te kunnen geven op de vraag of een grote golfklap altijd relatief breed is, of juist smal, zijn voor een aantal proeven figuren getekend met op de horizontale als de ϕ_{max} en op de verticale as $B_{klap50\%}$. Steeds zijn in de figuur de 50 grootste golfklappen weergegeven. In figuur 14 zijn de resultaten van twee proeven gegeven met het asfalttalud met helling van 1:4. In de bovenste figuur (proef AS401) valt op dat er één golf is met een golfklapbreedte van bijna 3 m, terwijl alle andere golfklappen smaller zijn dan 1,5 m. Mogelijk is dit een meetfout. Verder is te zien dat de grootste 5 golfklappen een breedte hebben van omstreeks 1 m en relatief smal zijn ten opzichte van de anderen.

In de onderste figuur van figuur 14 is proef AS601 gegeven. Bij deze proef is er niets terug te vinden van de constatering bij proef AS401. De punten liggen verspreid over de grafiek wat duidt op volledige onafhankelijkheid tussen ϕ_{max} en $B_{klap50\%}$.

Ook in figuur 15 en 16 blijkt dat er geen afhankelijkheid is tussen ϕ_{max} en $B_{klap50\%}$ en de grootste golfklappen een redelijke gemiddelde breedte hebben.

4 Vergelijking met GOLFKLAP

In het programma GOLFKLAP dat gebruikt wordt voor het gedetailleerd toetsen van asfaltbekledingen, is gebruik gemaakt van kansdichtheidfuncties voor de eigenschappen van de golfklappen (Gaarkeuken, 2001, en de Loeff e.a., 2004). Teneinde deze kansdichtheidfuncties te kunnen vergelijken met de resultaten van de analyse uit hoofdstuk 3, zijn de volgende kenmerkende grootheden hieruit gedestilleerd:

- maximale stijghoogte tijdens de golfklappen met overschrijdingsfrequentie van 2% en 10%:

$$\frac{\phi_{\max 2\%}}{H_s} = 19 \tan \alpha \quad (4.1)$$

$$\frac{\phi_{\max 10\%}}{H_s} = 16 \tan \alpha \quad (4.2)$$

- breedte van de golfklappen:

$$\text{gemiddeld: } \frac{B_{\text{klap}}}{H_s} = 0,60 \quad (4.3)$$

$$\text{range: } 0,1 < B_{\text{klap}}/H_s < 1,1$$

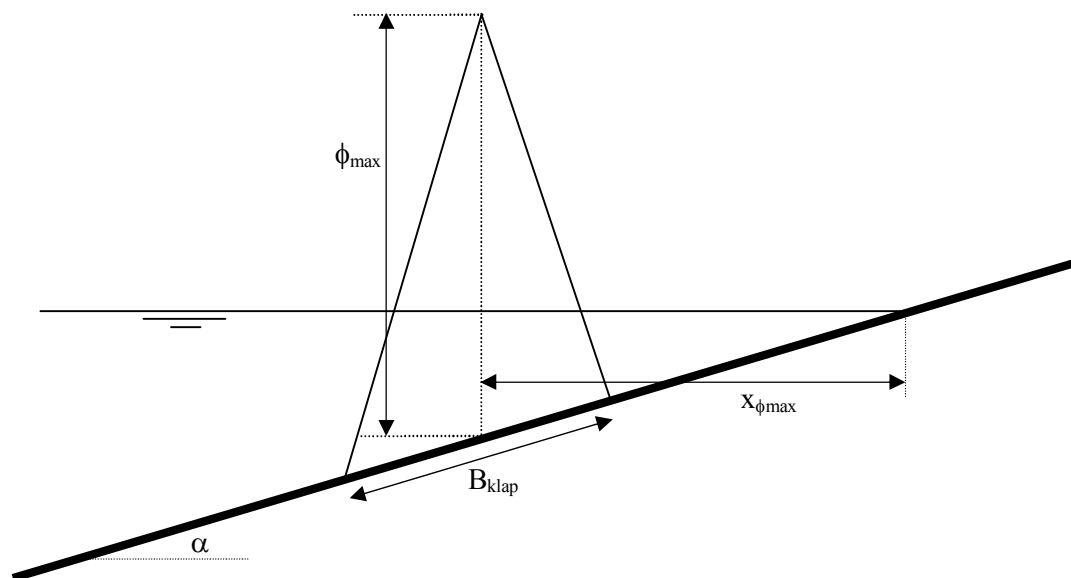
- locatie van de golfklappen:

$$\text{gemiddeld: } \frac{x_{\phi_{\max}} \tan \alpha}{H_s} = 0,45 \quad (4.4)$$

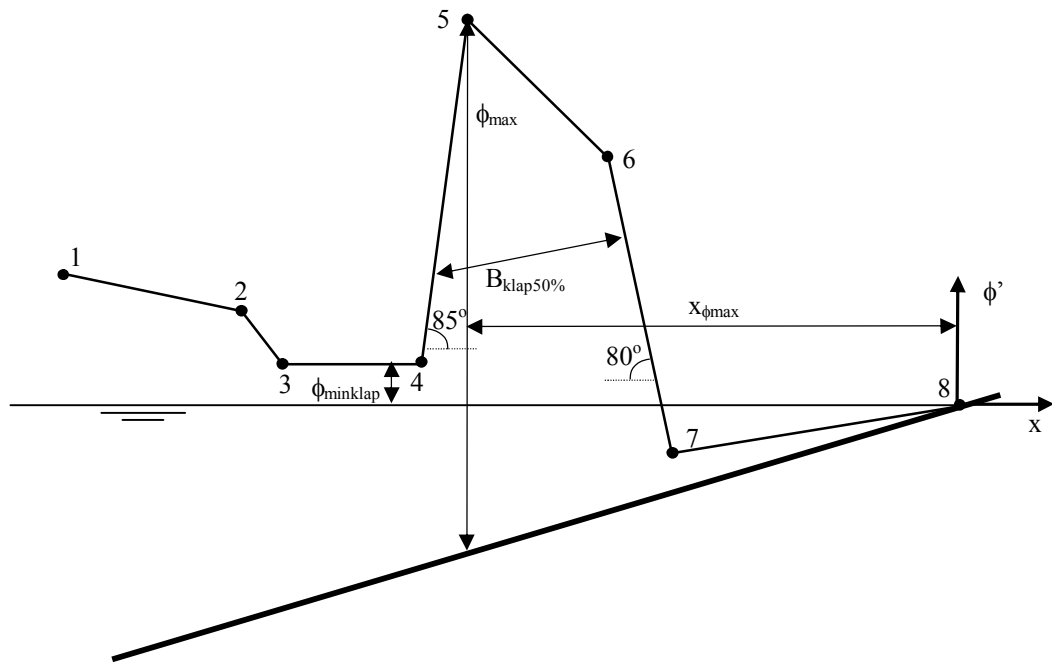
$$\text{range: } 0,0 < x_{\phi_{\max}} \cdot \tan \alpha / H_s < 0,9$$

Vorm van het stijghoogteverloop

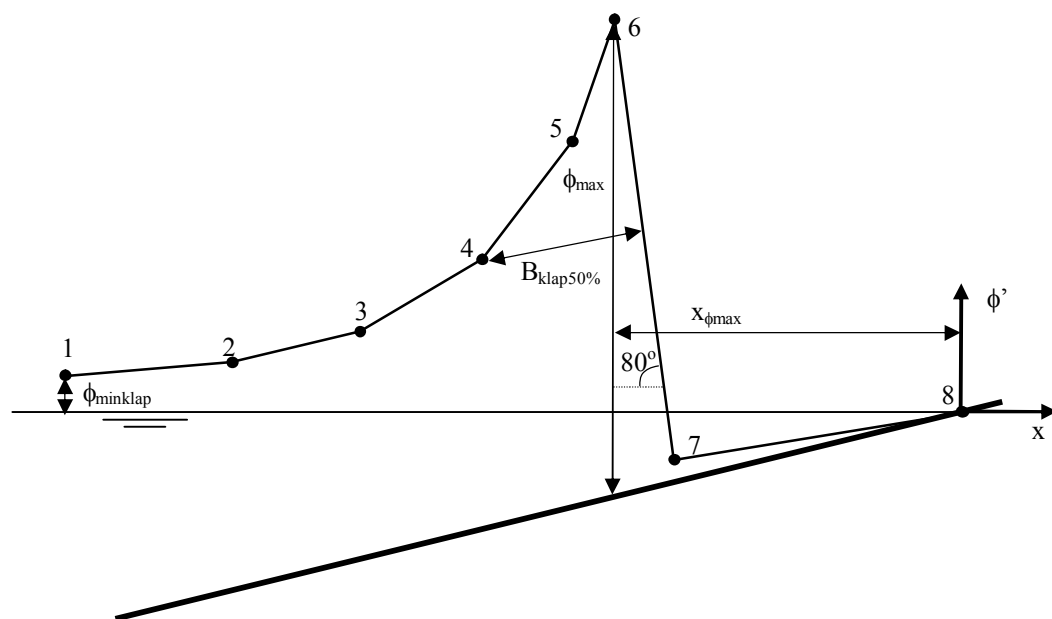
Het stijghoogteverloop is volgens GOLFKLAP driehoekig (zie figuur 5), terwijl de karakteristieke vorm volgens de analyse van Klein Breteler e.a. (2006b) is als weergegeven in figuur 6 en 7.



Figuur 5. Schematische weergave van een golfklap op het talud volgens GOLFKLAP



Figuur 6. Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens de golfklap van type 1



Figuur 7. Geschematiseerd stijghoogteverloop op de toplaag tijdens de golfklap van type 2

Uit deze figuren blijkt dat het stijghoogteverloop volgens GOLFKLAP heel anders is dan volgens de metingen uit Klein Breteler e.a. (2006a).

Maximale stijghoogte in de golfklap

Formule 4.1 uit GOLFKLAP is alleen te vergelijken met formule 3.5 uit de huidige analyse als specifieke waarden van de taludhelling, golfhoogte en golfsteilheid gekozen worden. Voor $\tan\alpha = 0,25$, $s_{op} = 0,04$ en $H_s = 1,5$ m wordt het volgende gevonden:

- huidige analyse uit hoofdstuk 3: $\phi_{\max 2\%}/H_s = 4,0$
- GOLFKLAP: $\phi_{\max 2\%}/H_s = 4,7$

Bij grotere golven, steilere taluds en langere golven wordt het verschil zelfs nog groter. Geconcludeerd kan worden dat de maximale stijghoogte in de golfklap volgens het programma GOLFKLAP beduidend hoger is dan volgens de huidige analyse. Voor een deel komt dat doordat de proeven die gebruikt zijn voor de afleiding van formule 4.1 zijn uitgevoerd met een zeer hoge bemonsteringsfrequentie. Dan wordt ook het allerhoogste piekje van de golfklappen nog geregistreerd, terwijl de proeven uit hoofdstuk 3 niet tot doel hadden om dit allerhoogste piekje te meten. Zij waren gericht op het bepalen van de belasting van steenzettingen, die als gevolg van de traagheid niet reageren op zeer kortdurende belastingen.

Verder valt op dat in formule 4.1 de taludhelling is opgenomen, maar in formule 3.5 is dat niet het geval. Bij de afleiding van formule 3.5 is gebruikgemaakt van modelonderzoek met taludhellingen van 1:3, 1:3,5 en 1:4. Bij deze taludhellingen was er vrijwel geen invloed van de taludhelling te merken. De formules in GOLFKLAP zijn gebaseerd op metingen met een talud van 1:4 en 1:6, en daar was wel een invloed van de taludhelling aanwezig.

Daarentegen is in formule 3.5 een term opgenomen voor schaaleffecten en golfsteilheid, terwijl dat juist in formule 4.1 niet is opgenomen. De proeven die ten grondslag lagen aan formule 4.1 zijn destijds uitgevoerd met een kleine range aan golfhoogten, zodat schaaleffecten niet zijn opgevallen. Verder is ook de golfsteilheid niet zo breed gevarieerd als in de proeven die geleid hebben tot formule 3.5.

Bij het beoordelen van het asfalt bij een belasting met golfklappen wordt door GOLFKLAP de Minersom voor alle golfklappen tijdens een storm meegeteld. Daardoor gaat het niet alleen om de karakteristieke belasting, zoals een 2%-overschrijdingswaarde, maar gaat het om de gehele verdeling van belastingen. Om een indruk te krijgen van de breedte van de verdeling van ϕ_{\max} is voor de proeven uit Klein Breteler e.a. (2006a) de verhouding bepaald tussen de ϕ_{\max} met overschrijdingswaarde van 2% en die van 10%. Deze verhouding blijkt ongeveer $\phi_{\max 2\%}/\phi_{\max 10\%} \approx 1,5$ à $1,6$ te zijn. Uit formule 4.1 en 4.2 blijkt dat deze verhouding volgens GOLFKLAP slechts 1,2 is.

Hieruit blijkt dat de verdeling volgens de metingen uit Klein Breteler e.a. (2006a) veel smaller is dan volgens GOLFKLAP.

Breedte van de golfklappen

In GOLFKLAP heeft het verloop van de stijghoogte op het talud tijdens de golfklap een andere vorm dan vastgesteld is in het onderzoek van Klein Breteler e.a. (2006a), en tevens is de breedte van de golfklap anders gedefinieerd. In GOLFKLAP is het verloop van de stijghoogte op de toplaag een symmetrische driehoek en is de breedte van de de golfklap gelijk genomen aan de basis van deze driehoek. Dit is toegelicht in figuur 5.

Volgens Klein Breteler e.a. (2006b) zijn er twee karakteristieke stijghoogteverlopen, zoals weergegeven in figuur 6 en 7. De golfklap van het type 1 (figuur 6) lijkt het meeste op die in GOLFKLAP en daarom is de aandacht vooral op die golfklap geconcentreerd.

De flanken van het stijghoogteverloop volgens Klein Breteler e.a. (2006a) zijn ten opzichte van die van GOLFKLAP veel steiler, zie ook figuur 6. Als de flanken van het stijghoogteverloop worden doorgetrokken naar het taludoppervlak, dan is de breedte van de golfklap type 1 ter plaatse van het talud ca 40 à 50% breder dan halverwege de hoogte van de golfklap ($B_{\text{klap}50\%}$):

$$B_{\text{klap}0\%}/B_{\text{klap}50\%} \approx 1,4 \text{ à } 1,5$$

Met:

$B_{\text{klap}0\%}$ = breedte van de golfklap ter plaatse van het talud met de schematisatie van het stijghoogteverloop volgens Klein Breteler e.a. (2006a) (golfklap type 1) (m)

Voor een goede vergelijking tussen de breedte volgens GOLFKLAP en volgens Klein Breteler e.a. (2006a) moet dit percentage erbij geteld worden. Voor golfklappen van het type 2 is de breedte van de golfklap ter plaatse van het talud niet te bepalen.

De dimensieloze breedte van de golfklappen is volgens formule 3.6 afhankelijk van de brekerparameter, terwijl volgens GOLFKLAP het een constante waarde van gemiddeld 0,60 heeft. Bij een $\xi_{\text{op}} = 2$ is volgens formule 3.6 $B_{\text{klap}50\%,2\%}/H_s = 0,74$, zodat $B_{\text{klap}0\%,2\%}/H_s \approx 1,1$. Gezien het feit dat het hier gaat om een waarde met overschrijdingsfrequentie van 2% moet dit vergeleken worden met de bovengrens van de range van waarden bij formule 4.3: $B_{\text{klap}}/H_s = 1,1$. Hieruit blijkt dat de golfklapbreedte volgens GOLFKLAP bij $\xi_{\text{op}} = 2$ goed overeenkomt met die van Klein Breteler e.a. (2006a).

Uit een analyse van de grootste 50 golfklappen in een groot aantal proeven (Klein Breteler e.a. 2006b) is overigens gebleken dat de dimensieloze golfklapbreedte, $B_{\text{klap}50\%,2\%}/H_s$, varieert van ongeveer 0,2 tot 1,0, zodat $B_{\text{klap}0\%,2\%}/H_s$ varieert van 0,3 tot 1,5. Dit is toch beduidend breder dan de range volgens GOLFKLAP (die van 0,1 tot 1,1 is).

Locatie van de golfklap

De gemiddelde dimensieloze diepte van de golfklappen, $x_{\phi_{\text{max}}}\tan\alpha$, heeft in GOLFKLAP een constante waarde van 0,45, terwijl die volgens formule 3.7 afhankelijk is van de brekerparameter. Alleen bij $\xi_{\text{op}} = 1,67$ geeft formule 4.4 hetzelfde resultaat als formule 3.7.

In figuur 13 is verder te zien dat de range volgens de analyse van hoofdstuk 3 vergelijkbaar is aan die volgens GOLFKLAP als $\xi_{\text{op}} \approx 2$. Als $\xi_{\text{op}} \approx 1,5$ is de range echter wat kleiner, namelijk $0 < x_{\phi_{\text{max}}}\tan\alpha/H_s < 0,7$, en bij $\xi_{\text{op}} \approx 3$ ligt de range wat verschoven en is wat breder, namelijk $0,4 < x_{\phi_{\text{max}}}\tan\alpha/H_s < 1,7$.

5 Relatie tussen gemeten en berekende rekken in Deltagootonderzoek van '92

In 1992 zijn Deltagootmetingen geanalyseerd waarbij zowel gekeken is naar drukverdelingen op het talud tijdens de golfklappen als rekken in verschillende posities aan de onderzijde van de asfaltlaag (De Waal, 1993).

In grote lijnen is het volgende toen gedaan: op de momenten van aanzienlijke golfklappen (24 stuks geselecteerd uit 6 verschillende golfcondities) is de drukverdeling op het talud geschematiseerd tot een driehoekig verdeelde belasting. Met deze schematisatie van de belasting is de rek in de onderste vezel van de bekleding berekend en deze is vergeleken met de gemeten rek voor zover die mocht worden toegeschreven aan de golfklap.

De letterlijke, wat teleurstellende, eindconclusie van het rapport luidt: "Er is nauwelijks sprake van overeenkomst tussen gemeten en berekende rekken in het asfalt. De gemeten rek (recht onder de golfklap) is veelal aanzienlijk kleiner dan de berekende rek ter plaatse. Er zijn veel bronnen van onnauwkeurigheid aan te wijzen."

Een uitgebreide analyse van de beschikbare figuren van de metingen in de uitgebreide appendix leidt tot de conclusie dat er weinig systematiek in te brengen is: de belasting én de respons zijn zeer variabel in ruimte en tijd. Daardoor is een schematisatie tot een statische driehoekige belasting en de beschouwing van een rek op het tijdstip van de maximale belasting onvoldoende om overeenstemming te verkrijgen.

Wel geldt dat in dit onderzoek de maximale gemeten rekken voor alle geanalyseerde golfklappen (het "veelal" uit het citaat lijkt onterecht gebruikt) kleiner zijn dan de berekende rekken, (gemiddeld is de gemeten rek 1/3 van de berekende) waarmee in ieder geval geconcludeerd kan worden dat de huidige methodiek aan de veilige kant zit.

6 Conclusie

Op basis van de onderzoeksresultaten met golfklappen uit het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen (Klein Breteler e.a. 2006a) is in dit verslag een samenvatting gegeven van de belangrijkste eigenschappen van golfklappen ten behoeve van de gedetailleerde analyse van asfaltbekledingen. Dit heeft geleid tot de volgende resultaten:

- maximale stijghoogte in de golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie:

$$\left(\frac{\phi_{max2\%}}{\gamma_{berm,\phi_{max}} H_s} \right) \left(\frac{\rho g H_s^2}{\sigma_w} \right)^{0,1} = 16 - \frac{0,36}{\sqrt{s_{op}}} \quad \text{voor } s_{op} > 0,002 \quad (6.1)$$

- breedte van de golfklappen:

$$\frac{B_{klap50\%2\%}}{H_s} = 0,96 - 0,11 \xi_{op} \quad \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 5,5 \quad (6.2)$$

- locatie van de golfklappen:

$$\frac{x_{\phi_{\max}} \tan \alpha}{H_s} = \min \{ 0,45\xi_{op} - 0,3; 1,7 \} \quad \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 6 \quad (6.3)$$

De vorm van het stijghoogteverloop tijdens de golfklap is volgens de analyse van Klein Breteler e.a. (2006b) heel anders dan het driehoekige verloop volgens GOLFKLAP, zoals blijkt uit figuur 5 tot en met 7.

Bij de vergelijking met de formules die opgenomen zijn in het rekenmodel GOLFKLAP blijkt dat formule 6.1 doorgaans kleinere waarden geeft. Verder is ook de verdeling van ϕ_{\max} geanalyseerd, waaruit blijkt dat de verdeling volgens GOLFKLAP veel breder is dan die volgens de metingen uit Klein Breteler e.a. (2006a).

Bij een vergelijking van de golfklapbreedte met die uit GOLFKLAP moeten rekening gehouden worden met het verschil in definitie van de golfklapbreedte, zie figuur 5 en figuur 6. Hierdoor moeten de waarden uit formule 6.2 nog vermenigvuldigd worden met 1,4 à 1,5 om ze goed te kunnen vergelijken met de breedte volgens GOLFKLAP. Als hiermee rekening gehouden wordt, dan geeft formule 6.2 dezelfde resultaten als GOLFKLAP bij $\xi_{op} \approx 2$. De range van golfklapbreedtes volgens GOLFKLAP is $0,1 < B_{\text{klap}}/H_s < 1,1$, terwijl die volgens de metingen uit Klein Breteler e.a. (2006a) bij $\xi_{op} \approx 2$ $0,3 < B_{\text{klap}0\%}/H_s < 1,5$ is. In de range is er dus wel een duidelijk verschil.

Formule 6.3 geeft alleen dezelfde waarde als in GOLFKLAP als $\xi_{op} = 1,67$.

Verder is de analyse van De Waal (1993) samengevat, betreffende de relatie tussen de berekende rekken en de in de Deltagoot gemeten rekken tijdens golfklappen. Het blijkt dat de gemeten rekken kleiner zijn dan de berekende. Het is verontrustend dat er nauwelijks sprake is van overeenkomst tussen gemeten en berekende rekken in het asfalt.

De verschillen tussen GOLFKLAP en de metingen uit Klein Breteler e.a. (2006a) betreffen zoveel verschillende aspecten, terwijl ook de vorm van het stijghoogteverloop zo afwijkend is, dat het niet te zeggen is of GOLFKLAP veilige of onveilige resultaten oplevert.

Aanbevolen wordt om de resultaten van Klein Breteler e.a. (2006a) en Klein Breteler e.a. (2006b) te gebruiken om de modellering van het stijghoogteverloop tijdens de golfklap in GOLFKLAP te verbeteren. Hierbij dienen niet alleen de formules voor de hoogte, breedte en locatie van de golfklappen te worden herzien, maar ook de vorm van het stijghoogteverloop. Om de formules te kunnen verbeteren is het noodzakelijk om van de oorspronkelijke metingen de verdelingsfuncties van de karakteristieke eigenschappen van de golfklappen te analyseren. Daarmee is het mogelijk om een verdelingsfunctie van de golfklaphoogte, breedte en locatie te verkrijgen die nodig is voor het bepalen van de Minersom in GOLFKLAP.

AUTEUR		REVIEW		GOEDKEURING	
M. Klein Breteler		E.M. Coeveld		M.R.A. van Gent	

Referenties

- Derks, H. en M. Klein Breteler (1992)
Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval
Verslag modelonderzoek in Deltagoot
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H1480.
- Gaarkeuken, G (2001)
Startnotitie ontwikkelen computermodel GOLFKLAP
NPC, verslag 008620, 14 december 2001
- Klein Breteler, M. (2000)
Grootschalig model onderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen
Analyse van resultaten van Deltagootproeven
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3272, mei 2000
- Klein Breteler, M. en W. Eysink (2005)
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
Langeduursterkte van steenzettingen
WL | Delft Hydraulics, rapport H4475, november 2005
- Klein Breteler, M., I.M. Van der Werf en I. Wenneker (2006a)
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
Kwantificering golfbelasting een invloed lange golven
WL | Delft Hydraulics, conceptverslag H4421, juni 2006
- Klein Breteler, M. en I. Van der Werf (2006b)
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
Kennisonwikkeling ten behoeve van Steentoets2006
WL | Delft Hydraulics, verslag H4846, november 2006
- Kuiper, C., en B. Van Vossen (2003)
Golfdrukken op talud ten gevolge van lange golven
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4329, december 2003
- Meer, J.W. Van der, en H. de Waal (1993)
Waterbeweging op taluds, invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H1256, april 1993
- Looff, A.K. de, I.H.B. van Vilsteren en P Eigeman (2004)
Gebruikershandleiding GOLFKLAP 1.2
KOAC-NPC, verslag e038390, 7 december 2004

Waal J.P. de (1993)

Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval, relatie tussen belasting en rek,
WL | Delft Hydraulics, verslag H1702, febr. 1993

Wouters, J. (1991)

Taludbekledingen van gezette steen
Eindverificatie onderzoek Deltagoot

WL | Delft Hydraulics, rapport nr. M1795/H195 deel XXII.

Symbolen

$B_{\text{klap}50\%2\%}$ = breedte van de golfklap halverwege de golfklaphoogte met 2% overschrijdingsfrequentie (m)

$B_{\text{klap}0\%}$ = breedte van de golfklap ter plaatse van het talud met de schematisatie van het stijghoogteverloop volgens Klein Breteler e.a. (2006a) (golfklap type 1) (m)

B_{klap} = breedte van de golfklap ter plaatse van het talud met de schematisatie van GOLFKLAP (m)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

h_b = diepte van de berm ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water = positief)(m)

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

L_{op} = $1,56T_p^2$ = diepwater golflengte op basis van T_p (-)

N_{klap} = aantal gedetecteerde golfklappen (-)

N = aantal golven (-)

p_{max} = maximale druk op het talud tijdens de golfklap (Pa)

s_{op} = $H_s/(1,56T_p^2)$ = golfsteilheid op basis van diepwater golflengte (-)

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

$x_{\phi_{\text{max}}}$ = horizontale afstand van de snijlijn van de stilwaterlijn en het talud tot de locatie met grootste stijghoogte in de golfklap (m)

α = taludhelling ($^\circ$)

$\gamma_{\text{berm}, p_{\text{max}}}$ = factor die de invloed van de berm op p_{max} tijdens de golfklap weergeeft (-)

ρ = soortelijke massa van water (kg/m^3)

ϕ_{max} = maximale drukhoogte op het talud tijdens de golfklap (m)

$\phi_{\text{max}, \text{max}}$ = grootste waarde van ϕ_{max} uit de betreffende proef (m)

$\phi_{\text{max}, 2\%}$ = waarde van ϕ_{max} met overschrijdingsfrequentie van 2% in de betreffende proef, gerelateerd aan het aantal golven (m)

$\phi_{\text{max}, 10\%}$ = waarde van ϕ_{max} met overschrijdingsfrequentie van 10% in de betreffende proef, gerelateerd aan het aantal golven (m)

ξ_{op} = $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter (-)

σ_w = oppervlaktespanning van het water = 0,073 N/m

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$cot\alpha$ (-)	Spectrum
T301	0.216	2.82	2.579	0.017	2.52	3	P-M
T302	0.220	3.08	2.832	0.015	2.74	3	P-M
T303	0.221	3.42	3.029	0.012	3.03	3	P-M
T304	0.220	3.54	3.202	0.011	3.15	3	P-M
T305	0.197	3.57	3.240	0.010	3.35	3	P-M
T306	0.171	3.57	3.224	0.009	3.60	3	P-M
T307	0.173	3.81	3.395	0.008	3.81	3	P-M
T308	0.173	4.00	3.569	0.007	4.00	3	P-M
T309	0.147	4.00	3.500	0.006	4.34	3	P-M
T310	0.148	4.05	3.615	0.006	4.39	3	P-M
T311	0.120	4.00	3.525	0.005	4.81	3	P-M
T312	0.121	4.30	3.767	0.004	5.15	3	P-M
T313	0.095	4.08	3.741	0.004	5.51	3	P-M
T314	0.096	4.60	3.921	0.003	6.19	3	P-M
T315	0.098	5.29	4.139	0.002	7.04	3	P-M

Tabel 2 Scheldegoot: gerealiseerde condities in proeven uit het onderzoek van Kuiper en Van Vossen (2003)

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$cot\alpha$ (-)	Spectrum
T401	0.197	3.43	3.105	0.011	2.42	4	P-M
T402	0.197	3.78	3.373	0.009	2.66	4	P-M
T403	0.172	3.81	3.395	0.008	2.87	4	P-M
T404	0.146	3.81	3.374	0.006	3.11	4	P-M
T405	0.146	4.04	3.587	0.006	3.30	4	P-M
T406	0.120	4.04	3.549	0.005	3.64	4	P-M
T407	0.120	4.10	3.720	0.005	3.70	4	P-M
T408	0.122	4.52	3.908	0.004	4.04	4	P-M
T409	0.094	4.10	3.773	0.004	4.17	4	P-M
T410	0.095	4.51	3.932	0.003	4.57	4	P-M
T411	0.095	4.53	4.096	0.003	4.59	4	P-M
T412	0.097	5.78	4.338	0.002	5.80	4	P-M
T413	0.081	5.57	4.415	0.002	6.12	4	P-M
T414	0.076	5.79	4.533	0.001	6.56	4	P-M
T415	0.074	6.34	4.750	0.001	7.28	4	P-M

Tabel 3 Scheldegoot: gerealiseerde condities in proeven uit het onderzoek van Kuiper en Van Vossen (2003)

Proef	H_s (m)	$*T_p$ (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$cot\alpha$ (-)	Spectrum
T501	0.142	3.03	1.856	0.010	2.51	4	dubb. topp
T502	0.147	4.19	2.333	0.005	3.42	4	dubb. topp
T503	0.157	3.05	2.790	0.011	2.40	4	dubb. topp

Tabel 4 Scheldegoot: gerealiseerde condities in proeven met dubbeltoppige golfspectra uit het onderzoek van Kuiper en Van Vossen (2003) *Dit is de piek-golfperiode zoals die met de standaard verwerkingsmethode van de golfgegevens vastgesteld is. In de analyse is uitgegaan van $T_p = 1,1T_{m-1,0}$.

Proef	H_s (m)	T_p (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$cot\alpha$ (-)	Spectrum	bijzonderheid
P3315	0.19	1.66	0.045	1.57	3	Jonswap	voorland, $h_{geen} = 0,6$ m
P3006	0.17	1.69	0.038	1.70	3	Jonswap	$h = 0,6$ m, SG
P3003	0.17	1.95	0.029	1.95	3	Jonswap	$h = 0,6$ m, SG
P4315	0.19	1.60	0.049	1.13	4	Jonswap	voorland, $h_{geen} = 0,6$ m
P4003	0.16	1.95	0.028	1.50	4	Jonswap	$h = 0,6$ m, SG
P4002	0.14	2.21	0.019	1.82	4	Jonswap	$h = 0,6$ m, SG
P4001	0.10	2.48	0.010	2.44	4	Jonswap	$h = 0,6$ m, SG

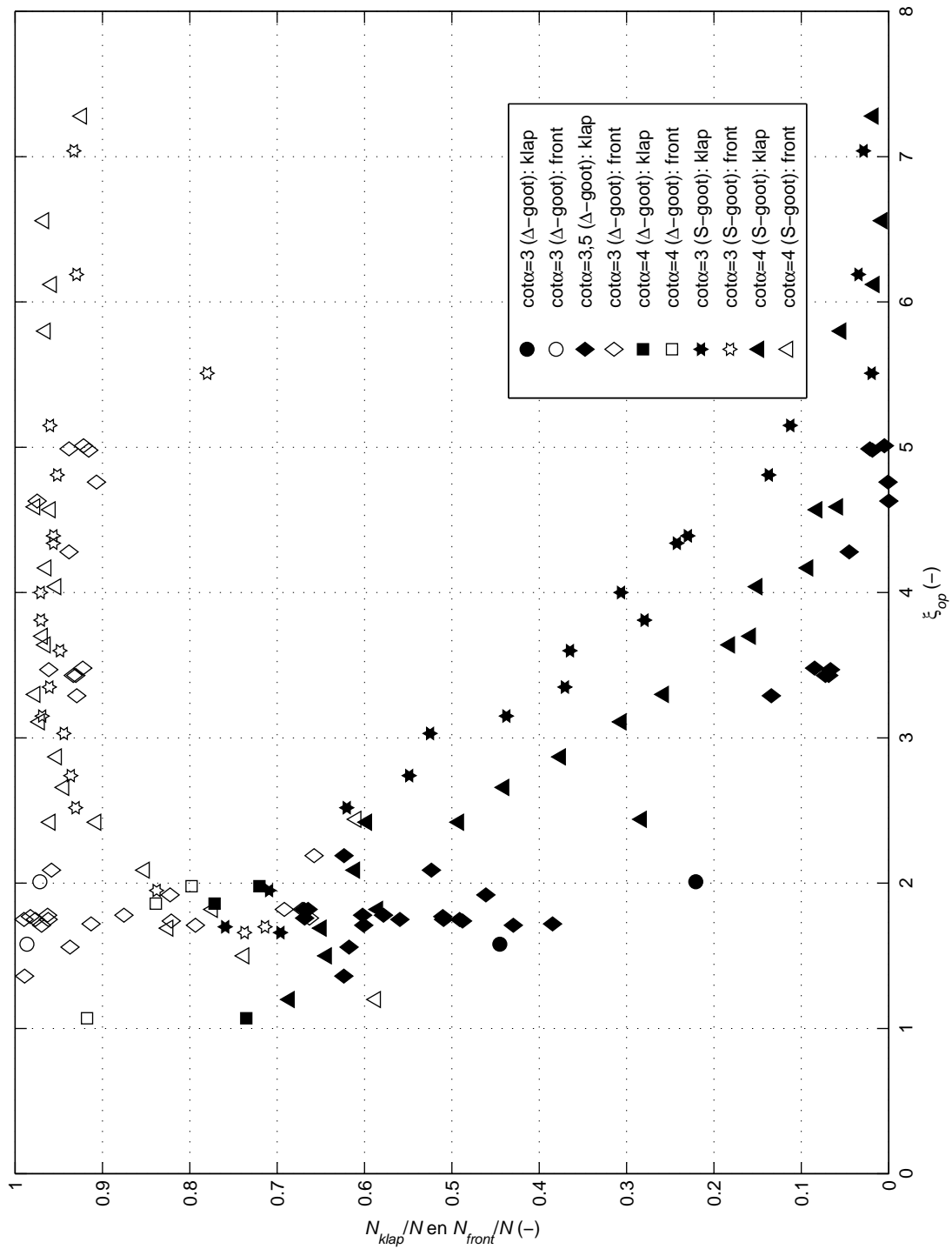
Tabel 5 Scheldegoot: gerealiseerde condities in proeven uit het onderzoek van Van der Meer en De Waal (1993) zonder berm (SG = Standaard golvenbestand van Zsteen)

Proef	h (m)	H _s (m)	T _p (s)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	cotα (-)	Spectrum
5o05	4,02	1,640	5,60	0,033	1,56	3,5	J
5o06	4,00	1,640	6,90	0,022	1,92	3,5	J
12ao7	4,63	0,840	4,40	0,028	1,71	3,5	J
12ao9	4,91	1,270	5,50	0,027	1,74	3,5	J
21o02	4,55	0,728	3,26	0,044	1,36	3,5	J
21o03	4,80	0,761	4,29	0,026	1,75	3,5	J
21o06	4,70	0,737	4,28	0,026	1,78	3,5	P-M
21o08	4,80	0,754	5,08	0,019	2,09	3,5	J
21o11	4,85	0,939	4,83	0,026	1,78	3,5	J
21o14	4,98	1,563	6,36	0,025	1,82	3,5	J
21o15	5,01	1,699	6,43	0,026	1,76	3,5	J
21o16	5,00	1,550	7,64	0,017	2,19	3,5	J
23o01	4,55	0,430	3,16	0,028	1,72	3,5	J
23o02	4,55	0,524	3,55	0,027	1,75	3,5	J
23o04	4,55	0,530	3,56	0,027	1,75	3,5	J
23o08	4,95	0,940	4,82	0,026	1,77	3,5	J
23o10	4,97	1,334	5,53	0,028	1,71	3,5	J
23o11	4,94	1,543	6,35	0,025	1,83	3,5	J
AS202	5,01	1,430	7,14	0,018	1,87	4	P-M
AS401	5,10	1,510	8,65	0,013	2,20	4	P-M
AS601	4,65	0,760	2,98	0,055	1,07	4	P-M
sz626	4,96	0,724	4,10	0,028	2,01	3	J
sz627	4,94	1,056	3,90	0,044	1,58	3	J

Tabel 6 Deltagootproeven: gerealiseerde condities in proeven uitgevoerd in 1997/1998 (5o05 t/m 23o11), in 1992 (AS202 t/m AS601) en in 1991 (sz626 en sz627)

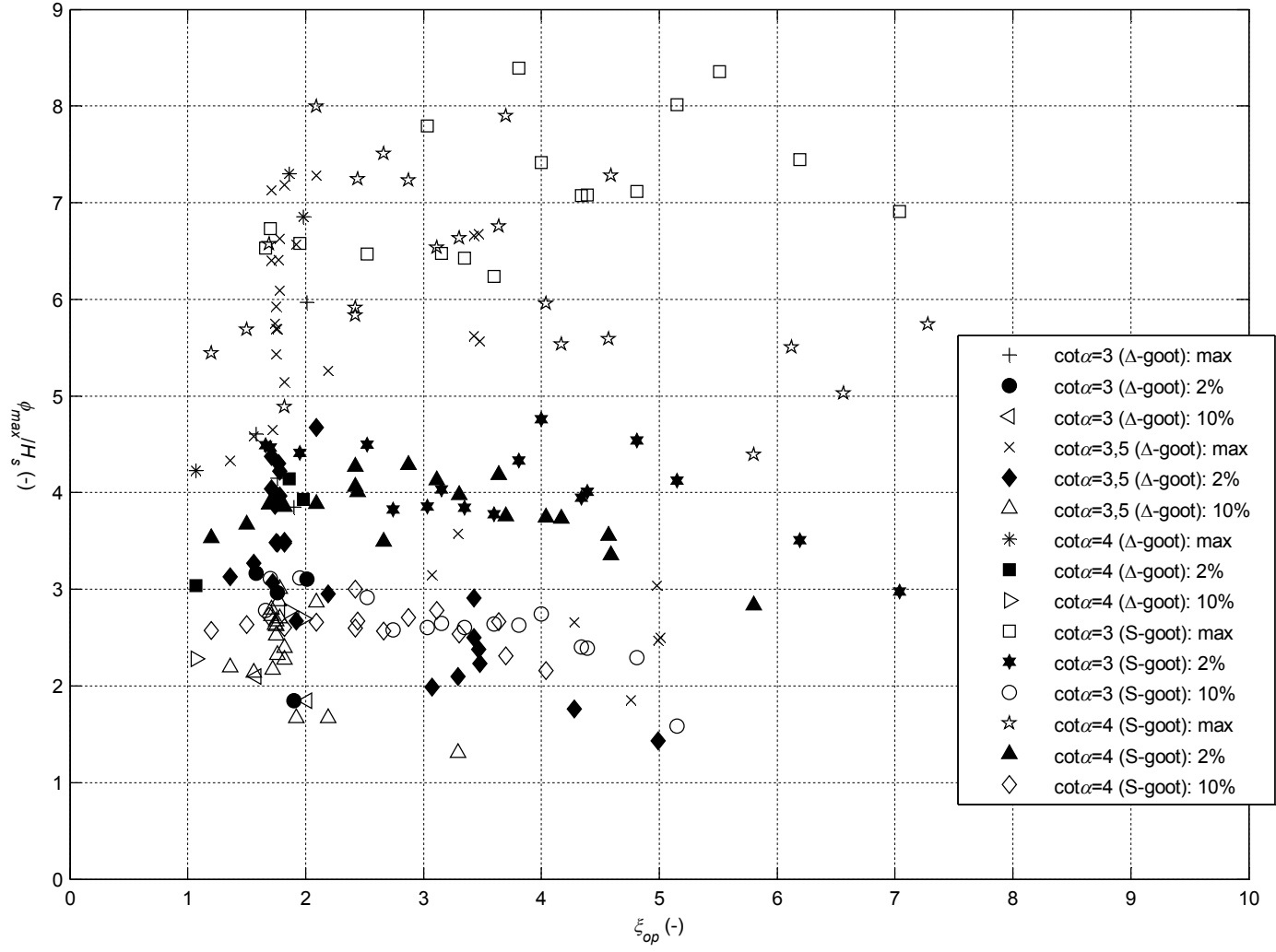
Proef	h (m)	H _s (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	cotα	Spectrum *
P10	4,20	0,27	4,47	4,14	0,009	3,07	3,5	P-M
P11	4,20	0,48	8,99	7,90	0,004	4,63	3,5	P-M
P12	4,51	0,56	9,95	8,87	0,004	4,75	3,5	P-M
P13	4,80	0,65	11,31	9,34	0,003	5,01	3,5	P-M
P14	5,02	0,76	12,16	9,97	0,003	4,98	3,5	P-M
P15	5,17	0,84	12,82	10,44	0,003	4,99	3,5	P-M
P16	5,18	0,96	11,74	9,50	0,004	4,28	3,5	P-M
P22	4,40	0,51	6,86	6,17	0,007	3,43	3,5	P-M
P23	4,41	0,63	7,64	6,89	0,007	3,44	3,5	P-M
P24	4,75	0,74	8,37	7,38	0,007	3,47	3,5	P-M
P25	4,80	0,89	9,21	7,90	0,007	3,49	3,5	P-M
P26	4,90	1,05	9,46	8,19	0,008	3,30	3,5	P-M

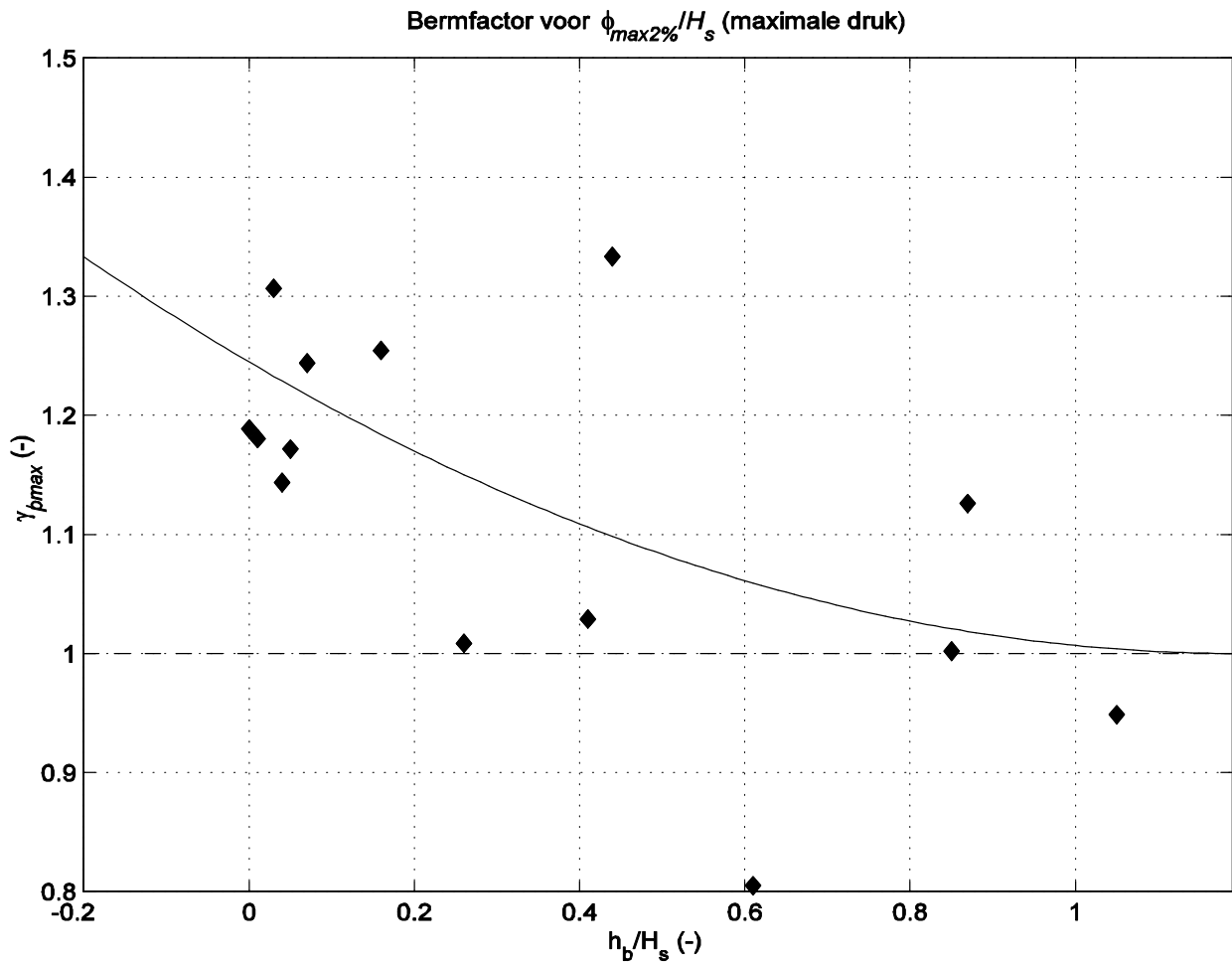
Tabel 7 Deltagootproeven: gerealiseerde condities in proeven uitgevoerd in 2004



Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven

Maximale druk to.v. het talud (ϕ_{max})





Bermfactor als functie
van relatieve bermhoogte

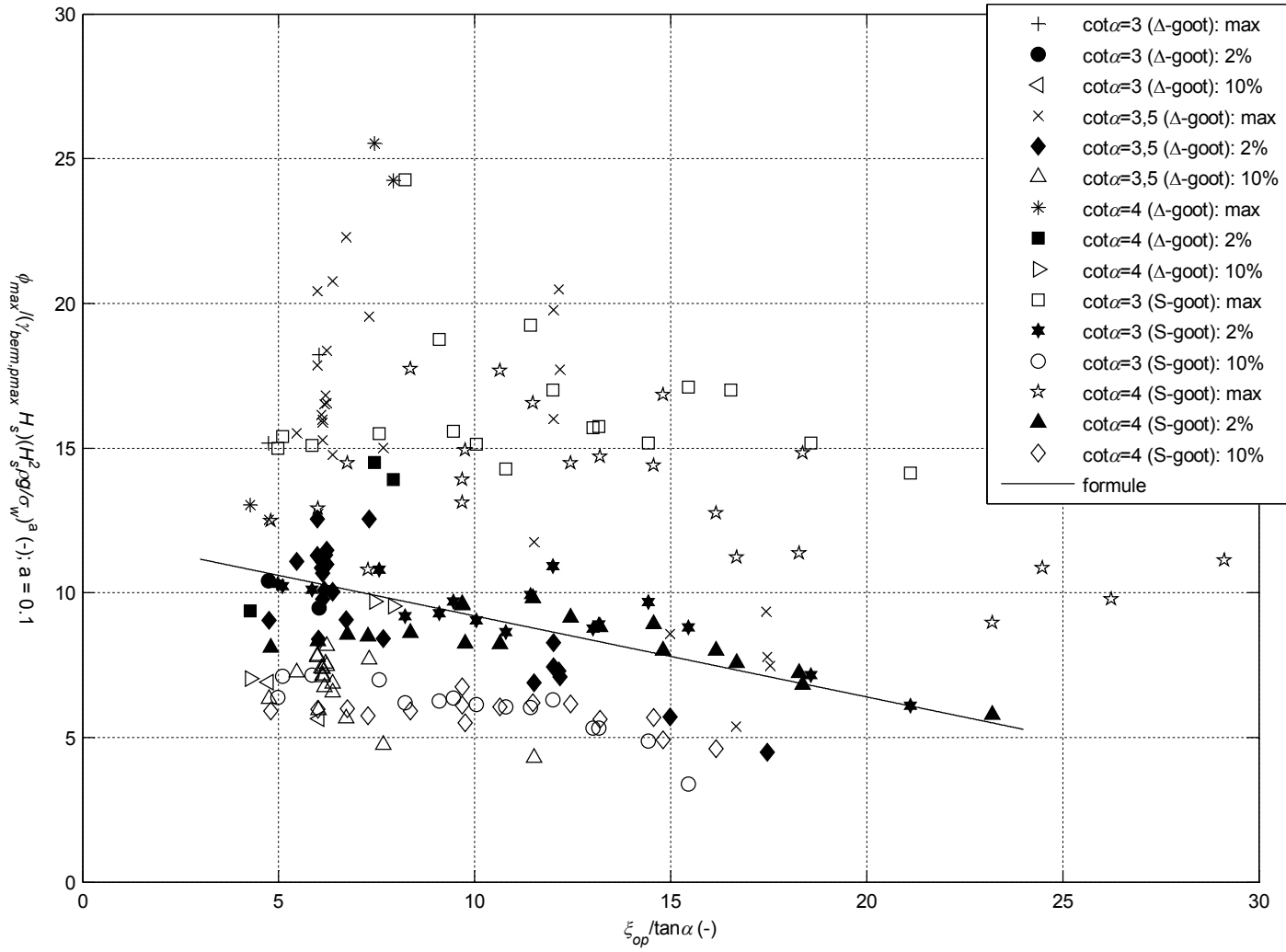
Maximale druk to v. het talud (ϕ_{max}) tegen golfsteilheid

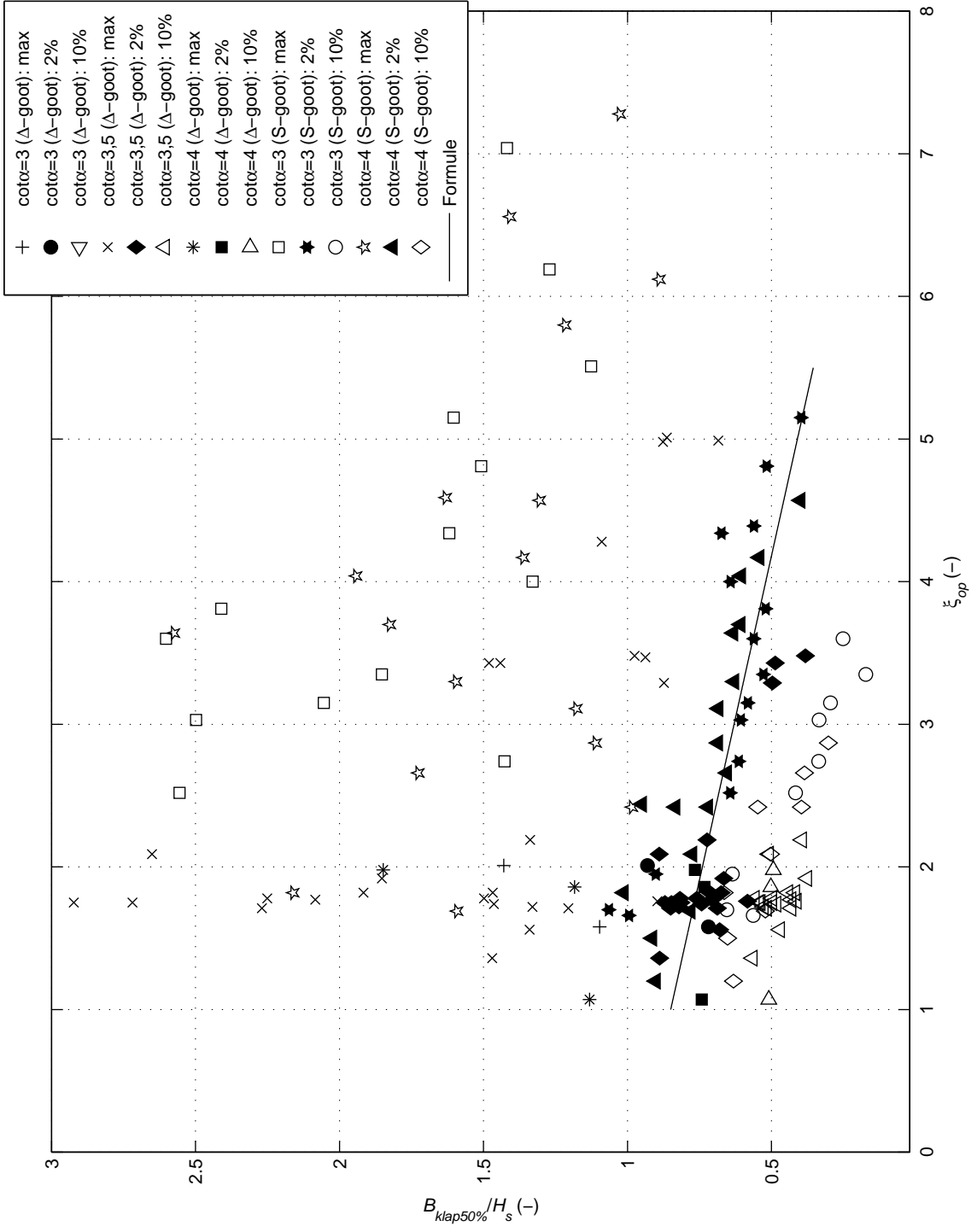
Weber-schaling

WL | DELFT HYDRAULICS

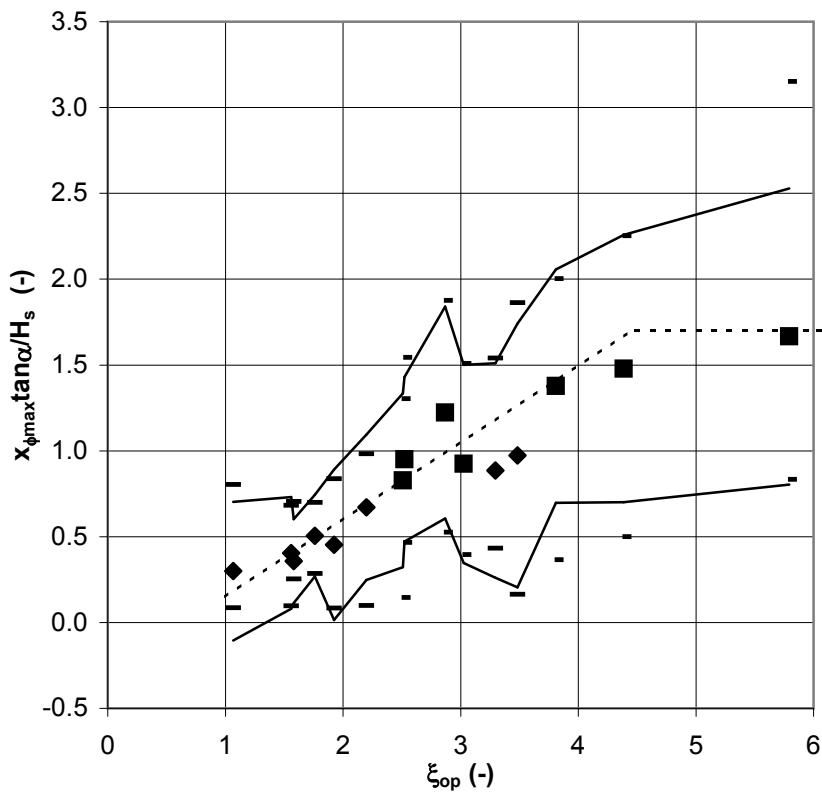
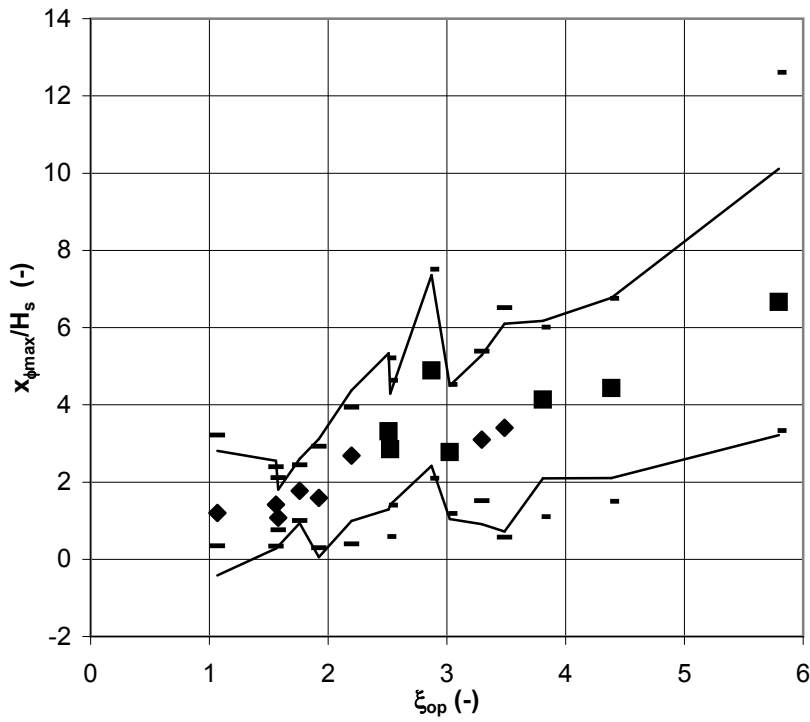
H4421

Fig. 11



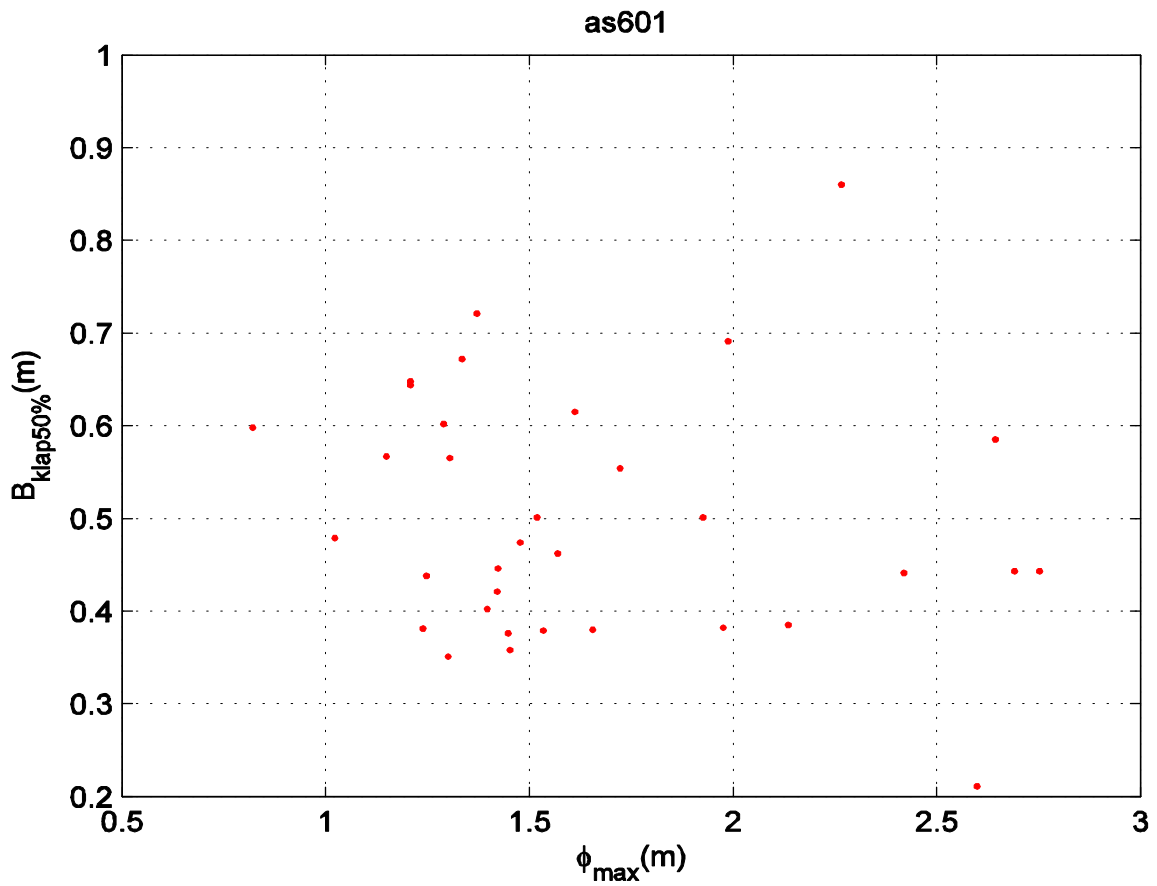
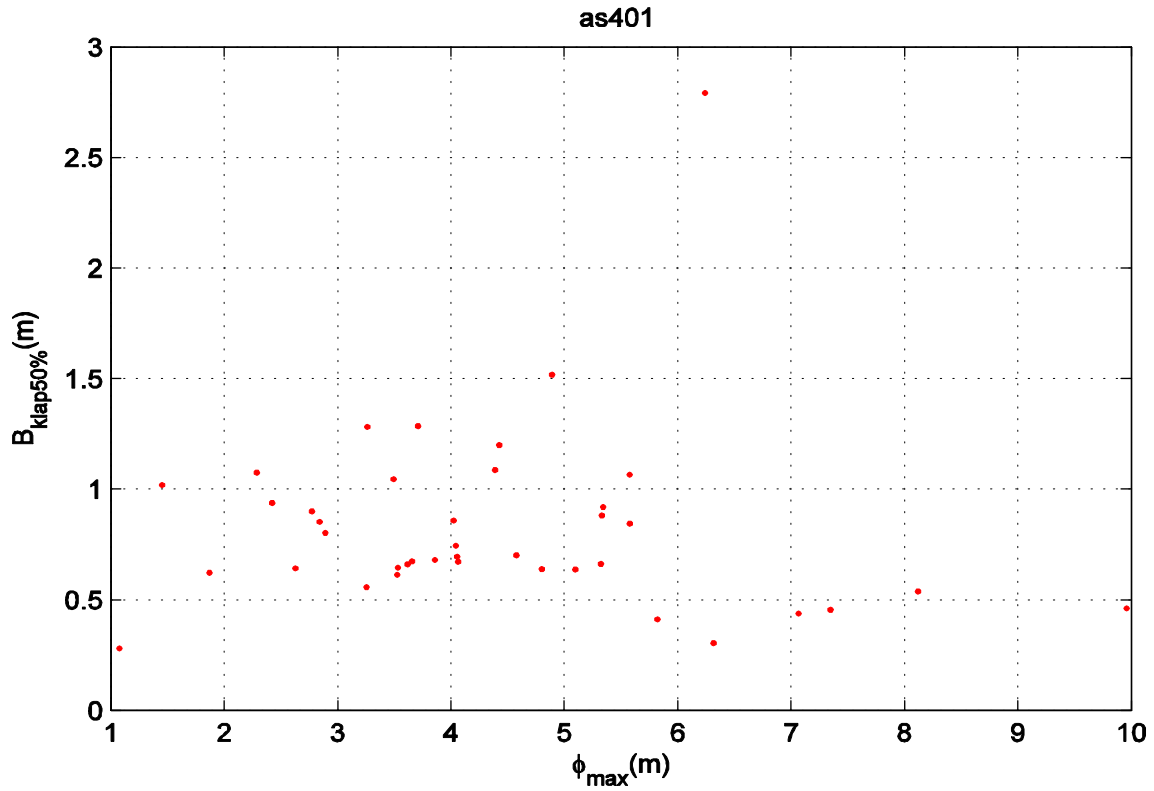


Golfklapbreedte ($B_{klap50\%}$)		
	Grootste 33 % van ϕ_k	
WL DELFT HYDRAULICS	H4421	Fig. 12

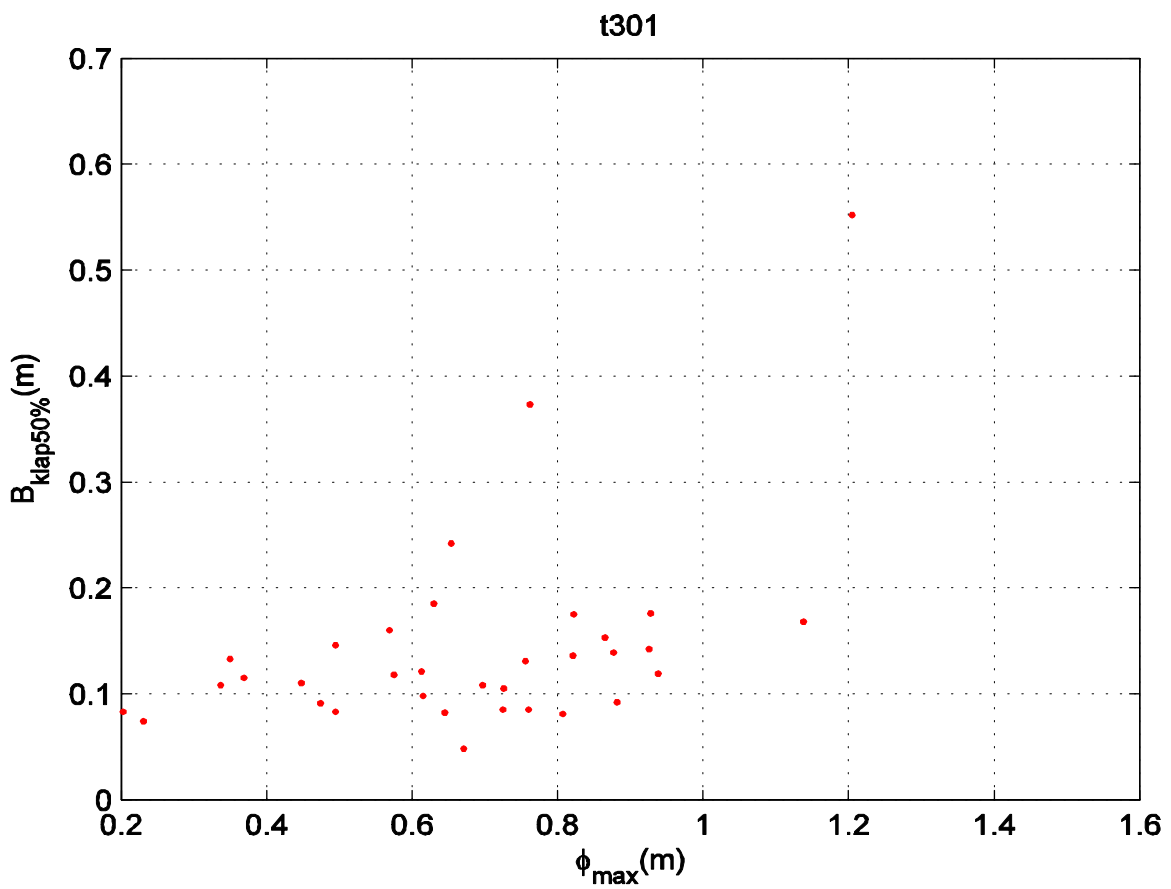
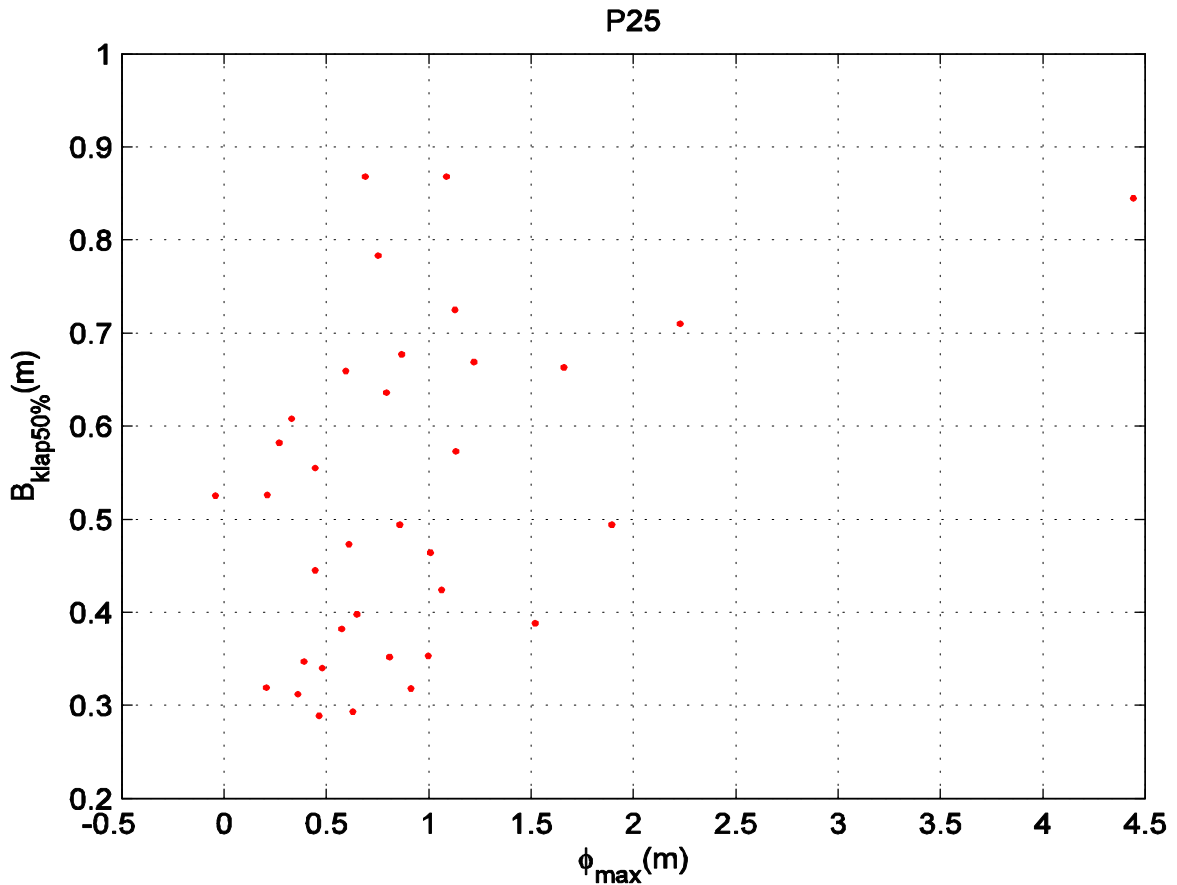


proeven uit tabel 1

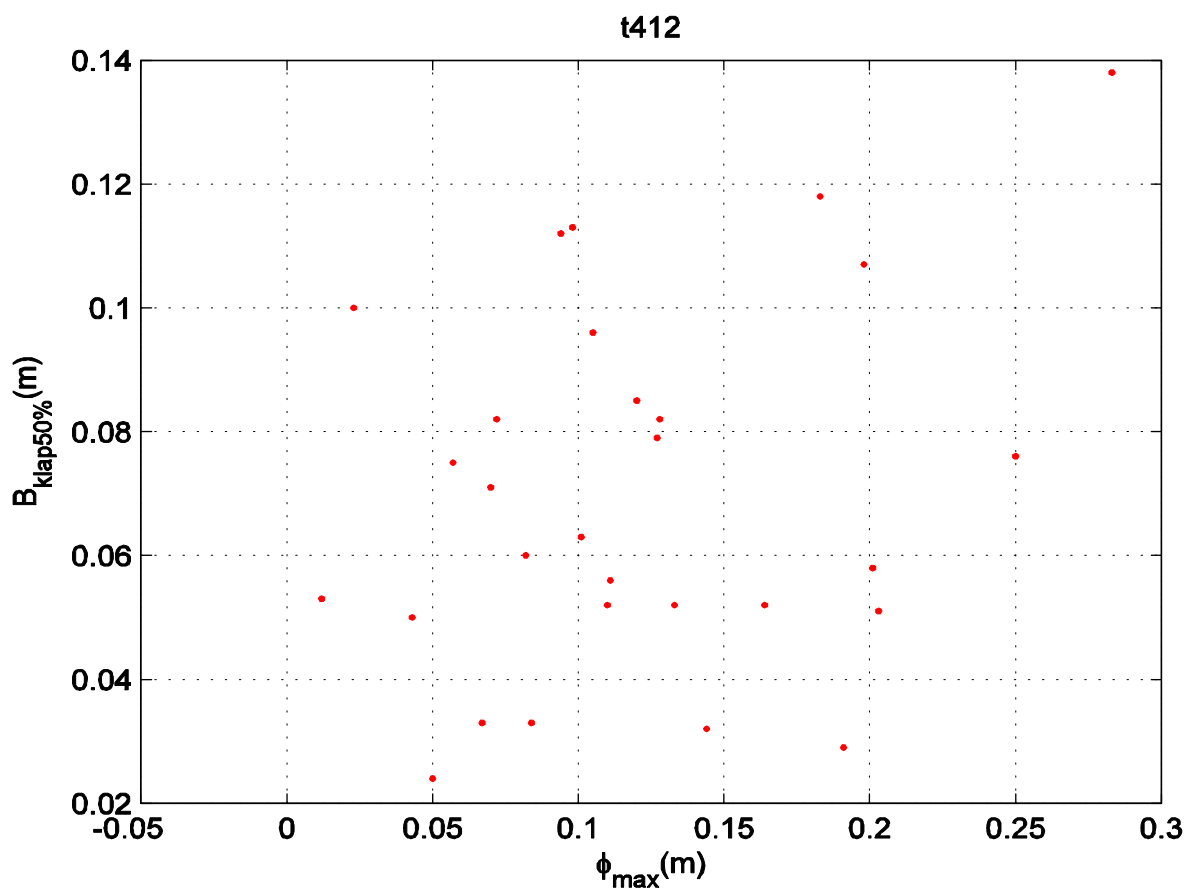
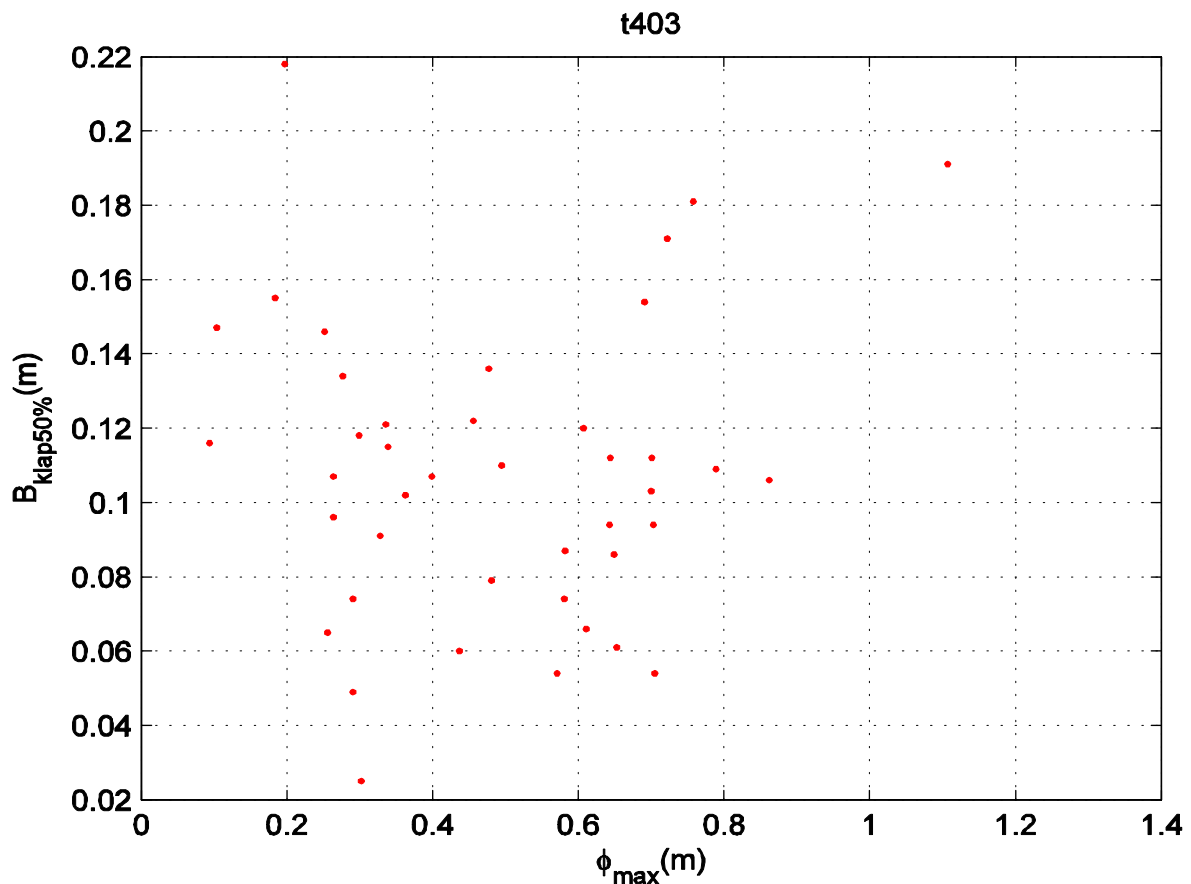
Statistische analyse van
locatie van de golfklap



Maximale stijghoogte in golfklap tegen
breedte van de golfklap



Maximale stijghoogte in golfklap tegen
breedte van de golfklap



Maximale stijghoogte in golfklap tegen
breedte van de golfklap