

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,
Directie Zeeland (PBZ)



Kwantificering golfbelasting op steenbekledingen

Onderzoeksprogramma
Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

november 2004

H4419

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Zeeland (PBZ)

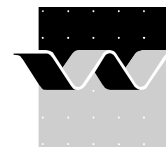
Kwantificering golfbelasting op steenbekledingen

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

E.M. Coeveld en M. Klein Breteler

Rapport

november 2004



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, Directie Zeeland (PBZ)				
TITEL:	Kwantificering golfbelasting op steenbekledingen Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen				
SAMENVATTING:	<p>In het kader van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, in 2003 opgestart door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde, heeft voorliggende bureaustudie betrekking op het deelonderzoek Gezette steenbekledingen, deelplan 7.4.2 Invloed van golfklappen op stabiliteit, Kwantificering van de golfklap op het talud.</p> <p>Het doel van het onderzoek is het kwantificeren van de golfbelasting op steenbekledingen. Daartoe is getracht relaties te leggen tussen de relevante eigenschappen van golfklappen en golffronten, en de golfparameters aan de teen van de dijk (golfhoogte en golfperiode) en de taludhelling. Daarnaast is beoogd meer inzicht te krijgen in de belasting in de vorm van golfklappen en fronten.</p> <p>Er is bepaald welke eigenschappen van de golfbelasting het meest relevant zijn voor de stabiliteit van steenbekledingen. Deze belastingseigenschappen zijn geanalyseerd met behulp van de golfbelasting-analyse-software, waarvan de ontwikkeling gestart is in een eerdere fase van bovengenoemd onderzoeksprogramma, en met Zsteen. De golfbelasting-analyse-software is verder uitgebreid en verbeterd.</p> <p>De analyse van de resultaten van de software heeft geresulteerd in verschillende relaties tussen relevante eigenschappen van de golfbelasting en de brekerparameter. Bovendien kon een aanbeveling gedaan worden ten aanzien van de instrumentatie van (toekomstig) fysisch modelonderzoek, waarin de invloed van de golfbelasting op steenbekledingen onderzocht wordt.</p>				
REFERENTIES:	Contract nummer: ZLA-5797 Opdrachtgever PBZ: Y. Provoost Projectbegeleider DWW: R. 't Hart				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	E.M. Coeveld & M. Klein Breteler	15-11-2004	definitief	M.R.A. van Gent	W.M.K. Tilmans
PROJECTNUMMER:	H4419				
TREFWOORDEN:	dijkbekleding, steenzetting, ANAMOS, Zsteen, golfklap, golffront				
AANTAL BLADZIJDEN:	38 (tekst)				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Lijst van Symbolen

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Onderzoeksopzet	2
1.4	Leeswijzer	2
2	Selectie van maatgevende eigenschappen van golfbelasting op steenbekledingen	3
2.1	Golffronten	3
2.2	Golfklappen	4
2.2.1	Eigenschappen van de geschematiseerde golfklappen	5
2.2.2	Analyse van de invloed van de eigenschappen	10
2.3	Stijghoogteverschil volgens Zsteen in relatie tot gediptheid	18
2.4	Conclusies ten aanzien van eigenschappen van golfbelasting	19
3	Analyse van golfklappen en golffronten	21
3.1	Geanalyseerde proeven	21
3.2	Eigenschappen van golfklappen en golffronten	22
3.2.1	Gediptheid	23
3.2.2	Geïntegreerde gediptheid	26
3.2.3	Dipkracht	27
3.2.4	Dipimpuls	28

3.2.5	Golfklaphoogte.....	28
3.2.6	Golfklapbreedte.....	31
3.2.7	Belastingsduur.....	31
3.2.8	Trogbreedte	32
3.2.9	Gradiënt van de golfklap.....	33
3.2.10	Hoogte van het stijghoogtefront.....	34
3.2.11	Helling van het stijghoogtefront.....	35
3.3	Samenvatting van resultaten uit analyse van golfklappen en golffronten ...	36
4	Eisen aan instrumentatiedichtheid en bemonsteringsfrequentie	39
4.1	Instrumentatie-eisen op basis van gekwantificeerde belasting.....	39
4.1.1	Instrumentatiedichtheid.....	39
4.1.2	Bemonsteringsfrequentie.....	40
4.2	Instrumentatie-eisen op basis van uitgedunde metingen.....	40
4.2.1	Instrumentatiedichtheid.....	40
4.2.2	Bemonsteringsfrequentie.....	41
5	Conclusies.....	43
5.1	Belastingeigenschappen.....	43
5.2	Analyse van golfklappen en golffronten	44
5.3	Instrumentatie-eisen	46

Literatuur

Bijlagen

- A Beschrijving van golfbelasting-analyse-software**
- B Tabellen**
- C Figuren**
- D Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**

Lijst van Figuren

Figuren die in de tekst terug te vinden zijn:

Figuur 2.1	Golffront vlak vóór de golfklap	4
Figuur 2.2	Geschematiseerde golfklap	5
Figuur 2.4	Trog-oppervlak-verhouding O_{trog} (de verhouding tussen het verticaal gearceerde oppervlak en het totale oppervlak binnen de stippellijnen)	6
Figuur 2.3	Definitie van gediptheid.....	6
Figuur 2.5	Variatie van steilheid van stijghoogtefront	8
Figuur 2.6	Variatie van golfklapbreedte	8
Figuur 2.7	Variatie van golfklaphoogte	9
Figuur 2.8	Variatie van trogbreedte	9
Figuur 2.9	Variatie van klipvorm (5 vormen, middelste is een driehoek zoals in Figuur 2.2, in deze figuur zijn de 2 extremen gegeven)	9
Figuur 2.10	Relatie tussen de gradiënt $\theta_{k20\%-50\%f}$ ($R_{\text{trog}20-50}$) en het stijghoogteverschil met lek lengte $\Lambda_2=0,5$	11
Figuur 2.11	Stijghoogteverschil over de toplaag als functie van de trogoppervlakte verhouding	13
Figuur 2.12	Stijghoogteverschil over de toplaag als functie van de golfklaphoogte.....	13
Figuur 2.13	Stijghoogteverschil over de toplaag als functie van de frontgradiënt.....	14
Figuur 2.14	Stijghoogteverschil als functie van de golfklapgradiënt $\theta_{k20\%-50\%f}$ ($R_{\text{trog}20-50}$) bij $\Lambda = 1,0$ m.....	14
Figuur 2.15	Stijghoogteverschil als functie van de golfklapgradiënt bij $\Lambda = 0,3$ m.....	15
Figuur 2.16	Stijghoogteverschil als functie van de gediptheid.....	15
Figuur 2.17	Definitie van geïntegreerde gediptheid.....	16
Figuur 2.18	Definitie van dipkracht	17
Figuur 3.1	Gediptheid tijdens golfklap als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek.....	23
Figuur 3.2	Gediptheid tijdens golffront als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek.....	25
Figuur 3.3	Stijghoogte van golfklap ten opzichte van trog als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek.....	29
Figuur 3.4	Hoogteverschil waarover de golfklap zich uitstrekt: $B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha$	31
Figuur 3.5	Gradiënten aan zeezijde van de golfklap	34
Figuur 3.6	Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten.....	38

Figuur 5.1	Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten (niet al deze waarden worden gerealiseerd in dezelfde golf)	46
------------	--	----

Figuren die in Bijlage A terug te vinden zijn:

Figuur A.1	Gemiddelde, minimale en maximale stijghoogtes in de drukopnemer
Figuur A.2	Voortschrijdend gemiddelde
Figuur A.3	Begin- en eindtijdstippen van de golven (verticale, groene lijn) in proef 23o11 in het eerste deel van het meetsignaal
Figuur A.4	Willekeurige golfklap in proef 23o11 waarin van links naar rechts $x_{\phi max}$, x_{sklap} , $x_{\phi max}$ en $x_{\phi minL}$ zijn weergegeven met verticale stippellijnen
Figuur A.5	Definitie stijghoogteverschil
Figuur A.6	Stijghoogte op het talud (gestippeld), stijghoogte onder het talud (doorgetrokken) en locatie waar maximaal verschil is geconstateerd (ruit) voor een willekeurige golfklap in proef 23o11
Figuur A.7	Breedte $B_{klap20\%}$ die hoort bij het gebied dat belast wordt door een belasting van 20 % van de maximale belasting
Figuur A.8	Breedtes behorend een willekeurige golfklap in proef 23o11
Figuur A.9	Bepaling van de breedtes van de trog
Figuur A.10	Breedtes van de trog behorend een willekeurige golfklap in proef 23o11
Figuur A.11	Totale duur van de golfklap
Figuur A.12	Totale golfklapduur op basis van 50 en 80 % van de druk met t_1 (meest linkse stippelijijn) en t_2 (meest rechtse stippelijijn)
Figuur A.13	Stijgtijd van de golfklap
Figuur A.14	Stijgtijd op basis van 50 en 80 % van de druk met t_3 (linker ruit op horizontale as) en t_4 (rechter ruit op horizontale as)
Figuur A.15	Gradiënten van de golfklap
Figuur A.16	Locaties van maximale gradiënten in een willekeurige golfklap in proef 23o11 (ruiten op horizontale as)
Figuur A.17	Maximale kracht van de golfklap
Figuur A.18	Laagdikte d behorend bij het gebied dat belast wordt met een belasting van minstens 50 % van de maximale belasting net vóór het tijdstip t_{max} waarop deze maximale belasting optreedt
Figuur A.19	Stijghoogte op het talud waarmee laagdikte d bepaald kan worden voor een willekeurige golf in proef 23o11
Figuur A.20	Mogelijk stijghoogtesignaal tijdens golffront

- Figuur A.21 Stijghoogte (blauw gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurig golffront in proef 23o11 in een golf waarin ook een golfklap is vastgesteld
- Figuur A.22 Stijghoogte (blauw gestippeld) en vloeiend gemaakte stijghoogte (rood gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurige golfklap in proef 23o11
- Figuur A.23 Stijghoogte (blauw gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een golffront in een willekeurige golf in proef 23o11
- Figuur A.24 Stijghoogte (blauw gestippeld) en vloeiend gemaakte stijghoogte (rood gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurige golffront in proef 23o11

Figuren die in Bijlage C terug te vinden zijn:

- Figuur C.1 Stijghoogteverschil (2%) tegen gediptheid (2%); Constructie A
- Figuur C.2 Stijghoogteverschil (2%) tegen gediptheid (2%); Constructie B
- Figuur C.3 Stijghoogteverschil (max) tegen gediptheid (max); Constructie A
- Figuur C.4 Stijghoogteverschil (max) tegen gediptheid (max); Constructie B
- Figuur C.5 Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven
- Figuur C.6 Gediptheid tijdens golfklap tegen golfsteilheid
- Figuur C.7 Gediptheid tijdens golfklap tegen golfklaphoogte
- Figuur C.8 Gediptheid tijdens golfklap tegen $H_s T_p$
- Figuur C.9 Gediptheid tijdens golffront
- Figuur C.10 Gediptheid tijdens golffront tegen golffronthoogte
- Figuur C.11 Geïntegreerde gediptheid ($\phi_{dip} / H_s T_p$) tijdens golfklap
- Figuur C.12 Geïntegreerde gediptheid (ϕ_{dip} / H_s) tijdens golfklap
- Figuur C.13 Geïntegreerde gediptheid tijdens golffront
- Figuur C.14 Dipkracht tijdens golfklap
- Figuur C.15 Belaste breedte ($F_{dip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s)$) tijdens golfklap
- Figuur C.16 Dipkracht tijdens golffront
- Figuur C.17 Dipimpuls tijdens golfklap
- Figuur C.18 Overschrijdingskromme van de dipimpuls
- Figuur C.19 Dipimpuls tijdens golffront
- Figuur C.20 Maximale stijghoogte ten opzichte van trog
- Figuur C.21 Maximale stijghoogte ten opzichte van trog tegen golfsteilheid
- Figuur C.22 Laagdikte voor golfklap tegen golfklaphoogte
- Figuur C.23 Gemiddelde laagdikte

- Figuur C.24 Golfklapbreedte ($B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha$)
- Figuur C.25 Belastingduur tijdens golfklap: $\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$
- Figuur C.26 Belastingduur tijdens golfklap: $[\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)]/ T_p$
- Figuur C.27 Belastingduur tijdens golfklap: $[\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)]/ \sqrt{(H_s/g)}$
- Figuur C.28 Golfklapduur tegen golfsteilheid
- Figuur C.29 Stijgtijd
- Figuur C.30 Trogbreedte
- Figuur C.31 Gradiënt aan zeezijde van golfklap: $\theta_{k20\%-50\%f}$
- Figuur C.32 Gradiënt aan zeezijde van golfklap: $\theta_{k50\%-80\%k}$
- Figuur C.33 Hoogte van het golffront
- Figuur C.34 Hoogte van het golffront tegen golfsteilheid
- Figuur C.35 Helling van het golffront
- Figuur C.36 Helling van het golffront tegen golfsteilheid
- Figuur C.37 Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven;
Instrumentatiedichtheid
- Figuur C.38 Gediptheid tijdens golfklap tegen golffront; Instrumentatiedichtheid
- Figuur C.39 Gediptheid tijdens golffront; Instrumentatiedichtheid
- Figuur C.40 Maximale stijghoogte ten opzichte van trog ; Instrumentatiedichtheid
- Figuur C.41 Golfklapbreedte ($B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha$) voor uitgedunde proeven
- Figuur C.42 Gradiënt aan zeezijde van golfklap: $\theta_{k20\%-50\%f}$, voor uitgedunde proeven
- Figuur C.43 Gradiënt aan zeezijde van golfklap: $\theta_{k50\%-80\%k}$, voor uitgedunde proeven
- Figuur C.44 Locatie van steil golfhoogtefront; Instrumentatiedichtheid
- Figuur C.45 Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven;
Bemonsteringsfrequentie
- Figuur C.46 Gediptheid tijdens golfklap tegen golffront; Bemonsteringsfrequentie
- Figuur C.47 Gediptheid tijdens golffront; Bemonsteringsfrequentie

Lijst van Tabellen

Tabellen die in de tekst terug te vinden zijn:

Tabel 2.1	Eigenschappen van Constructie A en B	18
Tabel 4.1	Uitgewerkte proeven en relatieve onderlinge afstand van de drukopnemers	41

Tabellen die in Bijlage A terug te vinden zijn:

Tabel A.1	De 4 waarden in de log-file voor elke proef
Tabel A.2	Kolomindeling in de golfklappenuitvoer-file waarin de resultaten zijn opgeslagen voor de golfklappen
Tabel A.3	Kolomindeling in de golffrontenuitvoer-file waarin de resultaten zijn opgeslagen voor de golffronten

Tabellen die in Bijlage B terug te vinden zijn:

Tabel B.1	Geselecteerde proeven (*J = JONSWAP spectrum, P-M = Pierson-Moskowitz spectrum. ** Deze proef is gebruikt bij het opzetten van de software.)
Tabel B.2	Totaal aantal golven, aantal golfklappen en aantal golffronten per geselecteerde proef uit grootschalig modelonderzoek

Lijst van Symbolen

Symbool	Eenheid	Betekenis
$B_{\text{klap}20\%}$, $B_{\text{klap}50\%}$, $B_{\text{klap}80\%}$	m	klapbreedte, evenwijdig aan het talud gemeten, van de golfklap behorend bij 20 %, 50 % en 80 % van de belasting (p_{max})
$B_{\text{trog}20\%}$, $B_{\text{trog}50\%}$, $B_{\text{trog}80\%}$, $B_{\text{trog}100\%}$	m	trogbreedte behorend bij 20 %, 50 %, 80 % en 100 % van de belasting (ϕ_{bklap}) optreden
d	m	laagdikte van water net voor de golfklap
D	m	dikte toplaag
f	Hz	bemonsteringsfrequentie
F_{dip}	m^2	dipkracht, gedefinieerd als de integraal van de gediptheid op één tijdstip over het gebied waar de gediptheid boven de drempelwaarde komt (vergelijkbaar met de opwaartse kracht op de toplaag, minus eigen gewicht, bij een bepaalde lek lengte)
$F_{\phi_{\text{max}}}$	kN	maximale kracht tijdens de golfklap
g	m/s^2	zwaartekrachtsversnelling
$H_{\text{m}0}$	m	spectrale significante golfhoogte aan de teen van het talud
H_s	m	significante golfhoogte aan de teen van het talud
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)
$I_{\phi_{\text{max}}}$	kNs	impuls rond de golfklap
L_{op}	m	golflengte op basis van de piekperiode ($= gT_p^2/(2\pi)$), teruggerekend naar diepwater
O_{trog}	-	trog-oppervlak-verhouding
p_{max}	m	druk ten opzichte van het talud tijdens een golfklap, op het moment dat ϕ_{max} optreedt
t_1	s	tijdstip waarop de golfklap aanvangt
t_2	s	tijdstip waarop de golfklap eindigt
t_3	s	tijdstip waarop 0.5 p_{max} optreedt
t_4	s	tijdstip waarop 0.8 p_{max} optreedt
$t_{F_{\phi_{\text{max}}}}$	s	tijdstip waarop maximale kracht rond de golfklap plaatsvindt
t_k	s	golfklapduur
t_{max}	s	tijdstip waarop de stijghoogte op de toplaag maximaal is
T_m	s	gemiddelde golfperiode
$T_{\text{m-1,0}}$	s	spectrale golfperiodemaat

Symbol	Eenheid	Betekenis
T_p	s	golfperiode bij de piek van het spectrum
t_{0f}	s	tijdstip waarop maximale golffront plaatsvindt
t_{0fgem}	s	tijdstip waarop tijdsgemiddelde golffront maximaal is
S_{op}	-	golfsteilheid op diep water op basis van de piekperiode ($= H_s/L_{op}$)
x	m	horizontale afstand evenwijdig aan de stilwaterlijn (zeewaarts van snijpunt stilwaterlijn met talud is positief)
x'	m	afstand over het talud in de richting evenwijdig aan het talud (zeewaarts van snijpunt stilwaterlijn met talud is positief)
$X_{LBklap20\%}$, $X_{LBklap50\%}$, $X_{LBklap80\%}$	m	landwaartse locaties waar 20 %, 50 % en 80 % van de belasting (p_{max}) optreden
$X_{LBtrog20\%}$, $X_{LBtrog50\%}$, $X_{LBtrog80\%}$, $X_{LBtrog100\%}$	m	landwaartse locaties waar 20 %, 50 %, 80 % en 100 % van de belasting (ϕ_{bklap}) optreden
X_s	m	horizontale afstand tussen waterlijn en locatie waar ϕ_{min} optreedt
X_{sklap}	m	horizontale afstand tussen waterlijn en locatie waar $\phi_{minklap}$ optreedt tijdens de golfklap
$X_{ZBklap20\%}$, $X_{ZBklap50\%}$, $X_{ZBklap80\%}$	m	zeewaartse locaties waar 20 %, 50 % en 80 % van de belasting (p_{max}) optreden
$X_{ZBtrog20\%}$, $X_{ZBtrog50\%}$, $X_{ZBtrog80\%}$, $X_{ZBtrog100\%}$	m	zeewaartse locaties waar 20 %, 50 %, 80 % en 100 % van de belasting (ϕ_{bklap}) optreden
$X_{\Delta\phi}$	m	locatie waar het maximale stijghoogteverschil optreedt
$X_{\Delta\phi\Delta x_L}$, $X_{\Delta\phi\Delta x_{tr}}$, $X_{\Delta\phi\Delta x_Z}$	m	locaties waar de maximale gradiënten land- en zeewaarts van de golfklap en landwaarts van het golffront optreden
$X_{\phi_{max}}$	m	locatie waar de maximale stijghoogte optreedt
$X_{\phi_{max2}}$	m	locatie waar het tweede maximum in stijghoogte optreedt (zeewaarts van x_{trog})
$X_{\phi_{minL}}$	m	locatie waar de minimale stijghoogte optreedt (landwaarts van $X_{\phi_{max}}$)
α	-	taludhelling
Γ_k	-	klemfactor
Δ	-	relatieve dichtheid ($= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$)
$\Delta\phi\Delta x'_L$, $\Delta\phi\Delta x'_{tr}$, $\Delta\phi\Delta x'_Z$	-	Maximale gradiënten optredend op respectievelijk $x_{\Delta\phi\Delta x_L}$, $x_{\Delta\phi\Delta x_{tr}}$ en $x_{\Delta\phi\Delta x_Z}$

Symbol	Eenheid	Betekenis
θ_f	°	frontgradiënt (steilheid van het front)
$\theta_{f_{gem}}$	°	frontgradiënt gemiddeld over een bepaalde tijdsspanne
θ_k	°	klapgradiënt (steilheid van de golfklap bij de trog)
ϕ_b	m	fronthoogte tijdens golffront
$\phi_{b_{klap}}$	m	fronthoogte tijdens golfklap
ϕ_{dip}	m	gediptheid, gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde leklengte)
ϕ_k	m	klaphoogte (ten opzichte van de trogdiepte: de maximale stijghoogte in de golfklap ten opzichte van de minimale stijghoogte in de trog)
ϕ_{max}	m	maximale stijghoogte op het talud gedurende een golf
ϕ_{max2}	m	tweede maximum in stijghoogte op locatie $x_{\phi_{max2}}$
$\phi_{max\Delta\phi}$	m	maximale stijghoogteverschil
ϕ_{min}	m	minimale stijghoogte in de trog aan de voet van het front
$\phi_{min_{klap}}$	m	minimale stijghoogte in de trog aan de voet van het front tijdens de golfklap
ϕ_{minL}	m	minimale stijghoogte op locatie $x_{\phi_{minL}}$
$\phi_{\int dip}$	ms	geïntegreerde gediptheid, gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging)
Λ	m	leklengte
ρ_s	kg/m ³	dichtheid van blokken
ρ_w	kg/m ³	dichtheid van water
ξ_{op}	-	brekerparameter (= $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$)

I Inleiding

I.1 Achtergrond

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

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

In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft dit verslag betrekking op het deelonderzoek 7.4.2 “Invloed van golfklappen op stabiliteit, Kwantificering van de golfklap op het talud”.

Golfklappen zijn waarschijnlijk de maatgevende belasting voor relatief open steenzettingen (zoals basalt en betonzuilen) en voor met gietasfalt ingegoten steenzettingen. Daarnaast wordt in dit verslag ook aandacht geschonken aan de golffronten, die optreden vlak vóór er een golfklap plaatsvindt. Hierdoor wordt goed aansluiting verkregen op het onderzoek uit het verleden. Daarnaast is het waarschijnlijk dat de grootte van de golfklap afneemt bij het toenemen van de brekerparameter, waardoor de golfklap wellicht niet maatgevend is bij grote waarden van ξ_{op} .

Het eerste deel van het onderzoek betreffende de kwantificering van golfklappen op steenzettingen is reeds uitgevoerd in 2003 (Coeveld, 2003b), hetgeen geresulteerd heeft in software waarmee drukregistraties van oude Deltagootproeven kunnen worden geanalyseerd. Het huidige onderzoek richt zich op het gebruik van die software en van het softwarepakket Zsteen om de relatie te leggen tussen relevante eigenschappen van de golfklappen en golffronten enerzijds en de eigenschappen van de golven en het dijktalud anderzijds.

I.2 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het vinden van een relatie tussen de relevante eigenschappen van de golfklappen en golffronten, en de golfparameters aan de teen van de dijk (golfhoogte en golfperiode) en de taludhelling. Daarnaast is beoogd meer inzicht te krijgen in de belasting in de vorm van golfklappen en fronten. Dit inzicht is nodig voor:

- het vinden van de juiste criteria voor het indikken van de golfbestanden die gebruikt worden door het softwarepakket Zsteen,
- het beoordelen van de kwaliteit van de golfbestanden voor Zsteen, zoals de vraag of de onderlinge afstand van de drukopnemers voldoende was en of de bemonsteringsfrequentie voldoende was,

- het vaststellen welke aspecten van de golfklap bepalend zijn voor de stabiliteit van de steenzetting, zodat Zsteen beoordeeld kan worden en ANAMOS eventueel uitgebreid kan worden als deze maatgevende aspecten van de golfklap niet goed meegenomen kunnen worden in Zsteen, en voor
- het vaststellen van criteria waaraan de instrumentatie van toekomstig groot- en kleinschalig modelonderzoek moet voldoen.

1.3 Onderzoeksopzet

Er is ten eerste bepaald welke eigenschappen van de golfbelasting het meest relevant zijn voor de stabiliteit van steenbekledingen. Hierbij is vooral gekeken naar het effect van bepaalde eigenschappen op het maximale stijghoogteverschil over de toplaag van de steenbekleding. Hiertoe is het stijghoogteverschil analytisch bepaald.

Vervolgens zijn deze belastingseigenschappen geanalyseerd met behulp van de golfbelasting-analyse-software en met het softwarepakket Zsteen, teneinde een relatie te leggen tussen relevante eigenschappen van de golfklappen en golffronten enerzijds en de eigenschappen van de golven en het dijktalud anderzijds. Daartoe is de software verder uitgebreid en verbeterd. In Bijlage A is een gedetailleerde beschrijving gegeven van de software zoals die voor onderhavig onderzoek toegepast is.

Met behulp van de gekwantificeerde golfbelasting is vervolgens onderzocht welke eisen er gesteld dienen te worden aan de instrumentatie in (toekomstig) fysisch modelonderzoek.

De analyse is primair gericht op grootschalig modelonderzoek met taluds van 1:3, 1:3,5 en 1:4. Daarnaast zijn ook de resultaten van kleinschalig modelonderzoek met relatief lange golven op een talud van 1:3 en 1:4 meegenomen (Kuiper en van Vossen, 2003). Door Klein Breteler en Coeveld (2004) is reeds een uitvoerige analyse uitgevoerd van laatstgenoemde proeven met dezelfde golfbelasting-analyse-software als die hier gebruikt is. Die resultaten zijn toegevoegd teneinde beide onderzoeken op elkaar te laten aansluiten.

1.4 Leeswijzer

De selectie van de meest relevante eigenschappen van golfklappen en golffronten voor de stabiliteit van steenzettingen is beschreven in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 zijn de geanalyseerde proeven beschreven en is nader ingegaan op de relatie tussen de eigenschappen van de golven (zoals H_s , T_p en ξ_{op}) en de maatgevende eigenschappen van de golfbelasting. In Hoofdstuk 4 is onderzocht wat de invloed van de Instrumentatiedichtheid en de bemonsteringsfrequentie is op resultaten van de golfbelasting-analyse-software. In Hoofdstuk 5 zijn de conclusies gegeven. In Bijlage A is de golfbelasting-analyse-software beschreven. Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen zoals het begin 2004 voorzien was, is weergegeven in Bijlage D.

2 Selectie van maatgevende eigenschappen van golfbelasting op steenbekledingen

In dit hoofdstuk zijn de maatgevende eigenschappen van de golfbelasting op steenbekledingen onderzocht. Dit is gedaan voor zowel golffronten, als golfklappen. Met behulp van een geschematiseerde belasting is het effect van bepaalde eigenschappen van de belasting op het maximale stijghoogteverschil over de toplaag onderzocht. Daartoe is het stijghoogteverschil analytisch bepaald. De resultaten van deze analyse zijn vergeleken met de resultaten van berekeningen met het softwarepakket Zsteen.

2.1 Golffronten

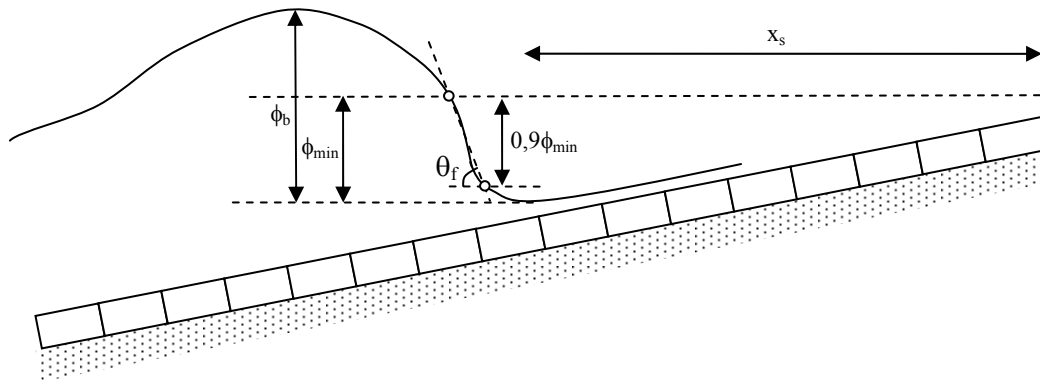
Hoewel de golfklap het meest in het oog springende deel van de golfbelasting is, kan het moment vlak vóór de golfklap, als er een golffront op het talud aanwezig is, ook een belangrijke belasting geven. Dit is zeker het geval bij een steenzetting met een grote leklengte. Ook bij relatief lange golven waarbij $\xi_{op} \gg 3$, kan de belasting tijdens het golffront wellicht belangrijker zijn dan tijdens de golfklap.

Kenmerkend voor een golffront is het stijghoogteverschil dat zich uitstrekt over een relatief groot gebied, dat bovendien relatief lang aanhoudt. Golfklappen daarentegen, geven een zeer lokaal stijghoogteverschil dat kort duurt.

Een golffront wordt gekarakteriseerd door de volgende parameters:

- de hoogte van het front ϕ_b , ten opzichte van minimale stijghoogte aan de voet van het front (m),
- de helling van het front θ_f , gedefinieerd als de helling van de lijn van de voet van het front naar het snijpunt van het front met de stilwaterlijn ($^\circ$),
- de minimale stijghoogte ϕ_{min} aan de voet van het front (m), en
- de locatie x_s van de voet van het front ten opzichte van de waterlijn op het talud (m).

Gezien het feit dat de stijghoogte nabij ϕ_{min} soms rond verloopt, is ervoor gekozen om in de golfbelasting-analyse-software de definitie van de frontsteilheid aan te passen. Deze is nu gedefinieerd als de helling van de lijn van het snijpunt van het front met de stilwaterlijn naar het punt waar $\phi_{op} = 0,9\phi_{min}$, zie Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Golffront vlak vóór de golfklap

Daarnaast is ook de duur van de belasting van belang. Hierop wordt later teruggekomen bij een bijzondere eigenschap van de belasting op het talud: de geïntegreerde gediptheid.

2.2 Golfklappen

Om ten behoeve van niet-ingegoten steenzettingen systematisch de invloed van de vorm en de grootte van de golfklap op de grootte van het stijghoogteverschil over de toplaag te onderzoeken, is gewerkt met geschematiseerde golfklappen. Door de eigenschappen van de golfklap te variëren is de relatie onderzocht tussen het stijghoogteverschil over de toplaag en de eigenschappen van de golfklappen. Het stijghoogteverschil over de toplaag is berekend met de analytische formules, die dezelfde basis hebben als de formules in ANAMOS (Klein Breteler *et al.*, 1991).

Met betrekking tot ingegoten steenzettingen zijn door Klein Breteler (2003) reeds de meeste relevante eigenschappen van de golfklappen gespecificeerd, namelijk:

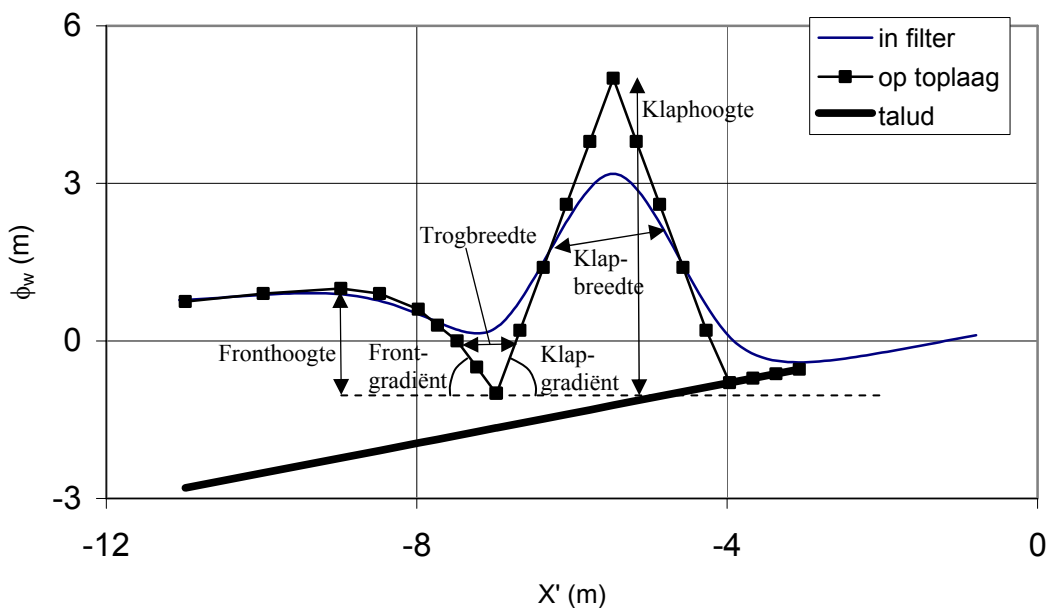
- de maximale stijghoogte tijdens de golfklap en de bijbehorende locatie,
- de breedte van de belaste strook op het talud in de golfklap,
- de totale duur van de golfklap, en
- de stijgtijd van de golfklap (duur van het begin van de golfklap tot een maximum in stijghoogte)

In het vervolg van dit hoofdstuk is de aandacht voornamelijk gericht op de niet-ingegoten steenzettingen.

De analyse is gericht op de eigenschappen die relevant zijn voor het maximale stijghoogteverschil over de toplaag, omdat dit opgevat kan worden als de primaire belasting van een niet-ingegoten steenzetting. Later moet daar aan toegevoegd worden dat niet alleen het stijghoogteverschil van belang is, maar ook de daaruit voortvloeiende blokbeweging. Dan wordt ook de belastingsduur van belang. De eigenschappen die van belang zijn voor de belastingsduur worden steeds apart vermeld, en worden niet betrokken in de onderlinge afweging van de andere eigenschappen (die vooral betrekking hebben op het maximale stijghoogteverschil).

2.2.1 Eigenschappen van de geschematiseerde golfklappen

Het stijghoogteverloop op de toplaag tijdens een golfklap bestaat uit de restanten van een stijghoogtefront met daarnaast een lokale golfklapzone waarin de stijghoogte op het talud een (zeer) hoge waarde heeft. Tussen dit front en de klap heeft het stijghoogteverloop een minimum, dat de trog genoemd wordt, zie Figuur 2.2. Ter plaatse van de trog treedt meestal het grootste stijghoogteverschil over de toplaag op en is de grootste blokbeweging te verwachten.



Figuur 2.2 Geschematiseerde golfklap

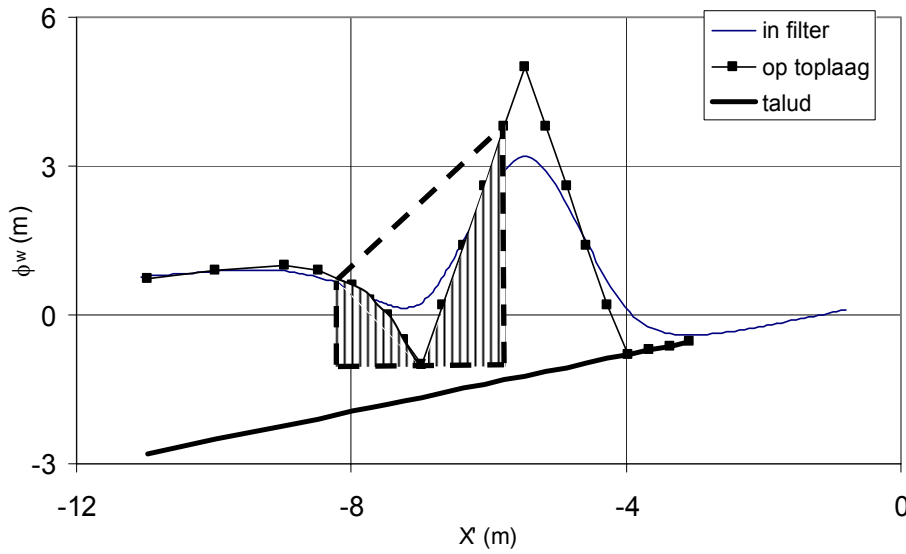
Het stijghoogteverloop tijdens de golfklap kent een aantal basiseigenschappen:

- de fronthoogte (ϕ_b),
- de frontgradiënt (steilheid van het front) (θ_f),
- de trogbreedte (B_{trog}),
- de klapgradiënt (steilheid van de golfklap bij de trog) (θ_k),
- de klapbreedte, evenwijdig aan het talud gemeten (B_{klap}),
- de klaphoogte (ten opzichte van de trogdiepte: de maximale stijghoogte in de golfklap ten opzichte van de minimale stijghoogte in de trog) (ϕ_k),
- de trog-oppervlak-verhouding (O_{trog}) (zie onderstaande uitleg), en
- de gediptheid (ϕ_{dip}) (zie onderstaande uitleg)

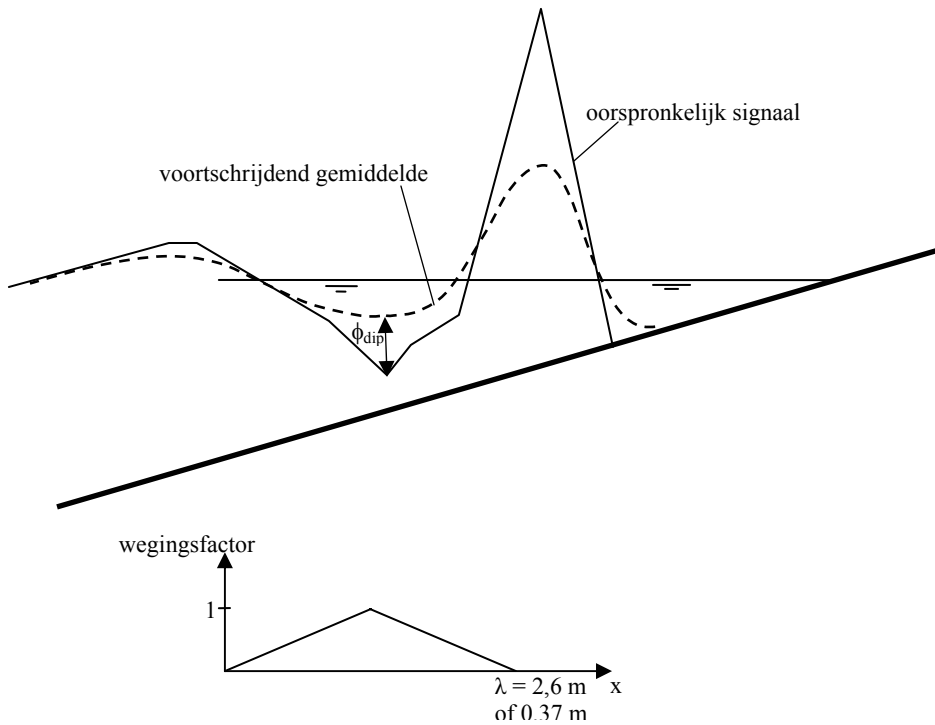
Deze eigenschappen van het stijghoogteverloop sluiten aan op de parameters die de software oplevert (zie Bijlage A).

De trog-oppervlak-verhouding is gedefinieerd in Figuur 2.3 en is gelijk aan de verhouding tussen het verticaal gearceerde oppervlak en het totale oppervlak binnen de stippellijnen. Deze verhouding is groot als de trog smal en diep is (en het stijghoogteverschil over de

toplaag daardoor groot is), en is klein als de trog breed is. De linker begrenzing ligt bij 80% van de fronthoogte en de rechter bij 80% van de klaphoogte.



Figuur 2.3 Trog-oppevlak-verhouding O_{trog} (de verhouding tussen het verticaal gearceerde oppervlak en het totale oppervlak binnen de stipellijnen)



Figuur 2.4 Definitie van gediptheid

De gediptheid wordt bepaald door eerst met een gekozen voortschrijdend gemiddelde het verloop van de stijghoogte op het talud vloeiend te maken (zie Figuur 2.4). Dit vloeiend gemaakte stijghoogteverloop is een grove benadering van het stijghoogteverloop in het filter bij een bepaalde lek lengte. Vervolgens is de gediptheid gelijk aan het maximale verschil tussen de vloeiend gemaakte stijghoogte en de werkelijke stijghoogte op het talud. Dit maximale verschil is een grove schatting van het maximale opwaartse stijghoogteverschil over de toplaag. De gediptheid kan zowel optreden zeewaarts van de golfklap, zoals weergegeven in Figuur 2.4, als landwaarts van de golfklap.

Het voortschrijdend gemiddelde is bepaald met een driehoekvormige wegingsfactor, zie Figuur 2.4. De basis van deze driehoek (de middelingslengte) is zodanig bepaald, dat de resulterende gediptheid overeenkomt met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde lek lengte. Hiertoe is eerst voor een geschematiseerde golfklap het stijghoogteverschil berekend. Vervolgens is de middelingslengte zodanig gekozen, dat de gediptheid overeenkwam met het berekende stijghoogteverschil. De berekening van het stijghoogteverschil is uitgevoerd met behulp van de formules die ook de basis vormen voor de berekening van het stijghoogteverschil in ANAMOS (Klein Breteler *et al.*, 1991).

De middelingslengte is vastgesteld op 2,6 m bij een lek lengte van 0,5 m en een golfhoogte die in de Deltagoot veel toegepast wordt: $H_s = 1$ à 1,5 m. Deze middelingslengte levert daarmee alleen een gediptheid op die overeenkomt met het stijghoogteverschil over de toplaag voor relatief open steenbekledingen onder een vergelijkbare golfbelasting. De gevoeligheid van de middelingslengte voor andere golfhoogtes en lek lengtes is nog niet onderzocht. De middelingslengte voor het bepalen van de gediptheid voor proeven in de Scheldegoet is gebaseerd op de middelingslengte voor proeven op Deltagoetschaal. Golven die in de Scheldegoet veel toegepast worden verschillen ongeveer een factor 7 in hoogte met de in de Deltagoot toegepaste golfhoogte. De middelingslengte voor de Scheldegoet komt daarmee op 0,37 m.

Opgemerkt moet worden dat in een eenvoudige schematisering zoals in Figuur 2.2, sommige eigenschappen afhankelijk van elkaar zijn. Bij een driehoekige golfklapvorm is de klapgradiënt afhankelijk van de breedte en de hoogte van de klap. Verder zullen de frontgradiënt en de klapgradiënt samen de trogbreedte bepalen. Bij het doorrekenen van de variaties is daarom ook gerekend met een stijghoogteverloop dat ter plaatse van de trog een breed minimum heeft (zie Figuur 2.8).

Een aantal van deze basiseigenschappen kunnen op verschillende plaatsen in het stijghoogteverloop bepaald worden:

- de frontgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in het *front* gelijk is aan 20% en 50% van de fronthoogte ($\theta_{f20\%-50\%}$), 50% en 80% van de fronthoogte ($\theta_{f50\%-80\%}$), en 20 en 80% van de fronthoogte ($\theta_{f20\%-80\%}$),
- de trogbreedte op de locatie waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in het *front* gelijk is aan 20%, 50% of 80% van de fronthoogte ($B_{trog20\%}$ etc.),
- de klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in de *klap* gelijk is aan 20% en 50% van de fronthoogte ($\theta_{k20\%-50\%f}$), 50% en 80% van de fronthoogte ($\theta_{k50\%-80\%f}$), en 20 en 80% van de fronthoogte ($\theta_{k20\%-80\%f}$),
- de klapgradiënt tussen de locaties waar de druk op het talud (stijghoogte ten opzichte van het talud) in de *klap* gelijk is aan 20% en 50% van het maximum ($\theta_{k20\%-50\%k}$), 50% en 80% van het maximum ($\theta_{k50\%-80\%k}$), en 20 en 80% van het maximum ($\theta_{k20\%-80\%k}$), en

- de klapbreedte op de locatie waar de druk op het talud (stijghoogte ten opzichte van het talud) in de *klap* gelijk is aan 20%, 50% of 80% van het maximum ($B_{k20\%}$ etc.).

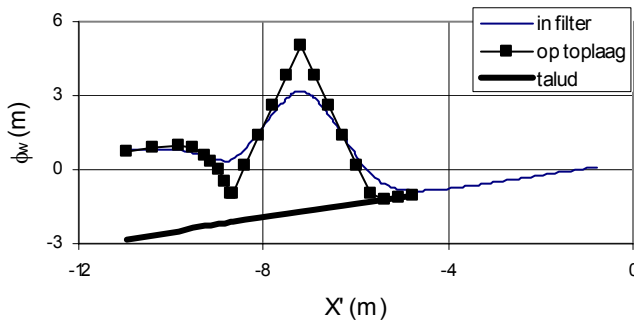
De naamgeving van de gradiënten is als volgt:

- de eerste letter geeft aan of het de gradiënt betreft van de klap of van het front
- vervolgens is aangegeven bij welk percentage van de fronthoogte of klaphoogte de gradiënt bepaald is, of de range als het gemiddelde bepaald is in een zone.

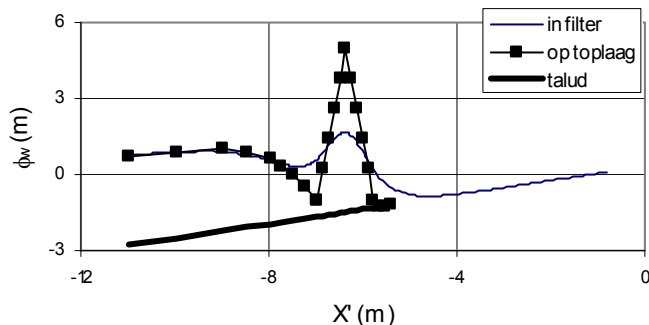
De vraag is nu welke van deze eigenschappen de grootste invloed hebben op het stijghoogteverschil over de toplaag. Om antwoord te krijgen op deze vraag, is voor een groot aantal cases het stijghoogteverschil over de toplaag berekend, waarbij het volgende is gevarieerd aan het stijghoogteverloop op de toplaag:

- de frontgradiënt: $-3,3 < \tan\theta_{f20\%-50\%} < -1,5$
- de trogbreedte ter plaatse van diepste punt: $0 < B_{trog} < 1$ m
- de golfklaphoogte: $3 < \phi_k < 10$ m
- de golfklapbreedte op halve hoogte: $0,6 < B_{klap50\%} < 3,0$ m, en
- de vorm: van Figuur 2.9-boven via Figuur 2.2 tot Figuur 2.9-onder.

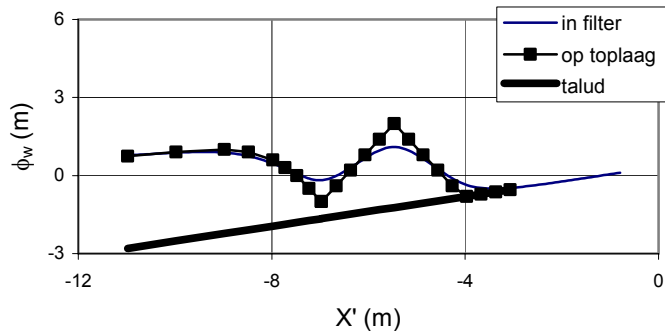
In Figuur 2.5 tot en met Figuur 2.9 is dit nader toegelicht.



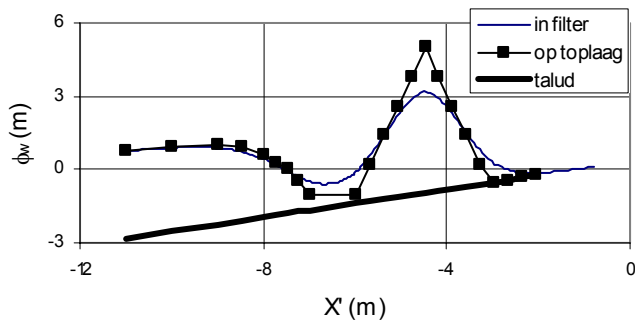
Figuur 2.5 Variatie van frontgradiënt



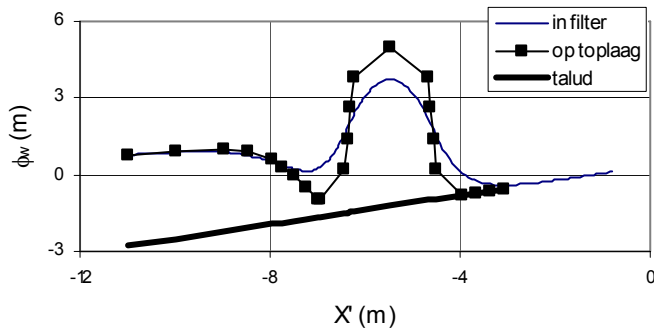
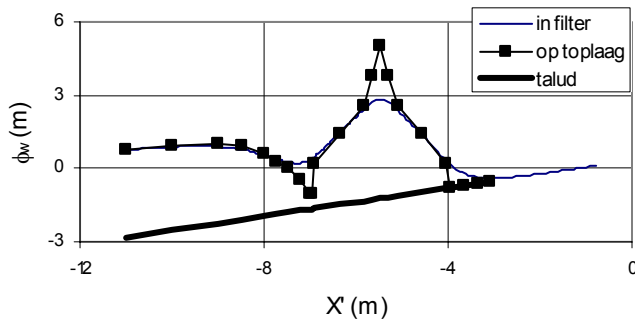
Figuur 2.6 Variatie van golfklapbreedte



Figuur 2.7 Variatie van golfklaphoogte



Figuur 2.8 Variatie van trogbreedte



Figuur 2.9 Variatie van klapvorm (5 vormen, middelste is een driehoek zoals in Figuur 2.2, in deze figuur zijn de 2 extremen gegeven)

Bij de variatie van de vorm is de klapbreedte ter hoogte van het minimum in stijghoogte (in de trog) en halverwege de klaphoogte ongeveer constant gehouden, teneinde niet alles tegelijk te variëren. De Figuur 2.9-boven kan omschreven worden als een hol stijghoogteverloop met steil begin, en de onderste als bol stijghoogteverloop met flauw begin.

Alle cases zijn doorgerekend met een fronthoogte van $\phi_b = 2$ m. Ten opzichte van deze waarde zijn de overige eigenschappen gevarieerd. De basiscase kan als volgt gekarakteriseerd worden:

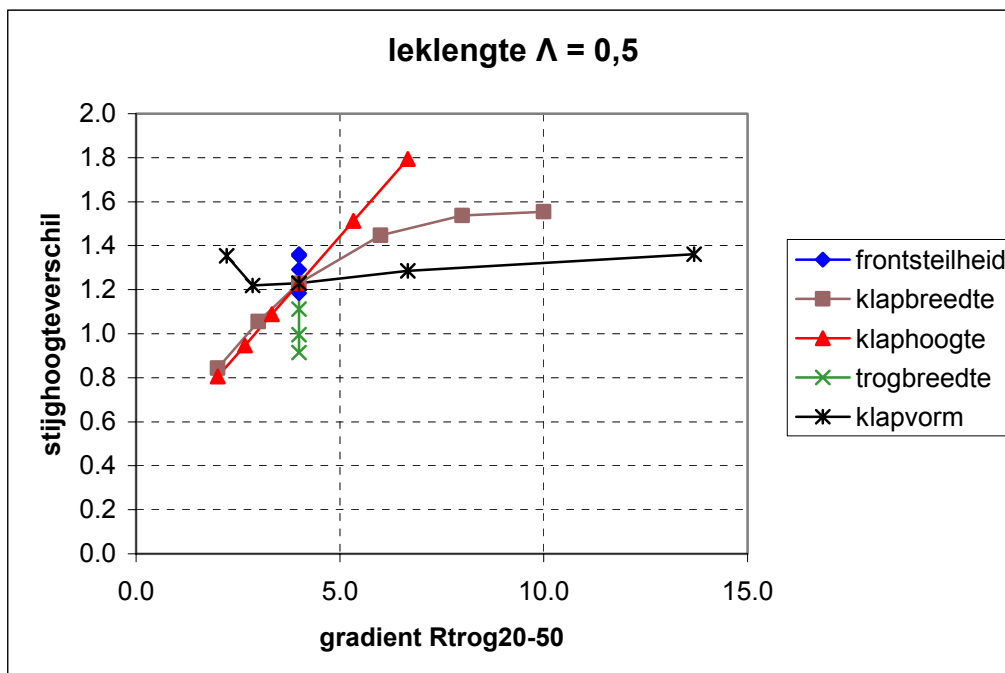
- frontgradiënt: $\tan\theta_{f20\%-50\%} = -2$
- golfklapbreedte op halve hoogte: $B_{klap50\%} = 1,5$ m
- golfklaphoogte: $\phi_k = 6$ m
- trogbreedte ter plaatse van diepste punt: 0 m
- vorm: driehoek

Verder zijn berekeningen gemaakt met drie leklengtes: $\Lambda = 0,3$ m, $\Lambda = 0,5$ m en $\Lambda = 1,0$ m. De variaties van de golfklaphoogte en golfklapbreedte die doorgerekend zijn, hebben tot gevolg gehad dat de daarmee gerelateerde gradiënt van de golfklap in een grotere range is gevarieerd dan de frontgradiënt, namelijk $2 < \tan\theta_{k20\%-50\%f} < 14$.

2.2.2 Analyse van de invloed van de eigenschappen

In deze paragraaf worden de geselecteerde resultaten van de uitgevoerde berekeningen gepresenteerd en geanalyseerd. De resultaten worden in figuren samengevat, waarbij op de x-as één van die eigenschappen van de golfklap en op de y-as het maximale stijghoogteverschil over de toplaag te zien is. Elke figuur bevat 5 lijnen die de relaties geven tussen de uitgezette parameter en het stijghoogteverschil over de toplaag. Alle rekenresultaten worden in de figuur gepresenteerd, waarbij de resultaten die betrekking hebben op de variatie van elk aspect van de golfklap herkenbaar zijn.

- De doorgerekende cases waarbij de frontgradiënt ($\theta_{f20\%-50\%}$) is gevarieerd zijn in de figuren met een blauwe ruit weergegeven. De wijze waarop de frontgradiënt (blauwe ruit) gevarieerd is, is toegelicht in Figuur 2.5.
- De wijze waarop de klapbreedte (B_{klap}) (bruin vierkant) gevarieerd is, is te zien in Figuur 2.6.
- De wijze waarop de klaphoogte (ϕ_k) (rode driehoek) gevarieerd is, is te zien in Figuur 2.7.
- De wijze waarop de trogbreedte (B_{trog}) (groen kruis) gevarieerd is, is te zien in Figuur 2.8.
- De wijze waarop de klapvorm (zwart dubbel kruis) gevarieerd is, is te zien in Figuur 2.9.



Figuur 2.10 Relatie tussen de klapgradiënt $\theta_{k20\%-50\%f}$ ($R_{trog20-50}$) en het stijghoogteverschil met lek lengte $\Lambda_2=0,5$

Figuur 2.10 is een voorbeeldfiguur. Vanwege de grote hoeveelheid, zijn niet alle figuren die gemaakt zijn tijdens de berekeningen in onderhavig verslag opgenomen. Om de interpretatie van de resultaten te verhelderen, wordt exemplarisch een figuur in detail beschouwd.

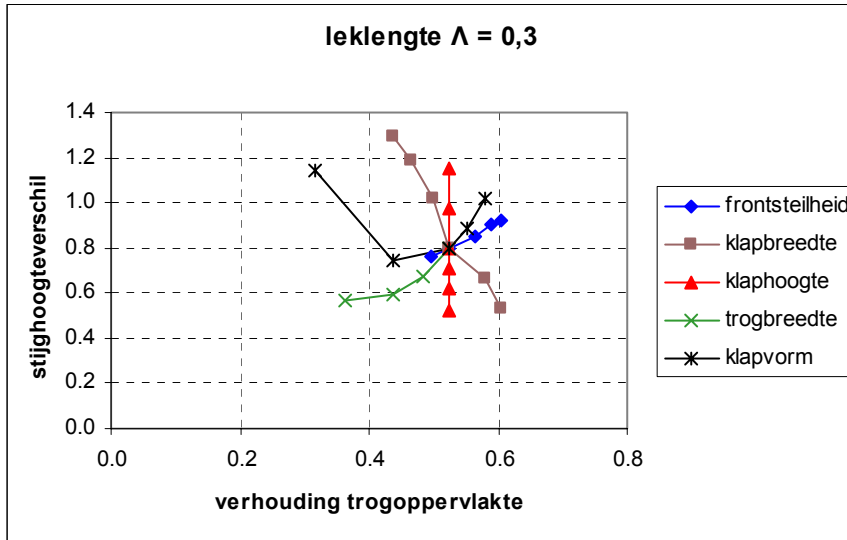
In Figuur 2.10 is op de x-as de klapgradiënt (θ_k) gegeven van het stijghoogteverloop aan de rechterkant van de trog (oftewel de zeezijde van de klap), berekend in de zone waar de stijghoogte tussen 20% en 50% ligt van de fronthoogte (ϕ_b): $\theta_{k20\%-50\%f}$. In deze figuur is te zien dat de verandering van de golfklapbreedte (B_{klap}), de golfklaphoogte (ϕ_k) en de klapvorm invloed hebben op de grootte van deze klapgradiënt (θ_k). Dit volgt uit de wijze waarop deze eigenschappen veranderd zijn (zie Figuur 2.5 tot en met Figuur 2.9). Verder is te zien dat een toename van de klapgradiënt ($\theta_{k20\%-50\%f}$) een toename van het stijghoogteverschil betekent, vooral als de golfklaphoogte (ϕ_k) vergroot wordt. Een uitzondering betreft de golfklapvorm, die een minimum in het midden van de figuur laat zien. Het blijkt dat een driehoekig stijghoogteverloop van de golfklap het kleinste stijghoogteverschil geeft, terwijl de afwijkende vormen (zie Figuur 2.9) een iets hoger stijghoogteverschil geven. De invloed van deze vorm is echter betrekkelijk klein.

Een verandering van de frontsteilheid en trogbreedte komt niet tot uiting in de gradiënt ($\theta_{k20\%-50\%f}$). In de figuur is echter wel een range aan stijghoogteverschillen te zien, omdat bij andere variaties er wel een verandering van het stijghoogteverschil is, echter zonder dat dit tot uiting komt in de gradiënt ($\theta_{k20\%-50\%f}$). Er zijn kennelijk nog andere eigenschappen nodig om een goede relatie te krijgen met het stijghoogteverschil.

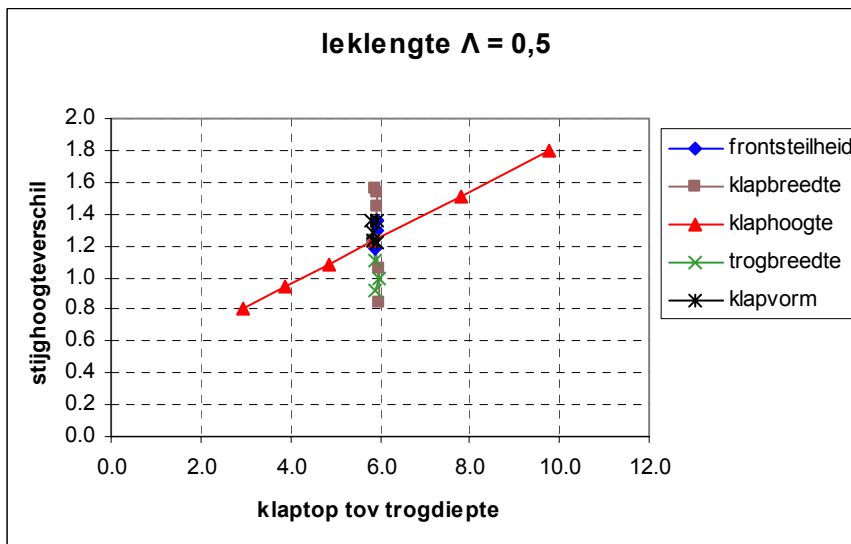
Op dezelfde manier kunnen conclusies voor alle andere eigenschappen van de golfklap getrokken worden. Deze zijn onderstaand in volgorde van afnemende belangrijkheid gegeven:

1. Gediptheid, ϕ_{dip}
Voor alle cases blijkt dat een toename van de gediptheid ook een belangrijke toename van het stijghoogteverschil heeft (zie Figuur 2.16).
2. Golfklaphoogte, ϕ_k
Voor die cases waarbij de golfklaphoogte is gevarieerd, blijkt er een sterke relatie tussen de golfklaphoogte en het maximale stijghoogteverschil (zie Figuur 2.12).
3. Golfklapbreedte (op 50% van de golfklaphoogte: $B_{klap50\%}$; of op 80%: $B_{klap80\%}$)
Als de golfklapbreedte toeneemt, neemt het maximale stijghoogteverschil duidelijk af. Er is echter ook een invloed van de golfklapvorm te zien. Als de golfklapvorm wordt veranderd (van Figuur 2.9-boven via Figuur 2.2 naar Figuur 2.9-onder) verandert de golfklapbreedte op 80% van de golfklaphoogte ($B_{klap80\%}$) aanzienlijk, terwijl het maximale stijghoogteverschil maar weinig verandert. De golfklapbreedte op 50% van de golfklaphoogte ($B_{klap50\%}$) verandert echter maar weinig.
4. Golfklapgradiënt aan de trogzijde: $\theta_{k20-50\%f}$ en $\theta_{k50-80\%k}$
De gradiënt van de stijghoogte op het talud varieert in de cases waarin de golfklapbreedte, de golfklaphoogte of de klapproom verandert is (zie Figuur 2.10). Vooral in de cases waarbij de klapproom verandert is, is er sprake van een min of meer onafhankelijke variatie van deze gradiënt en is de invloed op het maximale stijghoogteverschil dus het beste te zien. De invloed van deze gradiënt blijkt vrij klein te zijn.
5. Breedte van de trog: $B_{trog50\%}$ en $B_{trog20\%}$
Als de afstand tussen het front en de golfklap (de breedte van de trog) groter wordt, neemt het maximale stijghoogteverschil af. De invloed van de breedte van de trog is echter niet zo groot.
6. Frontgradiënt: $\theta_{f20-50\%}$
Als de frontgradiënt toeneemt, dan neemt ook het maximale stijghoogteverschil iets toe. De invloed van deze parameter is echter verrassend klein (zie Figuur 2.13).
7. Trog-oppervlak-verhouding: O_{trog}
De trog-oppervlak-verhouding is niet onafhankelijk gevarieerd, maar had bij alle cases steeds een andere waarde. Het blijkt dat er geen relatie is tussen de trog-oppervlak-verhouding en het maximale stijghoogteverschil over de toplaag (zie Figuur 2.11). Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat deze parameter niet geschikt is als relevante eigenschap van de golfklap in relatie tot het stijghoogteverschil.

Het is opmerkelijk dat de frontgradiënt een betrekkelijk kleine invloed heeft, zoals te zien is in Figuur 2.13, ondanks dat de gradiënt van zeer steil tot vrij flauw gevarieerd is. In deze figuur is verder te zien dat alle andere variaties geen invloed hebben op deze frontgradiënt (alle punten liggen verticaal boven elkaar), maar wel een grote range aan maximale stijghoogteverschillen opleveren. Deze range aan stijghoogteverschillen is veel groter dan bij variatie van de frontgradiënt.

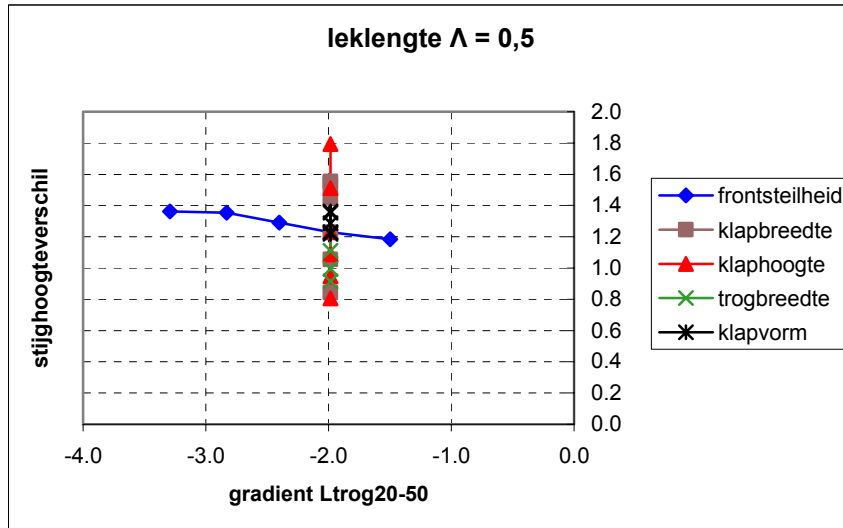


Figuur 2.11 Stijghoogteverschil over de toplaag als functie van de trogoppervlakte verhouding



Figuur 2.12 Stijghoogteverschil over de toplaag als functie van de golfklaphoogte

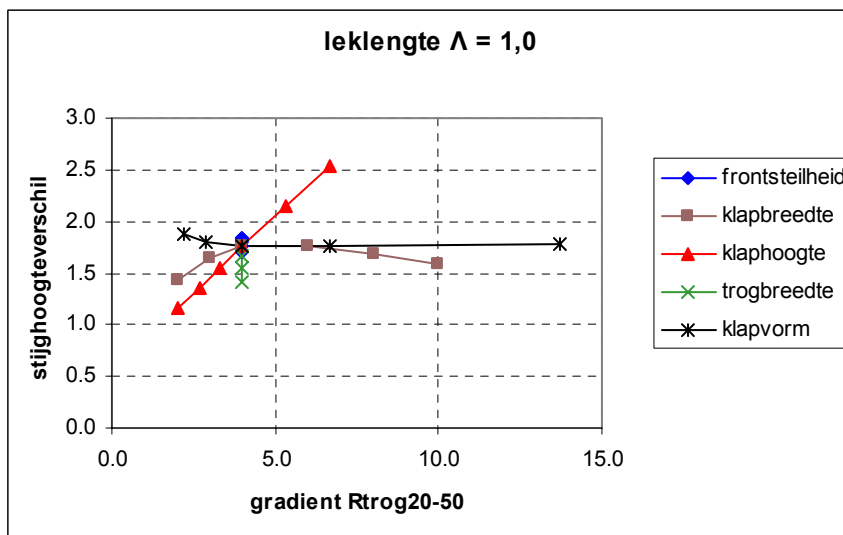
Op basis van deze rekenexercitie is het moeilijk vast te stellen of een golfklapbreedte op 50% van de golfklaphoogte ($B_{\text{klap}50\%}$) een grotere invloed heeft dan die op 80% van de golfklaphoogte ($B_{\text{klap}80\%}$).



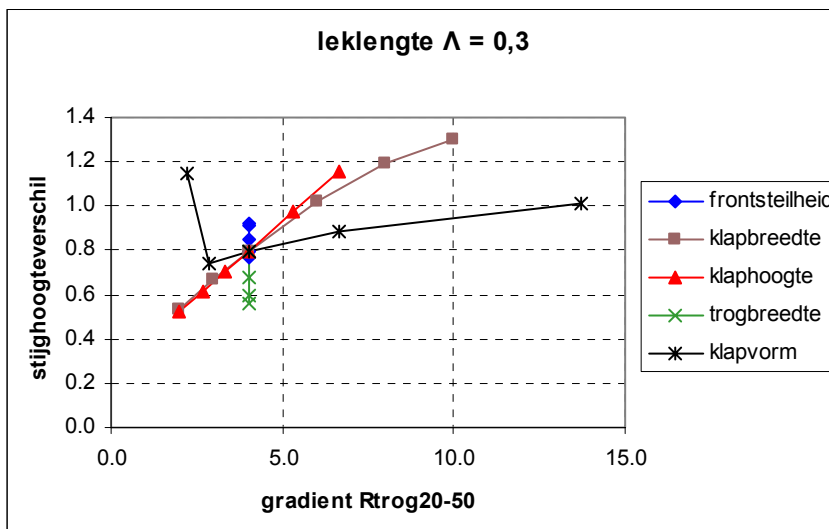
Figuur 2.13 Stijg hoogteverschil over de toplaag als functie van de frontgradiënt

Uit de berekeningen met een grote lek lengte ($\Lambda = 1,0$ m) blijkt dat de variatie van de maximale stijg hoogteverschillen in bijna alle cases beduidend minder wordt als de lek lengte groter wordt (zie Figuur 2.14 ten opzicht van Figuur 2.10). Alleen de variatie als functie van de golfklaphoogte (ϕ_k) is nog steeds groot. Daarmee neemt het relatieve belang van de golfklaphoogte (ϕ_k) dus toe.

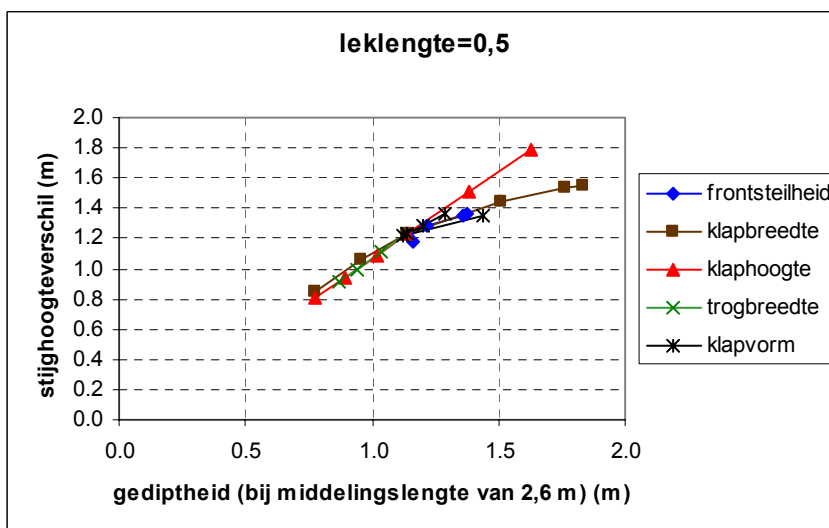
Bij de berekeningen met een kleine lek lengte ($\Lambda = 0,3$ m) is het maximale stijg hoogteverschil wel sterk afhankelijk van kleinschalige variaties zoals variaties in de klapvorm (zie Figuur 2.15). Verder blijkt dan de invloed van de golfklapbreedte (B_{klap}) zelfs nog groter te worden dan de invloed van de golfklaphoogte (ϕ_k).



Figuur 2.14 Stijg hoogteverschil als functie van de golfklapgradiënt $\theta_{k20\%-50\%f}$ ($R_{trog20-50}$) bij $\Lambda = 1,0$ m



Figuur 2.15 Stijghoogteverschil als functie van de golfklapgradient bij $\Lambda = 0,3$ m



Figuur 2.16 Stijghoogteverschil als functie van de gediptheid

De relatie tussen de gediptheid en het maximale stijghoogteverschil is het sterkst, zoals blijkt uit Figuur 2.16.

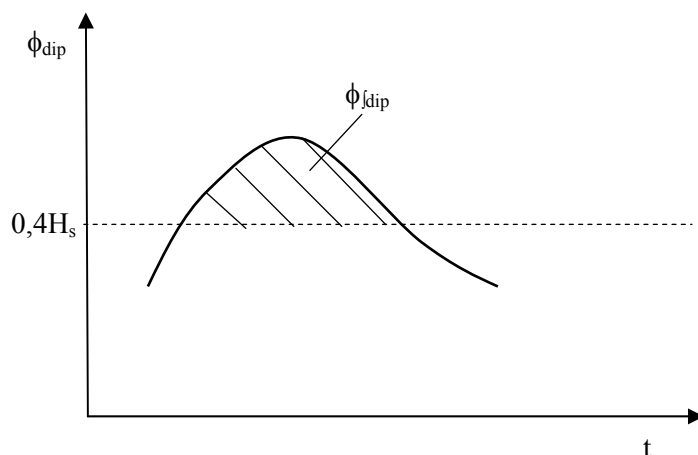
De achtergrond bij deze parameters is dat er in het stijghoogteverloop (als functie van de plaats) óp de toplaag scherpe uitschieters kunnen zijn naar beneden, die uiteindelijk zullen leiden tot een groot stijghoogteverschil over de toplaag (zie Figuur 2.4). Het stijghoogteverloop in het filter is namelijk een afgevlakte weergave van het stijghoogteverloop als functie van de plaats op de toplaag. Een uitschieter naar beneden wordt een dip in de stijghoogte genoemd. De grootte van de dip wordt bepaald ten opzichte van een voortschrijdend gemiddelde van het stijghoogteverloop als functie van de plaats op het talud. Het maximale verschil tussen dit voortschrijdend gemiddelde en het werkelijke verloop van de stijghoogte is gelijk aan de gediptheid. Het is een maat voor het te verwachten stijghoogteverschil over de toplaag.

Het voortschrijdend gemiddelde is berekend met een driehoekig verlopende wegingsfactor. Hierdoor wordt de resulterende gediptheid zeer vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde lek lengte. De totale lengte van het voortschrijdend gemiddelde bedraagt op Deltagootschaal 2,6 m en op Scheldegootschaal 0,37 m, zie ook Figuur 2.4, hetgeen voor de Deltagootschaal leidt tot een goede schatting van het stijghoogteverschil bij een lek lengte van 0,5 m.

Wegens de geschiktheid van de gediptheid als parameter om de belasting mee te karakteriseren, zijn nog drie vergelijkbare parameters die van de gediptheid zijn afgeleid geïntroduceerd. Zo zijn er vier parameters gerelateerd aan de gediptheid:

- de gediptheid (ϕ_{dip}) zelf, gedefinieerd als het verschil tussen het afgevlakte stijghoogteverloop en het werkelijke stijghoogteverloop op een bepaald moment (vergelijkbaar met het stijghoogteverschil over de toplaag bij een bepaalde lek lengte) (m),
- de geïntegreerde gediptheid (ϕ_{dip}), gedefinieerd als het oppervlak onder het verloop van de gediptheid als functie van de tijd boven een bepaalde drempelwaarde (maat voor de blokbeweging) (ms),
- de dipkracht (F_{dip}), gedefinieerd als de integraal van de gediptheid op één tijdstip over het gebied waar de gediptheid boven de drempelwaarde komt (vergelijkbaar met de opwaartse kracht op de toplaag, minus eigen gewicht, bij een bepaalde lek lengte) (m^2), en
- de dipimpuls (I_{dip}), 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 toplaagbeweging) (m^2s).

Deze parameters kunnen tijdens de golfklap en tijdens het golffront bepaald worden. Onderstaand worden ze nader toegelicht.



Figuur 2.17 Definitie van geïntegreerde gediptheid

Bij de geïntegreerde gediptheid wordt ook de duur van de dip in het stijghoogteverloop meegeteld (zie Figuur 2.17). Daar waar tijdens het front of de klap de maximale dip

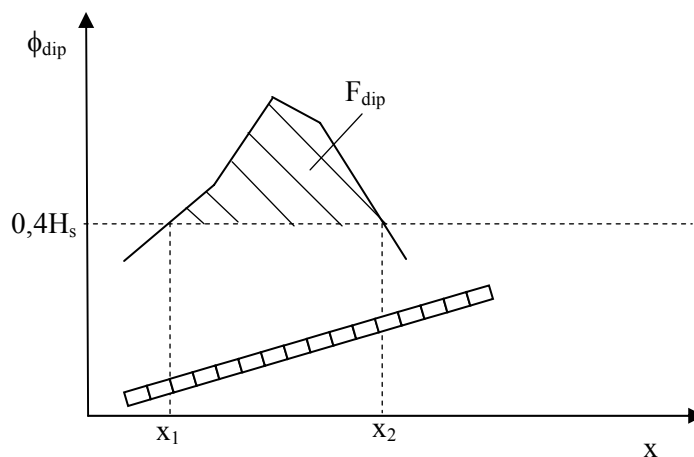
optreedt, wordt het oppervlak berekend onder de in de tijd verlopende waarde van de gediptheid. Daarmee is de geïntegreerde gediptheid een maat voor de blokbeweging.

Er wordt wel een drempelwaarde in acht genomen. De achterliggende gedachte hierbij is dat een bepaald stijghoogteverschil pas zal leiden tot een blokbeweging als tenminste het eigen gewicht (ΔD) en enige klemming (Γ_k) overschreden is.

Als drempelwaarde is voorlopig $0,4H_s$ genomen. Deze is afgeleid van een maximaal toelaatbare waarde van $H_s/(\Delta D) = 2,5\Gamma_k \approx 3$ à 5 . Dit leidt tot een drempel van $\Gamma_k \Delta D = H_s/2,5$.

De geïntegreerde gediptheid stelt ons in staat om een maat van voor de belastingsduur te bepalen. Met Figuur 2.17 wordt duidelijk dat de volgende formule een karakteristieke belastingsduur oplevert: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$.

De dipkracht is gelijk aan de integraal van de gediptheid op één tijdstip over het gebied waar de gediptheid boven de drempelwaarde komt (zie Figuur 2.18). De integraal wordt dus berekend vanaf x_1 tot x_2 . De dipkracht is een maat voor de totale opwaartse kracht die op de steenzetting werkt als gevolg van het stijghoogteverschil, minus het eigen gewicht. Deze kracht werkt over meerdere rijen blokken en kan een kattenrug veroorzaken. Bij het kattenrugmechanisme worden meerdere stenen als geheel enigszins opgelicht. Het mechanisme treedt op in gebieden met goed geklemde stenen. In Coeveld en Klein Breteler (2003) wordt verder op dit mechanisme ingegaan.



Figuur 2.18 Definitie van dipkracht

De dipimpuls is gelijk aan de integraal van de dipkracht als functie van de tijd gedurende de tijd dat deze positief is, maar slechts berekend tussen x_1 en x_2 , die bepaald zijn op het moment dat de gediptheid maximaal is. De dipimpuls is een maat voor de mogelijke beweging van een bepaald oppervlak van de steenzetting dat wat groter is dan één steen.

2.3 Stijghoogteverschil volgens Zsteen in relatie tot gediptheid

Ten behoeve van het onderzoek naar de stabiliteit van steenzettingen met een belasting door lange golven zijn een groot aantal berekeningen met het softwarepakket Zsteen gemaakt, zie Klein Breteler en Coeveld (2004). Dit heeft onder andere het maximale stijghoogteverschil, (ϕ_{wmax}) en het stijghoogteverschil met 2%-overschrijdingsfrequentie ($\phi_{w2\%}$) opgeleverd. Gezien het feit dat dit stijghoogteverschil zeer belangrijk is voor de grootte van de blokbeweging, is het zinvol de relatie te onderzoeken tussen dit stijghoogteverschil en de geselecteerde belastingeigenschappen. Omdat de gediptheid als belangrijkste eigenschap in Paragraaf 2.2 naar voren is gekomen, is de analyse op die parameter gericht.

Het stijghoogteverschil over de toplaag is afhankelijk van een aantal eigenschappen van de constructie, waarbij de leklengte en de helling van het talud de belangrijkste zijn. Een steenzetting met een lange leklengte (Constructie A) heeft bij dezelfde golfbelasting een groter stijghoogteverschil over de toplaag, dan een steenzetting met een korte leklengte (Constructie B).

Eigenschap	Constructie A	Constructie B
soort bekleding	blokken	zuilen
leklengte (Λ)	0,97 m	0,24 m
afmetingen (L x B)	0,5 m x 0,5 m	0,09 m ²
dikte toplaag (D)	0,35 m	0,25 m
spleetbreedte (s)	2,0 mm	-
openheid oppervlak	-	10%
klemfactor (Γ_k)	1	1
dichtheid blokken (ρ_{steen})	2300	2400
inwassing	nee	nee
gaten	nee	nee
wrijving toplagen en ondergrond	nee	nee
korrelgrootte filter (D_{f15})	8 mm	20 mm
laagdikte filter (b)	0,20 m	0,10 m
porositeit filter (n)	0,35	0,35
doorlatendheid onderste spleet	1(=volledig)	1(=volledig)
geotextiel	nee	nee
uitvullagen	geen	geen
X-links	0,00 m	0,00 m
Y-links	0,00 m	0,00 m
(X-rechts) talud 1:3	30,5 m	30,5 m
Y-rechts	10,00	10,00
SWL (h_{stil})	5,00 m	5,00 m
stormduur	4 uur	4 uur
initial phreatic head	5,00 m	5,00 m

Tabel 2.1 Eigenschappen van Constructie A en B

Voor deze analyse zijn daarom twee typen steenzettingen gekozen die representatief zijn voor de meerderheid van de steenzettingen in Nederland:

- Constructie A met een grote lek lengte, en
- Constructie B met een kleine lek lengte.

Voor beide constructies zijn berekeningen gemaakt met een talud van 1:3 en 1:4. De eigenschappen van de constructies zijn gegeven in Tabel 2.1, uitgedrukt in waarden op prototypeschaal. De golfcondities (golfhoogte en golfperiode) voor de berekeningen zijn zodanig gekozen, dat de gekozen golfcondities tot (begin van) schade leiden aan de constructie.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een dichtheid van water van $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

In Figuur C.1 is het stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie voor Constructie A uitgezet tegen de gediptheid. In Figuur C.2 is dit gedaan voor Constructie B. In Figuur C.3 en Figuur C.4 is het maximale stijghoogteverschil uitgezet voor Constructie A respectievelijk Constructie B.

In Figuur C.1 is te zien dat er een duidelijke relatie is tussen het stijghoogteverschil en de gediptheid, waarbij voor de verhouding geldt: $\phi_{w2\%}/\phi_{dip2\%} \approx 0,83$. Vrijwel alle punten wijken hier minder dan 20% van af. Voor Constructie B is de verhouding kleiner omdat ook de lek lengte kleiner was: $\phi_{w2\%}/\phi_{dip2\%} \approx 0,35$, zie Figuur C.2. De spreiding is wat groter dan voor Constructie A, maar nog steeds wijken de meeste punten minder dan 20% af.

Uit Figuur C.3 en Figuur C.4 zijn de volgende verhoudingen af te lezen: $\phi_{wmax}/\phi_{dipmax} \approx 0,75$ voor Constructie A en $\phi_{wmax}/\phi_{dipmax} \approx 0,32$ voor Constructie B. De spreiding van de punten is wat groter dan bij $\phi_{w2\%}$.

Aan de hand van de hoge correlatie tussen de gediptheid en het stijghoogteverschil volgens Zsteen kan geconcludeerd worden dat de gediptheid inderdaad een zeer goede parameter is om de grootte van de belasting mee te karakteriseren.

2.4 Conclusies ten aanzien van eigenschappen van golfbelasting

De analyse leidt tot de volgende conclusies ten aanzien van de belangrijkheid van de belastingeigenschappen voor de stabiliteit van steenzettingen. Het betreft zowel ingegoten, als niet-ingegoten steenbekledingen. Echter, als het gaat om parameters die aan de gediptheid gerelateerd zijn, dan blijft het toepassingsgebied beperkt tot open bekledingen met een lek lengte van $\Lambda = 0,5 \text{ m}$.

Golfklap

- De gediptheid (ϕ_{dip}) heeft de grootste correlatie met het maximale stijghoogteverschil over de toplaag en is daarmee de belangrijkste parameter.
- De golfklaphoogte (ϕ_k) en golfklapbreedte ($B_{klap50\%}$ of $B_{klap80\%}$) hebben een grote invloed op het maximale stijghoogteverschil over de toplaag.
- De klapgradiënt (aan de kant van de trog: ($\theta_{k20\%-50\%t}$ of $\theta_{k20\%-50\%k}$)) en de trogbreedte (B_{trog}) hebben een iets kleinere invloed, maar zijn wel belangrijk.

- De frontgradiënt ($\theta_{f20\%-50\%}$) tijdens de golfklap heeft een opmerkelijk kleine invloed op het maximale stijghoogteverschil.
- Lokale details in het stijghoogteverloop (zoals hier gevarieerd met de golfklapvorm) hebben alleen invloed op het maximale stijghoogteverschil bij een erg kleine lek lengte ($\Lambda = 0,3$ m).
- De trog-oppervlak-verhouding (O_{trog}) is ongeschikt om de golfklap mee te beschrijven.
- Het blijkt dat een driehoekig stijghoogteverloop van de golfklap het kleinste maximale stijghoogteverschil geeft, terwijl de afwijkende vormen (zie Figuur 2.9) een iets hoger verschil geven. De invloed van deze vorm is echter betrekkelijk klein.

Golffront

- De fronthoogte (ϕ_b) ten opzichte van minimale stijghoogte aan de voet van het front is een belangrijke parameter.
- De frontgradiënt (θ_f) gedefinieerd als de helling van de lijn van de voet van het front naar het snijpunt van het front met de stilwaterlijn is ook een belangrijke parameter.

Daarnaast is ook de duur van de belasting van belang. Dit is mede bepalend voor de grootte van de blokbeweging van niet-ingegoten steenzettingen en de grootte van de dwarskrachten en momenten in een ingegoten steenzettingen. Ten aanzien van de belastingsduur gaat het om:

- De duur van de golfklap.
- De stijgtijd van de golfklap.
- De duur van de opwaartse belasting, berekend uit gediptheid en geïntegreerde gediptheid: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$.

3 Analyse van golfklappen en golffronten

In Hoofdstuk 2 is aangegeven welke parameters of eigenschappen waarschijnlijk het meest relevant zijn ten aanzien van de golfbelasting op steenbekledingen, zowel ten tijde van de golfklap, als ten tijde van het golffront. In principe betreft het zowel ingegoten, als niet-ingegoten steenbekledingen. Als het gaat om parameters die aan de gediptheid gerelateerd zijn, dan blijft het toepassingsgebied beperkt tot open bekledingen met een leklengte van $\Lambda = 0,5$ m. In dit hoofdstuk is beschreven welke relaties er zijn tussen deze relevante eigenschappen van de golfbelasting en de taludhelling.

De analyse is primair gericht op grootschalig modelonderzoek met taluds van 1:3, 1:3,5 en 1:4. Daarnaast zijn ook de resultaten van kleinschalig modelonderzoek met relatief lange golven op een talud van 1:3 en 1:4 meegenomen (Kuiper en van Vossen, 2003). Door Coeveld en Klein Breteler (2004) was reeds een uitvoerige analyse gemaakt van laatstgenoemde proeven met dezelfde golfbelasting-analyse-software als die hier is gebruikt. Die resultaten zijn nu toegevoegd aan de figuren waarin de resultaten van het grootschalig modelonderzoek worden gepresenteerd, teneinde beide onderzoeken op elkaar te laten aansluiten.

3.1 Geanalyseerde proeven

Er is gebruik gemaakt van proeven uit drie verschillende grootschalige modelonderzoeken in de Deltagoot en een kleinschalig modelonderzoek in de Scheldegoot, die zijn uitgevoerd met verschillende taludhellingen en verschillende taludbekledingen (open, ingegoten, dicht):

- Grootschalig modelonderzoek:
 - metingen uit 1997 en 1998 met talud 1:3,5 en berm boven de waterlijn: Klein Breteler (2000),
 - metingen uit 1992 met talud 1:4: Derks en Klein Breteler (1992), en
 - metingen uit 1991 met talud 1:4: Wouters (1991).
- Kleinschalig modelonderzoek:
 - metingen uit 1993 en 2003 met talud 1:3 en 1:4: Van der Meer en De Waal (1993), Kuiper en van Vossen (2003) en de analyse van Klein Breteler en Coeveld (2004).

De grootschalige proeven die zijn meegenomen in de analyse zijn weergegeven Tabel B.1 in Bijlage B. In Tabel B.2 in Bijlage B is weergegeven hoeveel golven, golfklappen en golffronten er per proef gedetecteerd zijn. Voor de kleinschalige proeven wordt verwezen naar Klein Breteler en Coeveld (2004).

De geanalyseerde proeven bestaan elk uit ongeveer 1000 golven met vele golfklappen en golffronten. De analyse van al deze golven is gedaan met de golfbelasting-analyse-software beschreven in Bijlage A. Deze software levert voor elke golf de waarde van elke eigenschap van de golfklap en het golffront. De enorme hoeveelheid gegevens die dit heeft opgeleverd, is vervolgens statistisch geanalyseerd. Daarbij is vooral gekeken naar de maximale waarde van een bepaalde parameter in een bepaalde proef, en naar de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % (op basis van het aantal golven in de proef) en 10 %. In

sommige gevallen gaat het niet om de maximale, maar om de minimale waarde, en de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % en 10 %. Het gaat hierbij om de 2 % (of 10 %) overschrijdingswaarden ten opzichte van het aantal inkomende golven. Bij een totaal van 1000 golven is $\phi_{k2\%}$ de op 20 na grootste golfklap, ook al waren er bijvoorbeeld slechts 700 golven met een golfklap.

3.2 Eigenschappen van golfklappen en golffronten

De analyse van de maatgevende eigenschappen van de golfklappen en -fronten is uitgevoerd door deze allereerst in grafieken uit te zetten tegen de brekerparameter, ξ_{op} . Waar mogelijk is op het oog een ‘best-fit’ door de punten gemaakt, wat geresulteerd heeft in een aantal simpele formules die de betreffende parameter kwantificeren. In die gevallen dat deze grafieken geen duidelijke trend laten zien, of er een relatief grote spreiding van de meetpunten is, is er geïventariseerd of het uitzetten van de waarden tegen een andere parameter (bijvoorbeeld de golfsteilheid) duidelijkere resultaten oplevert.

Er is bij deze analyse echter ook gelet op de resultaten van Klein Breteler en Coeveld (2004), die een vergelijkbare analyse hebben uitgevoerd op proeven met relatief lange golven. De ervaringen bij die analyse zijn verwerkt in de huidige analyse.

In sommige gevallen was het nodig om de analyse te beperken tot alleen die golven die een grote golfklap of groot golffront hebben opgeleverd. Dit is bijvoorbeeld gedaan voor de breedte van de golfklap. Door alleen de breedtes van de grootste 33 % van de golfklappen te analyseren, is voorkomen dat het resultaat vertroebeld is door hele kleine, onbeduidende golfklappen. Deze selectie is gemaakt op basis van de waarde van ϕ_k als het om de grootste golfklappen gaat, en op basis van de waarde van ϕ_b als het om golffronten gaat.

Alle duidelijk herkenbare golfklappen tijdens de proeven zijn door de software geïdentificeerd. Het blijkt echter dat een deel van de golven geen duidelijke golfklap heeft. In Figuur C.5 is het aantal golfklappen per totaal aantal golven per proef weergegeven. Het blijkt dat het aantal sterk afneemt als de golven langer worden (toenemende waarde van de brekerparameter, ξ_{op}). Het aantal golffronten neemt niet af als de golven langer worden, zie Figuur C.5. Het blijkt dat de meeste golfklappen en de minste golffronten optreden als $1,6 < \xi_{op} < 2,2$. Als de waarde van ξ_{op} groter wordt, neemt het aantal golfklappen af, hetgeen ook te verwachten is aan de hand van het veranderen van het brekertype (van ‘plunging’ naar ‘surging breaker’). Het is opmerkelijk dat er 6 grootschalige proeven zijn met $1,7 < \xi_{op} < 2,1$ en een kleinschalige proef met $\xi_{op} = 2,45$ die veel minder golfklappen hebben dan de overige proeven. Deze metingen wijken duidelijk af van de trend en het is onduidelijk waar dit een gevolg van is. Er is geen verschil te zien tussen grootschalige en kleinschalige proeven.

Een gering aantal golven met een golfklap had als consequentie, dat soms de waarde met een overschrijdingsfrequentie van 10 % niet bepaald kon worden. Immers, als er 1000 golven waren en minder dan 100 golfklappen, dan is er geen op 100 na grootste golfklap.

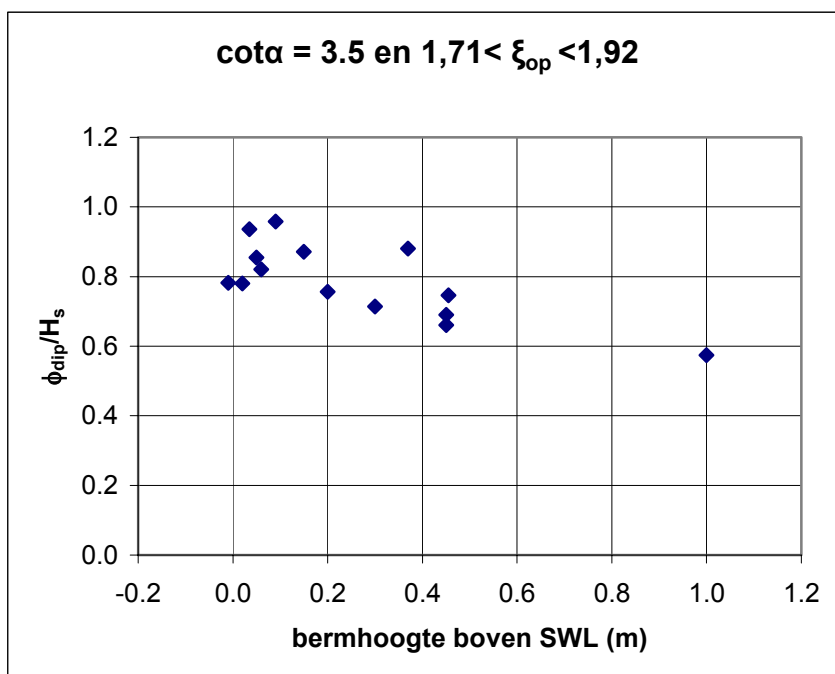
Onderstaand is voor alle in Hoofdstuk 2 geselecteerde eigenschappen een korte beschrijving gegeven aan de hand van de figuren die zijn gemaakt met, bij voorkeur, de dimensieloze waarden op de verticale as en bijvoorbeeld de brekerparameter op de horizontale as. Gezien

het feit dat de maximale waarden steeds een grote spreiding vertonen, is de analyse voornamelijk gericht op de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 %.

3.2.1 Gediptheid

Een belangrijke parameter voor de stabiliteit van niet-ingegoten steenzettingen is de gediptheid, die evenredig is met het stijghoogteverschil over de toplaag.

In Figuur C.6 is de gediptheid weergegeven tijdens de golfklap als functie van $\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$, omdat op deze manier volgens Klein Breteler en Coeveld (2004) de trend goed wordt weergegeven met een betrekkelijk kleine spreiding. Uit de figuur blijkt echter, dat vooral bij $\xi_{op} \approx 1,8$ de spreiding erg groot is. Het betreft hier de metingen die resulteren uit grootschalig modelonderzoek uit 1997 en 1998 met een talud van 1:3,5 en een berm op 5,0 m boven de gootbodern.



Figuur 3.1 Gediptheid tijdens golfklap als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek

In Figuur 3.1 is getoond dat het niveau van de berm ten opzichte van de waterlijn invloed heeft op de gediptheid. Wellicht wordt dit veroorzaakt door de golfneerloop van de vorige golf, en die golfneerloop wordt beïnvloed door de berm.

Aan de hand van de figuur kan geconcludeerd worden dat een deel van de spreiding van de punten bij $\xi_{op} \approx 1,8$ veroorzaakt wordt door de invloed van de berm.

De trend in de waarden voor ϕ_{dip}/H_s met de 2% overschrijdingsfrequentie kan globaal benaderd worden met:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,01 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 0,82; \quad \text{voor } 4,8 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 12 \\ \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = -0,02 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 1,18; \quad \text{voor } 12 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 23,2 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Wanneer alleen bij de hoogste 33% (ϕ_k) van de golfklappen naar de gediptheid gekeken wordt, dan blijven de maximale waarden en de waarden met de 2%-overschrijdingsfrequentie vrijwel onveranderd. Dit duidt erop, dat de grootste gediptheid optreedt tijdens de grootste golfklappen. In Figuur C.7 is dit met een viertal proeven geïllustreerd.

Gezien het feit dat de gediptheid een maat zou moeten zijn voor het stijghoogteverschil over de toplaag is het zinvol om dit te vergelijken met gemeten stijghoogteverschillen. Daartoe wordt gebruik gemaakt van de empirische relatie die afgeleid is uit grootschalig modelonderzoek uit 1997 en 1998 met rechthoekige blokken op een dun filter laagje (Klein Breteler, 2000). Die empirische formule voor het stijghoogteverschil met een 2%-overschrijdingsfrequentie is:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 3,3 \cdot 10^{-4} \frac{c_w^{3/2} \left(0,7 + 4k / \sqrt{gD} \right)}{g \sqrt{H_s T_p}}; \quad \text{voor } H_s T_p > 6 \text{ ms} \\ \frac{\phi_{w2\%}}{H_s} = 0,8 \left(0,7 + \frac{4k}{\sqrt{gD}} \right); \quad \text{voor } H_s T_p \leq 6 \text{ ms} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

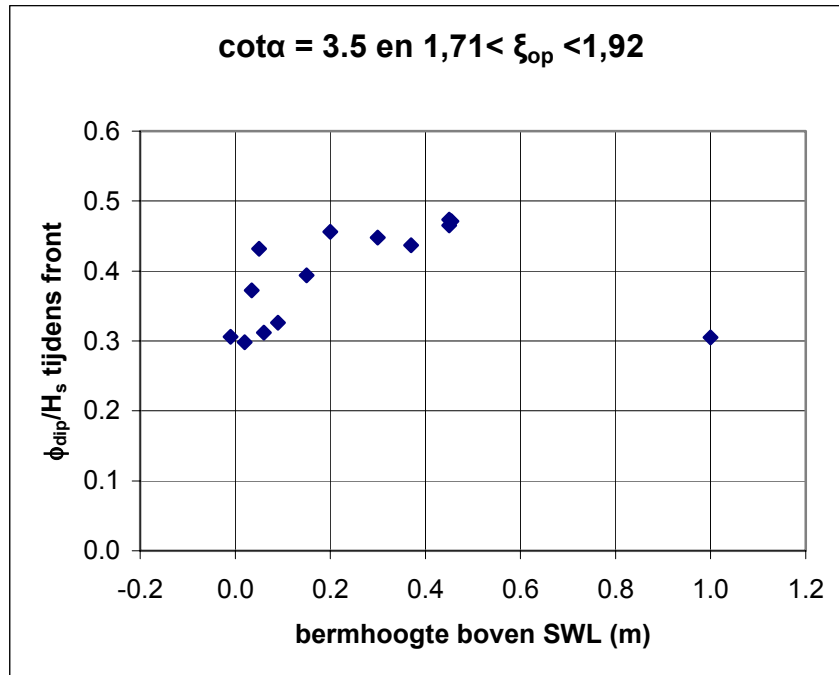
waarin:

- $\phi_{2\%}$ = stijghoogteverschil met overschrijdingspercentage van 2% (m)
- H_s = significante golfhoogte (m)
- c_w = voortplantingssnelheid van drukgolven in water (m/s),
- k = doorlatendheid van het filter (m/s)
- g = valversnelling (= 9,81 m/s²)
- D = blokdikte (m)
- T_p = piekperiode van golven (s)

In Figuur C.8 is Formule (3.2) toegevoegd met $c_w = 1485$ m/s, de laagdikte $D = 0,25$ m, en de doorlatendheid van het filter $k = 0,05$ m/s (ondergrens) en $k = 0,20$ m/s (bovengrens). Uit de figuur volgt dat de orde van grootte van de gediptheid goed overeenkomt met de empirische formule voor het stijghoogteverschil over de toplaag. De licht dalende trend voor grote golven ($H_s T_p > 6$) komt in de gediptheid niet tot uiting. Het is denkbaar dat dit aan de metingen ligt, omdat bij dergelijk grote golven de blokken tijdens de meting mogelijk iets bewogen hebben, waardoor de gemeten stijghoogteverschillen wat kleiner zijn dan zonder die beweging. Dit probleem was ook al genoemd door Klein Breteler (2000).

In Figuur C.9 is de gediptheid weergegeven tijdens het golffront. Er is wederom sprake van een behoorlijke spreiding bij $\xi_{op} \approx 1,8$ (metingen uit 1997 en 1998 met een talud van 1:3,5 en een berm op 5,0 m boven de gootbodem). In Figuur 3.2 is te zien dat er weer een

duidelijk verband is met het niveau van de berm ten opzichte van de waterlijn. Dit keer stijgt echter de waarde van de gediptheid met toenemende bermhoogte, terwijl er bij de golfklap sprake was van een afname.



Figuur 3.2 Gediptheid tijdens golffront als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek

Afgezien van de invloed van het bermniveau nemen de waarden van $\phi_{dip2\%}/H_s$ toe over de volle range van ξ_{op} . De toename is het grootst voor waarden van $\xi_{op} < 2,5$. De trend wordt weergegeven door de volgende formule:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,15\xi_{op} - 0,055; \text{ voor } 1 \leq \xi_{op} < 2,5 \\ \frac{\phi_{dip2\%}}{H_s} = 0,06\xi_{op} + 0,28; \text{ voor } 2,5 \leq \xi_{op} < 6 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

In alle gevallen is de gediptheid tijdens het golffront kleiner dan tijdens de golfklap.

Het blijkt, dat $\phi_{dip2\%}/H_s$ ongeveer 0,8 bedraagt bij deze grootschalige proeven voor de gediptheid tijdens de golfklap bij $\xi_{op} \approx 2$. Bij het onderzoek naar de invloed van lange golven op de stabiliteit van steenzettingen (Klein Breteler en Coeveld, 2004) is gebleken, dat bij de kleinschalige proeven $\phi_{dip2\%}/H_s$ ongeveer 0,9 bedraagt. Bij de gediptheid tijdens het golffront is bij de grootschalige proeven vastgesteld, dat $\phi_{dip2\%}/H_s$ grofweg rond de 0,3 ligt bij $\xi_{op} \approx 2$. Bij de kleinschalige proeven bedraagt $\phi_{dip2\%}/H_s$ bij $\xi_{op} \approx 2$ ook ongeveer 0,3. De resultaten van de kleinschalige en de grootschalige proeven sluiten derhalve mooi op elkaar aan.

In Figuur C.10 is voor een viertal proeven de gediptheid tijdens het steilste golffront tegen de hoogte van het golffront weergegeven. De gediptheid neemt duidelijk toe met toenemende fronthoogte.

3.2.2 Geïntegreerde gediptheid

De geïntegreerde gediptheid kan beschouwd worden als een maat voor de blokbeweging. Het is de integraal over de tijd van de gediptheid (minus een drempelwaarde) voor zolang deze groter is dan deze drempelwaarde. De drempelwaarde bedraagt $0,4H_s$ en is vergelijkbaar met het eigen gewicht van de toplaag met enige klemming.

In Figuur C.11 is de geïntegreerde gediptheid weergegeven tijdens de golfklap. De geïntegreerde gediptheid is dimensieloos gemaakt door te delen door het product van H_s en T_p . Het valt op, dat de kleinschalige modelresultaten een veel lagere waarde voor $\phi_{\text{dip}}/(H_s T_p)$ met de 2%-overschrijdingsfrequentie geven dan de grootschalige resultaten. Dit kan veroorzaakt worden door de manier waarop de geïntegreerde gediptheid dimensieloos gemaakt is. Daarom is in Figuur C.12 de geïntegreerde gediptheid slechts gedeeld door de golfhoogte H_s , omdat dit waarschijnlijk de primaire grootte is die de grootte van de blokbeweging (en dus de geïntegreerde gediptheid) bepaald. Voor de kleinschalige resultaten met $\xi_{\text{op}} > 2,5$ levert dit een minder mooi resultaat. De spreiding is daar namelijk toegenomen. De meetpunten met een taludhelling van 1:3 liggen consequent lager dan die met een taludhelling van 1:4. De grootschalige meetpunten liggen nu wel op vergelijkbare hoogte als de kleinschalige punten.

In Figuur C.12 is te zien dat de meetpunten van het grootschalige onderzoek uit 1992 beduidend hoger liggen dan de andere meetpunten. Voor dit onderzoek was in Figuur C.5 te zien dat het aantal golfklappen wat hoger is dan voor de andere proeven. Het is niet duidelijk wat de reden hiervan is en of er een verband is tussen beide constatering.

Zoals reeds vastgesteld was door Klein Breteler en Coeveld (2004) is het nog steeds moeilijk om de geïntegreerde gediptheid op de juiste manier dimensieloos te maken. Dit probleem maakt het moeilijk om de metingen goed te interpreteren.

In Figuur C.13 is de dimensieloze geïntegreerde gediptheid $\phi_{\text{dip}}/(H_s T_p)$ weergegeven tijdens het golffront. Voor $\xi_{\text{op}} < 2$ zijn er een groot aantal punten waarbij de geïntegreerde gediptheid nul is, omdat er voor het berekenen van de geïntegreerde gediptheid een drempel van $0,4H_s$ gehanteerd wordt. Alleen de gediptheid die hierboven komt wordt geïntegreerd. Verder resulteert dit in een grotere spreiding: een kleine spreiding in de gemeten gediptheden komt dan als een veel grotere spreiding terug in de geïntegreerde gediptheden.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{\int_{\text{dip}2\%}}}{H_s T_p} = \frac{\xi_{\text{op}}}{70} - 0,0214; \text{ voor } 1,5 \leq \xi_{\text{op}} < 2,2 \\ \frac{\phi_{\int_{\text{dip}2\%}}}{H_s T_p} = \frac{0,01}{(\xi_{\text{op}} - 1,2)^{1,2}}; \text{ voor } 2,2 \leq \xi_{\text{op}} < 6 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Het is opmerkelijk dat voor vele proeven, vooral als $\xi_{\text{op}} > 2,5$, de geïntegreerde gediptheid tijdens de golfklap gelijk is aan die tijdens het golffront. Waarschijnlijk is dit een gevolg van het feit dat het bij deze proeven niet goed mogelijk is om onderscheid te maken tussen de

golfklap en het golffront, omdat ze direct aansluitend optreden. Als er geen scheiding is te zien tussen deze gebeurtenissen, dan wordt door de golfbelasting-analyse-software in de huidige opzet de geïntegreerde gediptheid van zowel de golfklap, als het golffront tezamen berekend. Voor het doel waarvoor dit uiteindelijk gebruikt wordt, is het geen probleem dat beide tezamen berekend worden. Als immers de belasting tussentijds niet wegvalt, zal ook de blokbeweging gewoon voortgezet worden. De totale blokbeweging zal dan gerelateerd zijn aan de totale geïntegreerde gediptheid over golfklap en golffront tezamen. In het vervolg zal de aandacht vooral gericht worden op de geïntegreerde gediptheid tijdens de golfklap, of tijdens de golfklap en het golffront tezamen als er geen onderscheid te maken is.

Er wordt voorlopig getwijfeld aan de praktische toepasbaarheid van de geïntegreerde gediptheid. Enerzijds moet het een maat zijn voor de blokbeweging, maar anderzijds is het nog niet mogelijk kwantitatief de link te leggen met de blokbeweging. Het is in feite een impulsbelasting, die een zekere mate van blokbeweging zou kunnen gaan veroorzaken. Pas als deze relatie kwantitatief is uitgewerkt, wordt de geïntegreerde gediptheid pas praktisch bruikbaar. Dat valt echter buiten het kader van onderhavig onderzoek.

Wel kan er praktisch gebruik gemaakt worden van de geïntegreerde gediptheid voor het bepalen van de belastingsduur, zie Paragraaf 3.2.7.

3.2.3 Dipkracht

De dipkracht, F_{dip} , is gelijk aan de integraal van de gediptheid over de gehele steenzetting, als de gediptheid groter is dan een bepaalde drempelwaarde (drempel = $0,4H_s$), minus deze drempel waarde. Met deze definitie is de dipkracht vergelijkbaar met de totale omhoog gerichte kracht die het stijghoogteverschil uitoefent op de steenzetting minus het eigen gewicht (en enige klemming) van de steenzetting. Het geeft dus de kracht weer, die beschikbaar is om de steenzetting op te lichten.

In Figuur C.14 is de dipkracht weergegeven tijdens de golfklap. In de figuur is de dipkracht dimensieloos gemaakt door te delen door H_s^2 . Uit de figuur blijkt dat de grootschalige metingen en de kleinschalige metingen mooi op elkaar aansluiten. Verder is te zien dat F_{dip}/H_s^2 licht toeneemt met toenemende ξ_{op} . De spreiding is echter aanzienlijk. De toename kan beschreven worden met de volgende formule:

$$\frac{F_{dip2\%}}{H_s^2} = \frac{\xi_{op}}{35} + \frac{1}{23.33}; \text{ voor } 1 \leq \xi_{op} < 6 \quad (3.5)$$

Aan de hand van de dipkracht kan een indruk verkregen worden van de breedte van een strook van de steenzetting die een opwaartse belasting te verwerken krijgt. Door de dipkracht te delen door de gediptheid (minus de drempelwaarde), wordt een maat verkregen voor de gemiddelde breedte waarop de opwaartse kracht werkt: $F_{dip}/(\phi_{dip}-0,4H_s)$.

In Figuur C.15 is deze belaste breedte weergegeven, dimensieloos gemaakt door te delen door H_s , als functie van de brekerparameter. Alleen de grootste 33 % (ϕ_k) van de golfklappen zijn in beschouwing genomen.

Ondanks de spreiding in de maximale waarden en de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % en 10 %, kan er toch een dalende tendens waargenomen worden. Deze kan beschreven worden met:

$$\left(\frac{F_{dip}}{\phi_{dip} - 0,4H_s} \right)_{2\%} / H_s = -0,06\xi_{op} + 0,46; \text{ voor } 1 \leq \xi_{op} < 5 \quad (3.6)$$

In Figuur C.16 is de dipkracht weergegeven tijdens het golffront. Opvallend is het geringe aantal waarden. De gediptheid tijdens het golffront is blijkbaar vaak kleiner dan $0,4H_s$, zie ook Figuur C.9. Er zijn te weinig waarden om een trend te ontdekken.

3.2.4 Dipimpuls

De dipimpuls is gelijk aan de dipkracht (totale omhoog gerichte kracht op een strook van de steenzetting) vermenigvuldigd met de duur dat deze kracht aanwezig is. Het zou een maat kunnen zijn voor de beweging van een strook van de steenzetting. De relatie met de beweging is echter moeilijk kwantitatief uit te werken, waardoor het praktisch belang van deze parameter nog niet zo groot is.

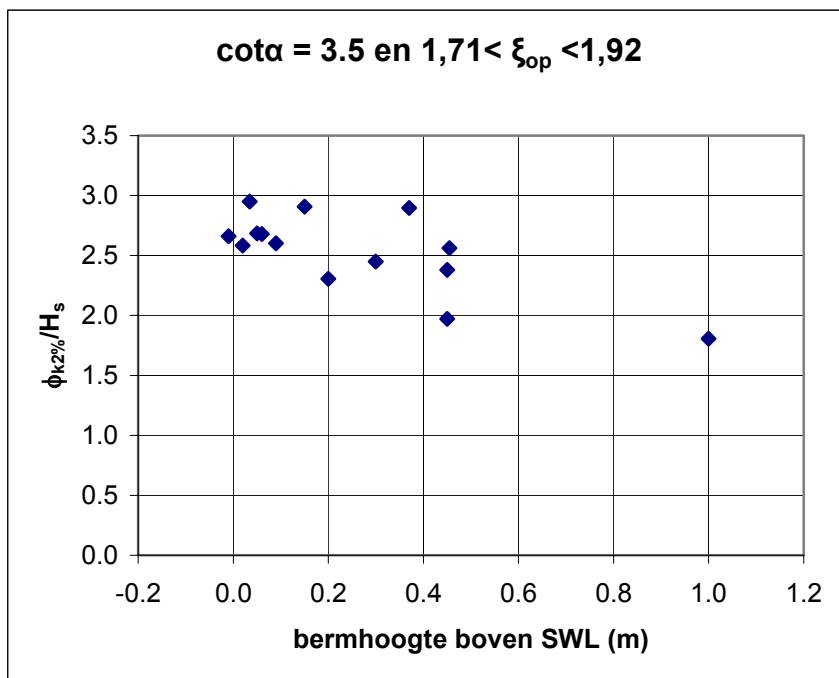
In Figuur C.17 is de dipimpuls weergegeven tijdens de golfklap: $I_{dip}/(T_p H_s^2)$. Uit de figuur blijkt, dat er voor zowel de maximale waarden voor I_{dip} , als de waarden met de 2%- en 10%-overschrijdingsfrequentie weer sprake is van een zeer grote spreiding. In Figuur C.18 is voor een viertal proeven de overschrijdingskromme van de dipimpuls weergegeven, waarbij het overschrijdingspercentage is gebaseerd op het aantal inkomende golven.

In Figuur C.19 is de dipimpuls weergegeven tijdens het golffront. Er zijn heel weinig waarden gevonden, net als bij de dipkracht tijdens het golffront.

3.2.5 Golfklaphoogte

In Figuur C.20 is de stijghoogte van de golfklap weergegeven ten opzichte van de trog: ϕ_k . Er is weer een grote spreiding te zien bij $\xi_{op} \approx 1,8$ (metingen uit 1997 en 1998 met een talud van 1:3,5 en een berm op 5,0 m boven de gootbodern). In Figuur 3.3 zijn de betreffende meetpunten uitgezet als functie van de bermhoogte. Net als bij de gediptheid blijkt er een afhankelijkheid te zijn van de hoogte van de berm ten opzichte van de stilwaterlijn. Hiermee wordt een deel van de spreiding verklaard. De overblijvende spreiding is vergelijkbaar met die in de meetpunten van de proeven met een recht talud.

In Figuur C.20 is verder te zien dat de resultaten van het grootschalige modelonderzoek vrij goed aansluiten op het kleinschalige modelonderzoek als rekening wordt gehouden met de invloed van de berm. Het valt op dit punt derhalve mee met de oorspronkelijk verwachte schaafeffecten.



Figuur 3.3 Stijghoogte van golfklap ten opzichte van trog als functie van bermhoogte voor grootschalig modelonderzoek

Er is sprake van een dalende tendens als $\xi_{op} > 2$. Voor $\xi_{op} < 2$ is er nog sprake van een licht stijgende tendens:

$$\begin{cases} \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 0,25\xi_{op} + 2,5; & \text{voor } 1 \leq \xi_{op} < 2 \\ \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = -0,25\xi_{op} + 3,5; & \text{voor } 2 \leq \xi_{op} < 6 \end{cases} \quad (3.7)$$

De twee groepen meetpunten behorende bij een talud van respectievelijk 1:3 en 1:4 liggen ongeveer op elkaar. Opmerkelijk is wel dat voor $\xi_{op} > 4$ de metingen behorende bij een talud van 1:4 allemaal lager liggen dan die behorende bij 1:3. Dit is een aanwijzing dat de spreiding kleiner wordt als de meetpunten worden uitgezet als functie van de golfsteilheid. Om het beeld van de figuur ongeveer gelijk te houden aan die van Figuur C.20 is in Figuur C.21 op de horizontale as $\xi_{op}/\tan\alpha = 1/\sqrt{s_{op}}$ uitgezet. Hierdoor wordt de spreiding wat minder. De volgende formule sluit goed aan op de metingen:

$$\begin{cases} \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 0,215 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 0,8625; & \text{voor } 3,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 7,5 \\ \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = -0,8 \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} + 3,6; & \text{voor } 7,5 \leq \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} < 25 \end{cases} \quad (3.8)$$

In de literatuurstudie door Coeveld (2003a) komt een relatie voor regelmatige golven naar voren voor de maximale stijghoogte tijdens de golfklap op het talud (Formule 4.1 tot en met

Formule 4.3 in Coeveld (2003a)) en voor de diepte waarop de golfklap plaatsvindt (Formule 4.5 in Coeveld (2003a)). Door deze formules te combineren, kan een indicatie verkregen worden voor de golfklaphoogte ten opzichte van de trog. Voor regelmatige golven tot 1 m geldt dan:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 3,5\xi_{op} - 0,3\xi_{op}^{1,25}; \text{ voor } \xi_{op} \leq 1,4 \\ \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 9,5\xi_{op}^{-2} - 0,3\xi_{op}^{1,25}; \text{ voor } 1,4 < \xi_{op} < 3 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Voor regelmatige golven tussen 1 en 1,5 m geldt dan:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 3,0\xi_{op} - 0,3\xi_{op}^{1,25}; \text{ voor } \xi_{op} \leq 1,4 \\ \frac{\phi_{k2\%}}{H_s} = 7,7\xi_{op}^{-2} - 0,3\xi_{op}^{1,25}; \text{ voor } 1,4 < \xi_{op} < 3 \end{array} \right. \quad (3.10)$$

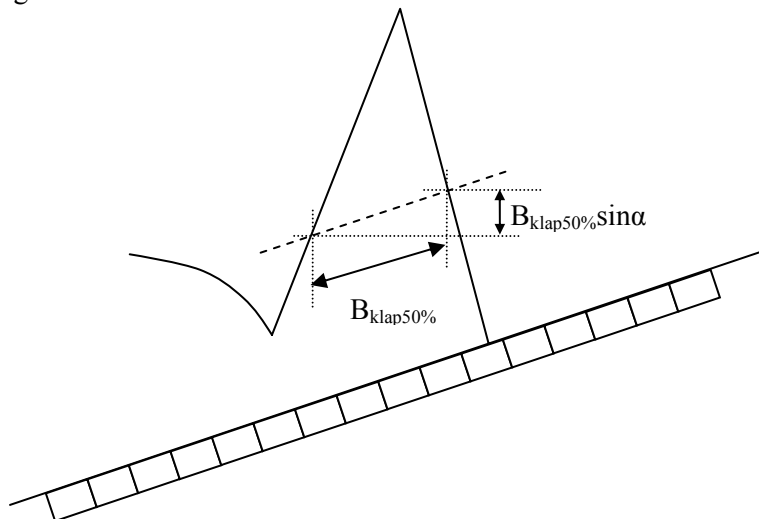
Voor $\xi_{op} = 2$ levert dit respectievelijk $\phi_{k2\%}/H_s \approx 1,7$ (kleine golven) of $\phi_{k2\%}/H_s \approx 1,2$ (grote golven) op, terwijl de huidige metingen aangeven dat $\phi_{k2\%}/H_s \approx 3$. Het verloop van zowel Formule (3.9), als Formule (3.10) sluit dus niet goed aan op de proeven. Opgemerkt dient te worden, dat de overschrijdingsfrequentie van ϕ_k bij regelmatige golven een andere verdeling heeft dan bij onregelmatige golven. Bij regelmatige golven wordt de verdeling voornamelijk bepaald door de niet-reproduceerbaarheid van de belasting.

Tijdens constante golfcondities, en zelfs tijdens regelmatige golven, vertoont elke golfklap een andere maximale waarde van ϕ_k , maar ook wat betreft de andere eigenschappen. Het is denkbaar dat dit voor een deel veroorzaakt wordt door de golfneerloop van de vorige golf die een dunne waterlaag achterlaat op het talud. De golfklap valt neer op deze waterlaag. (In Bijlage A is meer in detail beschreven op wat voor manier de laagdikte door de golfbelasting-analyse-software bepaald wordt.) Naarmate de waterlaag dikker is, zou de dempende werking van de waterlaag sterker kunnen zijn. Het is dus denkbaar dat de dikte van de waterlaag invloed heeft op de grootte van de golfklap. Om dit te beoordelen is in Figuur C.22 voor een viertal proeven de grootte van de golfklap uitgezet tegen de dikte van de waterlaag (beide dimensieloos gemaakt door te delen door de golfhoogte H_s), waarbij elk punt het resultaat van een specifieke golfklap vertegenwoordigd. Als de dikte van de waterlaag belangrijk is voor de grootte van de golfklap en werkt als een demping, zou in deze figuur een puntenwolk ontstaan rond een lijn van links boven naar rechts onder. In de figuren is te zien dat dit niet het geval is.

In Figuur C.23 is voor alle geanalyseerde proeven de gemiddelde dikte van het waterlaagje dat aanwezig is vlak voor de 33% grootste golfklappen (ten aanzien van de waarde van ϕ_k) uitgezet als functie van ξ_{op} . In deze figuur is een lichte toename van de dimensieloze laagdikte waar te nemen voor een toenemende ξ_{op} . Resultaten uit groot- en kleinschalig modelonderzoek sluiten goed op elkaar aan.

3.2.6 Golfklapbreedte

In Figuur C.24 is de golfklapbreedte halverwege de klaphoogte ($B_{\text{klap}50\%}$) weergegeven, dimensieloos gemaakt door te delen door de golfhoogte H_s . In aansluiting op de analyse van Klein Breteler en Coeveld (2004) is de breedte van de golfklap niet in horizontale zin uitgezet, maar het hoogteverschil waarover de golfklap zich uitstrekt: $B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha$, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Hoogteverschil waarover de golfklap zich uitstrekt: $B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha$

De maximale waarden van $B_{\text{klap}50\%}\sin\alpha/H_s$ vertonen de meeste spreiding. Het blijkt dat de resultaten van het grootschalig modelonderzoek weer goed aansluiten op die van het kleinschalige onderzoek, waarbij de volgende relatie blijkt te voldoen:

$$\frac{B_{\text{klap}50\%} \sin \alpha}{H_s} = -0,0325\xi + 0,2525; \text{ voor } 1 < \xi_{op} < 5 \quad (3.11)$$

De grootte van de golfklap ϕ_k neemt van $\xi_{op} \approx 2$ tot $\xi_{op} \approx 4$ met ongeveer 20 % af, terwijl dan de breedte van de golfklap ongeveer 35 % afneemt. Hieruit blijkt dat de golfklappen bij toenemende ξ_{op} relatief smaller worden, en dus steilere flanken krijgen.

3.2.7 Belastingduur

De grootte van de blokbeweging wordt bepaald door twee belastingeigenschappen: het maximale stijghoogteverschil, en de duur dat het stijghoogteverschil groter is dan het eigen gewicht en de klemming. In deze paragraaf wordt de aandacht gericht op de duur van de belasting.

Voor niet-ingegoten steenzettingen met een lekengte van $\Lambda = 0,5$ kan de duur van de belasting geschat worden aan de hand van de geïntegreerde gediptheid: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$. Het dimensieloos maken van deze duur, zodat de resultaten van kleinschalig en grootschalig modelonderzoek vergeleken kunnen worden, is echter nog wel een probleem. In Figuur C.25 tot en met Figuur C.27 zijn de resultaten op drie manieren gepresenteerd:

1. Met dimensie (seconde): $\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$
2. Dimensieloos door te delen door de golfperiode: $[\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)]/T_p$
3. Dimensieloos door te delen door de golfhoogte: $[\phi_{\text{dip}}/(\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)]/\sqrt{(H_s/g)}$

In Figuur C.25 tot en met Figuur C.27 liggen maxima en 2%-overschrijdingswaarden erg ver uit elkaar. Om een trend in de 2%-overschrijdingswaarden te kunnen ontdekken zijn de data ook weergegeven in een figuur waar het bereik op de verticale as verkleind is. Uit de figuren blijkt, dat als $\xi_{\text{op}} < 2$ de spreiding in de 2%-overschrijdingswaarden erg groot is ongeacht de presentatie. Als $\xi_{\text{op}} > 2$ lijkt de belastingsduur af te nemen bij toenemende brekerparameter.

Voor ingegoten bekledingen is de duur van de golfklap en de stijgtijd van belang. In Bijlage A is beschreven op welke manier de golfklapduur en de stijgtijd bepaald worden door de golfbelasting-analyse-software. De golfklap is in Figuur C.28 weergegeven tegen $\xi_{\text{op}}/\tan\alpha$. De 2%-overschrijdingswaarden van de golfklapduur vertonen een grote spreiding voor het grootschalig modelonderzoek (als $\xi_{\text{op}} < 2$). De spreiding is kleiner voor het kleinschalig modelonderzoek. De trend van de resultaten uit het kleinschalig onderzoek kan beschreven worden met (Formule (3.12) heeft secondes als dimensie):

$$\begin{cases} t_{k2\%} = -0,008 \frac{\xi_{\text{op}}}{\tan \alpha} + 0,125; & \text{voor } 4,8 \leq \frac{\xi_{\text{op}}}{\tan \alpha} < 10 \\ t_{k2\%} = 5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\xi_{\text{op}}}{\tan \alpha} - 10 \right)^4 + 0,045; & \text{voor } 10 \leq \frac{\xi_{\text{op}}}{\tan \alpha} < 17 \end{cases} \quad (3.12)$$

In Figuur C.29 is de stijgtijd weergegeven. Wederom is de grootste spreiding waarneembaar voor het grootschalig modelonderzoek. Het kleinschalig onderzoek vertoont een vrij constante stijgtijd met toenemende brekerparameter. Deze stijgtijd bedraagt ongeveer 0,015 s.

3.2.8 Trogbreedte

De zone met een lage stijghoogte op het talud, tussen de golfklap en de restanten van het zeewaarts daarvan gelegen front, wordt de trog genoemd.

In Figuur C.30 is de trogbreedte weergegeven van de grootste (ϕ_k) 33% van de golfklappen. De maximale waarden van $B_{\text{trog50\%}}/H_s$ vertonen een zeer grote spreiding. De waarden van $B_{\text{trog50\%}}/H_s$ met een overschrijdingsfrequentie van 2% laten een redelijk constant verloop zien met toenemende brekerparameter en een waarde die overeenkomt met die voor de golfklapbreedte:

$$\frac{B_{\text{trog50\%2\%}}}{H_s} = 0,7 \quad (3.13)$$

Bij de trogbreedte $B_{\text{trog50\%}}$ is gekeken naar de grootste (ϕ_k) 33% van de golfklappen. Deze selectie heeft tot gevolg dat de waarden van $B_{\text{trog50\%}}$ met een overschrijdingsfrequentie van 2% iets lager zijn komen te liggen.

3.2.9 Gradiënt van de golfklap

De golfklap kent steile stijghoogteflanken ter weerszijden van het punt waar de maximale stijghoogte op het talud plaatsvindt. De flank aan de zeezijde is het belangrijkste voor de stabiliteit.

Er is gekeken naar 2 verschillende gradiënten van de golfklap, namelijk:

- de gemiddelde klapgradiënt tussen de locaties waar de stijghoogte (ten opzichte van het minimum in de trog) in de *klap* gelijk is aan 20% en 50% van de fronthoogte ($\theta_{k20\%-50\%f}$), en
- de gemiddelde klapgradiënt tussen de locaties waar de druk op het talud (stijghoogte ten opzichte van het talud) in de *klap* gelijk is aan 50% en 80% van het maximum ($\theta_{k50\%-80\%k}$).

Bij deze gradiënten aan de zeezijde van de golfklap is gekeken naar de grootste (ϕ_k) 33% van de golfklappen.

De maximale waarden van $\theta_{k20\%-50\%f}$ liggen tegen de 90° , zie Figuur C.31. De meeste waarden van $\theta_{k20\%-50\%f}$ met een 2%-overschrijdingsfrequentie liggen rond de 82° , maar nemen sterk af als $\xi_{op} > 3,5$ tot een waarde van ongeveer 35° . De trend is ongeveer als volgt:

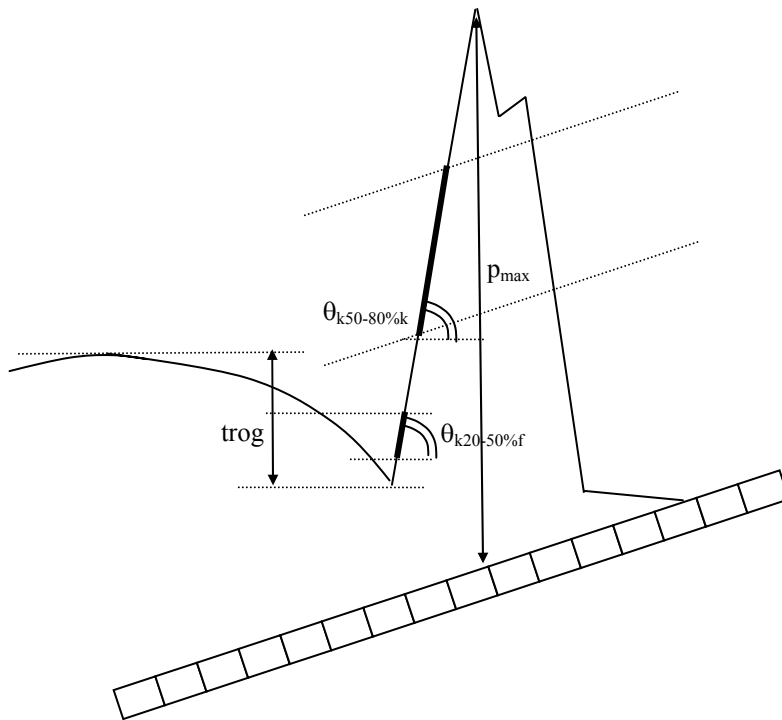
$$\begin{cases} \theta_{k20\%-50\%f 2\%} = 82^\circ; & \text{voor } \xi_{op} \leq 3,5 \\ \theta_{k20\%-50\%f 2\%} = 222^\circ - 40^\circ \xi_{op}; & \text{voor } 3,5 < \xi_{op} < 5 \end{cases} \quad (3.14)$$

De maximale waarden van $\theta_{k50\%-80\%k}$ liggen ook tegen de 90° , zie Figuur C.32. De waarden van $\theta_{k50\%-80\%k}$ met een 2%-overschrijdingsfrequentie liggen rond de 84° , maar nemen sterk af als $\xi_{op} > 3,5$ tot een waarde van ongeveer 35° . De trend is ongeveer als volgt:

$$\begin{cases} \theta_{k50\%-80\%f 2\%} = 84^\circ; & \text{voor } \xi_{op} \leq 3,5 \\ \theta_{k50\%-80\%f 2\%} = 241^\circ - 45^\circ \xi_{op}; & \text{voor } 3,5 < \xi_{op} < 5 \end{cases} \quad (3.15)$$

Proef sz626 wijkt het meest van deze 84° af. Wellicht heeft het geringe aantal golfklappen hier mee te maken.

Gezien het feit dat $\theta_{k50\%-80\%k}$ ongeveer gelijk is aan $\theta_{k20\%-50\%f}$ kan geconcludeerd worden, dat het stijghoogteverloop aan de zeezijde van de golfklap ongeveer een rechte lijn volgt. Bovendien is deze lijn zeer steil, zie Figuur 3.5.



Figuur 3.5 Gradiënten aan zeezijde van de golfklap

3.2.10 Hoogte van het stijghoogtefront

Vlak voordat de golfklap op het talud terechtkomt, is er een steil golffront dat ook een belangrijke belasting op de steenzetting kan geven. De eigenschappen van het bijbehorende stijghoogtefront, zoals helling en hoogte, zijn in deze en de volgende paragraaf nader belicht. De belasting tijdens het steile stijghoogtefront kan voor relatief dichte steenzettingen op een open filter belangrijker zijn dan die tijdens de golfklap.

In Figuur C.33 is de hoogte van het golffront (ϕ_b) weergegeven als functie van de brekerparameter. Zowel de maximale waarden, als de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % en 10 % laten een toename zien in ϕ_b/H_s bij toenemende ξ_{op} . Bij waarden van $\xi_{op} > 4$ lijkt de toename iets minder groot te worden.

In Figuur C.33 is Formule 2.9 uit De Waal *et al.* (1995) toegevoegd,

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,27 \frac{\gamma_{\phi b} \xi_{op}}{(\tan \alpha)^{0,75}}; \text{ met als maximum: } \frac{\phi_b}{H_s} \leq 2,5 \gamma_{\phi b} \tag{3.16}$$

waarbij de factor $\gamma_{\phi b}$ (-) als volgt uitgerekend wordt:

$$\gamma_{\phi b} = 1 - 1,4e^{-70h/L_{op}} \tag{3.17}$$

$$L_{op} = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (3.18)$$

Deze factor was echter bedoeld om de invloed van brekende golven op een ondiep voorland te verdisconteren en is slechts relevant als $h / H_s < 2$ à 2.5 . Bij de doorgerekende proeven is dat niet het geval en hoeft de factor niet meegerekend te worden. In Figuur C.33 is Formule (3.16) goed weergegeven met $\gamma_{\phi_b} = 1$, en benadert de formule de metingen in de proeven vrij goed.

De metingen met $\xi_{op} > 3$ behorende bij een talud van 1:3 liggen echter consequent lager dan die behorende bij een talud van 1:4. In Figuur C.34 is te zien dat dit verschil verdwijnt als de meetpunten worden uitgezet als functie van de golfsteilheid. Teneinde het beeld van de figuur vergelijkbaar te laten zijn met Figuur C.33, is op de horizontale as $\xi_{op}/\tan\alpha$ ($= 1/\sqrt{s_{op}}$) uitgezet. De spreiding van de meetpunten is nu veel kleiner, maar het blijkt dat de trend niet helemaal conform de formule van De Waal *et al.* (1995) is. De volgende formule is beter:

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = 0,5 + 0,12 \frac{\gamma_{\phi_b} \xi_{op}}{\tan \alpha}; \text{ met als maximum: } \frac{\phi_{b2\%}}{H_s} \leq 2,5 \gamma_{\phi_b} \quad (3.19)$$

De grootschalige modelproeven en de kleinschalige proeven sluiten goed op elkaar aan.

3.2.1.1 Helling van het stijghoogtefront

In Figuur C.35 is de helling van het golffront (θ_f) weergegeven als functie van de brekerparameter. Alleen de waarden bij de hoogste 33 % van de golffronten (ten aanzien van ϕ_b) zijn weergegeven.

De maximale waarden liggen vrij dicht tegen de 90° aan als $\xi_{op} > 2,5$, terwijl ze beduidend lager zijn bij de oude proeven met $\xi_{op} < 2,5$. Dit verschil is voorlopig nog niet te verklaren. De waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 % nemen af met toenemende brekerparameter. Deze afname lijkt groter te zijn bij de proeven met een helling van 1:4.

In Figuur C.35 is Formule 2.10 uit De Waal *et al.* (1995) toegevoegd:

$$\theta_f = \arctan \left(\frac{2,7}{\xi_{op}^{1/3}} \right) \quad (3.20)$$

Deze formule vormt geen goede benadering van de helling van het golffront. Wellicht heeft het te maken met de verschillen tussen de gehanteerde definities in De Waal *et al.* (1995) en in onderhavig onderzoek.

In Figuur C.36 is de helling van het golffront weergegeven als functie van de golfsteilheid. Teneinde het beeld van de figuur vergelijkbaar te laten zijn met Figuur C.35, is op de horizontale as $\xi_{op}/\tan\alpha$ ($= 1/\sqrt{s_{op}}$) uitgezet. Dit leidt tot minder spreiding in de waarden met een overschrijdingsfrequentie van 2 %. De helling van het golffront neemt af vanaf $\xi_{op}/\tan\alpha \approx 10$, wat overeenkomt met een golfsteilheid van $s_{op} \approx 0,01$.

Bij $\xi_{op}/\tan\alpha \approx 6$ à 7 zijn de resultaten van de grootschalige modelonderzoeken te vinden. Deze punten met overschrijdingsfrequentie van 2 % sluiten vrij goed aan op de resultaten uit

het kleinschalig modelonderzoek van 2003. Een aantal metingen wijken echter vrij sterk af, namelijk de kleinschalige resultaten uit 1993 met talud van 1:3 ($37^\circ < \theta_f < 42^\circ$) en in iets mindere mate de kleinschalige resultaten uit 1993 met talud van 1:4 ($45^\circ < \theta_f < 76^\circ$) en enkele grootschalige resultaten met $\xi_{op}/\tan\alpha \approx 5$ ($53^\circ < \theta_f < 70^\circ$). Voor een deel is dit een gevolg van het feit dat er toen met minder drukopnemers is gewerkt en voor een deel omdat de bemonsteringsfrequentie kleiner was.

De volgende formule sluit vrij goed aan op de metingen als $\xi_{op}/\tan\alpha > 7$:

$$\theta_{f2\%} = \min \left\{ 80^\circ; 100^\circ - 2^\circ \frac{\xi_{op}}{\tan \alpha} \right\} \quad (3.21)$$

Voor $\xi_{op}/\tan\alpha < 7$ is het nauwelijks mogelijk op basis van deze punten een formule af te leiden.

3.3 Samenvatting van resultaten uit analyse van golfklappen en golffronten

De analyse van de gemeten belasting op het talud heeft kwantitatief inzicht gegeven in de grootte van de golfklappen en golffronten, die maatgevend zijn voor de stabiliteit van steenzettingen. In principe is de analyse gericht geweest op zowel ingegoten, als niet-ingegoten steenbekledingen. Als het gaat om parameters die aan de gediptheid gerelateerd zijn, dan blijft het toepassingsgebied beperkt tot open bekledingen met een leklengte van $\Lambda = 0,5$ m. De resultaten kunnen als volgt samengevat worden (zie ook Figuur 3.6):

Gediptheid

De gediptheid is gebaseerd op de lokale dip in het stijghoogteverloop op het talud en kan gezien worden als een maat voor het stijghoogteverschil over de toplaag van een gemiddelde, niet-ingegoten steenzetting met een leklengte van $\Lambda = 0,5$ m. De gediptheid tijdens de golfklap kan berekend worden met Formule (3.1).

Het is gebleken dat de gediptheid beïnvloed wordt door een berm, ook als deze iets boven de waterlijn ligt. Voor de gediptheid tijdens de golfklap geldt, dat de gediptheid afneemt naarmate de berm hoger boven de waterlijn ligt.

De grootte van de gediptheid blijkt goed overeen te komen met de gemeten stijghoogteverschillen over de toplaag van het onderzoek van Klein Breteler (2000). Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de gediptheid een zeer belangrijke parameter is van de belasting op een open steenbekleding.

Golfklaphoogte

De golfklaphoogte is belangrijk voor de stabiliteit van steenzettingen, vooral ook als deze zijn ingegoten (Klein Breteler, 2003). De grootte van de golfklap kan berekend worden met Formule (3.7).

De grootte van golfklaphoogte wordt beïnvloed door een berm boven de waterlijn. Naarmate deze berm hoger ligt, is de golfklaphoogte kleiner.

De resultaten van grootschalig modelonderzoek en kleinschalig modelonderzoek blijken mooi op elkaar aan te sluiten. Dit is een indicatie dat het kennelijk wel meevalt met de invloed van de schaal waarop de proeven zijn uitgevoerd.

Er blijkt geen relatie te zijn tussen de golfklaphoogte en de waterlaagdikte op het talud vlak vóór de golfklap. Men zou kunnen verwachten dat een dikke waterlaag als een kussen werkt, maar dat blijkt niet aantoonbaar te zijn.

Golfklapbreedte

Het blijkt dat de resultaten van het grootschalig modelonderzoek goed aansluiten op die van het kleinschalige onderzoek wat betreft de breedte van de golfklap. De relatie tussen de brekerparameter en de breedte van de golfklap, blijkt te voldoen aan de relatie volgens Formule (3.11).

Belastingsduur

Voor niet-ingegoten steenzettingen met een lek lengte van $\Lambda = 0,5$ m kan de duur van de belasting geschat worden aan de hand van de geïntegreerde gediptheid: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{klap}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$. Er is nog geen manier gevonden waarop de resultaten uit kleinschalig en grootschalig modelonderzoek met elkaar vergeleken kunnen worden.

Trogbreedte

De zone met een lage stijghoogte op het talud, tussen de golfklap en de restanten van het zeewaarts daarvan gelegen front, wordt de trog genoemd. Het blijkt dat de dimensieloze breedte, $B_{\text{trog}50\%,2\%}$ (halverwege de fronthoogte gemeten), met overschrijdingsfrequentie van 2% vrijwel onafhankelijk van de brekerparameter is: $B_{\text{trog}50\%,2\%} / H_s = 0,7$.

Gradiënt van de golfklap

De golfklap kent steile stijghoogteflanken ter weerszijden van het punt waar de maximale stijghoogte op het talud plaatsvindt. De flank aan de zeezijde heeft een stijghoogtegradiënt (met overschrijdingsfrequentie van 2%) van ongeveer 80° à 85° , die bij $\xi_{\text{op}} > 3,5$ sterk blijkt af te nemen. Halverwege deze flank is de gradiënt ongeveer gelijk aan die onderin de flank.

Hoogte van het stijghoogtefront

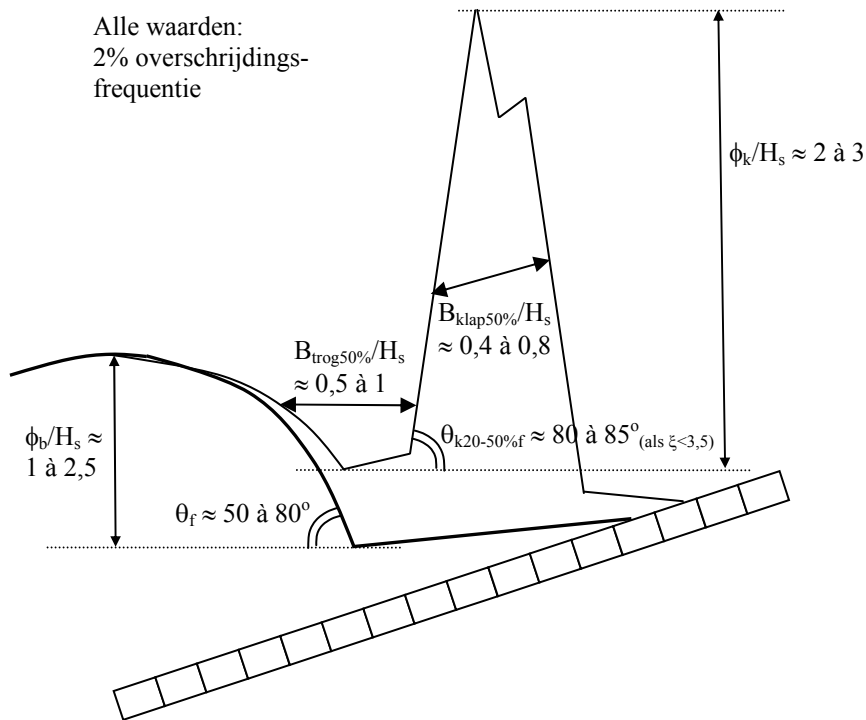
De formules van De Waal *et al.* (1995) sluiten redelijk aan op de huidige metingen met een overschrijdingsfrequentie van 2% als $\xi_{\text{op}} < 3$. Het blijkt dat de trend niet helemaal conform de formule van De Waal *et al.* (1995) is. Formule (3.19) beschrijft de trend beter.

Helling van het stijghoogtefront

De huidige metingen geven een totaal ander beeld dan de formule van De Waal *et al.* (1995). Voor $\xi_{\text{op}}/\tan\alpha < 7$ is de spreiding in de meetpunten zo groot, dat het nauwelijks mogelijk is om op basis van de meetpunten een formule af te leiden. Voor $\xi_{\text{op}}/\tan\alpha > 7$ is de spreiding veel kleiner en is de trend te beschrijven met Formule (3.21).

De spreiding wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de resultaten van verschillende onderzoeken samen beschouwd worden, waarbij er grote verschillen zijn in onderlinge afstand tussen de drukopnemers en bemonsteringsfrequentie.

De bovenstaande constatering zijn visueel samengevat in Figuur 3.6 (niet al deze waarden worden gerealiseerd in dezelfde golf).



Figuur 3.6 Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten

4 Eisen aan instrumentatiedichtheid en bemonsteringsfrequentie

In Hoofdstuk 3 is de belasting in ruimte en tijd gekwantificeerd. Op basis van deze kwantificering kan ook een uitspraak gedaan worden over de benodigde instrumentatie om de belasting voldoende nauwkeurig te kunnen meten voor het type belasting en het type constructie zoals hier is onderzocht. Dit is in Paragraaf 4.1 beschreven. Voor onderzoek met of naar afwijkende belastingen en afwijkende bekledingstypes zullen misschien andere eisen aan de instrumentatie gesteld moeten worden.

Daarnaast kan inzicht in de benodigde instrumentatie verkregen worden door bestaande metingen opnieuw te bewerken en te analyseren. Door niet alle drukopnemers in deze analyse mee te nemen, of door een lagere bemonsteringsfrequentie te hanteren, kunnen langs empirische weg de consequenties van de instrumentatiedichtheid en bemonsteringsfrequentie onderzocht worden. Daartoe dienen proeven die zijn uitgevoerd met een zeer kleine onderlinge afstand tussen de drukopnemers, en met een hoge bemonsteringsfrequentie geselecteerd te worden. Deze werkwijze is beschreven in Paragraaf 4.2.

4.1 Instrumentatie-eisen op basis van gekwantificeerde belasting

De grootte van de belasting tijdens de golfklap en tijdens het golffront is samengevat in Paragraaf 3.3, zie ook Figuur 3.6 in die paragraaf.

4.1.1 Instrumentatiedichtheid

Ten aanzien van de benodigde onderlinge afstand tussen de drukopnemers is vooral de steile stijghoogtegradiënt aan weerszijden van de golfklap van belang. Voor de minimale afstand tussen de drukopnemers geldt:

- 3 drukopnemers in de flank: $d_{dro} = \phi_k / (2 \tan \theta)$
- 2 drukopnemers in de flank: $d_{dro} = \phi_k / \tan \theta$

De gradiënt in de flank kan 85° zijn, terwijl de maximale stijghoogte in de golfklap ten opzichte van het niveau in de trog $\phi_k \approx 3H_s$ kan zijn, wanneer een overschrijdingsfrequentie van 2 % wordt aangehouden. Als de flank van de golfklap weergegeven moet worden met drie drukopnemers (één aan de voet, één halverwege en één aan de top) mag de onderlinge afstand tussen de drukopnemers maximaal $d_{dro} = 3H_s / (2 * \tan 85^\circ) = 0,13H_s$ zijn.

Stel dat deze drukopnemerafstand toegepast wordt, dan zou een extreme golfklap gemeten kunnen worden met 2 drukopnemers (één aan de voet en één aan de top) met $\phi_k \approx 6H_s$ en een gradiënt van $88,7^\circ$, maar ook een minder grote golfklap met $\phi_k \approx 2H_s$ en een gradiënt van $86,2^\circ$. Het is uiteraard niet mogelijk een gradiënt van 90° te meten.

Aan de hand van het bovenstaande blijkt een onderlinge afstand van de drukopnemers van $d_{\text{dro}} = 0,13H_s$ wel ongeveer voldoende te zijn. Voor de Deltagoot, met $H_s \approx 1,4$ m betekent dit $d_{\text{dro}} = 0,18$ m en voor de Scheldegoot, met $H_s = 0,20$ m: $d_{\text{dro}} = 0,026$ m

4.1.2 Bemonsteringsfrequentie

Voor de te stellen eisen aan de bemonsteringsfrequentie dient gekeken te worden naar de belastingsduur. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de duur van de golfklap, de stijgtijd van de golfklap, en de belastingsduur zoals deze berekend kan worden uit de geïntegreerde gediptheid voor de golfklap en het golffront. Het lijkt dat deze belastingsduren bijzonder kort kunnen zijn, orde 0,001 s à 0,01 s. Voor steenbekledingen zijn dit soort kortdurende belastingen niet echt bedreigend, omdat de traagheid van de zware constructie grote versnellingen verhindert. Daarnaast zorgt de verhinderde toestroming dat de stenen niet snel kunnen bewegen. Door Rudolph en Klein Breteler (2004) en Klein Breteler (2000) is de belastingsduur die leidt tot schade onderzocht. Bij hun beschouwing over de klemming is de duur van de overbelaste situatie die bedreigend is voor de stabiliteit gekwantificeerd. Uit die analyse bleek dat de relevante belastingsduren voor een steenzetting met dikte van ongeveer 20 cm 0,1 s à 0,3 s zijn, met soms uitschieters naar 0,5 s à 0,7 s. Een belastingsduur van 0,1 s kan voldoende nauwkeurig worden weergegeven met vier bemonsteringen, waardoor de benodigde bemonsteringsfrequentie komt op 40 Hz (Deltagootschaal).

Voor kleinschalig modelonderzoek levert dit een benodigde bemonsteringsfrequentie op van ongeveer 100 Hz.

4.2 Instrumentatie-eisen op basis van uitgedunde metingen

Er kunnen ook eisen aan de instrumentatie gesteld worden op basis van uitgedunde proeven. Daartoe wordt gebruik gemaakt van de best geïnstrumenteerde proeven die tot nu toe zijn uitgevoerd. De proeven in de Scheldegoot met relatief lange golven (Kuiper en Van Vossen, 2003) die uitgekozen zijn om de instrumentatie-eisen te kwantificeren, zijn proef t301, t306, t311, t401, t406 en t411.

4.2.1 Instrumentatiedichtheid

Er is gekeken naar de invloed van de onderlinge afstand van de drukopnemers op de volgende parameters (met een overschrijdingsfrequentie van 2%):

- het aantal golfklappen en golffronten, zie Figuur C.37,
- de gediptheid tijdens de golfklap, zie Figuur C.38,
- de gediptheid tijdens het golffront, zie Figuur C.39,
- de maximale stijghoogte in de golfklap ten opzichte van de trog, zie Figuur C.40,
- de breedte van de golfklap (halverwege de golfklaphoogte), zie Figuur C.41,
- de gradiënt van de stijghoogteflank aan de zeezijde van de golfklap, zie Figuur C.42 en Figuur C.43, en
- de locatie van de voet van het stijghoogtefront, zie Figuur C.44.

De onderlinge afstand van de drukopnemers in het interessegebied was tijdens de proeven $d_{dro1/1} = 0,021$ m. Teneinde de invloed van de onderlinge afstand te kunnen kwantificeren, is voor de uitgekozen proeven eerst de helft en vervolgens tweederde van de drukopnemers niet gebruikt. Daardoor werd de afstand van de drukopnemers respectievelijk $d_{dro1/2} = 0,042$ m en $d_{dro2/3} = 0,063$ m. In Figuur C.37 tot en met Figuur C.44 is gebruik gemaakt van de notatie '1/1', '1/2' en '2/3' voor de situaties waarin respectievelijk alle drukopnemers, de helft van de drukopnemers en tweederde van de drukopnemers meegenomen zijn. In Tabel 4.1 is voor de uitgewerkte proeven de relatieve onderlinge afstand weergegeven.

Proef	H_s (m)	T_p (s)	$\tan\alpha$ (-)	ξ_{op} (-)	$d_{dro1/1}/H_s$ (-)	$d_{dro1/2}/H_s$ (-)	$d_{dro2/3}/H_s$ (-)
t301	0,21	2,82	0,33	2,52	0,10	0,20	0,30
t306	0,17	3,57	0,33	3,60	0,12	0,25	0,37
t311	0,12	4,00	0,33	4,81	0,18	0,35	0,53
t401	0,19	3,43	0,25	2,42	0,11	0,22	0,33
t406	0,12	4,04	0,25	3,64	0,18	0,35	0,53
t411	0,09	4,53	0,25	4,59	0,22	0,45	0,67

Tabel 4.1 Uitgewerkte proeven en relatieve onderlinge afstand van de drukopnemers

Uit Figuur C.37 tot en met Figuur C.44 blijkt dat het aantal golfklappen, de gediptheid, de golfklapgrootte en de gradiënt van de flanken van de golfklap afnemen als de onderlinge afstand van de drukopnemers toeneemt. Deze afname is voor de gediptheid en de golfklapgrootte 5 à 10 %. Voor de andere eigenschappen maakt het weinig uit.

Uit deze resultaten blijkt dat de onderlinge afstand tussen de drukopnemers bij voorkeur niet groter moet zijn dan $d_{dro}/H_s = 0,1$ à $0,2$ (niet-uitgedunde instrumentatie), maar dat de fout bij een onderlinge afstand van $d_{dro}/H_s = 0,2$ à $0,3$ (gehalveerde instrumentatie) vrij beperkt is. Dit resultaat sluit aan op de conclusies uit Paragraaf 4.1.1.

4.2.2 Bemonsteringsfrequentie

Er is gekeken naar de invloed van de bemonsteringsfrequentie van de drukopnemers op de volgende parameters (met een overschrijdingsfrequentie van 2%):

- het aantal golfklappen en golffronten, zie Figuur C.45,
- de gediptheid tijdens de golfklap, zie Figuur C.46, en
- de gediptheid tijdens het golffront, zie Figuur C.47.

De bemonsteringsfrequentie van de proeven was 100 Hz. Na een filtering toegepast te hebben op deze proeven, is de bemonsteringsfrequentie teruggebracht naar 50 Hz, 25 Hz en 10 Hz.

Uit Figuur C.45 tot en met Figuur C.47 blijkt dat het aantal golfklappen, de gediptheid tijdens de golfklap en de gediptheid tijdens het golffront afnemen als de bemonsteringsfrequentie afneemt. De afname voor de gediptheid tijdens de golfklap is niet

voor elke proef even groot, maar loopt op tot 40%. De afname voor de gediptheid tijdens het golffront bedraagt 10 à 20 %. Voor de andere eigenschappen maakt het weinig uit. Uit de figuren blijkt niet direct dat een bemonsteringsfrequentie van 100 Hz ideaal is of dat een lagere bemonsteringsfrequentie ook voldoende is. Het is echter met de beschikbare computerapparatuur niet goed mogelijk proeven met een veel hogere bemonsteringsfrequentie te verwerken.

5 Conclusies

Op basis van de analyse van de gemeten drukken op het talud tijdens golfaanval is een gedetailleerd beeld ontstaan van de belasting op het talud. In de analyse is gebruik gemaakt van een aantal grootschalige en kleinschalige modelonderzoeken.

5.1 Belastingeigenschappen

De belastingeigenschappen die het meest bepalend zijn voor de stabiliteit van steenbekledingen zijn geïdentificeerd. Het betreft zowel ingegoten, als niet-ingegoten steenbekledingen. Echter, als het gaat om parameters die aan de gediptheid gerelateerd zijn, dan blijft het toepassingsgebied beperkt tot open bekledingen met een leklengte van $\Lambda = 0,5$ m. De eigenschappen zijn:

Golfklap

- De gediptheid heeft de grootste correlatie met het maximale stijghoogteverschil over de top laag en is daarmee de belangrijkste parameter. De gediptheid is gebaseerd op de lokale dip in het stijghoogteverloop op het talud en kan gezien worden als een maat voor het stijghoogteverschil over de top laag van een gemiddelde, niet-ingegoten steenzetting met een leklengte van $\Lambda = 0,5$ m.
- De golfklaphoogte en golfklapbreedte hebben een grote invloed op het maximale stijghoogteverschil over de top laag.
- De klapgradiënt (aan de kant van de trog: $\theta_{k20\%-50\%f}$ of $\theta_{k20\%-50\%k}$) en de trogbreedte hebben een iets kleinere invloed, maar zijn wel belangrijk.
- De frontgradiënt tijdens de golfklap heeft een opmerkelijk kleine invloed op het maximale stijghoogteverschil.

Golffront

- De fronthoogte ten opzichte van minimale stijghoogte aan de voet van het front is een belangrijke parameter.
- De frontgradiënt (θ_f) gedefinieerd als de helling van de lijn van de voet van het front naar het snijpunt van het front met de stilwaterlijn is ook een belangrijke parameter.

Belastingsduur

- De duur van de golfklap.
- De stijgtijd van de golfklap.
- De duur van de opwaartse belasting, berekend uit gediptheid en geïntegreerde gediptheid: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$.

Door de hoge correlatie met het stijghoogteverschil over de top laag is de gediptheid een zeer belangrijke parameter. Deze kan relatief eenvoudig berekend worden door voor elk tijdstip

het verschil tussen de gemeten stijghoogte op het talud en een met een voortschrijdend gemiddelde (ruimtelijk) afgevlakt stijghoogteverloop te bepalen. Daar waar de gemeten stijghoogte het verst onder het afgevlakte stijghoogteverloop ligt, is de gediptheid maximaal en ongeveer gelijk aan het stijghoogteverschil over een niet-ingegoten steenzetting (indien de lek lengte 0,5 m bedraagt). Mogelijke toepassingen van de gediptheid zijn:

- Het onderling vergelijken van belasting situaties. Op basis van de trend in de gediptheid kan vastgesteld worden of bijvoorbeeld het langer worden van de golven een verkleining van de belasting geeft, maar er kan bijvoorbeeld ook beoordeeld worden of de aanwezigheid van een voorland of berm de belasting beïnvloed.
- Het maken van ingedikte bestanden voor het softwarepakket Zsteen. De rekentijd van Zsteen is namelijk zo lang dat het ondoenlijk is om met volledige drukbestanden te werken. Daarom worden de bestanden ingedikd door slechts de belangrijkste golven mee te nemen.
- Het verbeteren van het rekenmodel ANAMOS. ANAMOS berekent momenteel het stijghoogteverschil uit op basis van de stijghoogte op het talud tijdens het golf front. Voor open steenzettingen is het moment van de golfklap echter veel belangrijker. Door met alle proeven uit het verleden een relatie te leggen tussen de golfcondities en de geometrie (taludhelling, berm, voorland) enerzijds en de gediptheid anderzijds, is het mogelijk om de formules voor het berekenen van het stijghoogteverschil over de top laag aanzienlijk te verbeteren.

5.2 Analyse van golfklappen en golf fronten

Ten aanzien van de kwantificering van de belasting op het talud is het volgende geconcludeerd (zie ook Figuur 5.1):

Gediptheid

De gediptheid tijdens de golfklap kan berekend worden met Formule (3.1).

Het is gebleken dat de gediptheid beïnvloed wordt door een berm, ook als deze iets boven de waterlijn ligt. Voor de gediptheid tijdens de golfklap geldt, dat de gediptheid afneemt naarmate de berm hoger boven de waterlijn ligt.

De grootte van de gediptheid blijkt goed overeen te komen met de gemeten stijghoogteverschillen over de top laag van het onderzoek van Klein Breteler (2000). Hierdoor kan geconcludeerd worden dat de gediptheid een zeer belangrijke parameter is van de belasting op een open steenbekleding met een lek lengte van $\Lambda = 0,5$ m.

Golfklaphoogte

De golfklaphoogte is belangrijk voor de stabiliteit van steenzettingen, vooral ook als deze zijn ingegoten (Klein Breteler, 2003). De grootte van de golfklap kan berekend worden met Formule (3.7).

De grootte van golfklaphoogte wordt beïnvloed door een berm boven de waterlijn. Naarmate deze berm hoger ligt, is de golfklaphoogte kleiner.

De resultaten van grootschalig modelonderzoek en kleinschalig modelonderzoek blijken mooi op elkaar aan te sluiten. Dit is een indicatie dat het kennelijk wel meevalt met de invloed van de schaal waarop de proeven zijn uitgevoerd.

Er blijkt geen relatie te zijn tussen de golfklaphoogte en de waterlaagdikte op het talud vlak vóór de golfklap. Men zou kunnen verwachten dat een dikke waterlaag als een kussen werkt, maar dat blijkt niet aantoonbaar te zijn.

Golfklapbreedte

Het blijkt dat de resultaten van het grootschalig modelonderzoek goed aansluiten op die van het kleinschalige onderzoek wat betreft de breedte van de golfklap. De relatie tussen de brekerparameter en de breedte van de golfklap, blijkt te voldoen aan de relatie volgens Formule (3.11).

Belastingsduur

Voor niet-ingegoten steenzettingen met een lek lengte van $\Lambda = 0,5$ m kan de duur van de belasting geschat worden aan de hand van de geïntegreerde gediptheid: $t_{\text{belast}} = \phi_{\text{dip}} / (\phi_{\text{dip}} - 0,4H_s)$. Er is nog geen manier gevonden waarop de resultaten uit kleinschalig en grootschalig modelonderzoek met elkaar vergeleken kunnen worden.

Trogbreedte

De zone met een lage stijghoogte op het talud, tussen de golfklap en de restanten van het zeewaarts daarvan gelegen front, wordt de trog genoemd. Het blijkt dat de dimensieloze breedte, $B_{\text{trog}50\%,2\%}$ (halverwege de fronthoogte gemeten), met overschrijdingsfrequentie van 2% vrijwel onafhankelijk van de brekerparameter is: $B_{\text{trog}50\%,2\%} / H_s = 0,7$.

Gradiënt van de golfklap

De golfklap kent steile stijghoogteflanken ter weerszijden van het punt waar de maximale stijghoogte op het talud plaatsvindt. De flank aan de zeezijde heeft een stijghoogtegradiënt (met overschrijdingsfrequentie van 2%) van ongeveer 80° à 85° , die bij $\xi_{\text{op}} > 3,5$ sterk blijkt af te nemen. Halverwege deze flank is de gradiënt ongeveer gelijk aan die onderin de flank.

Hoogte van het stijghoogtefront

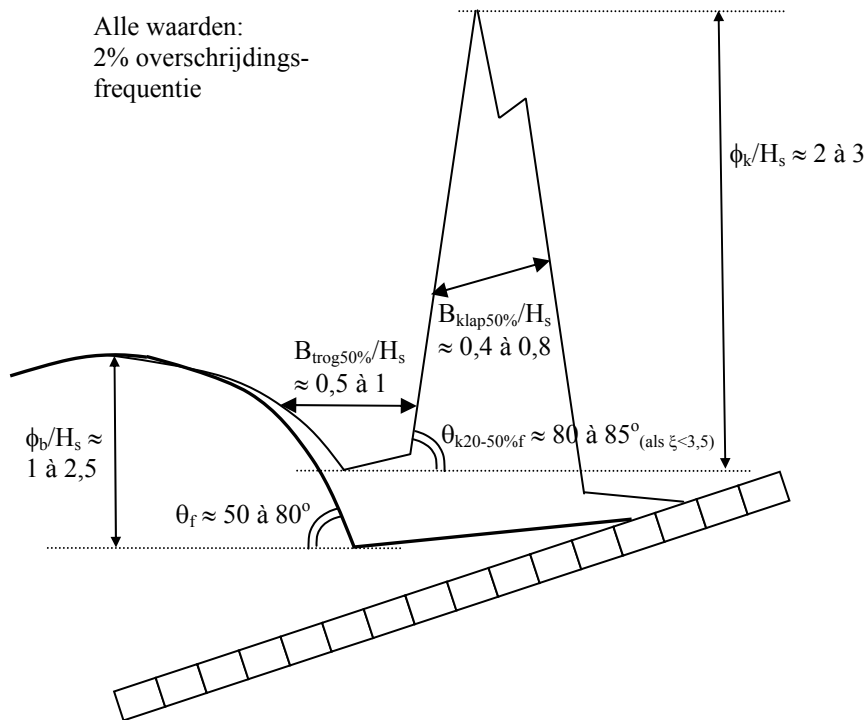
De formules van De Waal *et al.* (1995) sluiten redelijk aan op de huidige metingen met een overschrijdingsfrequentie van 2% als $\xi_{\text{op}} < 3$. Het blijkt dat de trend niet helemaal conform de formule van De Waal *et al.* (1995) is. Formule (3.19) beschrijft de trend beter.

Helling van het stijghoogtefront

De huidige metingen geven een totaal ander beeld dan de formule van De Waal *et al.* (1995). Voor $\xi_{\text{op}} / \tan\alpha < 7$ is de spreiding in de meetpunten zo groot, dat het nauwelijks mogelijk is om op basis van de meetpunten een formule af te leiden. Voor $\xi_{\text{op}} / \tan\alpha > 7$ is de spreiding veel kleiner en is de trend te beschrijven met Formule (3.21).

De spreiding wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de resultaten van verschillende onderzoeken samen beschouwd worden, waarbij er grote verschillen zijn in onderlinge afstand tussen de drukopnemers en bemonsteringsfrequentie.

Bovenstaande conclusies kunnen visueel samengevat worden in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten (niet al deze waarden worden gerealiseerd in dezelfde golf)

5.3 Instrumentatie-eisen

Met het kwantitatief inzicht in de grootte van de belasting op het talud is het mogelijk gebleken eisen te stellen aan de instrumentatie tijdens modelonderzoek teneinde deze belasting in voldoende detail te kunnen meten in. Er is gekeken naar de maximaal toelaatbare onderlinge afstand van de drukopnemers en de minimale bemonsteringsfrequentie:

- *Maximaal* toelaatbare afstand tussen drukopnemers (in de zone waar de golfklappen plaatsvinden): $d_{dro} = 0,13H_s$
- *Minimaal* toelaatbare bemonsteringsfrequentie:
 - Grootschalig modelonderzoek (Deltagoot): 40 Hz
 - Kleinschalig modelonderzoek (Scheldegoot, Vinjé bassin): 100 Hz

Het is wenselijk indien mogelijk een hogere bemonsteringsfrequentie toe te passen, omdat nog niet helemaal duidelijk is in hoeverre een hogere frequentie de resultaten zou beïnvloeden.

Literatuur

Coeveld, E.M. (2003a)

Invloed van golfklappen op stabiliteit: literatuurstudie
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4134, november 2003.

Coeveld, E.M. (2003b)

Software ontwikkeling en toepassing voor kwantificering van golfklappen
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4328, december 2003

Coeveld, E.M. en M. Klein Breteler (2003)

Invloed klemming: statistische analyse trekproeven
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4134, november 2003

Derks, H. en M. Klein Breteler (1992)

Gedrag van asfaltbekleding onder golfaanval
Verslag modelonderzoek in Deltagoot
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H1480

Klein Breteler, M. e.a. (1991)

Taludbekledingen van gezette steen, analytische en numerieke berekening van de stijghoogte onder de toplaag
Sectie 3: verificatie van de analytische methode voor berekenen van het stijghoogteverschil met Deltagootmetingen
Appendix B: stijghoogte in het filter volgens analytisch model
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. M1795/H195, deel XIX, augustus 1991

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. (2003)

Dwarskracht in ingegoten basalt tijdens golfaanval
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4134, februari 2003

Klein Breteler, M. en E.M. Coeveld (2004)

Invloed lange golfperiode op stabiliteit
WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H4421, september 2004

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

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

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen

Meetverslag van Deltagootonderzoek

WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H3272

Waal, J.P. de, M. Klein Breteler en H. den Adel (1995)

Taludbekledingen van gezette steen

Golfdruk op talud

Deel B: Verbetering van het analytisch model STEENZET

WL | Delft Hydraulics, rapport nr. H195

Wouters, J. (1991)

Taludbekledingen van gezette steen

Eindverificatie onderzoek Deltagoot

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

Bijlage A:

Definities van eigenschappen van golfbelasting

Inhoud

A	Beschrijving van golfbelasting-analyse-software.....	A-1
A.1	Invoer	A-1
A.2	Controle drukopnemers	A-2
A.3	Selectie van golven.....	A-2
A.4	Parameters tijdens golfklap	A-4
A.4.1	Tijdstip waarop maximale stijghoogte plaatsvindt.....	A-4
A.4.2	Maximale stijghoogte tijdens de golfklap op het talud en locatie	A-5
A.4.3	Maximaal stijghoogteverschil op tijdstip t_{max}	A-6
A.4.4	Breedtes van de belaste strook op het talud op tijdstip t_{max}	A-8
A.4.5	Totale duur van de golfklap rond tijdstip t_{max}	A-10
A.4.6	Stijgtijd van de golfklap rond tijdstip t_{max}	A-11
A.4.7	Totale impuls van de golfklap rond tijdstip t_{max}	A-13
A.4.8	Gradiënten van de stijghoogte langs het talud op tijdstip t_{max}	A-13
A.4.9	Maximale kracht van de golfklap op het talud rond tijdstip t_{max}	A-15
A.4.10	Laagdikte net voor tijdstip t_{max}	A-16
A.4.11	Golffront net voor tijdstip t_{max}	A-17
A.4.12	Gediptheid op tijdstip t_{max}	A-20
A.4.13	Geïntegreerde gediptheid rond tijdstip t_{max}	A-21
A.4.14	Dipkracht op tijdstip t_{max}	A-21
A.4.15	Dipimpuls rond tijdstip t_{max}	A-22
A.5	Parameters tijdens golffront	A-22
A.5.1	Golffront.....	A-22
A.5.2	Gediptheid, geïntegreerde gediptheid, dipkracht en dipimpuls ..	A-23
A.6	Uitvoer.....	A-24

A Beschrijving van golfbelasting-analyse-software

De opzet van de software om de golfbelasting te analyseren is in deze bijlage beschreven. Deze beschrijving bevat zowel de beschrijving in Coeveld (2003b), als de aanpassingen en uitbreidingen die in deze fase van het onderzoek uitgevoerd zijn.

Tijdens de opzet van de software zijn er voortdurend tests uitgevoerd. Dit is gebeurd met behulp van proef 23o11 uit het Deltagootonderzoek in 1997/1998 (Klein Breteler, 2000). Aangezien momenteel nog niet helemaal duidelijk is op welk moment in een golf de belasting op de top laag als gevolg van een golfklap of golffront maatgevend is, is de software zo opgezet dat er op verschillende tijdstippen in een golf karakteristieke parameters uitgerekend kunnen worden. In deze studie wordt gekeken naar twee tijdstippen, namelijk het moment waarop er een golfklap optreedt en het moment waarop er een golffront optreedt. (Het is ook mogelijk de karakteristieke parameters te bepalen op het moment dat het stijghoogteverschil maximaal is, maar dat is in deze fase van het onderzoek voorlopig buiten beschouwing gelaten.)

A.1 Invoer

De software vereist als invoer 2 files:

- een data-file (<proefnaam>.asc), en
- een coördinaten-file (<proefnaam.txt>).

In de data-file staan de data in kolommen. In de eerste kolom staat de tijd in seconden. In de tweede tot en met de laatste kolom staan de drukken per drukopnemer in kN/m² ten opzichte van de stilwaterlijn. In de coördinaten-file staat enerzijds informatie over golfcondities, waterstand en constructie, en anderzijds de coördinaten van de drukopnemers. Het is van belang dat de coördinaten-file precies volgens een bepaald format is opgesteld, anders kan de software de file niet lezen. Hieronder is (een deel van) de coördinaten-file van proef 23o11 gegeven:

h = 4.940

Talud 1:3.5

Aantal DRO: 34

Hs = 1.543

Tp = 6.35

Xop = 1.82

B = 0.000

hb = 5.400

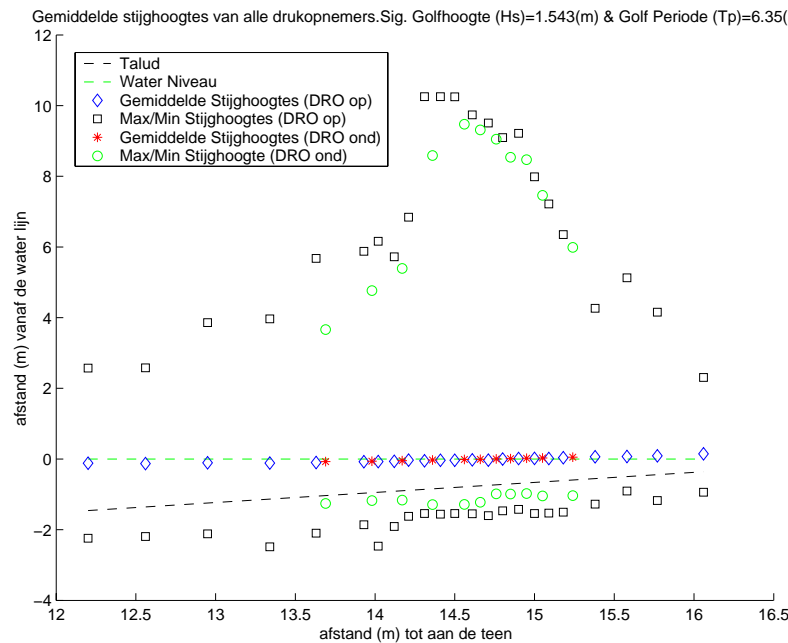
aberm 1:15.0

X(m)	Y(m)	Z(m)	"op=1;onder=2"			op of ondertoplaag	Instrument
12.20	1.96	3.48	1	1	op	DRO 01	
12.56	1.96	3.59	1	2	op	DRO 02	
12.95	1.96	3.70	1	3	op	DRO 03	

De software maakte geen gebruik van de parameters ‘B’, ‘hb’ en ‘aberm’. De waarden van deze parameters hoeven dus niet bekend te zijn. De x-coördinaat wordt gerekend vanaf de teen van de constructie, de y-coördinaat van de wand van de goot en de z-coördinaat van de bodem van de goot. In de coördinaten-file mogen geen drukopnemers staan die boven het stilwaterniveau liggen. Bovendien moet de volgorde van de coördinaten van de drukopnemers in de rijen van de coördinaten-file overeenkomen met de volgorde van de kolommen in de data-file.

A.2 Controle drukopnemers

Het begin en het eind van het signaal van elke drukopnemer kan voor elke proef visueel gecontroleerd worden. Hiertoe worden de meetsignalen grafisch weergegeven. Tevens wordt de gemiddelde stijghoogte van elke drukopnemer bepaald. Dit gemiddelde mag niet teveel afwijken van nul en van de gemiddelde stijghoogte van de naastliggende drukopnemer. Daarnaast worden de minimale en maximale stijghoogten voor elke drukopnemer bepaald. Voor proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.1.

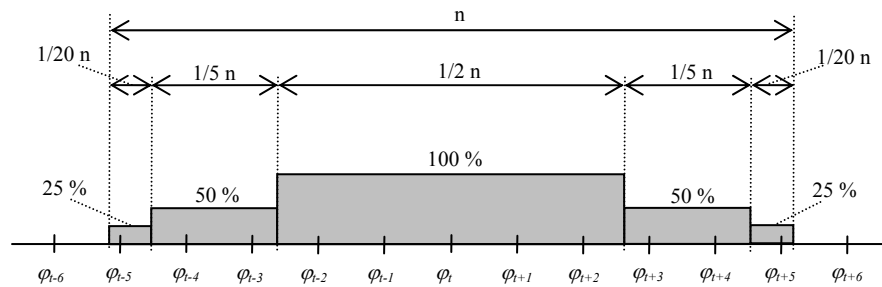


Figuur A.1 Gemiddelde, minimale en maximale stijghoogtes in de drukopnemers

A.3 Selectie van golven

Er wordt aangenomen dat er per golf voor elke drukopnemer gerekend kan worden met dezelfde begin- en eindtijd. Er wordt uitgegaan van het signaal van de diepst gelegen drukopnemer. Bij deze drukopnemer zullen waarschijnlijk de minste golfklappen optreden en zal het signaal daarom het meest gelijkmatig verlopen. Toch komen er hele kleine schommelingen in het signaal voor. Om deze uit te sluiten, is het signaal bewerkt met een voortschrijdend gemiddelde. Dit voortschrijdend gemiddelde wordt berekend over een bepaald aantal tijdstappen n rond een bepaald tijdstip. Hierbij worden bepaalde tijdstappen

binnen dit aantal zwaarder meegerekend dan andere tijdstappen, zoals weergegeven in Figuur A.2.



Figuur A.2 Voortschrijdend gemiddelde

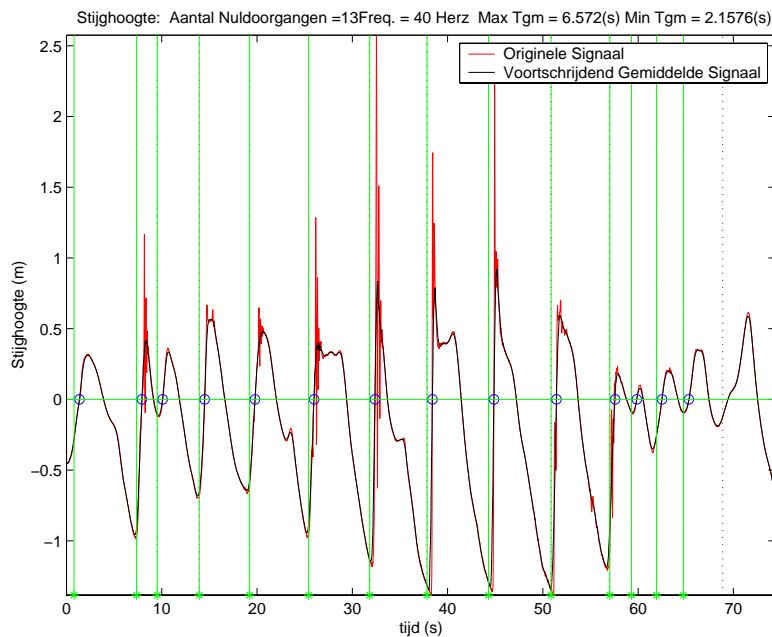
Het aantal tijdstappen n is afhankelijk van de golfperiode T_p en van de bemonsteringsfrequentie f :

$$n = \frac{T_p f}{10}$$

Belangrijk is dat n/f groot genoeg is ten opzichte van de golfperiode. In bovenstaande formule is deze quotiënt dus gelijk aan $T_p/10$.

Bij het selecteren van de golven wordt uitgegaan van de opwaartse nuldoorgangen van het voortschrijdend gemiddelde van het signaal van de diepst gelegen drukopnemer. Het begintijdstip van een golf vindt een bepaalde periode eerder plaats dan de opwaartse nuldoorgang, en het eindtijdstip een bepaalde periode na de opwaartse nuldoorgang. Deze periodes hangen af van de locatie waar de maximale stijghoogtes (het interessegebied) optreden ten opzichte van de diepst gelegen drukopnemer en van het faseverschil dat optreedt in de signalen van de diepst gelegen drukopnemer en de drukopnemers in het interessegebied. Het begintijdstip van een golf is vastgesteld op $0,1 T_m$ voor een opwaartse nuldoorgang. Omdat er soms na een golfklap schommelingen aanwezig zijn in het signaal, wordt pas vanaf $0,3 T_m$ na de eerste opwaartse nuldoorgang gezocht naar de tweede opwaartse nuldoorgang ter bepaling van de tweede golf. Voor proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.3. Vervolgens wordt $0,3 T_m$ na de opwaartse nuldoorgang gezocht naar de volgende opwaartse nuldoorgang. Het begintijdstip van de volgende golf is tevens het eindtijdstip van de voorgaande en ligt dus $0,1 T_m$ voor de volgende opwaartse nuldoorgang.

Soms blijkt dat de aanname dat hetzelfde begin- en eindtijdstip voor een golf geldt in elke drukopnemer niet helemaal gerechtvaardigd is. Er kan sprake zijn van een faseverschil van bijna een halve golfperiode tussen de meest zeewaarts gelegen drukopnemer en de meest landwaartse. Ondanks het optreden van deze faseverschillen, kan met bovengenoemde manier van het selecteren van begin- en eindtijdstippen van golven in het algemeen de meest interessante momenten binnen een golf goed geanalyseerd worden. Bovendien leidt de selectiemethode tot aantallen golven die min of meer overeenkomen met het aantal golven geregistreerd door de golfhoogtemeters in de modelopstellingen.



Figuur A.3 Begin- en eindtijdstippen van de golven (verticale, groene lijn) in proef 23o11 in het eerste deel van het meetsignaal

In Figuur A.3 is tevens aangegeven wat het aantal nuldoorgangen is in dat deel van het meetsignaal, wat de bemonsteringsfrequentie is van die proef, wat de maximale periode is en wat de minimale periode van een golf is in dat deel van het meetsignaal.

A.4 Parameters tijdens golfklap

In deze paragraaf is de vertaling van het meetsignaal naar de gewenste parameters weergegeven ten tijde van een golfklap. Het is geïllustreerd met de meetsignalen uit proef 23o11, zie Tabel B.1.

Alle parameters worden uiteindelijk weggeschreven naar een uitvoer-file. De naam van de uitvoer-file is: “matrix-<proefnaam>.txt”.

A.4.1 Tijdstip waarop maximale stijghoogte plaatsvindt

Om het tijdstip te bepalen waarop een golfklap plaatsvindt, dient gezocht te worden naar een maximum in stijghoogte op het talud. Er kan gezocht worden naar een stijghoogte te opzichte van de stilwaterlijn, of naar een stijghoogte ten opzichte van het talud. In feite is dit laatste een drukhoogte $p_{\max}/\rho g$. Bij de opzet van de software is gekozen om te werken met een maximum in stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn. Dit zou theoretisch een verschil kunnen geven ten opzichte van het werken met de drukhoogte, maar dat kan alleen als de drukkengradiënt kleiner is dan de taludhelling. Gezien het feit dat dit tijdens de extreme drukken in een golfklap zeer onwaarschijnlijk is, kan aangenomen worden dat het werken met de stijghoogte het juiste tijdstip oplevert.

Om de maximale stijghoogte op het talud te bepalen is gedurende elke golf (tussen eerder vastgesteld begin- en eindtijdstip) gezocht naar de grootste waarde van de maximaal optredende stijghoogten in elk van de drukopnemers op het talud: $\phi_{\max} = \text{MAX}\{\phi_{\max;\text{dro}1}, \phi_{\max;\text{dro}2}, \dots, \phi_{\max;\text{dro}X}\}$. Bij hele hoge golfoploop zou deze oploop als maximum aangemerkt kunnen worden. Om deze metingen uit te sluiten, dient de druk in de drukopnemer waar de maximale stijghoogte plaatsvindt in ieder geval 1/2 van de significante golfhoogte H_s te bedragen.

Er wordt vastgesteld of er op het tijdstip $t_{\phi_{\max}}$, waarop de maximale stijghoogte plaatsvindt, sprake is van een golfklap. Hiertoe wordt op tijdstip $t_{\phi_{\max}}$ zeewaarts van de locatie $x_{\phi_{\max}}$ gezocht naar een tweede maximum $\phi_{\max2}$, kleiner dan ϕ_{\max} . Tussen dit tweede maximum en ϕ_{\max} wordt een minimum gezocht ϕ_{\min} . Voor de locatie $x_{\phi_{\max}}$ geldt de horizontale afstand van de drukopnemer waarin ϕ_{\max} optreedt tot waar de stilwaterlijn het talud snijdt. Dit tweede maximum en het minimum wordt als volgt bepaald:

1. Het meest zeewaarts gelegen opwaartse snijpunt van het stijghoogteverloop op het talud met $0,5\phi_{\max}$ wordt eerst bepaald.
2. Vanaf dat punt wordt zeewaarts over een gebied met een lengte $0,5H_s$ het minimum in stijghoogte bepaald. Dit is voorlopig ϕ_{\min} .
3. Over het gebied zeewaarts van ϕ_{\max} wordt het maximum in stijghoogte bepaald. Dit is het tweede maximum.
4. Tussen het tweede maximum en het maximum in stijghoogte wordt nogmaals het minimum bepaald. Als dit minimum in stijghoogte kleiner is dan het eerder opgeslagen minimum, dan wordt dit vervangen.

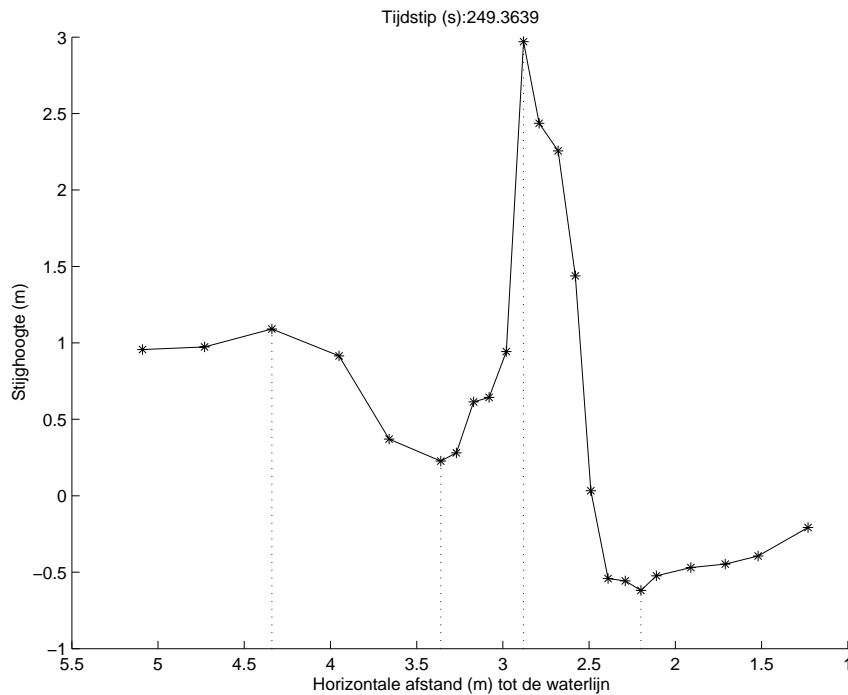
Aan het onderstaande moet vervolgens voldaan worden:

$$x_{\phi_{\max2}} > x_{\phi_{\max}} + \frac{1}{4}H_s \quad \text{EN} \quad p_{\max} > \frac{1}{2}H_s \quad \text{EN} \quad \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{x_{\phi_{\min}} - x_{\phi_{\max}}} > 1$$

Als aan één van deze eisen niet voldaan wordt, is er geen sprake van een golfklap. Er kan gezocht worden naar een maximale stijghoogte in de volgende golf. Als dat er wél is, dan wordt de maximale stijghoogte veroorzaakt door een golfklap. Het tijdstip $t_{\phi_{\max}}$ waarop de maximale stijghoogte plaatsvindt, wordt in dit geval opgeslagen als maatgevend tijdstip t_{\max} en de karakteristieke parameters kunnen bepaald worden.

A.4.2 Maximale stijghoogte tijdens de golfklap op het talud en locatie

De maximale stijghoogte is opgeslagen evenals het tijdstip en de locatie. Voor het tweede maximum wordt de stijghoogte $\phi_{\max2}$ en de locatie $x_{\phi_{\max2}}$ opgeslagen, evenals voor het er tussenin liggende minimum wordt de stijghoogte ϕ_{minklap} en de locatie x_{sklap} opgeslagen. Landwaarts van $x_{\phi_{\max}}$ ligt een minimum in stijghoogte. Dit minimum $\phi_{\min L}$ wordt ook vastgelegd, evenals de locatie $x_{\phi_{\min L}}$. Voor proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.4.



Figuur A.4 Willekeurige golfklap in proef 23o11 waarin van links naar rechts $x_{\phi_{max2}}$, x_{sklap} , $x_{\phi_{max}}$ en $x_{\phi_{minL}}$ zijn weergegeven met verticale stippellijnen

De stijghoogtes rond de trog zoals weergegeven in Figuur 2.2, ϕ_{bklap} en ϕ_k , worden ook vastgelegd. Ze zijn als volgt gedefinieerd:

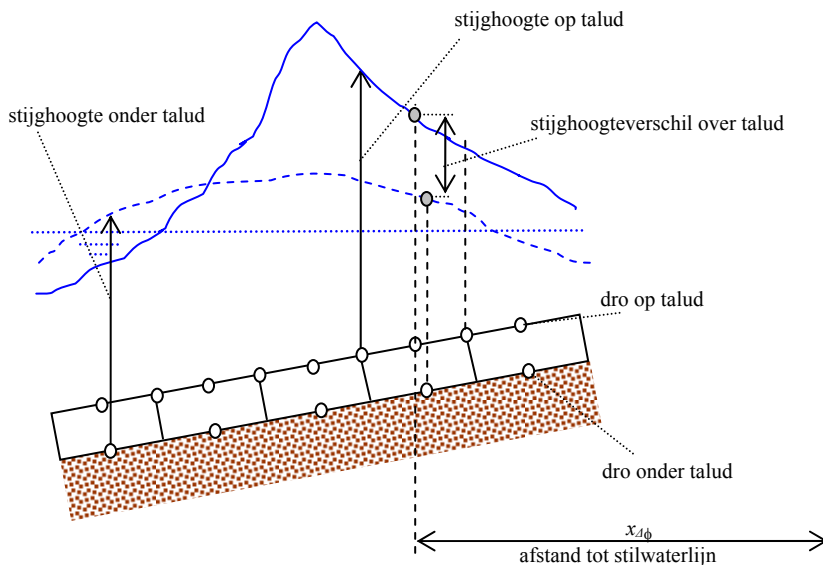
$$\phi_{bklap} = \phi_{max2} - \phi_{trog}$$

en:

$$\phi_k = \phi_{max} - \phi_{minklap}$$

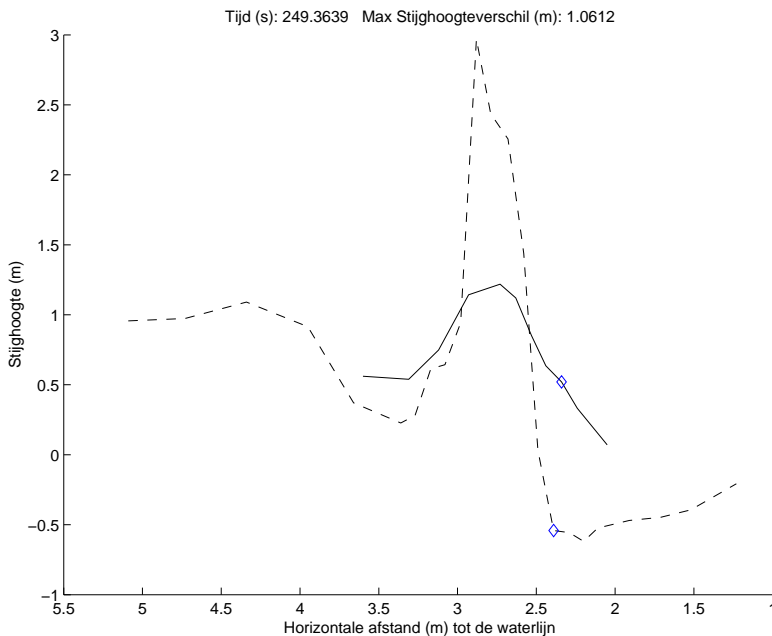
A.4.3 Maximaal stijghoogteverschil op tijdstip t_{max}

Het maximale stijghoogteverschil op tijdstip t_{max} over de toplaag dient vastgesteld te worden. Dit kan alleen voor die proeven waar zowel onder, als op de toplaag drukopnemers geïnstalleerd zijn. Het stijghoogteverschil is gelijk aan de stijghoogte van de drukopnemer onder het talud verminderd met de stijghoogte in de drukopnemer op het talud. Het gaat daarbij om drukopnemers die loodrecht ten opzichte van het talud onder elkaar liggen. Er wordt uitgegaan van de afstand van de drukopnemer op het talud tot de stilwaterlijn, zie Figuur A.5.



Figuur A.5 Definitie stijghoogteverschil

Het stijghoogteverschil wordt zo bepaald en vervolgens wordt het maximum $\phi_{\max\Delta\phi}$ vastgelegd, samen met de locatie $x_{\Delta\phi}$. Voor de locatie $x_{\Delta\phi}$ geldt de horizontale afstand van de drukopnemer op het talud waarin $\phi_{\max\Delta\phi}$ optreedt tot waar de stilwaterlijn het talud snijdt. Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.6.



Figuur A.6 Stijghoogte op het talud (gestippeld), stijghoogte onder het talud (doorgetrokken) en locatie waar maximaal verschil is geconstateerd (ruit) voor een willekeurige golfklap in proef 23o11

A.4.4 Breedtes van de belaste strook op het talud op tijdstip t_{max}

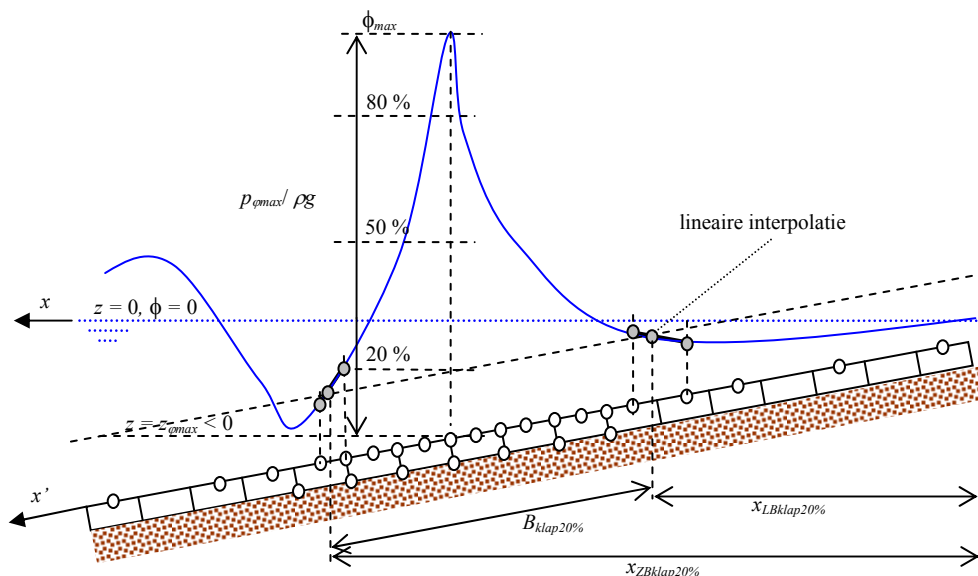
Op het tijdstip waarop de maximale stijghoogte optreedt als gevolg van een golfklap, t_{max} , wordt de breedte van de strook op het talud die belast wordt door de golfklap bepaald. Dit kan geschieden op de wijze zoals door Klein Breteler (1995) is voorgesteld. Hierbij worden verschillende breedtes vastgesteld afhankelijk van de belasting. Het gaat om de breedtes behorend bij de golfklap (maximum) en om de breedtes behorend bij de zeewaarts gelegen trog.

In het geval van het maximum wordt voor de belasting de stijghoogte vermindert met de hoogte van de drukopnemer ten opzichte van de stilwaterlijn (onder de waterlijn is die hoogte negatief), zodat de totale drukhoogte verkregen wordt:

$$\frac{P_{droX}}{\rho g} = \phi_{droX} - z_{droX}$$

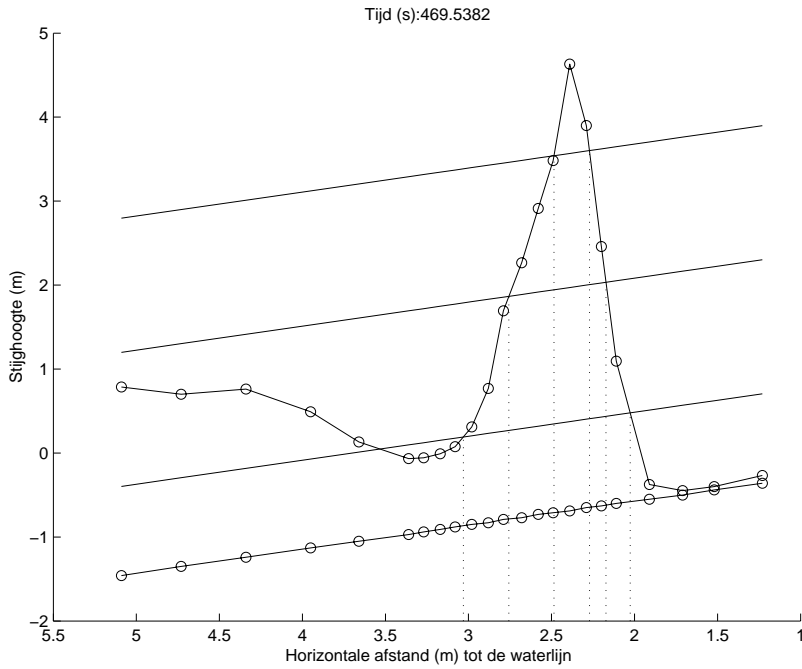
In Figuur A.7 wordt als voorbeeld de breedte $B_{klap20\%}$ weergegeven behorend bij het eerste percentage van 20 % van de belasting. Tevens worden de zeewaartse locatie $x_{ZBklap20\%}$ en de landwaartse locatie $x_{LBklap20\%}$ opgeslagen waartussen deze breedte bepaald wordt. De breedtes bij het tweede en derde percentage van 50 en 80 % van de belasting en locaties behorend bij die breedtes worden ook opgeslagen. Deze percentages kunnen bij het verwerken van de proeven op andere waarden ingesteld worden.

Aangezien de gekozen percentages van de belasting vaak niet precies in een drukopnemer optreden, dient er lineair geïnterpoleerd te worden tussen de twee drukopnemers waar een waarde net onder en net boven het percentage uitkomt, zie Figuur A.7.

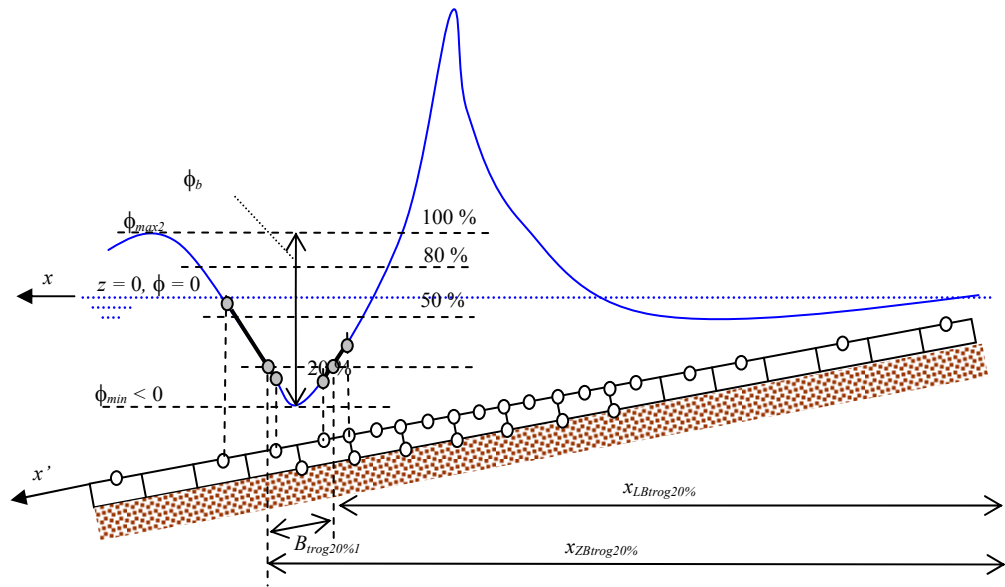


Figuur A.7 Breedte $B_{klap20\%}$ die hoort bij het gebied dat belast wordt door een belasting van 20 % van de maximale belasting

Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 zijn de breedtes behorend bij 20, 50 en 80 % weergegeven in Figuur A.8.



Figuur A.8 Breedtes behorend een willekeurige golfklap in proef 23o11

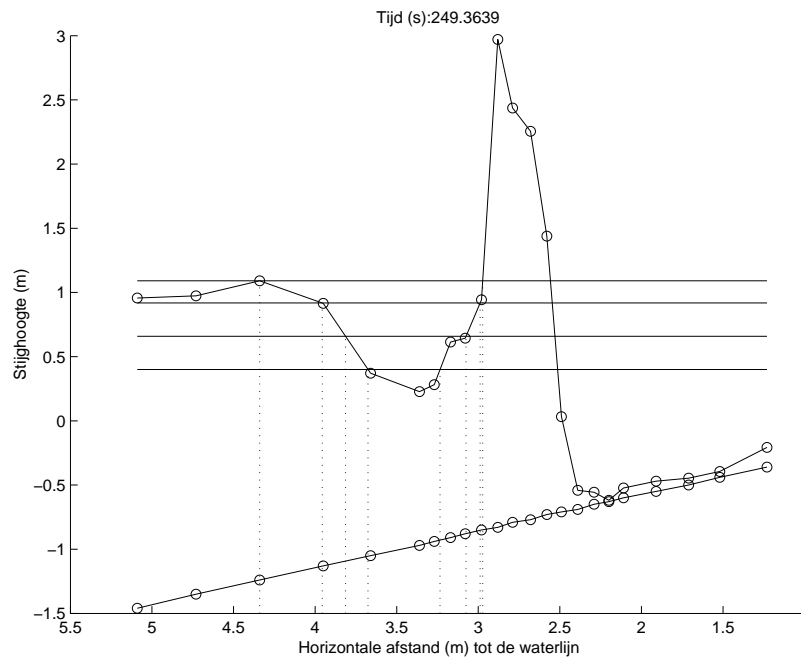


Figuur A.9 Bepaling van de breedtes van de trog

In het geval van de bepaling van de breedtes van de trog wordt uitgegaan van percentages van de trogdiepte ϕ_{bklap} . In Figuur A.9 is een voorbeeld gegeven van de bepaling van de breedte behorend bij 20 % van de trogdiepte B_{trog1} . Tevens worden de zeewaartse locatie $x_{BZtrog1}$ en de landwaartse locatie $x_{LBtrog1}$ opgeslagen waartussen deze breedte bepaald wordt.

De breedtes bij 50, 80 en 100 % van de belasting en locaties behorend bij die breedtes worden ook opgeslagen.

Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.10.

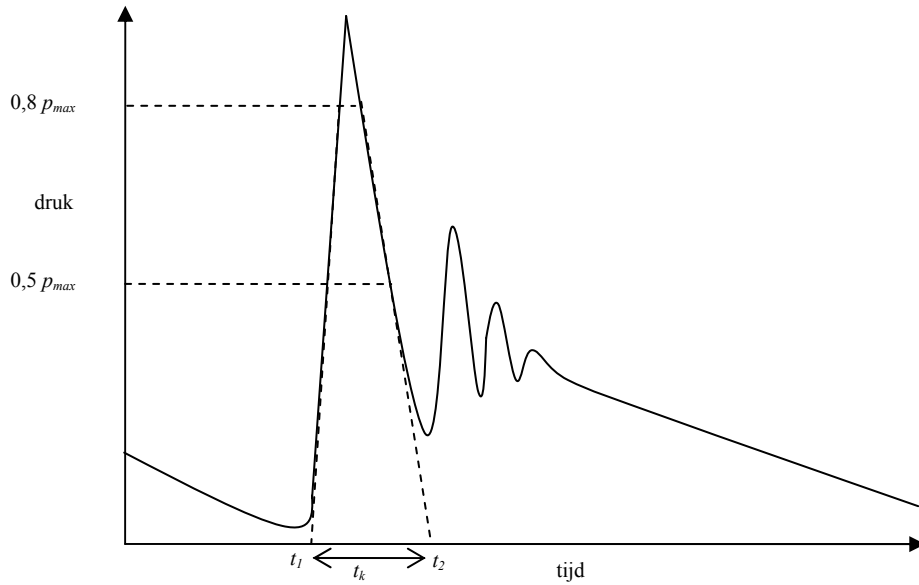


Figuur A.10 Breedtes van de trog behorend een willekeurige golfklap in proef 23o11

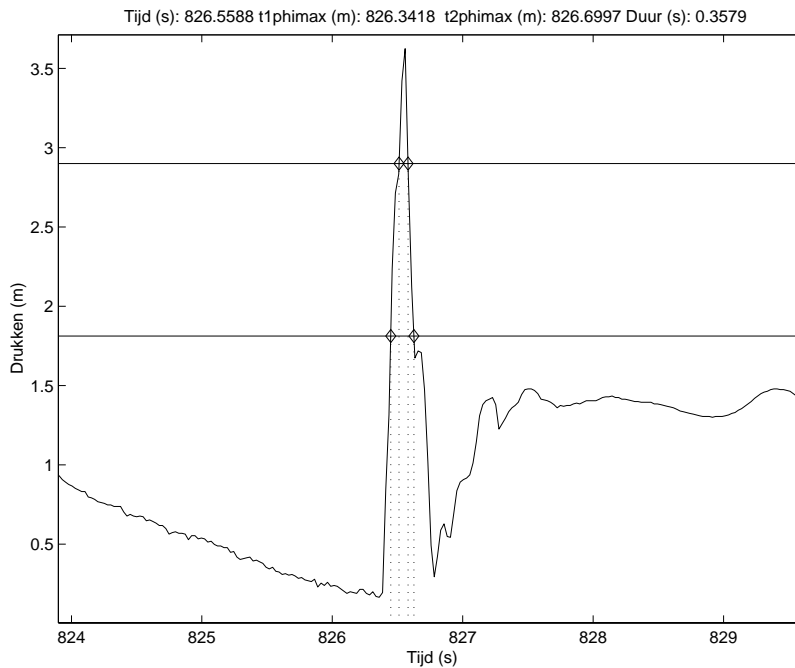
A.4.5 Totale duur van de golfklap rond tijdstip t_{max}

De golfklapduur, t_k , bepaald voor de drukopnemer waar ϕ_{max} optreedt, wordt als representatieve golfklapduur voor de golfklap aangehouden. Deze duur wordt bepaald op basis van de tijdstippen waarop de druk 80 % en 50 % van p_{max} bedraagt op de manier zoals is weergegeven in Figuur A.11.

Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.12.



Figuur A.11 Totale duur van de golfklap

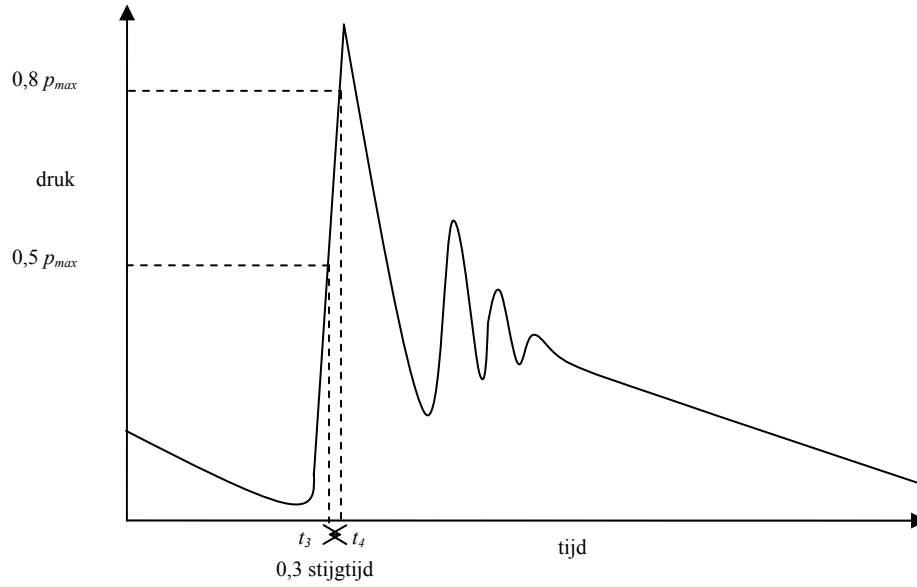


Figuur A.12 Totale golfklapduur op basis van 50 en 80 % van de druk met t_1 (meest linkse stippellijn) en t_2 (meest rechtse stippellijn)

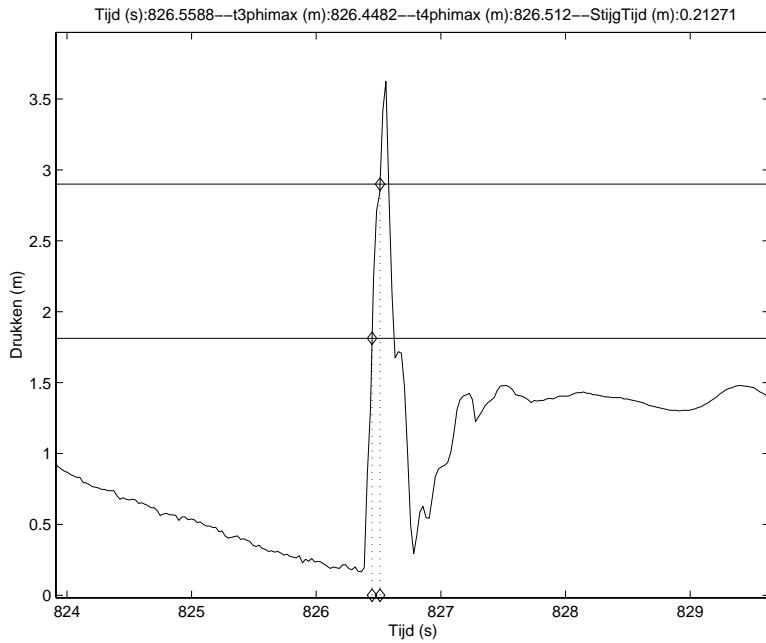
A.4.6 Stijgtijd van de golfklap rond tijdstip t_{max}

De stijgtijd van de golfklap, bepaald voor de drukopnemer waar ϕ_{max} optreedt, wordt als representatieve stijgtijd voor de golfklap aangehouden. Om te ontkomen aan slingeringen van het meetsignaal rond de piekwaarde van de stijghoogte en nabij de laagste waarden van de stijghoogte, wordt de stijgtijd gekoppeld aan de tijdstippen waarop de stijghoogte 50 en

80 % van p_{max} bedraagt, zie Figuur A.13. De tijd tussen deze twee tijdstippen wordt verondersteld overeen te komen met 30 % van de stijgtijd.



Figuur A.13 Stijgtijd van de golfklap



Figuur A.14 Stijgtijd op basis van 50 en 80 % van de druk met t_3 (linker ruit op horizontale as) en t_4 (rechter ruit op horizontale as)

Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 is de stijgtijd weergegeven in Figuur A.14.

A.4.7 Totale impuls van de golfklap rond tijdstip t_{max}

De totale impuls van de golfklap wordt bepaald gedurende de golfklap op het gebied met een breedte die hoort bij het laagst gekozen percentage bij de bepaling van de belaste strook. In dit geval is dat 50 % en de bijbehorende breedte $B_{klap50\%}$ ligt tussen de zeewaartse locatie $x_{ZBklap50\%}$ en de landwaartse locatie $x_{LBklap50\%}$, zie Figuur A.7. Voor elke drukopnemer X binnen de breedte $B_{klap50\%}$ wordt afzonderlijk de druk gesommeerd over de golfklapduur, t_k . Vervolgens worden deze waarden voor elke drukopnemer binnen de breedte $B_{klap50\%}$ gesommeerd. De druk in elke drukopnemer wordt vermenigvuldigd met het representatieve oppervlak rond een drukopnemer. Het representatieve oppervlak rond een drukopnemer wordt in de breedterichting bepaald door de afstand tussen de middens van de naastliggende drukopnemers. Voor de impuls van de meest zeewaarts gelegen drukopnemer Z binnen de breedte $B_{klap50\%}$ tot de meest landwaarts gelegen drukopnemer L geldt dus:

$$I_{\phi_{max}} = \sum_{droZ}^{droL} \Delta B \sum_{t_1}^{t_2=t_1+t_k} p_{droX} \Delta t$$

waarin p_{droX} de druk in drukopnemer X is en drukopnemer X tussen drukopnemers Z en L ligt.

In de praktische uitwerking blijkt het niet eenvoudig te zijn om de golfklap geografisch op het talud af te bakenen. Het probleem dat zich voordoet is dat een golfklap vaak niet een geïsoleerde gebeurtenis op het talud is, maar dat de golfklap op de voet van het golffront neerkomt. In de zone waar de golfklap aanwezig is, was er dus vlak vóór de golfklap al een stijghoogte aanwezig van het stijghoogtefront en van de resterende waterlaag op het talud. In feite zou alleen de vermeerdering van de stijghoogte in de zone van de golfklap toegerekend moeten worden aan de impuls als gevolg van de golfklap. Dit maakt het echter zo gecompliceerd, dat daar voorlopig van af is gezien. Een praktische oplossing voor dit probleem is door te werken met de zone waarin de drukhoogte ($p/\rho g$; stijghoogte ten opzichte van het taludoppervlak) op het talud de helft van de maximale drukhoogte in de golfklap overschrijdt (50%-waarde in Figuur A.7).

A.4.8 Gradiënten van de stijghoogte langs het talud op tijdstip t_{max}

De front- en klapgradiënten zoals beschreven in Paragraaf 2.2.1 (zie Figuur 2.2) worden bepaald volgens:

$$\theta_{f20\%-50\%} = \frac{0,3\phi_{bklap}}{x_{ZBtrog50\%} - x_{ZBtrog20\%}}$$

$$\theta_{f50\%-80\%} = \frac{0,3\phi_{bklap}}{x_{ZBtrog80\%} - x_{ZBtrog50\%}}$$

$$\theta_{f20\%-80\%} = \frac{0,6\phi_{bklap}}{x_{ZBtrog80\%} - x_{ZBtrog20\%}}$$

$$\theta_{k20\%-50\%f} = \frac{0,3\phi_{bklap}}{x_{LBtrog20\%} - x_{LBtrog50\%}}$$

$$\theta_{k50\%-80\%f} = \frac{0,3\phi_{bklap}}{x_{LBtrog50\%} - x_{LBtrog80\%}}$$

$$\theta_{k20\%-80\%f} = \frac{0,6\phi_{bklap}}{x_{LBtrog20\%} - x_{LBtrog80\%}}$$

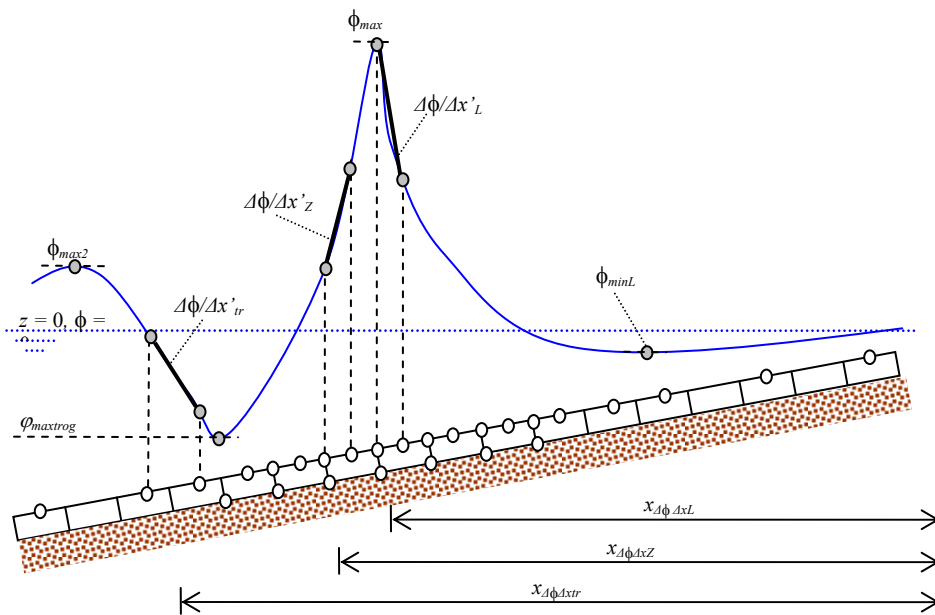
$$\theta_{k20\%-50\%k} = \frac{0,3p_{max}}{x_{ZBklap20\%} - x_{ZBklap50\%}}$$

$$\theta_{k50\%-80\%k} = \frac{0,3p_{max}}{x_{ZBklap50\%} - x_{ZBklap80\%}}$$

$$\theta_{k20\%-80\%k} = \frac{0,6p_{max}}{x_{ZBklap20\%} - x_{ZBklap80\%}}$$

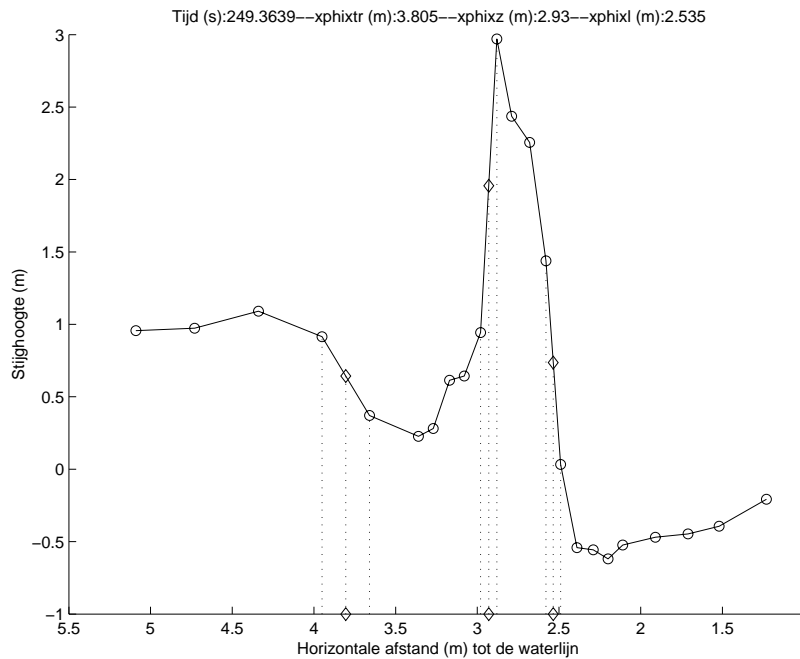
Deze gradiënten worden niet direct opgeslagen in de uitvoer in deze versie van de software. Er dient een extra bewerking plaats te vinden op de uitvoer.

Tevens worden op tijdstip t_{max} de gradiënten van de stijghoogte langs het talud bepaald op een drietal locaties. Tussen $x_{\phi_{max2}}$ en x_{sklap} , tussen x_{sklap} en $x_{\phi_{max}}$ en tussen $x_{\phi_{max}}$ en $x_{\phi_{minL}}$ wordt gezocht naar de steilste (negatieve of positieve) gradiënten tussen 2 naast elkaar liggende drukopnemers. Deze gradiënten, respectievelijk $\Delta\phi/\Delta x'_{tr}$, $\Delta\phi/\Delta x'_Z$ en $\Delta\phi/\Delta x'_L$, worden opgeslagen, evenals de locaties waar ze optreden. Voor de locaties wordt de horizontale afstand van het midden tussen de drukopnemers waartussen de gradiënt optreedt en het snijpunt van het talud met de stilwaterlijn aangehouden, zie Figuur A.15.



Figuur A.15 Gradiënten van de golfklap

Voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 is dit weergegeven in Figuur A.16.



Figuur A.16 Locaties van maximale gradiënten in een willekeurige golfklap in proef 23o11 (ruiten op horizontale as)

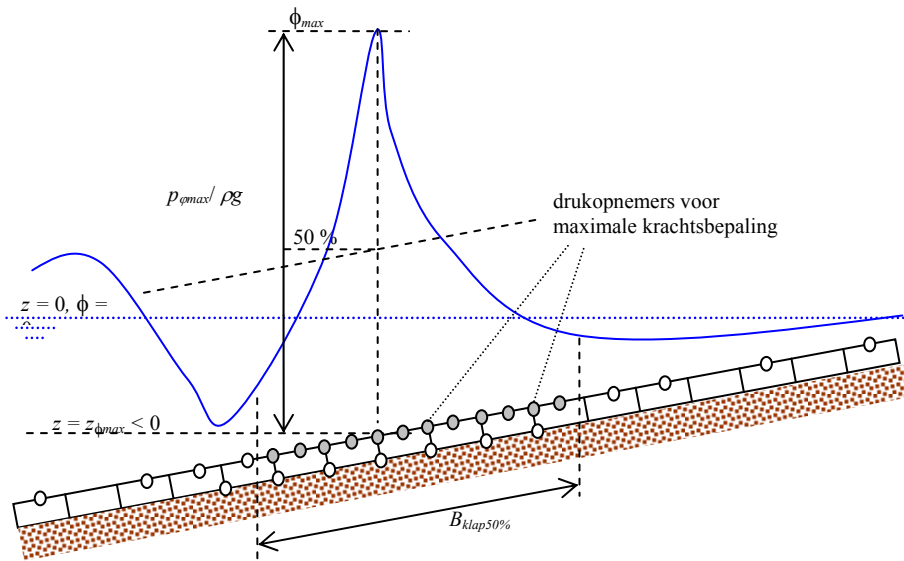
A.4.9 Maximale kracht van de golfklap op het talud rond tijdstip t_{max}

De kracht als gevolg van de golfklap wordt uitgerekend op het gebied met een breedte die hoort bij het laagst gekozen percentage bij de bepaling van de belaste strook. In dit geval is dat 50 % en de bijbehorende breedte $B_{klap50\%}$ ligt tussen de zeewaartse locatie $x_{ZBklap50\%}$ en de landwaartse locatie $x_{LBklap50\%}$, zie Figuur A.7. De waarde van deze 50% is gekozen om dezelfde reden als bij impuls is uitgelegd, omdat hier dezelfde problematiek speelt.

De druk in elke drukopnemer in dat gebied wordt vermenigvuldigd met de representatieve oppervlakte rond die drukopnemer en gesommeerd voor al die drukopnemers, zie Figuur A.17. Om de maximale kracht gedurende een golfklap te bepalen, dient bovenstaande bewerking uitgevoerd te worden gedurende een bepaald tijdsinterval, namelijk van t_1 tot t_2 , en dient de grootste waarde gedurende die periode als maximale kracht vastgelegd te worden.

Het representatieve oppervlak rond een drukopnemer wordt in de breedterichting bepaald door de afstand tussen de middens van de naastliggende drukopnemers.

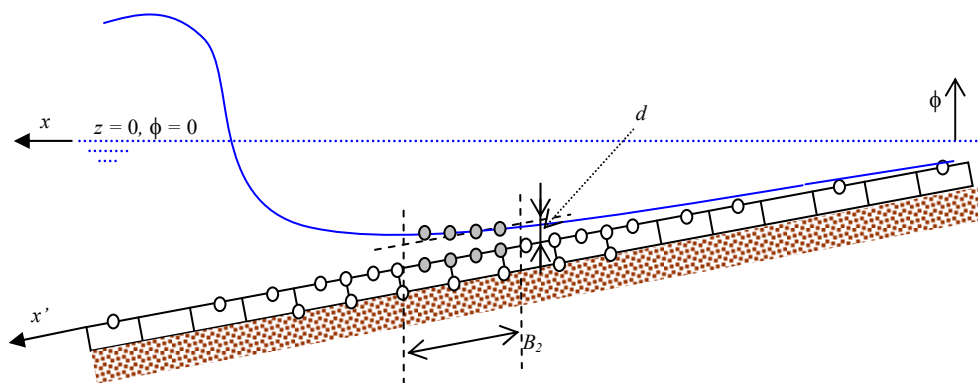
Aangezien de metingen uit 2D Deltagootonderzoek gehaald worden, wordt voor de lengterichting (evenwijdig aan dijkas) per strekkende meter gerekend.



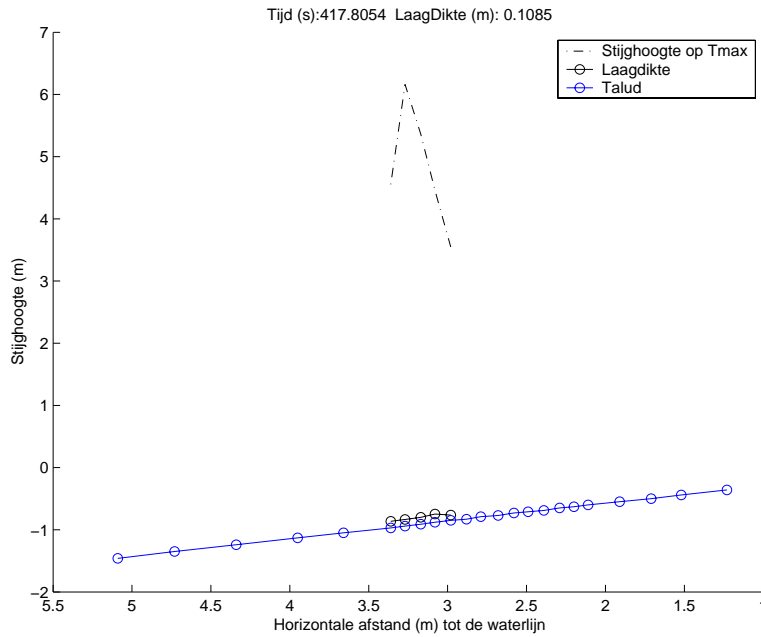
Figuur A.17 Maximale kracht van de golfklap

A.4.10 Laagdikte net voor tijdstip t_{max}

Net vóór het tijdstip waarop ϕ_{max} optreedt, bevindt zich op het talud een waterlaag met een dikte d , zie Figuur A.18. De dikte d wordt bepaald in het gebied dat ten tijde van t_{max} met meer dan 50 % van de maximale belasting belast wordt. Hier wordt het gemiddelde bepaald van de druk (m) in de drukopnemers op het talud, vanaf 1.5 maal de golfklapduur t_k vóór t_{max} tot t_{max} . Voor de laagdikte d wordt uiteindelijk de minimale gemiddelde druk in die periode opgeslagen in de uitvoertabel.



Figuur A.18 Laagdikte d behorend bij het gebied dat belast wordt met een belasting van minstens 50 % van de maximale belasting net vóór het tijdstip t_{max} waarop deze maximale belasting optreedt



Figuur A.19 Stijghoogte op het talud waarmee laagdikte d bepaald kan worden voor een willekeurige golf in proef 23o11

Figuur A.18 laat voor een willekeurige golf in proef 23o11 de laagdikte zien. Ook is het tijdstip weergegeven waarop deze laagdikte optreedt (linker getal in titel van grafiek).

A.4.11 Golf front net voor tijdstip t_{max}

Wanneer er sprake is van een golfklap, dan is het waarschijnlijk dat het golf front optreedt net voor de maximale stijghoogte. Er wordt gedurende een golf totdat de golfklap optreedt per tijdstap gezocht naar een gradiënt θ_f . Om deze gradiënt te bepalen wordt gebruik gemaakt van $0,9\phi_{min}$ en de locatie waar deze stijghoogte optreedt, aangezien het gebruik van de locatie waar ϕ_{min} optreedt, leidt tot minder steile gradiënten. Van alle tijdstappen wordt vervolgens de steilste opgeslagen. Per tijdstap wordt eerst gekeken naar een maximale stijghoogte op het talud. Er dient voorkomen te worden, dat de stijghoogtesignalen net voor de golfklap, wanneer de golfklap zich al sterk aan het ontwikkelen is, meegenomen worden bij de bepaling van het steilste front. Om te bepalen of er in een tijdstap een golfklap in ontwikkeling is, moet de stijghoogte $\phi_{max;front}$ voldoen aan:

$$\phi_{max;front} \leq 1,2(\phi_b + \phi_{min}) \tag{A.1}$$

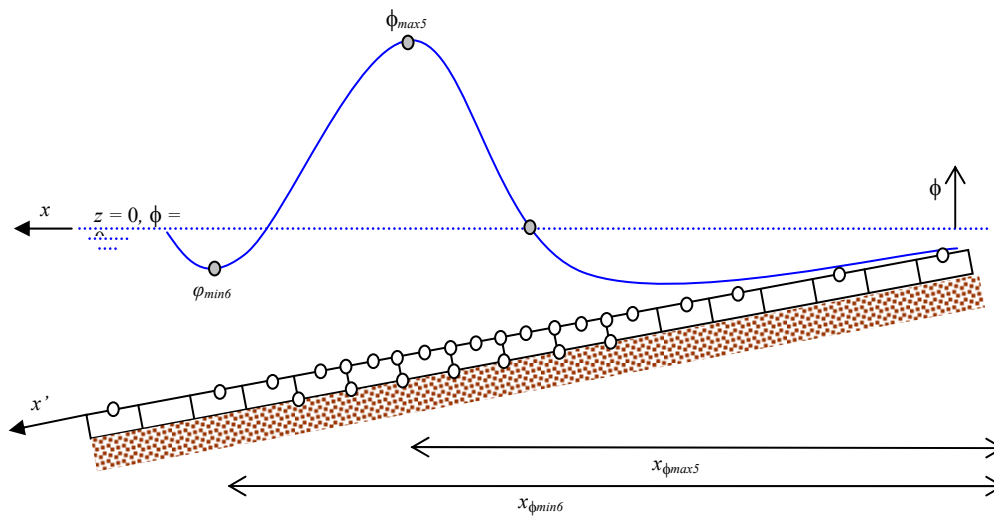
met

$$\phi_b = \min \left[0,34H_s \frac{\xi_{op}}{(\tan \alpha)^{0,75}}; 3,15H_s \right] \tag{A.2}$$

$$\phi_{min} = \max \left[-0,2H_s \left(\frac{\xi_{op}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right)^{1,25} ; \frac{-3,1H_s}{1 + \frac{0,9}{\sqrt{\xi_{op}}}} \right] \quad (A.3)$$

De factor 1,2 in Formule (A.1) is gekozen om niet al teveel tijdstappen in de golven af te keuren. De Formules (A.2) en (A.3) zijn afgeleid uit de formules die beschreven zijn door De Waal et al. (1995). De Waal et al. (1995) bepaalden soortgelijke formules met overschrijdingspercentages van 13,5 % en 2 %. Wanneer een Rayleigh verdeling verondersteld wordt en een extrapolatie naar een overschrijdingspercentage van 0,1 %, resulteert dat in Formules (A.2) en (A.3).

Wanneer de maximale stijghoogte $\phi_{max;front}$ kleiner is dan 0, dan wordt met de volgende tijdstap verder gegaan. Wanneer de maximale stijghoogte $\phi_{max;front}$ groter is dan 1,2 ($\phi_b + \phi_{min}$), dan wordt met de volgende golf verder gegaan en worden alleen de tijdstippen tot dat moment beschouwd. Als wel voldaan wordt aan Formule (A.1), dan wordt gezocht naar een minimum in stijghoogte (ϕ_{min}) op het talud. Dit minimum dient kleiner te zijn dan 0. Als dat niet het geval is, dan wordt met de volgende tijdstap verder gegaan. Anders wordt zeewaarts van dat minimum het snijpunt met de waterlijn ($\phi = 0$) bepaald.



Figuur A.20 Mogelijk stijghoogtesignaal tijdens golffront

Zeewaarts van het snijpunt met de waterlijn wordt vervolgens naar een maximum in stijghoogte (ϕ_{max5}) op het talud gezocht en zeewaarts van dat maximum wordt weer naar een minimum in stijghoogte (ϕ_{min6}) gezocht, zie Figuur A.20. Er kan sprake zijn van een soort golfklap, namelijk op het moment dat geldt:

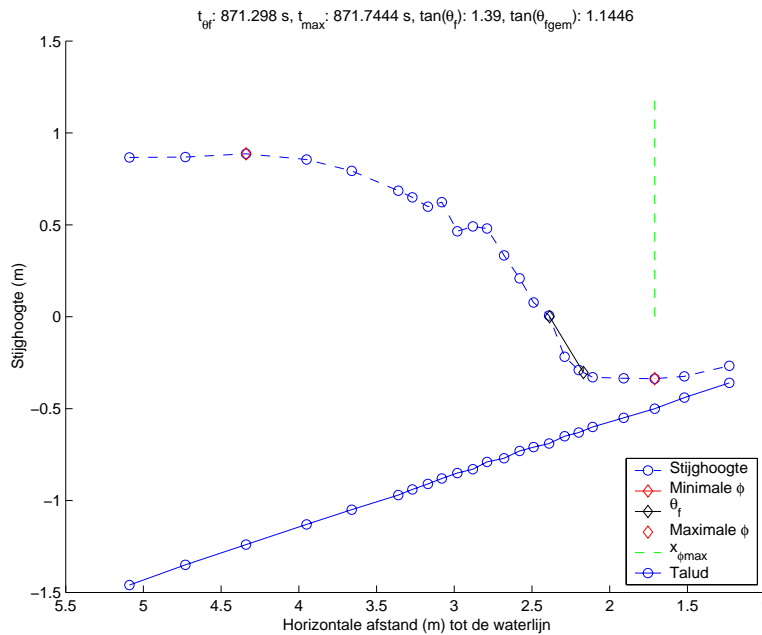
$$\phi_{\max 5} - \phi_{\min 6} > 0,25H_s \quad \text{EN} \quad \frac{\phi_{\max 5} - \phi_{\min 6}}{x_{\phi_{\min 6}} - x_{\phi_{\max 5}}} > 0,5 \quad (\text{A.4})$$

De eerste voorwaarde voorkomt dat met de tweede voorwaarde naar kleine fluctuaties gekeken wordt. Als aan Formule (A.4) voldaan wordt, dan wordt deze tijdstap beschouwd als eindtijdstip van de golf wat de bepaling van de gradiënten betreft. Als niet aan Formule (A.4) voldaan wordt, dan wordt gecheckt of de druk in de drukopnemers landwaarts van het minimum ϕ_{\min} voldoet aan:

$$p_{dro} < \max \left[\phi_{\min; front} + \frac{1}{8} H_s; \frac{1}{4} H_s \right] \quad (\text{A.5})$$

Als dat zo is, dan is er kennelijk sprake van een acceptabele laagdikte landwaarts van het golffront. Zo niet, dan is er wellicht toch al een golfklap aan het ontstaan. De gradiënt in de stijghoogte wordt vervolgens tijdelijk opgeslagen en daarna wordt met de volgende tijdstap verder gegaan.

Ten tijde van t_{\max} , of op het tijdstip dat voldaan wordt aan Formule (A.4) wordt gekeken naar de ontwikkeling van de gradiënt in de tijd. Vanaf het eerste tijdstip dat een gradiënt in een golf gevonden is, wordt over een bepaalde periode de gemiddelde en de maximale gradiënt bepaald. Met behulp van Klein Breteler (2000) kan die periode voor Deltagootproeven op 0,1 s vastgesteld worden en voor Scheldegootproeven op ongeveer 0,03 s. Op het begin- en eindtijdstip van die periode dient wel een gradiënt gevonden te zijn, anders worden de gemiddelde en maximale waarde niet bepaald voor die periode. Mocht er op een willekeurig ander tijdstip binnen die periode geen gradiënt gevonden zijn, dan wordt dat tijdstip niet meegenomen bij het bepalen van de gemiddelde en maximale gradiënt van die periode. Vervolgens wordt vanaf het tweede tijdstip dat een gradiënt in een golf gevonden is over die periode de gemiddelde en de maximale gradiënt bepaald. Zo wordt de hele periode dat er gradiënten gevonden zijn binnen een golf doorlopen. Uiteindelijk wordt de maximale gemiddelde gradiënt θ_{fgem} in een golf opgeslagen met het tijdstip $t_{\theta_{fgem}}$ van het begin van de periode waarin dit gemiddelde optreedt, evenals de maximale gradiënt θ_f met het tijdstip t_{θ_f} in de periode dat de maximale gemiddelde gradiënt optreedt. Op het tijdstip dat de maximale gradiënt optreedt worden de andere relevante parameters (zie Figuur 2.1) bepaald en opgeslagen. Er wordt aangenomen dat de locatie waar de gradiënten optreden niet veel veranderd.



Figuur A.21 Stijghoogte (blauw gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurig golffront in proef 23o11 in een golf waarin ook een golfklap is vastgesteld

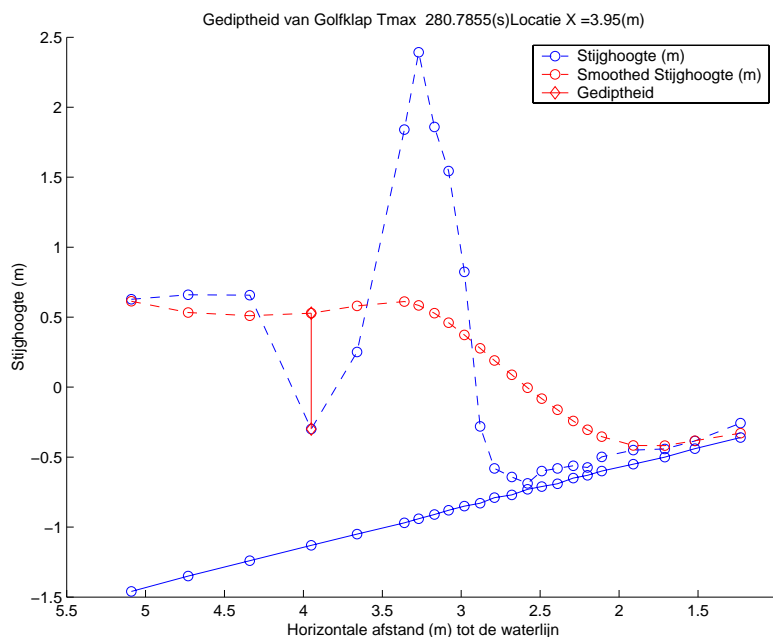
Figuur A.21 laat een willekeurig golffront zien in proef 23o11. Ook zijn de tijdstippen weergegeven waarop dit golffront (linker tijdstip in titel van grafiek) en de daarop volgende golfklap (rechter tijdstip in titel van grafiek) plaatsvinden. De locatie waar de golfklap plaats gaat vinden, is aangegeven met een verticale, gestippelde, groene lijn.

A.4.12 Gediptheid op tijdstip t_{max}

Om de gediptheid (zie Paragraaf 2.2.1, Figuur 2.4) te bepalen, wordt het stijghoogtesignaal op t_{max} bewerkt met een wegingsfactor tot een meer vloeiend verlopend signaal. Deze wegingsfactor heeft de vorm van een gelijkbenige driehoek met basis λ en hoogte 1. De bewerking gaat als volgt:

1. De driehoek wordt met de top bij een bepaalde drukopnemer gelegd.
2. De oorspronkelijk stijghoogte in die drukopnemer wordt vermenigvuldigd met een factor 1; de er omheen liggende drukopnemers met een factor die overeenkomt met de waarde in de driehoek op dezelfde afstand tot de top van de driehoek als de afstand tussen de betreffende drukopnemers. Wanneer een deel van de driehoek buiten het gebied waar drukopnemers geïnstalleerd zijn komt te liggen, wordt in dat deel gerekend met dezelfde stijghoogte als op de rand.
3. Het nieuwe signaal wordt geïntegreerd over het gebied waarop de wegingsfactor is toegepast en gedeeld door $\frac{1}{2} \lambda$.
4. Door van de uitkomst de originele stijghoogte af te trekken, wordt de gediptheid verkregen behorend bij die drukopnemer.

Deze bewerking wordt bij elke drukopnemer toegepast en het maximum ϕ_{dip} wordt opgeslagen, evenals de locatie $x_{\phi_{\text{dip}}}$ waar dit maximum optreedt. Bij Deltagootproeven wordt een λ van 2,6 m toegepast en bij Scheldegootproeven een λ van 0,37 m.



Figuur A.22 Stijghoogte (blauw gestippeld) en vloeiend gemaakte stijghoogte (rood gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurige golfklap in proef 23o11

Figuur A.22 laat voor een willekeurige golfklap in proef 23o11 het vloeiend gemaakte stijghoogtesignaal zien en de maximale gediptheid (verticale, rode lijn). In de titel van de grafiek is het tijdstip weergegeven waarop de golfklap plaatsvindt en de locatie waar de maximale gediptheid optreedt. In Figuur A.22 treedt de maximale gediptheid zeewaarts van de golfklap op, maar de maximale gediptheid zou ook landwaarts van de golfklap op kunnen treden.

A.4.13 Geïntegreerde gediptheid rond tijdstip t_{max}

Naast de gediptheid wordt ook de geïntegreerde gediptheid bepaald. Dit levert een maat op voor de blokbeweging. De gediptheid wordt op de locatie waar de maximale gediptheid op t_{max} optreedt geïntegreerd van $0,1T_p$ voor t_{max} tot $0,1T_p$ na t_{max} . Daarbij dient de gediptheid wel groter te zijn dan $0,4 H_s$. Deze drempelwaarde is afgeleid van een maximaal toelaatbare waarde van $H_s/\Delta D = 2,5 \Gamma_k \approx 3$ à 5 . Hiermee wordt de geïntegreerde gediptheid dus:

$$\phi_{\int dip} = \int_{t_{max}-0,1T_p}^{t_{max}+0,1T_p} \max \{ \phi_{dip} - 0,4H_s; 0 \} dt$$

De geïntegreerde gediptheid $\phi_{\int dip}$ wordt opgeslagen.

A.4.14 Dipkracht op tijdstip t_{max}

De dipkracht op het tijdstip t_{max} wordt verkregen door de gediptheid te integreren over het gebied waar de gediptheid groter is dan $0,4H_s$:

$$F_{dip} = \int_{x_1}^{x_2} \max \{ \phi_{dip} - 0,4H_s; 0 \} dx$$

De dipkracht is een maat voor de totale opwaartse kracht die op de steenzetting werkt als gevolg van het stijghoogteverschil, minus het eigen gewicht. Deze kracht werkt over meerdere rijen blokken en kan een kattenrug veroorzaken.

A.4.15 Dipimpuls rond tijdstip t_{max}

De dipimpuls wordt verkregen door de dipkracht te integreren van $0,1T_p$ voor t_{max} tot $0,1T_p$ na t_{max} :

$$I_{dip} = \int_{t_{max}-0,1T_p}^{t_{max}+0,1T_p} F_{dip} dt$$

De dipkracht wordt in die periode telkens bepaald over hetzelfde gebied, namelijk van x_1 tot x_2 , zie Paragraaf A.4.14. De dipimpuls is een maat voor de mogelijke beweging van een bepaald oppervlak van de steenzetting, dat wat groter is dan één steen.

A.5 Parameters tijdens golffront

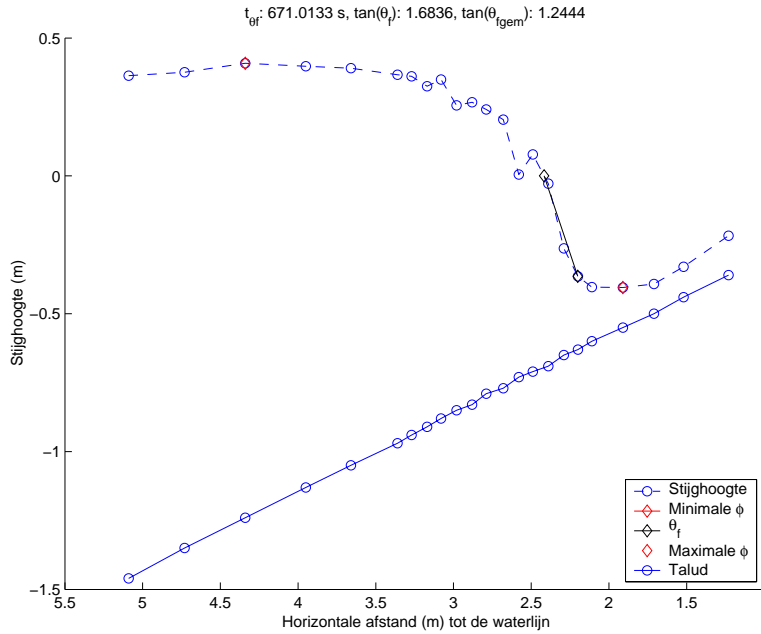
In deze paragraaf is de vertaling van het meetsignaal naar de gewenste parameters weergegeven ten tijde van een golffront. Het is geïllustreerd met de meetsignalen uit proef 23o11, zie Tabel B.1.

Alle parameters worden uiteindelijk weggeschreven naar een uitvoer-file. De naam van de uitvoer-file is: "allegolffronten-<proefnaam>.txt".

A.5.1 Golffront

In Paragraaf A.4.11 wordt beschreven hoe een golffront bepaald wordt in een golf waarin eerder een golfklap is vastgesteld. De manier waarop het steilste golffront bepaald wordt in een golf met golfklap, komt overeen met de manier waarop gezocht wordt naar het golffront in elke golf.

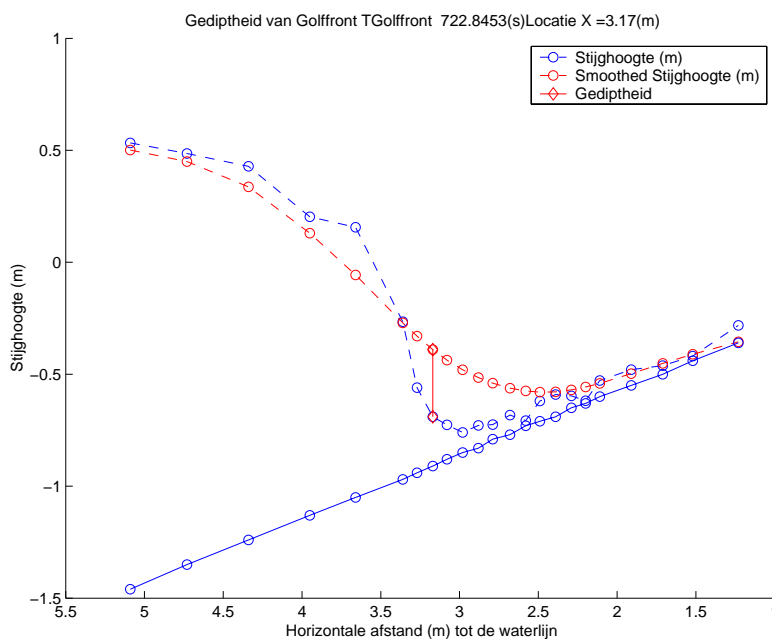
Figuur A.23 laat een willekeurig golffront zien in proef 23o11. Ook zijn de tijdstippen weergegeven waarop dit golffront (linker tijdstip in titel van grafiek) en de daarop volgende golfklap (rechter tijdstip in titel van grafiek) plaatsvinden. De locatie waar de golfklap plaats gaat vinden, is aangegeven met een verticale, gestippelde, groene lijn.



Figuur A.23 Stijghoogte (blauw gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een golf front in een willekeurige golf in proef 23o11

A.5.2 Gediptheid, geïntegreerde gediptheid, dipkracht en dipimpuls

In Paragraaf 2.2.1 is toegelicht dat de gediptheid bepaal kan worden, als een soort grove benadering van het stijghoogteverloop onder de toplaag bij een bepaalde lek lengte. Dit is geïllustreerd ten tijde van een golfklap, zie ook Paragraaf A.4.12. De gediptheid kan ook bepaald worden ten tijde van het steilste golf front. De manier waarop de gediptheid bepaald wordt, komt overeen met de beschrijving in Paragraaf A.4.12, met als enige verschil het tijdstip waarop de gediptheid bepaald wordt.



Figuur A.24 Stijghoogte (blauw gestippeld) en vloeiend gemaakte stijghoogte (rood gestippeld) op het talud (blauw doorgetrokken) voor een willekeurige golf front in proef 23o11

Figuur A.24 laat voor een willekeurig golf front in proef 23o11 het vloeiend gemaakte stijghoogtesignaal zien en de maximale gediptheid (verticale, rode lijn). In de titel van de grafiek is het tijdstip weergegeven waarop het golf front plaatsvindt en de locatie waar de maximale gediptheid optreedt. In Figuur A.24 treedt de maximale gediptheid zeewaarts van de golfklap op, maar de maximale gediptheid zou ook landwaarts van de golfklap op kunnen treden.

Tevens worden ten tijde van het steilste golf front de geïntegreerde gediptheid, de dipkracht en de dipimpuls bepaald op een manier overeenkomstig de beschrijving in Paragraaf A.4.13 tot Paragraaf A.4.15.

A.6 Uitvoer

De uitvoer is per proef naar drie files weggeschreven:

- een log-file (log-<proefnaam>.txt),
- een golfklappenuitvoer-file (matrix-<proefnaam>.txt), en
- een golf frontenuitvoer-file (allegolf fronten-<proefnaam>.txt).

Log-file

In de log-file zijn een viertal waarden te vinden:

1. Het totaal aantal golven. Dit hangt af van het aantal nuldoorgangen van de meest zeewaartse drukopnemer, zie Paragraaf A.3.
2. Het aantal golven waarin een golfklap is geconstateerd, zoals gedefinieerd in Paragraaf A.4.2.
3. Het aantal golven waarin geen golfklap is gevonden, maar waarvan de maximale stijghoogte ϕ_{max} groter is dan de significante golfhoogte H_s .
4. Het totaal aantal golven zonder golfklap.

Het aantal golven met een golfklap (waarde 2) vermeerderd met het totaal aantal golven zonder golfklap (waarde 4), komt overeen met het totaal aantal golven (waarde 1). In Tabel A.1 staat voor elke proef aangegeven wat deze 4 waarden zijn voor het tijdstip waarop de stijghoogte maximaal is.

Proef	Waarde 1: aantal golven	Waarde 2: aantal golven met golfklap	Waarde 3: aantal golven zonder golfklap maar $\phi_{max} > H_s$	Waarde 4: aantal golven zonder golfklap
5o05	841	292	126	552
5o06	912	191	90	722
12ao07	888	262	104	627

12ao09	530	182	45	349
21o02	828	224	144	605
21o03	873	254	150	620
21o06	831	261	139	571
21o08	960	261	113	700
21o11	905	317	131	589
21o14	957	408	108	550
21o15	928	414	80	515
21o16	934	377	54	558
23o01	849	206	67	644
23o02	856	236	105	621
23o04	843	232	117	612
23o08	908	292	127	617
23o10	1001	412	88	590
23o11	956	411	78	546
AS202	1041	589	104	453
AS401	875	432	85	444
AS601	1102	441	258	662
sz127	567	35	171	533
sz128	594	13	116	582
sz626	1022	115	112	908
sz627	1030	252	122	779

Tabel A.1 De 4 waarden in de log-file voor elke proef

Uit Tabel A.1 blijkt dat het aantal golven zonder golfklap, dat wel een maximale stijghoogte heeft groter dan de significante golfhoogte (waarde 3), slechts orde 20 % is van het totaal aantal golven zonder golfklap (waarde 4). Een groot deel van de grotere stijghoogtes wordt dus kennelijk meegenomen door de software met behulp van de in Paragraaf A.4.2 beschreven definitie.

Golfklappenuitvoer-file

In de golfklappenuitvoer-file zijn de resultaten van de software voor de golfklappen in tabelvorm weggeschreven. Per kolom in de tabel is een parameter weergegeven, zie Tabel A.2. Het aantal rijen in de tabel met resultaten komt overeen met het aantal geregistreerde golfklappen.

Kolom	Parameter	Dim	Kolom	Parameter	Dim	Kolom	Parameter	Dim
1	Golfklap nr	-	24	$B_{trog20\%}$	m	47	$\Delta\phi\Delta x_Z$	m/m
2	Begintijd	s	25	$x_{ZBtrog50\%}$	m	48	$x_{\Delta\phi\Delta x_L}$	m
3	Eindtijd	s	26	$x_{LBtrog50\%}$	m	49	$\Delta\phi\Delta x_L$	m/m
4	t_{max}	s	27	$B_{trog50\%}$	m	50	$F_{\phi max}$	kN
5	ϕ_{max}	m	28	$x_{ZBtrog80\%}$	m	51	$t_{F\phi max}$	s
6	$x_{\phi max}$	m	29	$x_{LBtrog80\%}$	m	52	$I_{\phi max}$	kNs
7	$\phi_{minklap}$	m	30	$B_{trog80\%}$	m	53	d	m
8	x_{sklap}	m	31	$x_{ZBtrog100\%}$	m	54	θ_f	°
9	ϕ_{max2}	m	32	$x_{LBtrog100\%}$	m	55	$\tan(\theta_f)$	-
10	$x_{\phi max2}$	m	33	$B_{trog100\%}$	m	56	ϕ_b	m
11	ϕ_k	m	34	$x_{\Delta\phi}$	m	57	ϕ_{min}	m
12	ϕ_{bklap}	m	35	$\phi_{max\Delta\phi}$	m	58	x_s	m
13	$x_{ZBklap20\%}$	m	36	ϕ_{minL}	m	59	$t_{\theta f}$	s
14	$x_{LBklap20\%}$	m	37	$x_{\phi minL}$	m	60	$0,9\phi_{min}$	m
15	$B_{klap20\%}$	m	38	t_1	s	61	$0,9x_s$	m
16	$x_{ZBklap50\%}$	m	39	t_2	s	62	θ_{fgem}	-
17	$x_{LBklap50\%}$	m	40	Golfklapduur	s	63	$t_{\theta fgem}$	s
18	$B_{klap50\%}$	m	41	t_3	s	64	ϕ_{dip}	m
19	$x_{ZBklap80\%}$	m	42	t_4	s	65	$x_{\phi dip}$	m
20	$x_{LBklap80\%}$	m	43	Stijgtijd	s	66	ϕ_{jdip}	ms
21	$B_{klap80\%}$	m	44	$x_{\Delta\phi\Delta x_{tr}}$	m	67	p_{max}	m
22	$x_{ZBtrog20\%}$	m	45	$\Delta\phi\Delta x_{tr}$	m/m	68	F_{dip}	m ²
23	$x_{LBtrog20\%}$	m	46	$x_{\Delta\phi\Delta x_Z}$	m	69	I_{dip}	m ² s

Tabel A.2 Kolomindeling in de golfklappenuitvoer-file waarin de resultaten zijn opgeslagen voor de golfklappen

Golffrontenuitvoer-file

In de golffrontenuitvoer-file zijn de resultaten van de software voor de golffronten in tabelvorm weggeschreven. Per kolom in de tabel is een parameter weergegeven, zie Tabel A.3. Het aantal rijen in de tabel met resultaten komt overeen met het aantal geregistreerde golffronten.

Kolom	Parameter	Dim	Kolom	Parameter	Dim	Kolom	Parameter	Dim
1	Golfklap nr	-	7	ϕ_{\min}	m	13	$t_{\theta_{\text{fgem}}}$	s
2	Begintijd	s	8	x_s	m	14	ϕ_{dip}	m
3	Eindtijd	s	9	t_{θ_f}	s	15	$x_{\phi_{\text{dip}}}$	m
4	θ_f	°	10	$0,9\phi_{\min}$	m	16	ϕ_{kdip}	ms
5	$\tan(\theta_f)$	-	11	$0.9x_s$	m	17	F_{dip}	m ²
6	ϕ_b	m	12	θ_{fgem}	-	18	I_{dip}	m ² s

Tabel A.3 Kolomindeling in de golffrontenuitvoer-file waarin de resultaten zijn opgeslagen voor de golffronten

Bijlage B:
Tabellen

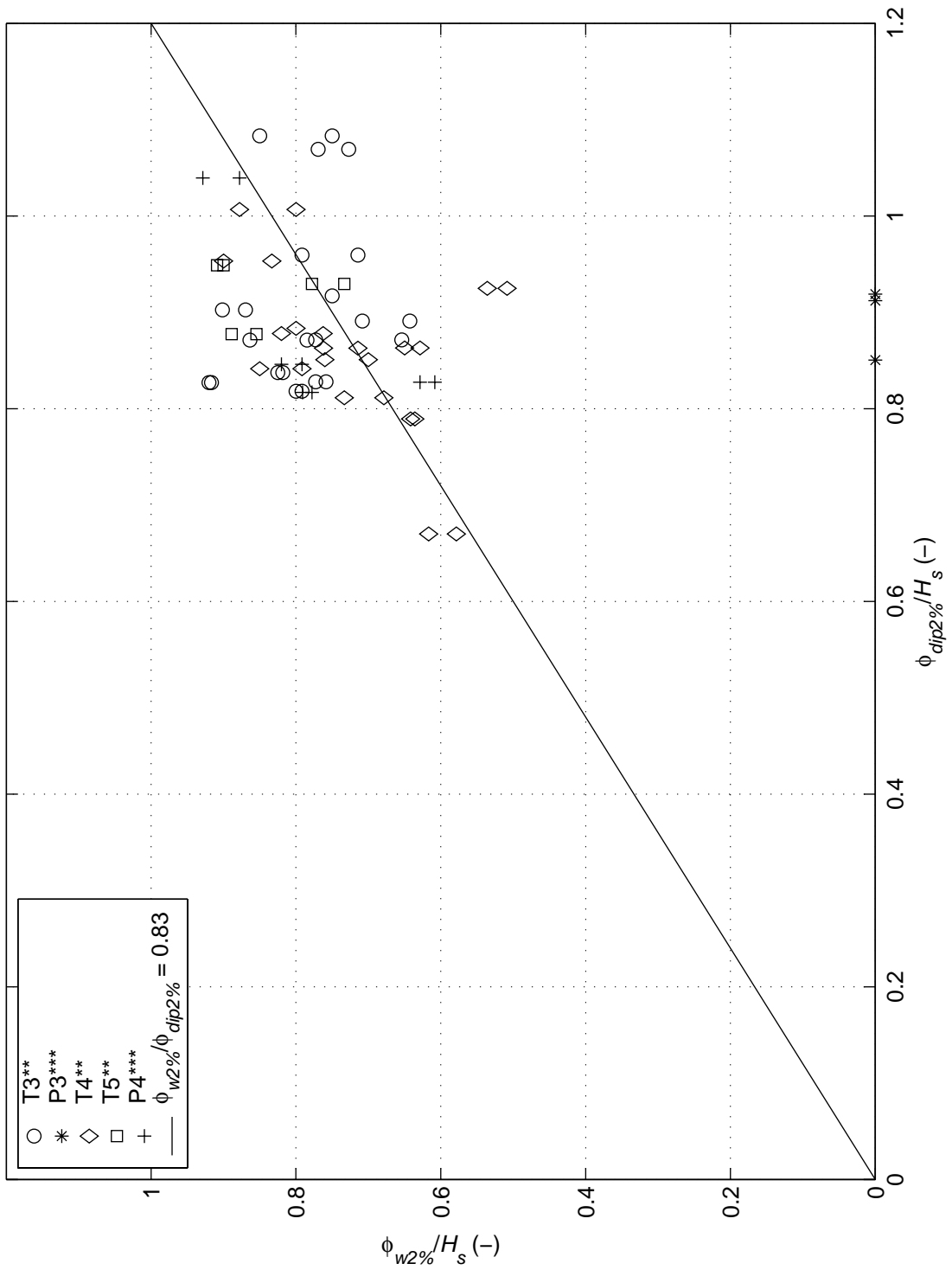
Proef	h	H_s	T_p	ξ_{op}	$\cot\alpha$	Spectrum*	Onderzoek (jaar)
	(m)	(m)	(s)	(-)	(-)		
5o05	4.02	1.640	5.60	1.56	3.5	J	1997/1998
5o06	4.00	1.640	6.90	1.92	3.5	J	1997/1998
12ao7	4.63	0.840	4.40	1.71	3.5	J	1997/1998
12ao9	4.91	1.270	5.50	1.74	3.5	J	1997/1998
21o02	4.55	0.728	3.26	1.36	3.5	J	1997/1998
21o03	4.80	0.761	4.29	1.75	3.5	J	1997/1998
21o06	4.70	0.737	4.28	1.78	3.5	P-M	1997/1998
21o08	4.80	0.754	5.08	2.09	3.5	J	1997/1998
21o11	4.85	0.939	4.83	1.78	3.5	J	1997/1998
21o14	4.98	1.563	6.36	1.82	3.5	J	1997/1998
21o15	5.01	1.699	6.43	1.76	3.5	J	1997/1998
21o16	5.00	1.550	7.64	2.19	3.5	J	1997/1998
23o01	4.55	0.430	3.16	1.72	3.5	J	1997/1998
23o02	4.55	0.524	3.55	1.75	3.5	J	1997/1998
23o04	4.55	0.530	3.56	1.75	3.5	J	1997/1998
23o08	4.95	0.940	4.82	1.77	3.5	J	1997/1998
23o10	4.97	1.334	5.53	1.71	3.5	J	1997/1998
23o11**	4.94	1.543	6.35	1.83	3.5	J	1997/1998
AS202	5.01	1.430	7.14	1.87	4.0	P-M	1992
AS401	5.10	1.510	8.65	2.20	4.0	P-M	1992
AS601	4.65	0.760	2.98	1.07	4.0	P-M	1992
w127	5.00	0.652	3.40	1.75	3.0	J	1991
w128	4.99	0.729	3.90	1.90	3.0	J	1991
w626	4.96	0.724	4.10	2.01	3.0	J	1991
w627	4.94	1.056	3.90	1.58	3.0	J	1991

Tabel B.1 Geselecteerde proeven (*J = JONSWAP spectrum, P-M = Pierson-Moskowitz spectrum. ** Deze proef is gebruikt bij het opzetten van de software.)

Proef	Totaal aantal golven	Aantal golfklappen	Aantal golffronten
12ao07	888	262	862
12ao09	530	182	436
21o02	828	224	820
21o03	873	254	865
21o06	831	261	801
21o08	960	261	921
21o11	905	317	793
21o14	957	408	643
21o15	928	414	616
21o16	934	377	615
23o01	849	206	776
23o02	856	236	837
23o04	843	232	812
23o08	908	292	893
23o10	1001	412	795
23o11	956	411	662
5o05	841	292	789
5o06	912	191	751
as202	1041	589	874
as401	875	432	699
as601	1102	441	1012
sz127	567	35	368
sz128	594	13	507
sz626	1022	115	994
sz627	1030	252	1017

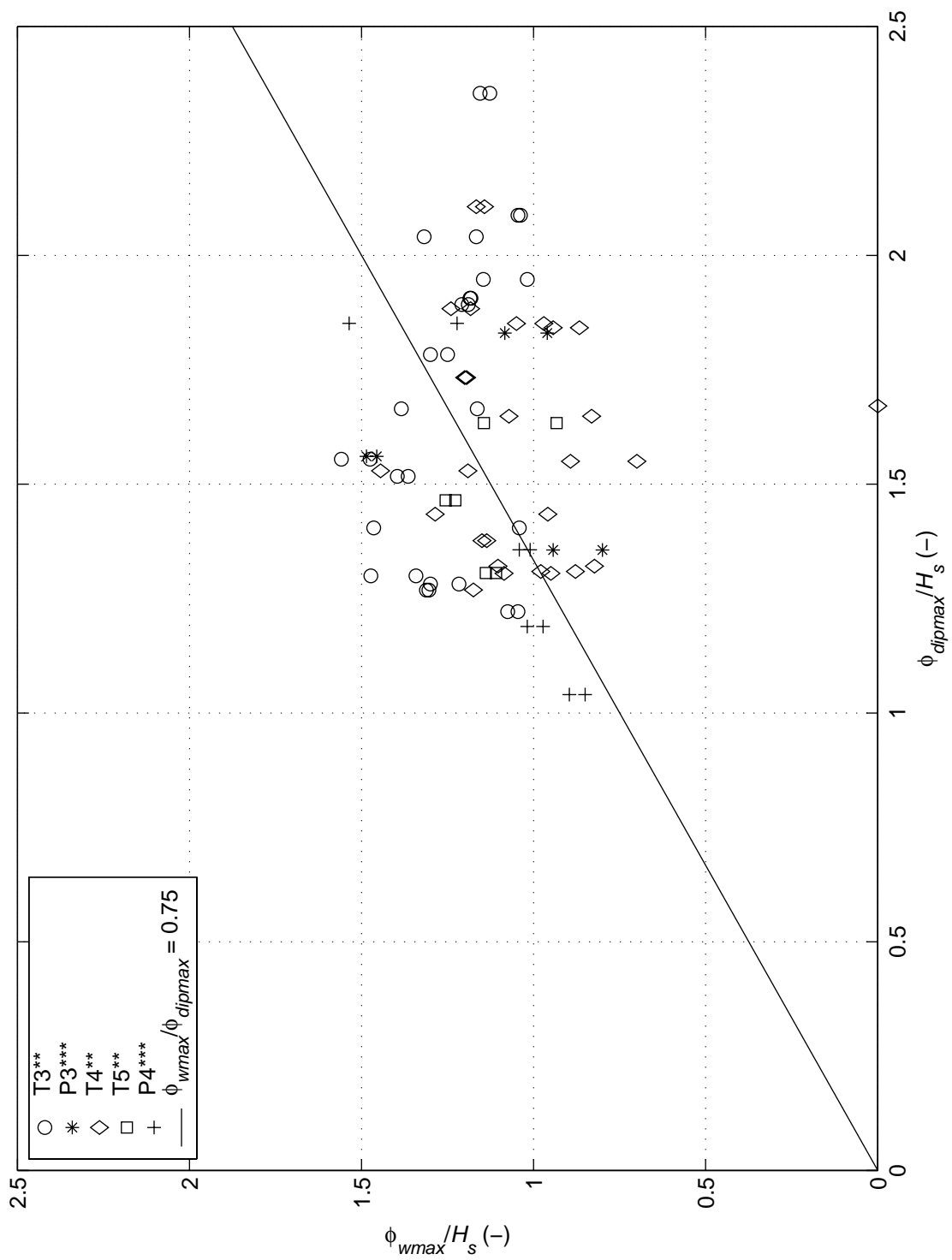
Tabel B.2 Totaal aantal golven, aantal golfklappen en aantal golffronten per geselecteerde proef uit grootschalig modelonderzoek

Bijlage C:
Figuren



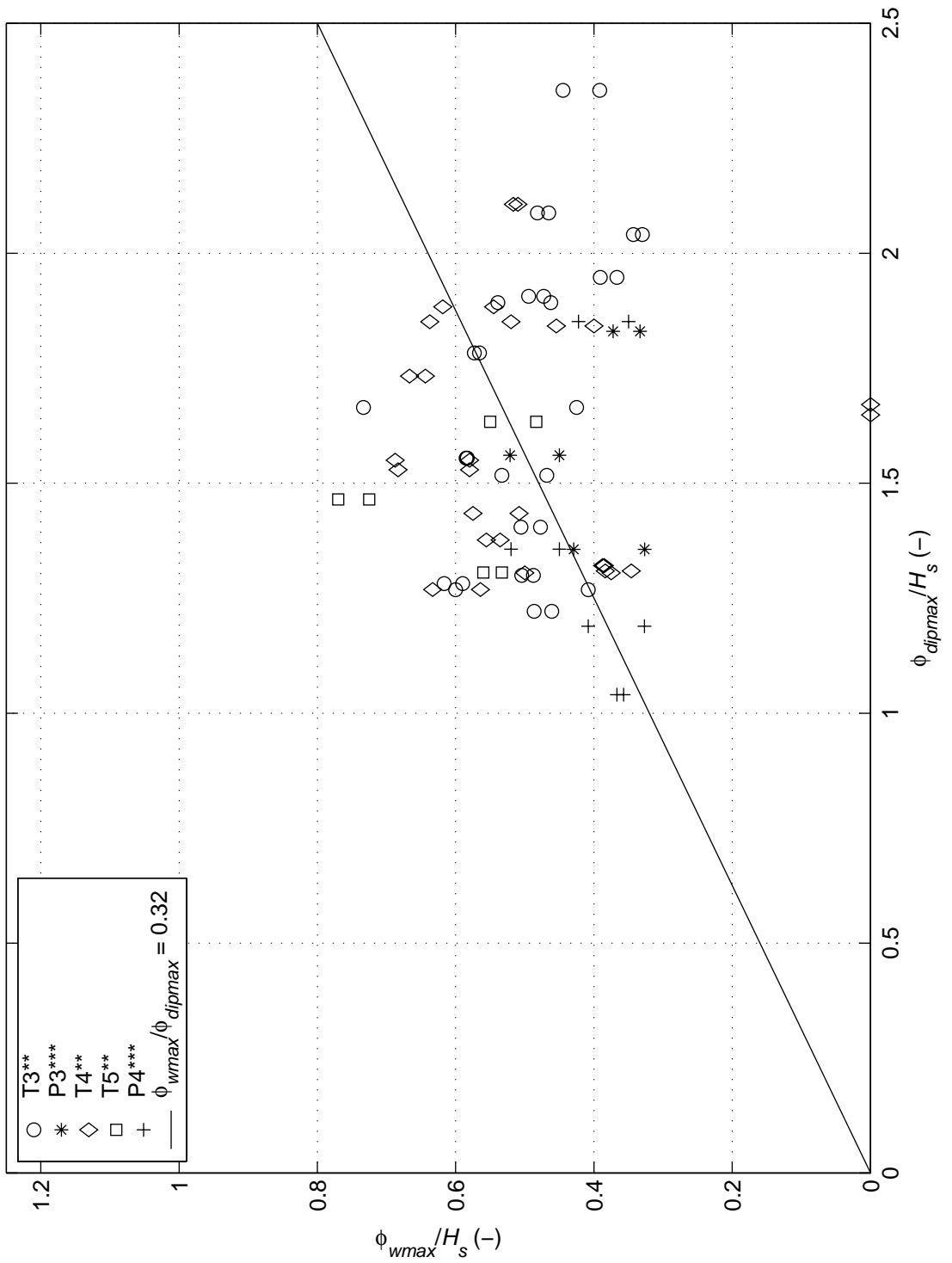
Stijghoogteverschil ($\phi_{w2\%}$) tegen gediptheid ($\phi_{dip2\%}$)

Constructie A



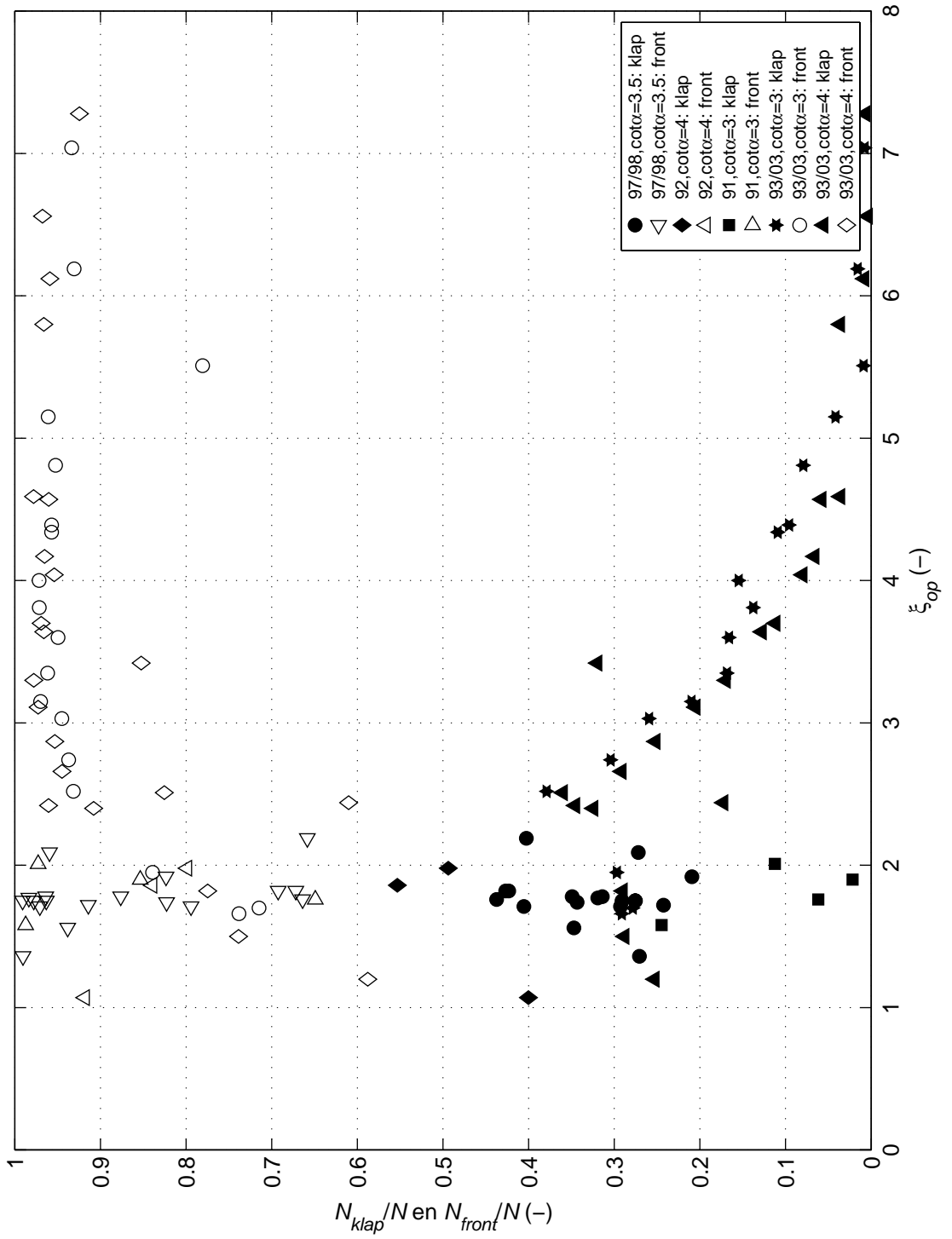
Stijghoogteverschil (ϕ_{wmax}) tegen gediptheid (ϕ_{dipmax})

Constructie A

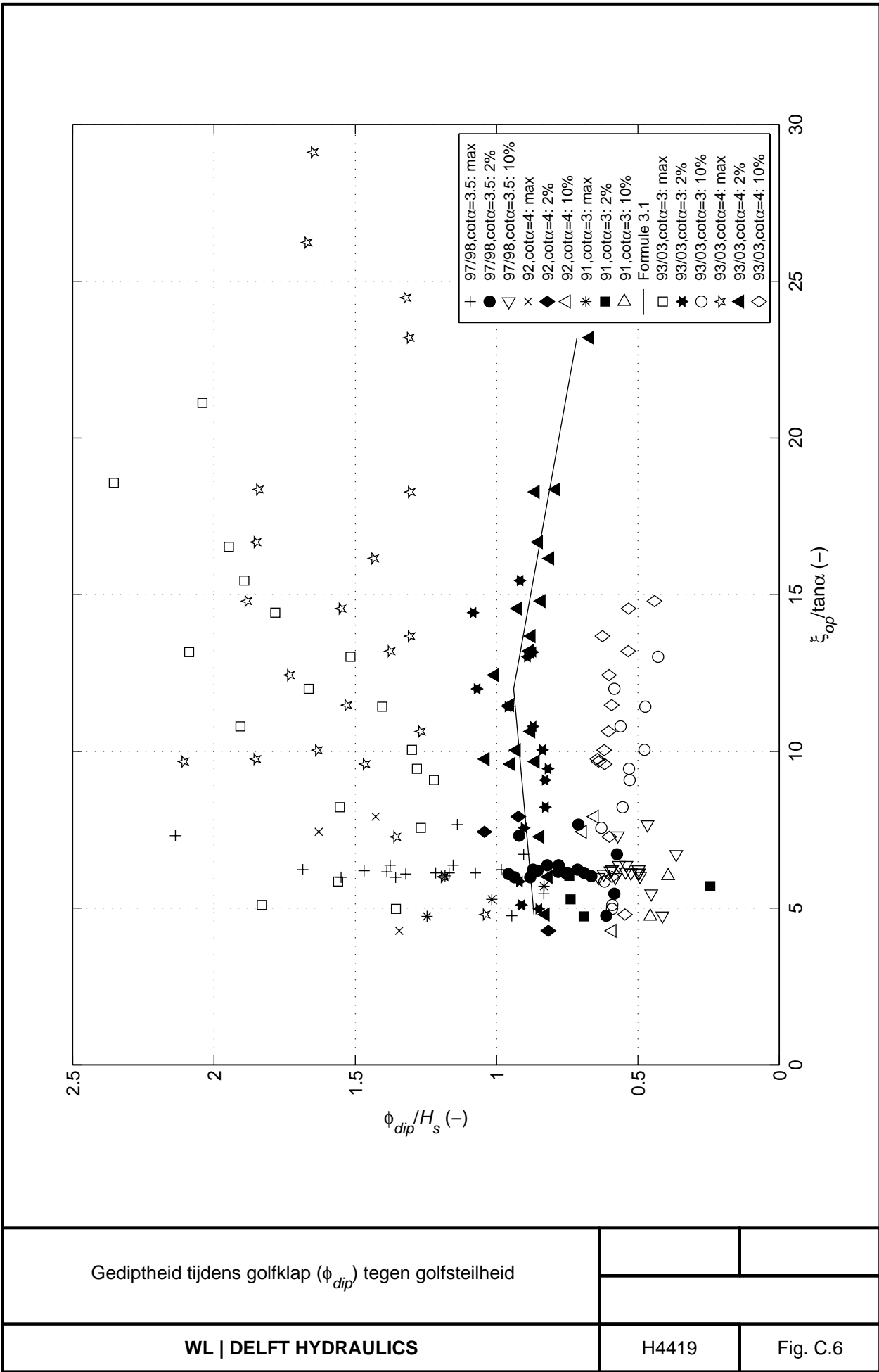


Stijghoogteverschil (ϕ_{wmax}) tegen gediptheid (ϕ_{dipmax})

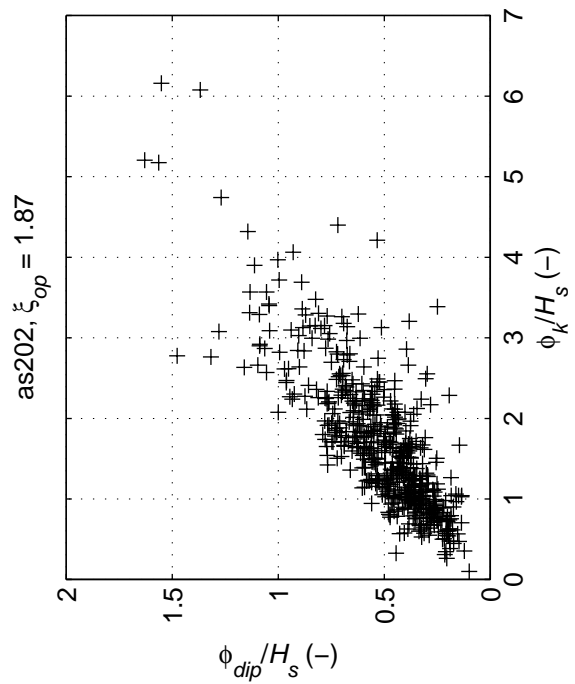
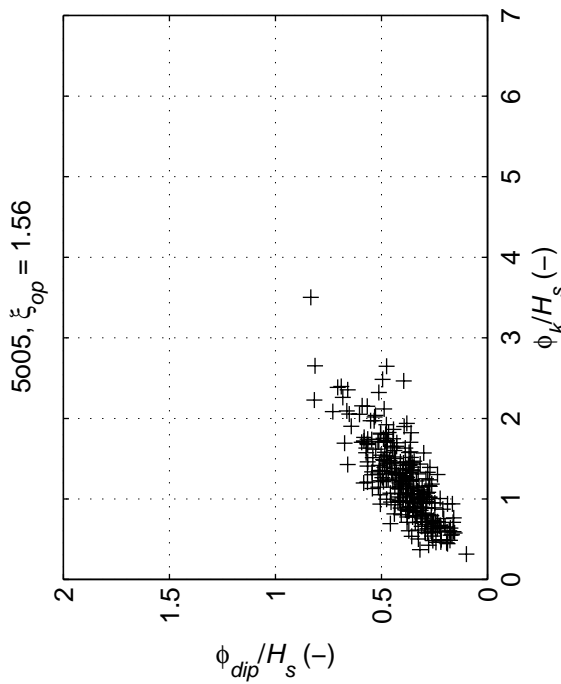
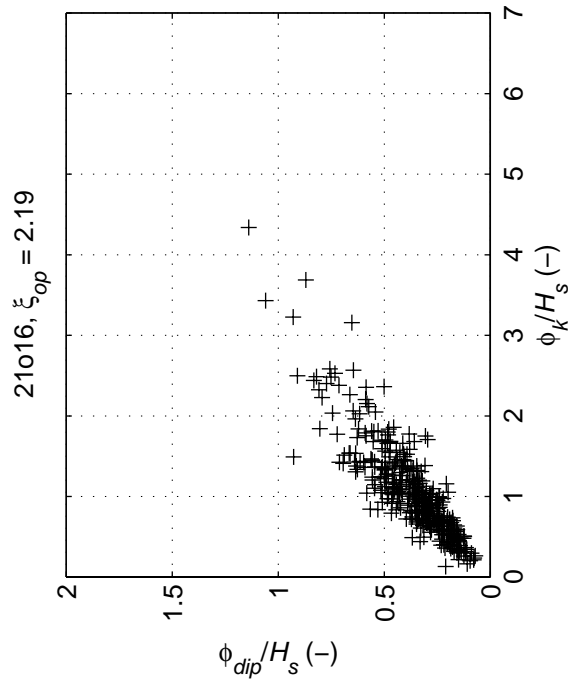
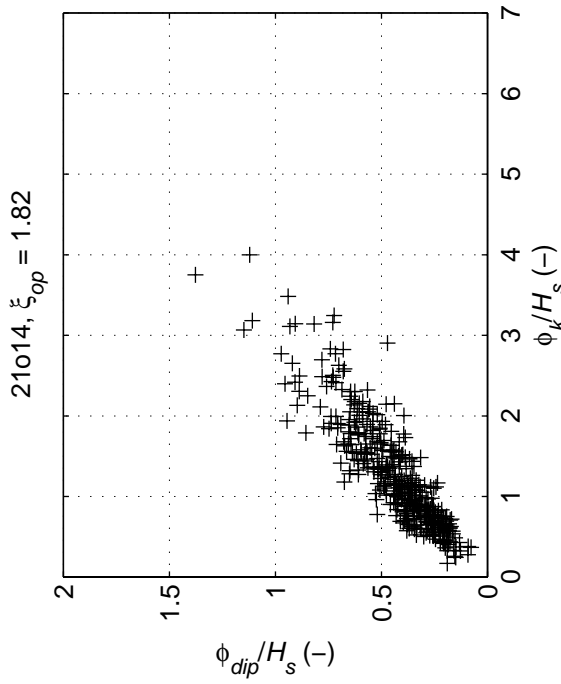
Constructie B



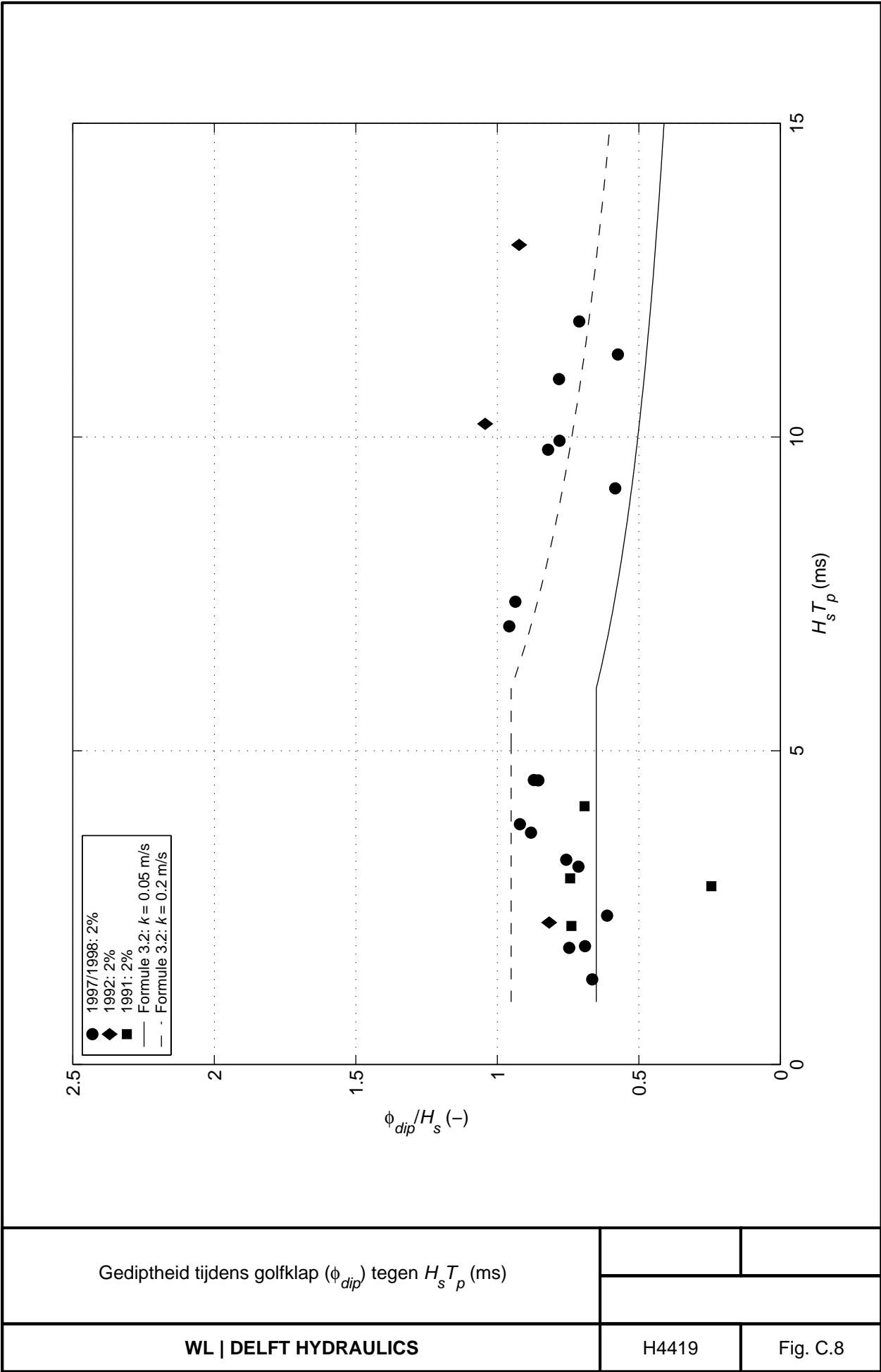
Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven



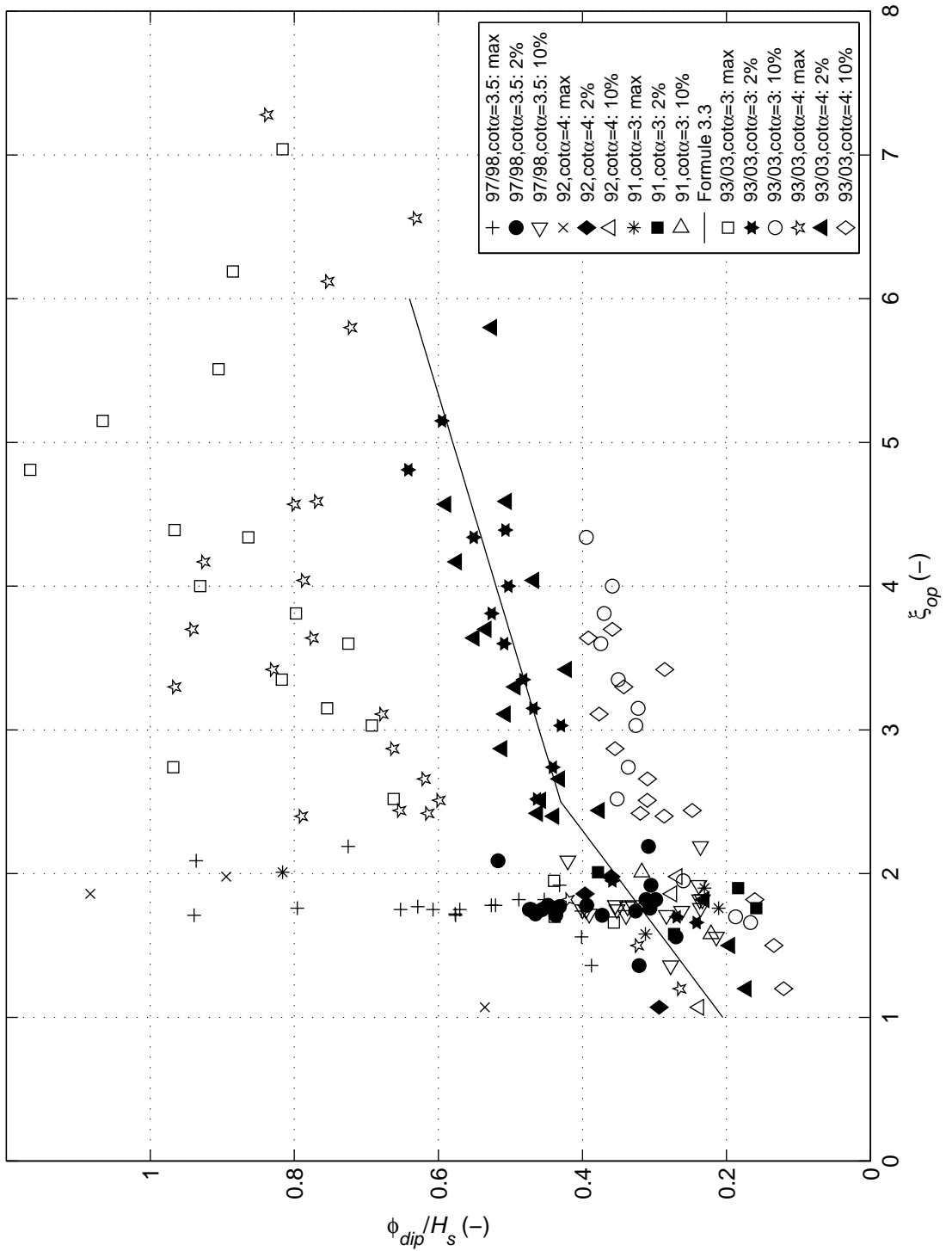
Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfsteilheid



Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen golfklaphoogte (ϕ_k)

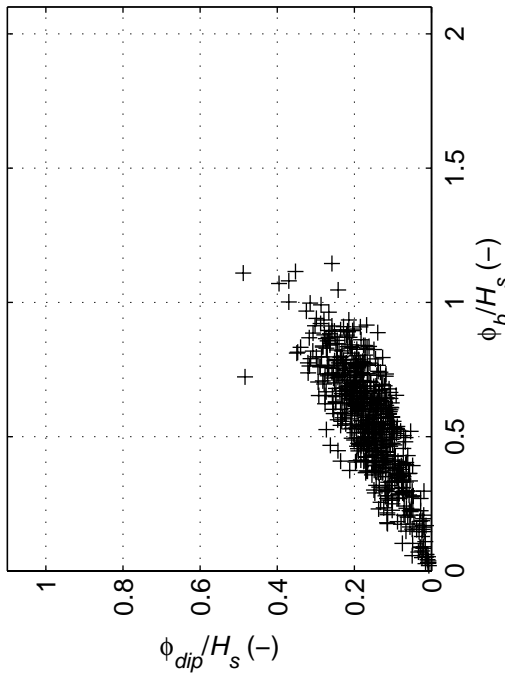


Gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip}) tegen $H_s T_p$ (ms)

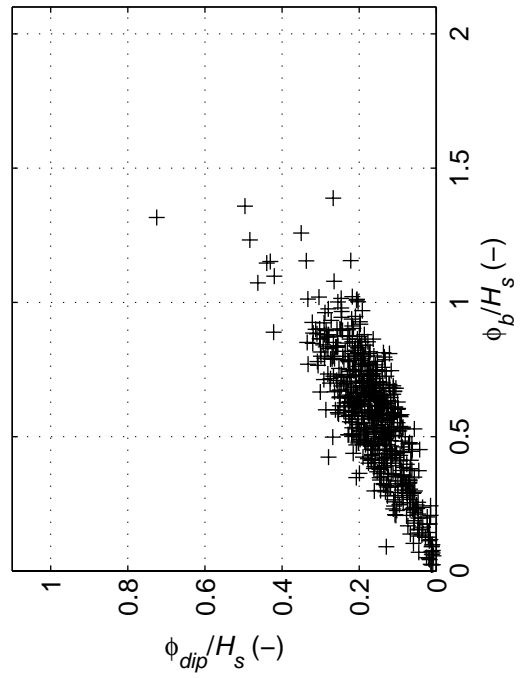


Gediptheid tijdens golffront (ϕ_{dip})

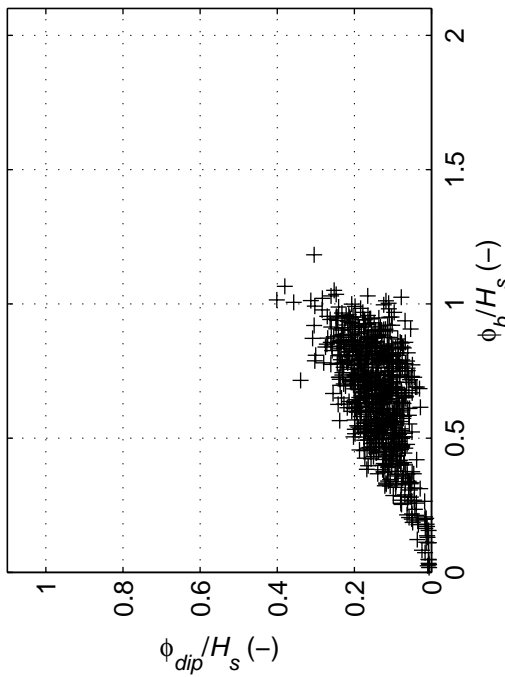
21o14, $\xi_{op} = 1.82$



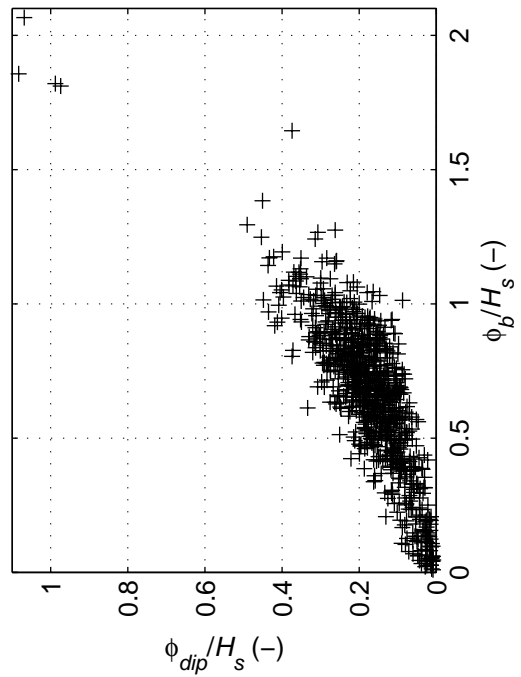
21o16, $\xi_{op} = 2.19$



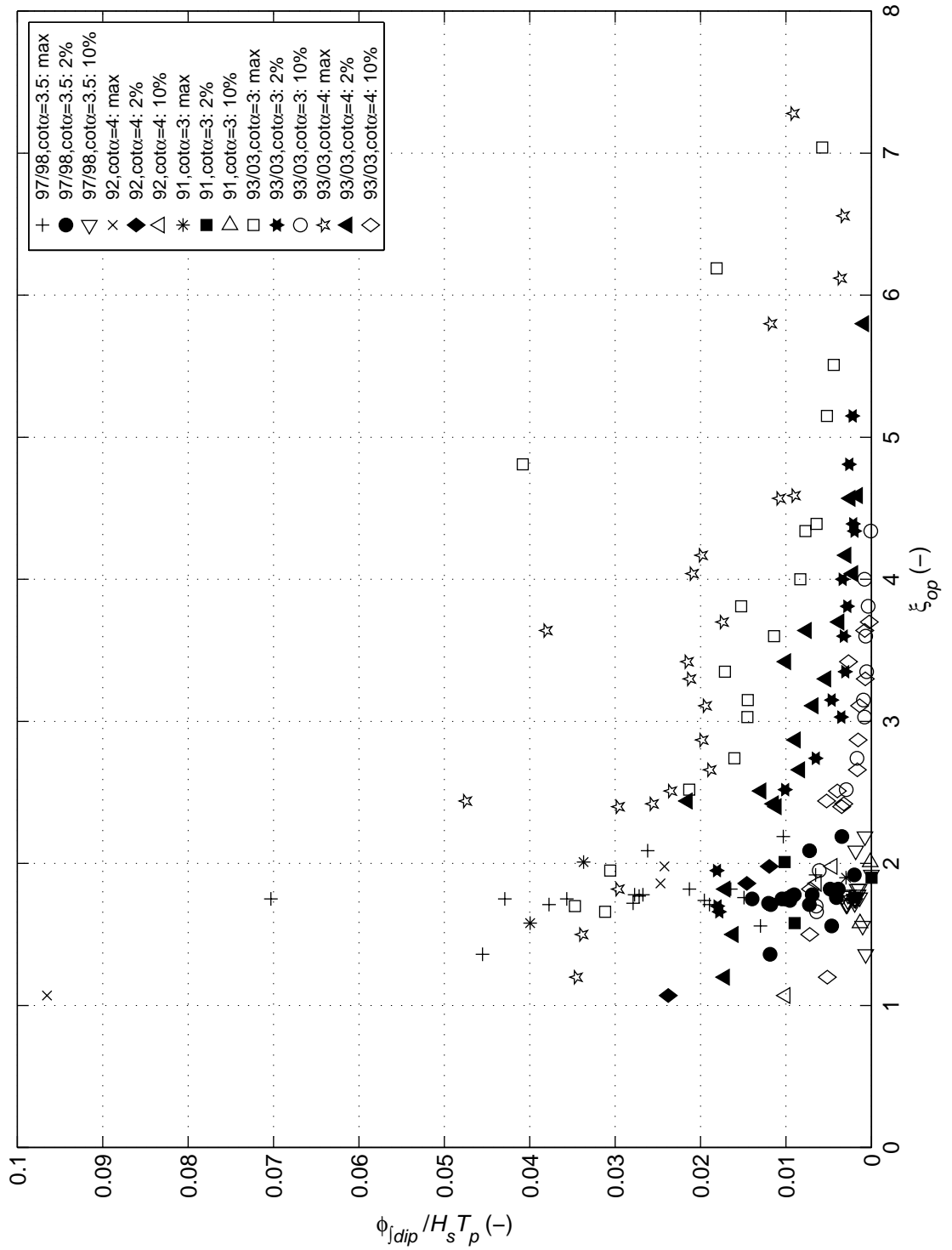
5o05, $\xi_{op} = 1.56$



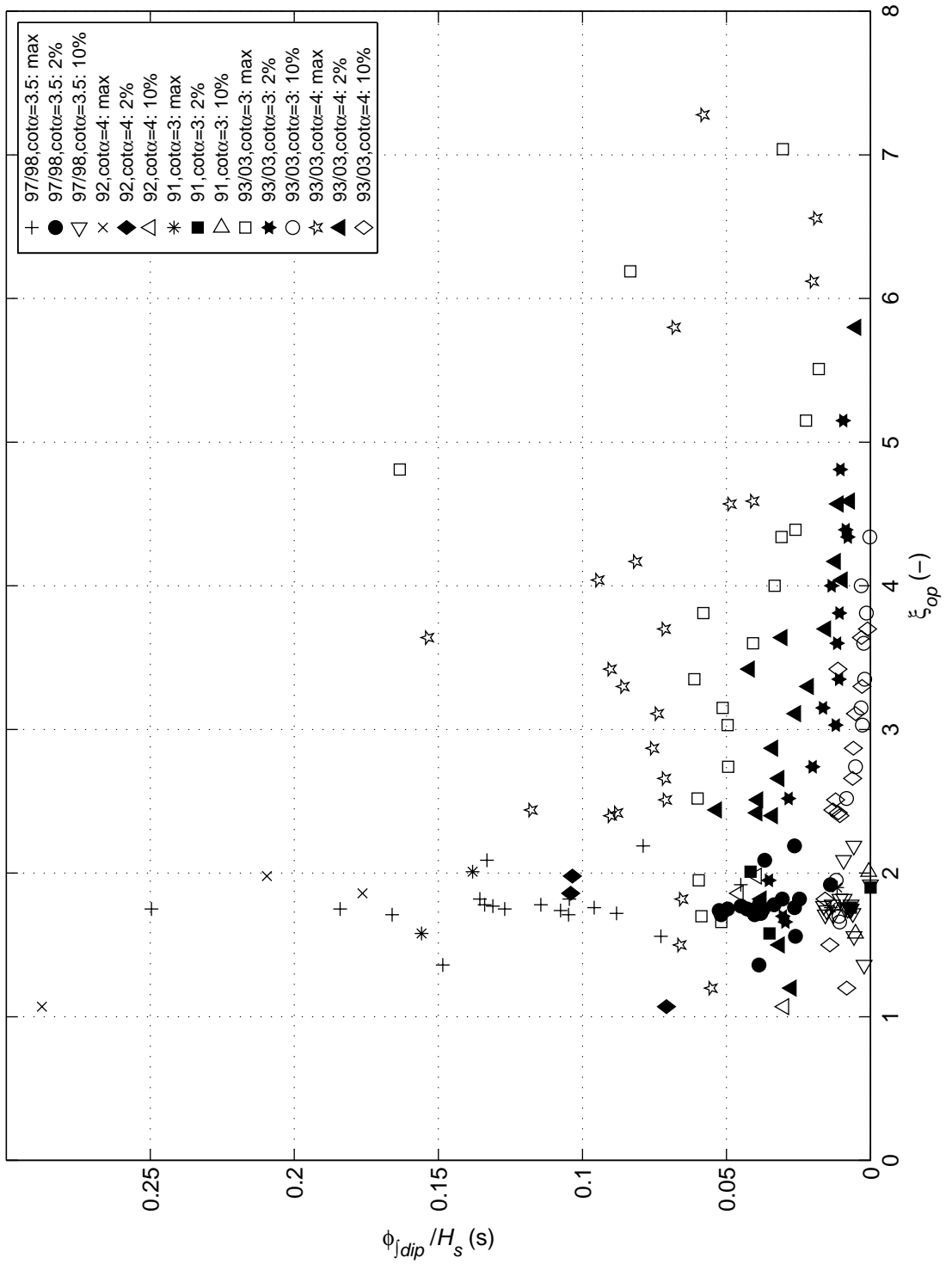
as202, $\xi_{op} = 1.87$



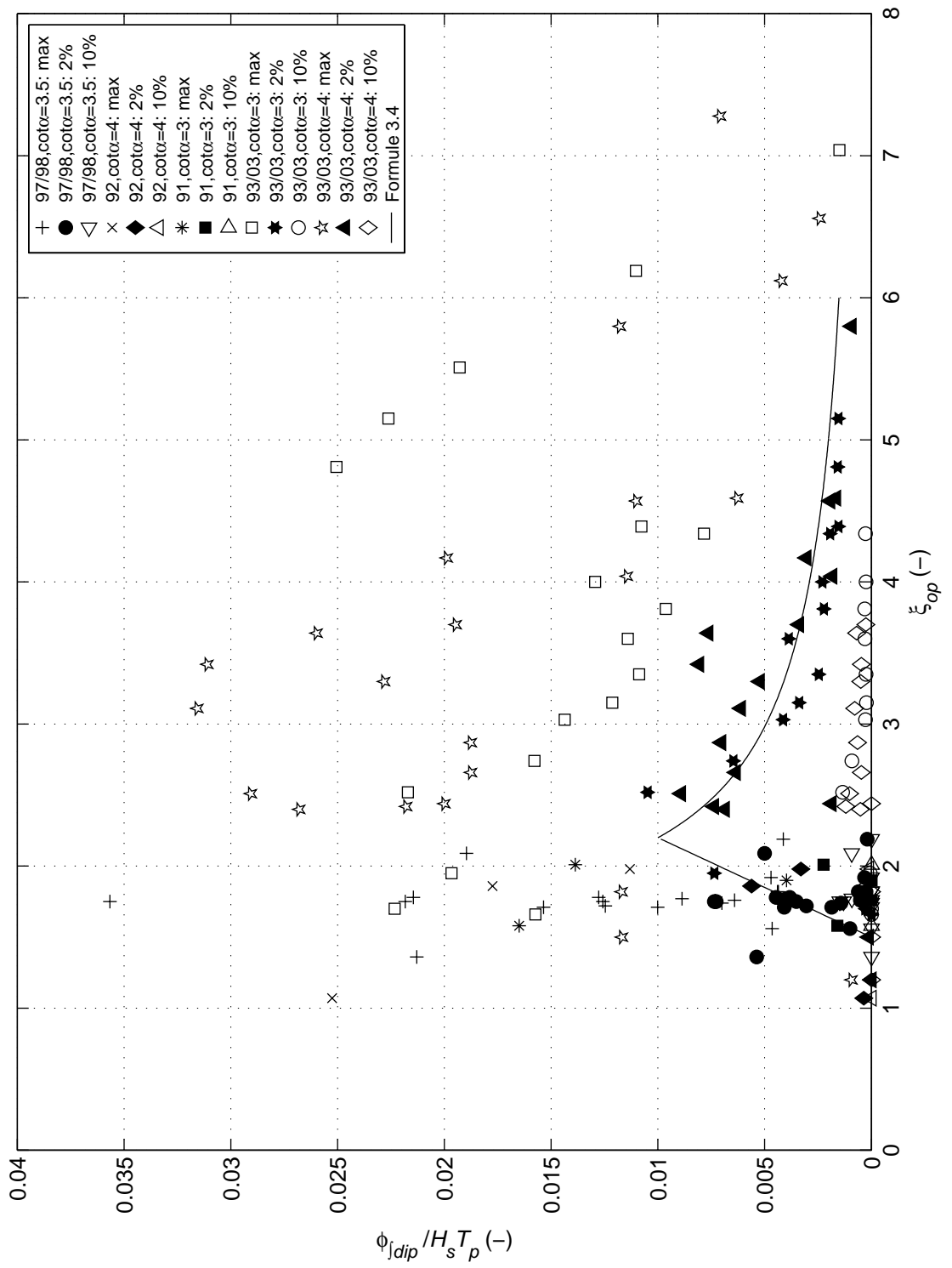
Gediptheid tijdens golffront (ϕ_{dip}) tegen golffronthoogte (ϕ_b)



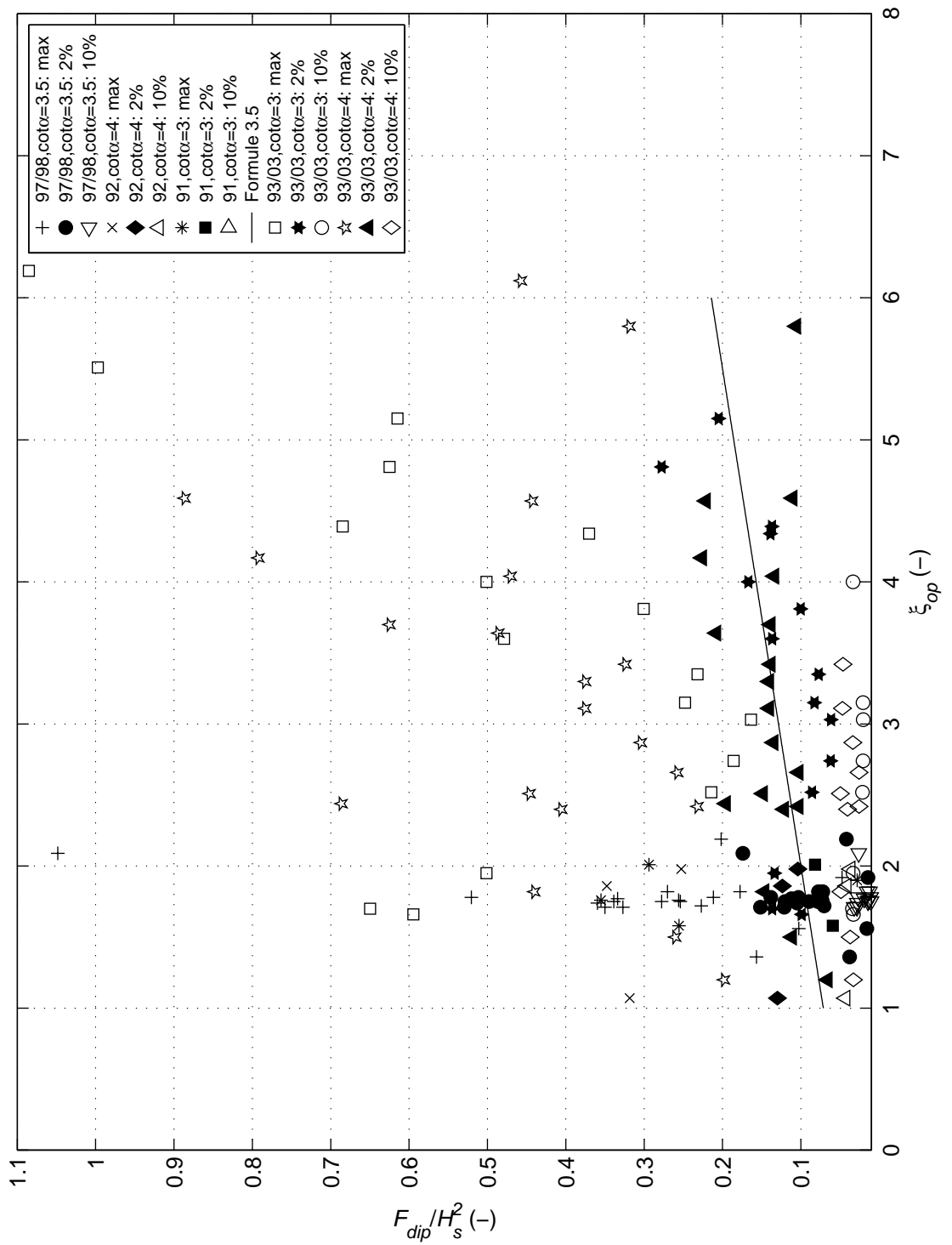
Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{jdip})



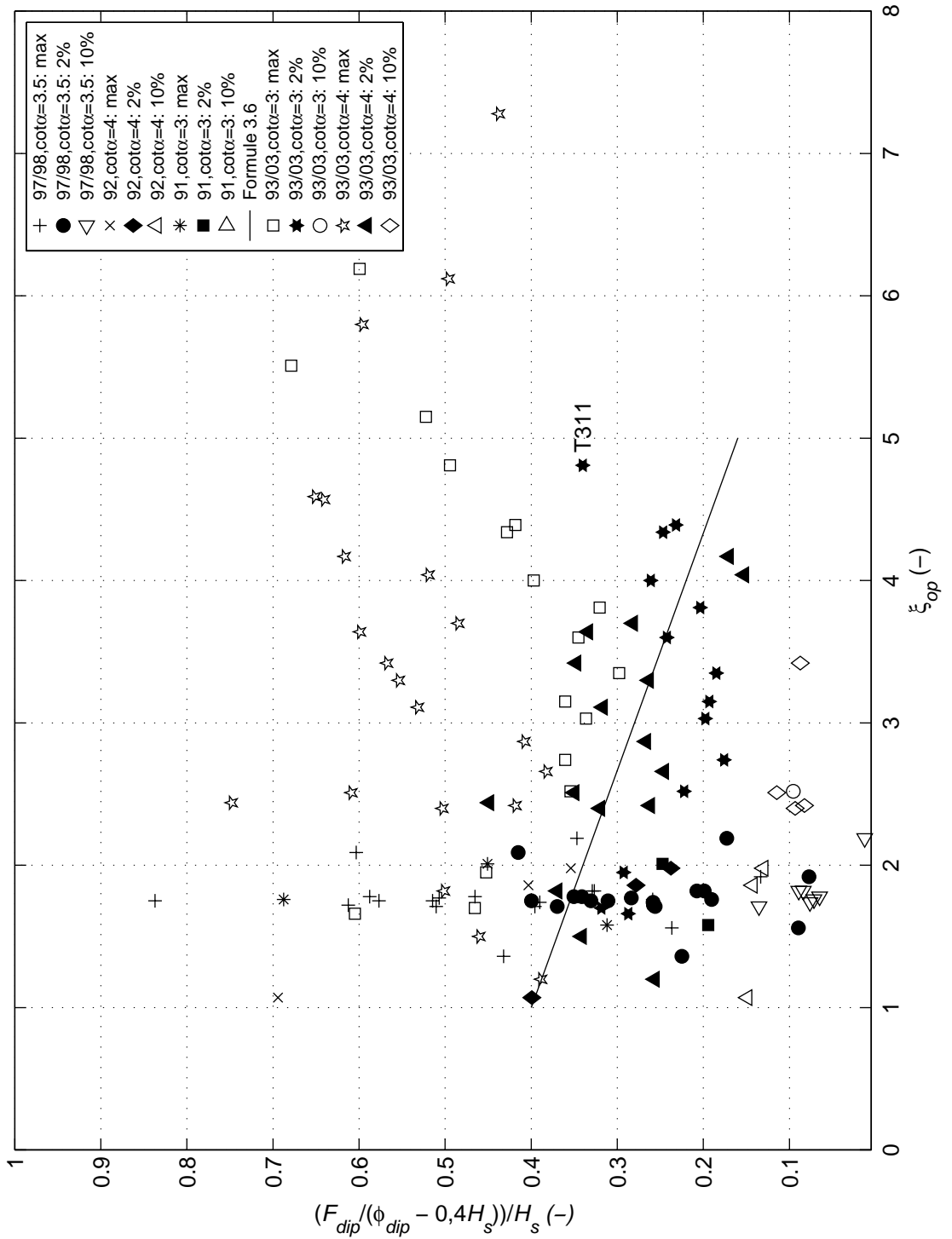
Geïntegreerde gediptheid tijdens golfklap (ϕ_{dip})



Geïntegreerde gediptheid tijdens golfvront ($\phi_{j\dip}$)

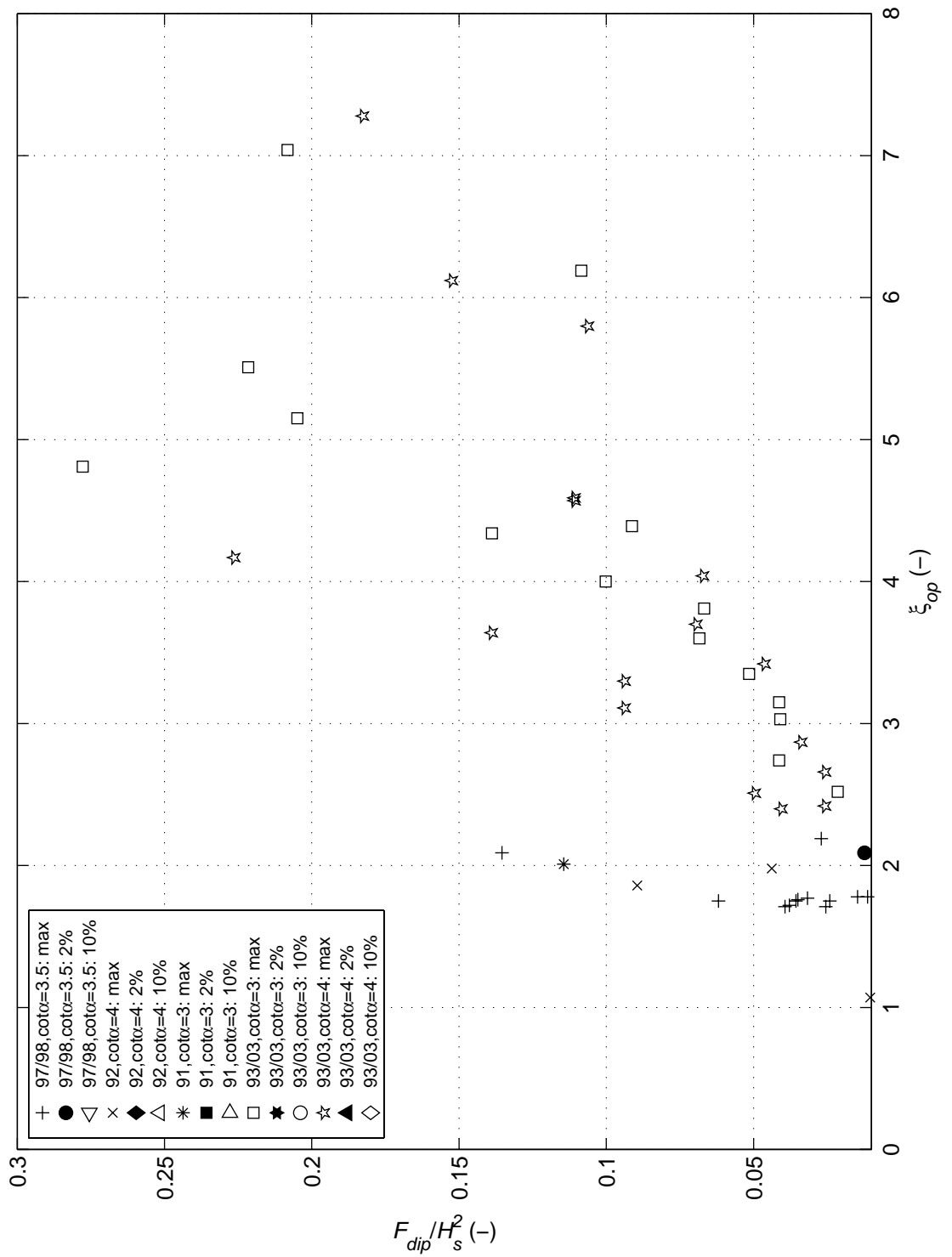


Dipkracht tijdens golfklap (F_{dip})

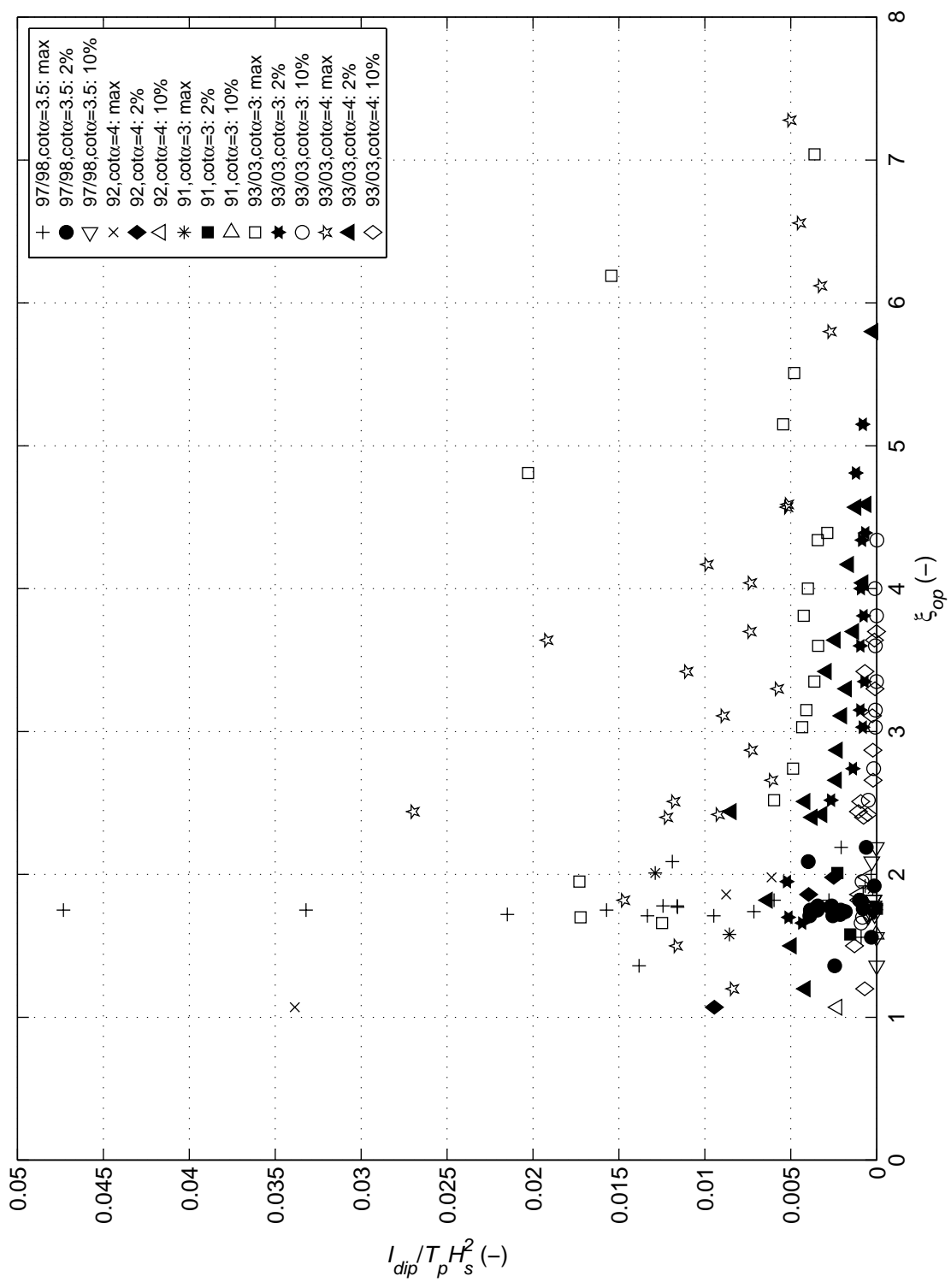


Belaste breedte $(F_{dip} / ((\phi_{dip} - 0,4H_s)) / H_s)$ tijdens golfklap

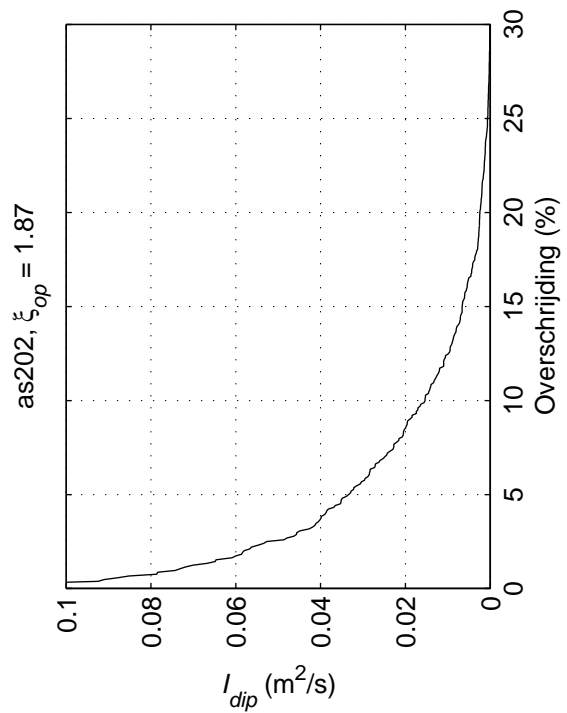
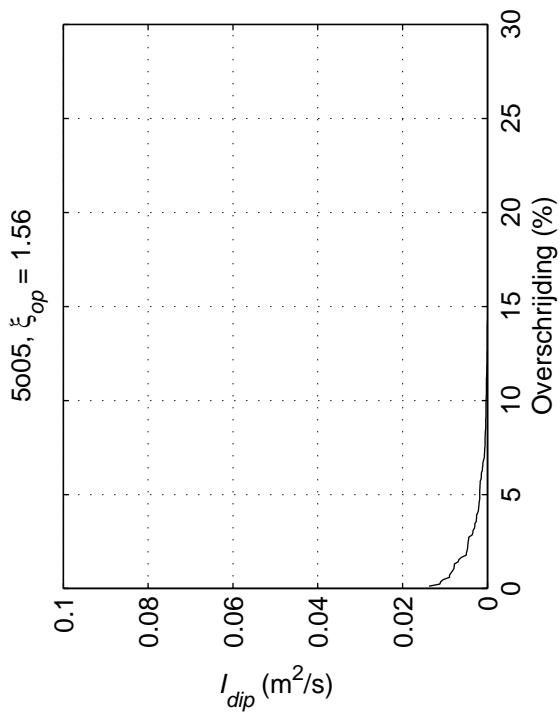
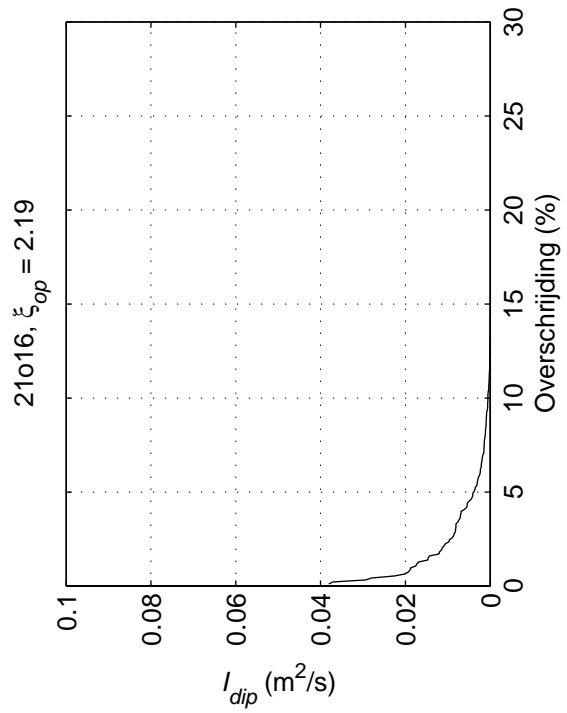
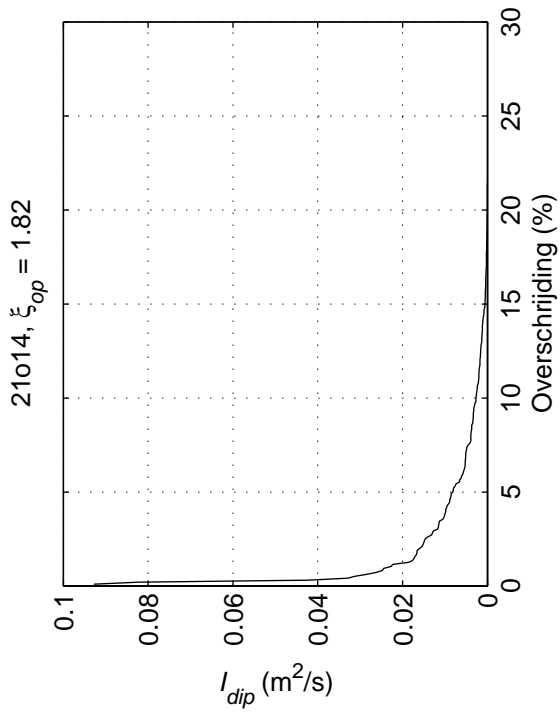
Grootste 33 % van ϕ_k



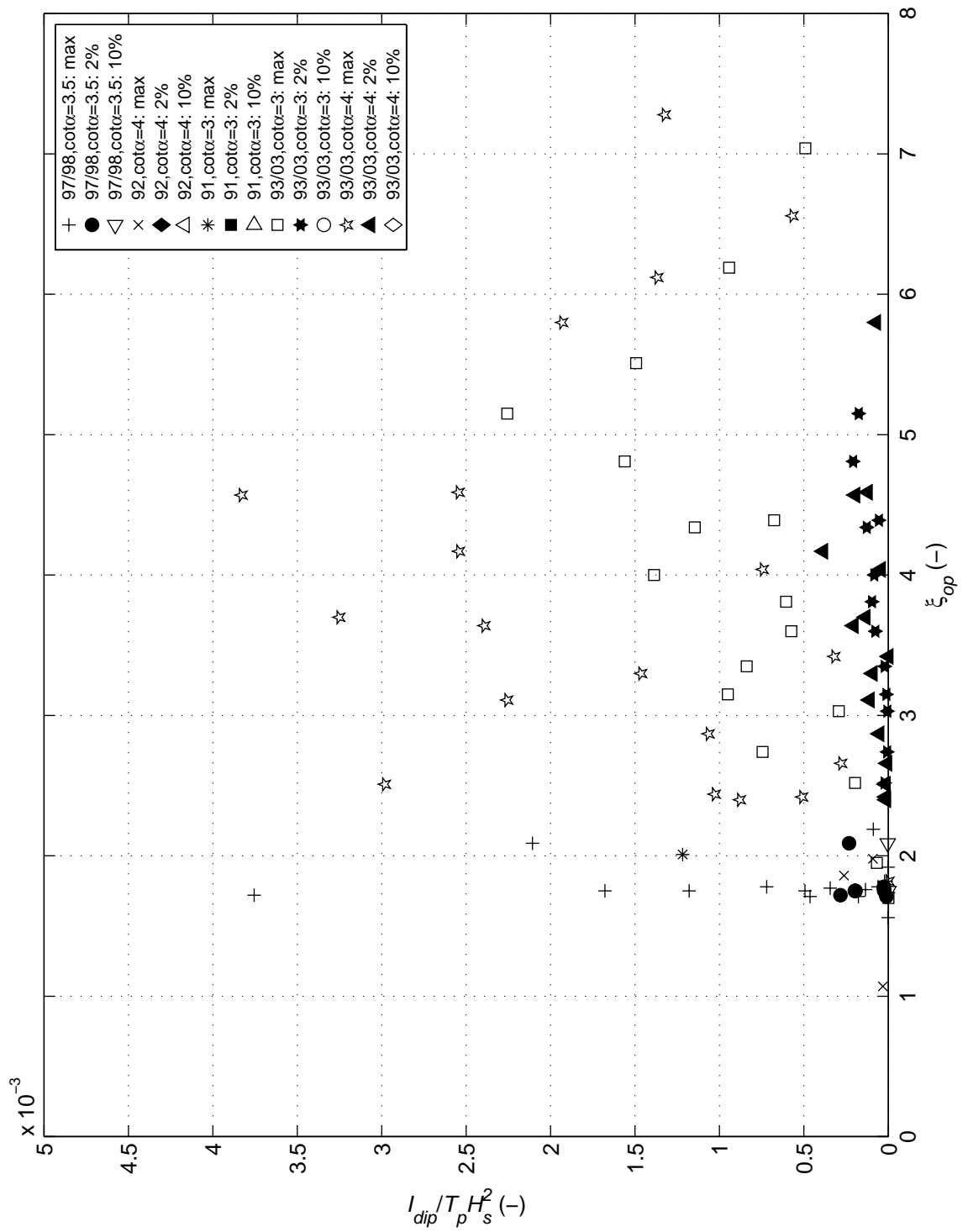
Dipkracht tijdens golffront (F_{dip})



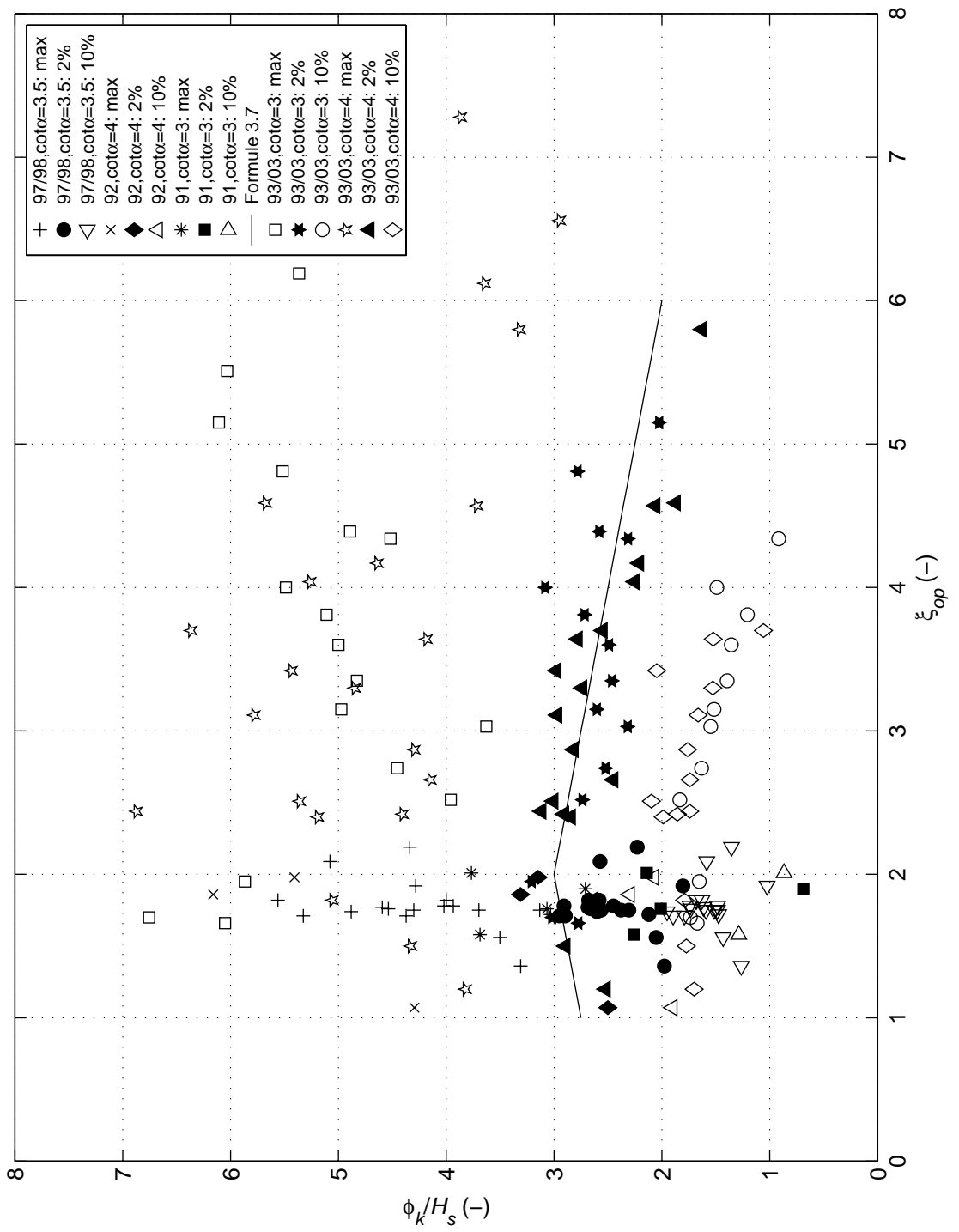
Dipimpuls tijdens golfklap (I_{dip})



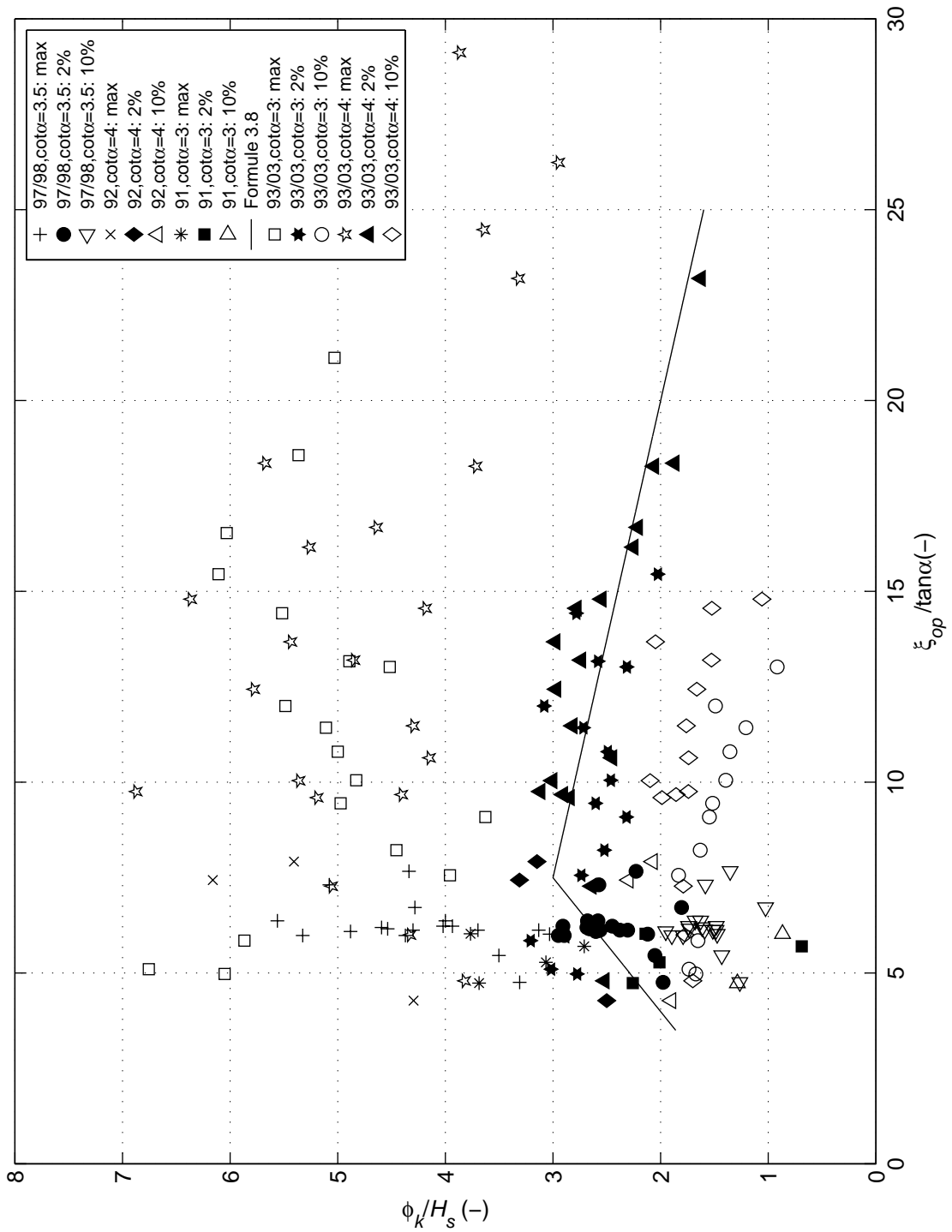
Overschrijdingskromme van de dipimpuls (I_{dip})



Dipimpuls tijdens golffront (I_{dip})

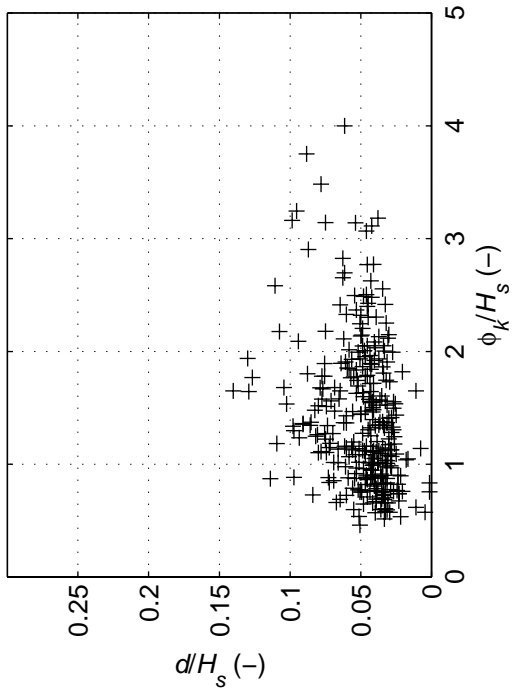


Maximale stijghoogte ten opzichte van trog (ϕ_K)

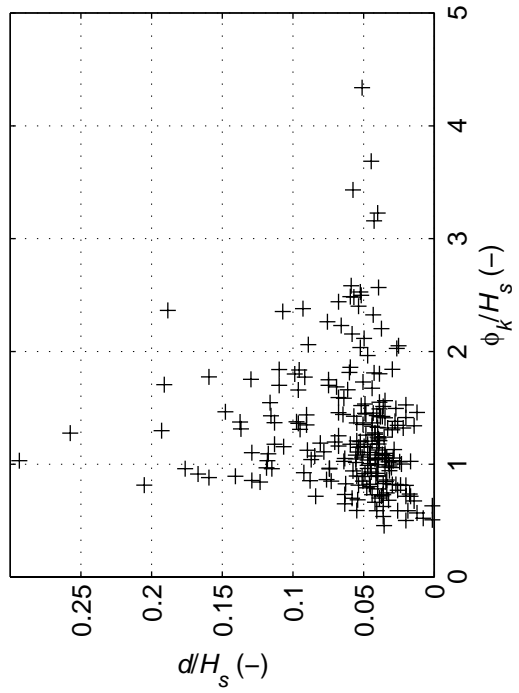


Maximale stijghoogte ten opzichte van trog (ϕ_k) tegen golfsteilheid

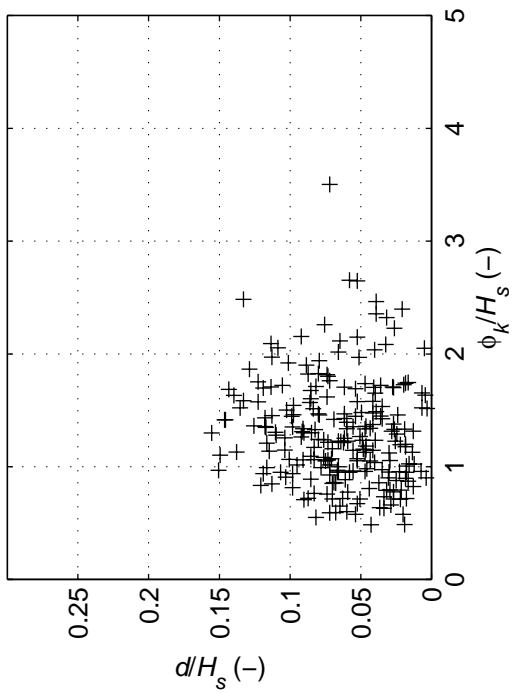
21o14, $\xi_{op} = 1.82$



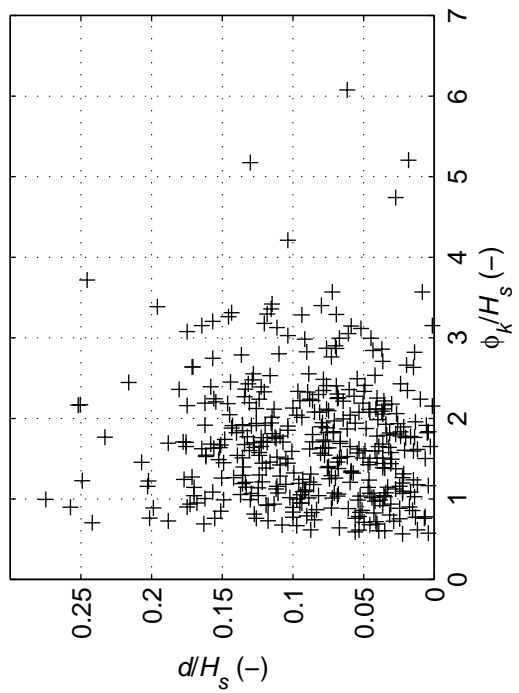
21o16, $\xi_{op} = 2.19$



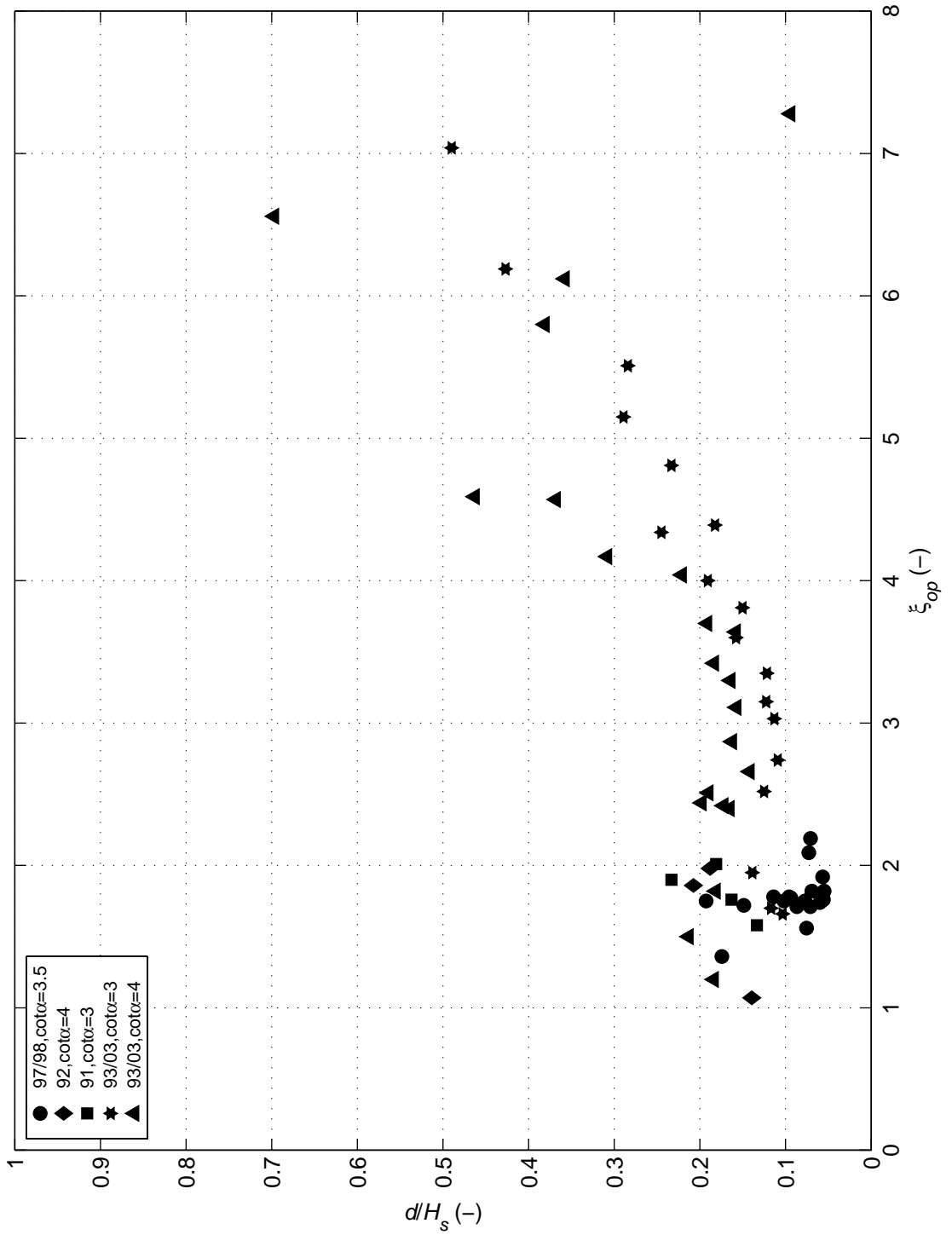
5o05, $\xi_{op} = 1.56$



as202, $\xi_{op} = 1.87$

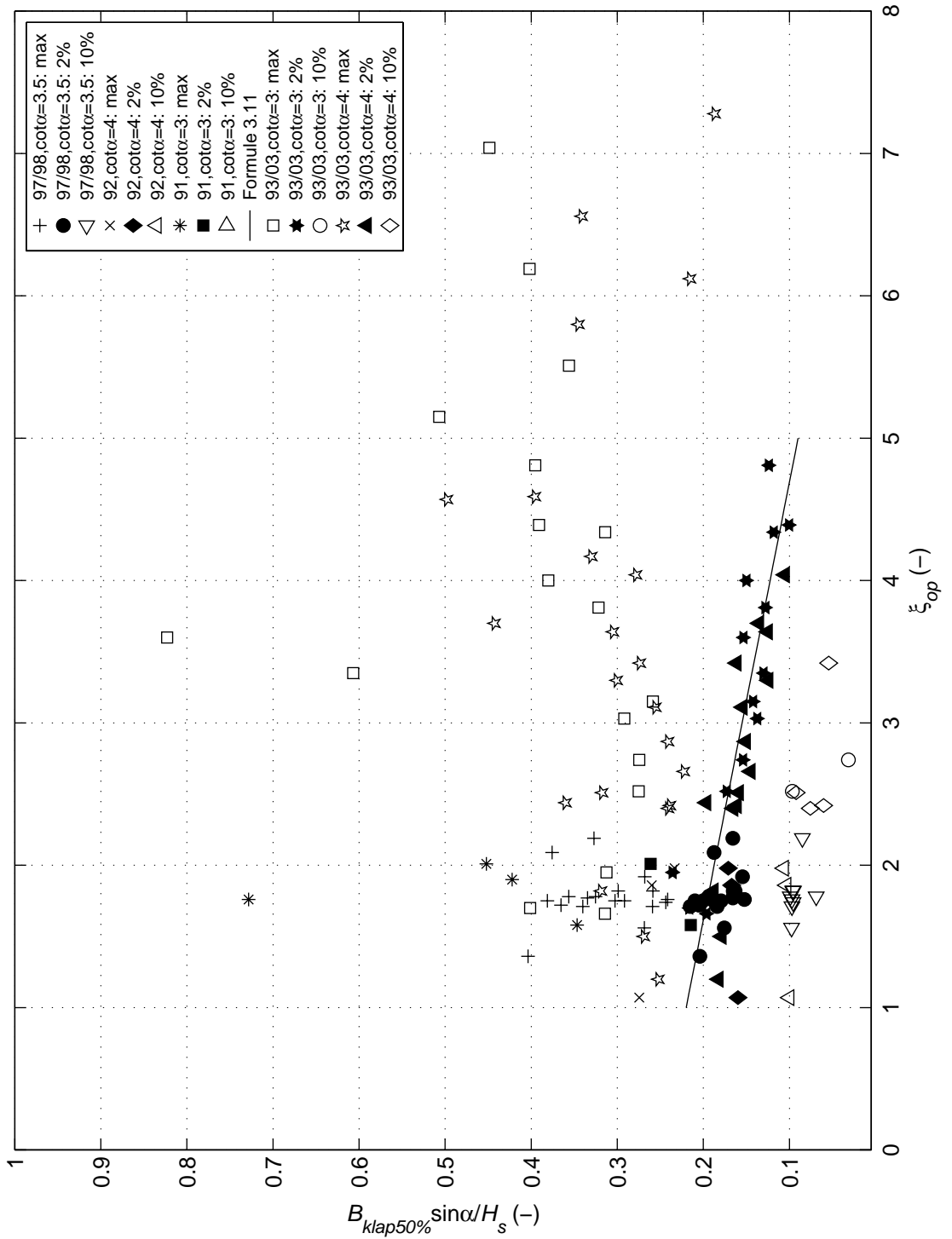


Laagdikte voor golfklap (d) tegen golfklaphoogte (ϕ_k)



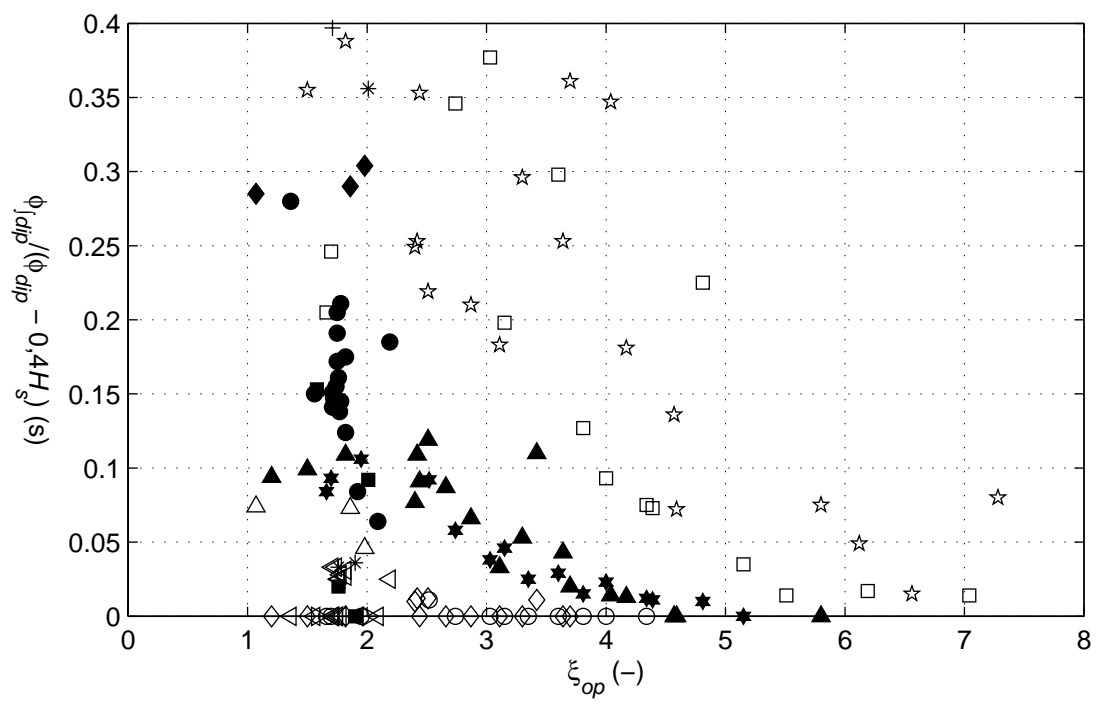
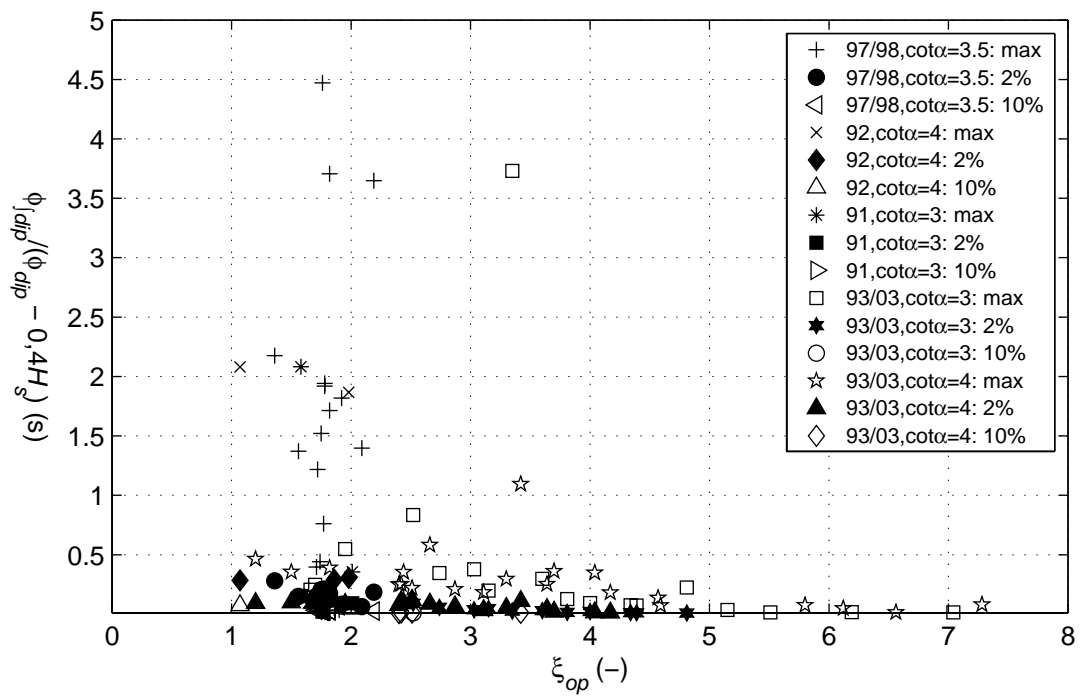
Gemiddelde laagdikte (d)

Grootste 33 % van ϕ_k



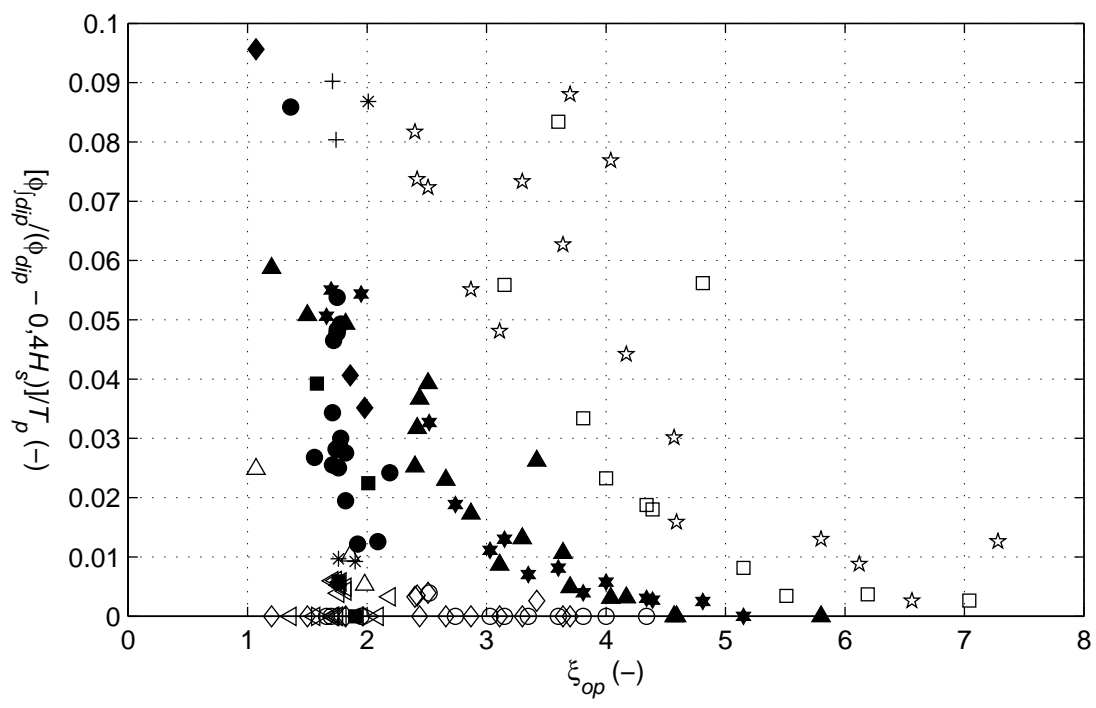
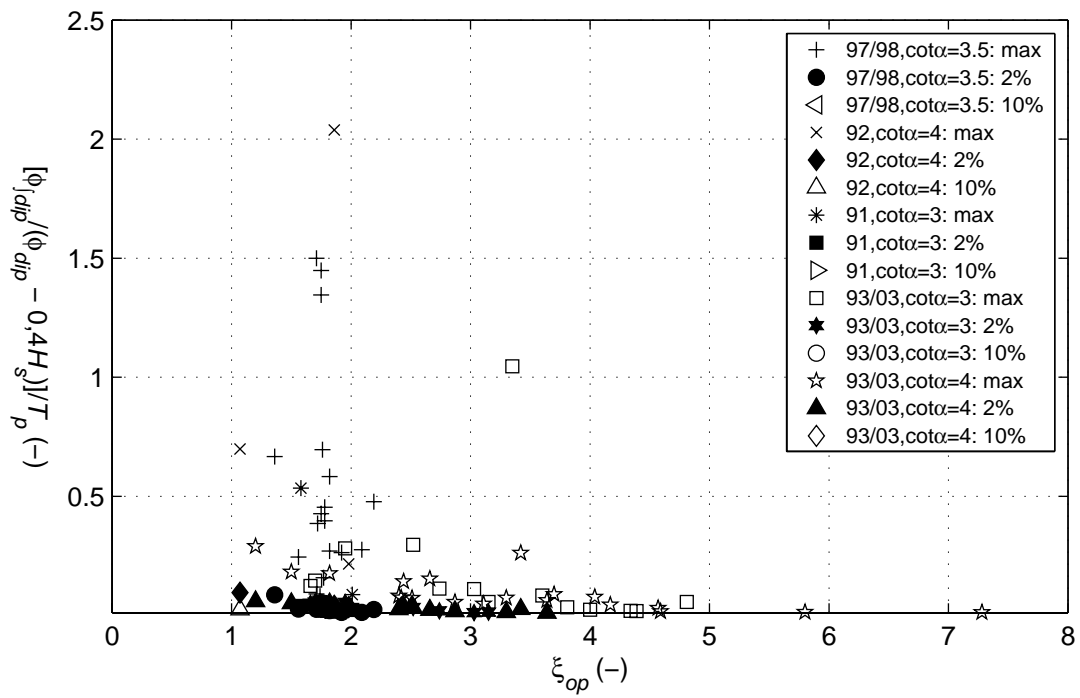
Golfklapbreedte ($B_{klap50\%} \sin \alpha$)

Grootste 33 % van ϕ_k



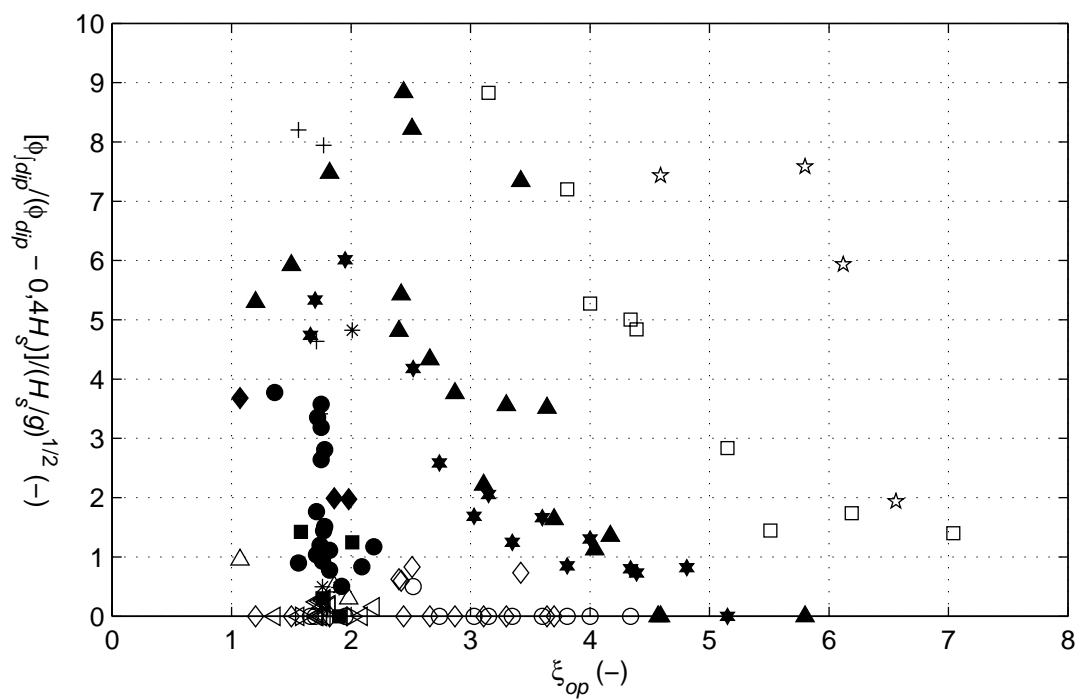
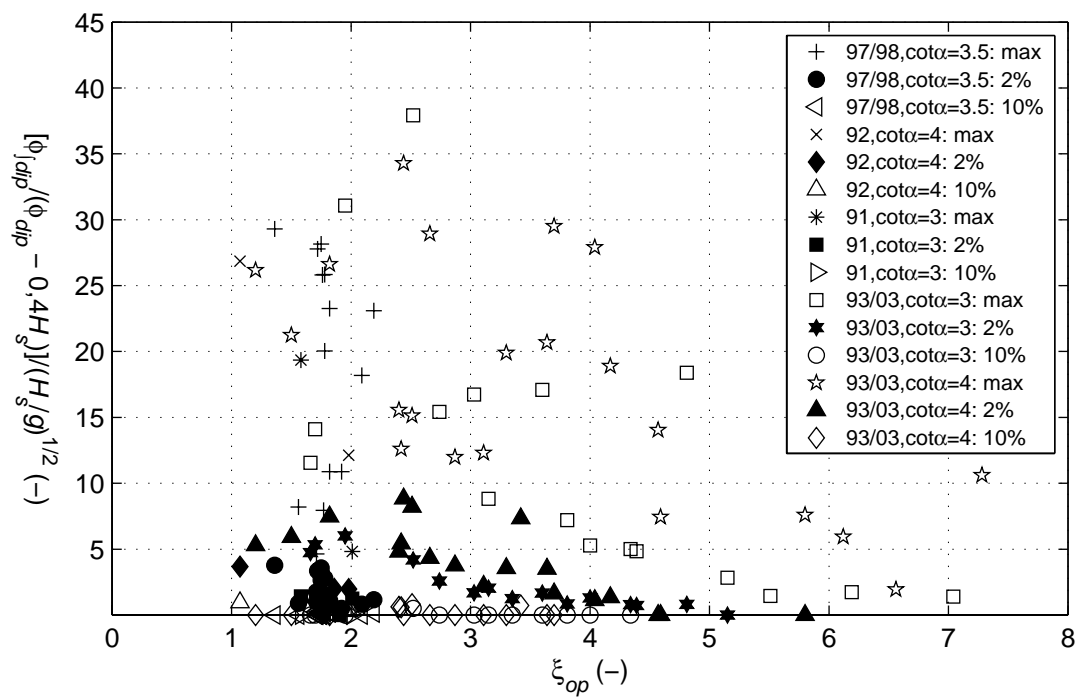
Belastingsduur tijdens golfklap: $\phi_{j,dip}/(\phi_{dip} - 0,4H_s)$

Grootste 33 % van ϕ_k



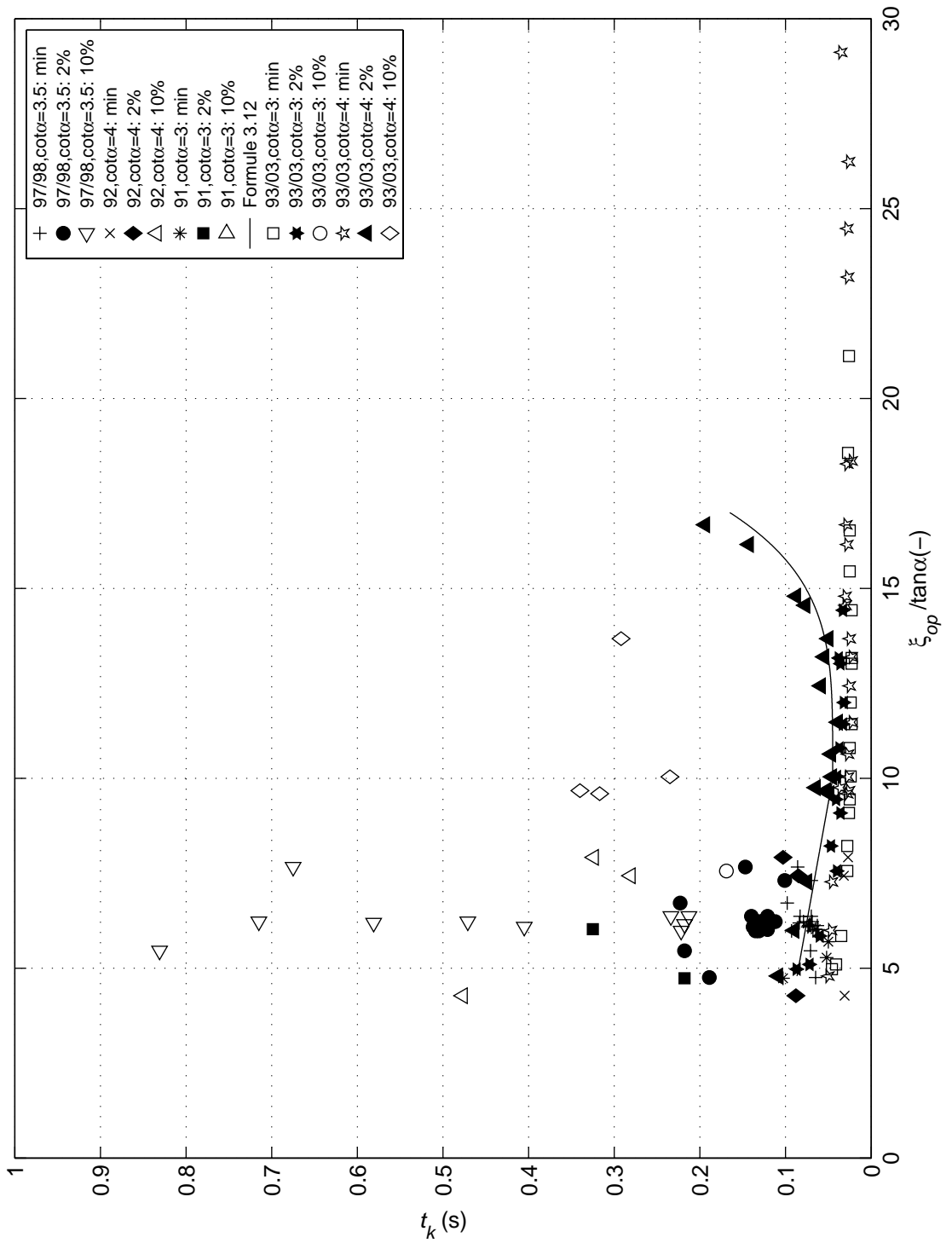
Belastingsduur tijdens golfklap: $[\phi]_{dip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s) / T_p$

Grootste 33 % van ϕ_k



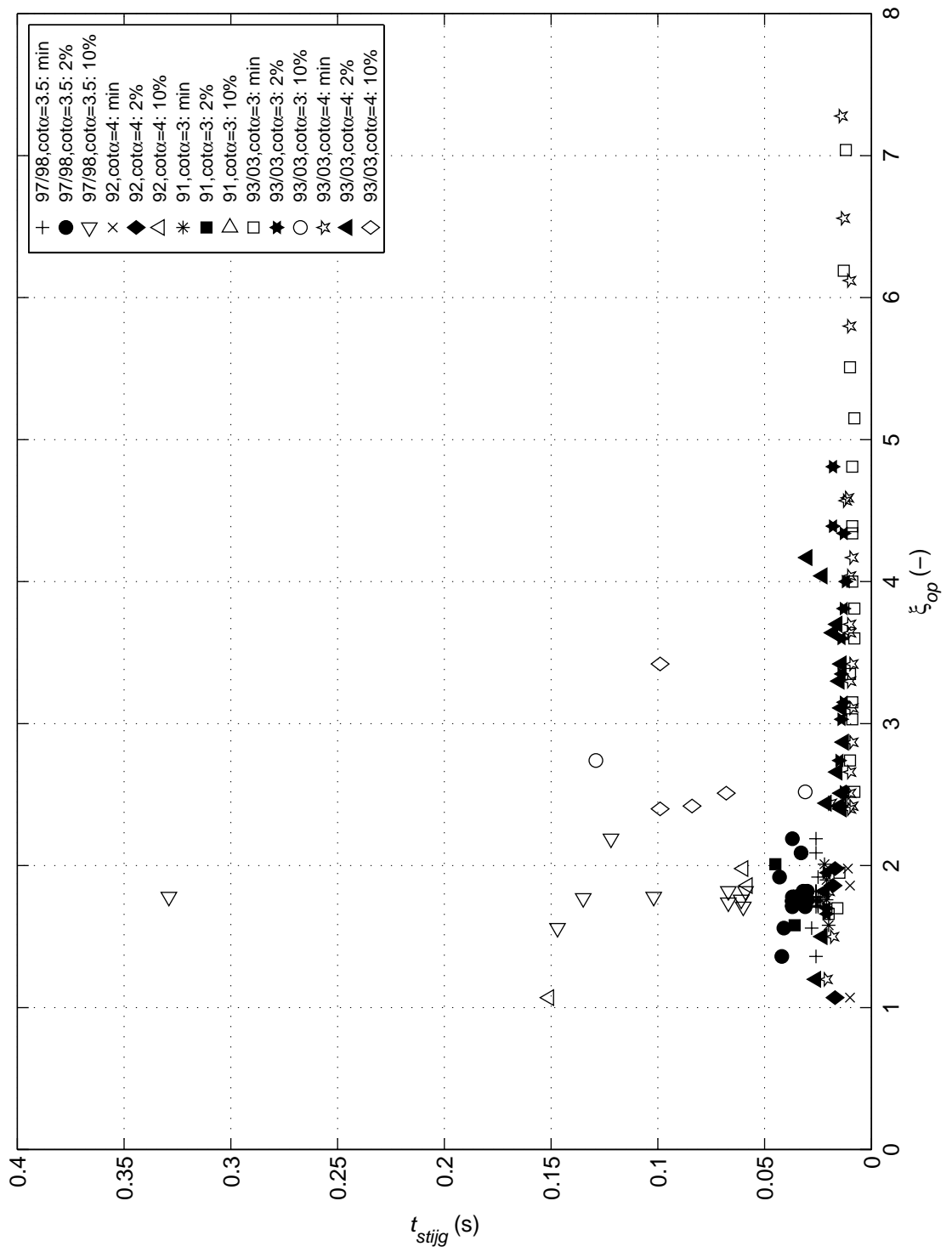
Belastingsduur tijdens golfklap: $[\phi_{dip} / (\phi_{dip} - 0,4H_s)] / (H_s/g)^{1/2}$

Grootste 33 % van ϕ_k



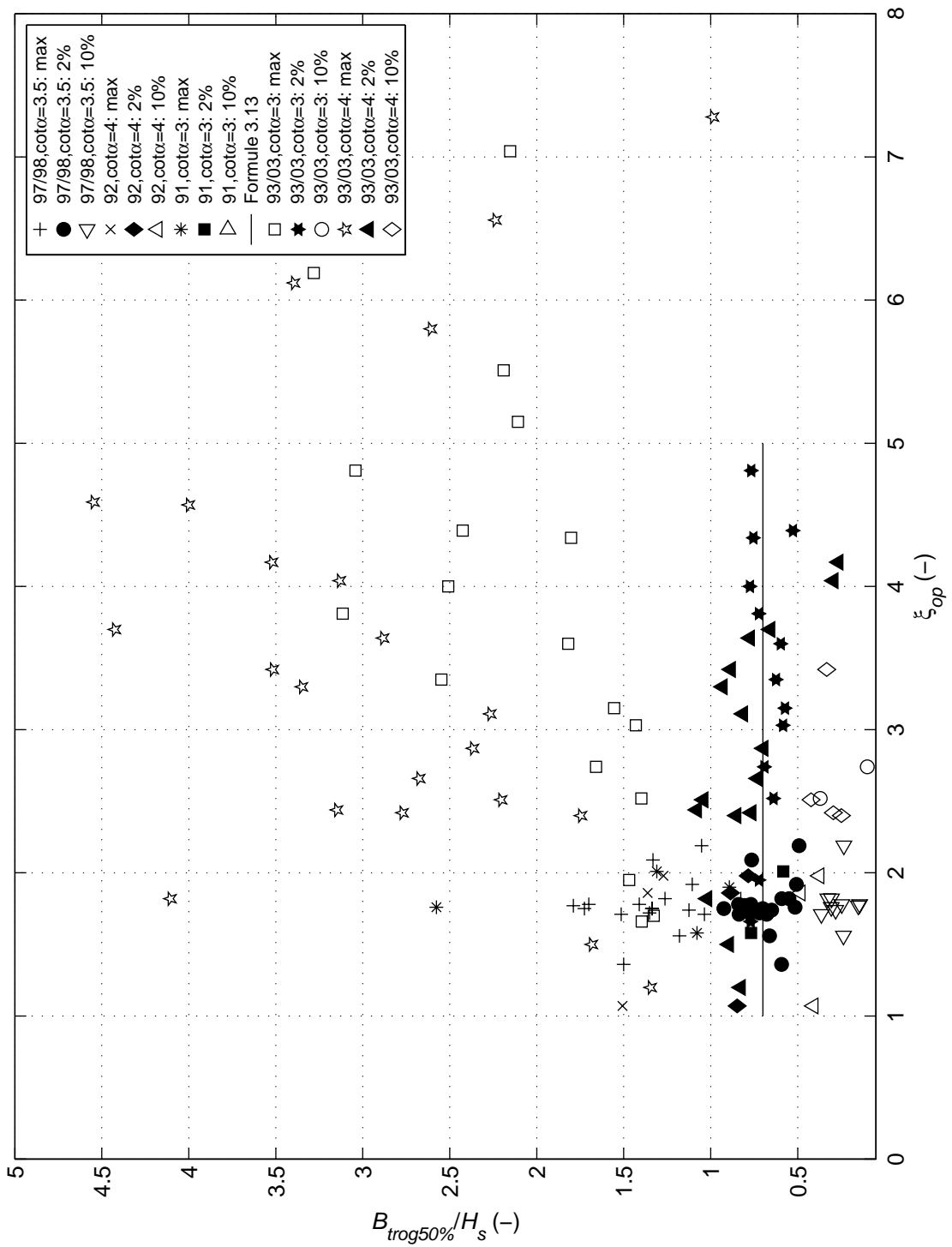
Golfklapduur (t_k)

Grootste 33 % van ϕ_k



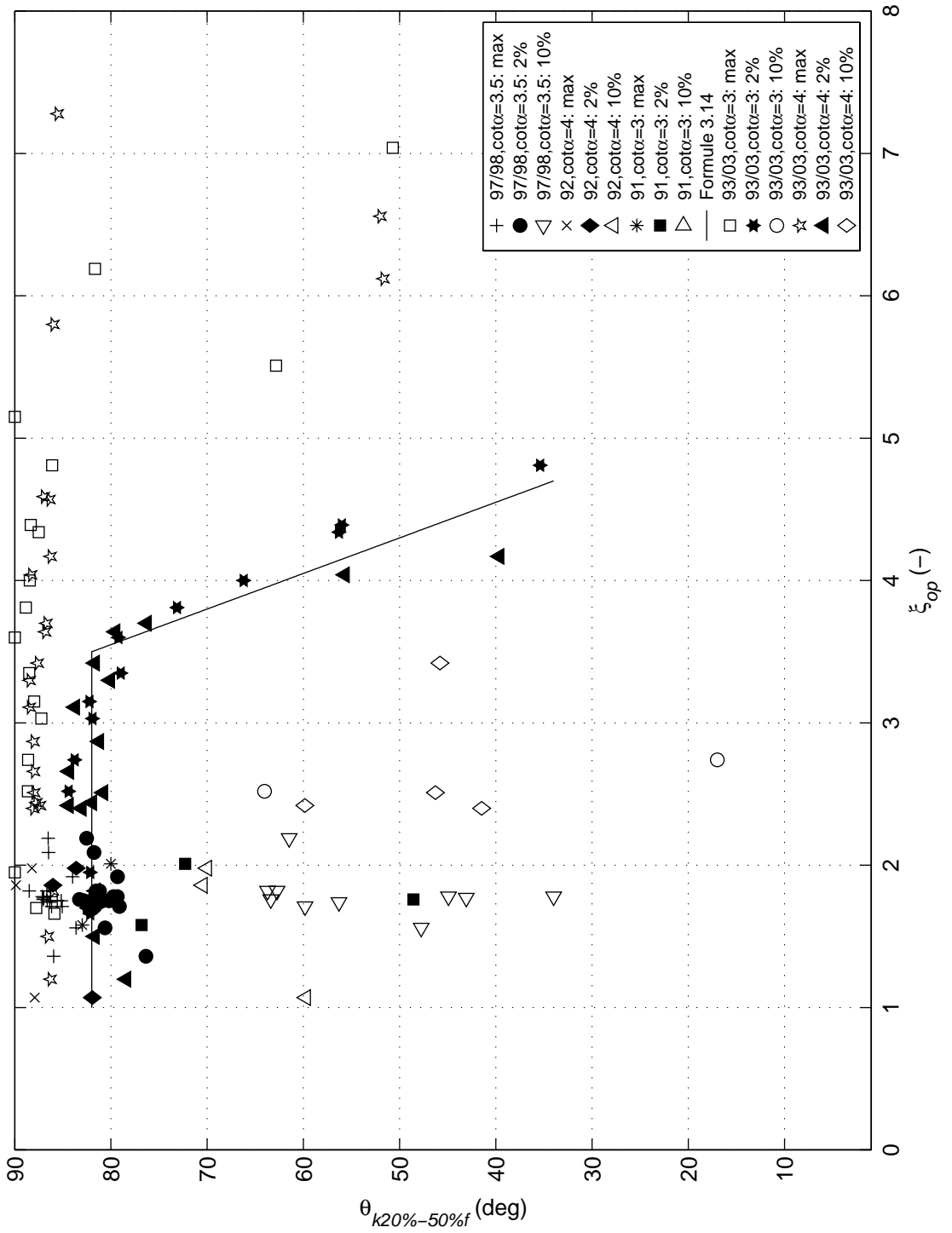
Stijgtijd (t_{stijg})

Grootste 33 % van ϕ_k



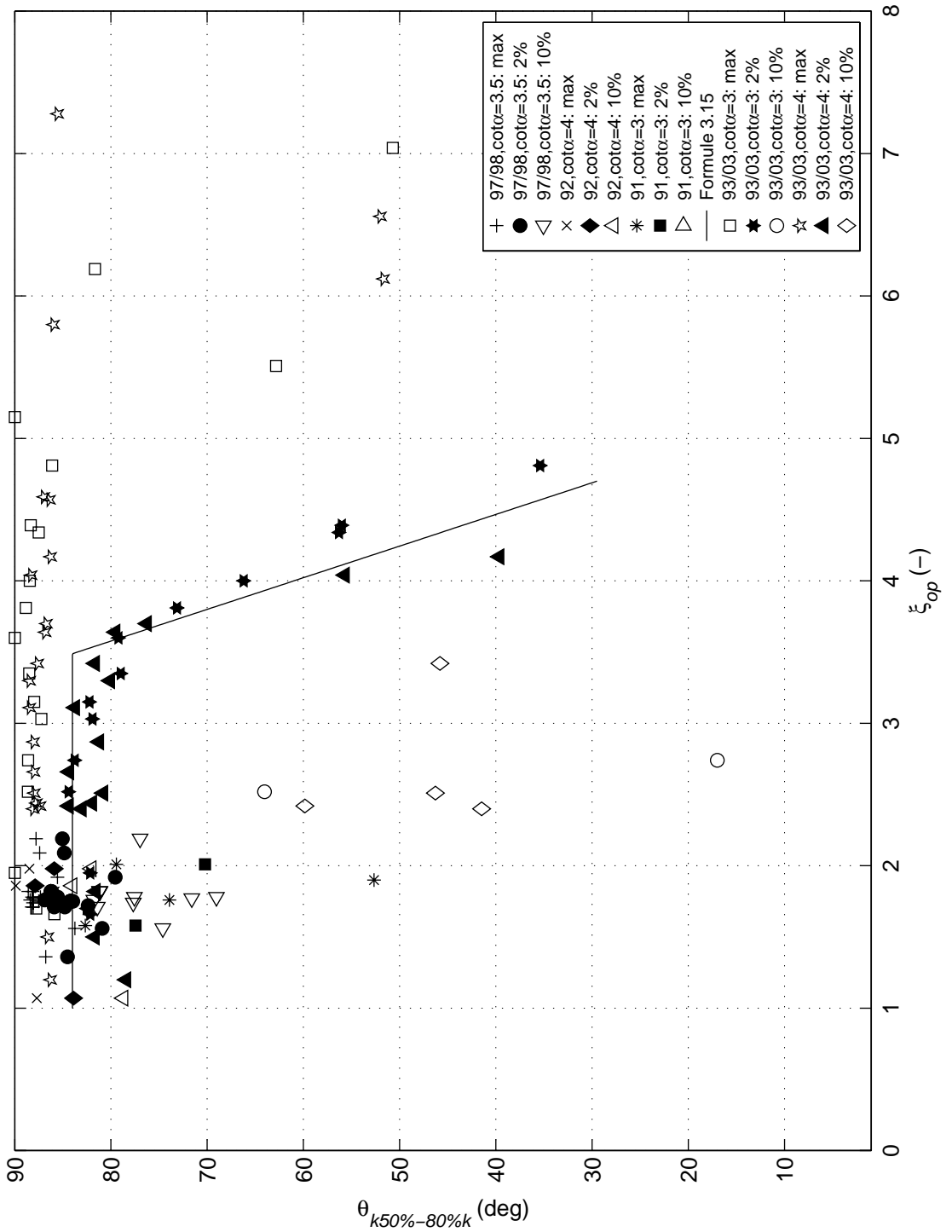
Trogbreedte ($B_{trog50\%}$)

Grootste 33 % van ϕ_k



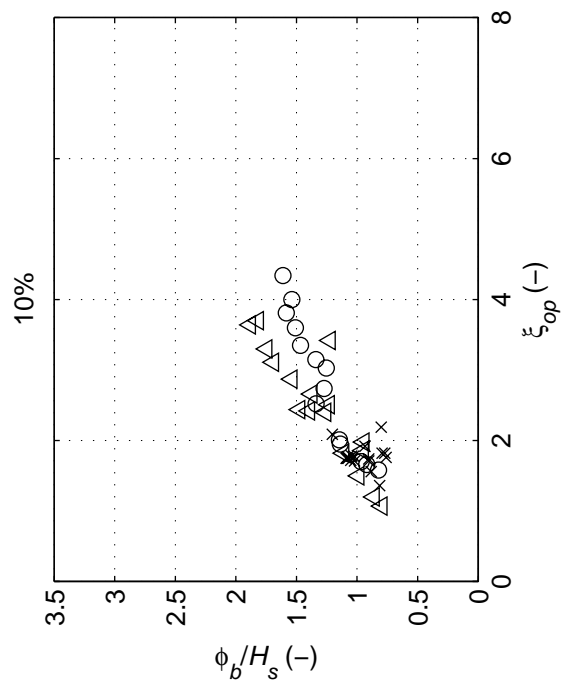
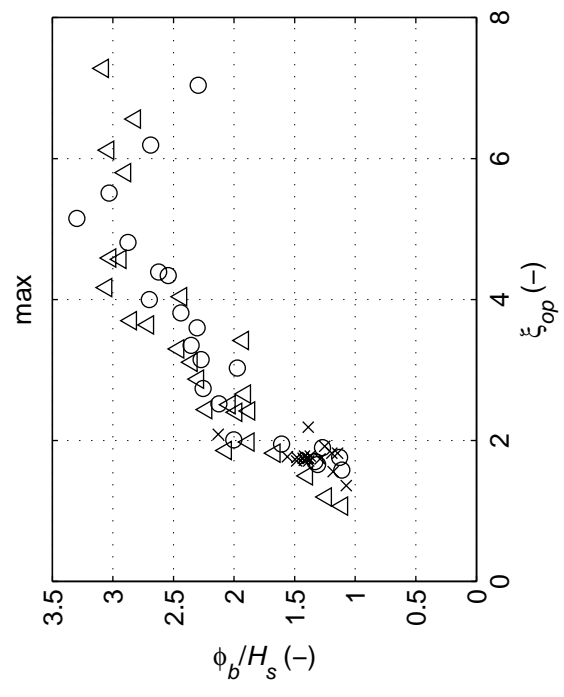
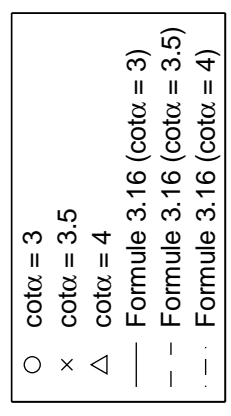
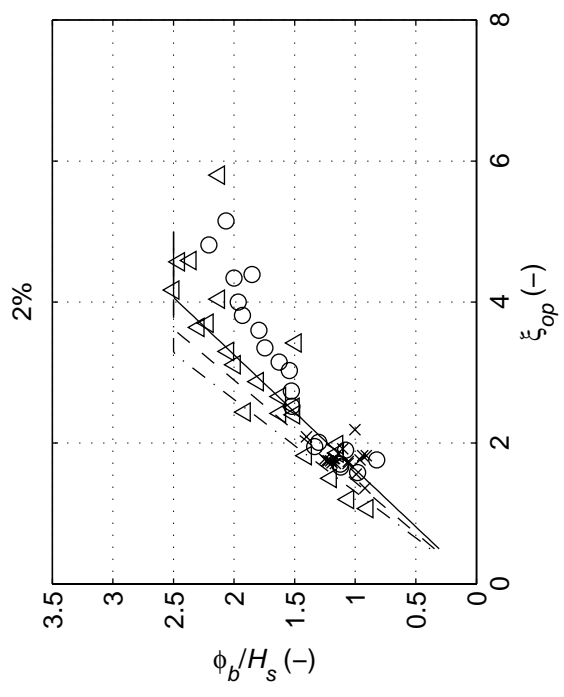
Gradient aan zeezijde van de golfklap ($\theta_{k20\%-50\%f}$)

Grootste 33 % van ϕ_k

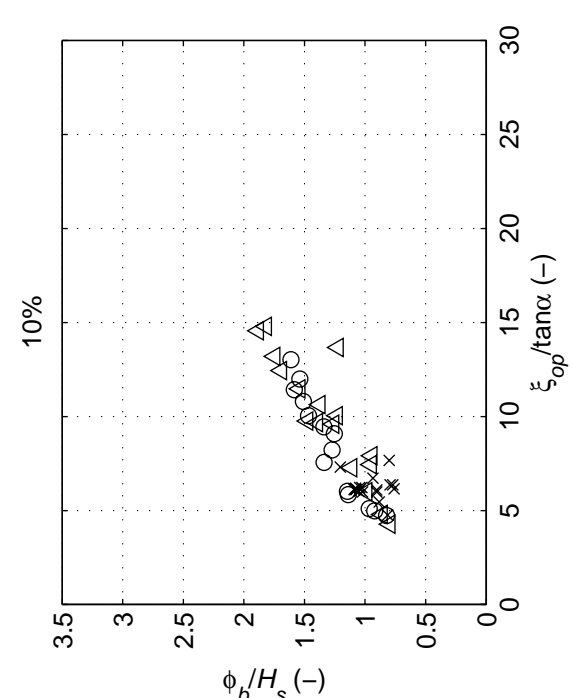
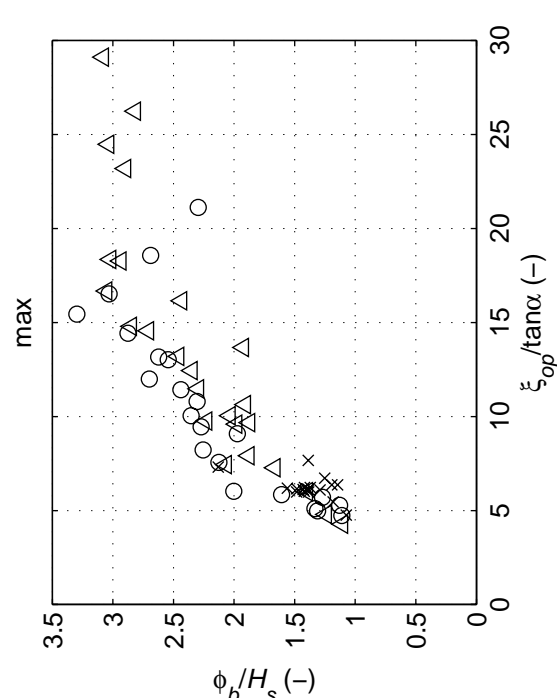
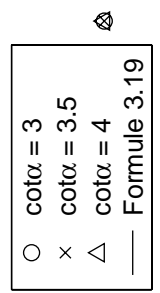
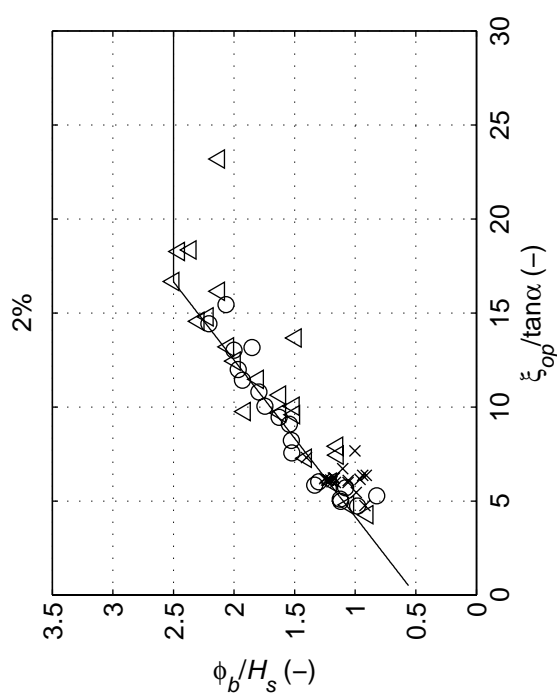


Gradient aan zeezijde van de golfklap ($\theta_{k50\%-80\%k}$)

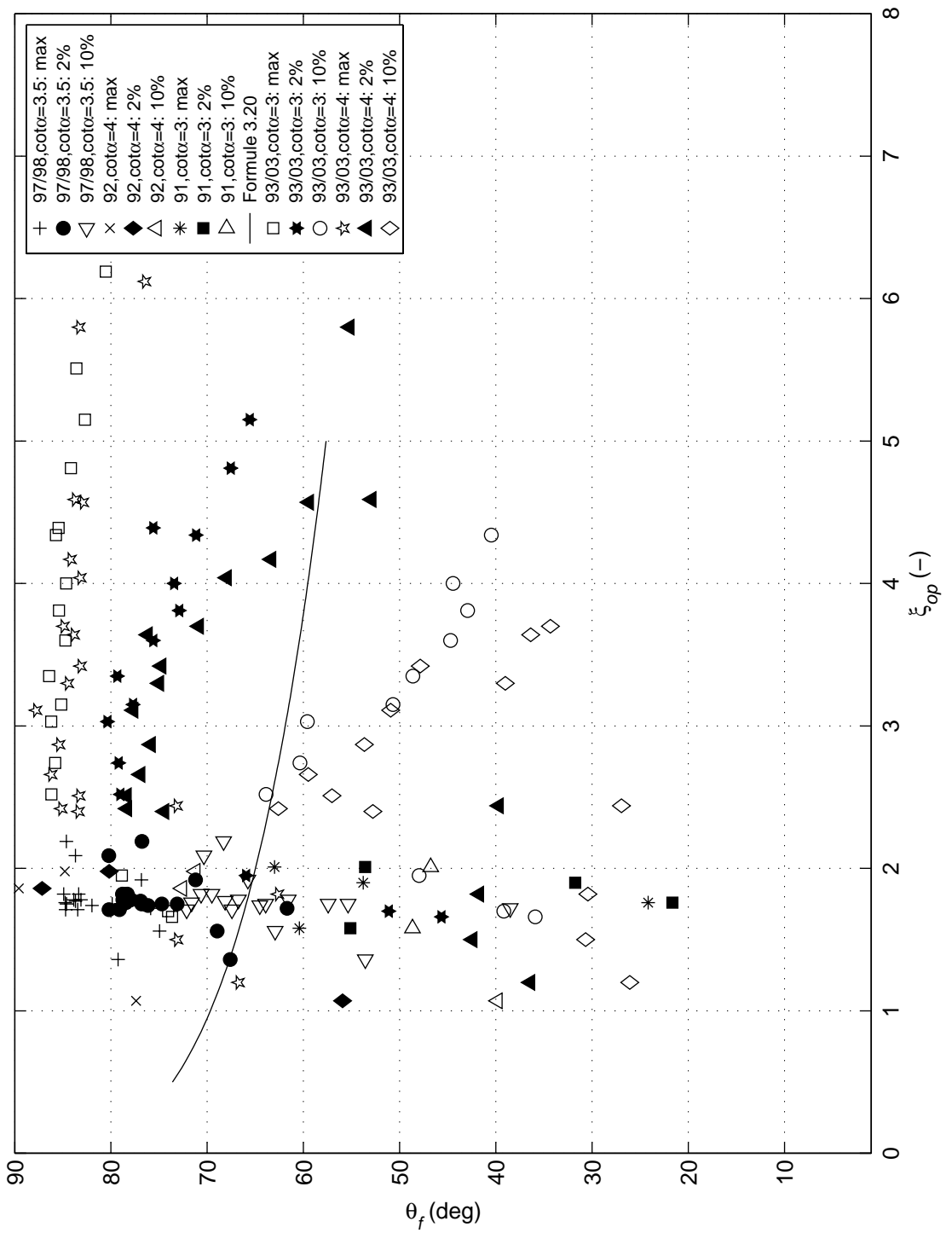
Grootste 33 % van ϕ_k



Hoogte van het golffront (ϕ_b)

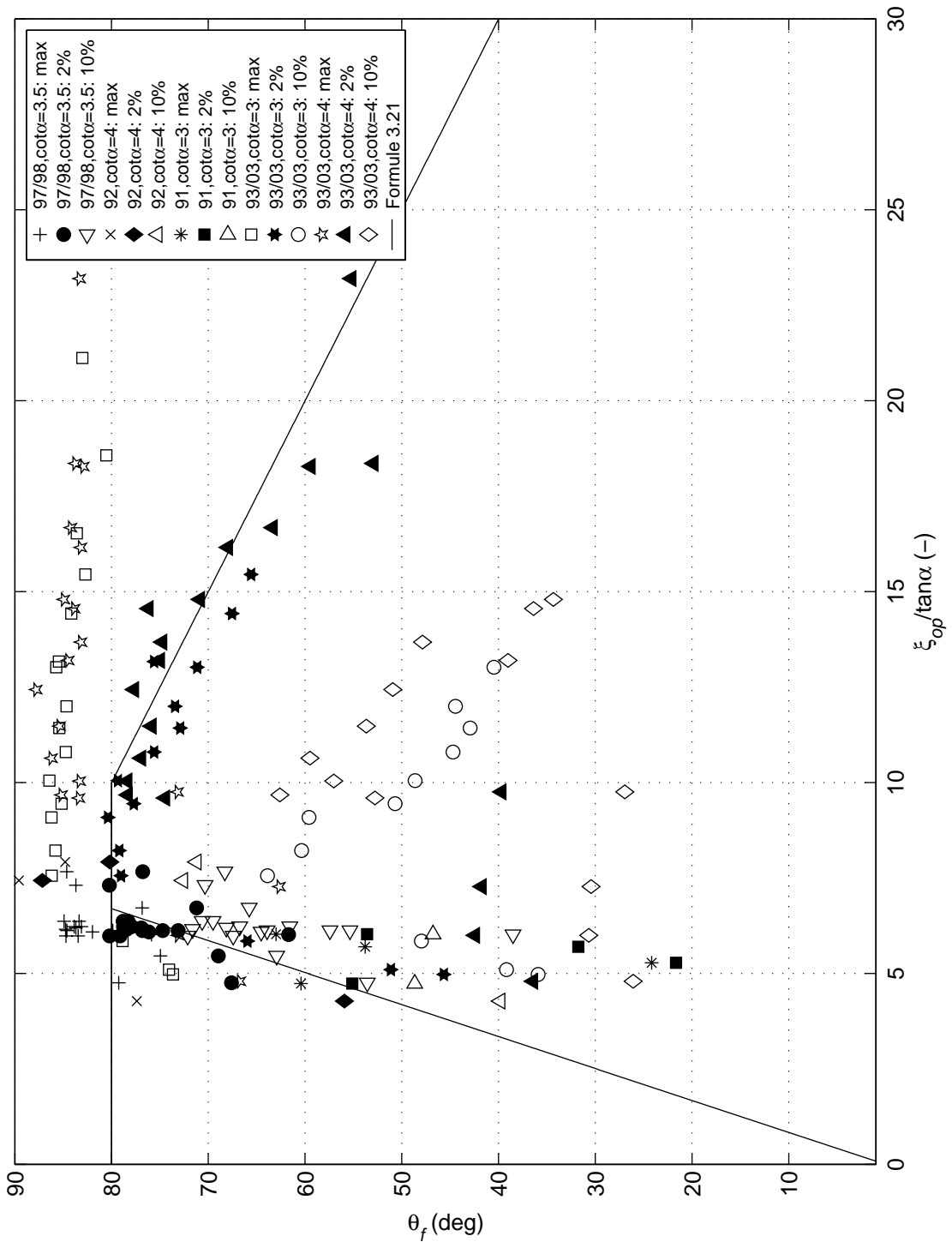


Hoogte van het golffront (ϕ_b) tegen golfsteilheid



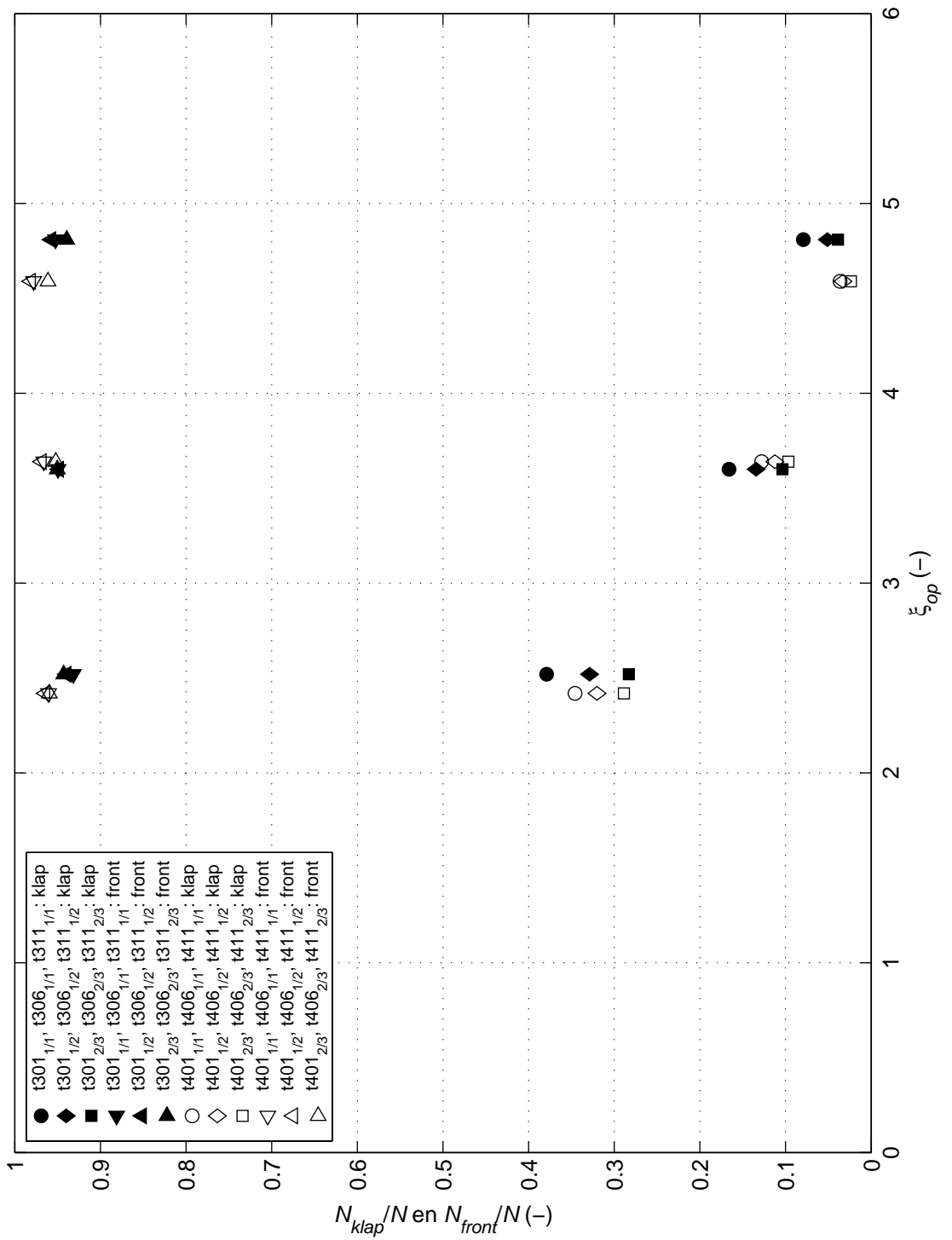
Helling van het golffront (θ_f)

Grootste 33 % van ϕ_b



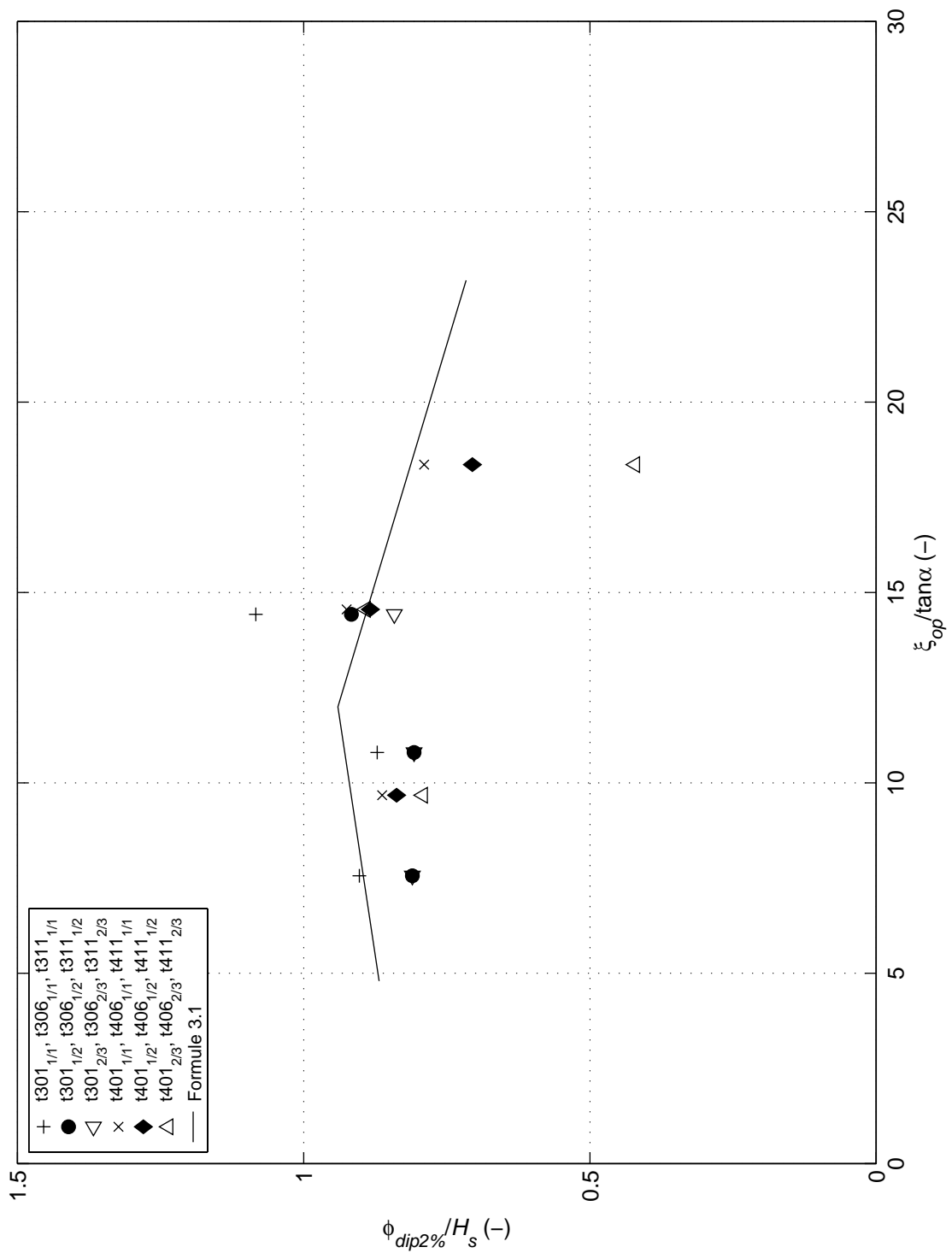
Helling van het golffront (θ_f) tegen golfsteilheid

Grootste 33 % van ϕ_b



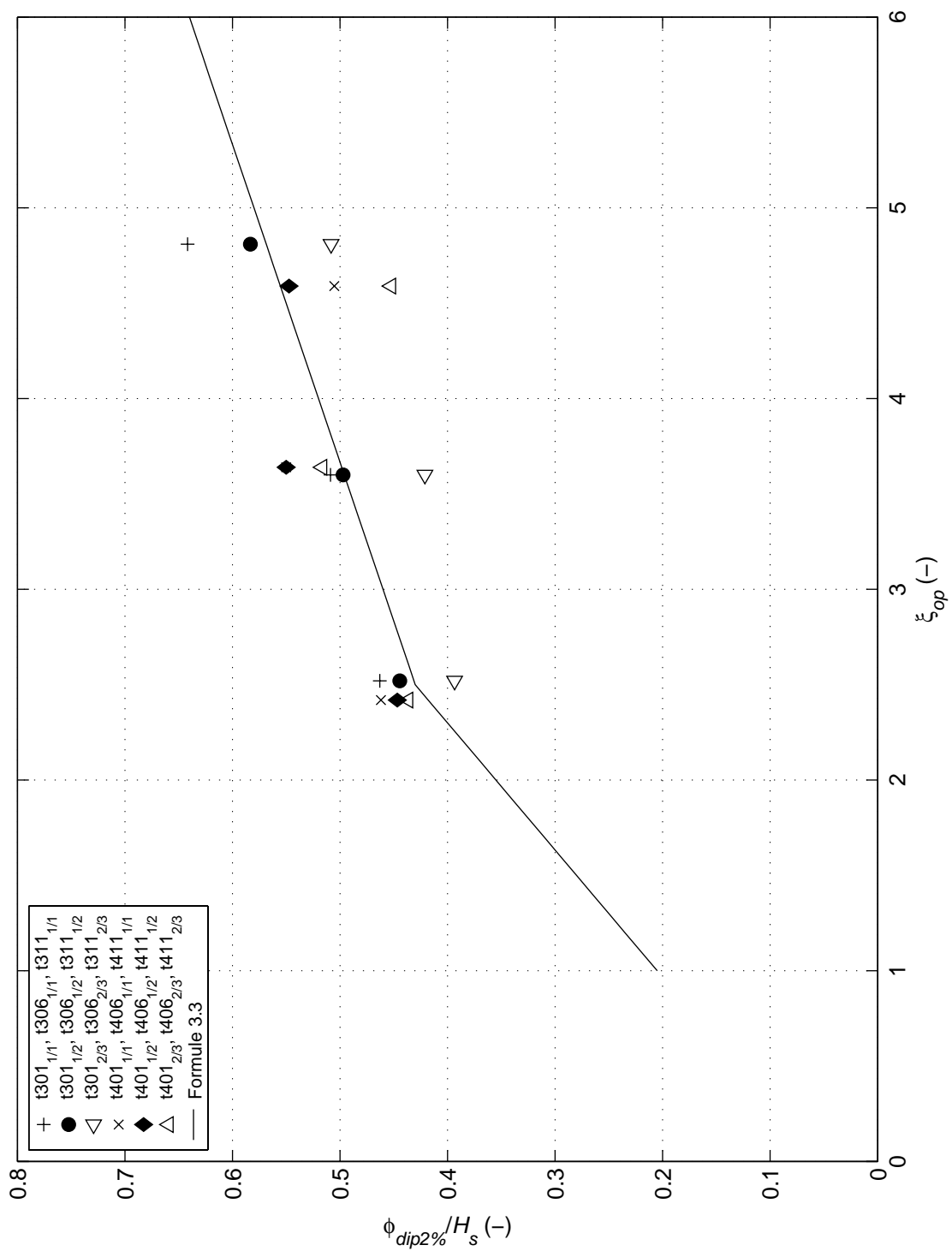
Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven

Instrumentatiedichtheid

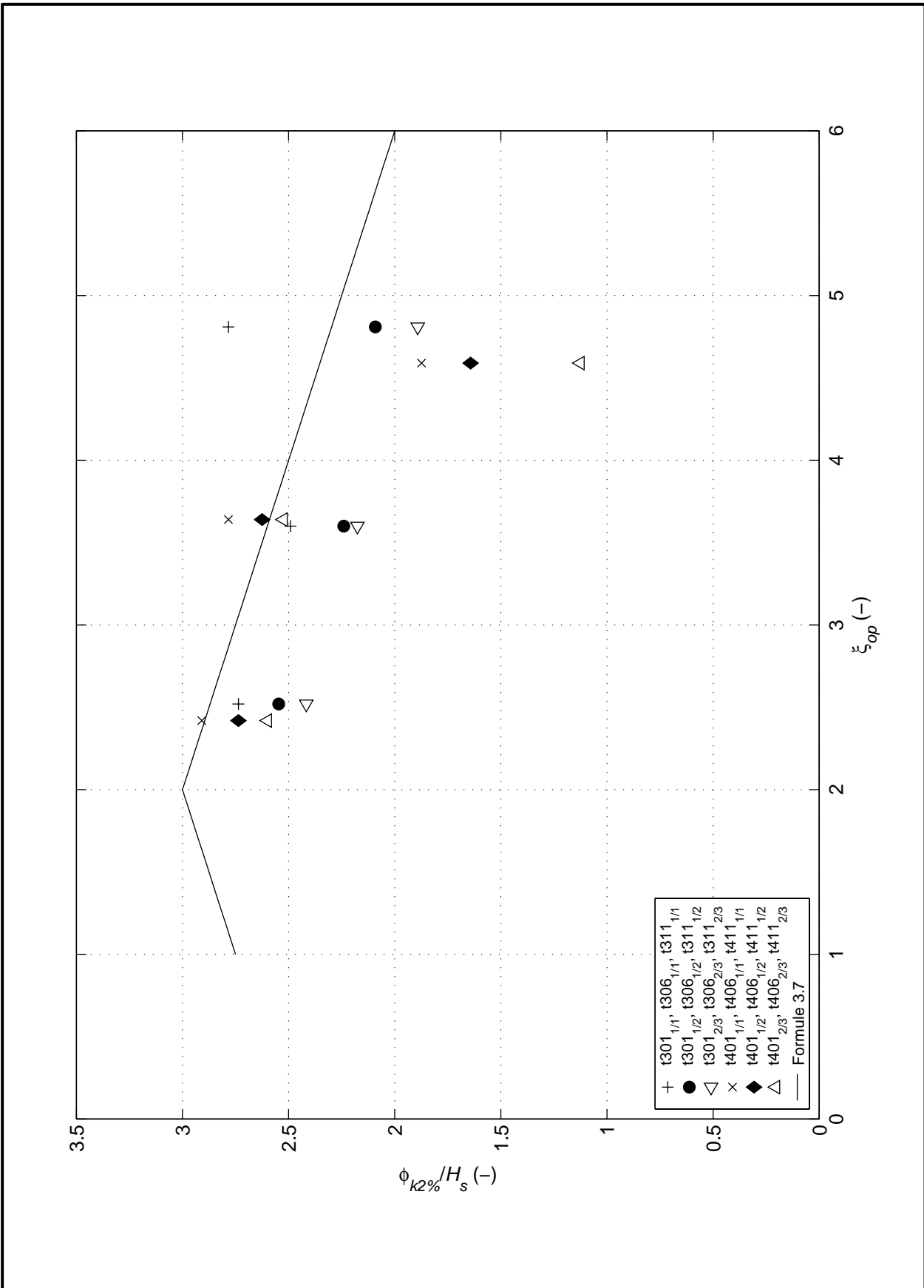


Gediptheid tijdens golfklap ($\phi_{dip2\%}$) tegen golfsteilheid

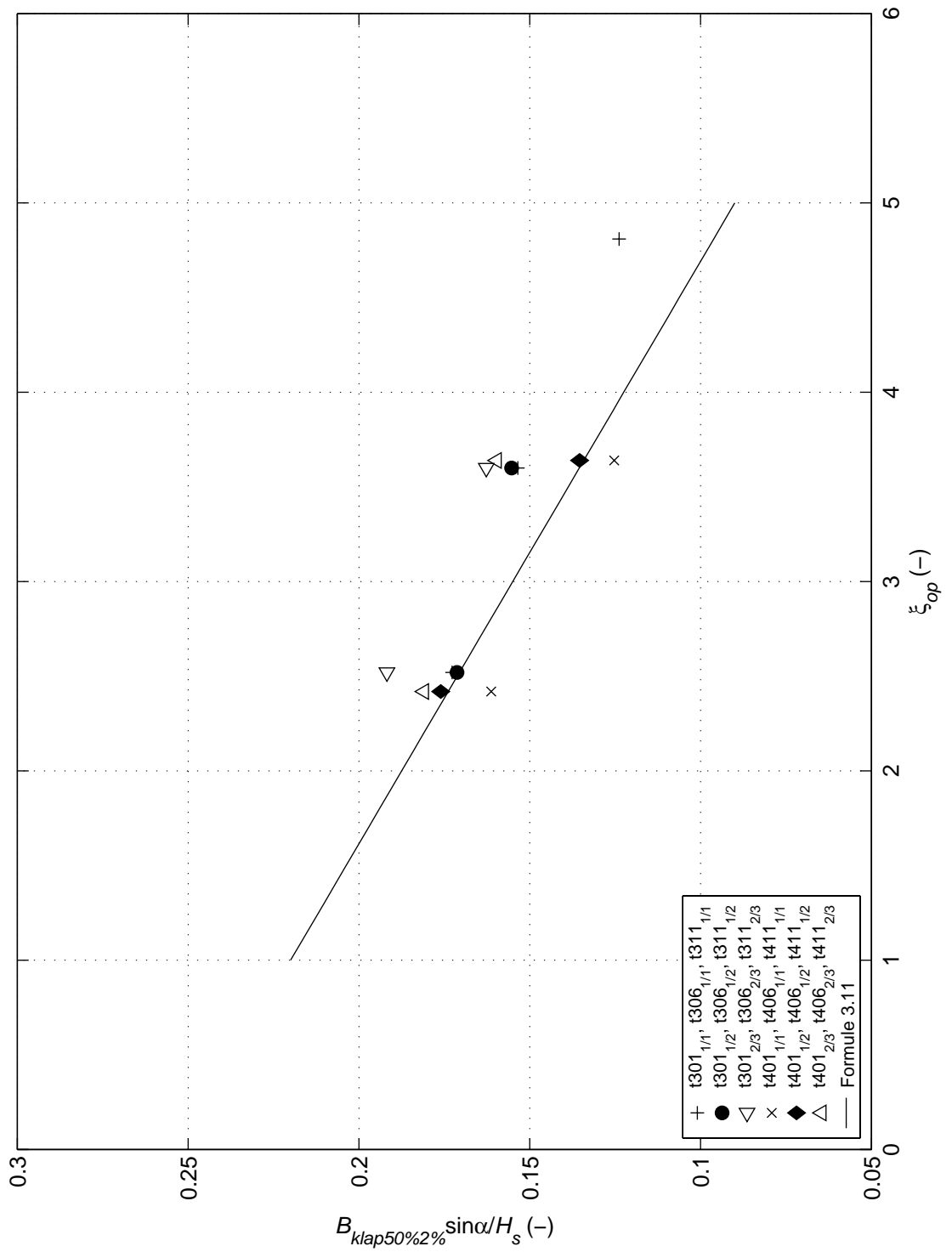
Instrumentatiedichtheid



Gediptheid tijdens golffront ($\phi_{dip2\%}$)		
	Instrumentatiedichtheid	
WL DELFT HYDRAULICS	H4419	Fig. C.39

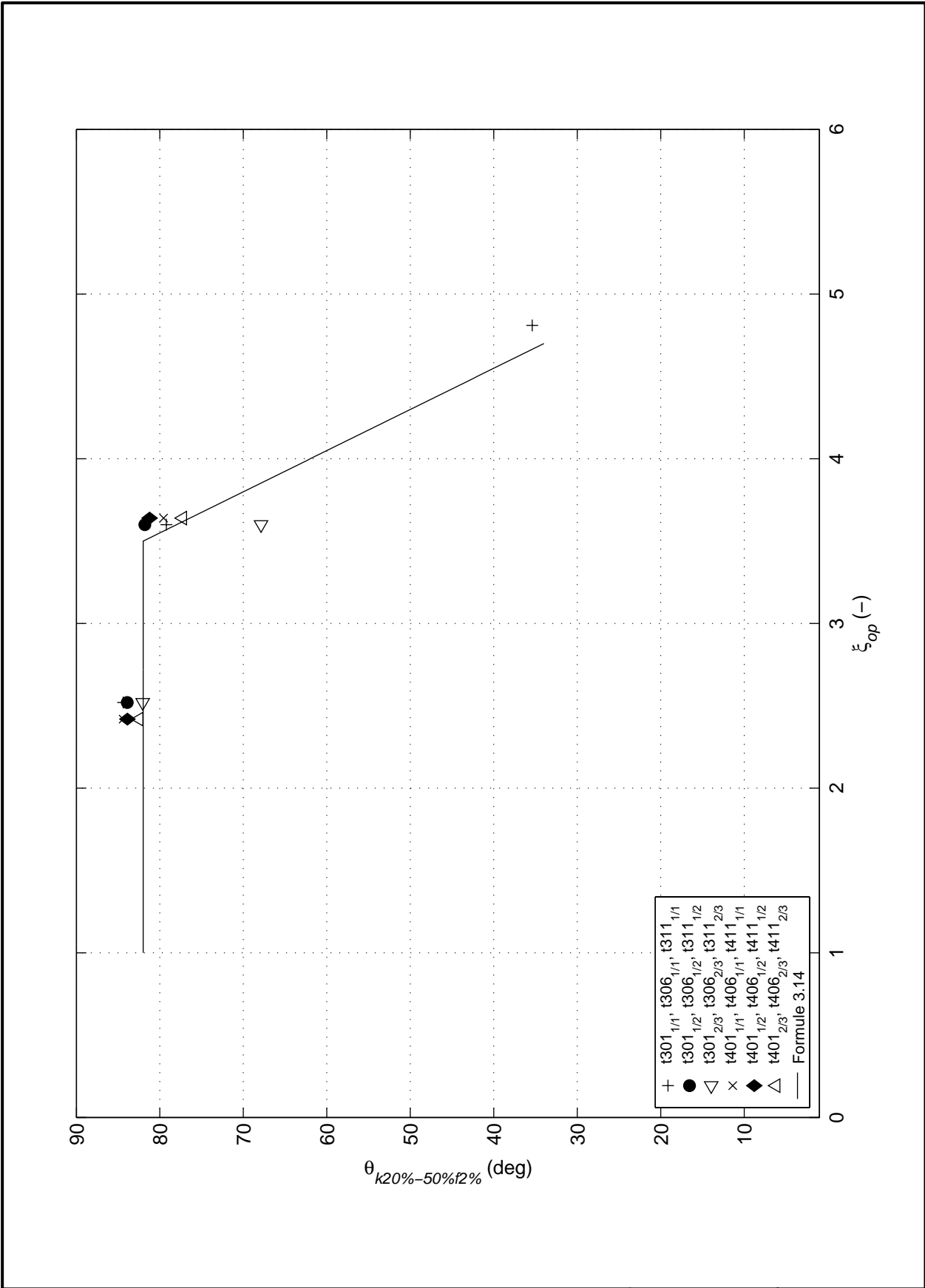


Maximale stijghoogte ten opzichte van trog ($\phi_{k2\%}$)		
	Instrumentatiedichtheid	
WL DELFT HYDRAULICS	H4419	Fig. C.40



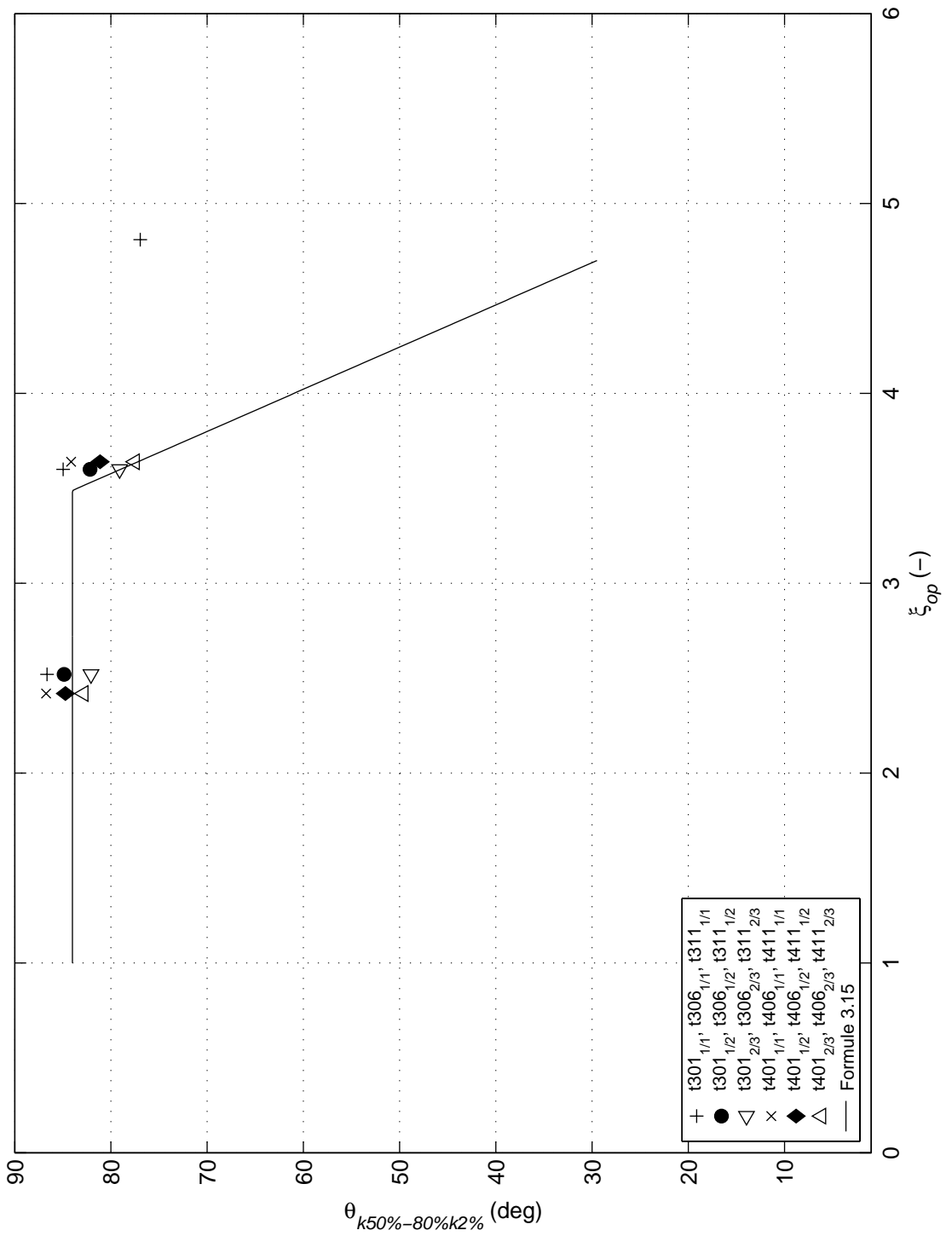
Golfklapbreedte ($B_{klap50\%2\%} \sin \alpha$) voor uitgedunde proeven

Grootste 33 % van ϕ_k



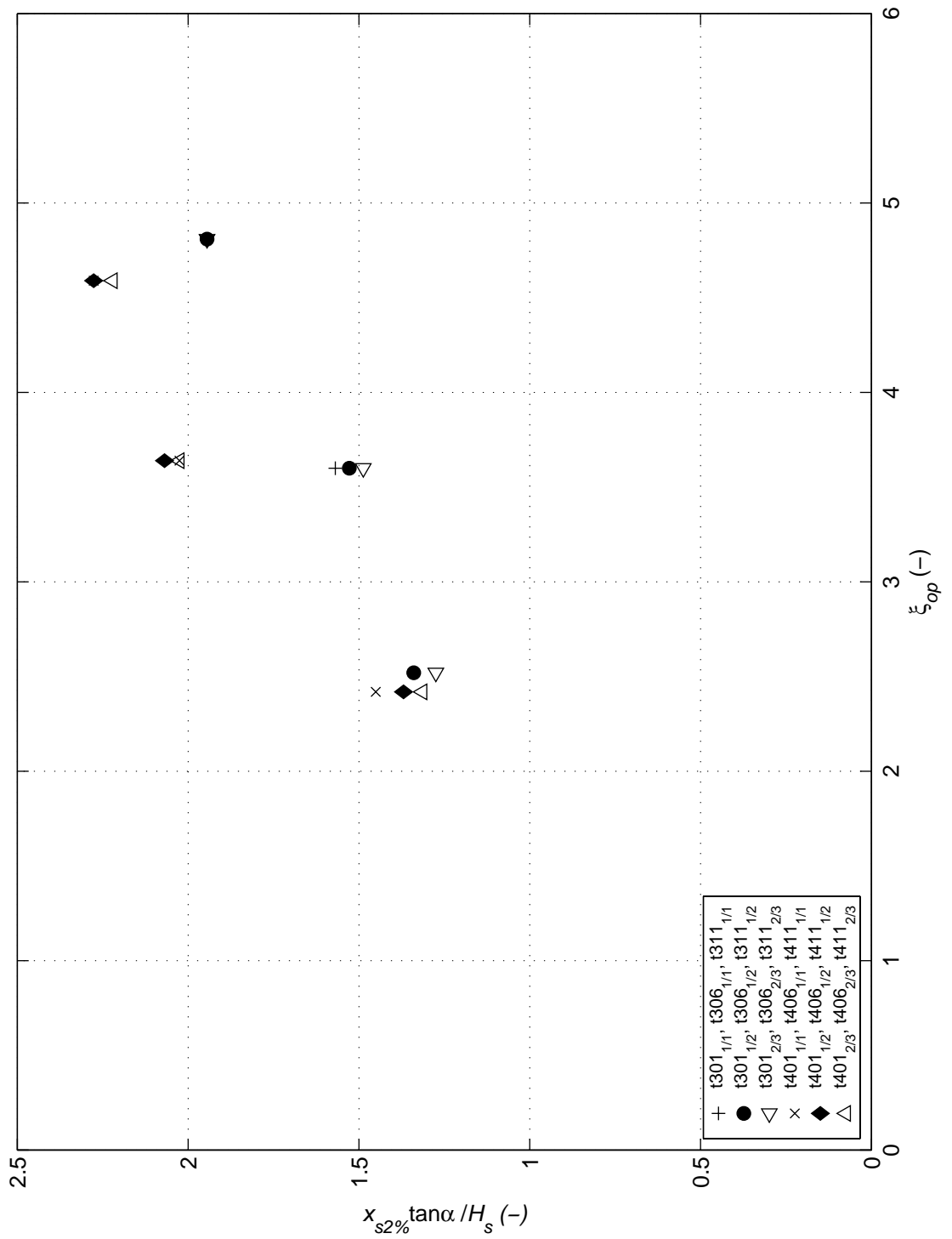
Gradient aan zeezijde van de golfklap ($\theta_{k20\%-50\%f2\%}$) voor uitgedunde proeven

Grootste 33 % van ϕ_k



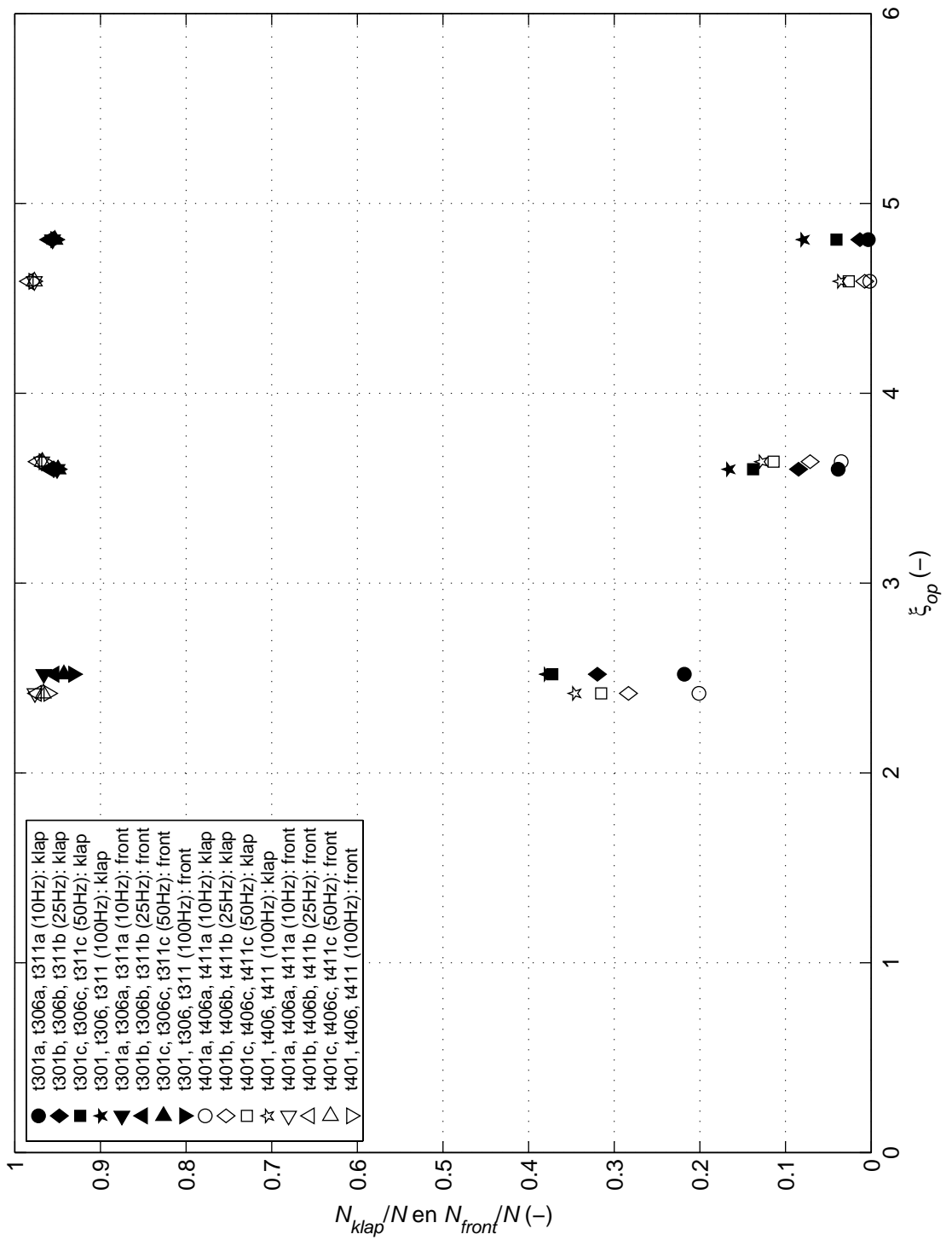
Gradient aan zeezijde van de golfklap ($\theta_{k50\%-80\%k2\%}$) voor uitgedunde proeven

Grootste 33 % van ϕ_k



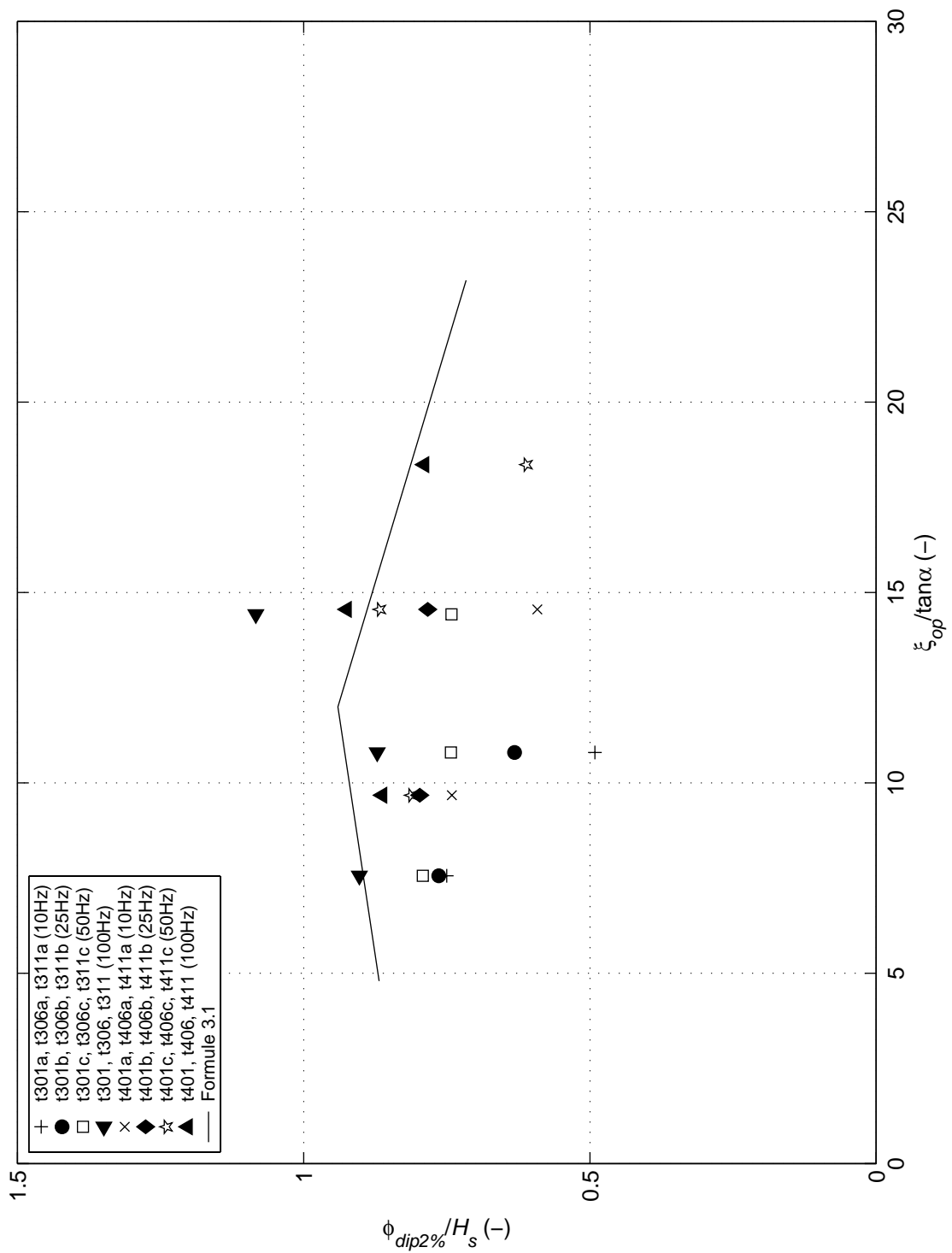
Locatie van steil golffront ($x_{s2\%}$)

Instrumentatiedichtheid



Aantal golfklappen en golffronten per aantal golven

Bemonsteringsfrequentie



Gediptheid tijdens golfklap ($\phi_{dip2\%}$) tegen golfsteilheid

Bemonsteringsfrequentie

Bijlage D:

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

