

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat,  
Directie Zeeland (PBZ)



## Invloed scheve golfaanval op stabiliteit van steenzettingen

Onderzoeksprogramma  
Kennisleemtes Steenbekledingen

rapport

november 2004

H4420

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Zeeland,  
Projectbureau Zeeweringen

## Invloed scheve golfaanval op stabiliteit van steenzettingen

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

C. Kuiper (WL) en A. Bezuijen (GeoDelft)

November 2004





<b>OPDRACHTGEVER:</b>	Prjectbureau Zeeweringen (PBZ) van Rijkswaterstaat, Directie Zeeland						
<b>TITEL:</b>	Invloed scheve golfaanval op stabiliteit van steenzettingen						
<b>SAMENVATTING:</b>	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend verslag betrekking op het deelonderzoek 3.2, "Scheve golfinval, Analyse meetresultaten kleinschalig modelonderzoek (Vinjé-bassin)".</p> <p>Het eerste deel van het onderzoek betreffende de kwantificering van de invloed van scheef invallende golven op de stabiliteit van steenzettingen is reeds uitgevoerd in 2003 (Kuiper, 2003), hetgeen geresulteerd heeft in bestanden van gemeten drukken op het talud. Het huidige onderzoek richt zich op het gebruik van die bestanden om de invloed van scheve golfaanval op het stijghoogteverschil over de toplaag en de stabiliteit te kwantificeren. Hiervoor heeft GeoDelft het rekenmodel ZSTEEN aangepast en heeft hiermee de invloed van de scheve golfaanval gekwantificeerd.</p>						
<b>REFERENTIES:</b>	Contract ZLA-5797 Opdrachtgever PBZ: Y. Provoost Project begeleider DWW: R. 't Hart						
VER	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING	
0	C. Kuiper (WL) en A. Bezuijen GeoDelft		nov. 2004		M. Klein Breteler	W.M.K. Tilmans	
1	C. Kuiper (WL) en A. Bezuijen GeoDelft		nov. 2004		M. Klein Breteler	W.M.K. Tilmans	
<b>PROJECTNUMMER:</b>	H4420						
<b>TREFWOORDEN:</b>	Steenzettingen, dijken, golfbelasting, scheve golfaanval, stabiliteit						
<b>AANTAL BLADZIJDEN:</b>	64						
<b>VERTROUWELIJK:</b>	<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)			<input checked="" type="checkbox"/> NEE			
<b>STATUS:</b>	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorbewerking drukbestanden</b> .....	<b>3</b>
2.1	Inleiding.....	3
2.2	Fase 1; bepalen faseverschillen .....	4
2.3	Fase 2; controleren toegepaste methode .....	6
2.4	Fase 3; faseverschuiving middenraai .....	12
2.4.1	Keuze frequenties .....	14
2.5	Fase 4; aanmaken drukbestanden .....	14
<b>3</b>	<b>Golfdrukregistratie</b> .....	<b>17</b>
3.1	Bemonsteringsfrequentie .....	17
3.2	Drukverdeling over het talud .....	19
3.3	Gebruikte golfdrukregistraties.....	21
<b>4</b>	<b>ZSTEEN-berekeningen in één raai</b> .....	<b>23</b>
4.1	Beginveronderstelling .....	23
4.2	Selectie momenten met grote belasting.....	24
4.3	Uitgevoerde berekeningen.....	24
4.4	Interpretatie van de resultaten 1-dimensionale sommen .....	28
4.4.1	Volledige golfbestanden versus gereduceerde golfbestanden .....	28
4.4.2	Invloed hoek van inval .....	29
<b>5</b>	<b>Aanpassingen ZSTEEN</b> .....	<b>31</b>
5.1	Aanpassingen .....	31
5.2	Afmetingen .....	31
<b>6</b>	<b>Vergelijking met STEEN3D</b> .....	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Drukverdeling in blokkenveld</b> .....	<b>37</b>

7.1	Berekeningen Golf T13 (20 graden scheef invallend) .....	37
7.2	Berekeningen voor T32 (70 graden scheef invallend) .....	39
<b>8</b>	<b>Invloed hoek van inval .....</b>	<b>41</b>
8.1	Belasting als functie van de hoek van inval .....	41
8.2	Vergelijking met ééndimensionale berekening .....	44
<b>9</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>47</b>
<b>Referenties</b>		
<b>A</b>	<b>Overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen.....</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Modelopstelling .....</b>	<b>B-1</b>

## Lijst van Figuren

- 2-1 Grafische weergave van de correlatie van een interessante golf voor Proef T13
- 2-2 Oorspronkelijke meetsignaal voor Drukopnemer 2 van Proef T30
- 2-3 Faseverschuiving toegepast op het meetsignaal van Drukopnemer 2 van Proef T30
- 2-4 Gemeten stijghoogtes als functie van de locatie met toegepaste faseverschuiving voor Proef T30
- 2-5 Berekende gemiddelde frontsnelheden langs de waterlijn berekend met MATLAB en visueel
- 2-6a Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 5
- 2-6b Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 1
- 2-6c Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 9
- 2-7 Gemeten stijghoogte (2000 Hz signaal) voor de centrale drukopnemerraai als functie van de locatie voor de 6 geselecteerde proeven, zowel met als zonder faseverschuiving
  
- 3-1 Verloop golfdruk in de tijd. Oorspronkelijk 2000 Hz signaal (HF) en gefilterd op 100 Hz (LF)
- 3-2 Gemeten golfdrukken op verschillende tijdstippen, gegeven in de legends in seconden. Boven bepaald uit het oorspronkelijke 2000 Hz signaal. Onder na filtering op 100 Hz
- 3-3 Gemeten golfdruk en snelheid langs het talud voor Proef T21
- 3-4 Gemeten snelheidsverdeling T21 (langkammig)
- 3-5 Gemeten snelheidsverdeling T22 (kortkammig)
  
- 4-1 Berekende verschildrukken voor één kolom en een veld blokken
- 4-2 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen, volledige golf met een lek lengte van 1 m.
- 4-3 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen, volledige golf met een lek lengte van 0.3 m.
- 4-4 Berekende 'impuls' voor 1-D berekening met een volledige golf en een lek lengte van 0.3 m.
- 4-5 Berekende 'impuls' voor 1-D berekening met een volledige golf en een lek lengte van 0.3 m.
- 4-6 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen ingekorte golf, lek lengte 1 m.
- 4-7 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen met ingekorte golf, lek lengte 0.3 m.
- 4-8 Test T13. Vergelijking tussen resultaten van de volledige golf en de selectie voor een lek lengte van 1 m.
- 4-9 Test T13. Vergelijking tussen resultaten van de volledige golf en de selectie voor een lek lengte van 0.3 m.

- 6-1 Gebruikte golfrandvoorwaarde voor vergelijking tussen STEEN3D en ZSTEEN
- 6-2 Resultaat berekening STEEN3D, lek lengte=0.945 m.
- 6-3 Resultaat berekening ZSTEEN, lek lengte=0.945 m.
- 6-4 Vergelijking berekende golfrandvoorwaarde en stijghoogteverschil voor STEEN3D en ZSTEEN. Lek lengte is 0.945 m.
- 6-5 Idem Figuur 6-4 voor een andere plaats op het talud
  
- 7-1 Invallende golf bij T13 op een blokkenveld
- 7-2 Stijghoogteverschil bij de golfrandvoorwaarde die getoond is in Figuur 7-1. Voor het golf front en in de golfklap ontstaan gebieden met een groot naar buiten gericht stijghoogteverschil
- 7-3 Resultaat van Figuur 7-2 weergegeven in een contourplot met de posities van de drukopnemers
- 7-4 Resultaat als Figuur 7-3, maar in de juiste lengte- en breedte verhouding
- 7-5 Golfrandvoorwaarde bij Proef D32 na ongeveer 7.5 s golven (schaalfactor 20)
- 7-6 Contourplot van Figuur 7-5 met juiste lengte- en breedte verhouding
- 7-7 Verloop verschildruk voor golfrandvoorwaarde van Figuur 7-5
  
- 8-1 Resultaten als functie van de hoek van inval, lek lengte 1 m.
- 8-2 Resultaten als functie van de hoek van inval, lek lengte 0.3 m.
- 8-3 Test T13, vergelijking tussen berekende stijghoogteverschillen met de oude en de verbeterde versie van ZSTEEN. Lek lengte is 0.3 m.
- 8-4 Test T21, histogram met verdeling van maximale stijghoogte voor een 1-D berekening en een berekening voor een blokkenveld van 6 m. lengte, lek lengte is 1m.
- 8-5 Maximaal stijghoogteverschil berekend voor verschillende golfdrukregistraties en cumulatieve stijghoogteverschillen voor golven over de gehele registratie. Lek lengte 1 en 0.3 m.
- 8-6 Maximale impuls berekend voor verschillende golfdrukregistraties en cumulatieve impuls voor golven over de gehele registratie. Lek lengte 1 en 0.3 m.

## Lijst van Tabellen

- 1 Drukopnemerparen
- 2 Geselecteerde proeven met de hydraulische kenmerken
- 3 Vergelijking van de berekende faseverschillen met de beschreven methodes
- 4 Berekende gemiddelde snelheden langs de waterlijn en toe te passen faseverschuivingen voor de drukopnemers die 9 mm. verschoven zijn in de middenraai
- 5 Statistische gegevens van T21 en t22
- 6 Geselecteerde golven voor berekeningen en schaalfactoren



## Symbolenlijst

$c$	=	voortplantingssnelheid van de golven (m/s)
$c_b$	=	snelheid van het golffront langs de waterlijn (m/s)
$D$	=	dikte van de toplaag (m)
$D_L$	=	benodigde dikte bij loodrechte golfaanval (m)
$f_\beta$	=	Invloedsfactor ten aanzien van scheve golfaanval (-)
$g$	=	versnelling van de zwaartekracht (m/s <sup>2</sup> )
$h$	=	waterdiepte (m)
$H_s$	=	significante golfhoogte aan de teen van het talud (m)
$I$	=	impuls (N.s)
$I'$	=	'impuls' (m.s)
$m$	=	massa van het blok (kg)
$L$	=	ondiepwater golflengte (m)
$L_0$	=	golflengte op diep water (m)
$P$	=	druk (Pa)
$R_{xy}(\tau)$	=	kruiscorrelatie bij faseverschuiving $\tau$ (m <sup>2</sup> /s)
$t$	=	tijd (s)
$t_{links}$	=	faseverschuiving voor de linker raai (s)
$t_{rechts}$	=	faseverschuiving voor de rechter raai (s)
$T_m$	=	gemiddelde periode (s)
$T_p$	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$v$	=	snelheid van het blok (m/s)
$x(t)$	=	tijdserie 1 (s)
$x_{totaal}$	=	totale afstand tussen linker raai en de rechter raai (m)
$x, y$	=	afmetingen langs het talud (m)
$y(t)$	=	tijdserie 2 (s)
$z$	=	niveau t.o.v. de stilwaterlijn (m)
$\beta$	=	hoek van golfinval t.o.v. van de normaal van de constructie (°)
$\tau$	=	faseverschuiving (s)
$\Delta t$	=	theoretische waarde voor de faseverschuiving (s)
$\Delta t_{links}$	=	faseverschuiving links (s)
$\Delta t_{rechts}$	=	faseverschuiving rechts (s)
$\Delta x$	=	afstand middenraai tot de zijraaien (m)
$\rho$	=	soortelijke massa van water (kg/m <sup>3</sup> )
$\Lambda$	=	lek lengte (m)

# I Inleiding

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

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

In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggend verslag betrekking op het deelonderzoek 3.2, "Scheve golfinval, Analyse meetresultaten kleinschalig modelonderzoek (Vinjé-bassin)". Het totale overzicht van het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen, zoals dat begin 2004 is bijgewerkt, is weergegeven in bijlage A.

Het eerste deel van het onderzoek betreffende de kwantificering van de invloed van scheef invallende golven op de stabiliteit van steenzettingen is reeds uitgevoerd in 2003 (Kuiper, 2003), hetgeen geresulteerd heeft in bestanden van gemeten drukken op het talud. Het huidige onderzoek richt zich op het gebruik van die bestanden om de invloed van scheve golfaanval op het stijghoogteverschil over de toplaag en de stabiliteit te kwantificeren.

Resultaten van berekeningen die in het verleden zijn uitgevoerd met het rekenprogramma STEEN3D gaven grotere belastingen op een taludbekleding van gezette steen voor scheef invallende golven in vergelijking met loodrecht invallende golven (Bezuijen en Klein Breteler, 1992, en Bezuijen, 2000). Ook waarnemingen in de Beaufort Sea (Gadd, 1990) wijzen in die richting. De berekeningen zijn echter alleen uitgevoerd voor regelmatige golven.

Globale theoretische beschouwingen (Hijum, 2004, en Van der Meer, 2003) konden echter geen verklaring geven waarom de belastingen op een taludbekleding van gezette steen toenemen. De belasting zou juist moeten afnemen.

Bovenstaande tegenstrijdige resultaten hebben geleid tot het besluit om de golfdrukken die optreden bij scheef invallende golven nog eens te meten in een modelonderzoek en dit dan ook te doen voor langkammige en kortkammige onregelmatige golven. Deze metingen zijn uitgevoerd in het Vinjé Bassin van WL | Delft Hydraulics en zijn gerapporteerd door Kuiper (2003).

Ten opzichte van de eerder uitgevoerde metingen (Klein Breteler, 1990) zijn de volgende verbeteringen doorgevoerd:

- Er zijn ook proeven uitgevoerd met onregelmatige golven.
- Er is een hogere bemonsteringsfrequentie toegepast (zie ook verderop in dit rapport).
- Het golfbassin is gecompenseerd voor reflecterende golven.
- Er zijn veel meer drukopnemers gebruikt.

Dit rapport behandelt de berekeningen die zijn uitgevoerd met de programma's STEEN3D en ZSTEEN om te bepalen wat de belasting is bij scheve golfaanval. STEEN3D is een programma dat begin 90'er jaren is ontwikkeld specifiek voor scheve golfaanval (Bezuijen en

Klein Breteler, 1992). ZSTEEN is nu het meest geavanceerde programma voor de berekening van de stabiliteit van een steenzetting. Bij de ontwikkeling van ZSTEEN is rekening gehouden met de mogelijkheid van het doorrekenen van scheef invallende golven, maar dit was nog niet volledig geïmplementeerd. Voor deze opdracht is deze implementatie wel doorgevoerd. STEEN3D is alleen gebruikt om een vergelijk te hebben voor de ZSTEEN resultaten.

Dit rapport behandelt eerst de analyse van de meetsignalen uit het modelonderzoek en de benodigde voorbereidingen van de databestanden. In hoofdstuk 3 is een korte studie naar de bemonsterings-frequentie en drukverdeling over het talud gegeven, gevolgd in hoofdstuk 4 door een beschrijving van ZSTEEN-berekeningen in één raai. In hoofdstuk 5 is een beschrijving van de aanpassingen aan ZSTEEN gepresenteerd. Daarna worden berekeningen met de traditionele versie van ZSTEEN beschreven. De reden waarom deze zijn uitgevoerd wordt ook besproken in dit hoofdstuk. In hoofdstuk 7 en 8 volgen de berekeningen voor scheef invallende golven. Het rapport wordt afgesloten met conclusies.

Hoofdstuk 2 is geschreven door ing. C. Kuiper van WL en hoofdstuk 3 tot de met 9 zijn geschreven door ir. A. Bezuijen van GeoDelft.

## 2 Voorbewerking drukbestanden

### 2.1 Inleiding

Voor de analyse van de invloed van de hoek van inval van een golffront op de stabiliteit van een steenzetting is gebruik gemaakt van de metingen die in november 2003 zijn uitgevoerd in het Vinjé-bassin (Kuiper, 2003). De basis voor dit onderzoek vormen de gemeten drukken. In Figuur 3 in Bijlage B is de tekening met de positie en de nummering van de drukopnemers weergegeven.

Voor het bepalen van de invloed van scheve golfaanval zal een invloedsfactor bepaald worden met behulp van het rekenmodel ZSTEEN3D van GeoDelft. Voordat de simulaties met ZSTEEN3D kunnen worden uitgevoerd is het nodig om een drukkenveld te genereren. Dit drukkenveld is gegenereerd op basis van de fasesnelheid die vastgesteld is met behulp van de linker en rechter meetraai ten opzichte van de centrale middenraai. Er is een MATLAB-routine geschreven die per golf per drukopnemerpaar het faseverschil bepaald. In totaal zijn 9 drukopnemerparen gedefinieerd. Dit zijn paren waarbij de hoogte van de drukopnemer in zowel de linker, de rechter en de middenraai hetzelfde was. Tevens lagen de drukopnemers in elke raai op één lijn. De 9 paren met bijbehorende drukopnemernummers zijn weergegeven in Tabel 1.

<i>Dro-paar</i>	<i>Dro nr. (links)</i>	<i>Dro nr. (midden)</i>	<i>Dro nr. (rechts)</i>
1	39	07	30
2	40	08	31
3	41	09	32
4	42	10	33
5	43	11	34
6	44	12	35
7	45	13	36
8	46	14	37
9	47	15	38

Tabel 1 Drukopnemerparen

Alvorens het drukkenveld te genereren voor alle 42 uitgevoerde proeven is de werkwijze eerst gecontroleerd voor 6 geselecteerde proeven. In onderstaande tabel zijn de proeven weergegeven die zijn gebruikt voor de controle, met in de tweede kolom de golfrichting ten opzichte van de normaal en of het langkammige golven dan wel kortkammige golven betrof. Dit is aangegeven in de derde kolom met een L respectievelijk een K. De gemeten hydraulische randvoorwaarden zijn weergegeven in de laatste drie kolommen. De helling van het talud was voor alle proeven 1:3.

<i>Proefnummer</i>	<i>Golfrichting</i> [° t.o.v. normaal]	<i>Lang-</i> /kortkammig	<i>h</i> [m]	<i>H<sub>s</sub></i> [m]	<i>T<sub>p</sub></i> [s]
T05	-2	L	0.644	0.13	1.60
T06	+4	K	0.644	0.13	1.45
T13	22	L	0.644	0.14	1.44
<i>Proefnummer</i>	<i>Golfrichting</i> [° t.o.v. normaal]	<i>Lang-</i> /kortkammig	<i>h</i> [m]	<i>H<sub>s</sub></i> [m]	<i>T<sub>p</sub></i> [s]
T14	21	K	0.644	0.14	1.38
T29	56	L	0.623	0.10	1.22
T30	48	K	0.623	0.11	1.24

Tabel 2 Geselecteerde proeven met de hydraulische kenmerken

Het totale project kan in 6 fases worden onderverdeeld:

1. Maken van de MATLAB-routine voor het bepalen van de faseverschillen tussen de 3 raaien en het bepalen van de voortplantingssnelheid.
2. Visueel controleren van de in Fase 1 toegepaste methode om de faseverschillen te bepalen voor 6 tijdstippen en voor alle 6 geselecteerde proeven uit Tabel 2.
3. Door de dichte instrumentatie konden de drukopnemers in de centrale middenraai niet op één lijn geplaatst worden. In deze fase wordt een analyse gedaan wat de invloed hiervan was op de gemeten stijghoogte.
4. Bij goed functioneren van de routines moet deze worden toegepast voor het generen van drukvelden voor alle 42 uitgevoerde proeven.
5. Maken van ZSTEEN 3D sommen voor het bepalen van de invloedsfactor voor scheve golfaanval (GeoDelft).
6. Conclusies en rapportage.

Deze notitie zal beschrijft de Fase 1 tot en met Fase 4.

## 2.2 Fase I; bepalen faseverschillen

Als eerste worden voor de elke proef de begin en eindtijden van elke individuele golf bepaald. Het selecteren van golven zoals beschreven in Coeveld (2003) is gebaseerd op de aanname dat hetzelfde begin- en eindtijdstip voor een golf geldt in elke drukopnemer. Er wordt uitgegaan van het voortschrijdend gemiddelde van het signaal van de diepst gelegen drukopnemer van de rechter drukopnemerraai. Het begintijdstip van een golf ligt  $0.1T_m$  voor een opwaartse nuldoorgang. Vervolgens wordt vanaf  $0.3T_m$  na de opwaartse nuldoorgang gezocht naar de volgende opwaartse nuldoorgang. Het eindtijdstip van de golf is tevens het begintijdstip van de volgende golf en is  $0.1T_m$  voor de volgende opwaartse nuldoorgang. Het referentie signaal is het signaal van DRO30 (de laagste drukopnemer uit de rechter raai).

De bepaalde begin- en eindtijden voor DRO30 worden toegepast op alle 9 drukopnemerparen. Een drukopnemerpaar is gedefinieerd als twee drukopnemers in het zelfde horizontale vlak en waarvan een drukopnemer op de centrale middelste raai ligt en de ander op de linker of rechter raai (zie Tabel 1).

Het bepalen van de benodigde faseverschuiving gaat als volgt:

1. Voor iedere golf wordt de benodigde faseverschuiving bepaald voor ieder drukopnemerpaar.
2. Hiertoe wordt iedere golf kunstmatig verdrievoudigd (zie ook het bovenste figuur van Figuur 2.1). Het vergroten van de signalen wordt gedaan door hetzelfde signaal er zowel voor als achter te plaatsen. Door dit te doen wordt periodiciteit geïntroduceerd. Hierdoor kan het faseverschil tussen twee signalen beter bepaald worden.
3. Op deze manier hebben we voor elke golf 9 faseverschuivingen voor de linker raai en 9 faseverschillen voor de rechter raai bepaald, op basis van een berekening van de kruiscorrelatie tussen beide signalen (Vergelijking 2.1).

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\tau-t} \int_0^{\tau-t} x(t)y(t+\tau)dt \quad (2.1)$$

$R_{xy}(\tau)$  : kruiscorrelatie bij faseverschuiving  $\tau$  (m<sup>2</sup>/s)  
 $\tau$  : faseverschuiving op horizontale (s)  
 $x(t)$  : tijdserie 1 (m)  
 $y(t)$  : tijdserie 2 (m)

4. Vervolgens worden deze faseverschuivingen gemiddeld, zodat per golf een gemiddelde faseverschuiving voor de linker raai ( $t_{links}$ ) en een faseverschuiving voor de rechter raai ( $t_{rechts}$ ) bepaald is. De middeling is uitgevoerd door de 9 bepaalde faseverschuivingen te sommeren en vervolgens te delen door het aantal drukopnemerparen. Dit geeft de gemiddelde faseverschuiving.
5. Met deze gemiddelde faseverschuivingen voor de linker en de rechter kant kan nu een voortplantingssnelheid langs de waterlijn bepaald worden. De faseverschillen links ( $\Delta t_{links}$ ) en rechts ( $\Delta t_{rechts}$ ) worden bij elkaar opgeteld. Dit is de totale tijd die het golfvront nodig heeft om van de rechter naar de linker meetraai te komen. De afstand tussen de beide raaien bedraagt 0.220 m. Hiermee kan dan de gemiddelde snelheid langs de waterlijn bepaald worden volgens de volgende vergelijking:

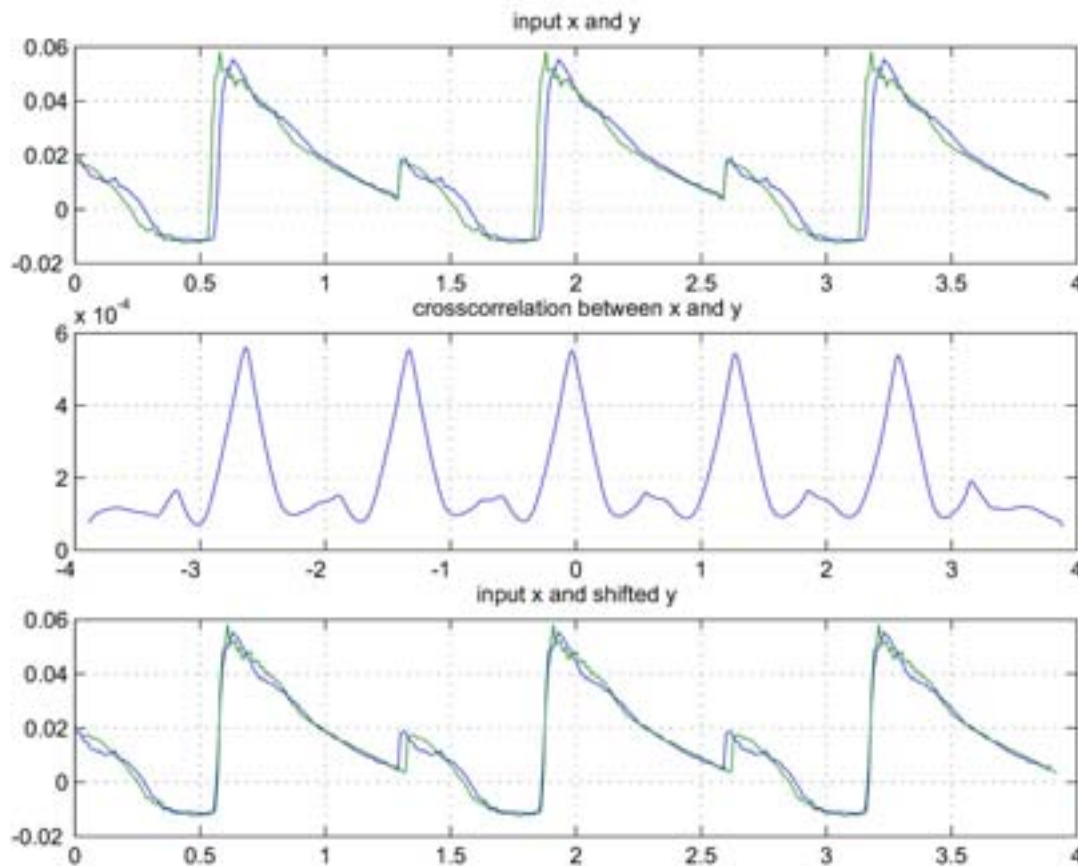
$$c_b = x_{totaal} / (\Delta t_{links} + \Delta t_{rechts})$$

(De richting van rechts naar links wordt gedefinieerd als positief, omdat de golven in de proeven van rechts naar links liepen).

In enkele gevallen komt het voor dat de faseverschillen tussen de rechter en de linker meetraai  $\Delta t = 0$  s bedraagt. De snelheid is dan dus oneindig groot. Er is gekozen om dan de snelheid op 200 m/s te zetten.

In Figuur 2.1 is voor Proef T13 een voorbeeld gegeven van hoe de correlatie tussen 2 signalen bepaald is. In het bovenste figuur staat één golf weergegeven die als invoer wordt gebruikt. Het blauwe signaal representeert de middenraai en het groene signaal de rechter raai. In de figuur is te onderscheiden dat het signaal kunstmatig verlengd is door het signaal er zowel voor als achter te plakken. Het middelste figuur geeft de berekende correlatie-

coëfficiënt als functie van de faseverschuiving  $\tau$ . In het onderste figuur staan beide signalen weergegeven, waarbij is gecorrigeerd met de bepaalde faseverschuiving. De faseverschuiving is bepaald door het maximum te nemen van de berekende kruiscorrelatie in het interval  $-T_p/2 < 0 < T_p/2$ .



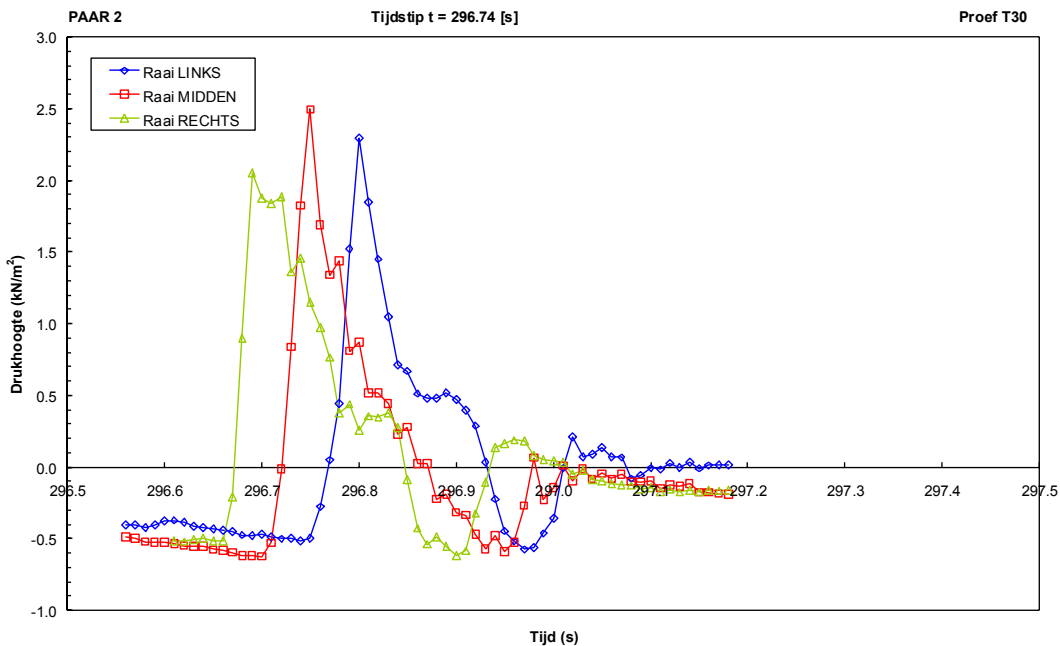
Figuur 2-1 Grafische weergave van de correlatie van een interessante golf voor ProefT13

### 2.3 Fase 2; controleren toegepaste methode

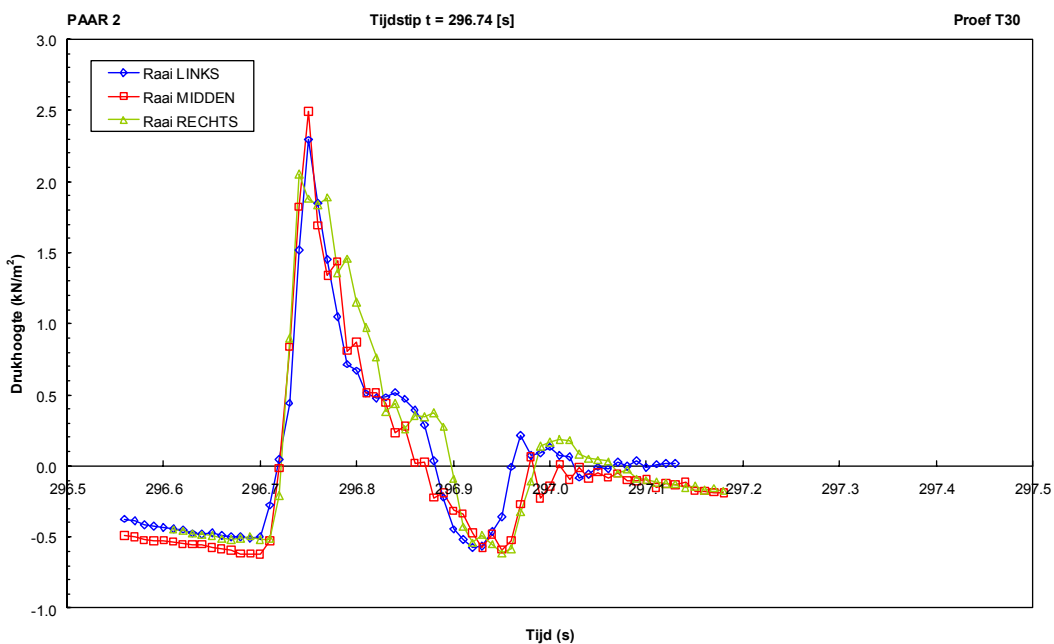
Alvorens de boven beschreven methode toe te passen voor alle proeven is deze gecontroleerd voor enkele interessante golven uit de 6 geselecteerde proeven die zijn weergegeven in Tabel 2. De selectie van interessante golven is gebeurd op 2 manieren:

1. De gemeten drukken voor de middenraai zijn omgezet naar GEF-formaat. Hiervoor is niet het oorspronkelijke 2000 Hz signaal gebruikt maar het 50 Hz gefilterde signaal (numeriek lage orde filter) uitgedund naar een 100 Hz bestand. Hiermee zijn ZSTEEN berekeningen gemaakt voor een Basalton bekleding, zodat de blokbeweging circa 10% van de zuilhoogte bedroeg. Vervolgens zijn 3 tijdstippen geselecteerd die grote blokbeweging gaven.
2. Op basis van de methode voor het identificeren van golfklappen (Coeveld, 2003) zijn per golf de stijghoogte en de steilheid van het stijghoogtefront bepaald. Vervolgens zijn de golven aflopend gesorteerd, eerst op stijghoogte en vervolgens op steilheid van het

stijghoogtefront. Daarna zijn 3 golven geselecteerd waarbij een grote stijghoogte optrad in combinatie met een steil stijghoogtefront.



Figuur 2-2 Oorspronkelijke meetsignaal voor Drukopnemerpaar 2 van Proef T30



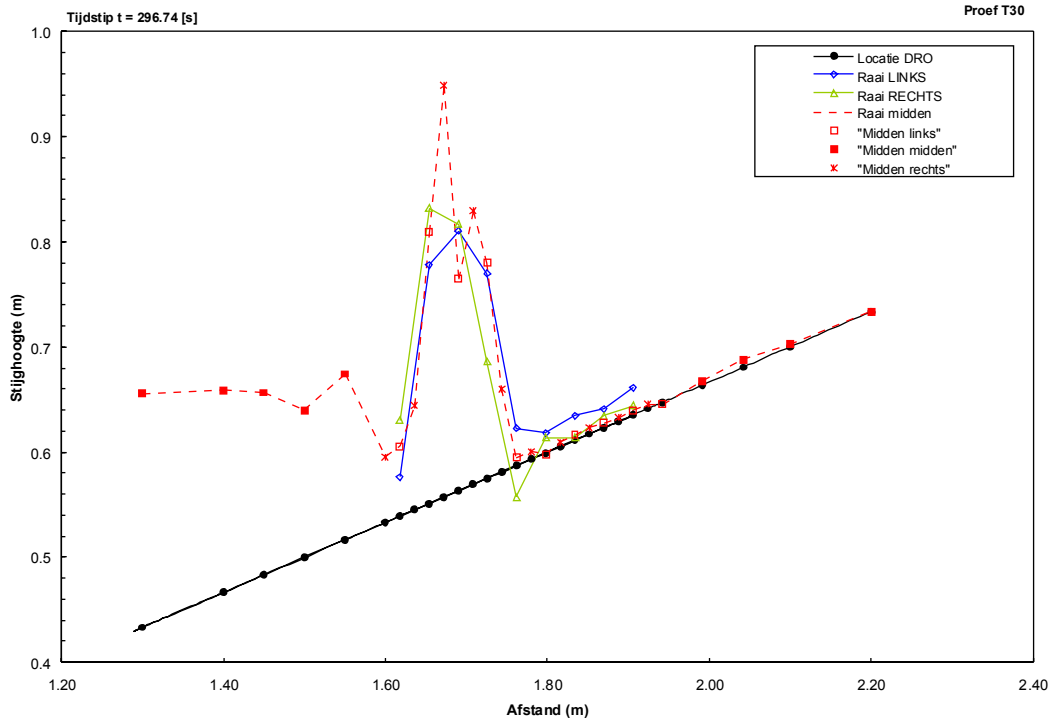
Figuur 2-3 Faseverschuiving toegepast op het meetsignaal van Drukopnemerpaar 2 van Proef T30

Voor elke proef zijn deze 6 geselecteerde golven voor de drie meetraaien getekend in de tijd in EXCEL. De linker en de rechter raai zijn vervolgens handmatig verschoven zodat deze zo goed mogelijk op de middenraai lag. Op deze manier is visueel voor elk drukopnemerpaar het faseverschil bepaald. In Figuur 2.2 en Figuur 2.3 is een voorbeeld gegeven hoe deze



verschuiving is toegepast. Figuur 2.2 toont één geselecteerde golf uit het oorspronkelijke meetbestand voor Drukopnemerpaar 2. In Figuur 2.3 is de linker en de rechter raai verschoven zodat deze zo goed mogelijk samenvalt met de middenraai.

Zo is voor alle drukopnemerparen geprobeerd deze zo goed mogelijk over elkaar heen te leggen. In Figuur 2.4 zijn voor dit tijdstip de gemeten drukken als functie van de locatie getekend voor zowel de linker, de midden als de rechter raai na toepassing van de faseverschuiving.



Figuur 2-4 Gemeten stijghoogtes als functie van de locatie met toegepaste faseverschuiving voor Proef T30

Naast de faseverschuiving die bepaald is met de MATLAB-routine en de fase verschuiving die visueel bepaald is met EXCEL is een theoretische waarde voor de faseverschuiving ( $\Delta t$ ) bepaald:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c_B}$$

$$c_B = \frac{L}{T_p * \sin \beta}$$

waarin:

- $\Delta t$  : theoretische waarde voor de faseverschuiving (s)
- $\Delta x$  : afstand middenraai tot de zijraaien (m)  
0.101 m tot de linker of 0.119 m tot de rechter raai
- $c_B$  : snelheid van het golfvront langs de waterlijn (m/s)

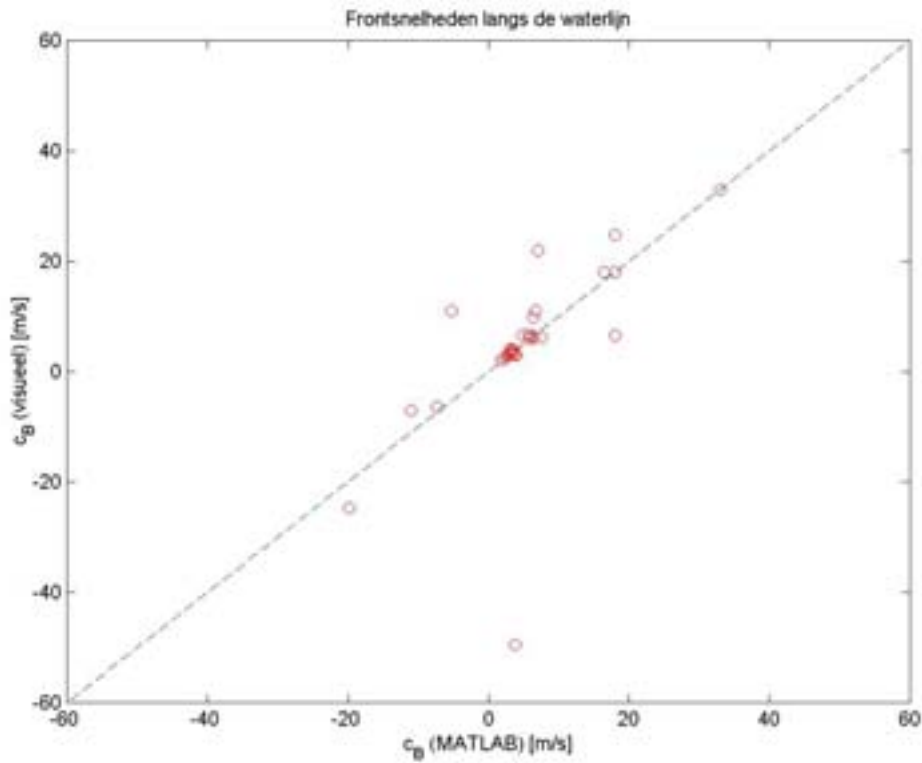
- $L$  : ondiep water golflengte (m)  
 $\beta$  : hoek van golfinval t.o.v. van de normaal van de constructie (°)

In onderstaande tabel zijn de gemiddelde faseverschillen over de 9 drukopnemerparen gegeven voor zowel de linker zijde ( $\Delta t$  Gem\_links) als de rechter zijde ( $\Delta t$  Gem\_rechts). In de eerste kolom staan de 6 geselecteerde golven per proef. De eerste 3 golven zijn geselecteerd op basis van berekende blokbeweging. De golven 4 tot en met 6 zijn geselecteerd op basis van een golfklap met een steil stijghoogtefront.

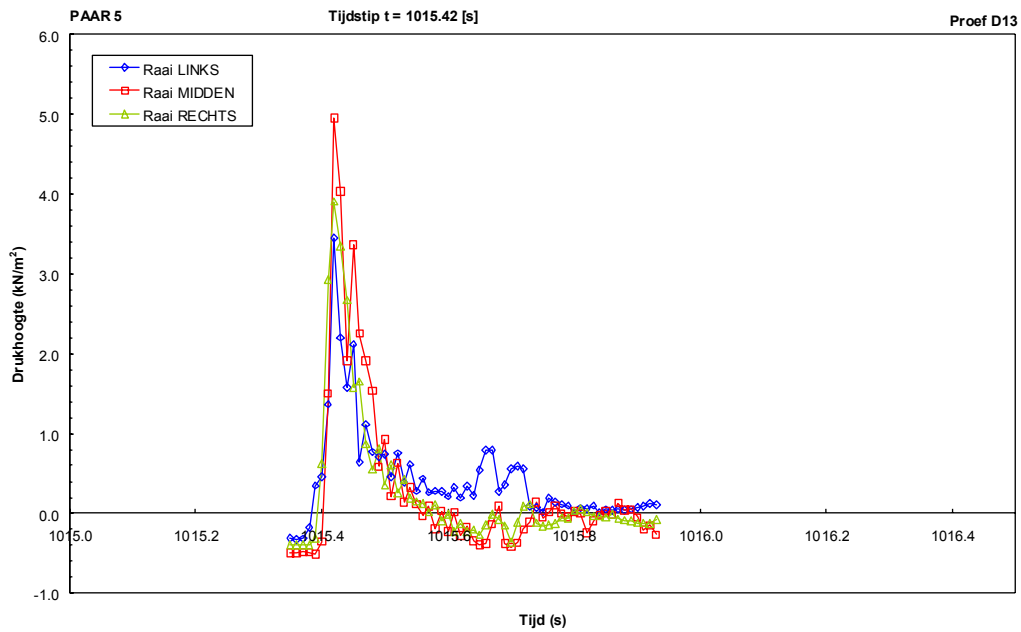
	$\Delta t$ Gem_links [s]	$\Delta t$ Gem_rechts [s]	$c_B$ [m/s]	$\Delta t$ Gem_links [s]	$\Delta t$ Gem_rechts [s]	$c_B$ [m/s]
T05-01	0.000	0.003	66.00	0.001	0.008	24.8
T05-02	0.001	-0.012	-19.8	0.001	-0.010	-24.8
T05-03	0.002	0.003	39.6	-0.002	0.002	200.0
T05-04	0.008	-0.001	33.0	0.008	-0.001	33.0
T05-05	-0.006	0.004	-198.0	-0.006	0.004	-198.0
T05-06	-0.006	0.001	-49.5	0.004	-0.002	99.0
T06-01	-0.024	-0.006	-7.3	-0.013	-0.021	-6.4
T06-02	-0.002	0.016	16.5	-0.001	0.013	18.0
T06-03	0.014	0.017	7.1	0.006	0.004	22.0
T06-04	0.033	0.006	5.7	0.021	0.011	6.8
T06-05	-0.022	0.002	-11.0	-0.014	-0.017	-7.1
T06-06	-0.003	0.003	200.0	-0.003	0.003	200.0
T13-01	0.033	0.031	3.4	0.036	0.033	3.2
T13-02	0.042	0.014	3.9	0.052	0.023	2.9
T13-03	0.019	0.016	6.4	0.019	0.016	6.4
T13-04	0.019	0.016	6.4	0.020	0.017	6.0
T13-05	0.053	0.004	3.8	0.003	-0.008	-49.5
T13-06	0.023	0.006	7.6	0.019	0.017	6.2
T14-01	-0.030	-0.012	-5.2	0.016	0.004	11.0
T14-02	0.009	-0.011	-99.0	0.004	0.009	16.5
T14-03	0.039	0.038	2.9	0.038	0.036	3.0
T14-04	0.016	0.019	6.4	0.016	0.007	9.9
T14-05	0.006	0.007	18.0	0.004	0.004	24.8
T14-06	0.003	0.009	18.0	0.019	0.014	6.6
T29-01	0.027	0.031	3.8	0.037	0.034	3.1
T29-02	0.050	0.051	2.2	0.050	0.040	2.4
T29-03	0.036	0.031	3.3	0.030	0.027	3.9
T29-04	0.034	0.039	3.0	0.023	0.030	4.1
T29-05	0.022	0.023	4.8	0.013	0.020	6.6
T29-06	0.061	0.053	1.9	0.062	0.043	2.1
T30-01	0.007	0.027	6.6	-0.007	0.027	11.0
T30-02	0.038	0.041	2.8	0.037	0.041	2.8
T30-03	0.020	0.019	5.7	0.018	0.019	6.0
T30-04	0.036	0.032	3.2	0.036	0.027	3.5
T30-05	0.040	0.020	3.7	0.028	0.027	4.0
T30-06	-0.008	0.020	18.0	-0.007	0.019	18.0

Tabel 3 Vergelijking van de berekende faseverschillen met de beschreven methodes

De faseverschillen zijn positief als de golf van rechts naar links loopt. In de kolom  $c_B$  is de gemiddelde frontsnelheid langs de waterlijn weergegeven, gebaseerd op de berekende faseverschillen links en rechts. In Figuur 2.5 zijn deze berekende gemiddelde frontsnelheden bepaald met de MATLAB-routine en de visueel bepaalde frontsnelheid tegen elkaar uitgezet.



Figuur 2-5 Berekende gemiddelde frontsnelheden langs de waterlijn berekend met MATLAB en visueel

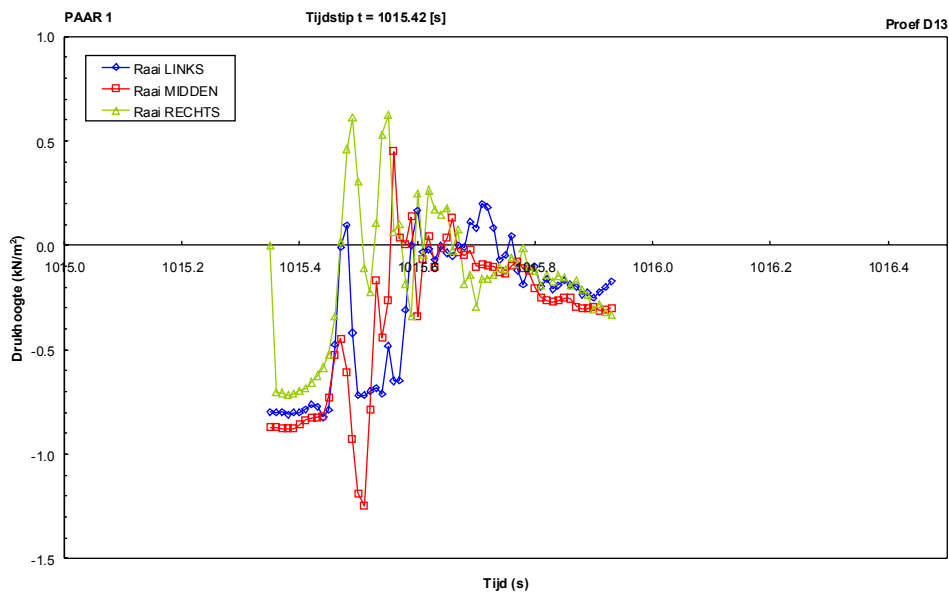


Figuur 2-6a Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 5

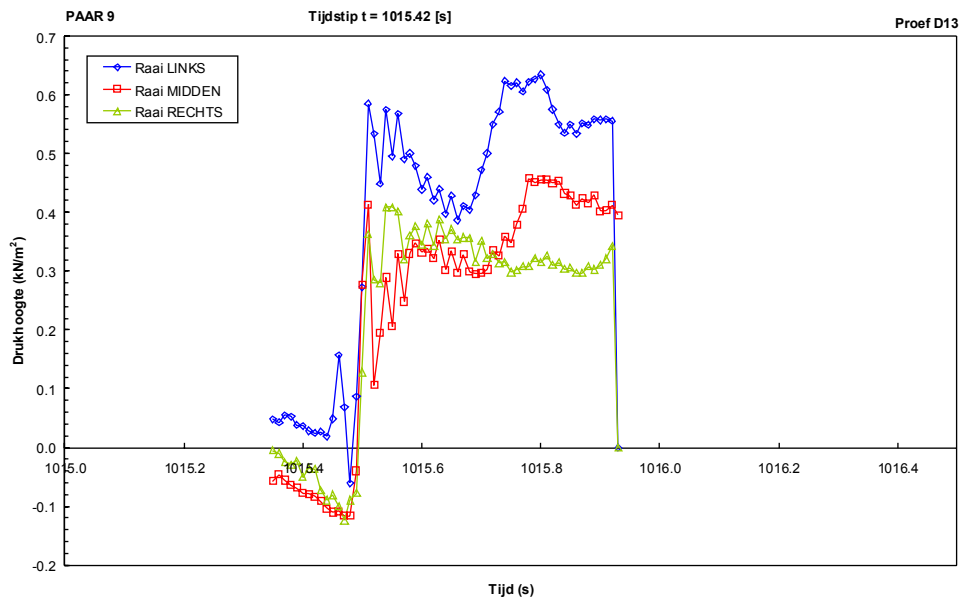
Voor Proef T05 en T06 blijkt dat de kolom  $u_{gem}$  voor enkele tijdstippen een negatief getal laat zien. Voor deze proeven was de golfrichting ongeveer loodrecht. Echter, een kleine variatie in de richting kan al de oorzaak zijn dat de gemiddelde frontsnelheid toch negatief kan zijn. Voor de proeven met scheve golfaanval blijkt dit alleen nog op te treden voor

Proef T14. Dit was een proef met kortkammige golven. Hierdoor kan het komen dat enkele golven in tegengestelde richting langs het talud lopen.

Verder blijkt dat voor de meeste golven de MATLAB-routine de faseverschuiving goed bepaald. De grootste afwijkingen worden gevonden voor de drukopnemerparen waar geen duidelijke golfklap waar te nemen valt (bovenste of onderste drukopnemerparen). In onderstaande figuren wordt dit geïllustreerd. Het is hier soms moeilijk vast te stellen hoeveel de signalen moeten worden verschoven.



Figuur 2-6b Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 1



Figuur 2-6c Stijghoogteverloop Proef T13 voor Paar 9

Gebaseerd op bovenstaande analyse is besloten de faseverschuiving te bepalen op basis van de 6 drukopnemerparen met de hoogste correlatiecoëfficiënt en dus niet over alle 9 drukopnemerparen.

## 2.4 Fase 3; faseverschuiving middenraai

Omdat er veel drukopnemers aanwezig waren in het gebied waar de golfklappen optreden konden niet alle 29 drukopnemers in de middenraai op één lijn geplaatst worden. Enkele drukopnemers waren 9 mm links of rechts van de hartlijn geplaatst. De drukopnemers die gebruikt zijn voor de analyse zoals beschreven in Paragraaf 1.2 lagen allemaal op één lijn, 9 mm verschoven links van de middenlijn. Om te controleren of een correctie moet worden toegepast op de middenraai is voor de 6 geselecteerde proeven voor de 6 tijdstippen de gemeten drukken als functie van de plaats getekend. Op deze wijze kan gecontroleerd worden of er sprongen in het signaal voorkomen en een faseverschuiving moet worden toegepast. Omdat de afstand en dus de eventueel toe te passen faseverschuivingen maar klein zijn is gebruik gemaakt van het originele 2000 Hz meetsignaal.

	$c_B$		$\Delta t$ (s)	
			Links	rechts
T05-01	66.0		0.0001	0.0001
T05-02	-19.8		-0.0005	-0.0005
T05-03	39.6		0.0002	0.0002
T05-04	33.0		0.0003	0.0003
T05-05	-198.0		0.0000	0.0000
T05-06	-49.5		-0.0002	-0.0002
T06-01	-7.3		-0.0012	-0.0012
T06-02	16.5		0.0005	0.0005
T06-03	7.1		0.0013	0.0013
T06-04	5.7		0.0016	0.0016
T06-05	-11.0		-0.0008	-0.0008
T06-06	200.0		0.0000	0.0000
T13-01	3.4		0.0026	0.0026
T13-02	3.9		0.0023	0.0023
T13-03	6.4		0.0014	0.0014
T13-04	6.4		0.0014	0.0014
T13-05	3.8		0.0024	0.0024
T13-06	7.6		0.0012	0.0012
T14-01	-5.2		-0.0017	-0.0017
T14-02	-99.0		-0.0001	-0.0001
T14-03	2.9		0.0031	0.0031
T14-04	6.4		0.0014	0.0014
T14-05	18.0		0.0005	0.0005
T14-06	18.0		0.0005	0.0005
T29-01	3.8		0.0024	0.0024
T29-02	2.2		0.0041	0.0041
T29-03	3.3		0.0027	0.0027
T29-04	3.0		0.0030	0.0030
T29-05	4.8		0.0019	0.0019
T29-06	1.9		0.0047	0.0047
T30-01	6.6		0.0014	0.0014
T30-02	2.8		0.0032	0.0032
T30-03	5.7		0.0016	0.0016
T30-04	3.2		0.0028	0.0028
T30-05	3.7		0.0025	0.0025
T30-06	18.0		0.0005	0.0005

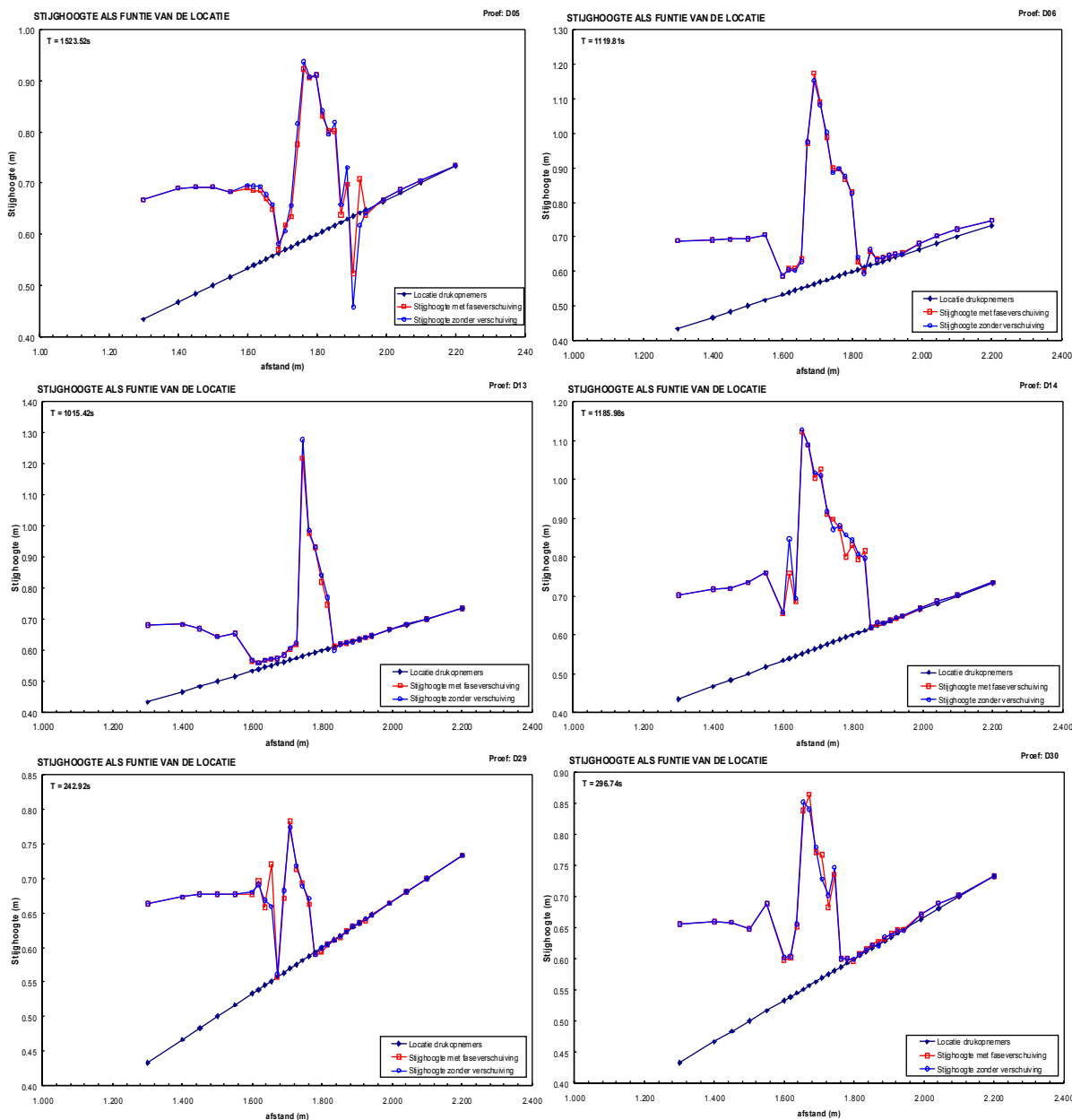
\*  $u > 0$  als golf van rechts naar links loopt

Tabel 4 Berekende gemiddelde snelheden langs de waterlijn en toe te passen faseverschuivingen voor de drukopnemers die 9 mm. verschoven zijn in de middenraai

Op basis van de berekende faseverschillen met de MATLAB-routine is de gemiddelde snelheid langs de waterlijn aan de linker en rechter zijde bepaald voor iedere golf.

Vervolgens is de theoretische faseverschuiving bepaald op basis van de ligging van de drukopnemer. In Tabel 4 zijn de berekende frontsnelheden voor de linker en de rechter zijde weergegeven. Aangezien voor Proef T05 en T06 de golfrichting bijna loodrecht was treden zeer hoge snelheden op omdat de faseverschillen klein zijn.

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de faseverschillen klein zijn. In Figuur 2.7 zijn de gemeten stijghoogten voor de centrale drukopnemerraai als functie van de locatie uitgezet (2000 Hz signaal) voor één tijdstip voor elke geselecteerde proef. In de figuren is in blauw het originele signaal zonder faseverschuiving weergegeven voor de 29 drukopnemers van de centrale middenraai. In rood is de gemeten stijghoogte aangegeven met de berekende faseverschillen uit Tabel 4. De figuren laten zien dat voor alle tijdstippen van de geselecteerde proeven het toepassen van een faseverschil weinig invloed heeft op het stijghoogteverloop.



Figuur 2-7 Gemeten stijghoogte (2000 Hz signaal) voor de centrale drukopnemerraai als functie van de locatie voor de 6 geselecteerde proeven, zowel met als zonder faseverschuiving

Gezien verwacht mag worden dat voor zeer scheefvallende golven en strijkgolven verwacht kan worden dat dit toch invloed heeft op het drukverloop. Derhalve is gekozen om voor alle proeven een correctie toe te passen voor de drukopnemers in de middenraai. Het bleek niet werkbaar te zijn om de verschuiving toe te passen door het volledige meetbestand met bemonsteringsfrequentie van 2000 Hz te gebruiken (erg lange rekentijden). Gekozen is om het oorspronkelijke signaal te in de tijd te filteren (voortschrijdend gemiddelde) op 250 Hz en vervolgens te resampelen op 500 Hz. Daarna zijn per golf op basis van de bepaalde  $c_B$  de signalen van de drukopnemers verschoven. Dit is gedaan op de volgende manier:

Als  $\Delta t < 4/2000$  s : geen verschuiving toegepast  
 Als  $4/2000 \leq \Delta t < 8/2000$  s : verschuiving toegepast van  $4/2000$  s  
 Als  $8/2000 \leq \Delta t < 12/2000$  s : verschuiving toegepast van  $8/2000$  s  
 .... enzovoort

Deze methode is toegepast voor alle drukopnemers die niet in het midden lagen (20 stuks), maar 9 mm naar rechts of links versprongen waren. De signalen van drukopnemers DRO01 tot en met DRO05 en DRO26 tot en met DRO29 zijn niet aangepast.

### 2.4.1 Keuze frequenties

Het vaststellen van de frequentie is zo gedaan dat:

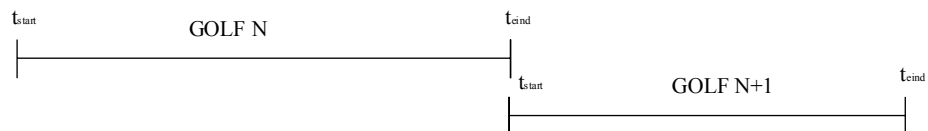
1. voldoende detail in de drukregistraties aanwezig blijft, zodat niet teveel belangrijke drukfluctuaties verloren gaan. Uitgegaan is dat drukfluctuaties op een Deltagooschaal van 10 tot 20 Hz nog zichtbaar moeten zijn. Vertaald naar een kleinschalig model betekend dit een minimum van 25 tot 50 Hz.
2. voldoende oplossend vermogen is om het faseverschil goed te bepalen. Het faseverschil wordt bepaald over het gemiddelde van de 6 drukopnemerparen met de hoogste correlatiefactor. Wanneer de faseverschillen bepaald zijn met een 100 Hz bestand kunnen faseverschillen tot  $\Delta t = 0.01$  s bepaald worden. Dit wordt voldoende geacht voor dit onderzoek.
3. de files niet te groot worden. Wanneer gerekend wordt met de volledige meetbestanden van 2000 zou dit ongewenst lange rekentijden tot gevolg hebben.

## 2.5 Fase 4; aanmaken drukbestanden

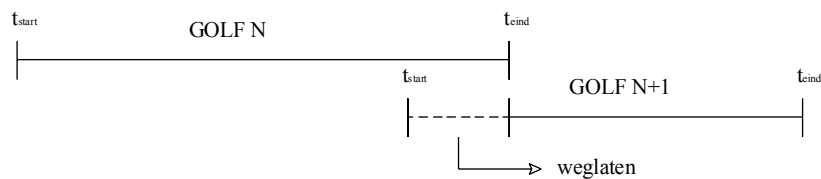
Aangezien de 500 Hz bestanden met drukken in de middenraai nog steeds erg grote files en dus lange rekentijden op zouden leveren met ZSTEEN 3D is gekozen om na uitvoering van bovenstaande bewerking het 500 Hz bestand nogmaals te filteren in de tijd op 50 Hz en te resampelen op 100 Hz. Er is nu een 100 Hz drukbestand gecreëerd met gemeten drukken (in  $\text{kN/m}^2$ ) ten opzichte van SWL voor 29 drukopnemers met in de eerste kolom de tijd, waarbij gecorrigeerd is voor de drukopnemers die verschoven lagen ten op zichte van de middenraai. In kolom 31 is vervolgens per golf de gemiddelde frontsnelheid  $c_B$  (in m/s) langs de waterlijn toegevoegd. Deze snelheid wordt gegeven per golf en is een constante gedurende deze golf. De selectie van begin en eindpunt van een golf is beschreven in Paragraaf 1.1 van deze notitie. Deze bestanden zijn gebruikt voor de ZSTEEN berekeningen.

Voor de signalen van de drukopnemers waarbij een tijdsverschuiving is toegepast is de volgende methode toegepast voor het aan elkaar knopen van de individuele golven:

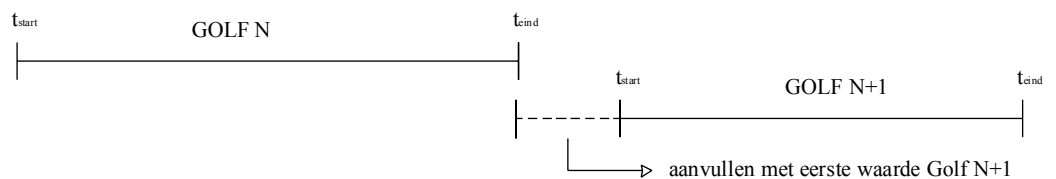
1. Voor het begin van de eerste golf is geen snelheid bepaald. Alle tijdstippen voor de eerste golf krijgen een snelheid met een dummy waarde van  $c_B = -99999.00$  m/s.
2. Alle tijdstippen na de laatste golf tot het einde van de file krijgen een snelheid met dummy waarde  $c_B = -99999.00$  m/s.
3. Wanneer geen faseverschuiving ( $\Delta t = 0$ ) wordt toegepast wordt golf N+1 achter golf N geplakt.



4. Wanneer golf N+1 in tijd teruggeschoven wordt vindt een overlap plaats van de signalen van Golf N en Golf N+1. In dat geval worden de signalen vanaf het beginpunt van Golf N+1 tot en met het eindpunt van Golf N genegeerd.



5. Wanneer golf N+1 in tijd vooruit geschoven wordt is er een gat tussen het eind van de signalen van Golf N en het begin van Golf N+1. In dat geval wordt dit gat gevuld met de beginwaarde van Golf N+1.







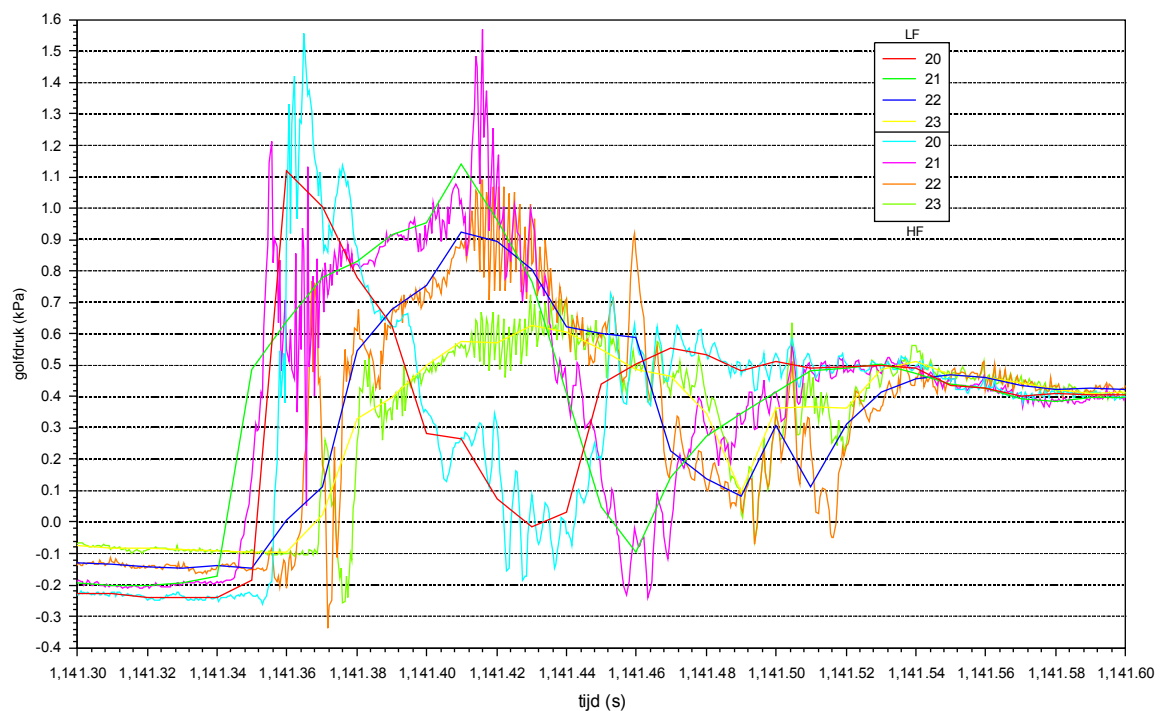
## 3 Golfdrukregistratie

### 3.1 Bemonsteringsfrequentie

Het vorige modelonderzoek naar de belasting die wordt uitgeoefend door scheef invallende golven uit 1990 is bemeten met een bemonsteringsfrequentie van 25 Hz (Klein Breteler, 1990). Nu is een bemonsteringsfrequentie van 2000 Hz gebruikt, maar om de filegrootte en de rekestijd te verminderen is een datareductie toegepast en zijn bestanden gemaakt met een bemonsteringsfrequentie van 100Hz (zie hoofdstuk 2).

De invloed van de bemonsteringsfrequentie op de drukregistratie is onderzocht door gedurende één golfklap tijdens proef D13 (hoek van inval van 22°) de registraties voor beide frequenties te vergelijken. Doorvoor is een drukregistratie met een bemonsteringsfrequentie van 2000 Hz gebruikt, naast de gebruikelijke registratie van 100 Hz.

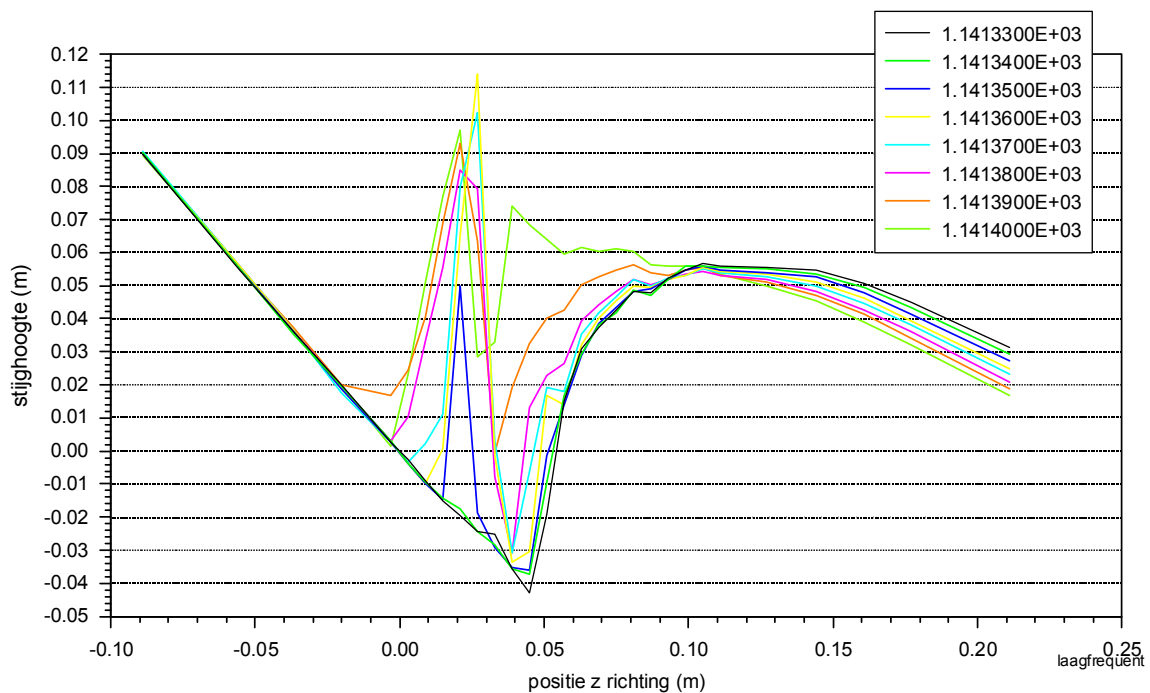
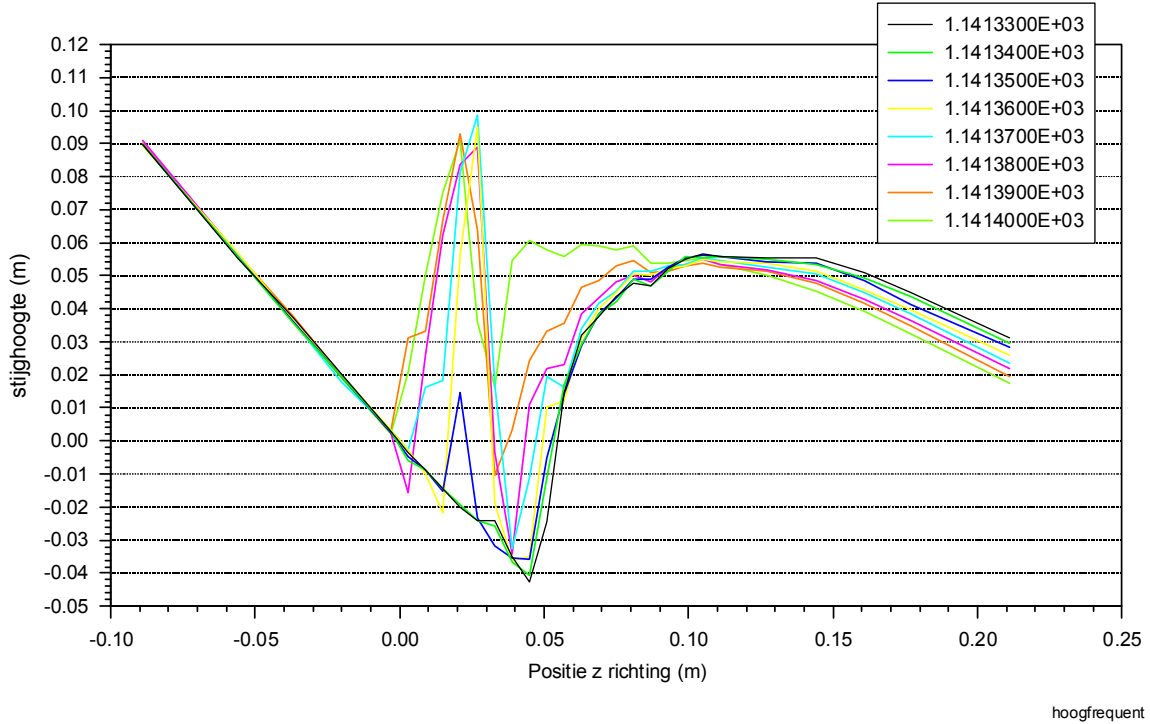
In Figuur 3-1 zijn deze registraties beide geplot voor de drukopnemers DRO20 tot en met 23. Dit zijn de drukopnemers die de golfklap registreren. Uit de figuur blijkt duidelijk het verschil tussen het hoogfrequente en laagfrequente signaal. De vorm van de signalen is in grote lijnen hetzelfde, maar het hoogfrequente signaal bevat allerlei extra fluctuaties. De frequentie van die fluctuaties lijkt overigens te verschillen voor de verschillende drukopnemers. Het is daarom mogelijk dat deze ook veroorzaakt worden door eigen-frequenties in de drukopnemers.



Figuur 3-1 Verloop golfdruk in de tijd. Oorspronkelijk 2000 Hz signaal (HF) en gefilterd op 100 Hz (LF)

Het verloop van het golffront is van belang om in te schatten in hoeverre de verschillen in de drukregistraties van invloed kunnen zijn op de berekende maximale drukken. Daarom is de drukverdeling op het talud geplot tussen de tijdstippen 1141.33 en 1141.40 (het begin van de golfklap op het talud). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3-2. Ook hier geldt dat er verschillen zichtbaar zijn, maar dat deze niet heel erg groot zijn.

Geconcludeerd wordt dat een 100 Hz signaal een voldoende nauwkeurige beschrijving geeft van de drukken en dat een hogere bemonsteringsfrequentie niet nodig lijkt.



Figuur 3-2 Gemeten golfdrukken op verschillende tijdstippen, gegeven in de legenda in seconden. Boven bepaald uit het oorspronkelijke 2000 Hz signaal. Onder na filtering op 100 Hz.

### 3.2 Drukverdeling over het talud

De drukverdeling over een veld van blokken is alleen te berekenen wanneer ook de golfdrukken op het talud over dat hele veld bekend zijn. Nu is er in het kleinschalig onderzoek maar op een beperkt aantal locaties gemeten. Zoals beschreven is in hoofdstuk 2 is met behulp van de drukregistraties de drukverdeling berekend in één raai en is de voortplantingssnelheid van de golf langs het talud bepaald op de verschillende tijdstippen. Deze voortplantingssnelheid is constant bij regelmatige golven maar niet bij onregelmatige golven. In de berekeningen is aangenomen dat de voortplantingssnelheid van de golven wel min of meer constant blijft over dat gedeelte van de steenzetting waarvoor de drukverdeling wordt uitgerekend. Met die aannames kan de drukverdeling over het gehele talud dat wordt beschouwd worden teruggerekend. Er geldt:

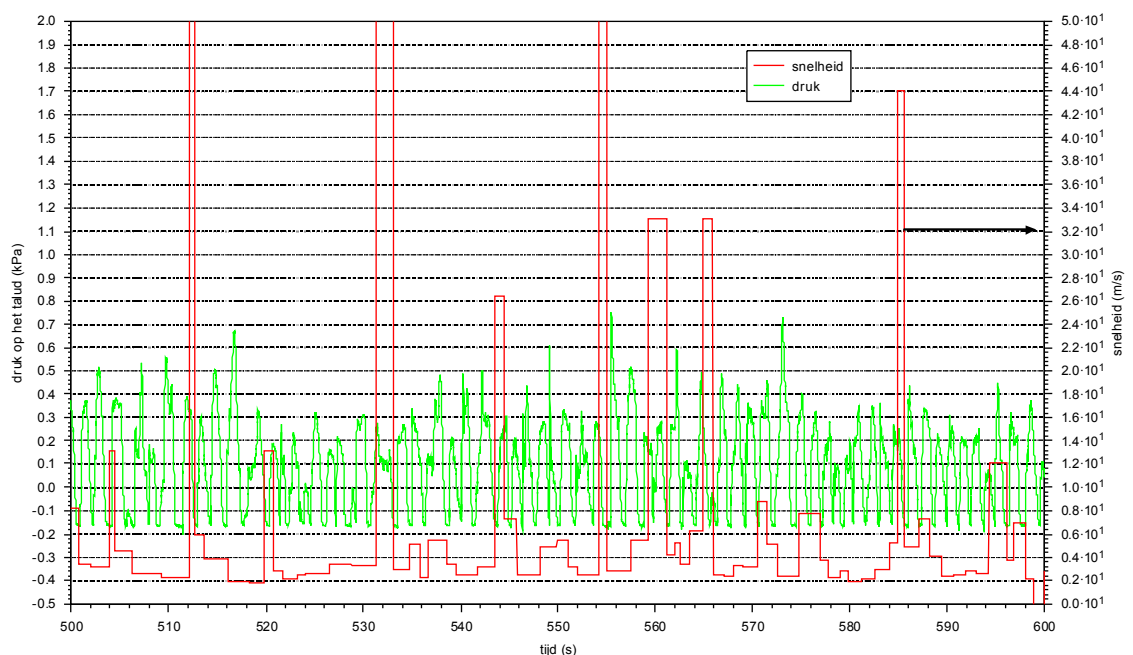
$$P(x, y, t) = P(0, y, t + x/c) \quad (3.1)$$

met:

x, y	: afmetingen langs het talud	(m)
t	: de tijd	(s)
P	: de druk	(kPa)
c	: de voortplantingssnelheid	(m/s)

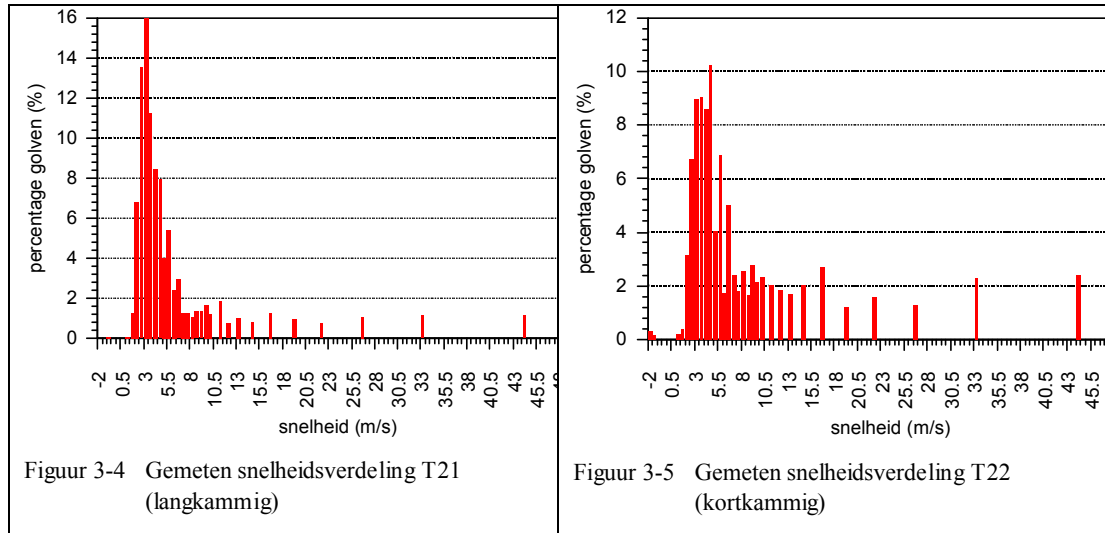
Deze methode levert betrouwbare resultaten tenzij de voortplantingssnelheid in het beschouwde interval sterk varieert.

Op basis van de meetgegevens is de voortplantingssnelheid berekend, zie hoofdstuk 2. In Figuur 3-3 is de berekende snelheid uitgezet met het resultaat van één van de drukopnemers. Het blijkt dat de voortplantingssnelheid bij elke golf weer anders is.



Figuur 3-3 Gemeten golfdruk en snelheid langs het talud voor proef T21

Het blijkt daarbij niet veel verschil te maken of er sprake is van lang- of kortkammige golven. Figuur 3-4 en Figuur 3-5 tonen de histogrammen van de golven T21 en T22. Deze golven zijn identiek, behalve dat T21 langkammig is en T22 kortkammig. Beide golven vallen in onder 40 graden t.o.v. loodrechte inval. De snelheidsverdeling is iets breder bij de kortkammige T22, zoals verwacht, maar verder is er weinig verschil. Ook bij langkammige golven is er dus al een spreiding in de gemeten snelheden. Dit blijkt ook uit de statistische gegevens van de snelheden die zijn genoemd in Tabel 5.



Tabel 5 Statistische gegevens van T21 en T22

Parameter	Test T21	Test T22
Gemiddelde snelheid	13,5	21,1
Standaarddeviatie	38,8	50,5
Mediaan	3,9	5,3

Wanneer de snelheid langs het talud niet was gemeten, zou deze worden bepaald met de fomule:

$$c_B = \frac{L_0}{T_m \sin \beta} \tag{3.2}$$

Hierin is  $L_0$  de golflengte op diep water,  $T_m$  de gemiddelde periode en  $\beta$  de richting ten opzichte van de normaal. Dit komt voor deze golven uit op een gemiddelde voortplantings-snelheid van 2.9 m/s. De gemeten gemiddelden en de mediaan zitten dus hoger.

Uit de meetgegevens blijkt dat er zoveel spreiding is in de snelheid van de verschillende golven dat zowel langkammig als kortkammig met een snelheid per golf gerekend moet worden. De rekenresultaten zijn daarom het meest betrouwbaar voor die tijdstippen waarop het hele talud kan worden beschouwd met één voortplanings-snelheid. In een situatie waar golven elkaar inhalen, zal de betrouwbaarheid kleiner zijn.

### 3.3 Gebruikte golfdrukregistraties

Doel van deze studie is om te onderzoeken of de hoek van inval van belang is voor de optredende maximale verschildruk over een steenzetting. Om dit te onderzoeken zijn een aantal golven geselecteerd zoals weergegeven in Tabel 6. Deze golven zijn opgeschaald zodat deze alle overeenkomen met een prototypegolf met dezelfde hoogte. De schaal-factoren zijn eveneens weergegeven in Tabel 6.

Met een door WL | Delft Hydraulics ontwikkelde routine (Kuiper, 2000) zijn de interessante stukken geselecteerd (met hoge golven of steile golffronten) uit de gehele onregelmatige golfdrukregistratie van ongeveer 1000 golven. Het doorrekenen van de gehele registratie in een blokkenveld zou te veel rekentijd kosten.

Tabel 6 Geselecteerde golven voor berekeningen en schaalfactoren

Test	h (m)	richting t.o.v. de normaal (°)	Spreiding (°)	lang-/ kortkammig	$r$ (-)	$H_{m0i}$ (m)	$T_p$ (s)	$s_{op}$ (-)	$\xi_{op}$	Schaal (-)
T05	0.644	-9	5	lang	0.32	0.135	1.47	0.04	1.67	20
T06	0.644	0	18	kort	0.31	0.128	1.45	0.04	1.69	20
T13	0.644	18	5	lang	0.28	0.139	1.44	0.04	1.61	20
T14	0.644	14	19	kort	0.29	0.138	1.38	0.05	1.55	20
T21	0.644	41	11	lang	0.29	0.098	1.71	0.02	2.27	25
T22	0.644	36	24	kort	0.38	0.104	1.75	0.02	2.26	25
T31	0.644	72	10	lang	0.25	0.101	1.54	0.03	2.02	27.27
T32	0.644	72	29	kort	0.22	0.098	1.73	0.02	2.30	27.27

De proeven met hoek van inval van 80 en 90 graden zijn niet beschouwd, omdat die wel erg scheef invallen zijn en gezien de rekenduur er een selectie gemaakt moest worden. Daarbij is gestreefd naar een conservatief resultaat. In de modelproeven gaat het om een recht talud. Onder 90 graden invallende golven kunnen alleen met diffractie het talud bereiken. In werkelijkheid zullen golven alleen onder die hoek invallen als er een bocht in het talud zit. De golfaanval kan dan mogelijk groter zijn. Daarom is de hoek van inval van 70 graden als grootste invalshoek beschouwd (dan komen de golven nog naar het rechte talud zonder diffractie).



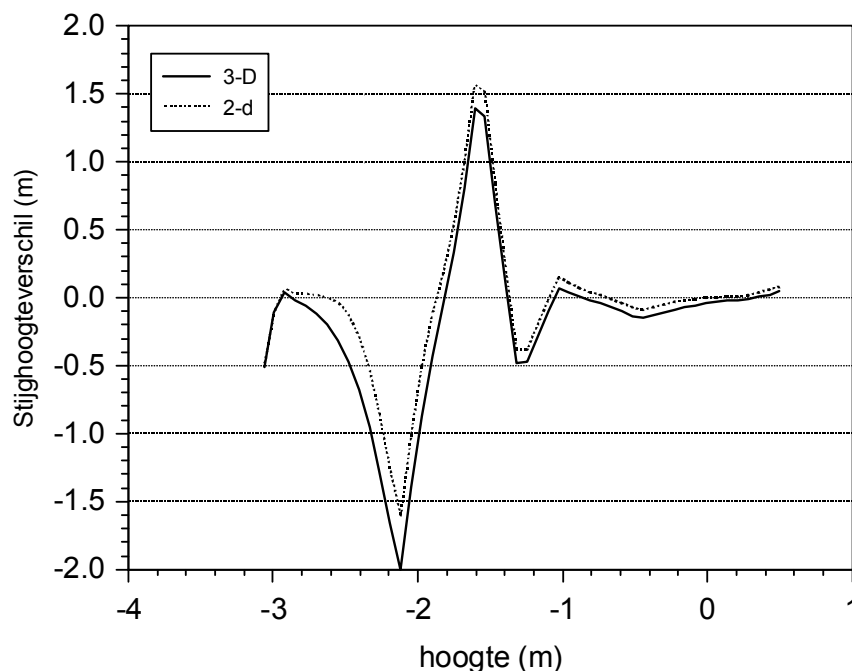
## 4 ZSTEEN-berekeningen in één raai

### 4.1 Beginveronderstelling

Door Bezuijen (2000) is beschreven dat, uitgaande van golfdrukken die zijn geregistreerd voor scheef invallende golven, de berekende verschildruk over de blokken groter is wanneer deze wordt berekend voor één raai in vergelijking met een berekening waarbij de drukverdeling over een heel blokkenveld wordt berekend.

In genoemd rapport wordt dit als volgt weergegeven:

Voor de gemeten golfrandvoorwaarde is een berekening uitgevoerd over een veld blokken en een berekening met slechts één kolom blokken, waarbij de golfrandvoorwaarde is gebruikt die stond op de kolom die in het veld blokken de hoogste verschildruk gaf. Het resultaat van de berekening is weergegeven in Figuur 4-1. Het blijkt dat de maximale verschildruk hoger is in de 2-D situatie (slechts één kolom) dan wanneer het gehele veld wordt doorgerekend. De hogere berekende verschildruk bij scheef invallende golven lijkt dus niet te komen doordat deze een ongunstige stroming in de filterlaag veroorzaken (dan zou de maximale verschildruk in de 2-D situatie lager moeten zijn). De conclusie lijkt daarom gerechtvaardigd dat de hogere verschildruk bij de berekeningen met gemeten golfrandvoorwaarden ontstaat doordat bij scheef invallende golven de golfrandvoorwaarde ongunstiger wordt.



Figuur 4-1 Berekende verschildrukken voor één kolom en een veld blokken. Zie ook tekst.

Nu is bovenstaand resultaat dat de verschillen veroorzaakt worden door de verschillen in golfrandvoorwaarde voldoende om als algemeen geldend bewijs te dienen. Het gaat hier slechts om één berekening en één golfrandvoorwaarde. In dit rapport wordt bovenstaande daarom gebruikt als eerste aanname en wordt dit nog niet als bewezen verondersteld.



## 4.2 Selectie momenten met grote belasting

Voor de onregelmatige golven die zijn gebruikt in het kleinschalig modelonderzoek is het lastig om het moment van grootste belasting te vinden. In ‘normale’ ZSTEEN berekeningen worden alle golven uit een registratie voor onregelmatige golven doorgerekend. Voor een heel blokkenveld leidt dit tot een zeer lange rekentijd. De berekeningen met ZSTEEN zijn daarom uitgevoerd op zogenaamde geselecteerde golven. Dit zijn golfdrukregistraties waarop volgens een door WL | Delft Hydraulics ontwikkelde routine (Kuiper, 2000) een selectie is toegepast, zodat de momenten met hoogste belasting worden geselecteerd.

Doordat de golfdruk over het talud ‘loopt’, is het niet zinvol om elk tijdstip de hoogste verschildruk over alle raaien te bepalen. De golfrandvoorwaarde die nu een groot stijghoogteverschil geeft op raai nummer  $i$ , zal even later een zelfde stijghoogteverschil geven op raai  $i+1$ . Daarbij zullen de begin- en eindraaien nog worden beïnvloed door randeffecten. In de berekening bevindt zich daar een overgangsconstructie. Om deze redenen is voor de ZSTEEN berekeningen de maximale druk voor de middelste raai gekozen. De meeste berekeningen zijn gemaakt met een breedte van het blokkenveld van 6 m. De middelste raai ligt dan bijna 3 meter van de randen. Aangezien de berekeningen zijn gemaakt voor leklengtes kleiner dan 1 m, liggen de randen altijd enkele leklengtes van de beschouwde raai vandaan. De invloed van de randen van het model op de resultaten zal daarom gering zijn.

Voor de STEEN3D berekeningen waarbij de drukverdeling onder de steenzetting en de daarbij behorende verschildrukken op één tijdstip wordt berekend zijn enkele golfdrukverdelingen gekozen. De STEEN3D berekeningen zijn echter alleen gebruikt om een overzicht van golfdrukken en stijghoogteverschillen op een talud te creëren en om de resultaten van ZSTEEN te controleren.

Nu is waarschijnlijk voor de stabiliteit van de steenzetting niet een kortdurend moment met een grote overdruk van belang, maar de combinatie van duur en grootte van een verschildruk groter dan het gewicht van de stenen. In een berekening over een heel blokkenveld op één tijdstip is de duur niet rechtstreeks te halen, maar, omdat uitgegaan wordt van een constante voortplantingssnelheid van de golven, is deze te bepalen uit het aantal blokken waarvoor een verschildruk groter dan het blokgewicht wordt berekend.

## 4.3 Uitgevoerde berekeningen

Voor de berekeningen is een aantal lang- en kortkammige golven geselecteerd, zie Tabel 1. Berekeningen zijn uitgevoerd voor een steenzetting met een leklengte van 1,0 en 0,3 m. Hierbij dient te worden opgemerkt dat een steenzetting met een leklengte van 0,3 m een zeer korte leklengte heeft in vergelijking met de afmetingen van de blokken. Het is de vraag of bij zulke korte leklengtes ook andere effecten de stabiliteit van de steenzetting beïnvloeden dan quasi-statische verschildrukken, zoals berekend met ZSTEEN en STEEN3D. Dit is hier verder niet onderzocht.

De stijghoogteverschillen die deze golven leveren is voor de 1-dimensionale situatie (dus voor één kolom blokken in één raai) doorgerekend voor de gehele golf. Uit de resultaten zijn maxima waarbij op één moment het stijghoogteverschil binnen en buiten groter is dan 0,4 m

geselecteerd. Als op één tijdstip het stijghoogteverschil voor meer dan één blok hoger zijn dan 0,4 m dan worden al die blokken waarvoor dit geldt geselecteerd. De gevonden realisaties van een stijghoogte op een tijdstip groter dan 0,4 m, zijn in een histogram uitgezet. Hierdoor is het mogelijk om in één oogopslag te zien welke stijghoogteverschillen zijn voorgekomen bij de verschillende golven. Een verzamelgrafiek voor alle golven is gegeven in Figuur 4-2 en Figuur 4-3.

Al in de vorige paragraaf is opgemerkt dat ook de duur van een hoge verschildruk van belang is. Daarom is uit de rekenresultaten ook de ‘impuls’ voor elk blok bepaald zo lang het stijghoogteverschil groter is dan 0,4 m. Het gaat hierbij niet om de echte impuls, maar om het stijghoogteverschil boven de 0,4 m maal de tijd. De dimensie van deze ‘impuls’ is dus [m.s] en niet [N.s] zoals bij een ‘echte’ impuls. De resultaten van deze berekeningen staan in Figuur 4-4 en Figuur 4-5.

De gedachte achter het uitwerken van deze parameter is als volgt:

Bij een stijghoogteverschil van 0,4 kan een blok potentieel instabiel worden (afhankelijk van de dikte van de steenzetting). De totale naar buiten gerichte impuls die een blok mee krijgt, is dan het stijghoogteverschil (boven de 0,4 m) maal de tijdstap. Deze berekening wordt voortgezet totdat het stijghoogteverschil onder de 0,4 m zakt. Het blok wordt dan geacht weer op zijn plaats te zijn teruggezakt. Het zou beter zijn om een berekening te maken met bewegende blokken, maar voor een berekening van de drukverdeling in een blokkenveld, zoals in de volgende hoofdstukken wordt besproken, is deze mogelijkheid nog niet geïmplementeerd. Daarbij moet worden opgemerkt dat nu de berekeningen al veel tijd in beslag nemen (uren), met blokbeweging zou de rekenduur alleen nog maar verder toenemen en zou het programma in feite onwerkbaar worden.

Om enig gevoel te krijgen voor de getalgrootte van de in de vorige alinea gedefinieerde ‘impuls’ kan het volgende rekenvoorbeeld worden gebruikt. Een ‘impuls’ van 0,1 m.s is om te rekenen in een impuls met de dimensie N.s bij een gegeven blok grootte. Stel de blok grootte is 0,3x0,3x0,4 m (lxbxh). Er geldt:

$$I = \rho g I' A \quad (4.1)$$

met:

- $I$  : de impuls in N.s.
- $I'$  : de ‘impuls’ in m.s
- $\rho$  : de volumieke massa van water
- $g$  : de versnelling van de zwaartekracht

Voor een ‘impuls’ van 0,1 m.s geldt dus dat deze bij de genoemde blok grootte gelijk is aan 88 N.s. Verder geldt:

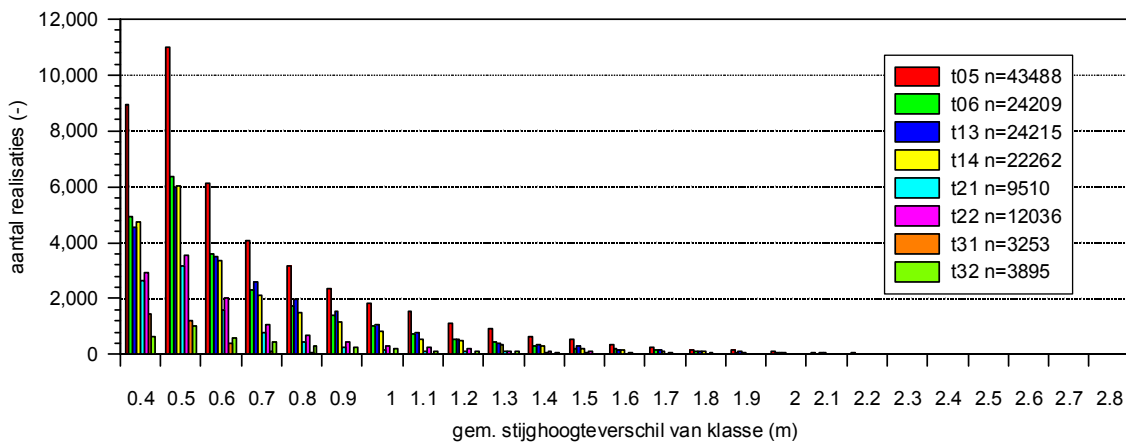
$$I = mv \quad (4.2)$$

met:

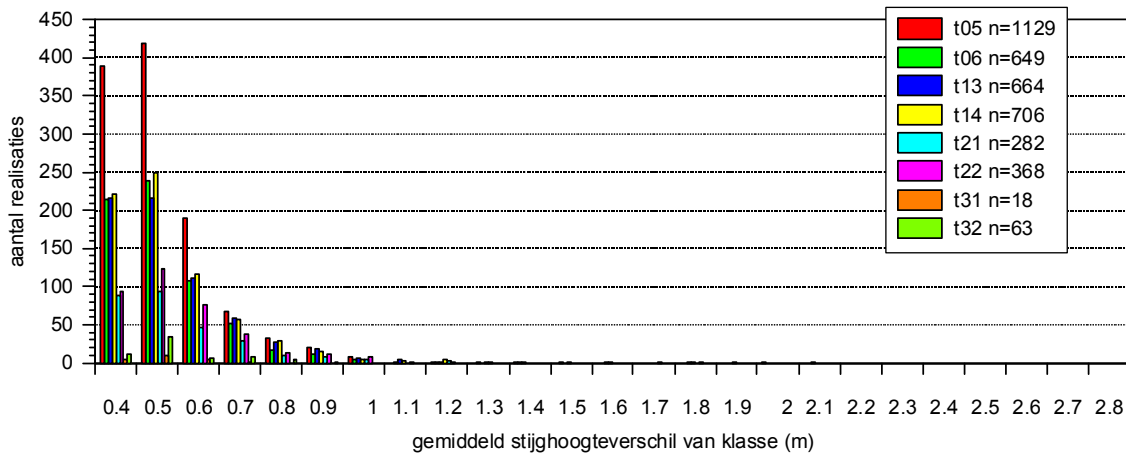
- $m$  : de massa van het blok (kg)
- $v$  : de snelheid van het blok (m/s)

Hieruit volgt dat bij een volumieke massa van het gebruikte beton van  $2350 \text{ kg/m}^3$  de snelheid van het blok bij een dergelijke impuls ongeveer  $1 \text{ m/s}$  is. Een dergelijke impuls is dus zeker instaat om een zetting te beschadigen. Nu zal door blokbeweging de impuls kleiner worden dan hier berekend (blokbeweging leidt tot een verkleining van het stijghoogteverschil door verhinderde toestroming).

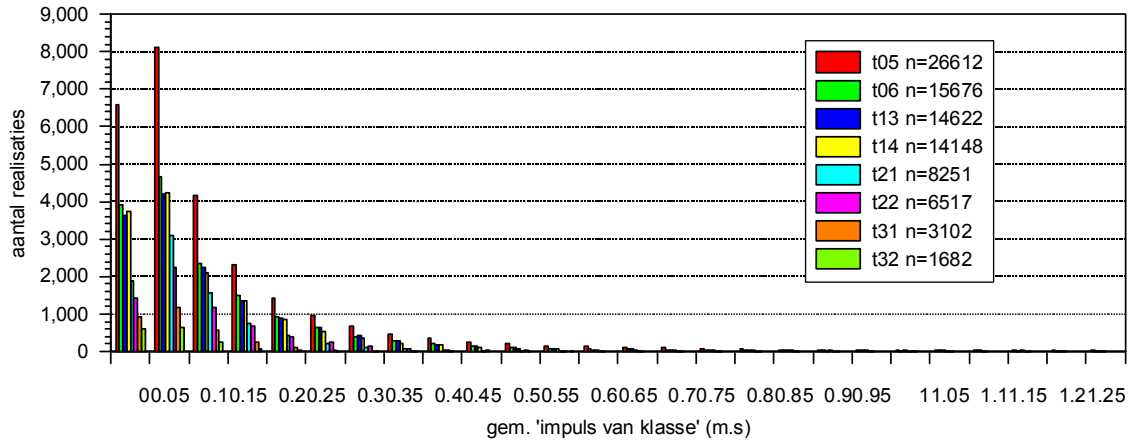
Behalve de berekeningen met alle golven van een proef zijn ook berekeningen uitgevoerd waarbij via de door WL | Delft Hydraulics ontwikkelde routine (Kuiper, 2000) eerst een voorselectie is gemaakt van alleen potentieel gevaarlijke golven (hoge golven of golven met een grote drukgradiënt). De resultaten van deze berekeningen zijn op dezelfde manier uitgezet als die van de eerste serie berekeningen en staan in de verzamelgrafieken Figuur 4-6 en Figuur 4-7.



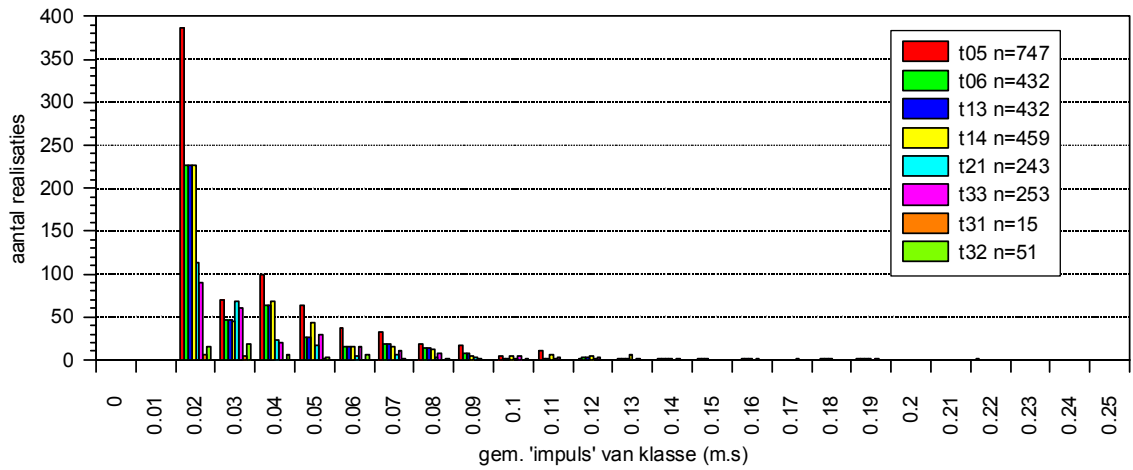
Figuur 4-2 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen, volledige golf met een lengte van 1m.



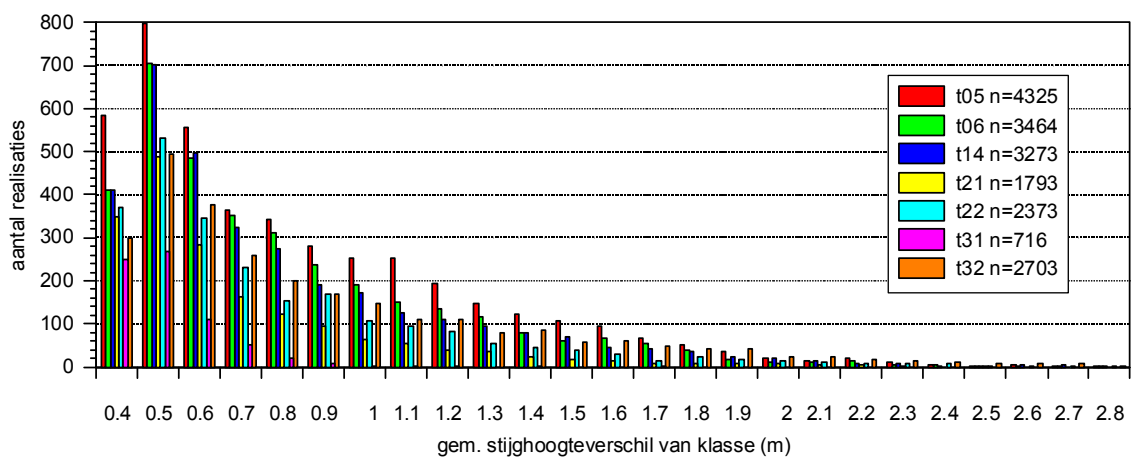
Figuur 4-3 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen, volledige golf met een lengte van 0.3m.



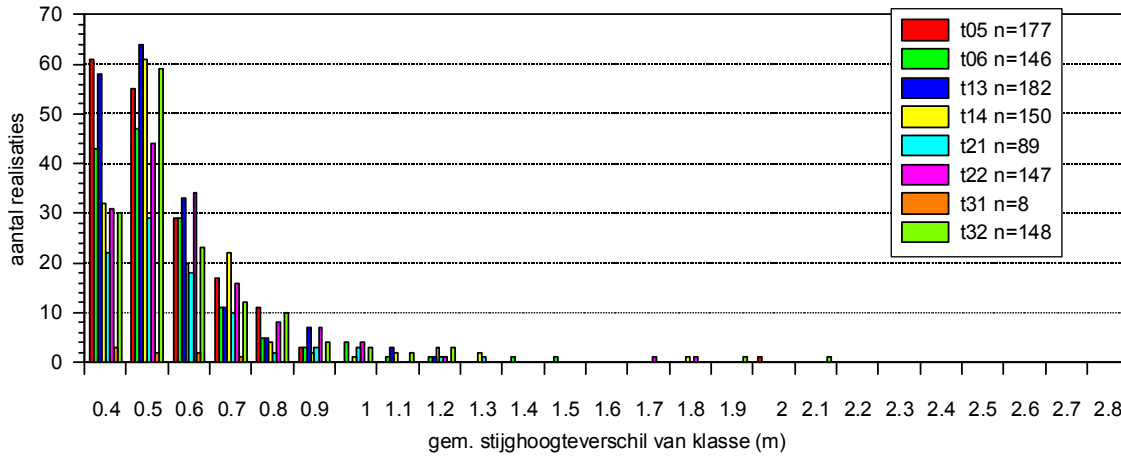
Figuur 4-4 Berekende 'impuls' voor 1-D berekening met een volledige golf en een leklengte van 0.3 m.



Figuur 4-5 Berekende 'impuls' voor 1-D berekening met een volledige golf en een leklengte van 0.3 m.



Figuur 4-6 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen ingekorte golf, leklengte 1m.

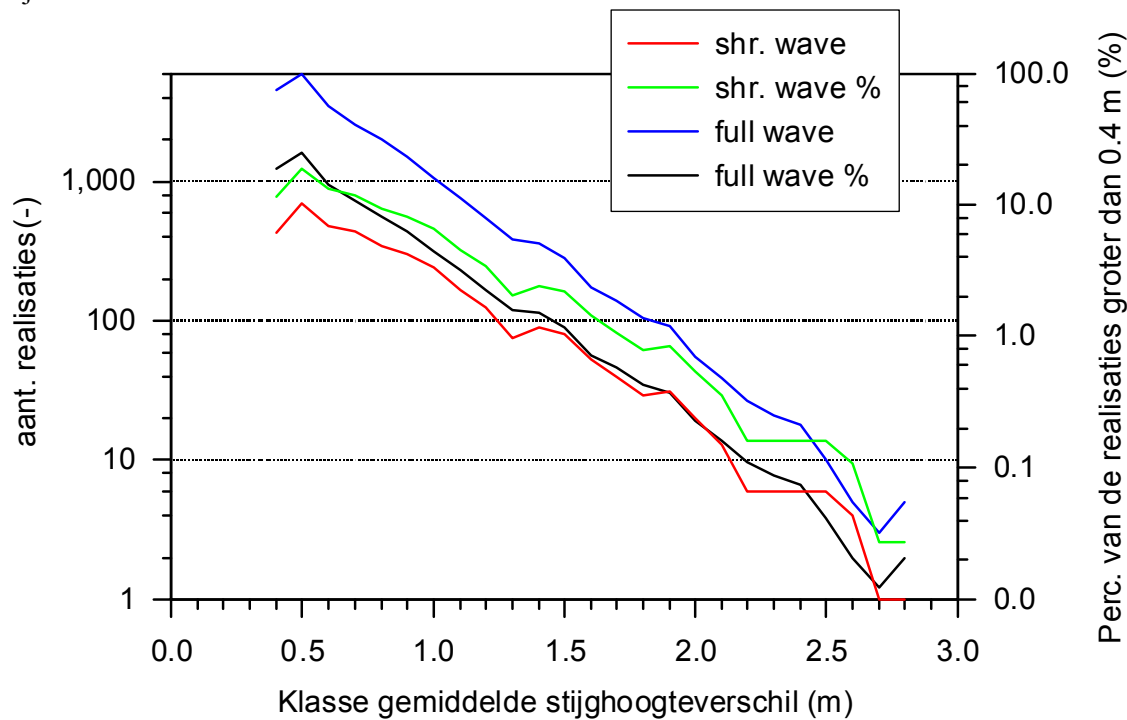


Figuur 4-7 Histogram berekende maximale stijghoogteverschillen voor de 1-D berekeningen met ingekorte golf, leklengte 0.3 m.

## 4.4 Interpretatie van de resultaten van de 1-dimensionale sommen

### 4.4.1 Volledige golfbestanden versus gereduceerde golfbestanden

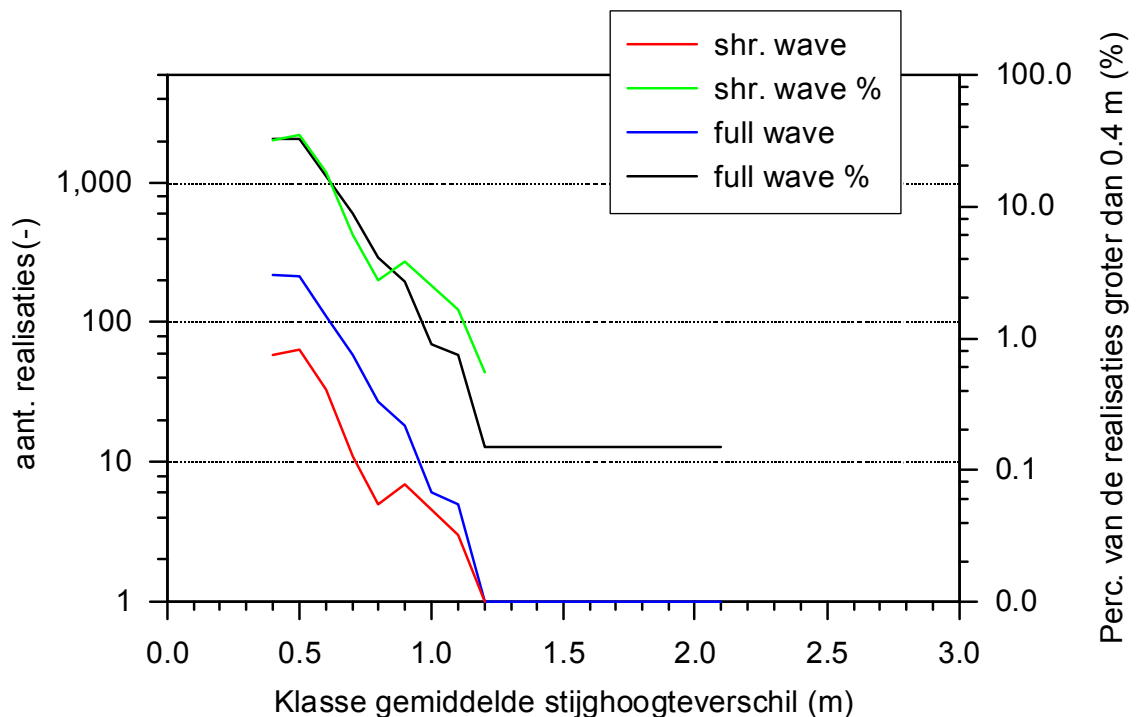
Uit vergelijking van de resultaten met geselecteerde en ongeselecteerde golven is duidelijk gebleken dat er met de ongeselecteerde golven meer situaties optreden met een groot stijghoogteverschil dan de geselecteerde bestanden. Ook de situaties met een hoge impuls zijn verschillend.



Figuur 4-8 Test T13. Vergelijking tussen resultaten van de volledige golf (full wave) en de selectie (shr. Wave) voor een leklengte van 1 m. De lijnen met percentages moeten afgelezen worden op

de rechter verticale as. De percentages is het percentage van de realisaties dat een stijghoogteverschil groter is dan 0.4 m.

Voor de meting T13 zijn daarom de gevonden waarden uit het histogram apart uitgezet als functie van het stijghoogteverschil, zie Figuur 4-8 en Figuur 4-9. Het blijkt, conform de verwachting, dat het aantal realisaties in een klasse (tussen bijvoorbeeld 0.8 en 0.9 m stijghoogteverschil) afneemt bij een toenemend stijghoogteverschil. Het blijkt ook dat de vorm van de kromme's vergelijkbaar zijn voor het totale golfbestand en het geselecteerde golfbestand. In absolute aantallen zijn er echter grote verschillen. Dit blijkt iets minder duidelijk uit genoemde figuren omdat hier logaritmische verticale assen zijn gekozen. Dit is gedaan om ook bij hoge stijghoogteverschillen (die juist heel belangrijk zijn voor de stabiliteit van de zetting) en dus een heel klein aantal realisaties, de grafiek leesbaar te kunnen houden.



Figuur 4-9 Als Figuur 4-8, maar nu voor een lek lengte van 0.3 m. Het horizontaal lopende gedeelte in de lijn "full wave %" wordt veroorzaakt doordat voor 1 stijghoogte het aantal realisaties nul is en dit niet weergegeven kan worden op een logaritmische as.

#### 4.4.2 Invloed hoek van inval

De invloed van de hoek van inval zal later bij de volledige berekeningen nog gedetailleerder worden onderzocht. Een eerste resultaat is echter al duidelijk zichtbaar in Figuur 4-2 tot en met Figuur 4-7. De hoogte van de balken in deze figuren geeft aan hoeveel keer een stijghoogte of impuls wordt gevonden met een waarde behorend bij de genoemde klasse, dus een stijghoogte tussen de 0.95 en 1.05 m voor de klasse 1 m in de stijghoogte grafiek. De verschillende balkjes zijn uitgezet zodanig dat de golven steeds schever invallen (bij elke klasse is het meest linkse balkje loodrechte inval en het meest rechtse representeert een golf die 70 graden afwijkt van loodrechte inval). De balkjes 1, 3, 5 en 7 representeren langkammige golven, de overige kortkammige. Duidelijk blijkt uit de figuren dat bij elke klasse van links naar rechts de hoogte van de balkjes afneemt. Daarbij maakt het niet uit of nu naar

de impuls of naar het maximale stijghoogteverschil wordt gekeken. Op grond van deze resultaten kan dus worden gezegd dat een scheef invallende golf niet leidt tot een grotere verschuldruk over de steenzetting, maar tot een lagere. De loodrechte inval geeft dus de grootste belasting op de steenzetting.

## 5 Aanpassingen ZSTEEN

### 5.1 Aanpassingen

Zoals reeds is opgemerkt in de inleiding, is er bij de ontwikkeling van ZSTEEN reeds rekening gehouden met de mogelijkheid om de stijghoogteverdeling over een geheel blokkenveld door te rekenen. Dit gedeelte was echter niet operationeel gemaakt, omdat er geen geschikte golfrandvoorwaarde voorhanden was en de freatische lijn in de filterlaag lastig te bepalen is. Met de nu uitgevoerde metingen is er een geschikte golfrandvoorwaarde voorhanden. De bepaling van de freatische lijn vergt enige toelichting.

In ZSTEEN wordt, net als in de voorloper STEENZET, de freatische lijn berekend door een startwaarde te kiezen en dan voor elke stijdstap te berekenen of er water in of uit de filterlaag stroomt. De hoogte wordt dan aangepast naar gelang er water in of uit gestroomd is. Bij regelmatige golven ontstaat er na enige tijd een evenwicht waarin de freatische lijn nog wat fluctueert, maar gemiddeld over een golfperiode constant blijft.

STEEN3D rekent voor één tijdstap en dus moet de freatische lijn worden opgegeven. De freatische lijn is gelijk aan de bovenkant van het rekengrid, omdat het geen zin heeft om berekeningen te doen boven de freatische lijn. Wel is het ook mogelijk om aan te geven dat er geen freatische lijn in de filterlaag aanwezig is. De filterlaag is dan geheel gevuld met water. Voor deze situatie, die kan voorkomen wanneer er vrij laag op het talud een overgangsconstructie is aangebracht, wordt verondersteld dat de hoeveelheid water in de filterlaag constant blijft.

Het momentaan uitrekenen van de freatische lijn in de situatie dat een geheel blokkenveld wordt doorgerekend, is gecompliceerd, omdat er dan ook sprake zal zijn van een horizontale stroming in de filterlaag. Uit diverse onderzoeken is echter vastgesteld dat de positie van de freatische lijn geen grote invloed heeft op de berekende stijghoogteverschillen. In ZSTEEN is daarom, wanneer een blokkenveld wordt doorgerekend de positie van de freatische lijn ook vastgezet evenals in STEEN3D.

Met bovenstaand uitgangspunt voor de freatische lijn waren de enige noodzakelijke aanpassingen:

- Het kunnen vastzetten van de freatische lijn.
- Het berekenen van de golfrandvoorwaarde voor op het talud, uitgaande van een in één raai gemeten verdeling.
- Aanpassen van de invoer- en uitvoerroutines (breedte moet opgegeven kunnen worden, drukken uitlezen etc.).

### 5.2 Afmetingen

Voor vergelijking van de resultaten van ZSTEEN met die van STEEN3D bleek het volgende nog van belang. Wanneer bij STEEN3D een bloklengte of breedte wordt opgegeven, is dit de breedte inclusief spleet, bij ZSTEEN is dit echter exclusief spleet. De ZSTEEN benadering is



beter als het om het narekenen van een echte zetting gaat. Ook daar zullen de spleten ruimte innemen. Echter, om de programma's onderling te vergelijken, of om berekeningen uit te voeren met verschillende lek lengtes, is de ZSTEEN benadering iets minder handig. De afmetingen zullen dus iets anders zijn dan die van STEEN3D, maar hiervoor is te corrigeren. Lastiger is echter dat een andere spleetbreedte ook de configuratie van de blokken doet veranderen en dus ook de spleten op een iets andere plaats op het talud komen. Dit maakt een directe 1 op 1 vergelijking lastig.

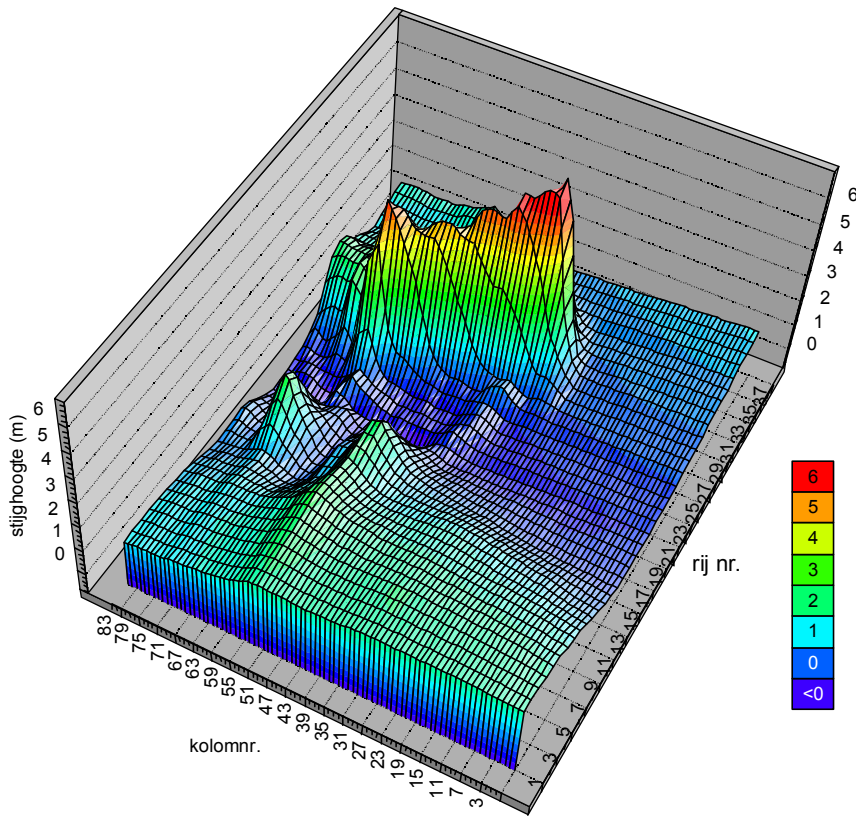
## 6 Vergelijking met STEEN3D

Voor dit project zijn, zoals hierboven beschreven, enige aanpassingen uitgevoerd aan ZSTEEN om dit geschikt te maken voor berekeningen aan een heel blokkenveld. Om zeker te zijn of het programma na deze aanpassingen nog betrouwbare resultaten gaf, zijn de resultaten vergeleken met resultaten van STEEN3D.

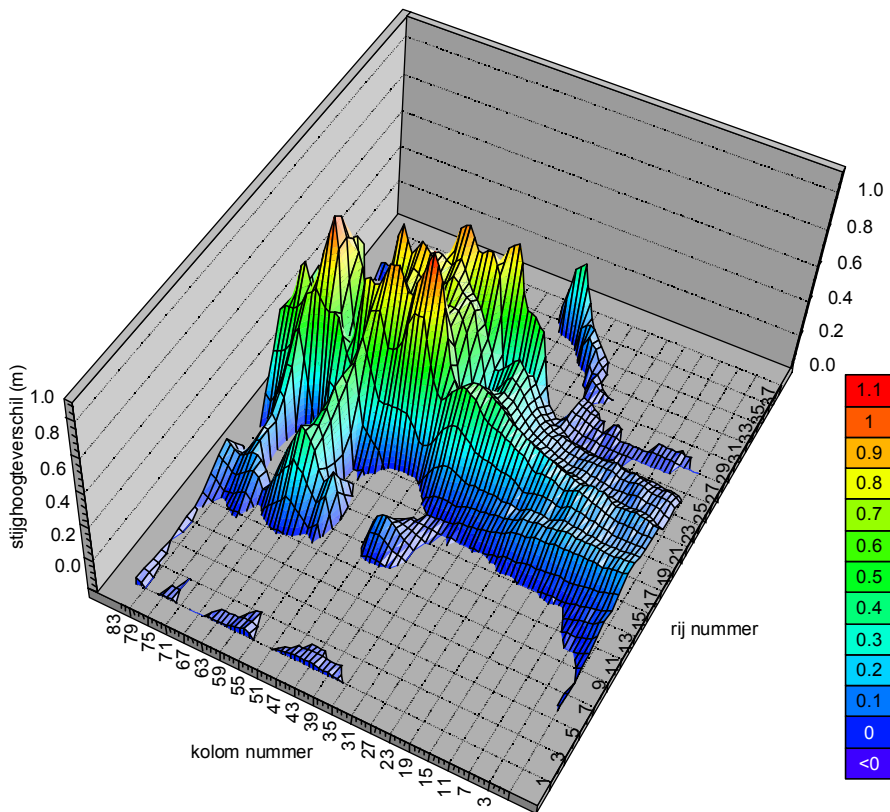
STEEN3D is vóór ZSTEEN ontwikkeld (Bezuijen, 1992). Het rekt slechts met de golfrandvoorwaarde op één tijdstip, terwijl ZSTEEN in staat is een hele registratie van onregelmatige golven door te rekenen. Voor deze vergelijking is dan ook in ZSTEEN de drukverdeling op één tijdstip geselecteerd en deze is gebruikt voor vergelijking met de STEEN3D resultaten. STEEN3D heeft de mogelijkheid een relatief groot blokkenveld door te rekenen (500 blokken horizontaal bij 100 verticaal). Bij ZSTEEN is dit niet mogelijk, maar ook niet nodig, omdat bij deze berekeningen altijd uitgegaan is dat er slechts op één raai wordt gemeten en dat daaruit een golfdrukkenveld wordt samengesteld. Dit golfdrukkenveld beweegt langs het talud. Wanneer bij een kleiner aantal blokken dus op verschillende tijdstippen wordt gerekend, komen de verschillende drukverdelingen ‘langs’. Het blokkenveld moet in ZSTEEN zo groot zijn dat dit enkele keren de leklengte is. Aan deze voorwaarde kan in ZSTEEN worden voldaan. Wanneer het blokkenveld kleiner is dan de leklengte is het mogelijk dat een verandering in de golfdruk buiten het blokkenveld valt, terwijl deze nog wel een invloed zou hebben op de druk onder de blokken op het punt dat wordt doorgerekend als het beschouwde blokkenveld groter zou zijn.

Het bleek lastig om de plaats waar de golf op het talud komt in beide programma's precies te synchroniseren. De programma's gaan wat verschillend om met de manier waarop een golfdruk, die in één kolom op één bepaalde tijd is gemeten, op het talud wordt gezet. Het bleek dat die soms een zekere afstand was verschoven. Omdat dit verder niet van belang is voor de bepaling van de verschildruk over de zetting, is dit niet verder uitgezocht, maar is pragmatisch eerst in de golfgegevens gezocht hoe de golfdrukken in de beide programma's in overeenstemming konden worden gebracht. Voor die situatie is toen de verschildruk uitgerekend. De resultaten worden vergeleken door Figuur 6-2 met Figuur 6-3 te vergelijken en met Figuur 6-4.

Het blijkt dat er een goede overeenkomst is tussen beide programma's. Bij steile pieken in de golfdruk blijken er verschillen te ontstaan tussen ZSTEEN en STEEN3D. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een iets andere golfdrukinterpolatie bij beide programma's.



Figuur 6-1 Gebruikte golfrandvoorwaarde voor vergelijking tussen STEEN3D en ZSTEEN



Figuur 6-2 Resultaat berekening STEEN3D, lek lengte=0.945 m.