

# **SBW Golfverslag en Sterkte Grasbekleding**

**Fase 4D Evaluatie Vechtdijk**

Jentsje van der Meer  
Henk Verheij  
Andre van Hoven

1201541-000



**Titel**  
SBW Golfverslag en Sterkte Grasbekleding

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1201541-000	1201541-000-GEO-0024	153

**Trefwoorden**

Golfverslag, erosie, erosiebestendigheid, grasbekleding, graszode, infiltratie, zandgehalte

**Samenvatting**

In het kader van SBW (Sterkte en Belastingen Waterkeringen) wordt onderzoek verricht naar de sterkte van grasbekledingen op de kruin en het binnentalud bij golfverslag. Hoofddoel van dit onderzoek is het verbeteren van toetsregels voor het VTV 2011. Het onderzoek bestaat uit cycli rondom grootschalige destructieve proeven op bestaande dijken. In het kader van onderhavige Fase 4D Evaluatie Vechtdijk, zijn de resultaten van de golfverslagproeven op de Vechtdijk geëvalueerd. De erosiebestendigheid van de graszode met een zandgehalte van gemiddeld 90% is aanzienlijk gebleken. Met behulp van de proefresultaten en de vernieuwde erosiemodellering, zal het criterium ten aanzien van het acceptabele zandgehalte (momenteel 70%) kunnen worden aangepast. De resultaten dienen ook als onderbouwing van het eenvoudige toetscriterium voor het mechanisme erosie dat zal worden opgeleverd aan WTI. Naast de erosiemodellering zijn de modellen voor de berekening van de waterlaagdiktes en de stroomsnelheden als gevolg van golfverslag verbeterd. Meting van de waterspanningsopbouw in de dijk tijdens één van de vier golfverslagproeven hebben gediend ter validatie van de rekenmethode voor het bepalen van de potentiële drukopbouw als gevolg van golfverslag. Beoogd wordt deze rekenmethode op te nemen in het Technisch Rapport Grasbekledingen bij Dijken.

**Referenties**

Projectplan - Golfverslag en Sterkte Grasbekleding d.d. 10 augustus 2007

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
4	Dec. 2010	Jentsje van der Meer		Bas Hofland		Harm Aantjes	
		Henk Verheij		Jan Blinde			
		Andre van Hoven					

**Status**  
definitief





## Inhoud

<b>1. Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Kader en projectopzet	1
1.2 Locatie Vechtdijk	2
1.3 Leeswijzer	3
<b>2 Hydraulische parameters</b>	<b>5</b>
2.1 Metingen met laagdiktemeters, electromagnetische snelheidsmeters, drukopnemers en luchtgehaltemeter	5
2.1.1 Uitgevoerde proeven	5
2.1.2 Meetopstelling	6
2.1.3 Dataverwerking	7
2.1.4 Resultaten hydraulische metingen	12
2.1.5 Nadere analyse laagdikte	17
2.1.6 Drukmeting laagdikte	24
2.1.7 Resultaten metingen met luchtgehaltemeter (VFM)	27
2.2 Meeting laagdiktes en snelheden met de surfplanken	42
2.2.1 Opzet metingen	42
2.2.2 Data processing	44
2.2.3 Analyse signalen	47
2.2.4 Conclusies en aanbevelingen surfplankmetingen	69
2.3 Cumulatieve belastingen	72
2.3.1 Evaluatie verschillende hydraulische regimes Vechtdijk	75
2.3.2 Vechtdijk, schade door taludovergang en boom	82
2.3.3 Vechtdijk, schade na hydraulische metingen	82
2.3.4 Evaluatie Delfzijl	83
2.3.5 Evaluatie Boonweg	83
2.3.6 Evaluatie St Philipsland	84
2.3.7 Evaluatie Kattendijke	84
2.3.8 Evaluatie Afsluitdijk	85
2.3.9 Eerste evaluatie van het totaalbeeld	86
2.4 Conclusies hydraulische belastingen	91
<b>3 Erosie</b>	<b>93</b>
3.1 Beschrijving proefstroken	93
3.2 Waargenomen erosie	97
3.3 Evaluatie erosiepredictie	102
3.4 Cumulatieve belastingmaat	107
3.5 Conclusies en aanbevelingen	109
<b>4 Infiltratie</b>	<b>111</b>
4.1 Inleiding	111
4.2 Achtergrond waterspanningsopbouw door infiltratie	111
4.3 Meetopstelling en proefprogramma	113
4.4 Scheidende laag tussen zanddijk en zandondergrond	116
4.5 3D effect	117
4.6 Drukmetingen	120
4.6.1 Volledige tijdreeksen	120

4.6.2	Metingen in diepe zand en initieel freatisch vlak	122
4.6.3	Meting waterspanning in de dijk vs predictie PlaxFlow	124
4.6.4	Meting waterspanning in de dijk vs predictie eenvoudige 3 stappenmethode	133
4.6.5	Invloed neerslag	136
4.7	Samenvatting evaluatie infiltratie	137
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>139</b>
5.1	Conclusies	139
5.1.1	Hydraulische parameters	139
5.1.2	Erosie	139
5.1.3	Infiltratie	140
5.2	Aanbevelingen	140
5.2.1	Hydraulische parameters	140
5.2.2	Erosie	141
5.2.3	Infiltratie	141
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>143</b>
<b>Bijlage(n)</b>		
<b>A</b>	<b>Fotorapportage</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Metingen met de surfplanken</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Evaluatie proefopstelling Vechtdijk</b>	<b>C-1</b>

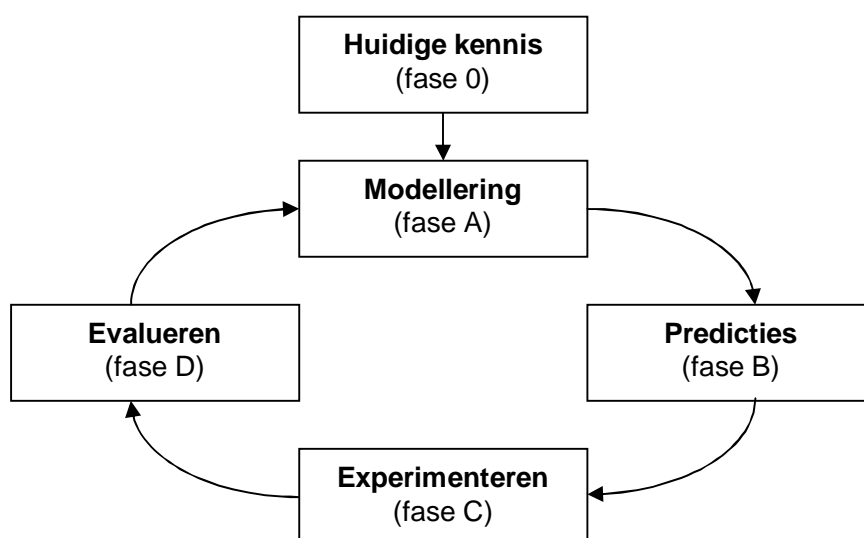
## 1. Inleiding

### 1.1 Kader en projectopzet

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het Rijkswaterstaatsproject Sterkte en Belastingen Waterkeren (SBW). Het doel van dit project is het in kaart brengen van het bezwijkmechanisme van een grasbekleding bij golfoverslag en het afleiden van praktische toets- en ontwerpformules. Het project is beschreven in het Projectplan - Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding d.d. 10 augustus 2007. De resultaten van het onderzoek moeten uiteindelijk worden verwerkt in drie eindproducten: een Technisch Rapport, een voorstel voor toetsregels voor het VTV 2011 en een doorkijk naar 2012 – 2016. Het voorstel voor de toetsregels zal worden geleverd aan het WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium) dat de toetsregels mogelijk zal verwerken in het VTV.

Voor onderzoek naar de erosiebestendigheid van grastaluds bij golfoverslag wordt gebruik gemaakt van grootschalige proeven op bestaande dijken. Met behulp van de golfoverslagsimulator wordt een stormsituatie gesimuleerd, waarbij golfoverslag optreedt tot een gemiddeld overslagdebiet van 75 l/s per m. De gesimuleerde condities zijn veel zwaarder dan waarop dijken zijn ontworpen. De golfoverslag kan erosie van de grasmatten veroorzaken.

Het eindproduct van het project, de bouwsteen ten behoeve van het VTV 2011, wordt vervaardigd middels een cyclisch proces. De grondgedachte hiervan is het KOLB-principe (zie Figuur 1.1 en <http://www.thesis.nl/kolb>).



Figuur 1.1 Kolb cyclus

Per proeflocatie wordt deze cyclus doorlopen. Na evaluatie van proeven (fase D) worden aanbevelingen gedaan voor modellering of modelaanpassingen (fase A) ten behoeve van de volgende proeflocatie. Hiermee wordt direct de ontwikkelde kennis c.q. inzichten ten behoeve van de volgende proeflocatie ingebracht. Iedere fase wordt afgesloten met een rapportage (tussenproduct).

Deze rapportage bevat Fase 4D - Evaluatie Vechtdijk. Eerder zijn in het kader van Fase 4A Modelontwikkeling Vechtdijk (Deltares 2010A) de predictiemodellen voor hydraulische

parameters, erosie en infiltratie aangepast naar aanleiding van de eerdere proevenserie op de Afsluitdijk. Met de aangepaste modellen is een predictie gemaakt voor de proeven op de Vechtdijk (Deltares 2010B). In het kader van Fase 4C is de proef uitgevoerd (Infram 2010). In onderhavige rapportage worden de predicties vergeleken met de resultaten van de proef. Deze evaluatie geeft een oordeel op het functioneren van de laatste stand van zaken ten aanzien van de predictiemodellen.

De proeven op de Vechtdijk maken deel uit van een serie proeven. Met alle proeven tezamen wordt geprobeerd een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de mechanismen die spelen bij verschillende types grasbekledingen. Eerder zijn proeven uitgevoerd op dijken in:

- 1 Groningen, Delfzijl - Golfoverslagproef op gras, op versterkt gras en op kale klei.
- 2 Friesland, Boonweg - Golfoverslagproef op vier stroken die gedurende 15 jaar op verschillende manieren zijn beheerd en een afschuifproef.
- 3 Zeeland, St. Philipsland - Golfoverslagproef op gras, relatief stijl talud.
- 4 Zeeland, Kattendijke - Golfoverslagproef op grastalud, met mestinjector beschadigd grastalud, open steenasfalt en op elastocoast.
- 5 Afsluitdijk – Golfoverslag op gras, gras met een klinkerbestrating onderaan het talud en langs een taludtrap en een afschuifproef.

## 1.2 Locatie Vechtdijk

De locatie Vechtdijk is uitgekozen vanwege het hoge zandgehalte van 90% in de bekleding. Voor dijken met een zandgehalte hoger dan 70% is momenteel geen toetsmethode ten aanzien van het mechanisme erosie. De invloed van een hoog zandgehalte op erosie van een grasbekleding is het hoofddoel van deze onderzoekscyclus. Het invullen van deze witte vlek zal leiden tot minder dijken zonder een eindoordeel.

Verwacht werd dat door het hoge zandgehalte de grond snel tussen de wortels van het gras zou uitspoelen, wat zou leiden tot het snel falen van de bekleding. Volgens de erosiemodellen voor het taludoppervlak was de invloed van het zandgehalte echter klein en is de erosiebestendigheid hoofdzakelijk afhankelijk van de doorworteling. De golfoverslagproeven hebben de geringe invloed van het zandgehalte op het mechanisme erosie bevestigd.

Bij de golfoverslagproeven op de Vechtdijk zijn ook de invloed van een boom en van een wegovergang meegenomen. Bij de eerdere proeven is al een begin gemaakt met onderzoek naar het effect van verstoringen in het talud en naar de invloed van de overgang van talud naar horizontaal. Dit wordt bij de Vechtdijk uitgebreid. De obstakels bleken wederom een zwakke plek in de bekleding. In deze evaluatie zal verder worden gekeken naar de toelaatbare verstoring van de grasmat in de vorm van overgangen en objecten ten aanzien van het mechanisme erosie.

Ten slotte zijn er golfoverslagproeven uitgevoerd met een lager en een hoger golfregime. Naast de invloed op erosie wordt ook gekeken naar de invloed op de tijd dat er een wateraanbod op het talud aanwezig is en dus hoeveel water er kan infiltreren.

De exacte locatie op de Vechtdijk staat in Figuur 1.2.





Figuur 1.2 Proeflocatie Vechtdijk (foto Google Earth)

- Strook 1 – buitentalud wegovergang
- Strook 2 – binnentalud boom
- Strook HM – meting hydraulische parameters
- Strook 3 – laag golf regime
- Strook 4 – hoog golf regime

In tegenstelling tot het predictierapport (Deltares 2010B) wordt in deze rapportage micro-instabiliteit niet behandeld. De analyse naar het mechanisme is uitgevoerd, omdat het door het Waterschap werd gezien als een risico bij het uitvoeren van de proeven in het gesloten seizoen. De analyse was nodig voor het verkrijgen van een vergunning en is opgenomen in het predictierapport. Tijdens de proef is het mechanisme niet zichtbaar opgetreden binnen de proefstrook. Alleen buiten de proefstrook is het uitspoelen van zand gezien vanuit molgangen met een ingang binnen de proefstrook. Op basis van deze observatie is geen zinvolle evaluatie uit te voeren. Het mechanisme micro-instabiliteit heeft niet geleid tot problemen, wat ook de verwachting was. Het veroorzaken van micro-instabiliteit was ook geen doel van de proeven. Om deze redenen is het mechanisme niet verder meegenomen bij deze evaluatie.

De evaluatie van de proefopstelling is opgenomen in bijlage C.

### 1.3 Leeswijzer

Het rapport is verdeeld in 5 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 bevat de modelontwikkeling ten aanzien van de hydraulische parameters, hoofdstuk 3 graserosie en 4 infiltratie. Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen.



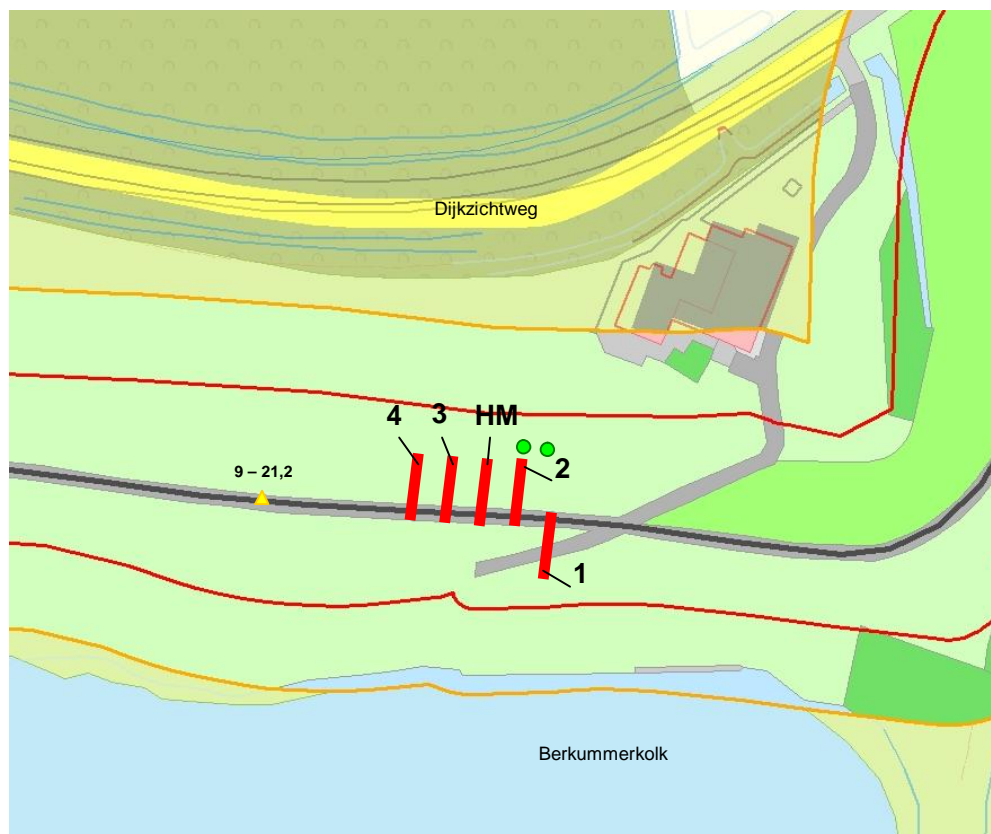
## 2 Hydraulische parameters

In dit hoofdstuk komen de hydraulische condities bij golfoverslag aan de orde. De optredende hydraulische grootheden zoals laagdikte en stroomsnelheid zijn relevant omdat zij de relatie leggen tussen de condities tijdens een storm en de sterkte van de grasbekleding. In paragraaf 2.1 worden metingen geanalyseerd die zijn uitgevoerd met LDM's (laagdikte meters), EMS'en (electromagnetische snelheidsmeters), DRO's (drukopnemers) en een VFM (luchtgehalte meter). In paragraaf 2.2 worden laagdikten en snelheden gemeten met surfplanken geanalyseerd. In paragraaf 2.3 wordt een belastingparameter gekoppeld aan de waargenomen schade. Tot slot staan in paragraaf 2.4 de conclusies.

### 2.1 Metingen met laagdiktemeters, electromagnetische snelheidsmeters, drukopnemers en luchtgehaltemeter

#### 2.1.1 Uitgevoerde proeven

Op 16 maart 2010 zijn op locatie Vechtdijk in proefvak HM (zie Figuur 2.1) golfoverslagproeven uitgevoerd ten behoeve van de bepaling van hydraulische parameters van de golven. Het betreft 41 overslagvolumes, verdeeld over drie series. Zie Tabel 2.1. Deze series komen overeen met verschillende meethoogtes van de surfplank boven het talud ("laag", "hoog" en "midden", zie hiervoor paragraaf 2.2). De EMS- en VFM-apparatuur is slechts eenmaal in hoogte versteld, na serie 1.



Figuur 2.1 Proefstroken Vechtdijk

Volumes sessie 1 (l/m)	Volumes sessie 2 (l/m)	Volumes sessie 3 (l/m)
200a	1000d	1000ea
200b	1000e	2000ea
200c	1000f	3000ea
400a	2000a	4000ea
400b	2000b	5000ea
400c	2000c	
600a	3000a	
600b	3000b	
600c	3000c	
800a	4000a	
800b	4000b	
800c	4000c	
800d	5000a	
1000a	5000b	
1000b	5000c	
1000c	5500a	
200d	5500b	
	5500c	

Tabel 2.1 Overslagvolumes

Opmerking: bij sessie 1 bevonden EMS (electromagnetische snelheidsmeter) en VFM (luchtgehaltemeter) zich op 5 cm boven het maaiveld; bij sessies 2 en 3 op 10 cm.

## 2.1.2 Meetopstelling

Tijdens de proeven is met verschillende instrumenten gemeten. In Figuur 2.2 is aangegeven waar op het talud de meters zich bevinden. De nummering in deze figuur; 1 ter plaatse van de teen van de dijk tot en met 5 ter plaatse van de binnenkruinlijn, geldt voor alle verschillende instrumenten. Bijvoorbeeld: zowel de laagdiktemeter (LDM) als de surfplank ter plaatse van de teen hebben het nummer 1.

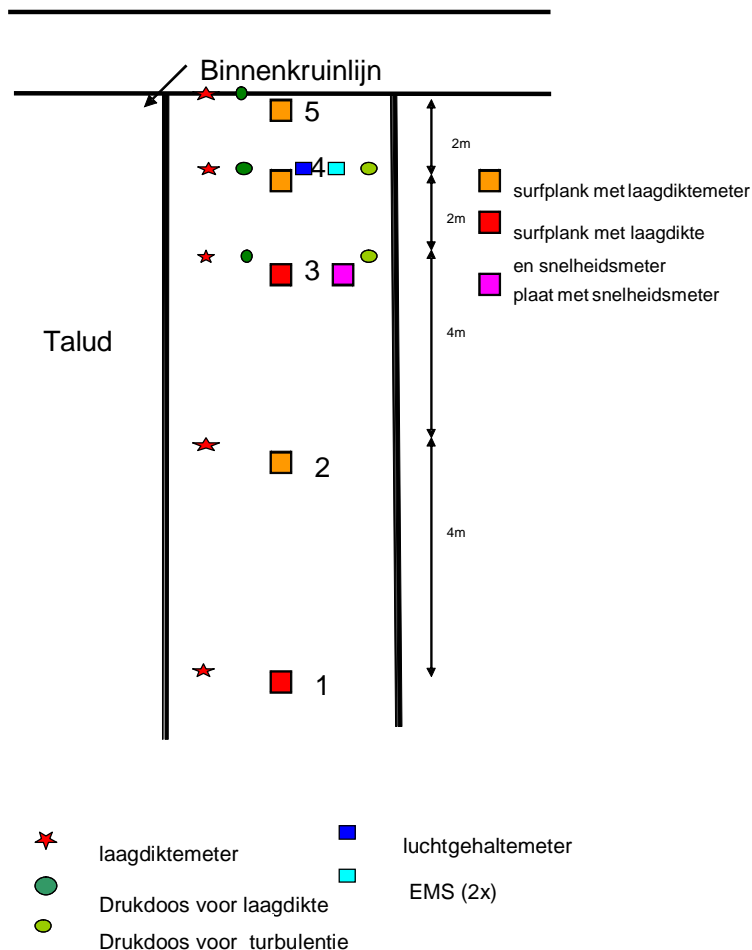
Hier, in paragraaf 2.1, worden de analyse en metingen van LDM (laagdiktemeters), EMS (electromagnetische snelheidsmeter), DRO (drukopnemers) en VFM (luchtgehaltemeter) besproken. De surfplanken komen in paragraaf 2.2 aan de orde.

De acquisitie van de meetdata vond plaats in een centraal, gesynchroniseerd systeem, waarbij de signalen tegelijkertijd werden opgeslagen. Daarnaast werd het signaal van de VFM ook als ISO-compatible bestand opgeslagen (zie voor uitleg en analyse van VFM-signaal verderop in dit hoofdstuk).

Er wordt een toelichting gegeven op de bewerking van achtereenvolgens de signalen van de laagdiktemeters, drukopnemers, EMS-opnemer en de luchtgehaltemeter (VFM). Het gebruik van drukopnemers is nieuw bij de proeven van dit jaar. Het luchtgehalte werd bij de proeven op de Afsluitdijk in 2009 voor het eerst gemeten.

In onderstaande figuur is de positie van de verschillende opnemers langs het talud gegeven. Merk op dat slechts één EMS en één VFM zijn gebruikt, beide geplaatst op meetraai 4. Zowel EMS als VFM geven een dubbel signaal: de EMS meet in de twee horizontale richtingen en

de VFM meet synchroon met twee meetnaalden. Verder zijn er twee typen drukopnemers gebruikt: een voor het registreren van laagdikten en een voor de turbulentie in de stroming.



Figuur 2.2 Schematisch bovenaanzicht op talud met locatie meetinstrumenten. Toestroming van golfsimulator naar talud vindt plaats van bovenste horizontale lijn (opening golfoverslagsimulator) naar getekende binnenkruinlijn en vervolgens over het talud.

### 2.1.3 Dataverwerking

De signalen van de verschillende meetinstrumenten zijn per serie in één databestand aangeleverd. De bemonsteringsfrequentie is 1000 Hz. Er is dus voor elke milliseconde een waarde in elk van de signalen aanwezig.

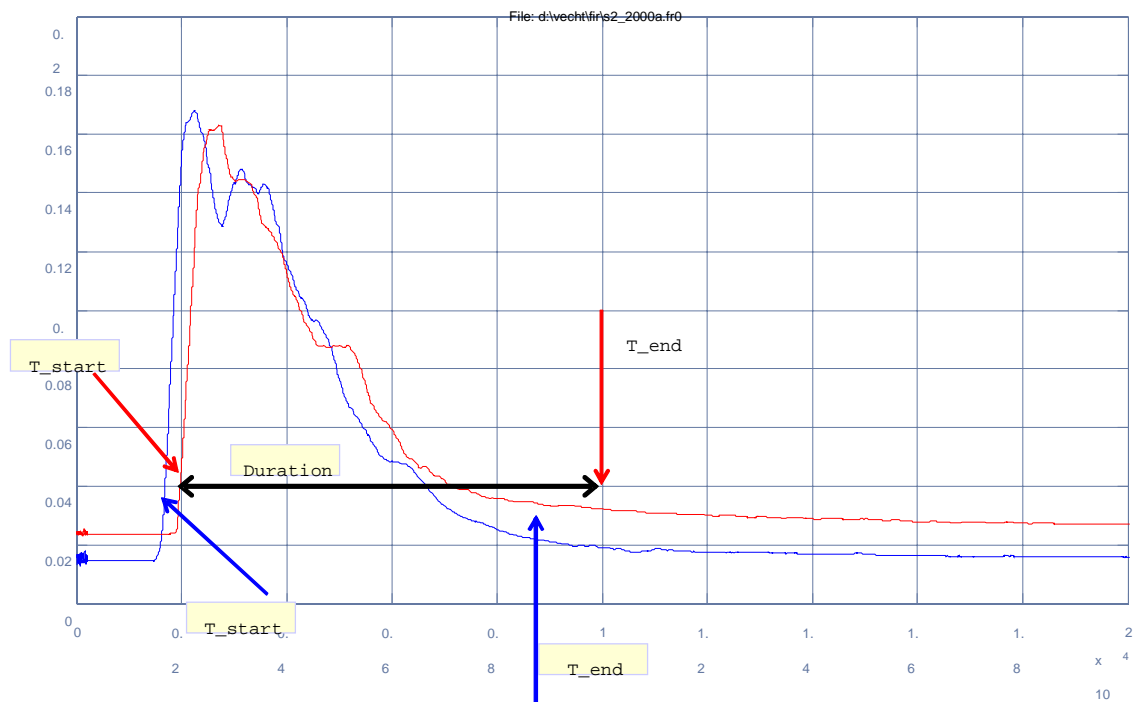
#### Laagdiktemeter

Alvorens de analyse van de signalen te starten zijn de signalen van de laagdiktemeters bewerkt met een filter. Hiervoor zijn de volgende stappen doorlopen:

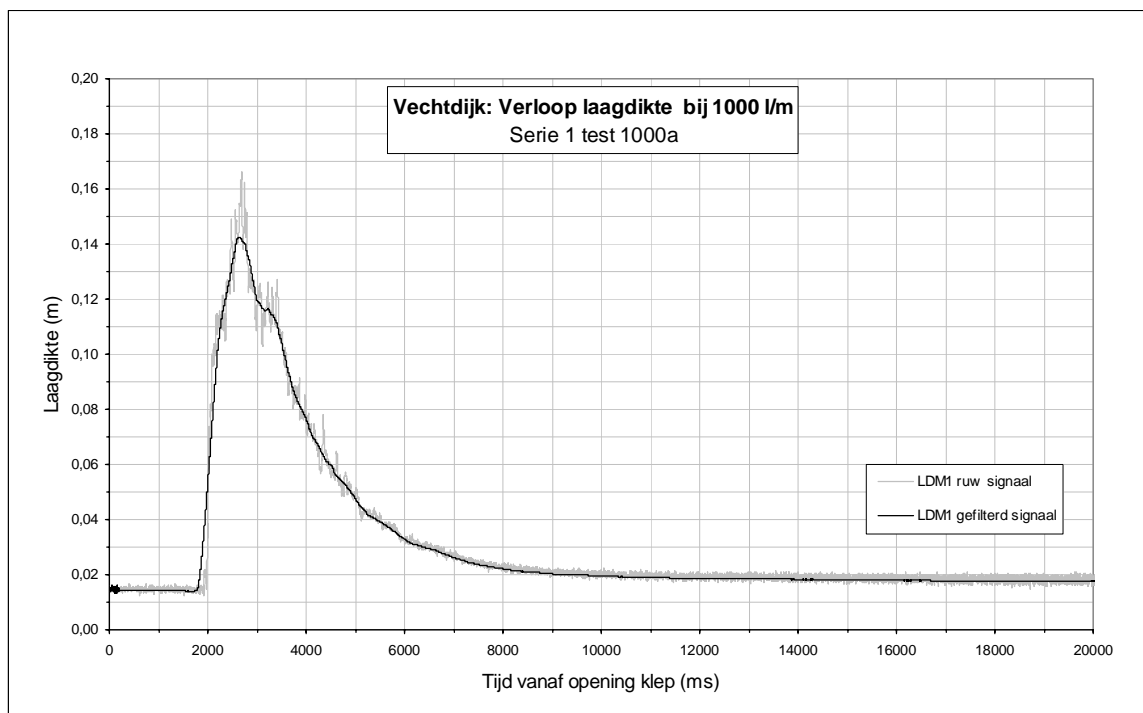
- Het 'knippen' van de ruwe signalen op basis van het open/dicht signaal van de klep. Uitgangspunt daarbij is: tijdstip van opengaan van de klep is de start van de volgende proef. Per proef geldt op dat moment:  $t(t_0) = 0$ . Op basis van het logboekbestand dat tijdens de uitvoering van de proeven is bijgehouden, zijn de gevonden starttijden gesynchroniseerd met de tijden in het logboek. Zo was het mogelijk om per proef de overeenkomende naam uit het logboek aan het databestand te koppelen.

- Het ruwe signaal is gefilterd om extremen uit te sluiten. Daartoe is een 'moving average'-filter toegepast dat een gemiddelde bepaalt op tijdstip  $t$  over de periode  $t-200\text{ms}$  tot  $t+200\text{ms}$ . Een totaal tijdsinterval van  $400\text{ms}$  dus. Dit tijdsinterval is als goed bruikbaar beoordeeld aan de hand van een gevoeligheidsanalyse bij de 2009-proeven op de Afsluitdijk.
- Op basis van het gefilterde laagdiktesignaal is de golf afgeleid. Om te voorkomen dat delen van het signaal worden herkend als golf terwijl dit niet het geval is zijn drempelwaarden gekozen voor het begin en het eind van de golf bepaald. De drempelwaarden zijn gekozen op basis van eerdere proeven. Uitgangspunten bij de definitie van de golf zijn:
  - Drempelwaarde start van de golf:  $1,25 \cdot$  totaalgemiddelde van het signaal van de proef;
  - Drempelwaarde eind van de golf:  $1,10 \cdot$  totaalgemiddelde van het signaal van de proef;
  - Dit betekent concreet dat wanneer de laagdikte het gemiddelde met een factor  $0,25$  overschrijdt er dan sprake is van een langskomende golf. Het tijdstip waarop dit gebeurt wordt weggeschreven ( $T_{\text{start}}$ ). Als de laagdikte vervolgens onder het niveau van  $1,10$  keer de laagdikte zakt, is er sprake van het einde van de langskomende golf. Het tijdstip waarop dit gebeurt wordt weggeschreven ( $T_{\text{end}}$ ). Het verschil tussen beide tijdstippen is de duur van de golf (duration). In figuur 2.3 zijn voorbeelden gegeven van de beschreven begrippen voor de laagdikteopnemers 1 en 2.

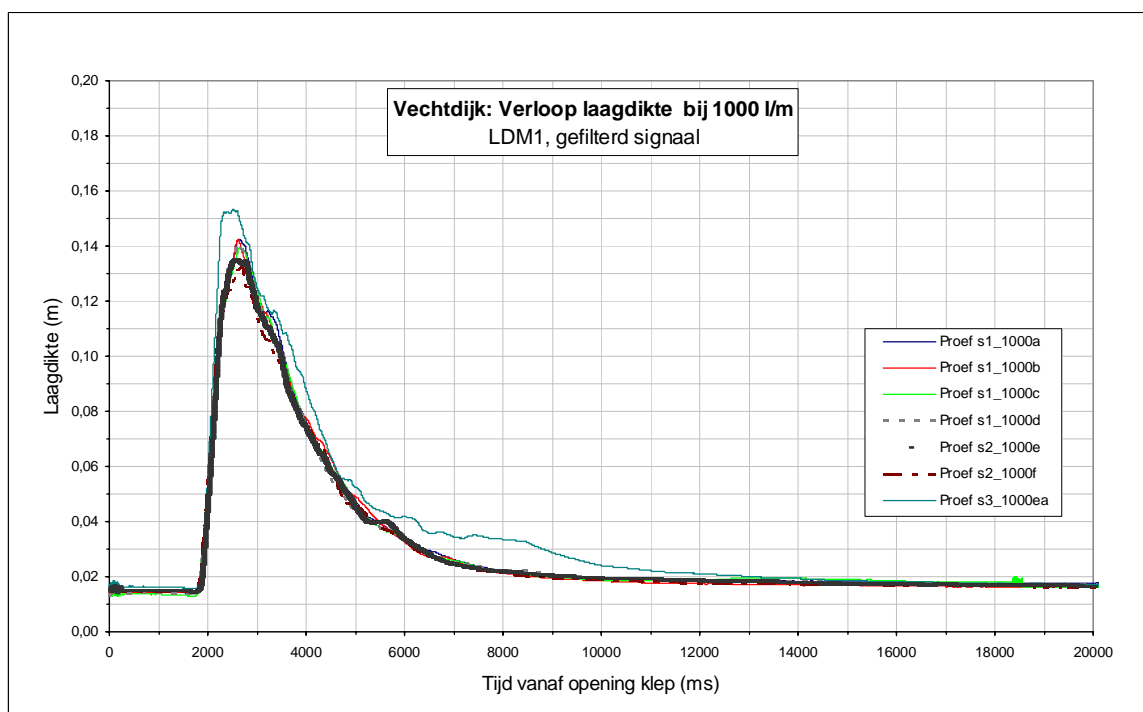
Figuur 2.4 is een voorbeeld van het ruwe en gefilterde signaal van de laagdikte, en Figuur 2.5 van het signaal van verschillende golven van  $1000\text{ l/s per m}$ . Geconcludeerd kan worden dat de gekozen werkwijze voldoet.



Figuur 2.3 Voorbeeld van gekozen definities van begin, eind en duur van de golf. Dit is golf 2000a van serie 2. Op de horizontale as staat de tijd in milliseconden; op de verticale as staat de laagdikte in meters



Figuur 2.4 Voorbeeld ruwe en gefilterde laagdikte signalen



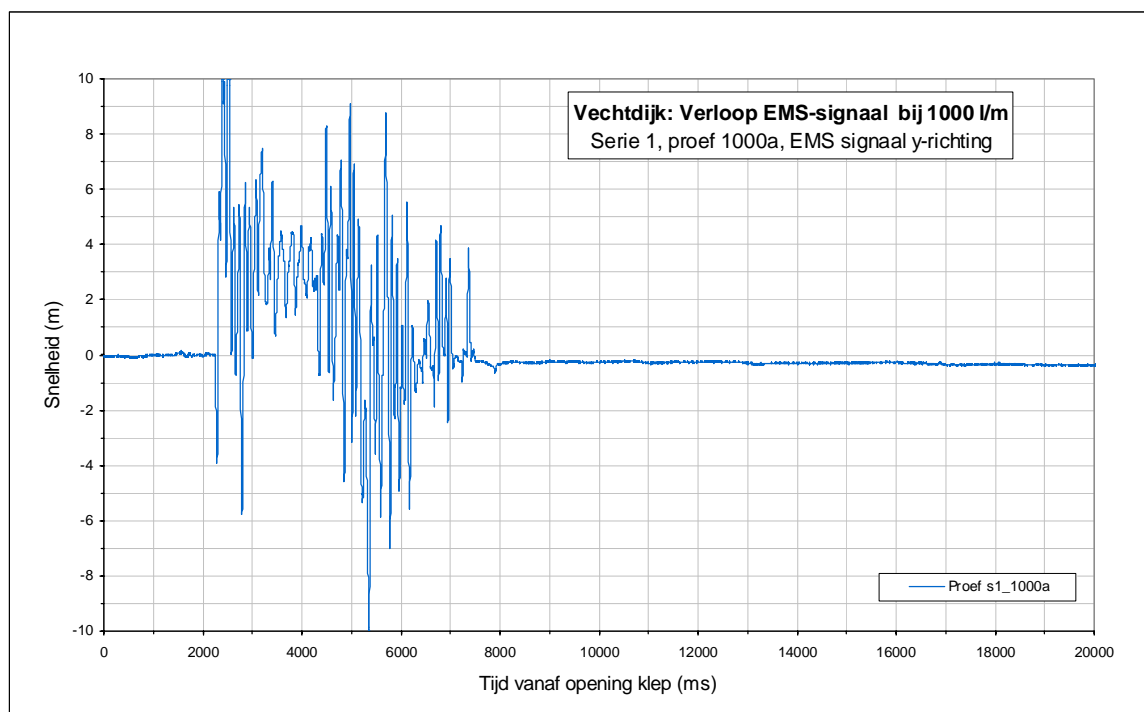
Figuur 2.5 Voorbeeld signalen van verschillende golven van 1000 l/s per m

Bij de bepaling van de eigenschappen van de golven is gebleken dat laagdikteopnemer 4 bij proeven 200a, 200b, 200c, 400a en 400b van serie 1 geen bruikbaar signaal heeft opgeleverd. De oorzaak hiervan is onbekend. De overige proeven laten bruikbare signalen zien.

De frontsnelheden zijn bepaald voor de trajecten 1-2, 2-3, 3-4 en 4-5 door de afstanden van de betreffende sensoren te delen op de verschiltijden  $T_{start}$  van de twee sensoren. Een traject is gedefinieerd als de afstand tussen twee raaien met opeenvolgende sensoren (zie Figuur 2.2).

#### *Snelheidsmeter (EMS)*

De start- en eindtijdstippen uit de signalen van de laagdiktemeters (LDM's) zijn gebruikt om het juiste deel van het signaal van de EMS-opnemer te knippen. Daarbij komt de positie van laagdikteopnemer 4 overeen met de positie van de EMS-opnemer. De gevonden maximumsnelheden zijn in de grafiek met berekende frontsnelheden uitgezet. Zie Figuur 2.6 voor een voorbeeld van een EMS signaal.



Figuur 2.6 Voorbeeld EMS signaal

#### *Drukopnemersignalen*

Er zijn drukopnemers gebruikt als controle van de laagdiktemetingen en drukopnemers voor de turbulentie in de overslaande golf.

Voor de DRO's voor controle zijn de start- en eindtijdstippen uit de LDM signalen gebruikt om de juiste delen uit de signalen van de drukopnemers te knippen. Daarbij komen de volgende posities overeen:

Positie laagdikteopnemer 5 = positie drukopnemer 5

Positie laagdikteopnemer 4 = positie drukopnemer 4

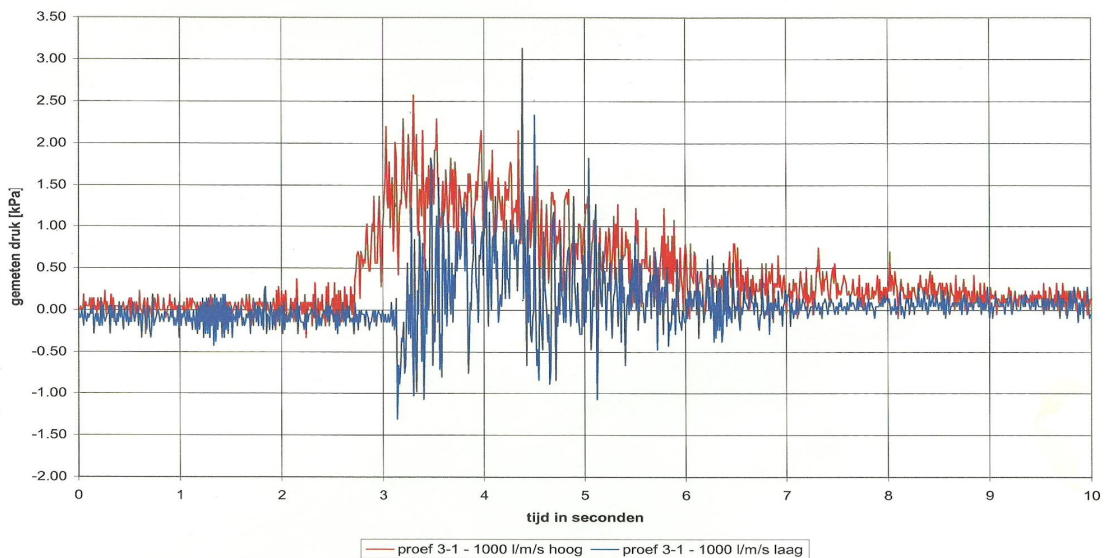
Positie laagdikteopnemer 3 = positie drukopnemer 3

De resultaten van de drukmetingen kunnen in de figuren als laagdikte worden uitgezet. Daarbij wordt er van uitgegaan dat 1 mbar overeenkomt met een laagdikte (van water exclusief lucht) van 0,01 m.

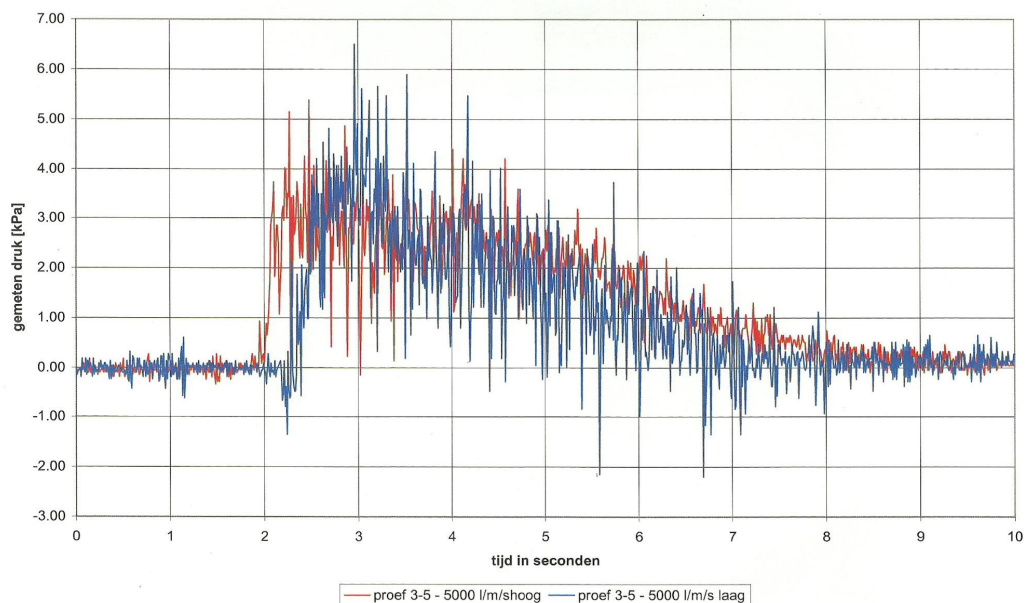


Voor de turbulentiemetingen zijn twee drukopnemers geplaatst op 2 en 4 m uit de binnenkruinlijn om turbulente drukfluctuaties in de overslaande golven te registreren (zie Figuur 2.2). De meetfrequentie was 100 Hz. De drukken zijn gedurende 10 seconden geregistreerd. Voor details wordt verwezen naar het Factual Report Monitoring Vechtdijk (Van Etten en Van Waardenburg, 2010).

De drukopnemer op 2 m uit de kruin heeft waarden maximale waarden geregistreerd van ongeveer 6 kPa en minimale waarden van ongeveer -2 kPa. Voor de drukopnemer op 4 m uit de kruin zijn deze waarden ongeveer 8 kPa en - 4 kPa respectievelijk. In het navolgende wordt een beknopte analyse gepresenteerd. Zie figuren 2.7 en 2.8 voor voorbeelden van registraties.



Figuur 2.7 Gemeten bodemdrukfluctuatie ( $P_m$ ) als functie van de tijd voor  $V = 1\text{ m}^3$



Figuur 2.8 Gemeten bodemdrukfluctuatie ( $P_m$ ) als functie van de tijd voor  $V = 5\text{ m}^3$

## *Luchtgehaltemeter (VFM)*

De luchtgehaltemeter (Void Fraction Meter) ofwel VFM is een relatief nieuw instrument en daarom wordt hier ten opzichte van de overige instrumenten extra aandacht aan besteed. Analyse en resultaten worden in een aparte sectie besproken (paragraaf 2.1.7).

### 2.1.4 Resultaten hydraulische metingen

Er zijn metingen verricht met een aantal instrumenten, elk met een zeker doel. Het volgende overzicht kan worden gegeven:

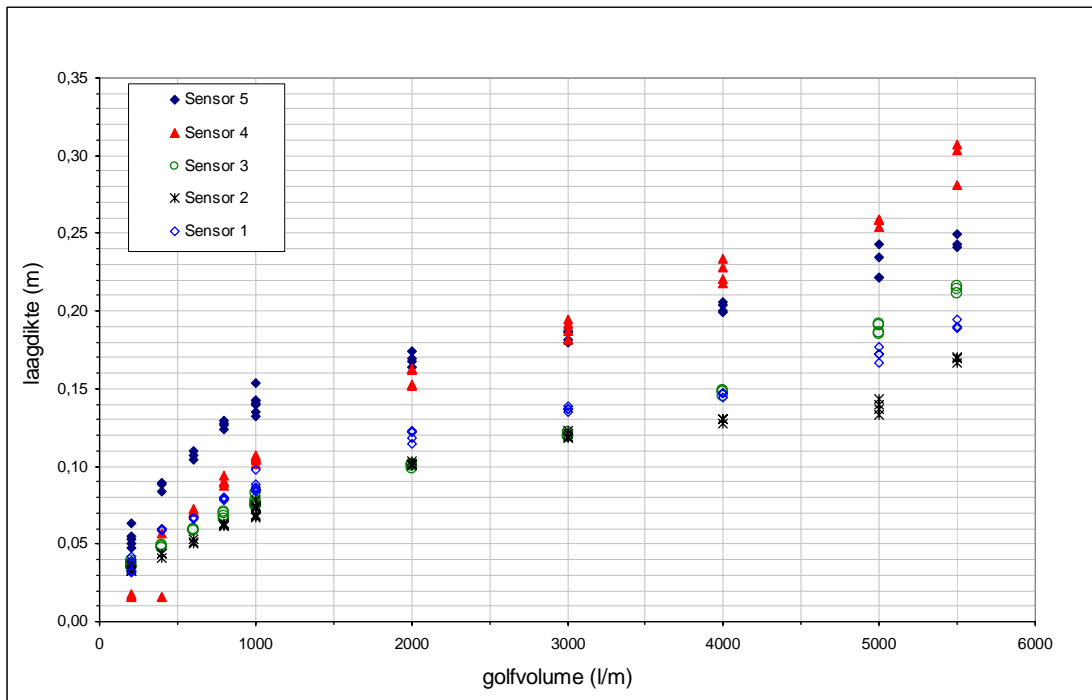
- LDM's: meten laagdikte zonder het luchtgehalte
- EMS'en: meten stroomsnelheid
- VFM: meten luchtgehalte en stroomsnelheid
- DRO's\_laagdikte: meten laagdikte als controle van de LDM's
- DRO's\_turbulentie: meten drukfluctuaties in de stroming

Van elk van de golven is aan de hand van de signalen van de laagdiktemeters de maximale laagdikte, de frontsnelheid en de duur van de golf bepaald. Op basis van starttijdstippen en de afstanden tussen opeenvolgende laagdikteopnemers is de frontsnelheid van de overstortende golf berekend voor de trajecten tussen de laagdiktemeters. Hierbij is de definitie gebruikt van het starttijdstip van de golf zoals reeds uiteengezet in het commentaar bij Figuur 2.3. De gevonden waarden van de laagdikte zijn in figuren (zie Figuur 2.9 e.v.) uitgezet, en wel als volgt:

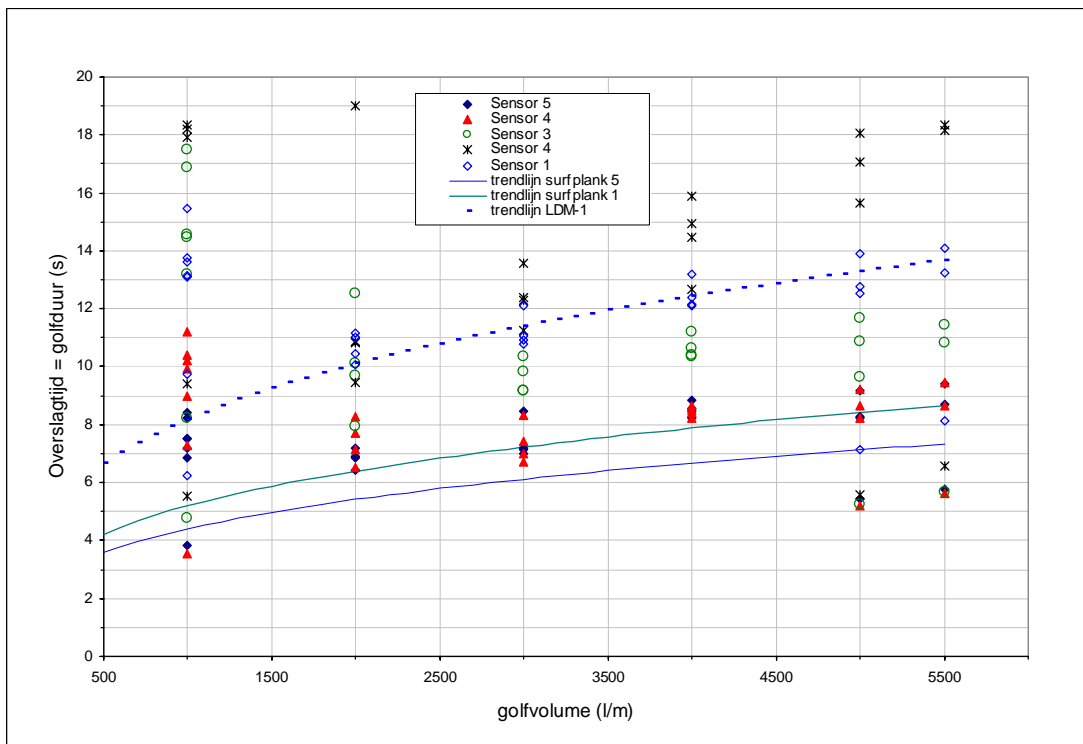
- De relatie tussen overslagvolume en laagdikte
- De relatie tussen overslagvolume en golfduur
- De relatie tussen overslagvolume en berekende frontsnelheid
- De correlatie tussen de laagdikte bij sensor 1 en overige sensoren
- De correlatie tussen de frontsnelheid over traject sensor 5-4 en overige sensor-trajecten
- De relatie tussen berekende frontsnelheid en laagdikte

De gefilterde meetdata (zie paragraaf 2.1.3) worden in grafiekvorm gepresenteerd. Dit wordt grotendeels op dezelfde wijze gedaan als in het Evaluatie rapport Afsluitdijk. Globaal wordt dezelfde volgorde aangehouden: resultaten van LDMr, EMS, DRO en VFM. In sommige figuren wordt data geplot van twee verschillende meetinstrumenten om onderlinge resultaten te kunnen vergelijken. Bespreking van de resultaten van de luchtgehaltemeter volgt later deze paragraaf.

Figuur 2.9 geeft de laagdikte op verschillende posities op het talud (het sensornummer verwijst naar de raai in Figuur 2.2). Uit de data lijkt dat boven aan het talud (sensor 5) de laagdikte groter is dan lager op het talud (sensor 1).



Figuur 2.9 Relatie overslagvolume en laagdikte



Figuur 2.10 Overlagtijden (d.w.z. golfduur) per golfvolume voor  $V \geq 1000$  l/m.

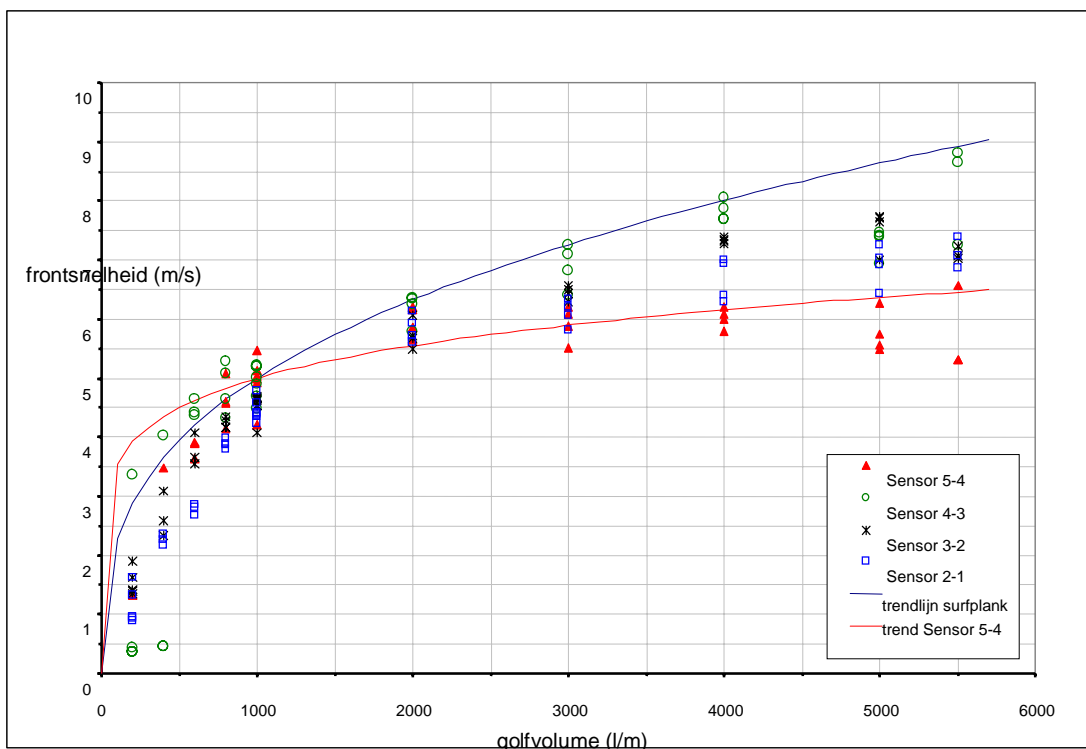
In figuur 2.10 is één trendlijn toegevoegd van de overlagtijd bepaald met laagdiktemeters, namelijk de overlagtijd bepaald op grond van data gemeten met LDM-1. Daarnaast zijn twee trendlijnen aangebracht zoals gevonden met surfplanken 5 en 1 (zie paragraaf 2.2).

Alle drie de verbanden volgen de formule:

$$T_{ovt} = a \cdot V^{0,3} \quad (2.1)$$

waarin  $T_{ovt}$  de overslagtijd, ofwel de duur van de overslaande golf, is in seconden en  $V$  het golfvolume in  $m^3/m$ . De exponent in deze formule is overgenomen van de resultaten van de surfplankmetingen. Voor de trendlijnen van surfplank 1 en 5 gelden respectievelijk de waarden  $a=5,2 s(m^3/m)^{-0,3}$  en  $a=4,4 s(m^3/m)^{-0,3}$ . De trendlijn voor LDM-1, waarvan de locatie overeenkomt met die van surfplank 1, heeft waarde  $a=8,2 s(m^3/m)^{-0,3}$ .

De aanzienlijke verschillen tussen de overslagtijden afgeleid uit surfplank- en laagdiktemeteranalyses zijn in eerste instantie terug te voeren op een verschillende manier van berekenen. Dit heeft betrekking op hoe het einde van de golf gedefinieerd is in de berekening. Desalniettemin lijkt genoemde machtsformule in beide gevallen de relatie golfvolume versus overslagtijd te kunnen beschrijven – zij het dat dit alleen zinvol is voor golfvolumes van minimaal 1000 l/m. Op basis van alleen deze informatie kan geen voorkeur worden uitgesproken voor een van de formules.



Figuur 2.11 Relatie overslagvolume en berekende frontspeed

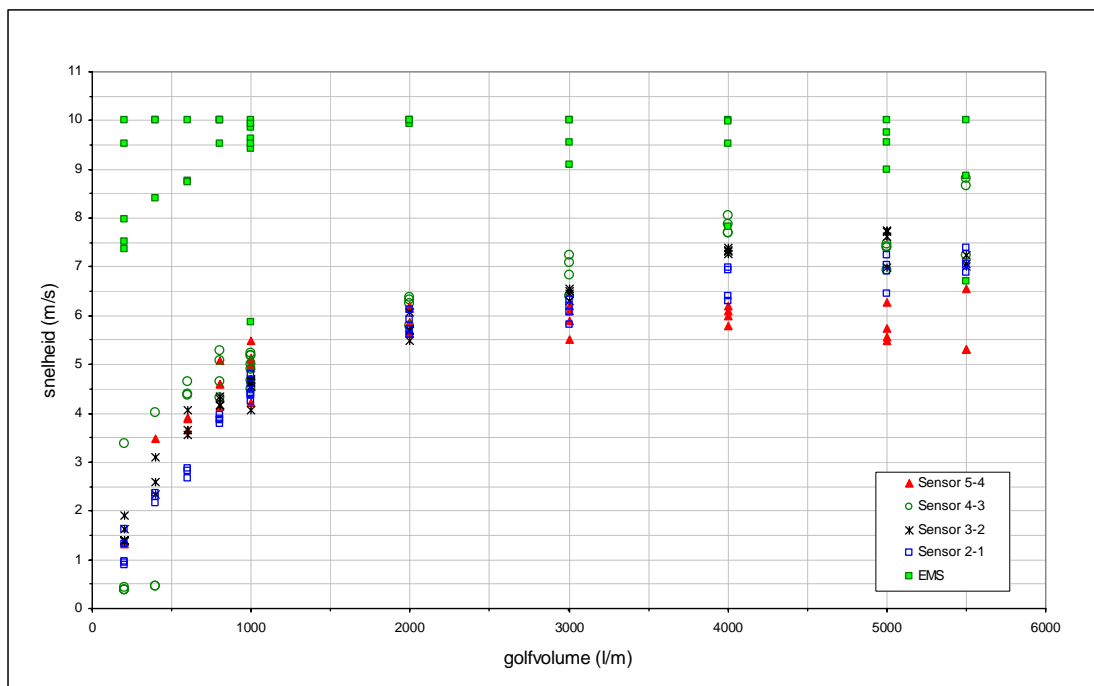
Figuur 2.11 toont trendlijn voor de frontsnelheid in het traject 5-4 is gegeven door de formule

$$U_{front} = 5 \cdot V^{0,15} \quad (2.2)$$

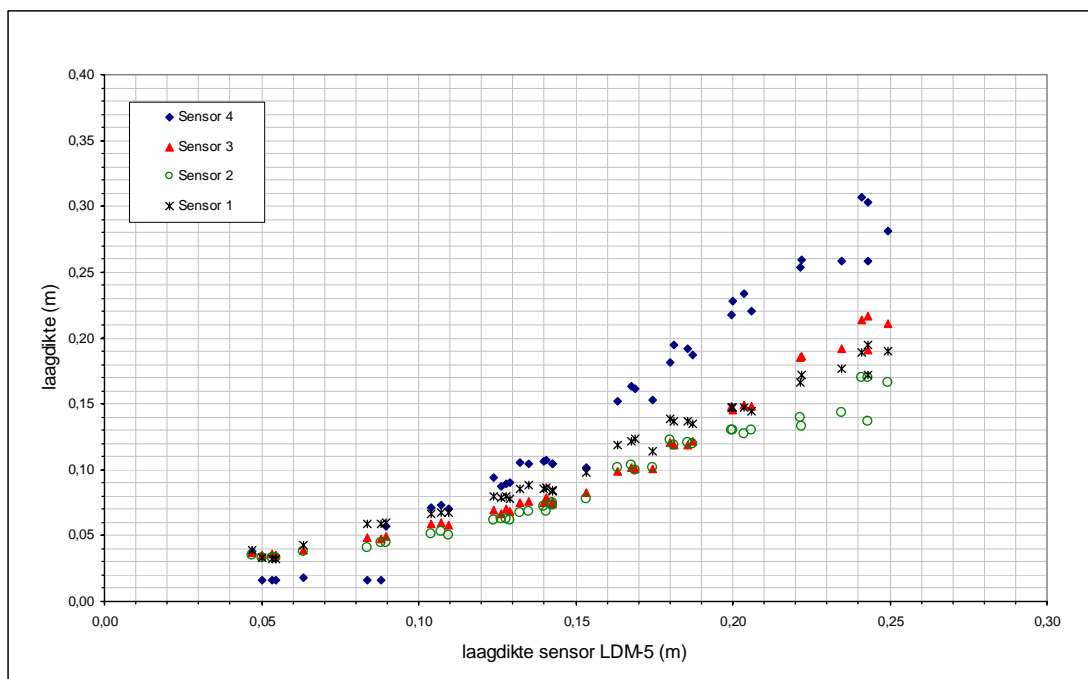
met  $U$  in m/s en  $V$  in  $m^3/m$ . Dit verband is niet geschikt voor golfvolumes kleiner dan 1000 l/m.

Onderstaand zijn meer verbanden in grafiekvorm gepresenteerd op basis van LDM- en EMS-metingen. Deze grafieken hebben dezelfde vorm als in de analyse van de Afsluitdijkmetingen. Figuur 2.12 geeft de snelheden gemeten met de EMS en de frontsnelheden. Hieruit blijkt dat de EMS niet goed heeft gefunctioneerd zoals ook al eerder opgemerkt. Waarschijnlijk zijn de aanwezige luchtbelllen te groot voor goede registraties. Voorgesteld wordt de EMS bij toekomstige metingen niet meer te gebruiken. Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat andere instrumenten niet beïnvloed worden door luchtinsluitingen.

Figuur 2.13 toont de laagdikte op diverse locaties langs het talud ten opzichte van de meting op de binnenkruinlijn (sensor 5). Het blijkt dat sensor 4 op 2 m vanaf de binnenkruinlijn grotere laagdikten registreert. De andere sensoren juist een kleinere laagdikte. Mogelijk is hier sprake van luchtinsluiting bij het loslaten van de overstortende golf op de binnenkruinlijn. Het verschijnsel treedt alleen op voor de grotere laagdikten (dus golfvolumes).



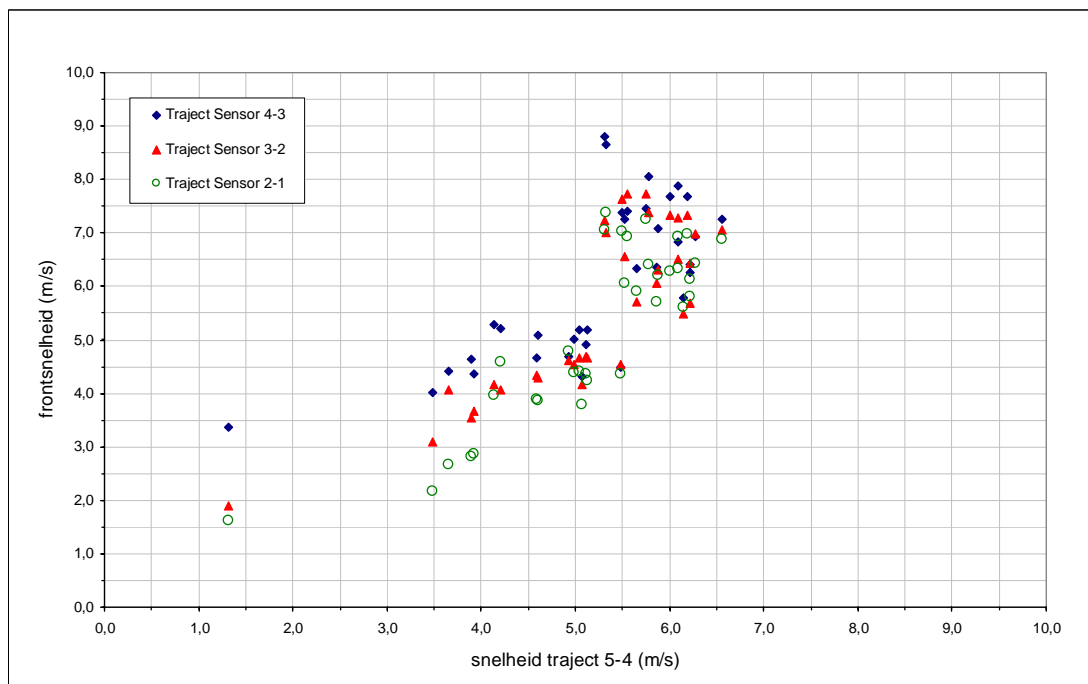
Figuur 2.12 Relatie overslagvolume en berekende frontsnelheid, aangevuld met gemeten snelheid EMS



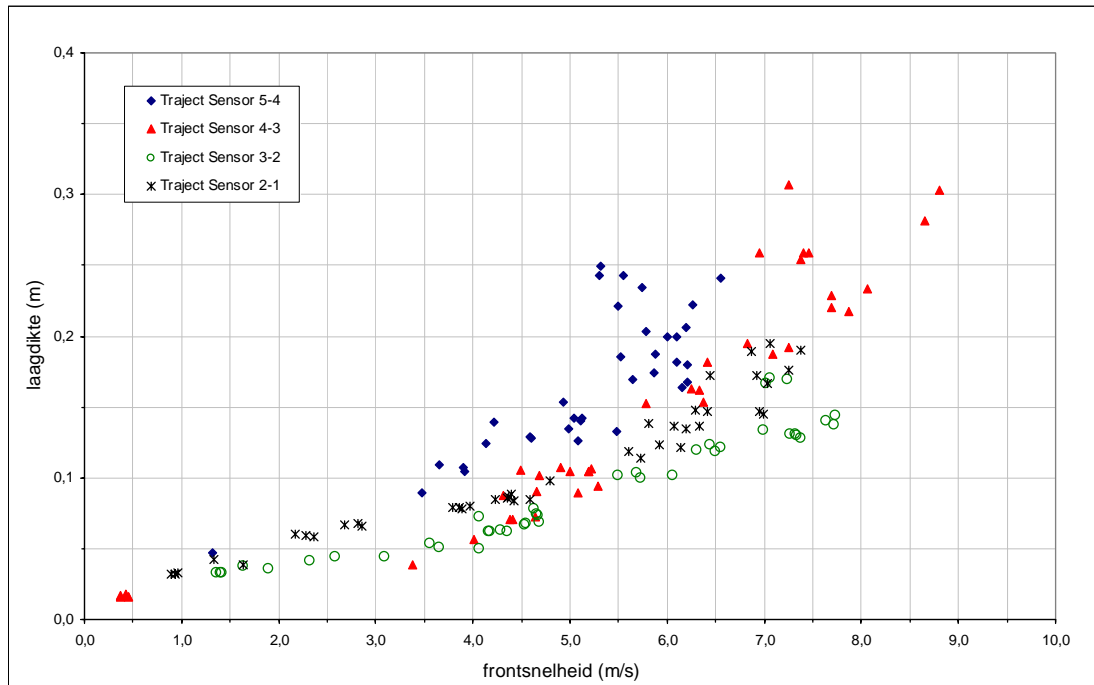
Figuur 2.13 Correlatie laagdikte sensor LDM-5 met overige sensoren

Figuur 2.14 geeft de snelheden lager op het talud ten opzichte van de snelheid op het bovenste traject van het talud. Het is moeilijk vast te stellen maar het lijkt er op dat de golf vertraagt in stroomafwaartse richting van het talud.

Figuur 2.15 geeft de relatie tussen de laagdikte en de frontsnelheid. Op het traject 5-4 boven aan het talud is duidelijk sprake van een grotere laagdikte en dit zou te maken kunnen hebben met het eerder genoemde loslaten van de golf.



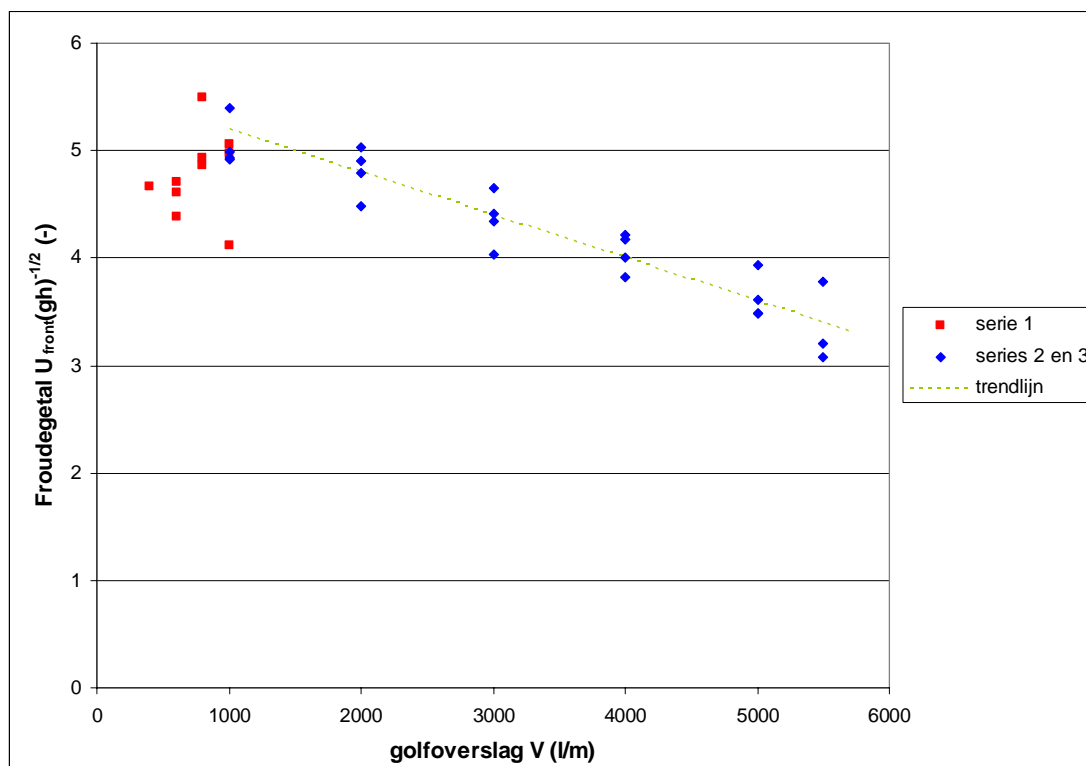
Figuur 2.14 Correlatie frontsnelheid traject sensor 5-4 en overige sensor trajecten



Figuur 2.15 Relatie tussen frontsnelheid en laagdikte op grond van metingen LDM

### 2.1.5 Nadere analyse laagdikte

Met de laagdiktedata is nog een aantal andere zaken te onderzoeken. Ten eerste wordt het Froudegetal besproken, ten tweede worden de laagdiktes gemeten met de LDM vergeleken met de dikte bepaald met de surfplanken. Beide analyses zijn gerelateerd aan het luchtgehalte in de overslag. Ten derde is ook het verband tussen frontsnelheid en laagdikte bijgevoegd.



Figuur 2.16 Froudegetal gebaseerd op frontsnelheid en laagdikte versus overslagvolume

In figuur 2.16 is de getekende trendlijn, gebaseerd op de datapunten van LDM-4 en frontsnelheid over traject 5-4 van series 2 en 3, als volgt:

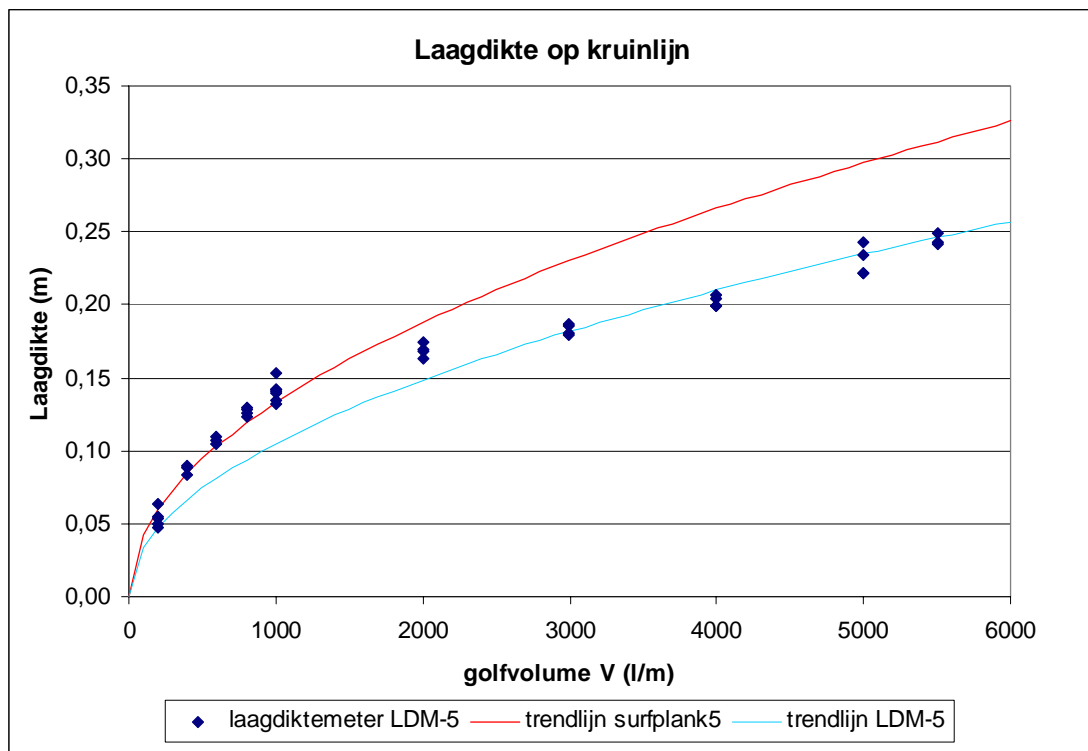
$$Fr = \frac{u_{front}}{\sqrt{gh_{max}}} = 5,6 - 0,4V \quad (2.3)$$

Het Froudegetal  $Fr$  is berekend met laagdikte en frontsnelheid van de overslaggolf en  $V$  het overslagvolume in  $m^3/m$ . Het is een lineair afnemend verband. De geringe variatie in spreiding om de trendlijn –bij benadering is de correlatiecoëfficiënt gelijk aan  $r^2 = 0,7$  – is enigszins opmerkelijk.

Het bepalen van het Froudegetal is in elk geval om twee redenen van belang. Met dit dimensieloze getal wordt de stroming getypeerd; het is een universeel kengetal dat het mogelijk maakt om een stroming te vergelijken met andere stromingen (uit literatuur of andere experimenten). Dit vormt een basis voor de veronderstelling dat stromingen over taluds onderzocht in laboratoriumstudies met hetzelfde Froudegetal, gelijkwaardige eigenschappen vertonen als in de huidige veldmetingen.

De mate van verstoring van het wateroppervlak aangeduid met het Froudegetal is, meer in het bijzonder voor de voorliggende situatie van stroming over een talud, tevens een factor die een rol speelt in de mate van luchtinmenging.





Figuur 2.17 Vergelijking Vechtdijk: laagdikte op kruinlijn met surfplank en met LDM

In Figuur 2.17 is op grond van de aanname:

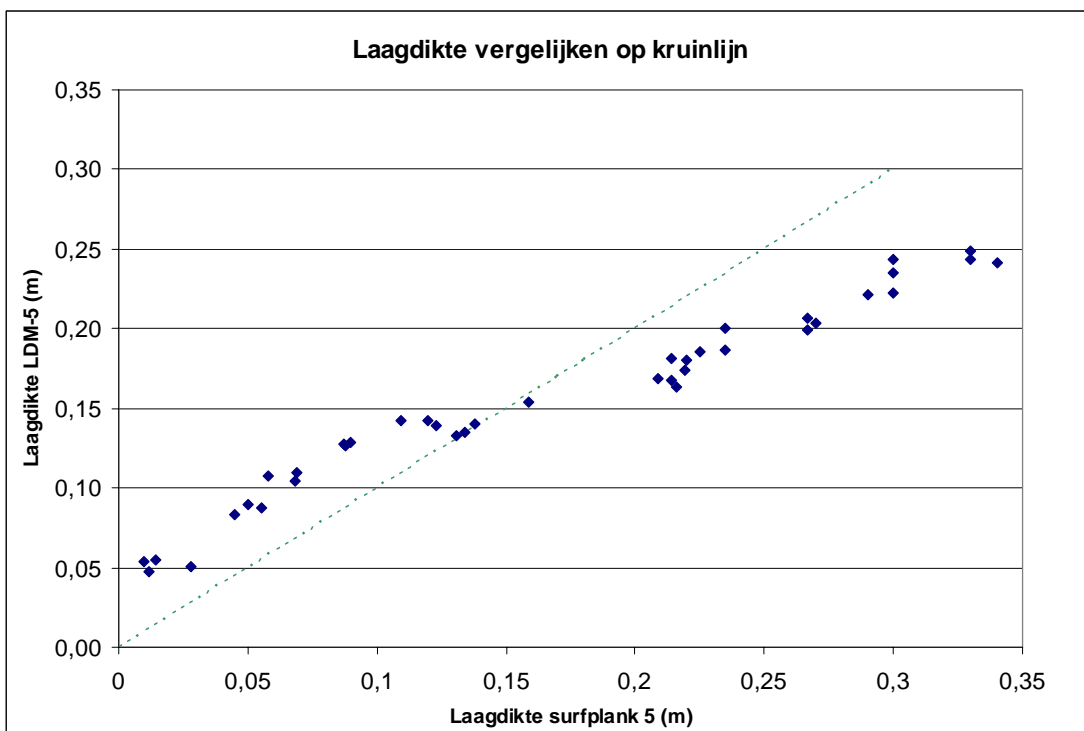
$$h = C \cdot \sqrt{V} \quad (2.4)$$

met  $h$  de laagdikte in m en  $V$  het golfvolume in  $\text{m}^3/\text{m}$ , de trendlijn LDM-5 beschreven met  $C=0,105$  en de getekende trendlijn van surfplank 5 met  $C=0,133$ . Merk op dat constante  $C$  hier inderdaad dimensieloos is.

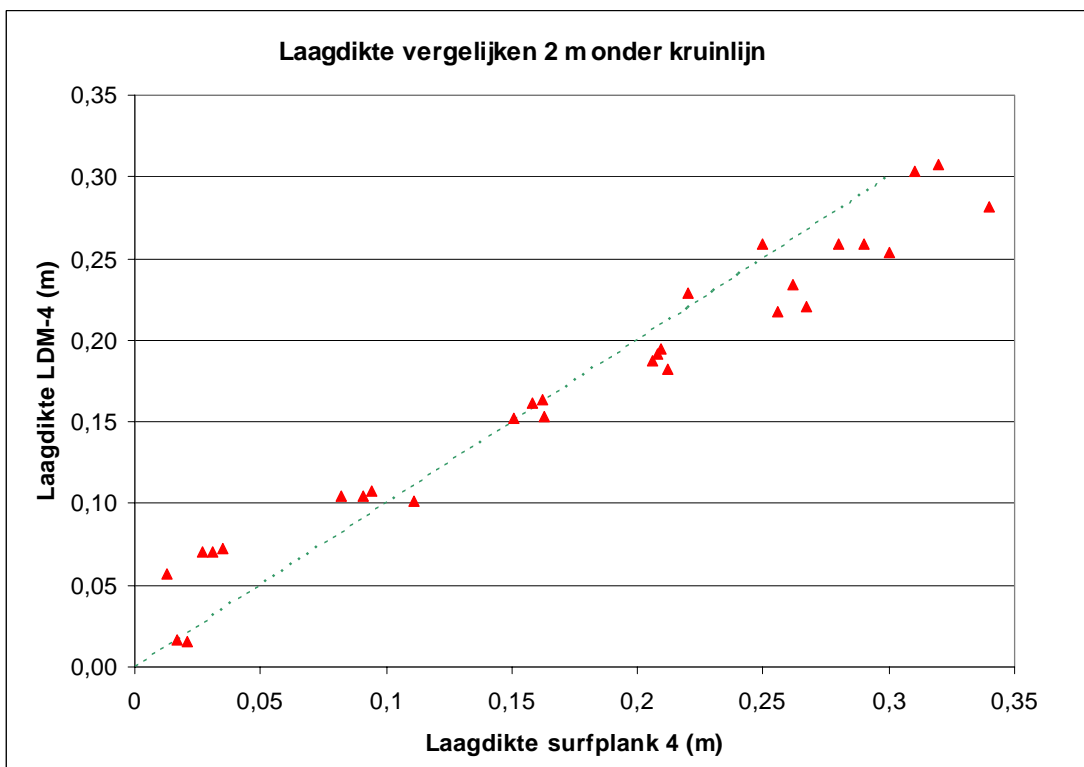
Op grond van deze verschillen wordt geconcludeerd dat er sprake is van een significante luchtinsluiting vanaf 1000 l/s per m; orde 25%.

Voor alle raaien wordt de rechtstreekse vergelijking van laagdiktes gemaakt in de figuren 2.18 t/m 2.22. De diagonale stippellijnen geven de 1:1 lijn weer.

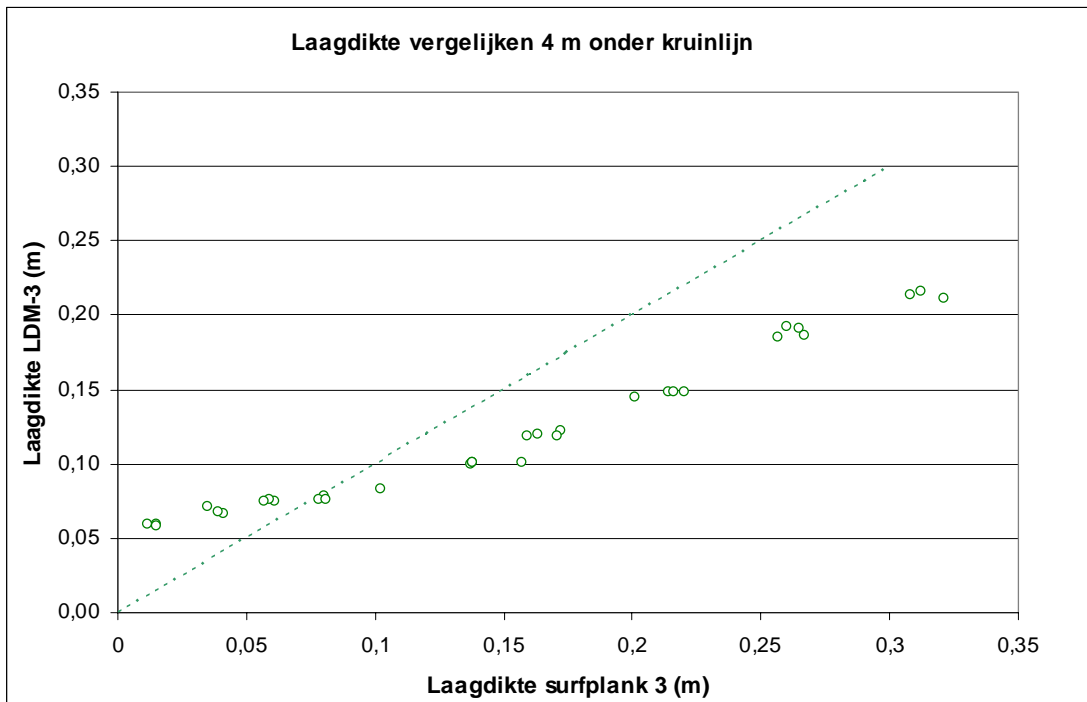
Alle figuren laten duidelijk zien dat de laagdikten volgens de LDM meting groter zijn dan de laagdikten volgens de surfplank met uitzondering van locatie 4, zie Figuur 2.19, wat weer te maken kan hebben met het loslaten. Hier lijkt een luchtinsluiting van 10% het geval.



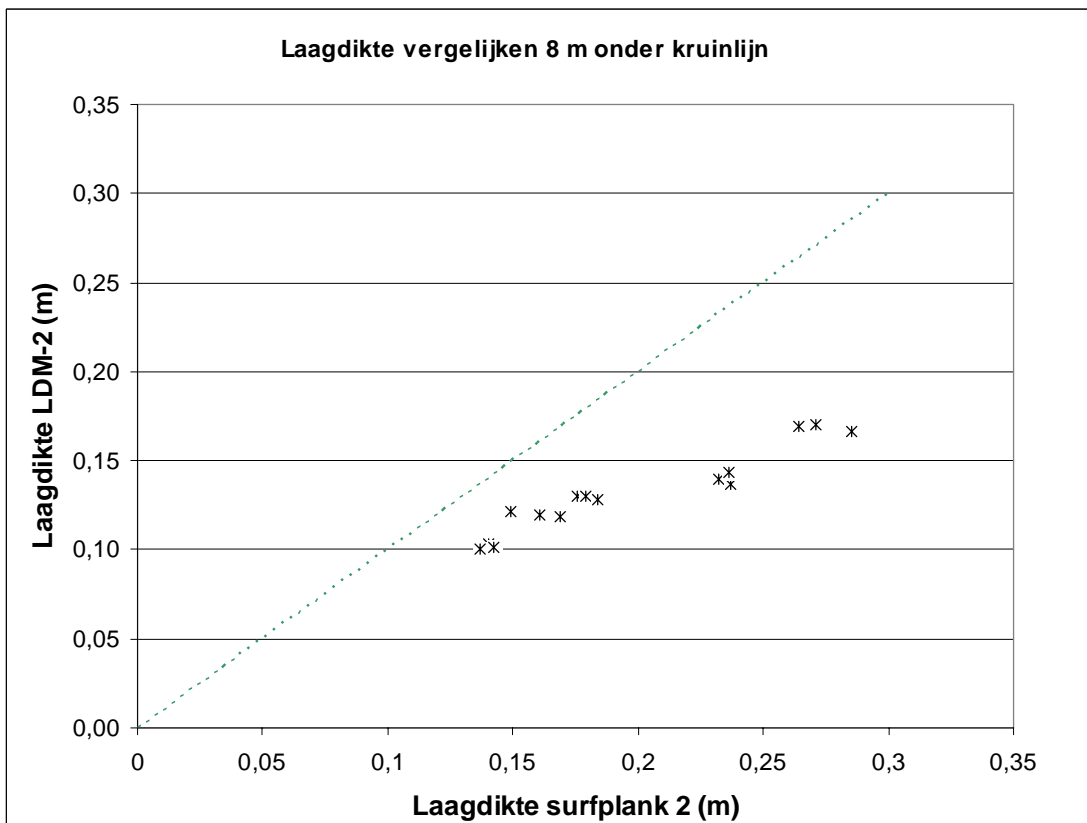
Figuur 2.18 Laagdikte surfplank 5 versus laagdikte LDM-5, locatie is kruinlijn



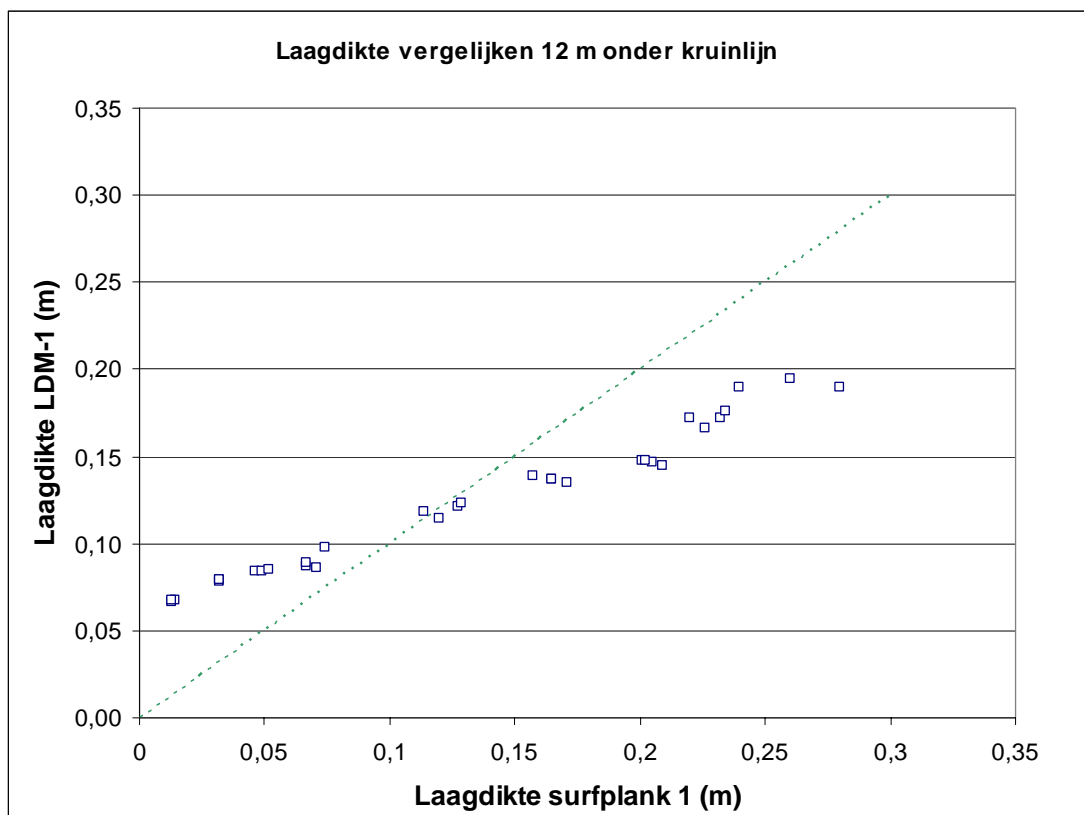
Figuur 2.19 Laagdikte surfplank 4 versus laagdikte LDM-4, locatie is 2m onder kruinlijn



Figuur 2.20 Laagdikte surfplank 3 versus laagdikte LDM-3, locatie is 4 m onder kruinlijn



Figuur 2.21 Laagdikte surfplank 2 versus laagdikte LDM-2, locatie is 8 m onder kruinlijn



Figuur 2.22 Laagdikte surfplank 1 versus laagdikte LDM-1, locatie is 12 m onder kruinlijn

Uit bovenstaande figuren van de laagdiktes kan worden opgemaakt dat het aantal meetpunten varieert. Zo is op meetraai 4 alleen bij sessie 2 gemeten met een surfplank.

Zoals al gezegd: de figuren tonen een terugkerend verband in de verhouding tussen laagdikte gemeten met LDM en surfplankmethode, uitgezonderd meetraai 4. Bij alle raaien wordt, voor waarden boven een bepaalde laagdikte, met de surfplank een hogere laagdikte gemeten. Dit komt overeen met de verwachting van het inmengen van lucht bij de grotere golfvolumes (hogere snelheden en grotere laagdiktes). Een fysische verklaring van verschillen tussen laagdiktes gemeten met surfplank en LDM is immers het feit dat de surfplank de laagdikte inclusief lucht meet en de LDM exclusief lucht.

Interessant aspect hierbij zijn de punten, dat wil zeggen de laagdiktes, waarbij luchtinmenging in de overslaggolf begint op te treden. In elke figuur behalve raai 2 snijdt de meetpuntenwolk de 1:1 lijn. De 'omslagpunten' op deze snijpunten kunnen een indicatie zijn van de golfoverslagconditie waarbij juist voldoende golfvolume naar beneden stort om luchtinmenging in de golf te krijgen. Variatie van omslagpunten met de meetposities (naar beneden raai 1 t/m 5) kan informatie geven over het proces van de luchtinmenging. Zie Tabel 2.2. Voor de tabel is niet geïnterpoleerd: er is gekeken naar meetpunten zo dicht mogelijk bij de 1:1 lijn en de volumes waarbij deze punten zijn gemeten.

Een te onderzoeken hypothese in deze context is of loslating van de stroming bij de binnenkruinlijn bepalend is voor de luchtinmenging in de overstortlaag. Het proces van luchtinmenging in de waterlaag en de bijbehorende turbulentieniveaus is van rechtstreeks belang voor een goede modellering van de golfbelasting (en de daaruit volgende erosie) op

het grastalud. Als we meer weten over de condities waaronder luchtinmenging een rol begint te spelen, dan is dat mogelijk een goede stap voorwaarts.

<b>omslagpunt</b>		
<b>raai</b>	<b>laagdikte (m)</b>	<b>overslagvolume (l/m)</b>
<b>5</b>	0,15	1000
<b>4</b>	0,15	2000
<b>3</b>	0,08	1000
<b>2</b>	niet gemeten	niet gemeten
<b>1</b>	0,11	2000

Tabel 2.2 De 'omslagpunten' per meetraai waarbij de laagdiktes gemeten met surfplank nog net gelijk zijn aan de laagdiktes gemeten met laagdiktemeter

Factoren die het lastig maken om conclusies te trekken uit de omslagwaarden en daardoor om de beschreven hypothese te bevestigen dan wel te weerleggen, zijn de volgende. De meetonnauwkeurigheden van de metingen bij golfvolumes lager dan  $V \approx 1000$  l/m; de volumes van de omslagpunten liggen in dezelfde range. Ten tweede is het waargenomen effect van 'opspringen' van de surfplanken, wat een onzekerheid in de laagdikte introduceert, van kracht bij de grotere laagdikten. Dit zou, naast het fysische proces van luchtinmenging in de stroming, een oorzaak kunnen zijn van de oplopende verschillen tussen laagdiktes gemeten met surfplank en LDM bij groter wordende laagdiktes.

Analyses zoals deze dragen wel bij aan een toenemend begrip over het mechanisme van luchtinmenging en daarbij turbulentieopwekking bij overslag op binnentalud.

#### *Verband frontsnelheid en laagdikte*

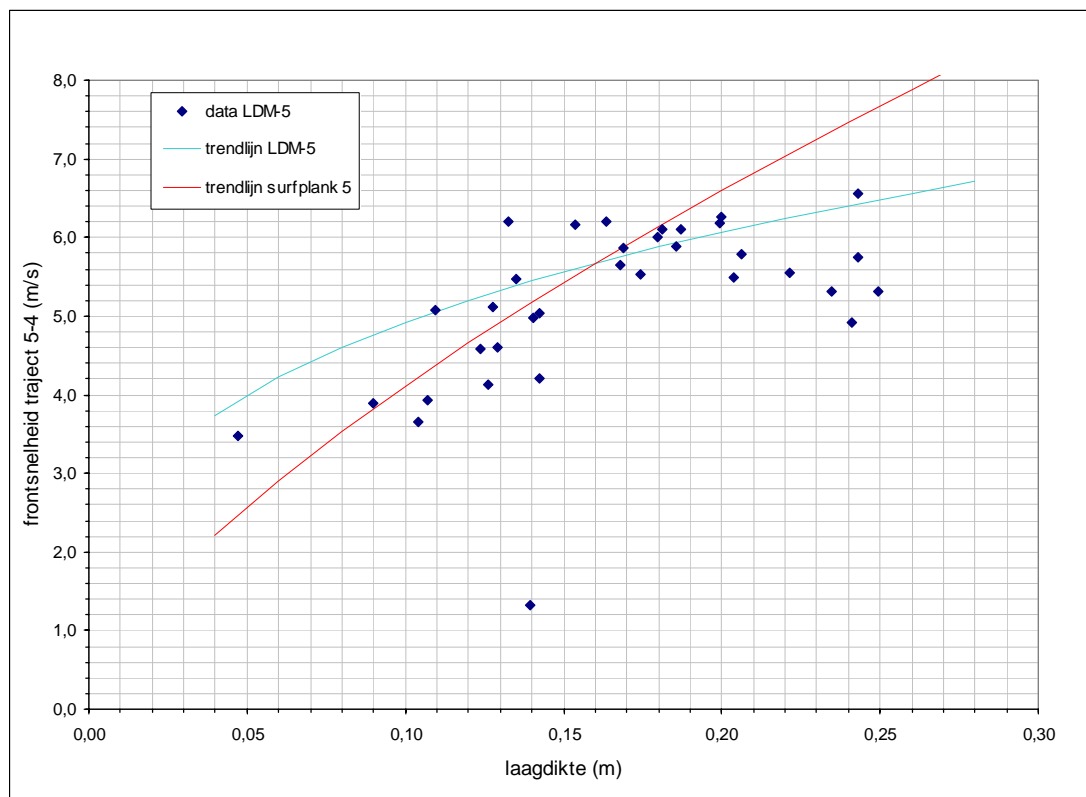
In bovenstaande analyses van de meetdata van de laagdiktemeters kan uit de trendlijnen voor  $h(V)$  en  $U_{front}(V)$  respectievelijk net onder de kruinlijn en op het traject 5-4 analytisch worden afgeleid dat moet gelden

$$U_{front1-2} = 9,83 h^{0,30} \quad (2.5)$$

In de analyse van de surfplankmetingen is op analoge wijze gevonden dat geldt

$$U_{front} = 19,7 h^{0,68} \quad (2.6)$$

In deze formules is  $U$  in m/s en  $h$  in m. Beide verbanden geplot in een figuur met laagdikte versus frontsnelheid vlak onder de kruin, ziet er als volgt uit:

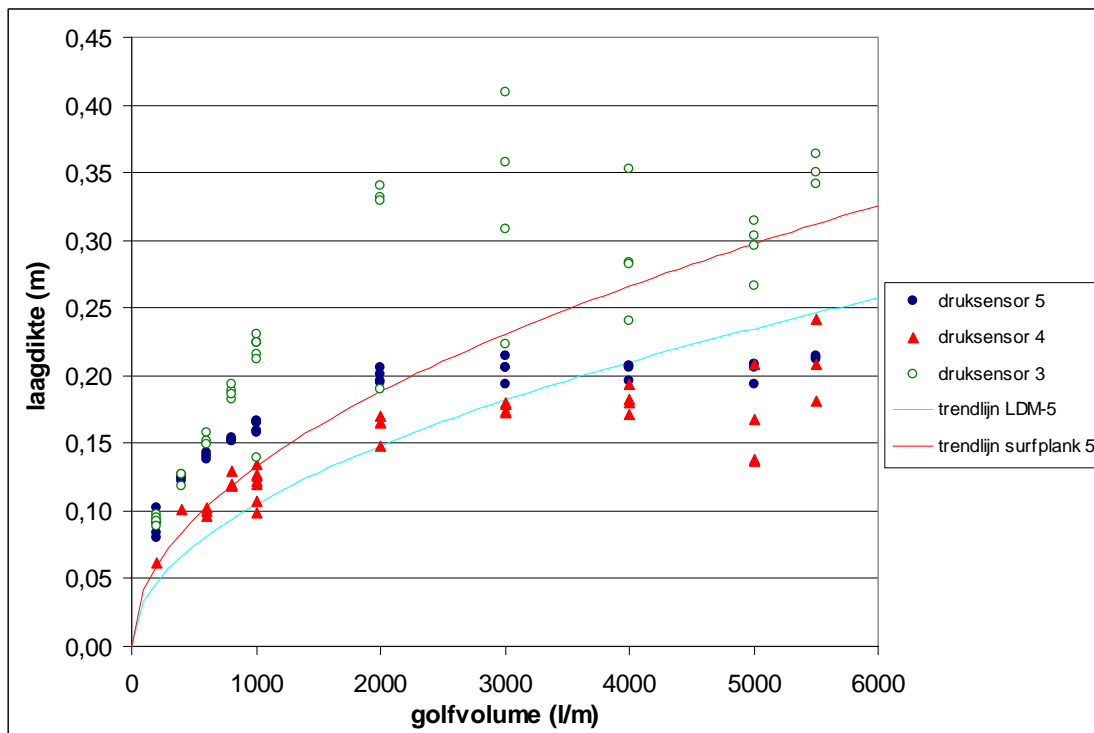


Figuur 2.23 Laagdikte LDM-5 versus frontsnelheid volgens LDM over traject 5-4, met trendlijnen LDM en surfplank

De meetdata vertoont –op deze manier uitgezet althans– een grote spreiding zonder duidelijk verband. Geen van beide afgeleide trendlijnen geeft een adequate beschrijving van de datawolk. Op basis van consistentie van verschillende grootheden lijkt de beschrijving volgens de surfplank de beste benadering.

### 2.1.6 Drukmeting laagdikte

Figuur 2.24 is verkregen door de maximale gemeten druk met de drie druksensoren van elke gepasseerde golf om te rekenen naar een laagdikte. Dit is gebeurd via de omrekening  $p = \rho gh$  (aanname hydrostatische drukverdeling). In de figuur zijn de trendlijnen getekend van de surfplank en LDM beide op de hoogste locatie (raai 5).

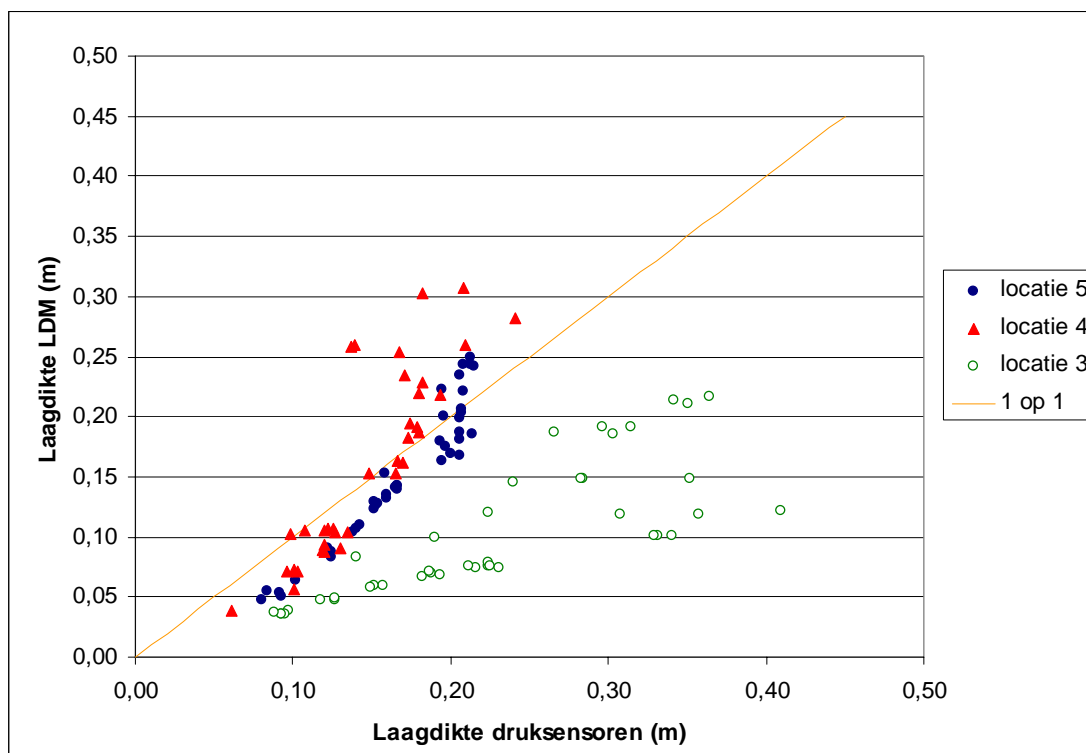


Figuur 2.24 Laagdikte afgeleid uit data druksensoren op talud

De laagdiktes afgeleid uit de data van druksensor 5 hebben zeer weinig gelijkenis met beide trendlijnen. Opvallend is dat de druk van druksensor 5 voor golfvolumes groter dan 2000 l/m niet verder toeneemt. Dit terwijl duidelijk is waargenomen en vastgelegd met surfplank en LDM, dat de laagdikte wel degelijk groter wordt voor grotere volumes. Verder is het opmerkelijk dat druksensor 3, met name voor de grotere volumes, een flinke spreiding vertoont. Bij gelijke golven van  $V=3000$  l/m geeft druksensor 3 laagdiktes variërend van 0,23m tot 0,36m. Dit is een aanzienlijke range, hetgeen weinig vertrouwen geeft in de meetmethode.

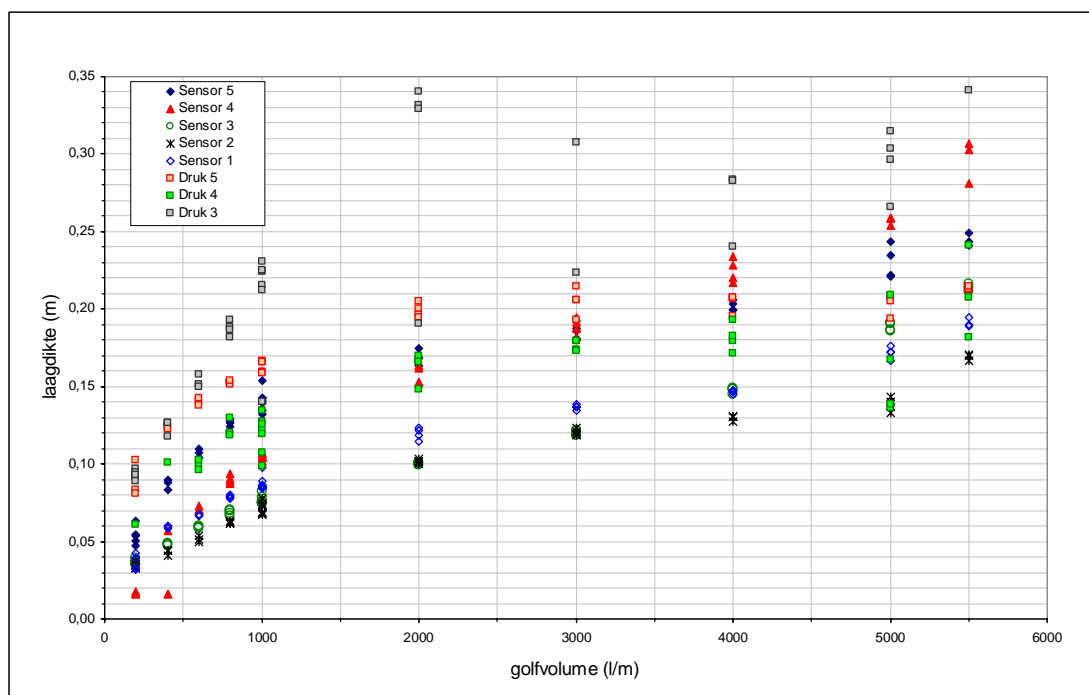
De moeilijkheid inherent aan het bepalen van een waterdiepte aan de hand van een drukmeting is dat een stilstaande waterlaag een andere druk bij de bodem oplevert dan een waterlaag van gelijke dikte in turbulent stromend water. Hoe meer variatie in de snelheid in de waterlaag aanwezig is, des te grilliger zal het druksignaal zijn en des te groter in de regel de spreiding in de berekende laagdikte.

Figuur 2.25 laat zien dat druksensor 3 een over de hele linie relatief (te) grote laagdikte geeft ten opzichte van de laagdiktes gemeten met LDM. De andere twee druksensoren geven voor de grotere volumes juist een relatief kleine laagdikte.



Figuur 2.25 Vergelijking laagdikte berekend met data druksensoren versus laagdikte met LDM gemeten

Tot slot een figuur met alle laagdiktedata afkomstig van LDM en druksensoren, uitgezet tegen volume, zie figuur 2.26. De data van beide meetmethoden liggen ver uit elkaar. Geconcludeerd wordt dat de DRO's voor controle van de laagdikte niet bruikbaar zijn.



Figuur 2.26 Totaal overzicht laagdikte van LDM en druksensoren



## 2.1.7 Resultaten metingen met luchtgehaltemeter (VFM)

### *Introductie*

In de handleiding van de VFM wordt een uitvoerige beschrijving gegeven van de fysische werking van het meetinstrument. Kort gezegd meet de VFM welk deel van de tijd er lucht voorbij komt, en welk deel water. De verhouding van de twee over een bepaalde (te kiezen) tijdsduur levert het luchtgehalte in de stroming. De gemiddelde snelheid van de stroming over die periode volgt uit de cross-correlatie tussen de twee meetnaalden van de VFM.

Voor een literatuurstudie naar luchtgehalten in allerlei soorten stroming wordt verwezen naar de rapportage van fase 3D, Evaluatie Afsluitdijk.

### *Opzet en aanpak*

De vraagstelling specifiek voor de metingen met de VFM zijn:

- Wat is het luchtgehalte, ook wel 'void fraction', of 'air content', in de overstortende golf?
- Welke snelheden treden op in de golf en welke statistische parameters van de snelheid (als maat voor turbulentie) kunnen hieruit worden afgeleid?
- Hoe geschikt is de VFM voor metingen in het veld. Eén manier om hier iets over te zeggen is door de meetresultaten van de VFM te vergelijken met de metingen van de andere instrumenten.

Ter voorbereiding zijn in het laboratorium referentieproeven gedaan met de VFM met behulp van de kleine golfoverslagsimulator. Weliswaar konden hierbij kleinere maximum volumes gesimuleerd worden en was er geen sprake van een talud maar van een vlakke afstroming; toch werd hiermee een beeld verkregen van de signaalsterkte en kwaliteit van de uitvoer.

### *Uitvoering van metingen VFM*

Er is extra voorzichtigheid in acht genomen met betrekking tot het gebruik van de VFM naar aanleiding van de ervaringen van vorige keer. Toch bleef regelmatig gras steken aan de haken aan weerszijden van het instrument en aan de meetnaalden zelf. In tegenstelling tot de vorige proevenserie (Afsluitdijk) is tijdens de metingen echter geen zichtbare schade ontstaan aan de meetnaalden. Het is mogelijk dat de metingen zijn verstoord door kleine afwijkingen ten opzichte van hun oorspronkelijke oriëntatie zonder dat dit met het oog zichtbaar was.

### ***Kwaliteit meetdata***

Bij het interpreteren en verwerken van de meetdata van de VFM is gebleken dat twee factoren aandacht verdienen. Dit is ten eerste het feit dat er op twee verschillende hoogtes is gemeten en ten tweede het ondermaats functioneren van één van de meetkanalen. Deze factoren worden achtereenvolgens besproken alvorens de meetresultaten zelf aan bod komen.

#### *(1) Variatie in verticale meetpositie*

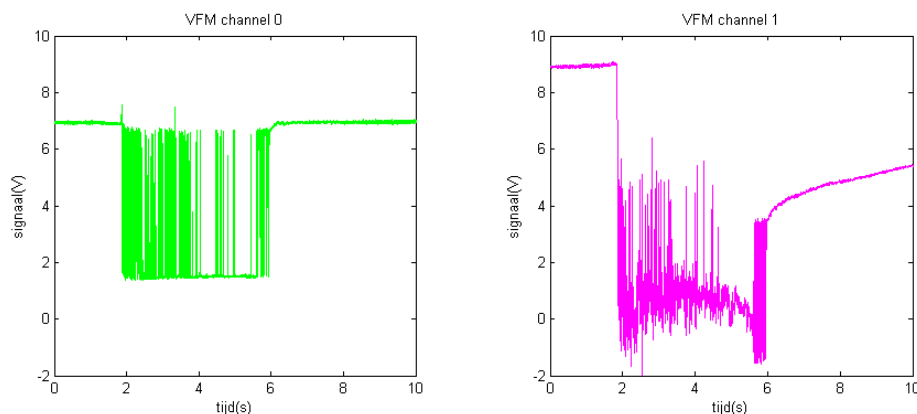
De sensoren van de VFM stonden op  $z=5\text{cm}$  en  $z=10\text{cm}$  boven maaiveld. Het doen van metingen op twee verschillende hoogtes boven het maaiveld is niet een factor die direct de kwaliteit van de metingen aantast. Het maakt interpreteren van de data desalniettemin ingewikkelder. Een reden om de meetnaalden niet te dicht bij de grond te plaatsen is hun kwetsbaarheid. Hoe dicht bij de grond, hoe groter doorgaans de kans dat ze worden geraakt door losgeslagen stukken gras en grond en al het materiaal dat ook in het opgepompte water zit.

In de eerste serie golven zijn de laagdiktes in een aantal gevallen te gering om op  $z=10\text{cm}$  te kunnen meten. Als een passerende golf de meetnaalden maar heel kort raakt, levert dit geen betrouwbare meting op. Het signaal is dan te kort om een gemiddeld luchtgehalte over 1,0s te kunnen berekenen. De eerste drie golven van 200 l/m waren zelfs te dun om goed te kunnen meten vanaf  $z=5\text{cm}$ . Deze drie metingen staan volledigheidshalve in de overzichtstabel maar zijn weggelaten in verdere analyse en figuren. De waarden van deze metingen zijn niet betrouwbaar.

Eén mogelijke aanpak zou zijn om de luchtgehaltemetingen van golfoverslagvolumes kleiner dan bijvoorbeeld 1000 liter te negeren. Hiermee zou een groot deel van de beschikbare data wegvallen. Afgezien van de eerste drie metingen bij 200 l/m, is er echter geen reden om te veronderstellen dat alle gemeten luchtgehalten van volumes onder de 1000 l/m onbetrouwbaar zijn. De laagdiktes van golfoverslagen meer dan 200 l/s waren goed meetbaar. Hier wordt dus niet de keuze gemaakt om de eerste meetserie van  $z=5\text{cm}$  te negeren. In de vorige proevenserie (de 2009-metingen aan de Afsluitdijk) is immers net als nu op  $z=5\text{cm}$  en  $z=10\text{cm}$  gemeten met de VFM. In de hierop volgende bespreking van de meetresultaten wordt expliciet rekening gehouden met de twee verschillende verticale meetposities van de VFM.

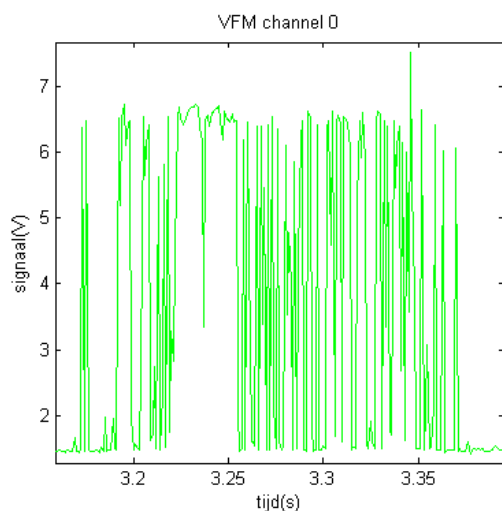
### (2) Slecht functionerend meetkanaal

De eerste bevindingen, na bestudering van een aantal kleine en grote golven, suggereren dat één van de twee kanalen een sterk verminderde kwaliteit data heeft geproduceerd. Het signaal vertoont niet de karakteristieke 'streepjescode'-vorm en verloopt tijdens de passage van de golf. Dit is zichtbaar in de rechterfiguur van Figuur 2.27. Het is om deze reden uit dit signaal niet af te leiden wanneer lucht dan wel water de meetnaald heeft gepasseerd.



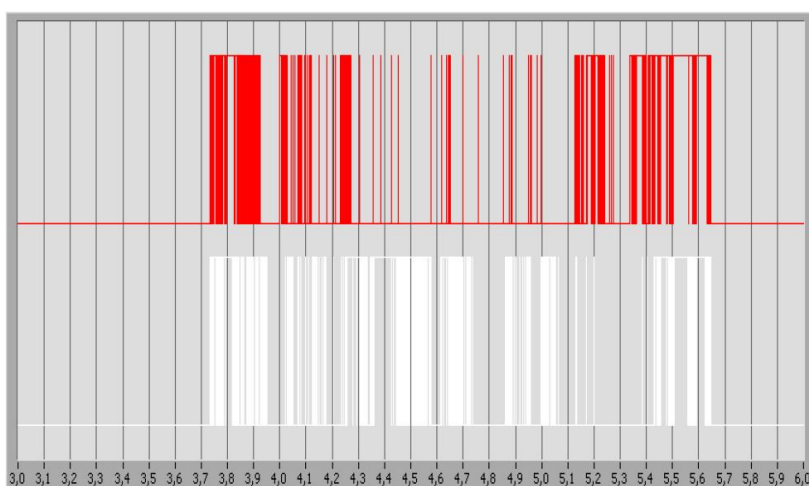
Figuur 2.27 Voorbeeld van VFM-signalen (serie 2, golf 3000a)

Het signaal in de linkerfiguur van Figuur 2.27 vertoont gelukkig wel de verwachte vorm van een streepjescode. De golfpassage wordt hierin zoals het hoort gekarakteriseerd door een nagenoeg binair signaal dat aangeeft wanneer de meetnaald in contact is geweest met lucht dan wel water. Voorafgaand en na afloop van de golf wordt lucht gemeten en is het signaal constant (op ongeveer 7V). Bij passeren van de overslag golf springt het signaal op en neer tussen 7V (lucht) en 1.8V (water). Begin en einde van de golf zijn zodoende goed te bepalen. Steeksproefgewijze vergelijking, hier niet expliciet bijgevoegd, van aldus te bepalen golfduur ( $t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}}$ ) met de eerder met de LDM's afgeleide duur van de golven blijkt goed te kloppen.



Figuur 2.28 Detail van VFM-sigitaal kanaal 0 (serie 2, golf 3000a)

De orde grootte van luchtinmenging in stromingen van dit type, gekarakteriseerd door vergelijkbaar Froudegetal (Chanson 2004), wordt globaal verwacht te liggen in het bereik 15% – 40%. Gemeten waarden die hier duidelijk van afwijken zijn fysisch moeilijk te verklaren. Dit is een argument om de waarden afgegeven door kanaal 0 wel te vertrouwen en dat van kanaal 1 niet.



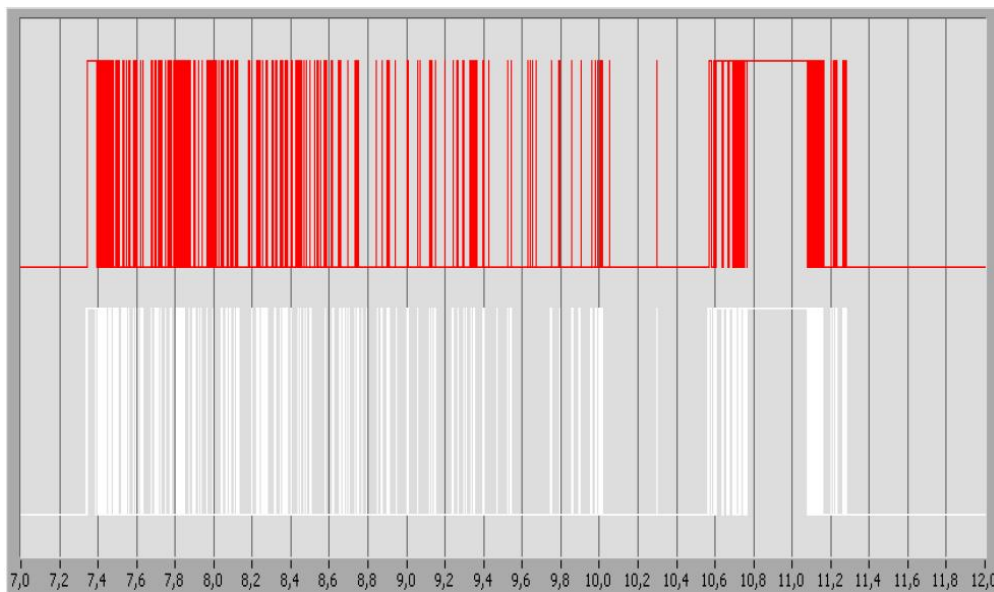
Figuur 2.29 Voorbeeld van VFM-sigitaal van kanaal 1 (rood) en kanaal 0 (wit). Dit is golf 1000e van serie 2. Horizontaal staat de tijd in seconden en verticaal de binaire water(=hoog) / lucht(=laag)-waarde

In figuur 2.29 is te zien dat de opeenvolging van streepjes van beide kanalen geheel anders is. De hier met het oog waargenomen verschillen geven al aan dat er sprake is van zeer lage correlatie tussen de twee signalen. En dit blijkt inderdaad het geval te zijn in de analyse van de cross-correlatiediagrammen.

Aangetoond is dat de afwijkende, moeilijk interpreteerbare data zoals gezien in Figuur 2.29 en de afwijkende epsilon-waarden gevonden met de ISO-software, afkomstig zijn van

hetzelfde kanaal en dus veroorzaakt door dezelfde meetnaald. Deze check is gedaan voor diverse golven.

De verschillen tussen de twee kanalen van de veldmetingen kunnen worden vergeleken met de signalen die bij de proefmetingen met de VFM in het laboratorium zijn gevonden. Zie Figuur 2.30.



Figuur 2.30 Voorbeeld van succesvolle laboratoriumproef: "streepjescode"-datasets van kanaal 1 (boven) en kanaal 0 (onder). Dit is een figuur gemaakt met de ISO-software

De twee signalen in deze figuur vertonen een veel grotere gelijkheid tussen de opeenvolging van luchtbel passages in de tijd. Dit wordt bevestigd door berekende correlatiespectra van de laboratoriummetingen, zie bijvoorbeeld Figuur 2.31.

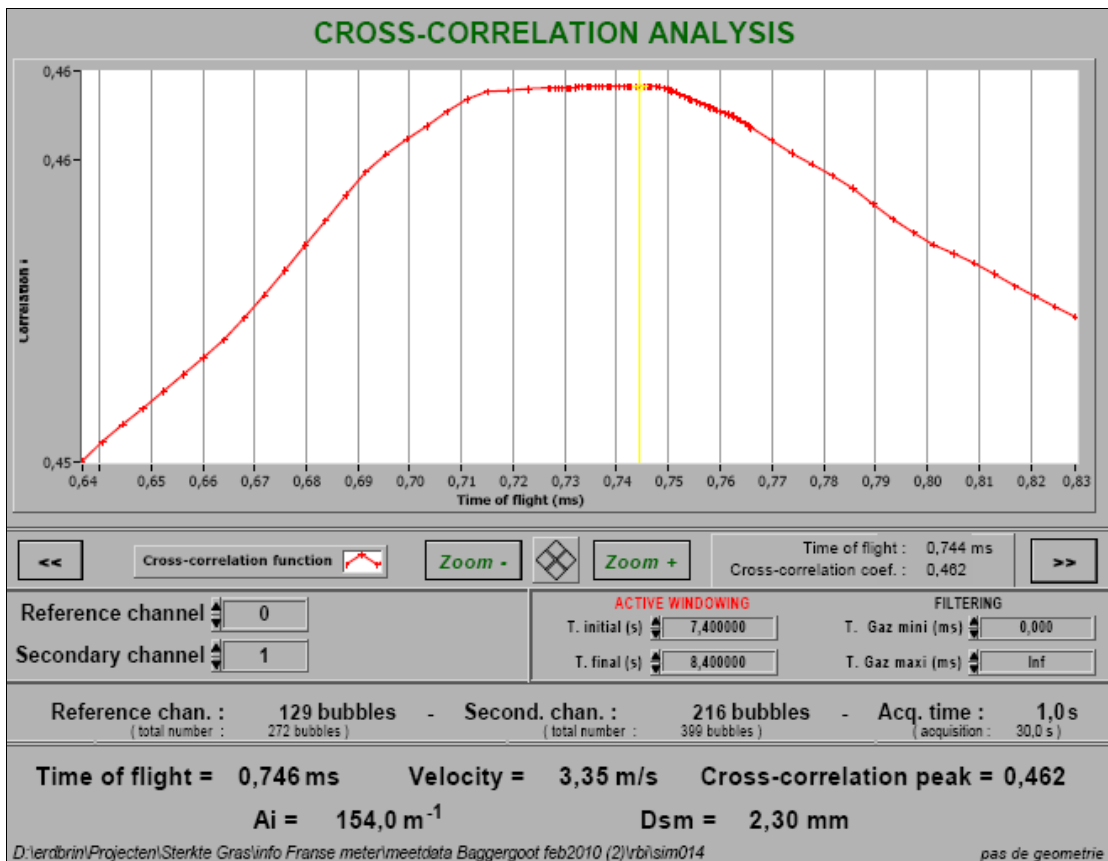
Het is duidelijk dat in het laboratorium deze grote verschillen niet aanwezig zijn. Is hier sprake van verklaarbare meetonzekerheden en meeton nauwkeurigheden? Bijvoorbeeld ten gevolge van gras en kleine deeltjes in het water, die in het laboratorium afwezig zijn? Het is aannemelijker dat één van de twee meetnaalden, dat wil zeggen de naald die correspondeert met kanaal 1, is beschadigd aan het begin van de veldproeven (of zelfs reeds tijdens transport) en dientengevolge zeer lage kwaliteit data heeft voortgebracht. Anders dan op de Afsluitdijk is overigens niet de fout gemaakt om het talud voor aanvang van de hydraulische metingen 'schoon te spoelen' terwijl de instrumenten al langs het talud geïnstalleerd zijn.

#### *Conclusie datakwaliteit VFM*

De afwijkende waarden van kanaal 1 kunnen niet anders uitgelegd worden dan in zijn geheel onbetrouwbaar. Ze liggen buiten de voorspelde range van waarden en het signaal verloopt sterk tijdens de meting. De conclusie is dat kanaal 1 niet wordt gebruikt voor het bepalen van luchtgehalten, maar kanaal 0 wel.

Het teleurstellende gevolg van het haperende meetkanaal is dat er geen betrouwbare cross-correlatie uitgevoerd kan worden en voorts geen goede informatie over snelheden kan worden afgeleid. Voor de volledigheid is de gemiddelde snelheid over de tijdspanne  $\Delta t$  van steeds 1 seconde toch berekend. Het moge duidelijk zijn dat het resultaat, de laatste kolom in

Tabel 2.3, inderdaad van slechte kwaliteit is. Uit eerdere (gemeten, berekende en waargenomen) bevindingen is namelijk bekend dat de snelheden langs het talud grofweg in de orde 1-7 m/s liggen. Omdat de snelheden in de tabel zoals gezegd gemiddeld zijn, is niet aannemelijk dat de waarden heel klein ( $<0,5$  m/s) of negatief zouden kunnen zijn. Hieronder een karakteristieke cross-correlatiefiguur van de lab-proeven. Dit toont de diagram zoals deze zou moeten zijn.



Figuur 2.31 Screenshot van analyse met ISO-software van succesvolle proefmeting VFM in laboratorium

De figuur toont een spectrum: horizontaal de tijdsduur van passage tussen de twee meetnaalden en verticaal (hier slecht leesbaar) de cross-correlatiecoëfficiënt. Hieruit wordt in dit geval een over de tijd ( $t=7,4$ s tot  $t=8,4$ s) gemiddelde stroomsnelheid afgeleid van 3,35 m/s.

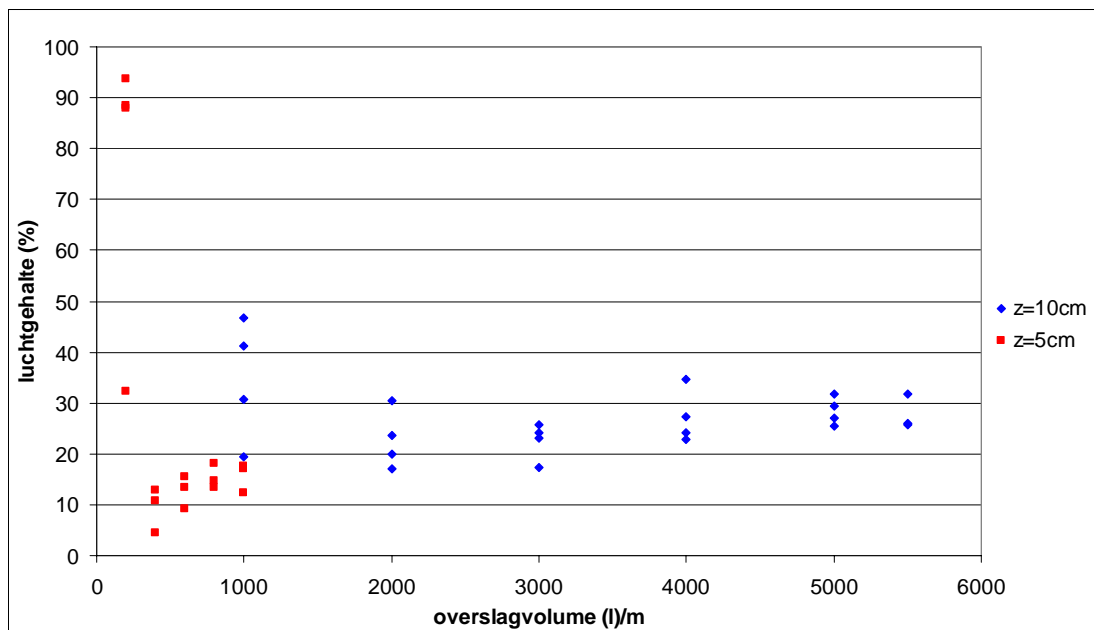
serie	golf	volume	geanalyseerde tijd $\Delta t$ (s)	begintijd (s)	eindtijd (s)	void Channel 0		void Channel 1		snelheid (m/s)
						void fraction (%)	bubble number	void fraction (%)	bubble number	
1	200_a	200	1,00	7,30	8,30	88,46	117	91,10	131	2,07
1	200_b	200	1,00	8,20	9,20	87,88	144	91,05	149	2,57
1	200_c	200	1,00	8,70	9,70	93,65	85	95,33	83	2,42
1	200_d	200	1,00	4,55	5,55	32,17	146	71,23	240	1,66
1	400_a	400	1,00	5,80	6,80	12,80	1868	28,47	311	0,09
1	400_b	400	1,00	3,05	4,05	10,73	732	30,11	294	-6,08
1	400_c	400	1,00	5,00	6,00	4,59	181	23,77	287	-0,22
1	600_a	600	1,00	3,60	4,60	9,29	847	16,13	259	0,65
1	600_b	600	1,00	3,40	4,40	15,59	1205	17,87	257	0,21
1	600_c	600	1,00	5,35	6,35	13,41	850	29,44	326	0,03
1	800_a	800	1,00	5,05	6,05	18,24	1458	32,64	331	0,07
1	800_c	800	1,00	9,20	10,20	14,67	591	15,86	373	0,03
1	800_d	800	1,00	6,75	7,75	13,51	2346	23,00	314	-6,65
1	1000_a	1000	1,00	5,70	6,70	17,18	1482	27,05	413	0,04
1	1000_b	1000	1,00	4,26	5,26	17,60	2182	31,38	445	0,11
1	1000_c	1000	1,00	4,90	5,90	12,34	363	5,90	51	1,63
2	1000_d	1000	1,00	5,40	6,40	19,33	543	20,79	141	0,79
2	1000_e	1000	1,00	3,75	4,75	41,23	3214	16,55	183	3,73
2	1000_f	1000	1,00	4,15	5,15	30,81	1746	21,25	172	-3,46
2	2000_a	2000	1,00	4,30	5,30	17,00	1008	68,57	558	0,19
2	2000_b	2000	1,00	2,70	3,70	20,04	1289	9,87	347	-0,49
2	2000_c	2000	1,00	5,85	6,85	23,55	2474	19,54	371	-0,18
2	3000_a	3000	1,00	5,45	6,45	23,11	1650	40,95	522	0,13
2	3000_b	3000	1,00	3,90	4,90	25,70	2187	28,18	472	0,03
2	3000_c	3000	1,00	3,00	4,00	24,25	976	24,24	460	0,03
2	4000_a	4000	1,00	4,05	5,05	22,91	990	14,26	305	-0,24
2	4000_b	4000	1,00	3,90	4,90	34,56	777	29,74	884	-0,12
2	4000_c	4000	1,00	4,00	5,00	24,08	813	66,29	689	0,44
2	5000_a	5000	1,00	5,30	6,30	25,36	835	50,87	711	0,38
2	5000_b	5000	1,00	5,20	6,20	31,83	1145	41,17	627	0,17
2	5000_c	5000	1,00	4,05	5,05	27,03	1042	52,61	632	0,07
2	5500_a	5500	1,00	0,75	1,75	25,76	1167	45,79	712	0,07
2	5500_b	5500	1,00	7,30	8,30	25,97	1311	49,28	731	0,09
2	5500_c	5500	1,00	3,85	4,85	31,80	1625	54,72	678	0,03
3	1000_ea	1000	1,00	2,70	3,70	46,62	2240	9,25	159	-0,41
3	2000_ea	2000	1,00	6,90	7,90	30,32	1849	16,39	255	0,1
3	3000_ae	3000	1,00	8,70	9,70	17,31	1343	68,16	489	0,2
3	4000_ea	4000	1,00	3,40	4,40	27,42	1279	78,80	564	0,13
3	5000_ea	5000	1,00	6,65	7,65	29,28	1617	67,81	683	0,15
					maximum	46,62		78,80		
					minimum	4,59		5,90		
					standaarddeviatie	9,04		20,28		

Tabel 2.3 Samenvatting meetwaarden VFM berekend met  $\Delta t=1,0s$  aan begin van overstortgolf. Golven 200a, 200b en 200c zijn niet betrokken in de berekening van max, min, std

### Resultaatgrafieken luchtgehalte

Het front van de overstortende golf is het meest interessant vanuit het oogpunt van luchtinmenging. Dit betekent dat het luchtgehalte in eerste instantie bekeken wordt aan het begin van de golf. Aangezien sommige golven slechts enkele seconden duren, is ervoor gekozen om het gemiddelde luchtgehalte van de eerste seconde van het VFM-sigitaal (overeenkomend met de eerste seconde van het signaal van laagdiktemeter 4) te gebruiken voor de grafieken. In de hieronder volgende Figuur 2.32 is het luchtgehalte in procenten weergegeven in verhouding tot overslagvolume. Voor de relatie tussen luchtgehalte en laagdikte is gebruik gemaakt van de laagdiktes gemeten met laagdiktemeter 4.

Data van twee verschillende meetposities ( $z=5$  cm en  $z=10$  cm) zijn hier steeds in één figuur geplot. Dit heeft wezenlijke invloed op het afleiden van verbanden (die al of niet door de figuren worden gesuggereerd). Het luchtgehalte varieert over de hoogte. Beter is om op meerdere hoogtes te meten.



Figuur 2.32 Luchtgehalte als functie van overslagdebieten

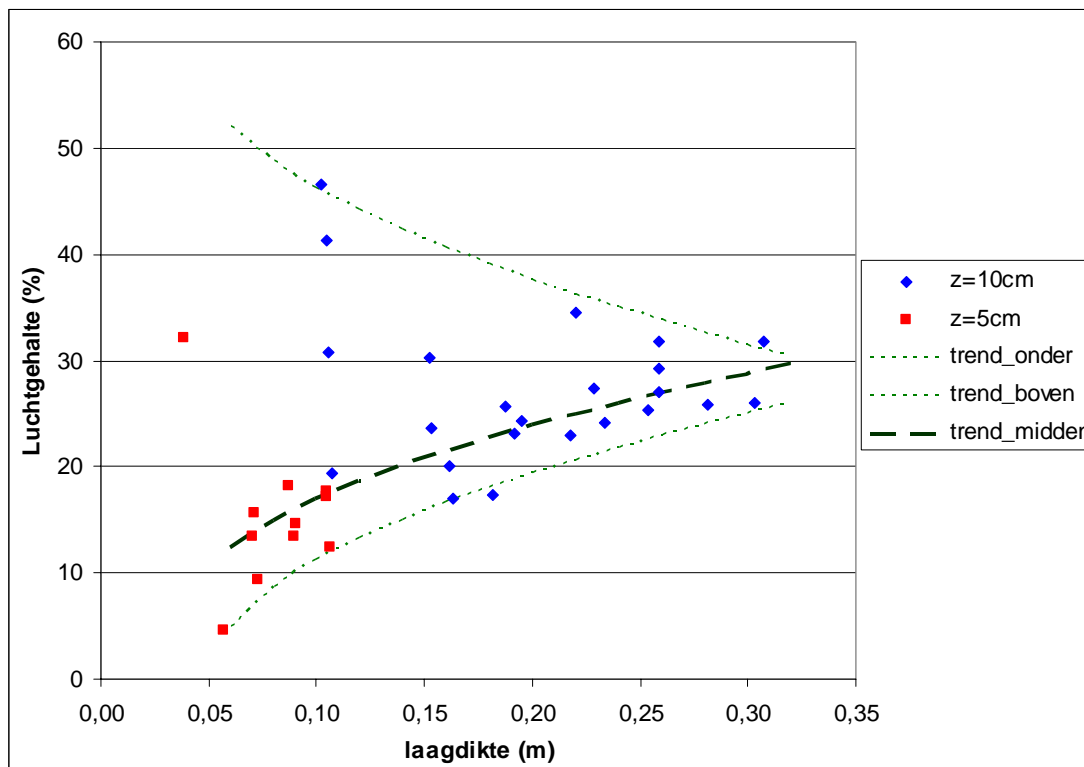
In Figuur 2.33 wordt de relatie gegeven tussen het percentage luchtinsluiting en de laagdikte. De getekende trendlijn in Figuur 2.33 geven de volgende formule:

$$\varepsilon \approx 6 + 20\sqrt{5h - 0.2} \quad (2.7)$$

In deze uitdrukking is  $\varepsilon$  het luchtgehalte in procenten en  $h$  de laagdikte in meters. De twee andere curves geven onder- en bovengrenzen aan de hand van gemeten data. De trendlijn "Midden" geeft de algehele trend van de dataset weer. Deze trendlijn is zodanig door het gebied met hoge concentratie meetdata getrokken dat evenveel datapunten boven als onder de lijn liggen. Wel is de spreiding van de punten aan bovenzijde van de middelste trendlijn groter dan de spreiding onder de lijn – dit is goed te zien in de figuur.

Wederom wordt gewaarschuwd voor het feit dat de dataset bestaat uit meetpunten van twee verschillende verticale posities. Dit beperkt hier vooral de betekenis van de middelste

trendlijn. De getekende ondergrens/bovengrens-trendlijnen gelden daarentegen voor zowel de dataset als geheel alsook voor alleen meetpositie z=10cm.



Figuur 2.33 Luchtgehalte versus laagdikte met trendlijnen

Voor de relatie tussen luchtgehalte en frontnelheid is gebruik gemaakt van de frontnelheid over traject 5–4.

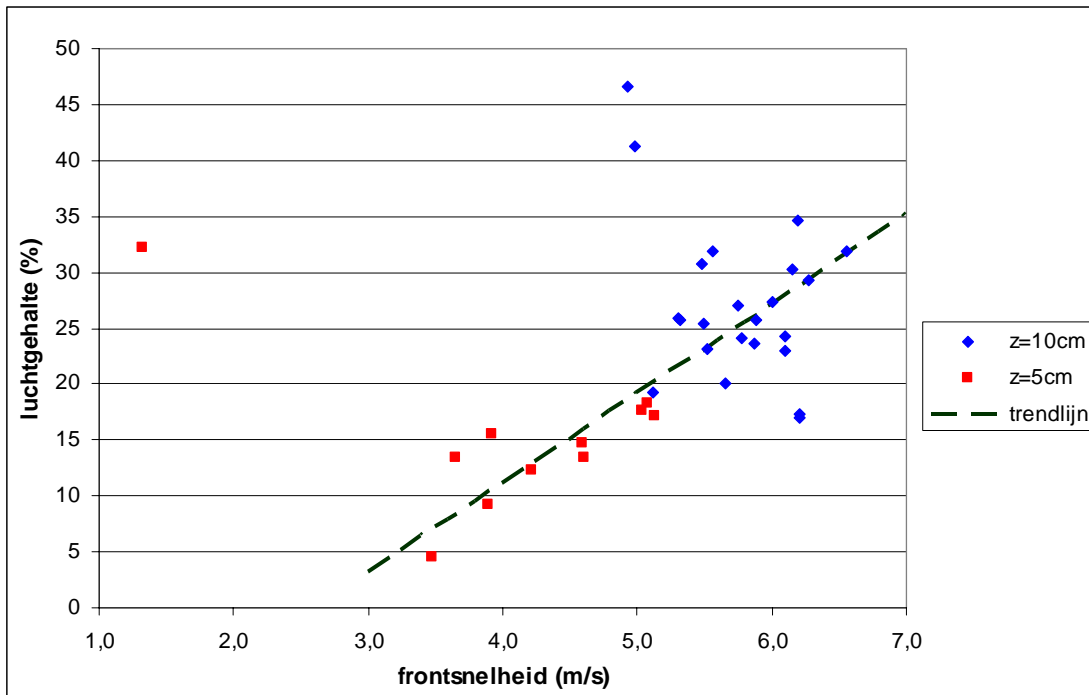
De getekende, lineaire trendlijn in Figuur 2.34 voldoet aan de vergelijking:

$$\varepsilon = 8(U_{front} - 2.6) \quad (2.8)$$

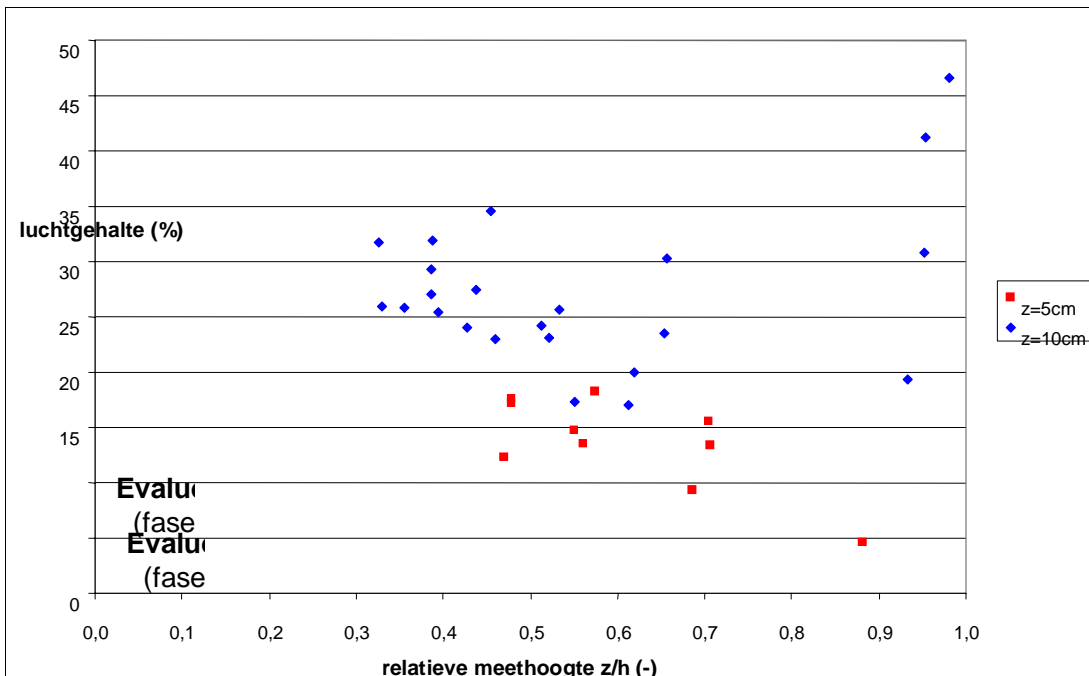
met  $U_{front}$  is de frontnelheid in meters per seconde. Voor de relatie tussen luchtgehalte en frontnelheid is gebruik gemaakt van de frontnelheid over traject 5–4.

De steilheid van de trendlijn in Figuur 2.34 is aanvechtbaar; het zou kunnen dat de rode meetpunten van meetserie 1 hoger hadden gelegen als deze ook op z=10cm waren gemeten. De lijn zou dan veel vlakker kunnen lopen. Verder: als men alleen de datapunten van z=10cm beschouwt, dan is de getekende lijn ook zeer discutabel. Een horizontale lijn die het gemiddelde luchtgehalte van deze deelset aangeeft zou ook te verdedigen zijn. Deze trendlijn zou de vergelijking  $\varepsilon=27,2\%$  hebben.

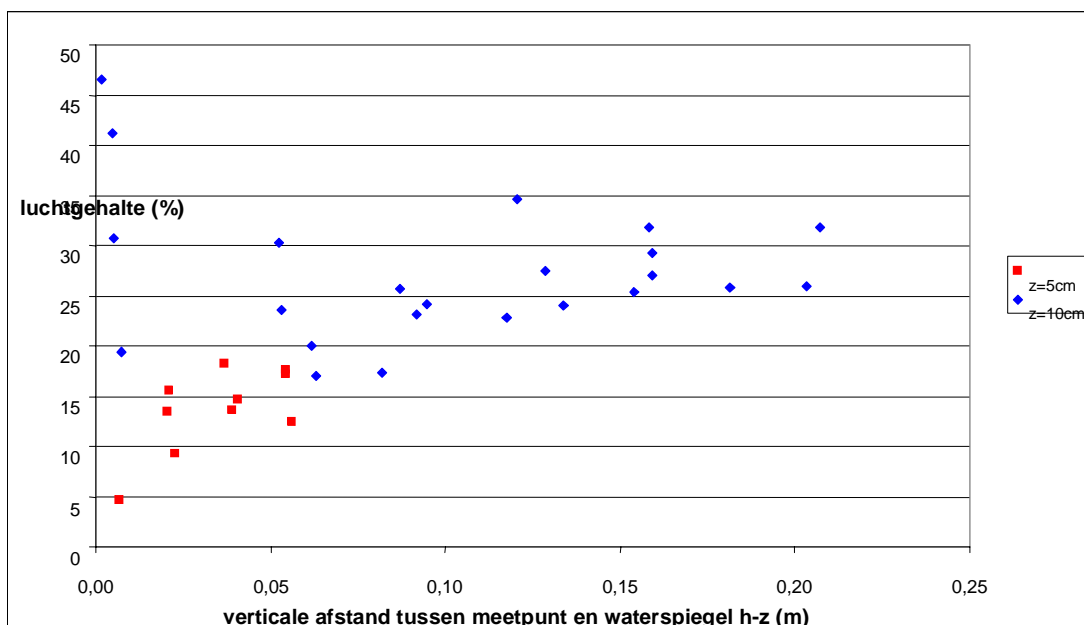




Figuur 2.34 Luchtgehalte versus frontsnelheid met trendlijn



Figuur 2.35 Luchtgehalte gemeten met VFM als functie van relatieve meethoogte



Figuur 2.36 Luchtgehalte gemeten met VFM als functie van afstand meetpunt tot bovenkant golfoverslaglaag

Figuur 2.35 laat het luchtgehalte zien tegenover de relatieve meetpositie in de hoogte. Dit blijkt geen grootheid te zijn die een helder verband oplevert. In Figuur 2.36 is het luchtgehalte uitgezet tegen de verticale afstand tussen het meetpunt van de VFM en de top van de overstortende waterlaag. De laagdikte is hierin als het ware gecorrigeerd voor de hoogte van meetapparatuur boven het talud. Dit geeft net iets andere verbanden dan afgeleid uit Figuur 2.33.

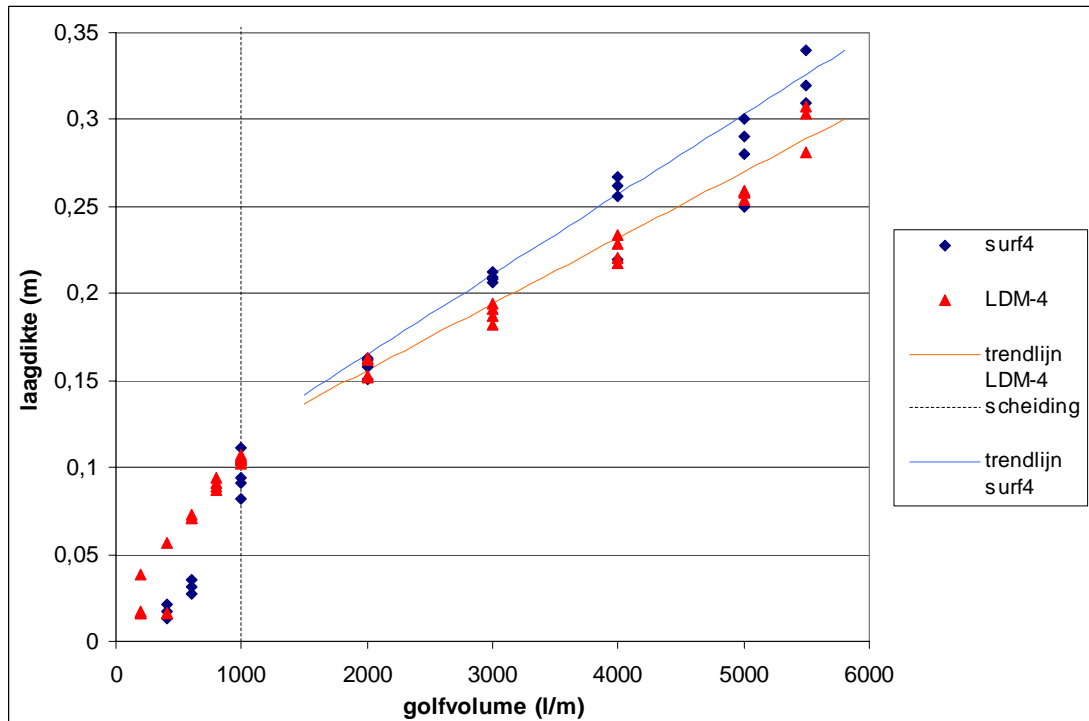
#### Nadere discussie VFM resultaten

(1). Vergelijking VFM met luchtgehalte berekend via verschil laagdiktemeter en surfplank.

Voor een beschouwing van luchtgehalte in de overslaggolf kan, naast de 'directe waarden' van de VFM, worden gekeken naar het verschil tussen laagdikte gemeten met de surfplank en laagdikte volgens de laagdiktemeter, zie Figuur 2.37. De laagdiktemeter (LDM) wordt geacht de 'natte laagdikte' te meten, dat wil zeggen exclusief lucht. De surfplank daarentegen meet laagdiktes van het geheel van water *en* lucht. Uiteraard kijkt men naar de raai op 2 meter onder de kruinlijn waar de VFM stond. Dit betreft surfplank 4 en LDM-4.

Op basis van de beide trendlijnen wordt een luchtgehalte van 10% geschat. Dat is minder dan de eerder geconstateerde 25% zoals in Figuur 2.17, maar gelijk aan dat volgens Figuur 2.19. Volgens de VFM zou het percentage 25% moeten zijn voor de grotere golven, zie Figuur 2.32.

Om verschillende redenen is het luchtgehalte bij de kleinere golfvolumes moeilijk te meten. Ten eerste omdat de luchtgehalten bij de kleine golven vrij laag zijn; ten tweede omdat bij deze volumes kleine laagdiktes optreden, die moeilijker meetbaar zijn. Dit is terug te zien in de figuur. Zoals ook eerder opgemerkt blijken de laagdiktes voor volumes van minder dan 1000 l/m moeilijk te interpreteren. Het is immers niet te verklaren waarom de laagdikte volgens LDM groter zou kunnen zijn dan de laagdikte volgens de surfplank. Er wordt in deze analyse voor gekozen alleen metingen van golfvolumes meer dan 1000 l/m te gebruiken.



Figuur 2.37 Laagdiktes gemeten met surfplank 4 en LDM-4 met lineaire trends voor  $V > 1000$  l/m

De getekende trendlijnen in Figuur 2.37 geven het geschematiseerde verloop van de laagdiktes voor de grotere volumes. Deze trends bleken beter in een lineair verband uit te drukken dan in een wortelfunctie. Wanneer men echter een uitdrukking zou opstellen voor de laagdiktes *inclusief* de lagere waarden van lagere golfvolumes, is een wortelfunctie overigens juist wel een betere keuze. De formules van de trendlijnen luiden als volgt

$$\text{Laagdikte surfplank 4 voor } V > 1000 \text{ l/m: } h = 0,046V + 0,073 \quad (2.9)$$

$$\text{Laagdikte LDM-4 voor } V > 1000 \text{ l/m: } h = 0,038V + 0,08 \quad (2.10)$$

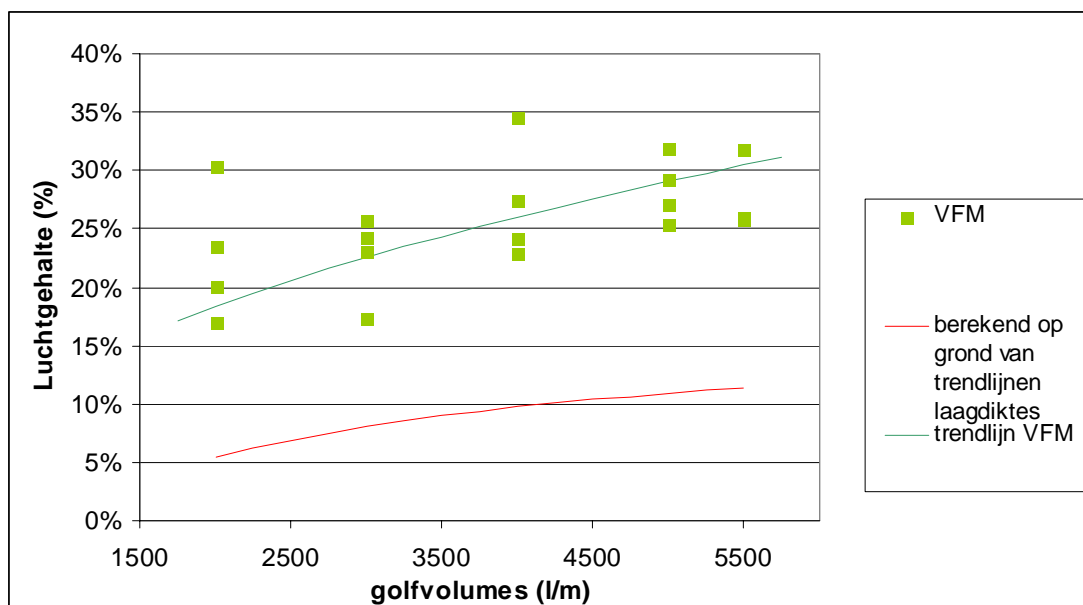
In deze formules is  $h$  de laagdikte in meters en  $V$  het golfvolume in  $\text{m}^3/\text{m}$ . Onderstaande tabel toont waarden van laagdiktes (rechts) die deze trendlijnen aannemen bij de volumes waarbij er meetdata beschikbaar is van de VFM. Voorts is het luchtgehalte berekend met de formule:

$$\varepsilon = \frac{h_{\text{surfplank}} - h_{\text{LDM}}}{h_{\text{surfplank}}} \quad (2.11)$$

Hierin is  $\varepsilon$  het berekende luchtgehalte in procenten en  $h$  de laagdikte in meters. Tabel 2.4 geeft ook de gemeten waarden van de VFM (links) voor de volumes groter dan 1000 l/m.

		luchtgehalte gemeten met VFM		trends Laagdikte			
		golfvolumen	VF (%)	golfvolumen	LDM-4	surfplank 4	berekend luchtgehalte
		V (l/m)	VF (%)	V (l/m)	H (m)	H (m)	VF (%)
serie 2		2000	17,0%	2000	0,16	0,17	5,5%
		2000	20,0%	2250	0,17	0,18	6,2%
		2000	23,6%	2500	0,18	0,19	6,9%
		3000	23,1%	2750	0,18	0,20	7,5%
		3000	25,7%	3000	0,19	0,21	8,1%
		3000	24,3%	3250	0,20	0,22	8,5%
		4000	22,9%	3500	0,21	0,23	9,0%
		4000	34,6%	3750	0,22	0,25	9,4%
		4000	24,1%	4000	0,23	0,26	9,7%
		5000	25,4%	4250	0,24	0,27	10,1%
		5000	31,8%	4500	0,25	0,28	10,4%
		5000	27,0%	4750	0,26	0,29	10,6%
		5500	25,8%	5000	0,27	0,30	10,9%
		5500	26,0%	5250	0,28	0,31	11,1%
	5500	31,8%	5500	0,29	0,33	11,3%	
serie 3		2000	30,3%				
		3000	17,3%				
		4000	27,4%				
		5000	29,3%				

Tabel 2.4 Gemeten luchtgehalte versus gemeten luchtgehalte



Figuur 2.38 Vergelijking luchtgehaltes: direct gemeten met VFM en afgeleid uit laagdiktemetingen met LDM en surfplank

De getoonde trendlijn voor de VFM-metingen als functie van golfvolume voldoet aan

$$VF = 13\sqrt{V} \quad (2.12)$$

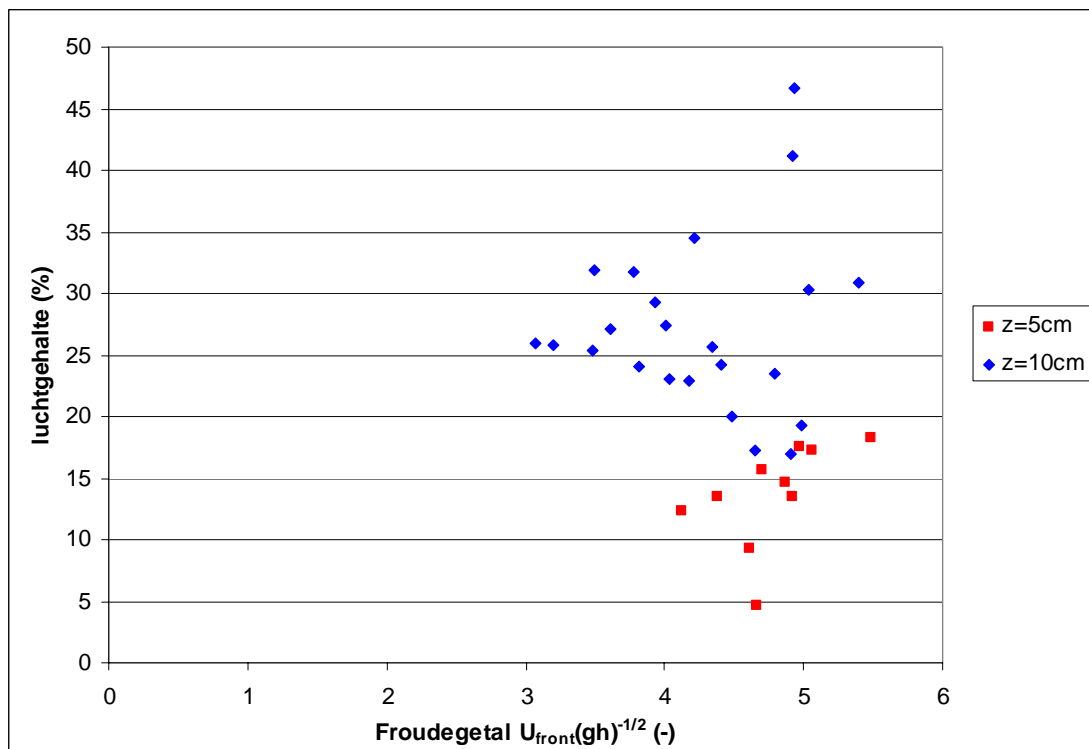
met  $VF$  het luchtgehalte ('void fraction'), hier vermenigvuldigd met 100%, en met  $V$  het golfvolume in  $m^3/m$ .

De conclusie is dat voor alle golfvolumes de luchtgehaltenes direct gemeten met de VFM in de orde 10% - 15% groter zijn dan afgeleid uit het verschil tussen surfplank- en LDM-metingen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de VFM punt metingen zijn en de surfplank een gemiddelde luchtgehalte. Voor verder verwerking is het gemiddelde luchtgehalte het meest relevant.

### (2). Luchtgehalte versus Froudegetal

In Figuur 2.39 is het luchtgehalte gemeten met VFM uitgezet tegen het Froudegetal zoals dat is afgeleid uit de LDM data.

Er is een grote spreiding te constateren, maar wel een duidelijk onderscheid tussen hoog en laag in de waterlaag. De waarden komen overeen met eerder genoemde waarden uit de literatuur, zie Fase 3D rapport Evaluatie Afsluitdijk.



Figuur 2.39 Froudegetal op basis van frontsnelheid en laagdikte uitgezet tegen luchtgehalte gemeten met VFM

### (3). Overwegingen met betrekking tot turbulentie

De gemeten luchtgehaltenes geven bruikbare informatie. Ze zouden idealiter moeten worden aangevuld met turbulentiemetingen van de stroming. Een volgende stap zou zijn om turbulentie metingen naast analytische modellen te houden. Onderstaand wordt verder ingegaan op drukfluctuatie metingen.

## Drukfluctuaties

De drukfluctuaties op de bodem zijn gecorreleerd met de golfvolumes, zie de Figuren 2.7 en 2.8 in paragraaf 2.1.3. Deze figuren tonen de gemeten fluctuerende bodemdrukken ( $P$ ) als functie van de tijd voor respectievelijk een golfvolume ( $V$ ) van  $1 \text{ m}^3$  en  $5 \text{ m}^3$ . In formulevorm:

$$P = p + \rho gh \quad (2.13)$$

waarin

$P$	instantane bodemdruk (inclusief hydrostatische druk)
$p$	instantane bodemdruk (exclusief hydrostatische druk)
$g$	zwaartekracht
$h$	waterdiepte

Op basis van deze metingen volgt dat bij een toenemend golfvolume de drukfluctuaties groter worden. Het is interessant of deze experimentele resultaten met bestaande theorieën of metingen overeenkomen.

Overigens lijkt de standaardafwijking van de druk constant, terwijl de laagdikte en de stroomsnelheid afnemen. Dit klopt niet volledig met de aangenomen theorie van uniforme stroming.

Voor turbulente en uniforme stromingen geldt

$$\tau_0 = \rho gh S_b \quad (2.14)$$

waarin

$\tau_0$	gemiddelde bodemschuifspanning
$\rho$	dichtheid van het water
$S_b$	(= $\sin \beta$ ) taludhelling ( $\beta$ is de taludhoek)

Volgens Emmerling (1973) is de maximale instantane bodemdruk ( $p_m$ ) 18 keer de gemiddelde bodemschuifspanning, dus

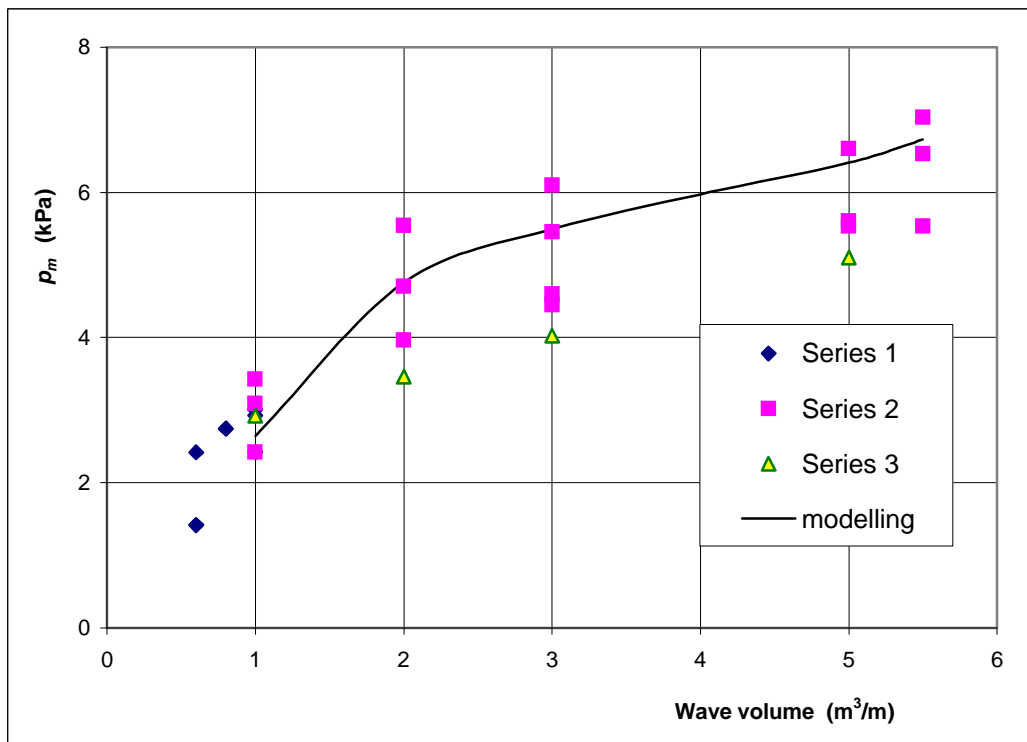
$$p_m = 18\tau_0 \quad (2.15)$$

Omdat het stromend water over het talud relatief veel lucht bevat, wordt  $p_m$  hier als volgt gecorrigeerd

$$p_m = 18\rho gh(1 - \varepsilon)S_b \quad (2.16)$$

Hierin is  $\varepsilon$  het luchtgehalte volgens de VFM dat varieert van 17,5% bij een golfvolume  $V = 1 \text{ m}^3$  tot 30% bij  $V = 5,5 \text{ m}^3$ . Omdat grotere golfvolumes tot een grotere waterdiepte leiden, lijken de experimenten de theorie te ondersteunen. Figuur 2.40 toont de gemeten  $p_m$  (=  $P_m - \rho gh(1 - \varepsilon)$ ) voor drie proevenseries en de berekende  $p_m$ .

De conclusie is dat de metingen goed overeenstemmen met de theorie. Op basis hiervan kan een koppeling worden gelegd met de relatieve turbulente intensiteit  $r_0$ .



Figuur 2.40  $p_m$  als functie van golfvolume; steilheid van binnentalud is 1V:3,7H (Vechtdijk 2010)

#### Relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit

Deze subparagraaf beschrijft een relatie tussen de relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit  $r_0$  en de instantane maximale bodemdruk  $p_m$ .

Voor uniforme stromingscondities is het verband tussen  $r_0$  en de coëfficiënt  $C$  van Chézy en de vergelijking van Chézy

$$r_0 = 1,2\sqrt{g} / C \quad (2.17)$$

$$U = C\sqrt{hS_b} \quad (2.18)$$

waarin  $U$  de dieptegemiddelde stroomsnelheid. Herleiden geeft

$$r_0 = 1,2 \frac{\sqrt{ghS_b}}{U} \quad (2.19)$$

of met vgl. (2.14)

$$r_0 = 1,2 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho U^2}} \quad (2.20)$$

of met vgl. (2.15)

$$r_0 = 1,2 \sqrt{\frac{1/8 p_m}{\rho U^2}} \quad (2.21)$$

Hieruit kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- 1) Naarmate het talud steiler wordt, neemt  $r_0$  toe;
- 2) Hoe groter de waterdiepte is, hoe groter  $r_0$  is;
- 3) Hoe groter de stroomsnelheid wordt, des te kleiner  $r_0$  wordt;
- 4) De belasting nabij de bodem wordt bepaald door  $p_m$  of door het product  $r_0 U$ ;
- 5) De belasting door het overstortende golf is het grootst indien de waterdiepte in de golf maximaal is (dus in het front van de golf);
- 6) De bodemdruk  $p_m$  is het grootst in het front van de golf;
- 7) De relatieve turbulentie parameter  $r_0$  is het grootst in de staart van de golf (en dus niet in het front van de golf).

Met vgl.(2.21) is het nu mogelijk om de relatieve turbulentie te schatten gegeven een laagdikte, stroomsnelheid en luchtgehalte. Het is wel wenselijk overigens om in de toekomst met een hogere frequentie de drukken te registreren. Aangezien de relatieve turbulentie niet rechtstreeks is gemeten is een vergelijking met de berekende uitkomsten met vgl.(2.21) niet mogelijk.

## 2.2 Meeting laagdiktes en snelheden met de surfplanken

### 2.2.1 Opzet metingen

In de vorige paragraaf zijn analyses gepresenteerd van de metingen met instrumenten van Deltares. Daarnaast zijn ook door Infram/Van der Meer Consulting meetinstrumenten ingezet en wel de eerder gebruikte surfplank, nu ook met een snelheidsmeter. Deze paragraaf geeft de dataprocessing en analyse van de hydraulische metingen, zoals deze voor de surfplanken en snelheidsmeters zijn verkregen.

De dataprocessing is voornamelijk door Serge Versluis uitgevoerd, als onderdeel van zijn afstudeerwerk, en is begeleid door Van der Meer. De analyse en rapportage is uitgevoerd door Van der Meer.

De precieze uitvoering van de proef is beschreven in het Factual Report van Infram (2010). Samengevat komt het er op neer dat vijf surfplanken op verschillende locaties op het binnentalud zijn ingezet om de laagdikte van overstromend water te meten. De bovenste surfplank heeft de laagdikte precies op de binnenkruinlijn gemeten en dit is ongeveer 3 m na het "einde" van de golfoverslagsimulator (deze 3 m was ook de breedte van de kruin zelf). De onderlinge afstanden van de volgende surfplanken waren achtereenvolgens 2 m; 2 m; 4 m en 4 m. De surfplanken werden van onderen naar boven genummerd van 1 tot en met 5, zie figuur 2.2. Figuur 2.41 geeft een foto.





Figuur 2.41 Meetopstelling met alle surfplanken

De snelheidsmetingen werden uitgevoerd met een snelheidsmeter, zoals deze ook wordt gebruikt bij het mechanisch meten van de snelheid van een boot. Het geheel bestaat uit een doorvoer door de scheepswand (in dit specifieke geval de surfplank) en een schoepenwiel dat door langsstromend water gaat draaien. Het aantal omwentelingen is een maat voor de snelheid. Er zijn bij deze proeven in eerste instantie maar drie snelheidsmeters aangeschaft. Als deze metingen succesvol zouden zijn, dan zou bij een mogelijke volgende proef meer snelheidsmeters kunnen worden toegepast.

Surfplanken 1 en 3 (de onderste surfplank en de surfplank 8 m daarboven) werden met een snelheidsmeter uitgerust. Daarnaast is een snelheidsmeter in een dunne metalen plaat gemonteerd en deze is (omgekeerd) op de grond geplaatst. Hierdoor was het mogelijk de snelheid dichtbij de grond te meten, terwijl de surfplanken de snelheid bovenin de waterlaag hebben gemeten. Deze grondsnelheidsmeter stond op dezelfde hoogte als surfplank 3, zie de foto in figuur 2.42. Bij een van de meetsessies is deze snelheidsmeter in surfplank 2 gemonteerd.



Figuur 2.42 Surfplank 3 met daarnaast de grondsnelheidsmeter

De proeven bestonden uit drie meetseries. Bij de eerste serie werden relatief kleine overslaande golfvolumes losgelaten en dan driemaal hetzelfde volume na elkaar. Dit waren golfvolumes van 200; 400; 600; 800 en 1000 l per m breedte. Bij deze sessie werd het ophangpunt van de surfplanken vrij laag gehouden, zodat een kleine laagdikte goed gemeten kon worden. Deze sessie werd daarom de "lage sessie" genoemd.

De tweede serie betrof grote overslaande volumes en omdat een grotere laagdikte werd verwacht, werden de surfplanken hoger opgehangen. Dit was de "hoge sessie" en bestond uit 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; en 5500 l per m breedte. Alle volumes werden hier ook driemaal losgelaten.

Bij een laatste sessie, de "middensessie" zijn de surfplanken iets lager opgehangen en zijn de volumes van 1000-5000 l/m eenmaal losgelaten.

Het volume 1000 l/m is dus in alle meetsessies losgelaten, met elke keer een andere hoogte van het ophangpunt van de surfplank.

## 2.2.2 Data processing

### *Calibratie surfplank*

In het ophangpunt van de surfplank was een rotatiemeter gemonteerd, die de hoekverdraaiing heeft gemeten als de surfplank omhoog kwam door langsstromend water. Middels calibratie werd de relatie vastgelegd tussen hoekverdraaiing (in Volt) en de laagdikte onder de surfplank. Dit werd gedaan door blokken isolatiemateriaal van 0,2 x 0,4 m en 0,04 m dik onder de surfplank te leggen en dan het voltage af te lezen. Dit werd een aantal maal herhaald om na te gaan of steeds dezelfde waarde werd gevonden.

Annex 1 van Appendix B geeft de calibraties van alle surfplanken en voor alle meetsessies. De gevonden calibraties werden toegepast op de gemeten signalen.

### *Calibratie snelheidsmeter*

De snelheidsmeter wordt met een default calibratie afgeleverd, maar geadviseerd wordt om de precieze calibratie zelf uit te voeren. De default instelling is dat 1 Hz komt overeen met 0,0857 m/s.

De datalogger was zodanig ingesteld dat 0-500 Hz overeenkwam met 0-5 Volt. Dus 1 Volt = 100 Hz. Voorlopig is van de default waarde uitgegaan.

Directe calibratie van de snelheidsmeter is niet zo eenvoudig. Er bestaan geen gemakkelijk toegankelijke laboratorium opstellingen voor die snelheden tot 10 m/s aankunnen. Gedacht is aan het huren van een speedboot en dan de surfplank met snelheidsmeter over vlak water te calibreren, met GPS als calibratiemethode. Dit is niet uitgevoerd.

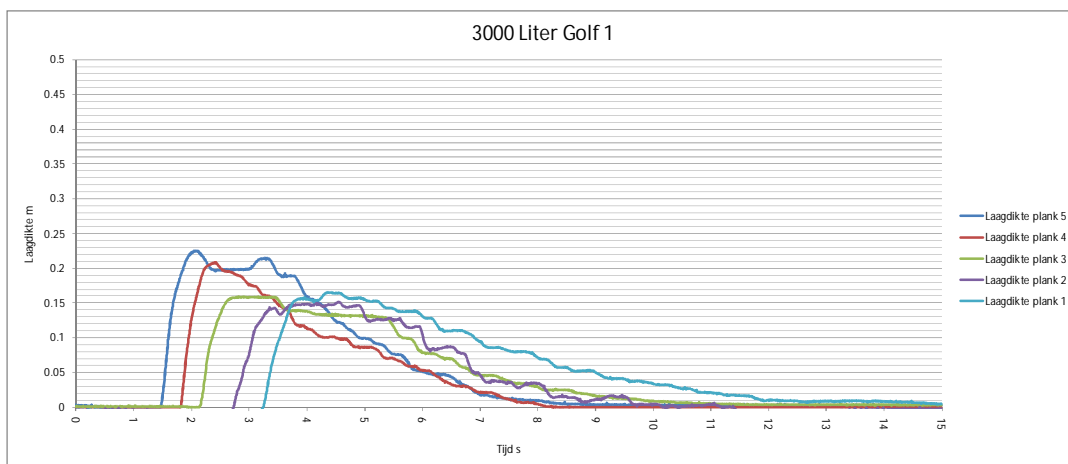
### *Gemeten signalen*

Tijdens de metingen bleek zich een aantal afwijkingen voor te doen. Bij een paar metingen kwam het signaal van de laagdikte niet mooi terug op nul. Consequent lag een nulpunt iets hoger of lager dan bij de calibratie het geval was. Aangezien de surfplank op een niet geheel vlak talud van gras lag, is het best mogelijk dat, eventueel door het uitvoeren van de proeven, de situatie in rust (tussen de golven door) net even iets anders kwam te liggen. Bij de metingen 1 midden en 2 midden (dus respectievelijk surfplanken 1 en 2 tijdens de middensessie) bleek er een substantiële afwijking te zijn. Voor deze twee metingen is het juiste nulpunt uit de metingen zelf gehaald. Verwacht mag worden dat de ijking zelf, dus de relatie tussen hoekverdraaiing en laagdikte niet wezenlijk verandert en dat de lijn van de calibratie hetzelfde is, maar dan verschoven naar het juiste nulpunt.

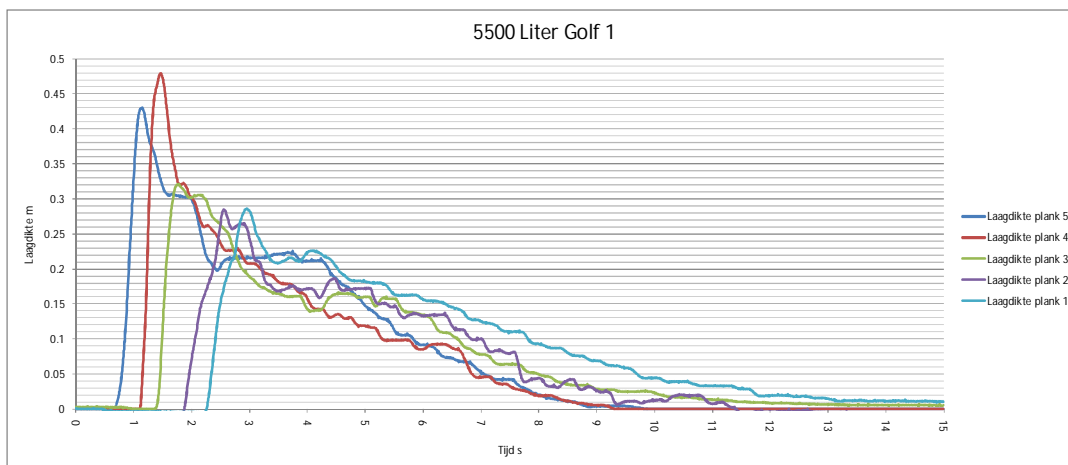
De laatste pagina van Annex 1 geeft de aangepaste calibraties van zowel plank 1 als plank 2, voor de middensessie.

Bij plank 5, op de binnenkruinlijn, deed zich het volgende voor in de lage sessie. Tot en met de eerste golf van 600 l/m kwam de meting mooi terug op nul. Daarna kwam het meetpunt per golf ongeveer 2 mm dieper te liggen. De reden is niet bekend, maar om een goede meting te krijgen is bij deze afwijkende metingen per golf het juiste nulpunt gehanteerd en de meting dus verschoven.

Vervolgens zijn de signalen per golf onderling vergeleken (vijf laagdiktesignalen en drie snelheidssignalen). Hieruit kwam naar voren dat niet alle meters goed hebben gewerkt. De rotatiemeter voor plank 2 gaf bij de calibratie van de surfplank met snelheidsmeter met het prototype van de simulator in Delft, ook al problemen, maar deze is niet vervangen. Bij de lage en middensessie past het signaal niet tussen die van plank 1 en plank 3. Het is veel korter, onregelmatiger en komt vaak niet op de juiste hoogte. Bij de hoge sessie, dus met de grote overslagvolumes, bleek surfplank 2 wel redelijk in lijn met de anderen, zie ook figuren 2.43 en 2.44 voor respectievelijk een golf van 3000 l/m en van 5500 l/m. Wel gaat het signaal eerder naar beneden dan voor surfplanken 1, 3 en 5 en lijkt de overslagduur ook iets korter. Voor de meetsessies laag en midden is de laagdikte van surfplank 2 niet meegenomen, voor de hoge sessie wel. Daarnaast bleek ook surfplank 4 tijdens de lage sessie bij overslagvolumes van 800 l/m en 1000 l/m niet in overeenstemming met de andere signalen. Deze signalen zijn verder niet meegenomen.



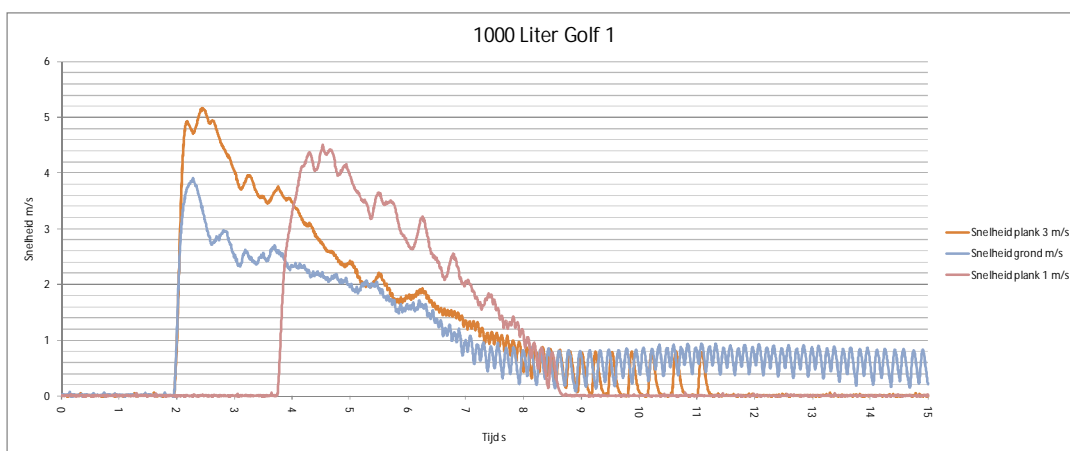
**Figuur 2.43** Laagdiktesignalen voor vijf surfplanken; hoge sessie, 3000 l/m volume



**Figuur 2.44** Laagdiktesignalen voor vijf surfplanken; hoge sessie, 5500 l/m volume

Een ander fenomeen werd geconstateerd bij de laagdiktemetingen van de grootste overslagvolumes van 5000 l/m en 5500 l/m. Figuur 2.44 geeft het voorbeeld. Surfplanken 5 (op de binnenkruinlijn) en 4 (2 m op het binnentalud) laten een scherpe en hoge piek zien. De maximale laagdikte van 0,45-0,5 m is niet in lijn met de veel lagere laagdikten voor bijvoorbeeld 3000 l/m (zie figuur 6). Op zich is de hoekverdraaiing en daarmee de stand van de surfplank wel goed gemeten, maar waarschijnlijk dreef de surfplank niet op het water. Bij deze grote volumes komt een dikke laag water met een steil front met grote snelheid aan. Deze botst tegen de achterkant van de surfplank en door de grote kracht krijgt de surfplank een snelheid mee waardoor ze even boven het water uit komt. Bij de analyse van de metingen is deze piek handmatig afgevlakt en is zo goed mogelijk een werkelijk maximum van de laagdikte geschat.

Bij de eerste meetsessie (de lage sessie) heeft de snelheidsmeter in plank 3 goed gemeten, zie als voorbeeld figuur 2.45. Bij de twee daaropvolgende sessie blijft het signaal qua hoogte en ook qua duur ver achter bij bijvoorbeeld de snelheid bij surfplank 1. De vermoedelijke reden is dat er enig vuil op het schoepenwiel of de as is blijven zitten, waardoor dit instrument niet meer goed functioneerde. Voor deze twee sessies is dit signaal niet meer meegenomen.



Figuur 2.45 Voorbeeld van gemeten snelheidssignalen. Lage sessie, 1000 l/m volume

Alle andere surfplanken en snelheidsmeters hebben wel goed gewerkt. Dus de laagdiktemetingen van surfplank 2 vallen deels weg en deels de snelheden van plank 3.

Alle gemeten laagdikten en snelheden zijn per golf weergegeven in Annex 2.

### 2.2.3 Analyse signalen

#### *Algemene beeld*

Uit het bekijken van alle gemeten signalen, zoals weergegeven in Annex 2, kan een algemeen beeld worden gehaald. Annex 2 geeft eerst de signalen van de laagdikten, oplopend van 200 l/m overslaand volume naar 5500 l/m. Het kleinste volume van 200 l/m bereikt net de binnenkruinlijn, maar komt niet tot de surfplank 2 m verderop. Er wordt op de binnenkruinlijn maar een laagdikte van minder dan 2 cm gemeten. Het overstromend volume is bij plank 2 waarschijnlijk zo vertraagd dat de plank niet is gaan drijven.

Bij de volgende golf van 400 l/m wordt ook een laagdikte gemeten voor surfplank 2. Maar nog steeds niet voor de lager gelegen surfplanken. Bij het volume van 600 l/m wordt de laagdikte overal gemeten. De laagdikte van surfplanken 3 en 1, lager op het talud, geven een kleine laagdikte en het water blijft lang aanwezig. Dit werd ook visueel geconstateerd. De kleinere volumes vertragen en "kabbelen" dan na". De signalen van de laagdikten worden duidelijker bij de grotere volumes.

De volumes tot 1000 l/m laten over het binnentalud een duidelijke afname zien van de laagdikte. Voor volumes van 2000-5500 l/m is dit nog steeds zo, maar de verschillen worden relatief kleiner, zie ook figuren 2.43 en 2.44.

Het volume van 200 l/m geeft alleen een kleine snelheid bij surfplank 3. Waarschijnlijk door toeval is er geen water bij de grondsnelheidsmeter gekomen, die ook ter hoogte van plank 3 zat. Bij het 400 l/m volume geeft ook de grondsnelheid een signaal en de signalen van surfplank 3 en de grondsnelheid komen goed overeen. Vanaf 600 l/m komt er ook een snelheidssignaal van surfplank 1. Dit is nog een kort signaal, omdat het water maar net de plank bereikt en de snelheidsmeter net boven de grond zit.

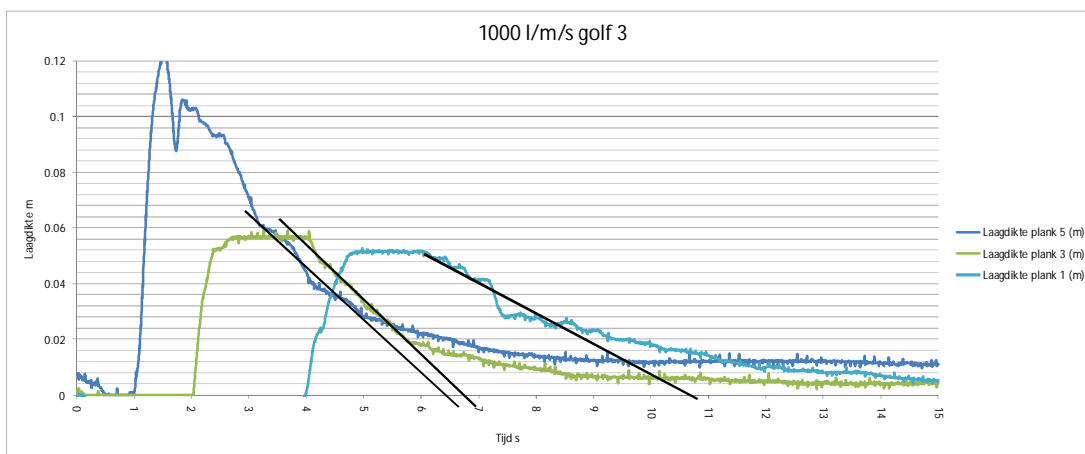
Voor 800 l/m en 1000 l/m (lage sessie) worden drie mooie snelheidssignalen verkregen, zie ook figuur 2.45. De snelheden van surfplanken 1 en 3 komen aardig overeen (surfplank 3 net iets hoger) en de grondsnelheid blijft steeds meer achter. Voor de hoge sessie zijn alleen de

snelheden van bij de grond (ter hoogte van surfplank 3) en van surfplank 1 beschikbaar. De grondsnelheid is duidelijk lager dan de snelheid van de surfplank.

Bij de middensessie werd de grondsnelheidsmeter verplaatst naar surfplank 2. De signalen geven nu de snelheden met surfplank 2 en 1. De snelheid in surfplank 2, 4 m hoger op het talud, is altijd iets groter dan bij surfplank 1, maar de verschillen zijn klein.

Naast maximale laagdikten en maximale snelheden zijn ook de overslagtijden, dus de tijd dat er water over het talud stroomt, van belang. Vaak geven de signalen verder naar beneden op het binnentalud het beeld dat het water nog na kabbelt. Gedurende vrij lange tijd stroomt er nog water na, waarop de lichte surfplank nog net kan drijven. Deze laagdikten zijn vaak 1 cm dik en soms nog dunner, zie ook figuur 2.46.

De overslagtijd is gerelateerd aan de overslaande golf zelf en veel minder aan het nakabbelen van het laatste water. Om de overslagtijd te bepalen is daarom handmatig een lijn getrokken door het deel van het signaal waar de laagdikte vrijwel lineair en vrij snel afneemt. Deze lijn is geëxtrapoleerd tot de nullijn en daarna is de overslagtijd bepaald. Als voorbeeld zijn de lijnen in figuur 2.46 weergegeven. Dit blijft een subjectieve manier, maar geeft natuurlijk een beter beeld dan wanneer ook de tijd van nakabbelend water wordt meegenomen.

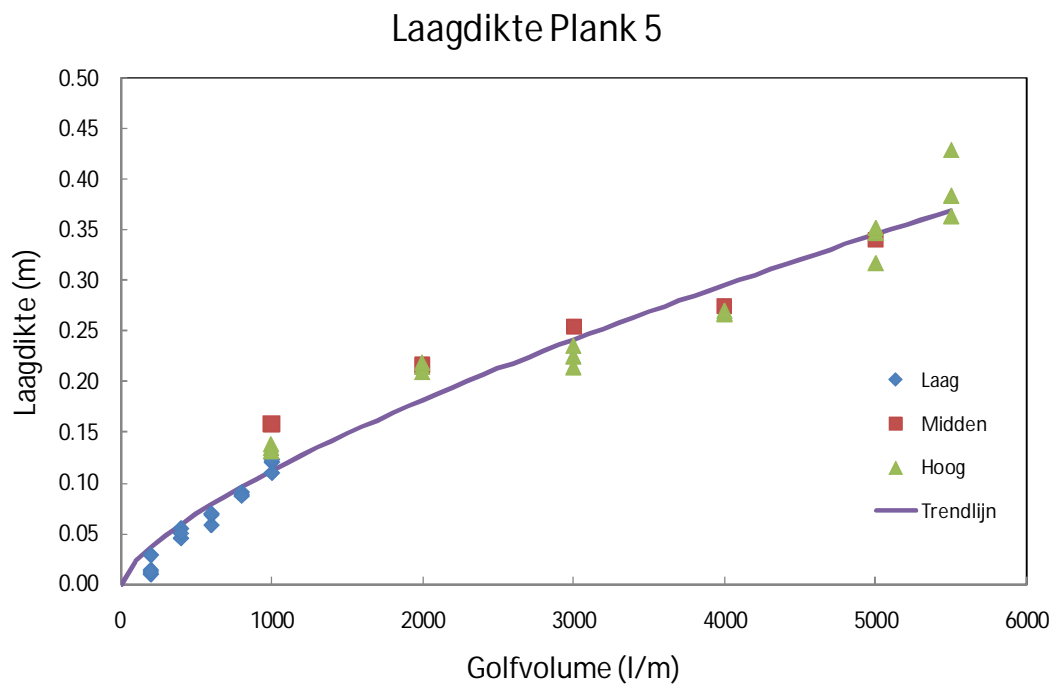


Figuur 2.46 Laagdikten bij een volume van 1000 l/m, waarbij de overslagtijd is bepaald

### Maximale laagdikten

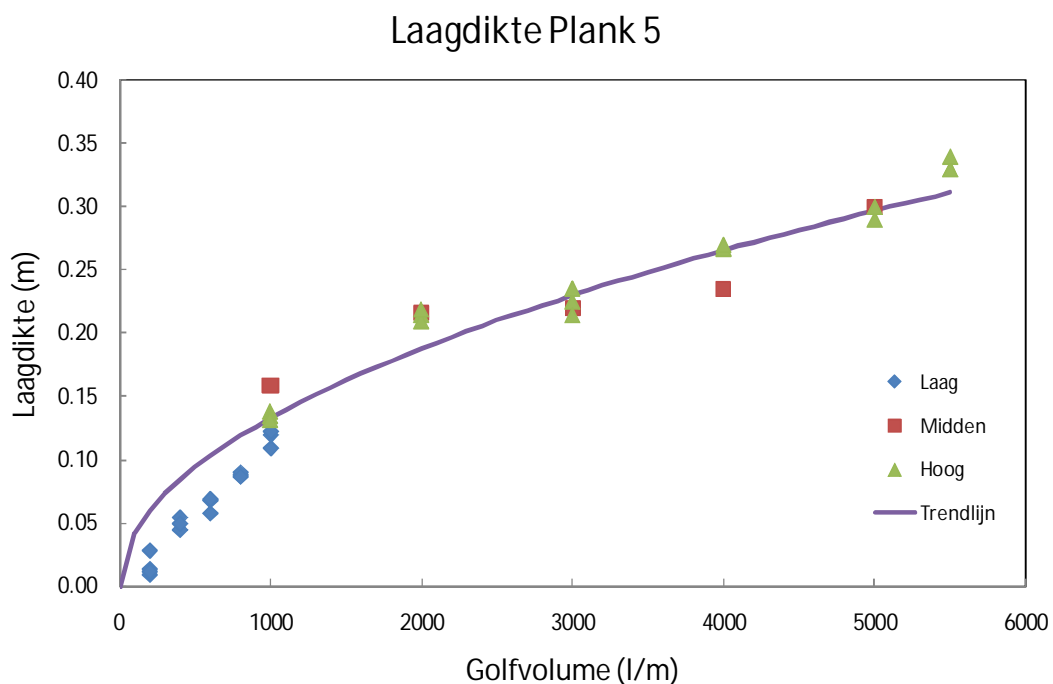
Van elk beschikbaar en betrouwbaar signaal is de maximale laagdikte bepaald. De waarden zijn per surfplank uitgezet in Annex 3. Figuur 2.47 geeft het voorbeeld voor surfplank 5.

Bij het overslagvolume van 1000 l/m zijn in alle meetsessies de laagdikten bepaald. Het verschil zit in de hoogte van het ophangpunt van de surfplank. Bij deze 1000 l/m valt op dat er toch verschillen ontstaan in laagdikte, de lage stand geeft lagere laagdikten dan een hogere stand. De metingen van de middensessie en de hoge sessie komen goed met elkaar overeen.



Figuur 2.47 Maximale laagdikten gemeten met surfplank 5 op de binnenkruinlijn

Wat verder in het figuur opvalt is dat voor 5000 l/m en 5500 l/m de laagdikte onevenredig toeneemt tot bijna 0,45 m. Dit wordt veroorzaakt door het "uit het water tillen" van de aanstormende golf, zoals ook bij figuur 2.44 is beschreven. In feite wordt niet het juiste maximum gevonden. Daarom zijn handmatig deze pieken afgevlakt. Figuur 2.48 geeft het beeld met deze aangepaste maxima en het beeld is nu meer in lijn met de verwachtingen: een lichte toename bij toenemen van het overslagvolume.

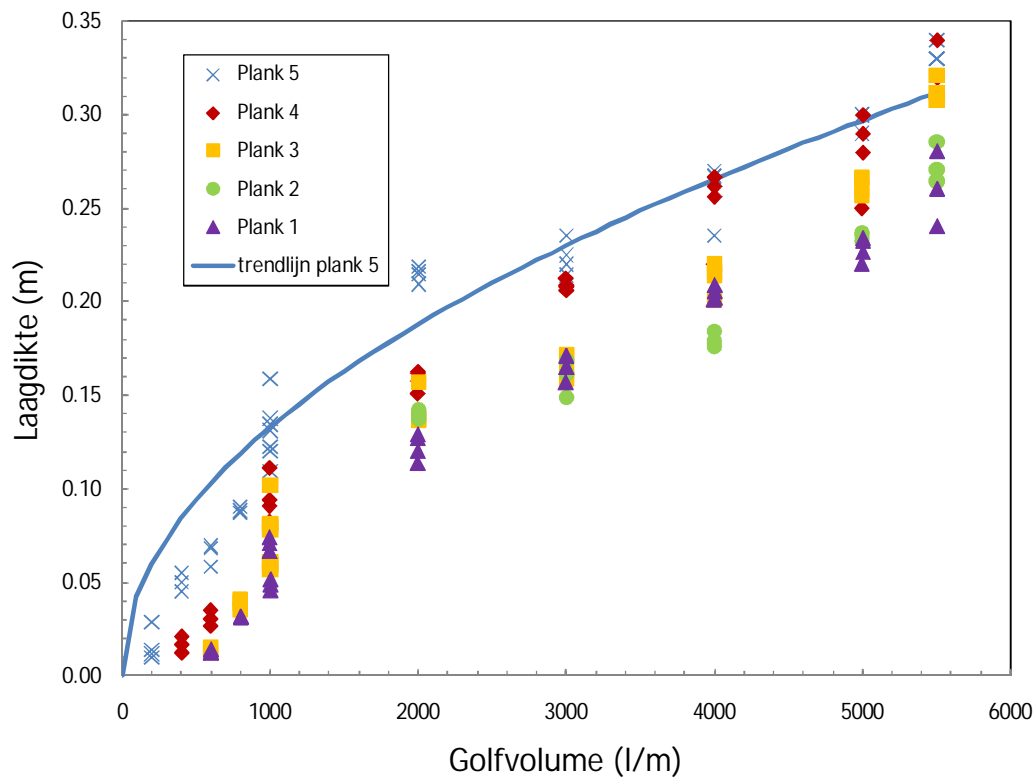


Figuur 2.48 Gemeten maximale laagdikten voor surfplank 5, aangepast voor de grote overslagvolumes

Annex 4 geeft de figuren voor alle surfplanken waarvoor het maximum is aangepast.

In figuur 2.49 zijn deze maximale laagdikten voor elke surfplank uitgezet als functie van het overslaande golfvolume. Globaal beschouwd geeft surfplank 5, op de binnenkruinlijn, de grootste laagdikten, gevolgd door surfplank 4. De laagdikten van de lageregelegen surfplanken 1-3 liggen dichtbij elkaar.





Figuur 2.49 Gemeten maximale laagdikten, aangepast voor de grote overslagvolumes

Tussen 200 l/m en 1000 l/m is duidelijk te zien dat de surfplanken verder op het binnentalud qua laagdikte achterblijven, wat veroorzaakt wordt door het vertragen van het overslaande water. Maar dit vertragende effect vond waarschijnlijk ook al plaats op de kruin zelf, waardoor ook de snelheden van surfplank 5 mogelijk al achterblijven ten opzichte van bijvoorbeeld de buitenkruinlijn. Voor golven van 2000 l/m en meer is het beeld vrijwel gelijk dat de laagdikte verderop het binnentalud achter blijft bij de laagdikte op de kruin.

Alle gemeten maximale laagdikten (en ook maximale snelheden), zoals deze op basis van het meetsignaal zijn bepaald, zijn in tabel 2.5 weergegeven. Tabel 2.6 geeft een vergelijkbare tabel, maar voor de geelgekleurde vakken zijn de maxima handmatig aangepast.

golfvolumen l/m	maximale laagdikte					maximale snelheid			
	plank 5 h (m)	plank 4 h (m)	plank 3 h (m)	plank 2 h (m)	plank 1 h (m)	plank 3 u (m/s)	grond 3 u (m/s)	plank 2	plank 1
lage sessie									
200	0.028					1.50			
200	0.014					1.00			
200	0.010					0.89			
200	0.012					0.96			
400	0.045	0.017				2.36			0.91
400	0.055	0.021				2.44	2.70		1.16
400	0.050	0.013				2.44	3.00		1.38
600	0.058	0.035	0.015		0.014	3.96	3.61		2.73
600	0.068	0.027	0.012		0.013	3.87	3.35		2.58
600	0.069	0.031	0.015		0.013	3.94	3.58		2.77
800	0.088		0.041		0.032	4.58	3.54		3.67
800	0.090		0.039		0.032	4.59	3.86		3.75
800	0.087		0.035		0.032	4.87	3.88		3.56
1000	0.109		0.061		0.046	5.16	3.90		4.51
1000	0.120		0.059		0.049	5.10	4.32		4.53
1000	0.123		0.057		0.052	5.11	3.85		4.60
midden sessie									
1000	0.159	0.111	0.102		0.074			5.19	5.05
2000	0.216	0.151	0.137		0.114			6.72	5.86
3000	0.254	0.212	0.163		0.157			7.56	6.73
4000	0.275	0.260	0.201		0.201			7.99	7.68
5000	0.340	0.333	0.267		0.277			8.69	8.43
hoge sessie									
1000	0.138	0.094	0.080		0.067		3.61		
1000	0.134	0.082	0.078		0.067		3.42		
1000	0.131	0.091	0.081		0.071		3.92		
2000	0.214	0.162	0.157	0.140	0.127		4.46		7.13
2000	0.209	0.158	0.138	0.137	0.129		4.25		6.65
2000	0.219	0.163	0.138	0.142	0.120		3.86		7.41
3000	0.225	0.208	0.159	0.149	0.165		4.55		7.22
3000	0.235	0.206	0.172	0.161	0.171		4.58		7.45
3000	0.214	0.209	0.171	0.169	0.165		4.11		7.57
4000	0.267	0.256	0.214	0.176	0.205		5.03		7.59
4000	0.267	0.267	0.216	0.179	0.209		5.08		7.99
4000	0.270	0.262	0.220	0.184	0.202		4.79		8.35
5000	0.317	0.415	0.257	0.232	0.226		5.90		8.62
5000	0.348	0.410	0.265	0.237	0.232		5.58		8.73
5000	0.352	0.407	0.260	0.236	0.234		6.05		8.78
5500	0.430	0.480	0.321	0.285	0.286		4.95		8.73
5500	0.364	0.487	0.312	0.264	0.302		5.04		9.12
5500	0.384	0.441	0.308	0.271	0.335		5.68		8.57

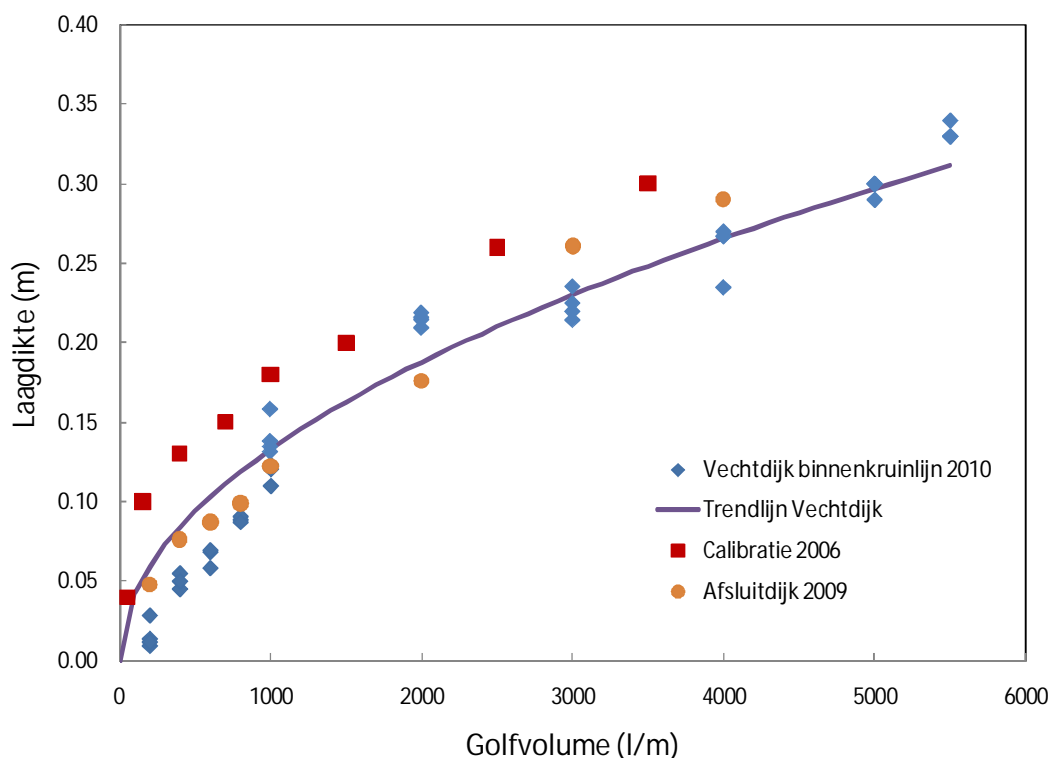
Tabel 2.5 Maximale laagdikten en snelheden (niet gecorrigeerde meetwaarden)

golfvolumel/m	maximale laagdikte					maximale snelheid			
	plank 5 h (m)	plank 4 h (m)	plank 3 h (m)	plank 2 h (m)	plank 1 h (m)	plank 3 u (m/s)	grond 3 u (m/s)	plank 2	plank 1
lage sessie									
200	0.028					1.50			
200	0.014					1.00			
200	0.010					0.89			
200	0.012					0.96			
400	0.045	0.017				2.36			0.91
400	0.055	0.021				2.44	2.70		1.16
400	0.050	0.013				2.44	3.00		1.38
600	0.058	0.035	0.015		0.014	3.96	3.61		2.73
600	0.068	0.027	0.012		0.013	3.87	3.35		2.58
600	0.069	0.031	0.015		0.013	3.94	3.58		2.77
800	0.088		0.041		0.032	4.58	3.54		3.67
800	0.090		0.039		0.032	4.59	3.86		3.75
800	0.087		0.035		0.032	4.87	3.88		3.56
1000	0.109		0.061		0.046	5.16	3.90		4.51
1000	0.120		0.059		0.049	5.10	4.32		4.53
1000	0.123		0.057		0.052	5.11	3.85		4.60
midden sessie									
1000	0.159	0.111	0.102		0.074			5.19	5.05
2000	0.216	0.151	0.137		0.114			6.72	5.86
3000	0.220	0.212	0.163		0.157			7.56	6.73
4000	0.235	0.220	0.201		0.201			7.99	7.68
5000	0.300	0.250	0.267		0.220			8.69	8.43
hoge sessie									
1000	0.138	0.094	0.080		0.067		3.61		
1000	0.134	0.082	0.078		0.067		3.42		
1000	0.131	0.091	0.081		0.071		3.92		
2000	0.214	0.162	0.157	0.140	0.127		4.46		7.13
2000	0.209	0.158	0.138	0.137	0.129		4.25		6.65
2000	0.219	0.163	0.138	0.142	0.120		3.86		7.41
3000	0.225	0.208	0.159	0.149	0.165		4.55		7.22
3000	0.235	0.206	0.172	0.161	0.171		4.58		7.45
3000	0.214	0.209	0.171	0.169	0.165		4.11		7.57
4000	0.267	0.256	0.214	0.176	0.205		5.03		7.59
4000	0.267	0.267	0.216	0.179	0.209		5.08		7.99
4000	0.270	0.262	0.220	0.184	0.202		4.79		8.35
5000	0.290	0.300	0.257	0.232	0.226		5.90		8.62
5000	0.300	0.290	0.265	0.237	0.232		5.58		8.73
5000	0.300	0.280	0.260	0.236	0.234		6.05		8.78
5500	0.330	0.340	0.321	0.285	0.240		4.95		8.73
5500	0.330	0.310	0.312	0.264	0.260		5.04		9.12
5500	0.340	0.320	0.308	0.271	0.280		5.68		8.57

Tabel 2.6 Maximale laagdikten en snelheden, met in gele vakken handmatig gecorrigeerde waarden

De gemeten laagdikten in figuur 2.48 kunnen worden vergeleken met eerdere metingen. Bij het ontwerpen van de golfvoerslagsimulator in 2006 zijn laagdikten visueel bepaald en wel op 2 m na de simulator en op een volkomen vlak en glad talud. De nauwkeurigheid van deze metingen is niet erg groot. Daarnaast zijn vorig jaar op de Afsluitdijk met de surfplank voor het eerst metingen gedaan. Het binnentalud was hier iets steiler dan op de Vechtdijk. De

vergelijking van de metingen is gemaakt in figuur 2.50. De metingen van 2006, op het gladde talud, liggen consequent iets hoger. De metingen van de Afsluitdijk komen voor de grotere overslagvolumes goed overeen en liggen wat hoger voor de kleinere overslagvolumes.



Figuur 2.50 Laagdiktemetingen van surfplank 5, op de binnenkruinlijn, vergeleken met eerdere metingen

De trendlijn voor de binnenkruinlijn kan worden gegeven door:

$$h = 0.133 V^{0.5} \quad (2.22)$$

Dit is iets lager dan op basis van de calibratie en de Afsluitdijkmetingen is voorgesteld ( $h = 0.149 V^{0.5}$ ). Bij de calibratie was de vloer erg vlak (beton). De Afsluitdijkmetingen zelf komen wel goed overeen met formule 2.22.

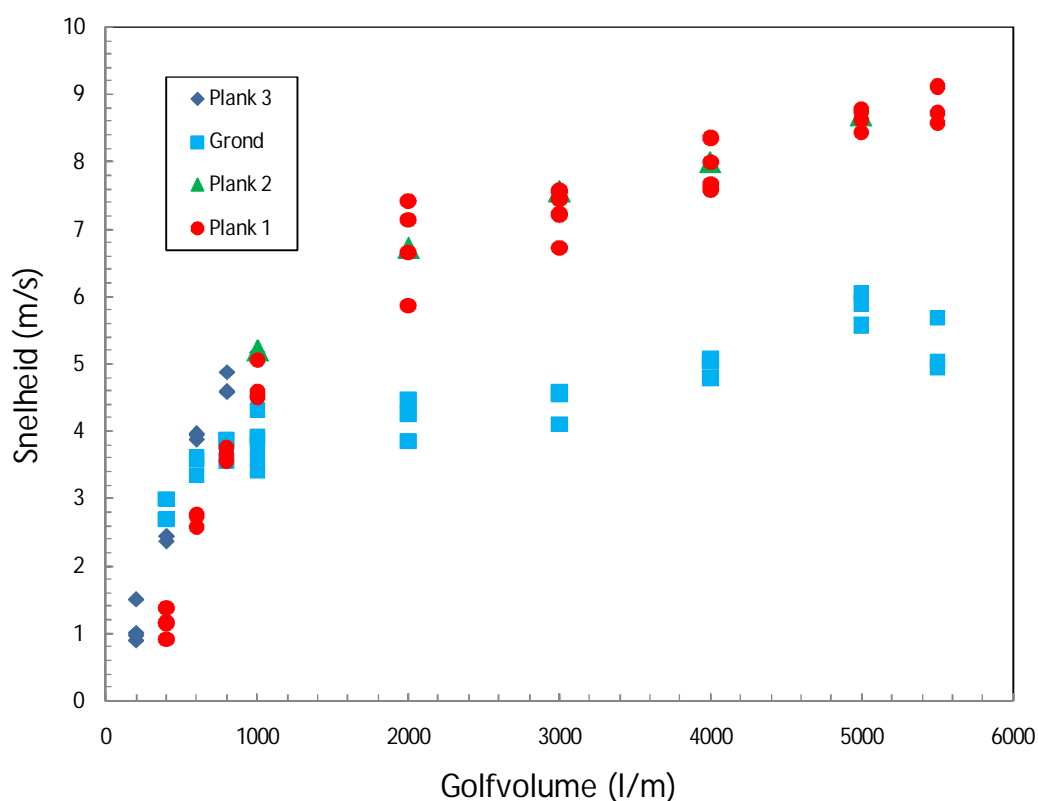
#### Maximale snelheden

In Annex 3 zijn alle gemeten maximale snelheden voor elke surfplank uitgezet als functie van het overslaand golfvolume. Voor surfplank 3 (4 m vanaf de binnenkruinlijn) zijn dit alleen de snelheden voor overslaande volumes tot en met 1000 l/m. De grondsnelheid (ter hoogte van surfplank 3) en de snelheid van surfplank 1 (12 m van de binnenkruinlijn) zijn over het hele bereik van overslaande volumes gemeten. De snelheid van surfplank 2 werd voor overslaande volumes van 1000-5000 l/m bepaald. Figuur 2.51 geeft het totaalbeeld van alle meetpunten.

Wat het meest opvalt is dat de grondsnelheid voor overslaande volumes groter of gelijk aan 1000 l/m duidelijk achterblijft bij de snelheid bovenin de laag van het overstromende water. De snelheid vlak bij de grond zit tussen 4-5 m/s, terwijl de snelheid bovenin de laag van 4 m/s

toeneemt tot 9 m/s. De snelheid in de laag is dus beslist niet overal gelijk, wat op theoretische gronden ook al bekend was. De vraag blijft hoe ver vanaf de bodem de snelheid wel in de buurt komt van de snelheid bovenin de laag.

De snelheden van surfplank 2 en surfplank 1 (4 m uit elkaar) komen goed overeen. Bij 1000 l/m sluiten de snelheden van deze surfplanken goed aan bij de hoger gelegen surfplank 3. Alleen voor kleinere overslaande debieten dan 1000 l/m blijft de snelheid lager op het talud achter. Kleine volumes vertragen veel, grotere bijna niet. Figuur 2.52 geeft alleen de snelheden bovenin de overstromende waterlaag.



Figuur 2.51 Maximale snelheden als functie van het overslaande volume

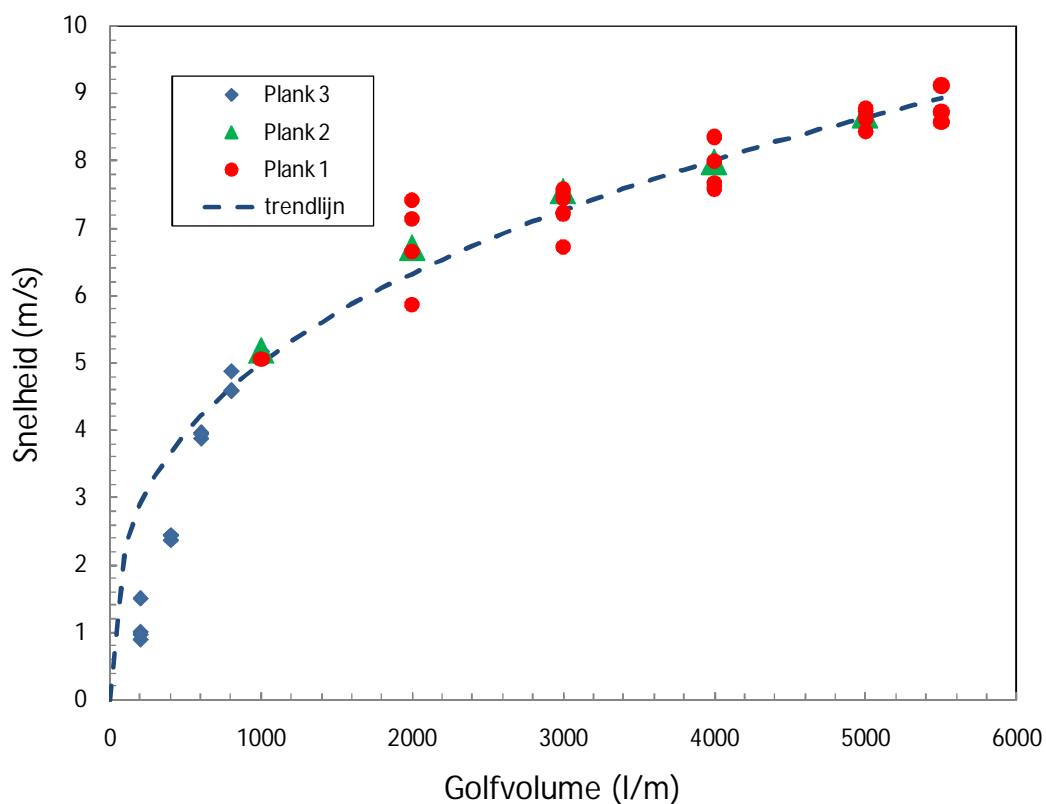
De trendlijn in figuur 2.52 kan worden gegeven door:

$$u = 5.0 V^{0.34} \quad (2.23)$$

waarin  $u$  in m/s en  $V$  in  $m^3/m$  (de coëfficiënt 5.0 is niet dimensieloos).

Op basis van de eerder genoemde metingen in 2006 en 2009 kan ook een vergelijking gemaakt worden met de gevonden maximale snelheid. Dit is gedaan in figuur 2.52. De trendlijn op basis van de eerdere metingen werd gegeven door:

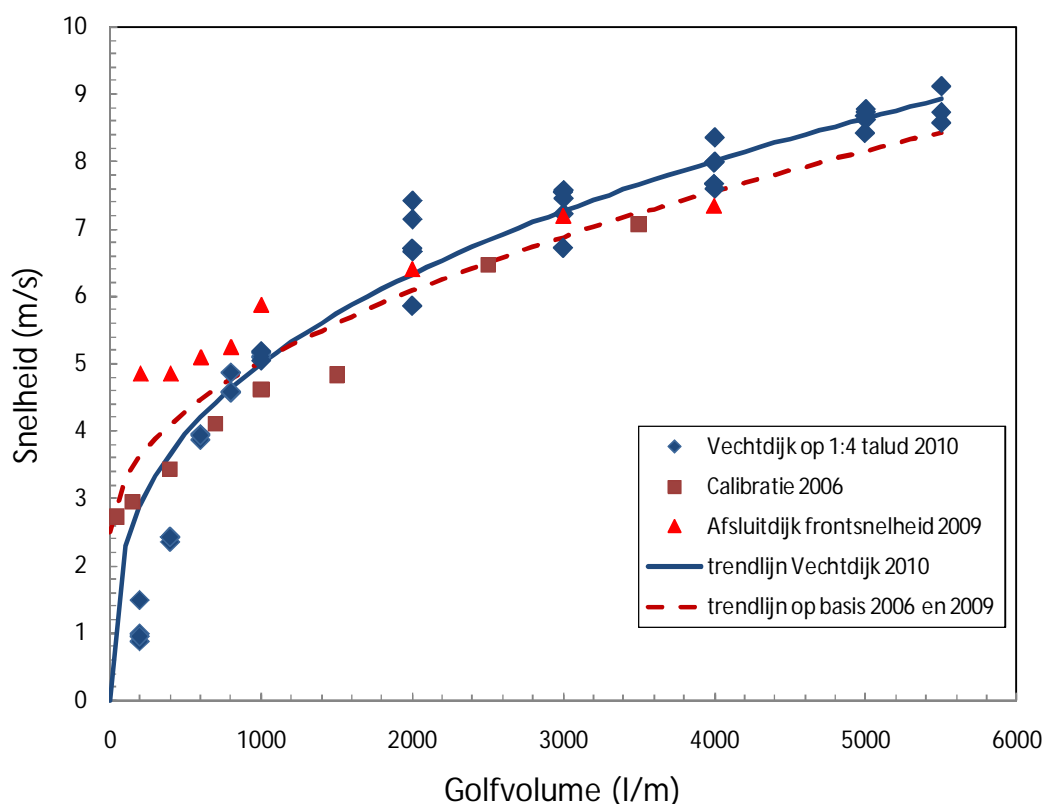
$$u = 2.53 V^{0.5} + 2.5 \quad (2.24)$$



Figuur 2.52 Maximale snelheden bovenin de overstromende waterlaag met trendlijn

De snelheden bij de calibratie in 2006 werden met een electromagnetische snelheidsmeter bepaald en dan ook nog met een bemonsteringsfrequentie van 2 Hz. Deze metingen zijn iets minder betrouwbaar, maar komen voor de grotere volumes goed overeen. Kleine volumes vielen van een zekere hoogte uit de simulator en vertraagden niet over de 2 m na de simulator. Bij de Vechtdijk was voor de kleinere overslaande volumes duidelijk wel een vertraging aanwezig over de kruin. Bij de Afsluitdijk werden frontsnelheden bepaald met behulp van een highspeed camera. In zijn algemeenheid komen de frontsnelheden heel aardig met de metingen van de Vechtdijk overeen. Ze liggen net iets lager.

Formule (2.24) gaat ervan uit dat kleine overslaande volumes altijd een bepaalde snelheid hebben, omdat ze van een bepaalde hoogte uit de simulator vallen. Dit is ook zo, maar de snelheid op de binnenkruinlijn, 3 m verderop, is toch weer afgenomen. In vergelijking met de Afsluitdijk is gekozen voor een formulering die wel in het nulpunt begint en voor grotere overslaande volumes iets hoger ligt. Voor een overslaand volume van 1000 l/m wordt een snelheid van 5 m/s gevonden, gelijk aan de eerdere formulering.

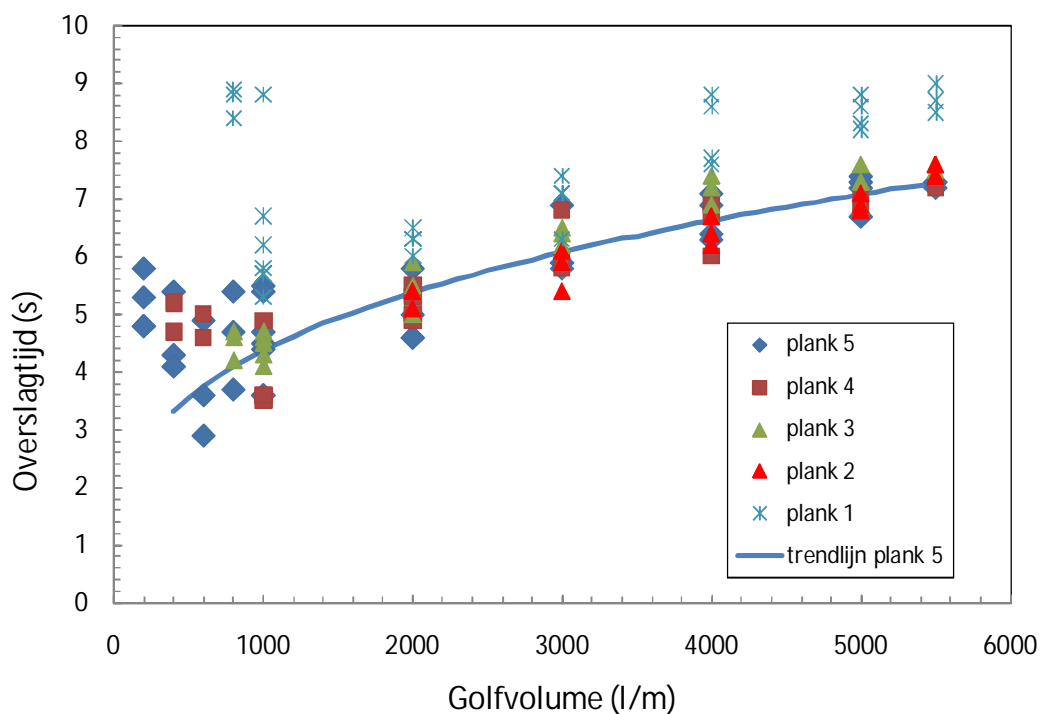


Figuur 2.53 Maximale snelheden vergeleken met eerdere metingen

### Overslagtijden

In Annex 3 zijn ook voor alle vijf surfplanken, op basis van de laagdiktemetingen, de overslagtijden gegeven als functie van het overslaande volume. De methode om de overslagtijd te bepalen, is uitgelegd in paragraaf 2.3.1 en figuur 2.48. Figuur 2.54 geeft alle metingen tezamen.

Voor overslaande golfvolumes groter dan 1000 l/m is er een mooi verband. Voor de kleinere overslaande volumes is dit duidelijk minder het geval. Dit komt toch doordat kleinere volumes het "na kabbelende" of vertragende effect hebben, waardoor een grotere overslagtijd wordt gevonden dan verwacht. Surfplanken 2, 3 en 4 zitten heel dichtbij elkaar, waarbij surfplank 2 vaak aan de lage kant zit. Al eerder is genoemd dat de laagdiktemeting van surfplank 2 niet echt betrouwbaar is, en alleen de metingen van de grotere overslaande volumes leken goed. Wat betreft de overslagtijd geven ze steeds een iets kortere tijd en zijn ze misschien toch niet betrouwbaar genoeg. Dit geldt deels ook voor surfplank 4, waar een wat onregelmatig signaal is verkregen (zie ook Annex 2). Om deze redenen zijn in figuur 2.55 de metingen van surfplanken 2 en 4 achterwege gelaten.



Figuur 2.54 Overslagtijden op basis van laagdiktemetingen, voor alle surfplanken

Nu liggen de metingen van surfplank 3 (4 m vanaf de binnenkruinlijn) mooi tussen de metingen in van surfplank 5 (op de binnenkruinlijn) en surfplank 1 (12 m vanaf de binnenkruinlijn en 8 m vanaf surfplank 3). Het is ook duidelijk dat over de 8 m die surfplanken 3 en 5 van elkaar scheidde, de overslagtijd iets toeneemt, mogelijk doordat het talud hier redelijk flauw was.

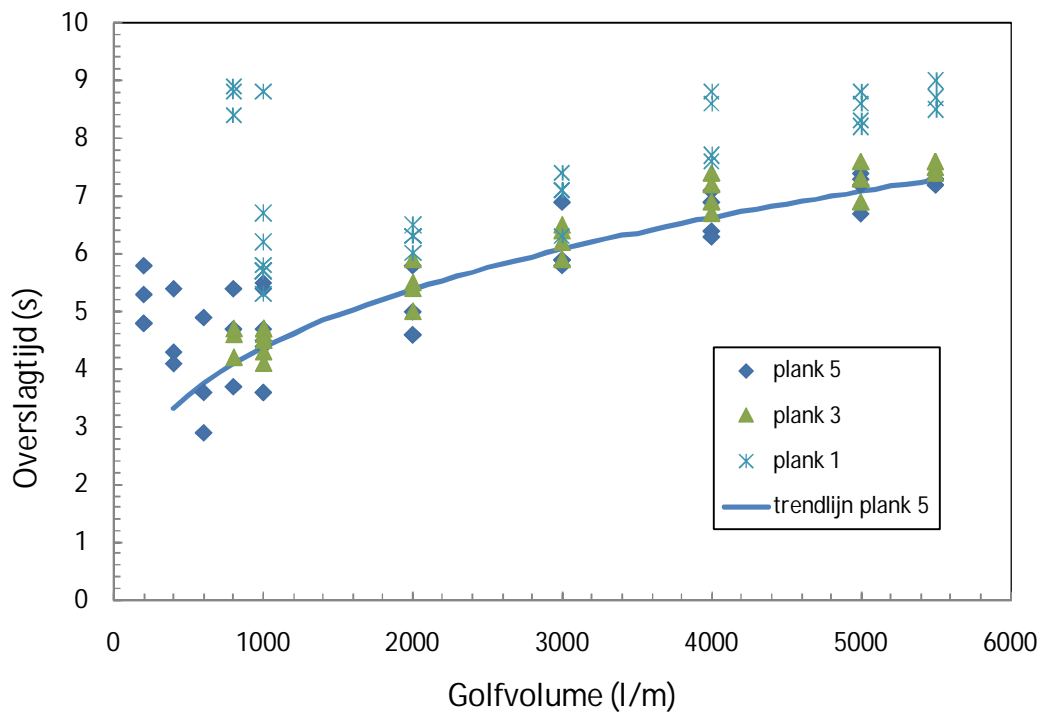
De trendlijnen voor surfplanken 5, 3 en 1 (zie Annex 3) kunnen allemaal door een machtsfunctie worden beschreven met een macht 0,3:

$$T_{\text{ovt}} = a V^{0.3} \quad (2.25)$$

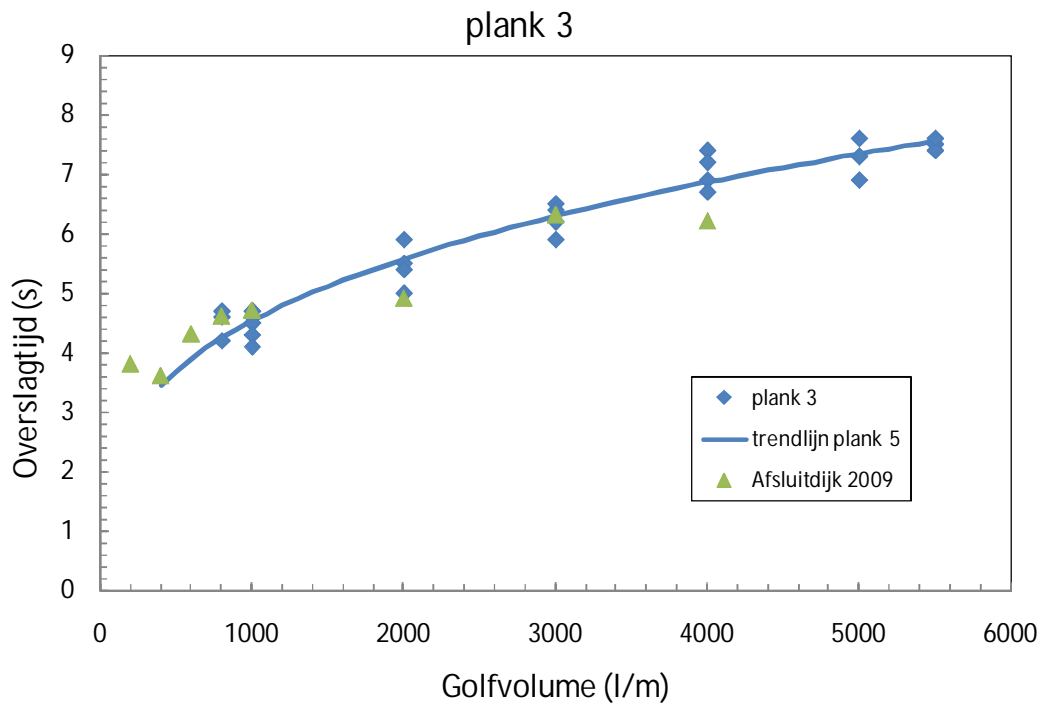
waarin  $T_{\text{ovt}}$  in s en  $V$  in  $\text{m}^3/\text{m}$  (ook hier is de coëfficiënt  $a$  niet dimensieloos).

De waarden van  $a$  zijn achtereenvolgens van binnenkruinlijn naar beneden: 4,4; 4,5; en 5,2.





Figuur 2.55 Overslagtijden voor surfplanken 1, 3 en 5



Figuur 2.56 Overslagtijden op 4 m vanaf de binnenkruinlijn vergeleken met de metingen op de Afsluitdijk

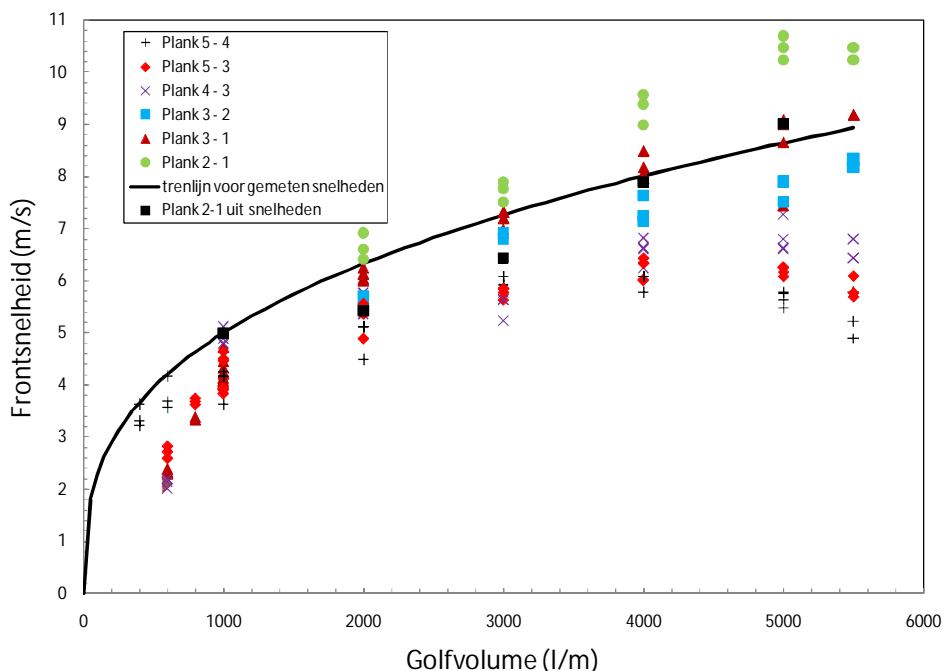
Uit de laagdiktemetingen op de Afsluitdijk zijn ook overslagtijden bepaald. In figuur 2.56 zijn deze vergeleken met de overslagtijden van surfplank 3. De metingen komen goed met elkaar overeen.

## Frontsnelheden

Bij de Afsluitdijk zijn in 2009 frontsnelheden bepaald door een high speed camera te gebruiken en het aantal beeldjes te tellen dat nodig bleek voor het front van de golf om een bepaalde afstand (bijvoorbeeld 2 m) over het binnentalud af te leggen. Deltares heeft draadgolfhoogtemeters gebruikt om frontsnelheden te bepalen. De afstand tussen de draadgolfhoogtemeters en de tijd die nodig was om die afstand te overbruggen, gaf de frontsnelheid.

Deze laatste manier kan ook worden gebruikt om de frontsnelheid tussen de verschillende surfplanken te bepalen. Na een eerste analyse van de signalen, zoals in Appendix 2 gegeven, werd besloten om het tijdstip van "start van bewegen" te nemen op het moment dat de surfplank een laagdikte van 0,01 m passeerde. De bemonsteringsfrequentie was 112,5 Hz. Op deze manier werden de frontsnelheden bepaald tussen opeenvolgende surfplanken onderling (van 5 naar 4, 4 naar 3, etc.) en nog over een grotere afstand, van 5 naar 3 (4 m) en 3 naar 1 (8 m).

Figuur 2.57 geeft de op deze manier bepaalde frontsnelheden als functie van het overslaand golfvolume. Ter vergelijking is de trendlijn ook gegeven, welke de gemeten snelheid geeft van surfplanken 1-3. Ook is de frontsnelheid bij de middensessie bepaald uit de signalen van de snelheden van planken 1 en 2.

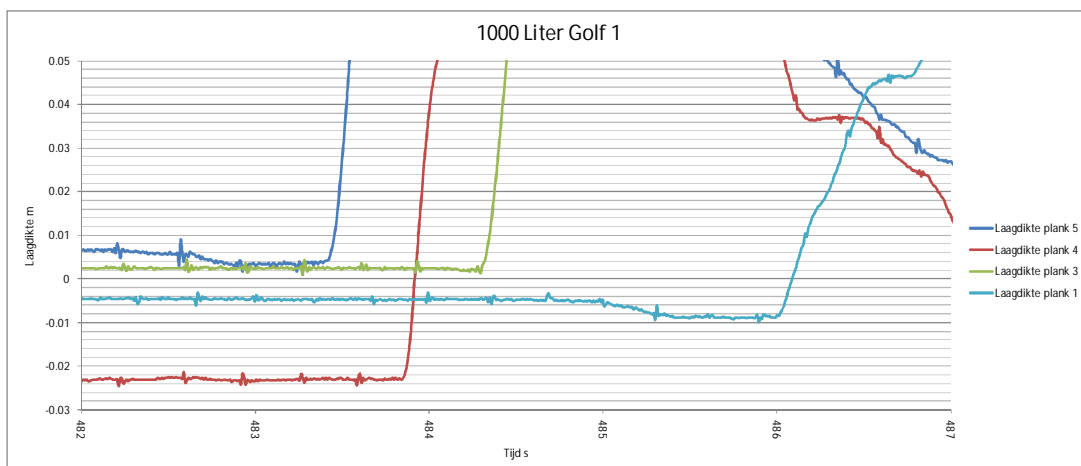
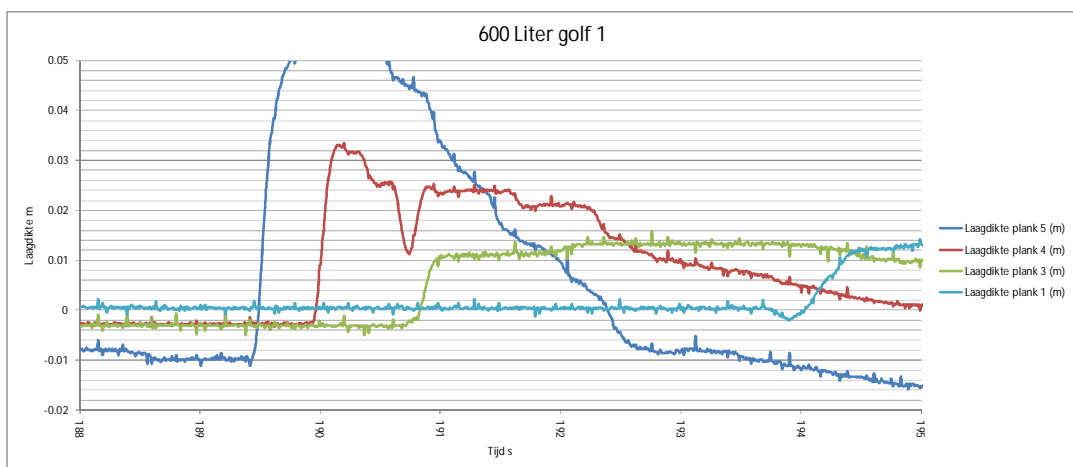


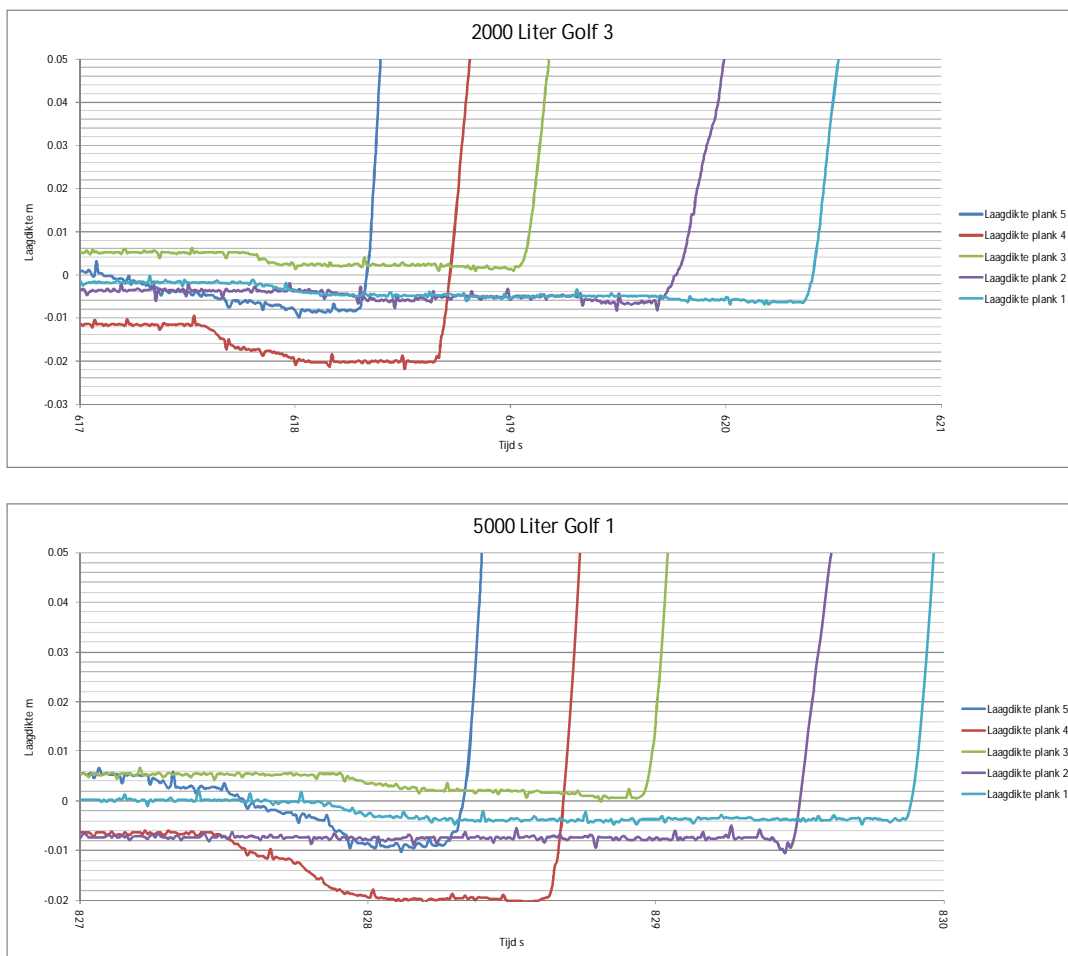
Figuur 2.57 Frontsnelheden bepaald uit de laagdiktemeting en op het moment dat een laagdikte van 0,01 m werd overschreden

De frontsnelheid van surfplanken 3 naar 1, dus over 8 m en daarbij overeenkomende met het traject waar ook de snelheid direct werd gemeten (surfplanken 1-3), komt heel goed met de trendlijn overeen. Ook worden voor kleine overslaande volumes, kleiner dan 1000 l/m, lagere

snelheden gevonden verder naar beneden op het talud. Dit komt ook overeen met eerdere metingen.

Maar daarnaast is het duidelijk dat de frontsnelheid een trend en variatie laat zien die niet overeen komen met de gemeten snelheid. Voor overslaande volumes groter dan 1000 l/m worden bovenaan het talud (veel) lagere frontsnelheden gevonden dan verderop het talud. Ook lijkt de frontsnelheid voor de grootste overslaande volumes van 5000 l/m en 5500 l/m af te nemen, wat niet logisch is. De op basis van snelheden bepaalde frontsnelheden tussen planken 2 en 1 komt wel goed met de trendlijn overeen.





Figuur 2.58 Detail signalen laagdikte bij begin van beweging

Om de verschillen te onderzoeken zijn meetsignalen in detail bekeken en wel voor het moment waarop de overslaande golf de surfplanken bereikt. Figuur 2.58 geeft deze meetsignalen voor overslaande golfvolumes van achtereenvolgens 600; 1000; 2000; en 5000 l/m. De maximale laagdikte op de verticale as werd op 0,05 m gezet en ook het negatieve deel van de signalen werd gegeven.

Een laagdikte kan negatief worden omdat bijvoorbeeld in rust de surfplank iets lager is gaan liggen dan bij de ijking, of doordat een aankomende golf eerst een beweging veroorzaakt in de rotatiemeter die tegengesteld is aan het omhoog komen van de surfplank. De surfplank is niet geheel stijf en krijgt een plotselinge belasting, waardoor de surfplank omhoog gaat en op de naar beneden stromende waterlaag gaat drijven.

In Annex 2 wordt het negatieve deel van de signalen niet gegeven. Vaak is het maar net negatief en vrijwel nooit meer dan 0,02 m. Bij sommige signalen bleek dat negatieve waarden niet werden weergegeven en dat de waarde nul werd aangehouden. Dit komt omdat bij de ijking van elke surfplank gezocht is naar een zo goed mogelijk fit (Annex 1) en hiervoor is een machtsfunctie gebruikt. De machtscoëfficiënt lag vaak dicht in de buurt van 1, wat een rechte lijn geeft, maar was soms toch een beetje afwijkend van 1. De aangehouden machtsfunctie kan niet met negatieve waarden overweg, zodat de waarde nul werd weergegeven.

Om dit probleem op te lossen is opnieuw een ijking toegepast, maar nu met een lineaire fit en vooral op het gedeelte met een laagdikte tussen 0 en 0,10 m. Met deze nieuwe ijking werd figuur 2.58 gemaakt.

De procedure om de frontsnelheid te bepalen was om de tijdstippen te vergelijken waarop het signaal een laagdikte van 0,01 m passeerde. Deze tijdstippen zijn in figuur 2.58 ook goed te bepalen, omdat in vrijwel alle gevallen het signaal daar snel omhoog gaat. Het verschil in tijd tussen de verschillende laagdiktemetingen, geeft ook al een indicatie in verschil van frontsnelheden. De signalen van surfplanken 5, 4 en 3 bij de 600 l/m golf, laten zien dat de frontsnelheid kleiner wordt (vertraging bij kleine overslaande volumes).

Het beeld van de 2000 l/m en 5000 l/m overslaande golven laat zien dat tussen surfplanken 4 en 3 een grotere frontsnelheid bestaat dan tussen 5 en 4, en dat ook tussen 2 en 1 een behoorlijke versnelling lijkt te ontstaan ten opzicht van het traject 3 naar 2. Dit is ook het algemene beeld in figuur 2.57, maar klopt niet met de gemeten snelheid (een hele lichte afname tussen surfplanken 3 en 1).

Figuur 2.58 laat zien dat een surfplank al een (neerwaartse) beweging laat zien, lang voordat het golffront de plank bereikt. Dit is het duidelijkste te zien bij de signalen van de grootste overslaande golven en wel voor surfplanken 5, 4, 3 en 1. Vaak een seconde of meer voordat de plank omhoog gaat, geeft het signaal een negatieve waarde. De daling varieert per surfplank en is het grootst voor surfplank 4. Surfplank 4 moet daarmee eerst orde 0,03 m omhoog gaan, voordat het niveau van +0,01 m wordt bereikt.

Hierdoor ontstaat voor sommige surfplanken onderling een soort vertraging en dit telt direct door in het bepalen van de frontsnelheid.

De conclusie is dat elke surfplank zijn eigen manier van "begin van bewegen" heeft en dat daardoor heel moeilijk een juiste frontsnelheid kan worden bepaald. Alleen over grote afstanden, zoals bijvoorbeeld tussen surfplank 3 en 1 over 8 m, lijkt dit goed te lukken en komen frontsnelheid en gemeten snelheid bovenin de overstromende waterlaag heel goed overeen (figuur 2.57). Wel lijkt het goed te gaan als van het signaal van de snelheid wordt uitgegaan.

#### *Overslaande golfvolumes middels integratie*

In de voorgaande paragrafen zijn de laagdikten, snelheden en overslagtijden afzonderlijk beschreven. Integratie van snelheid en laagdikte over de tijd dat er water stroomt levert in principe het totale overslaande volume (per m breedte). En een vergelijking met het daadwerkelijk overslaand golfvolume is dan interessant. Ten eerste om te kijken of integratie inderdaad goed werkt en ten tweede om mogelijk iets over luchtinsluiting te kunnen zeggen, want de surfplank drijft bovenop het stromende water en meet dus inclusief de luchtinsluiting.

Alle signalen van laagdikte en snelheid van surfplank 1 zijn in Annex 5 weergegeven. Voor elk overslaand volume zijn alle gemeten golven in dezelfde grafiek uitgezet, wat een indicatie geeft van de betrouwbaarheid van het meetsignaal bij herhaling. Hetzelfde is gedaan in Appendix 6 voor surfplank 3, maar daar is de snelheid alleen goed gemeten voor de lage sessie met de kleine overslaande volumes.

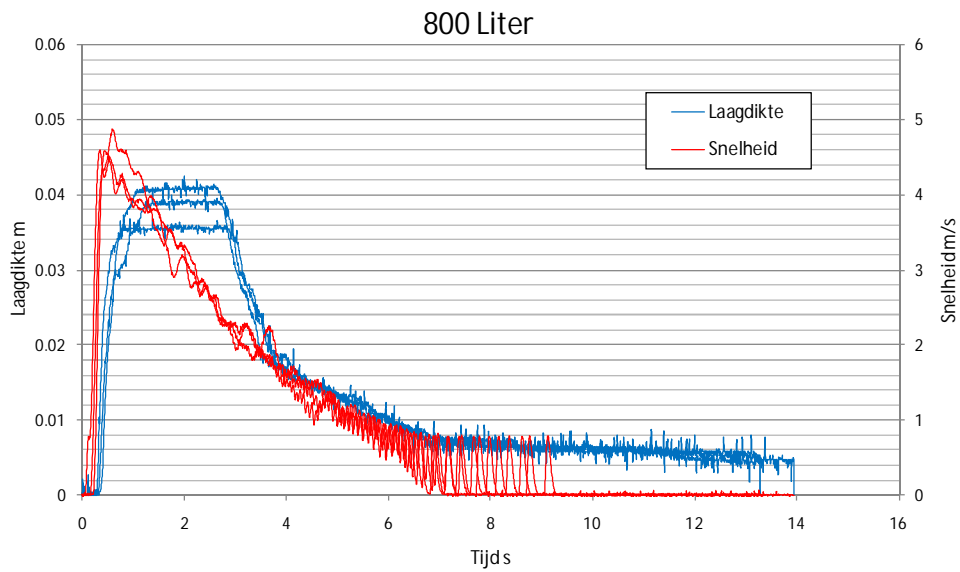
Het algemene beeld uit beide appendici is dat meetsignalen bij herhaling van golven vrijwel op elkaar liggen. De reproduceerbaarheid is goed tot erg goed.

Allereerst worden laagdikte- en snelheidssignalen met elkaar vergeleken. In figuren 2.59-2.61 is een aantal metingen als voorbeeld genomen. Figuur 2.59 geeft een klein overslaand volume van 800 l/m voor surfplank 3. De snelheidssignalen liggen mooi op elkaar. Het maximum van de laagdikte is niet precies gelijk. Dit kan veroorzaakt zijn door het feit dat het volume in de golfoverslagsimulator visueel werd vastgesteld op basis van het peilglas en dat op basis van visuele waarneming besloten werd de simulator te legen. Vooral voor de wat kleinere overslaande golfvolumes, kan hierdoor een variatie in overslaand volume zijn ontstaan. Het duidelijkst is dit te zien voor het kleinste overslaande volume van 200 l/m. Zie bijvoorbeeld de eerste pagina van Annex 2, waar het eerste volume vermoedelijk iets groter is geweest dan 200 l/m.

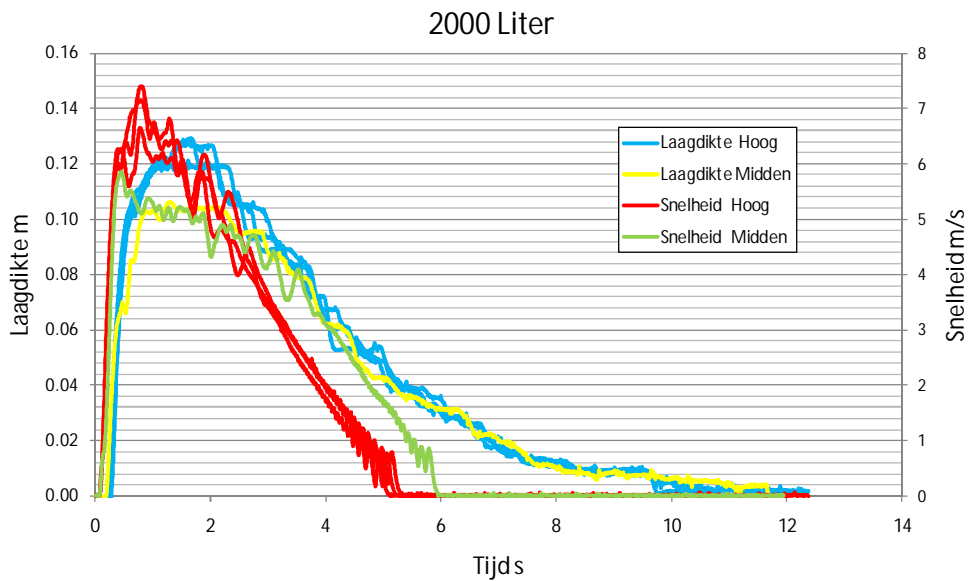
Behalve het precieze maximum liggen de laagdiktesignalen in figuur 2.59 goed op elkaar. Wat in de figuur opvalt is dat er nog meerdere seconden lang een laagdikte van minder dan 1 cm "nakabbelt", maar dat hiervoor geen snelheid wordt gemeten. Dat is ook logisch, want de snelheidsmeter zit vlak boven de bodem en een heel dunne waterlaag komt niet tegen de snelheidsmeter aan. Verder neemt de snelheid direct na het maximum af, terwijl dit even duurt voor de laagdikte. Het snelheidssignaal begint net iets eerder dan het signaal van de laagdikte. Ook dit is logisch, want de surfplank moet eerst gaan drijven en de snelheidsmeter zit ook net iets meer "stroomopwaarts" gemonteerd.

Figuur 2.60 geeft de signalen voor een overslaand volume van 2000 l/m en wel voor surfplank 1. Nu zijn zowel de hoge (3 golven) als de middensessie (1 golf) gegeven. De snelheids- en laagdiktesignalen komen voor eenzelfde sessie goed overeen, wat ook hier de goede reproduceerbaarheid weergeeft. Het maximum van de laagdikte ligt bij de middensessie iets lager dan bij de hoge sessie. Dit is in voorgaande paragrafen al besproken.

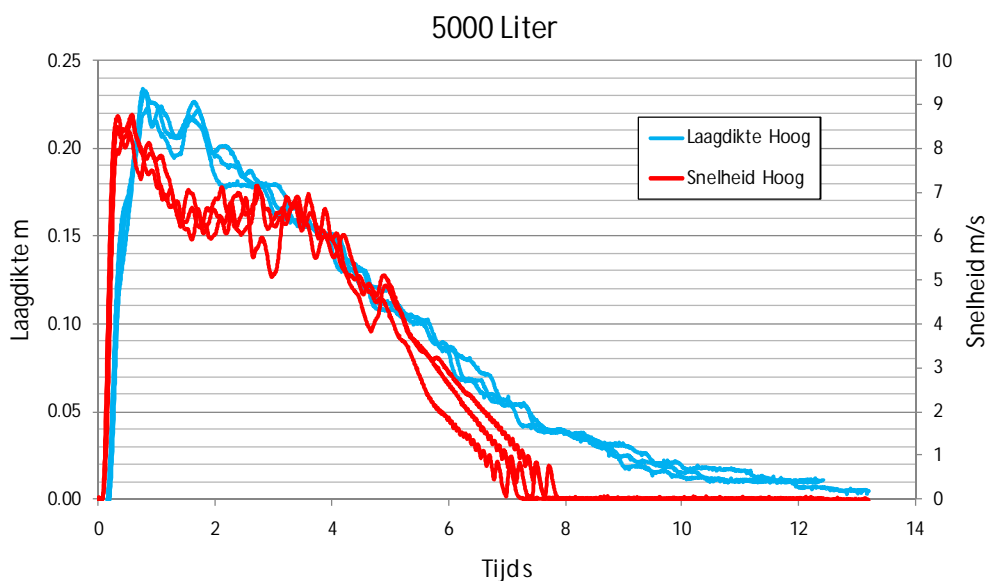
Verder valt op dat de snelheidssignalen eerder op nul komen dan de laagdiktesignalen en dat dit voor de middensessie later gebeurt dan voor de hoge sessie. Dit kan worden verklaard door de stand van de surfplanken te bekijken. Bij de hoge sessie zit de snelheidsmeter orde 4-5 cm vanaf de bodem en bij de middensessie is dit iets minder. Bij de hoge sessie komt de snelheid op nul bij een laagdikte van orde 4 cm, bij de middensessie is dit vrijwel 3 cm. Op dat moment drijft de surfplank nog wel, maar het water bereikt de snelheidsmeters niet meer. In feite wordt een te kort signaal verkregen voor een goede integratie, maar een voordeel is dat het over kleine laagdikten gaan en lagere snelheden, waardoor de invloed niet erg groot kan zijn.



Figuur 2.59 Laagdikte- en snelheidssignalen; Surfplank 3 met 800 l/m, sessie laag



Figuur 2.60 Laagdikte- en snelheidssignalen; Surfplank 1 met 2000 l/m



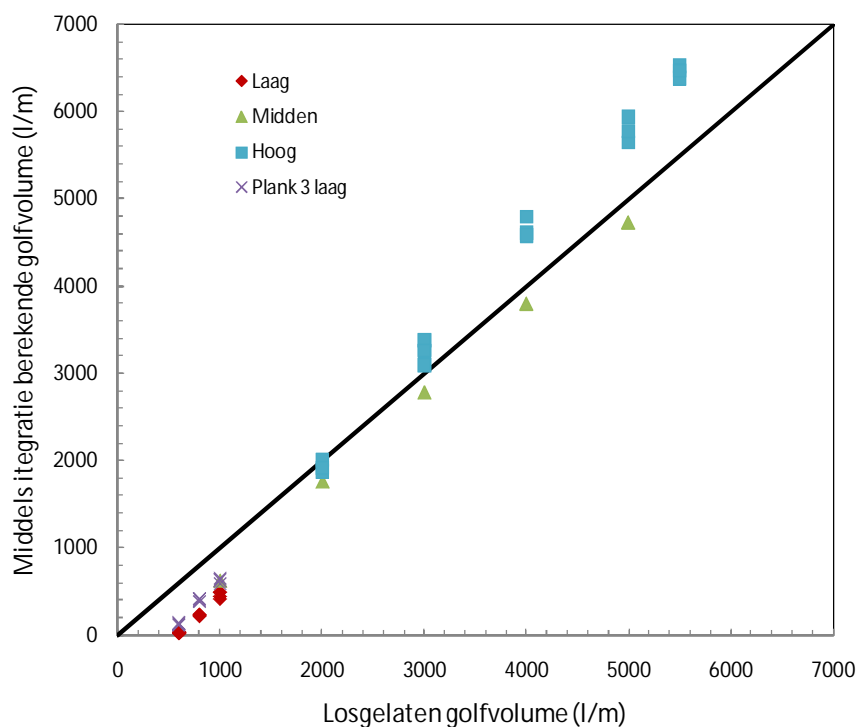
Figuur 2.61 Laagdikte- en snelheidssignalen; Surfplank 1 met 5000 l/m, sessie hoog

Tot slot is in figuur 2.61 een voorbeeld gegeven van een overslaand golfvolume van 5000 l/m. Opnieuw is de reproduceerbaarheid van de metingen erg goed. En opnieuw wordt bij een laagdikte van orde 4-5 cm de snelheid nul.

In figuren 2.60 en 2.61 komt de vorm van de snelheidsmeting meer overeen met de laagdiktemeting dan in figuur 2.59. Toch zijn ze niet precies gelijk.

In eerste instantie zijn de waarden van het snelheidssignaal en het laagdiktesignaal met elkaar vermenigvuldigd en geïntegreerd over de tijd. Dit kan voor surfplank 1 van overslaande golfvolumes van 600 - 5500 l/m en voor surfplank 3 alleen voor 600 - 1000 l/m. Surfplank 1 geeft dus vrijwel het volledige bereik van overslaande golfvolumes. De integratie is uitgevoerd over 15 s, beginnend bij de snelheid die het eerst van nul afwijkt. De resultaten voor beide surfplanken is gegeven in figuur 2.62.





Figuur 2.62 Middels rechtstreekse integratie berekend overslaand golfvolume voor surfplanken 1 en 3

Duidelijk is dat het beperkte snelheidssignaal voor overslaande golfvolumes kleiner dan 1000 l/m leidt tot lage berekende golfvolumes. Dit kon ook op basis van de meetsignalen al worden vermoed. Voor de grotere volumes wordt een waarde verkregen die redelijk in de buurt ligt van het werkelijk losgelaten golfvolume. Doordat de laagdikte bij de middensessie lager is dan bij de hoge sessie en de snelheid ook iets lager is (maar wel iets langer duurt), wordt er een significant verschil gevonden tussen de hoge en de midden sessie. De hoge sessie geeft daarmee hogere waarden dan de losgelaten volumes, de midden sessie zit er net onder.

Door de verschillen tussen de midden en hoge sessie is niets te zeggen over de eventuele mate van luchtinsluiting.

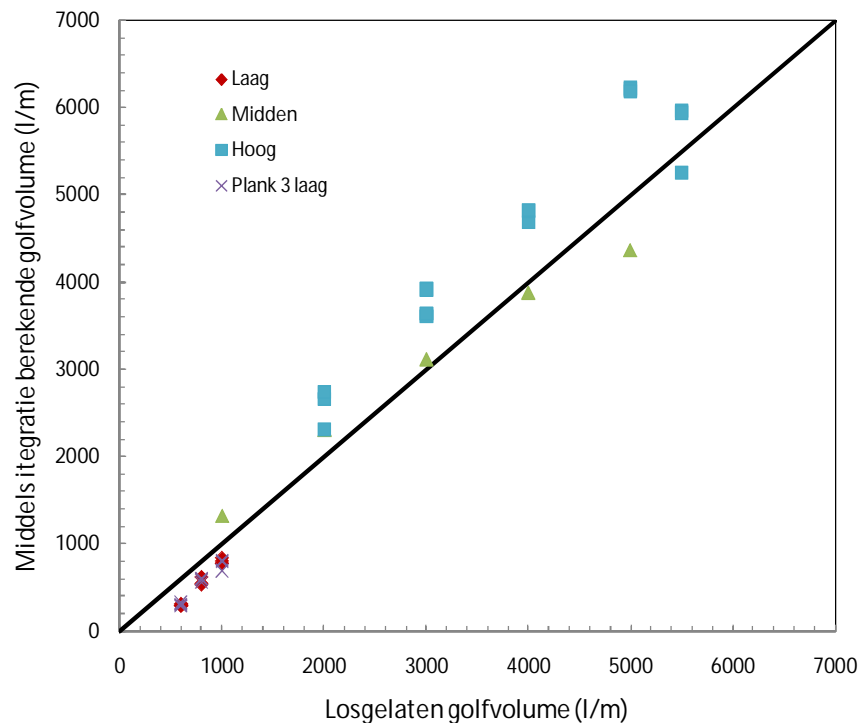
Omdat de snelheid iets te snel afneemt, omdat de snelheidsmeter een aantal centimeters boven de bodem zit, is er ook een alternatieve manier voor integratie. Deze manier is ook uitgevoerd bij analyse van de metingen op de Afsluitdijk. Hierbij was wel het verloop van de laagdikte gemeten, maar niet het verloop van de snelheid. Wel was de frontsnelheid bepaald. In figuur 2.57 komt de frontsnelheid gemeten over het traject van surfplank 3 naar surfplank 1 goed overeen met het gemeten maximum van de oppervlaktesnelheid van de surfplanken 1, 2 en 3. De alternatieve integratie gaat ervan uit dat de vorm van de laagdikte en de snelheid vrijwel gelijk zijn en dat daardoor alleen nog het maximum van de snelheid nodig is. Voor de snelheid wordt dan hetzelfde verloop genomen als van de laagdikte, maar de waarde wordt aangepast door  $v_{\max}/h_{\max}$  te nemen. De integratie wordt dan uitgevoerd door  $v_{\max}/h_{\max} * h^2$  over de tijd te integreren. Alle berekende overslaande golfvolumes zijn samengevat in Tabel 2.7. Figuur 2.63 geeft het resultaat van de alternatieve berekening.

Met name de kleine overslaande volumes komen nu dichterbij de lijn te liggen. Voor de grotere overslaande golfvolumes wordt in het algemeen een iets groter overslaand volume

berekend. Toch blijven de verschillen tussen de midden en hoge sessie dusdanig dat niets over eventuele luchtinsluiting kan worden gezegd.

golfvolumen l/m	Golfvolumen middels integratie (l/m)			
	plank 1 u*h	plank 1 $u_{max}/h_{max} * h^2$	plank 3 u*h	plank 3 $u_{max}/h_{max} * h^2$
lage sessie				
600	35.421	295.701	134	300
600	27.093	299.411	115	288
600	36.691	317.219	137	326
800	232.131	551.458	409	551
800	220.748	624.519	405	584
800	240.507	536.451	387	598
1000	448.021	780.093	650	806
1000	419.416	807.805	588	691
1000	496.576	842.677	627	792
midden sessie				
1000	617.615	1314.729		
2000	1753.957	2303.656		
3000	2777.481	3116.078		
4000	3794.732	3879.436		
5000	4726.408	4370.100		
hoge sessie				
2000	2008.210	2658.22		
2000	1878.265	2308.84		
2000	1916.682	2741.33		
3000	3092.165	3605.30		
3000	3375.947	3638.41		
3000	3258.168	3914.25		
4000	4612.537	4684.54		
4000	4793.522	4814.82		
4000	4579.221	4822.95		
5000	5651.599	6224.14		
5000	5938.465	6210.67		
5000	5768.682	6187.66		
5500	6384.891	5962.31		
5500	6524.849	5940.27		
5500	6467.616	5249.64		

Tabel 2.7 Middels integratie berekende overslaande golfvolumes



Figuur 2.63 Integratie van het overslaand golfvolume voor surfplanken 1 en 3, berekend door voor het snelheidssignaal de vorm van het laagdiktesignaal aan te houden

## 2.2.4 Conclusies en aanbevelingen surfplankmetingen

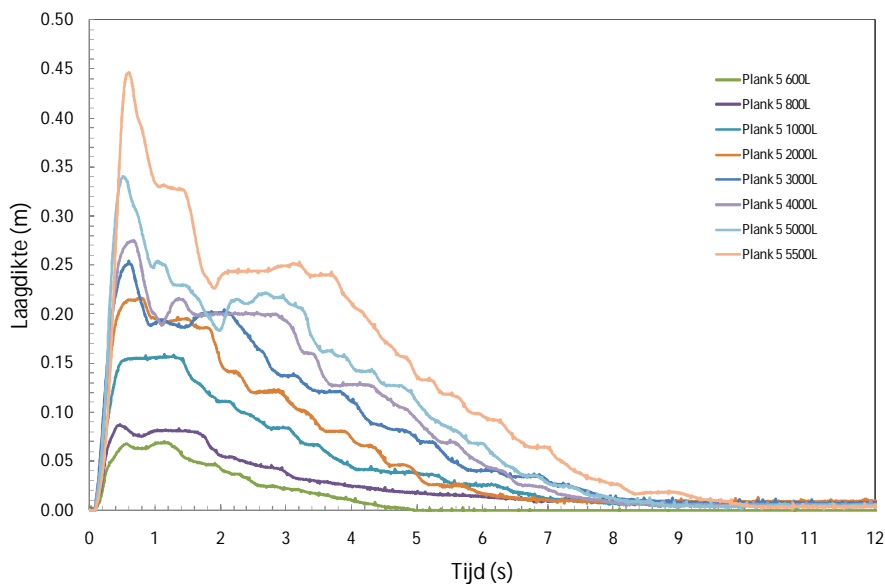
### Conclusies

Een eerste algemene conclusie is dat goede meetsignalen zijn verkregen van laagdikte en snelheid van overslaande golven op een binnentalud. Met name de snelheden met de nieuwe snelheidsmeters hebben goede resultaten opgeleverd. Bij de laagdiktemetingen is komen vast te staan dat de (maximum) waarde kan afhangen van de hoogte boven de bodem waarop de surfplank is bevestigd. Er zit dus enige variatie in de laagdiktemetingen voor de verschillende sessies. Maar van zowel de laagdikte als de snelheid is de reproduceerbaarheid van het meetsignaal erg goed.

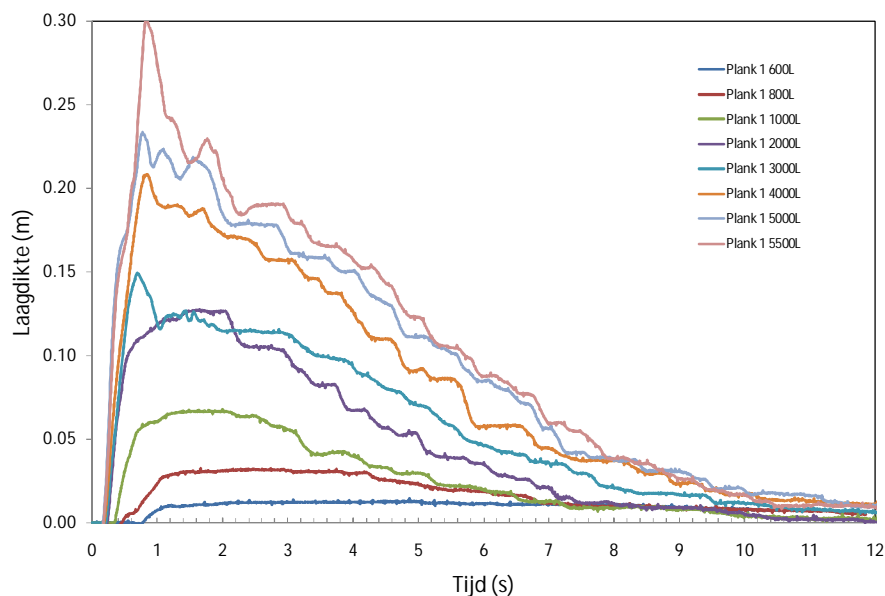
Figuren 2.64 – 2.66 geven achtereenvolgens de laagdikten op de binnenkruinlijn (surfplank 5), 12 m verder op het binnentalud (surfplank 1) en de snelheden van surfplank 1. Hierbij is het hele traject gegeven van overslaande golfvolumes van 200 l/m tot en met 5500 l/m. In alle gevallen wordt een mooie opbouwende tendens gevonden bij toenemend overslaand golfvolume. De grote overslaande volumes in figuur 2.64 geven een piek die wordt veroorzaakt doordat een dikke laag water met grote snelheid tegen de surfplank slaat en deze voor een korte tijd uit het water tilt. De analyse is hierop aangepast.

De potentiometer (rotatiemeter) van surfplank 2 heeft vanaf het begin niet goed gewerkt. Alleen in enkele gevallen kon het signaal worden gebruikt. De snelheidsmeter in surfplank 3 is na de eerste meetsessie waarschijnlijk door gras of vuil deels verstopt geraakt en de metingen hiermee waren niet meer betrouwbaar.

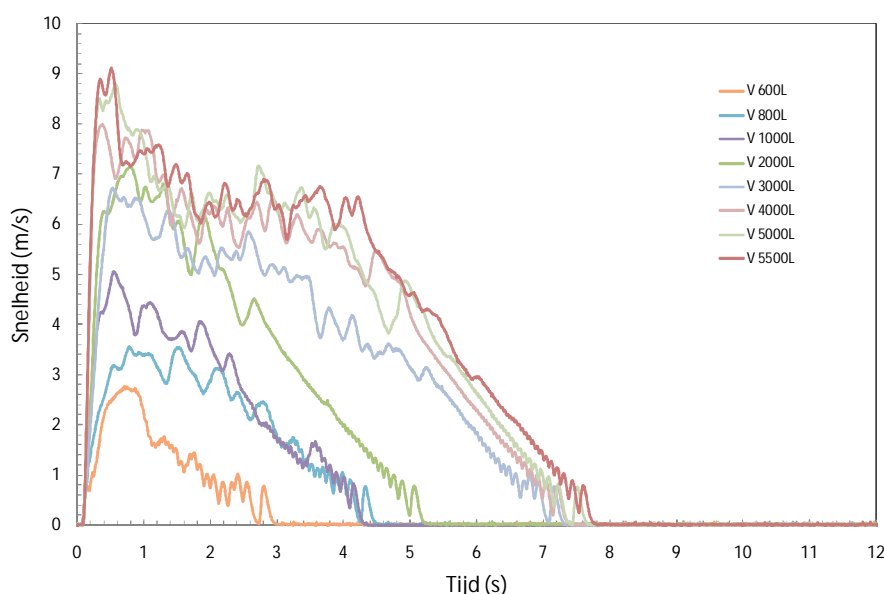
De grondsnelheid blijft bij groter wordend overslaand golfvolume achter bij de oppervlaktesnelheid. Dit was ook de verwachting, maar niet duidelijk was hoe groot de snelheid heel dicht bij de grond zou zijn.



Figuur 2.64 Laagdikten op de binnenkruinlijn (surfplank 5) voor verschillende volumes



Figuur 2.65 Laagdikten 12 m op het binnentalud (surfplank 1) voor verschillende volumes



Figuur 2.66 Snelheden 12 m op het binnentalud (surfplank 1) voor verschillende volumes

De frontsnelheid is berekend door het tijdsverschil te bepalen waarop de laagdiktemetingen een waarde van 1 cm bereikten en dit te relateren aan de afstand tussen de metingen. De frontsnelheid over grote afstand berekend, in totaal 8 m van surfplank 3 naar 1, komt erg goed overeen met het maximum van de gemeten oppervlaktesnelheid voor surfplanken 1, 2 en 3. Voor berekening over kortere afstanden bleken de uitkomsten niet consistent, met name doordat iedere surfplank zijn eigen karakteristiek heeft van opgetild worden door de golf en te gaan drijven. Kleine tijdsverschillen over korte afstanden leiden dan tot grote en inconsistente afwijkingen. Doordat de snelheid nu rechtstreeks kan worden gemeten, is de frontsnelheid niet echt belangrijk meer. Voor eerder bepaalde frontsnelheden, zoals bij de Afsluitdijk in 2009, is het wel belangrijk te weten dat deze frontsnelheid inderdaad goed het maximum van de snelheid weergeeft.

Integratie van snelheid en laagdikte over tijd levert een berekend overslaand golfvolume op. Op deze manier bepaalde volumes komen redelijk overeen met de werkelijk losgelaten volumes, maar doordat de laagdikten bij verschillende sessies niet gelijk waren, is geen conclusie te trekken omtrent de ingesloten hoeveelheid lucht.

Een losgelaten overslaand golfvolume liep eerst over een 3 m brede kruin en daarna over het binnentalud. Dit binnentalud liep niet helemaal recht. De taludhelling over de eerste 4,5 m was 1:3.7 en daarna 1:5,1. Tussen locaties 5, 4 en 3 was een talud van 1:3.7 aanwezig en tussen locaties 3, 2 en 1 een talud van 1:5,1.

Over het niet constante talud veranderde de stroming van het water. Uit de metingen blijkt dat de laagdikte over het talud afneemt. De grootste afname vindt plaats bij de kleine overslaande volumes. De snelheden over het traject van surfplanken 3 naar 1 zijn vrijwel gelijk en licht afnemend. Snelheden op het eerste traject zijn niet gemeten. De tijd van overslag verandert nauwelijks op het eerste traject van surfplanken 5 naar 3, maar neemt toe van surfplanken 3 naar 1.

Metingen van maximale laagdikten, snelheden en overslagtijden kunnen met eerdere metingen worden vergeleken. Hiervoor in aanmerking komen de calibratiemetingen tijdens

het ontwerpen van de simulator en de metingen bij de Afsluitdijk. De maximale laagdikte is in lijn met eerdere metingen, maar net iets lager. De snelheden tussen 4 m en 12 m op het talud komen goed overeen met eerdere metingen en zijn voor grote overslaande volumes iets hoger. De overslagtijden op locatie 3 komen overeen met die van de Afsluitdijk. Voor maximale laagdikte en snelheid zijn de volgende formules afgeleid:

$$h_{\max} = 0.133 V^{0.5} \quad (2.26)$$

$$u_{\max} = 5.0 V^{0.34} \quad (2.27)$$

Hierbij moet worden bedacht dat de coëfficiënt 5.0 niet dimensieloos is en alleen geldt voor de golfoverslagsimulator, waarbij  $u_{\max}$  in m/s wordt gegeven en  $V$  in  $\text{m}^3/\text{m}$ .

#### *Aanbevelingen*

Met de snelheidsmeters zijn waardevolle en goede metingen verkregen. Bij een eventueel volgende proef is het aan te bevelen veel meer snelheidsmeters aan te brengen, in alle surfplanken en op de grond. Nagedacht zou kunnen worden over hoe iets verder van de bodem gemeten kan worden, zodat het snelheidsprofiel in de laag kan worden vastgesteld.

De snelheidsmeters zijn met de default-waarde gebruikt. Er moet nog een precieze calibratie plaats vinden.

Bij de metingen moet goed worden gecontroleerd of er geen vuil in de snelheidsmeters terecht is gekomen.

De metingen van de laagdikte hebben laten zien dat de waarde (van vooral het maximum) afhankelijk is van hoever de surfplank vanaf de bodem is opgehangen. Dit zou eigenlijk niet zo mogen zijn. Het is aan te bevelen om na te gaan of er geen betere vorm van surfplank is te verzinnen, die zowel bij dunne als bij dikke lagen stromend water de juiste dikte meet en niet afhankelijk is van punt van ophanging. Daarbij zou ook kunnen worden gekeken naar de plaats van de snelheidsmeter, zodat deze ook nog bij heel dunne lagen van ongeveer 1 cm kan meten.

### **2.3 Cumulatieve belastingen**

In het Fase 4A-rapport zijn twee methoden uitgewerkt om tot een gewogen of cumulatieve belasting te komen, die representatief zouden kunnen zijn voor een serie van overslagproeven, bij verschillende hydraulische regimes. Geconcludeerd is dat met name de cumulatieve belasting  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  veelbelovend is en de gewogen belasting minder. Het bereik van hydraulische regimes was  $H_s = 1$  m, 2 m en 3 m en de gemiddelde overslagdebieten waren 0,1; 1; 5; 10; 30; 50 en 75 l/s per m.

In datzelfde rapport werd voor de kritieke snelheid  $u_c = 5$  m/s aangehouden, wat overeenkomt met een kritiek overslagvolume  $V_c = 1$   $\text{m}^3$  per m. De relatie voor de snelheid, gegeven een overslaand volume (voor de golfoverslagsimulator) was daarbij:

$$u = 2.53\sqrt{V} + 2.5 \quad (2.28)$$

In het daarop volgend rapport voor Fase 4B is een predictie gemaakt van de cumulatieve belastingen, gebaseerd op bovenstaande formule. Bij de evaluatie van de metingen op de Vechtdijk is gebleken dat op de binnenkruinlijn de snelheid net even iets anders is (zie de vorige paragraaf):

$$u = 5.0 V^{0.34} \quad (2.29)$$

Op basis van formule 2.29 is de eerder gegeven tabel voor de cumulatieve belasting opnieuw gemaakt en weergegeven in tabel 2.8. Deze tabel kan worden gebruikt voor het vaststellen van de cumulatieve belasting waarbij op de Vechtdijk schade ontstond. De middelste tabel kan ook worden gebruikt voor de waarnemingen bij de Boonweg (2008), St Philipsland en Kattendijke (2008) en de Afsluitdijk (2009). In de tabel is nog geen beslissing gemaakt welk kritieke volume  $V_c$  moet worden genomen om verschillende hydraulische regimes vergelijkbaar te maken.

Voor de proeven bij Delfzijl moet de cumulatieve belasting apart worden uitgerekend, omdat daar nog diverse "vaste" volumes werden losgelaten. De cumulatieve belastingen voor deze, onder het ComCoast programma uitgevoerde, proeven zijn weergegeven in tabel 2.9. De cumulatieve belastingen zijn goed vergelijkbaar met de middelste tabel van tabel 2.8. Bij de proeven in Delfzijl werd wel een 20 l/s per m proef uitgevoerd, maar geen 75 l/s per m. Bij de proef met kale klei werd ook een overslagdebiet van 5 l/s per m gesimuleerd.

Tabellen 2.8 en 2.9 kunnen worden gekoppeld aan opgetreden schade (en aan geen bezwijken) voor alle uitgevoerde proeven.

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 1$ m				
		$V_c = 0$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.25$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.5$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 1$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 2$ m <sup>3</sup> /m
uur	l/s per m					
6	0.1	121	0	0	0	0
6	1	1179	14	0	0	0
6	5	5273	220	23	0	0
6	10	9512	751	134	4	0
6	30	22858	4590	1546	245	6
6	50	33672	9837	4215	1022	87
6	75	45175	20492	8637	2754	398

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 2$ m				
		$V_c = 0$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.25$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.5$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 1$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 2$ m <sup>3</sup> /m
uur	l/s per m					
6	0.1	77	18	5	0	0
6	1	812	153	48	4	0
6	5	3810	898	346	65	0
6	10	7135	2036	896	222	15
6	30	18353	7438	4108	1528	284
6	50	27837	13353	8178	3630	933
6	75	38400	22201	13763	6918	2193

duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 3$ m				
		$V_c = 0$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.25$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.5$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 1$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 2$ m <sup>3</sup> /m
uur	l/s per m					
6	0.1	60	31	16	5	0
6	1	540	201	101	29	3
6	5	3074	1270	716	272	47
6	10	5857	2639	1579	669	151
6	30	15625	8425	5654	2922	970
6	50	24126	14327	10195	5813	2283
6	75	33716	22320	16133	9935	4463

Tabel 2.8 Cumulatieve belastingen bij verschillende hydraulische regimes, gemiddelde overslagdebieten en verschillende kritieke overslagvolumes; De waarden gelden voor een enkele proef (dus niet cumulatief) en voor een duur van 6 uur en zijn gebaseerd op formule 2.2



duur	gemiddeld overslagdebiet	$\Sigma (u^2 - u_c^2)$ bij $H_s = 2$ m; Proeven ComCoast				
		$V_c = 0$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.25$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 0.5$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 1$ m <sup>3</sup> /m	$V_c = 2$ m <sup>3</sup> /m
uur	l/s per m					
6	0.1	77	17	4	0	0
6	1	861	138	52	0	0
6	5	3554	776	233	0	0
6	10	7476	2035	881	201	39
6	20	12759	4898	2378	712	151
6	30	18226	7759	4220	1411	341
6	50	27075	14276	8075	3414	1054
Cumulatief tot. (excl 5 l)		69951	29883	15840	5739	1585

Tabel 2.9 Idem als tabel 2.1, maar nu voor de uitgevoerde proeven bij Delfzijl (2007) onder het ComCoast programma

### 2.3.1 Evaluatie verschillende hydraulische regimes Vechtdijk

Annex 1 bevat een fotoreportage, hiernaar wordt verwezen.

De cumulatieve belastingmaat  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  is bedacht om verschillende hydraulische regimes vergelijkbaar te maken. De gedachte is dat grote golven meer/eerder schade veroorzaken dan kleine en dat er wel een minimale belasting (kritieke snelheid  $u_c$ ) moet worden overschreden voordat er enig effect is. En elke golf boven de kritieke snelheid doet mee. Op deze manier zou het mogelijk moeten zijn om meer kleine overslaande golven gelijk te stellen aan minder, maar grotere overslaande golven.

De grote vraag hierbij is: wat is de juiste kritieke snelheid? In tabellen 2.8 en 2.9 is deze kritieke snelheid gekoppeld aan een kritiek overslaand golfvolume  $V_c$ . Met formule 2.9 wordt de volgende relatie gevonden:

$$\begin{aligned}
 V_c = 0 \text{ m}^3/\text{m} & \quad u_c = 0 \text{ m/s} \\
 V_c = 0.25 \text{ m}^3/\text{m} & \quad u_c = 3.1 \text{ m/s} \\
 V_c = 0.5 \text{ m}^3/\text{m} & \quad u_c = 4.0 \text{ m/s} \\
 V_c = 1 \text{ m}^3/\text{m} & \quad u_c = 5.0 \text{ m/s} \\
 V_c = 2 \text{ m}^3/\text{m} & \quad u_c = 6.3 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Het kan zijn dat voor elk talud met zijn specifieke grassoort, grasbeheer en klei eigenschappen er steeds een andere kritieke snelheid of overslaand golfvolume moet worden aangehouden. Maar bij een en dezelfde dijk is dit niet het geval. Bij de Vechtdijk zijn voor het eerst proeven met drie verschillende hydraulische regimes uitgevoerd, een rivierregime met  $H_s = 1$  m, het tot nu toe aangehouden zeeregime met  $H_s = 2$  m en een zeer zwaar zeeregime met  $H_s = 3$  m. Het vergelijken van de opgetreden schade met de cumulatieve belastingen zou uitsluitel moeten kunnen geven over de juiste kritieke snelheid of overslaand golfvolume.

Daartoe moet allereerst worden vastgesteld wanneer schade ontstond en wat voor schade. Het heeft alleen zin cumulatieve belastingen te vergelijken als de schades vergelijkbaar zijn. Een eerste schadedefinitie is begin van schade, bestaande uit een pol gras die verdwijnt en een open plek achterlaat van minimaal 0,15 m x 0,15 m en orde 0,1 m diep. Op die plek is dan voor de grasmat begin van schade ontstaan.

Uit foto's en het tijdstip waarop betreffende foto werd genomen is achterhaald wanneer begin van schade ontstond. Duidelijk werd dat als het om één klein gat gaat over hele talud, er nog wel eens een grote spreiding in resultaten kan ontstaan. Soms is het ontstaan van zo'n kale plek afhankelijk van het aanwezig zijn van een verstoring. In sommige gevallen ontstond dan ook al heel snel een enkel gat, maar duurde het nog een hele tijd voordat er meerdere van dit soort plekken ontstonden. Dit was bijvoorbeeld zo bij de eerste proef, waar bovenaan het talud direct al een klein gat ontstond. Tijdens de hele proef is dit gat een klein beetje uitgegroeid, maar het heeft niet geleid tot ernstige schade. Dit eerste gat ontstond al aan het eind van de 1 l/s per m proef.

Daarom leek het nuttig een tweede definitie van begin van schade aan te nemen, namelijk dat er meerdere van deze kleine beschadigingen over het hele talud aanwezig moesten zijn. Maar wel onder de voorwaarde dat deze niet waren uitgegroeid tot grotere gaten of kale plekken.

De afdeklaag bij de Vechtdijk was erg dun, ongeveer 0,2 m aarde. Vermoed werd dat zodra het zand onder de laag vrij zou komen, het niet zo lang zou duren voor het talud zou bezwijken. Het volgende schadecriterium werd daarmee: zand komt vrij door de afdeklaag.

Tot slot leidde het vrijkomen van zand uiteindelijk tot een mechanisme dat zich zo snel uitbreidde dat de proef moest worden gestopt. Het mechanisme van uitbreiding van het gat ging zo snel dat het niet meer controleerbaar was. Dit criterium werd genoemd: gestopt, oncontroleerbaar mechanisme.

Als geen doorgaand en oncontroleerbaar mechanisme werd gevonden, dan is het criterium het eind van de proef. Wanneer bezwijken zou optreden is dan niet bekend, wel een belastingmaat waarbij nog geen bezwijken optrad. Dit kwam voor bij de eerste twee proeven die bezweken op respectievelijk de taludovergang en de boom, maar waarbij het grastalud niet bezweek.

In tabel 2.10 zijn de genoemde schadecriteria bijeengebracht voor de vier proeven op de Vechtdijk, met het tijdstip van ontstaan van schade en de bijbehorende cumulatieve belastingen. Voor de taludovergang en de boom zijn eigen schadecriteria aangehouden.

Alle proeven zijn gestopt omdat schade was ontstaan, waarbij de schade zich (zeer) snel uitbreidde. Maar dit had niet altijd betrekking op de grasmat, zodat een vergelijking van de grasmat bij verschillende hydraulische regimes toch nog moeilijk is. Bij de eerste proef ontstond er wel schade aan het talud boven en beneden de taludovergang, maar het talud zelf is niet bezweken, dat was de overgang zelf na grote ondermijning. Bij de tweede proef moest worden gestopt omdat de erosie rondom de boom te groot werd, zelfs na het afdekken van het ontstane gat. Ook hier is het grastalud niet bezweken, alhoewel er wel redelijke schade (vrij grote gaten of kale plekken) aanwezig was. Beide proeven betrof het zeeregime.

Bij de proeven 3 en 4, voor respectievelijk het rivier- en zeer zwaar zeeregime, is de grasmat met afdeklaag wel volledig bezweken. Er was wel een verschil in hoedanigheid of toestand van deze taluds ten opzichte van het talud van proef 2 met de boom. Bij proeven 3 en 4 zat ongeveer tussen 2-4 m vanaf de binnenkruinlijn op het talud een grote hoeveelheid mollengaten en -gangen. Bij alle taluds en over het hele talud verspreid waren wel beschadigingen door mollen aanwezig, maar alleen bij proeven 3 en 4 was dit geconcentreerd in genoemde strook. Het is in deze strook dat bij beide proeven de schade ontstond die uiteindelijk tot bezwijken leidde (alhoewel niet in deze strook, maar meer naar

beneden op het talud). Bij vergelijking van de resultaten van de verschillende hydraulische regimes zou hier rekening mee moeten worden gehouden.

Tabel 2.10 geeft al de koppeling tussen schadecriterium en cumulatieve belasting, maar geeft nog niet een oordeel over het juiste kritiek overslaand golfvolume. Daarvoor moeten de uitkomsten in de tabel op een goede manier met elkaar worden vergeleken. In dit geval moet gezocht worden naar een match waarbij de cumulatieve belastingen bij eenzelfde schadecriterium zo goed mogelijk overeen komen. De volgende schadecriteria zijn gekozen:

- Eerste schade
- Meerdere locaties kale plekken
- Gestopt, oncontroleerbare schade

Als geen bezwijken optrad, is in plaats van het laatste criterium gekozen voor:

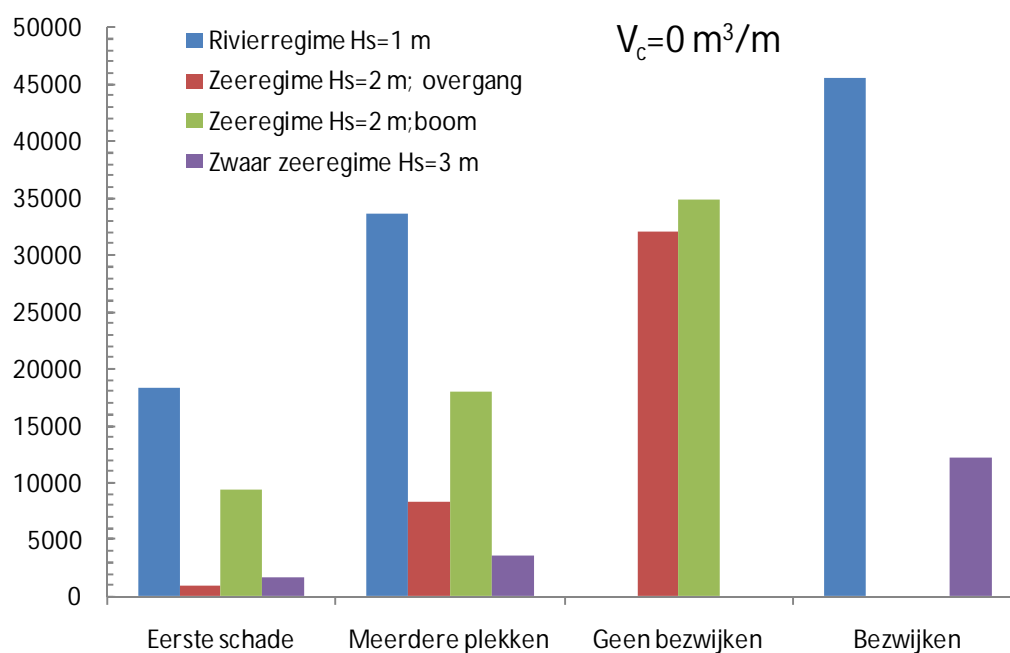
- Geen bezwijken

Een goede manier om de cumulatieve belastingen met de schadecriteria te vergelijken, is het maken van een staafdiagram. Per schadecriterium staan dan de cumulatieve belastingen als staven naast elkaar en wordt van links naar rechts (van begin van schade naar bezwijken) ook nog de indruk gewekt van een soort schadekromme. Figuren 2.67-2.71 geven deze staafdiagrammen.

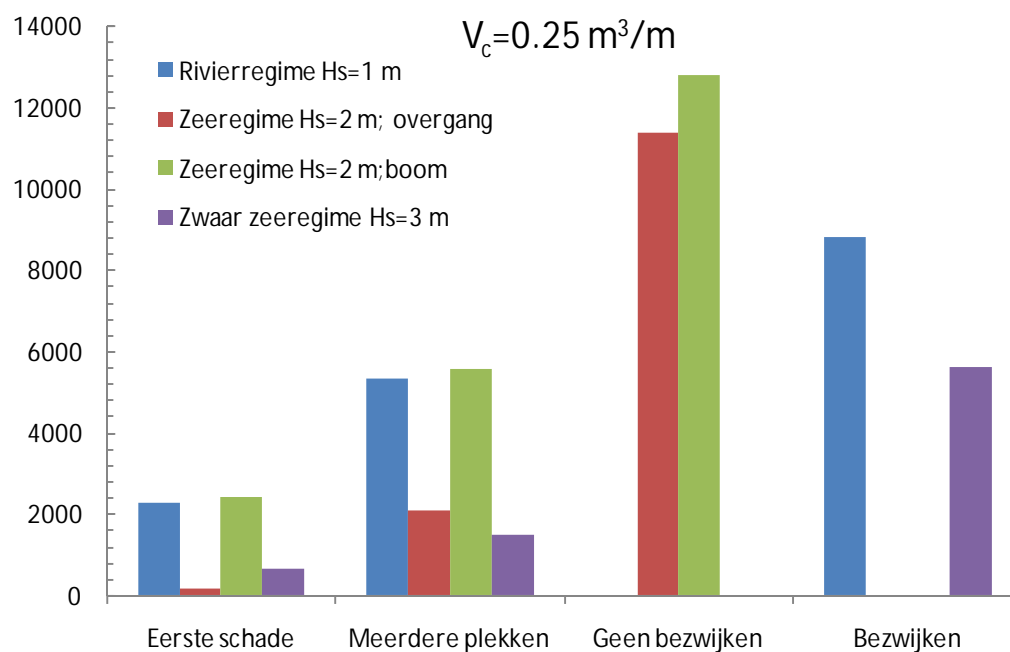
De vergelijking is theoretisch perfect als per schadecriterium de hoogte van de staven gelijk is. Dit is natuurlijk in geen enkele figuur het geval. Dus moet gezocht worden naar de figuur waar de vergelijking het beste is. Hierbij moet worden bedacht dat voor begin van schade het criterium met meerdere kale plekken (het tweede criterium) iets betrouwbaarder is dan het echte begin van schade. Verder is het wat vroege bezwijken van het talud door aanwezigheid van mollen bij het rivier- en zeer zwaar zeeregime opgetreden. Deze regimes liggen ver uit elkaar en een vergelijking waarbij de cumulatieve belasting vrijwel gelijk wordt voor dit mechanisme geeft een goede aanwijzing omtrent de juiste kritieke snelheid.

	Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
		$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
<i>Rivier regime (<math>H_s = 1 \text{ m}</math>)</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 10; 1:58 uur 30	18431	2295	649	86	2
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 10; 6:00 uur 30	33670	5355	1680	249	6
Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 10; 30; 2:00 uur 50	44894	8634	3085	589	35
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 10; 30; 2:07 uur 50	45548	8826	3167	609	37
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>); met overgang</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 6:00 uur 1	889	171	53	4	0
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 3:00 uur 10	8266	2087	847	180	8
Zand komt vrij (door de afdeklaag)						
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme						
Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	2052	359
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>); met boom</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	217	10
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	801	110
Zand komt vrij (door de afdeklaag)						
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme						
Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 1:01 uur 50	34903	12806	6790	2435	457
<i>Zwaar zee regime (<math>H_s = 3 \text{ m}</math>)</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 2:00 uur 5	1624	655	356	125	19
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 6:00 uur 5	3674	1502	833	306	50
Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	9530	4141	2412	974	201
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 1:03 uur 30	12265	5615	3402	1486	370
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>); met overgang</i>						
Begin ondermijning overgang	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	11834	3105	1296	291	15
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	2052	359
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>); met boom</i>						
Eerste wortel geerodeerd	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	217	10
Grote erosie van wortels, zand zichtbaar	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	801	110
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 5:30 uur 30	28657	9923	5061	1692	276

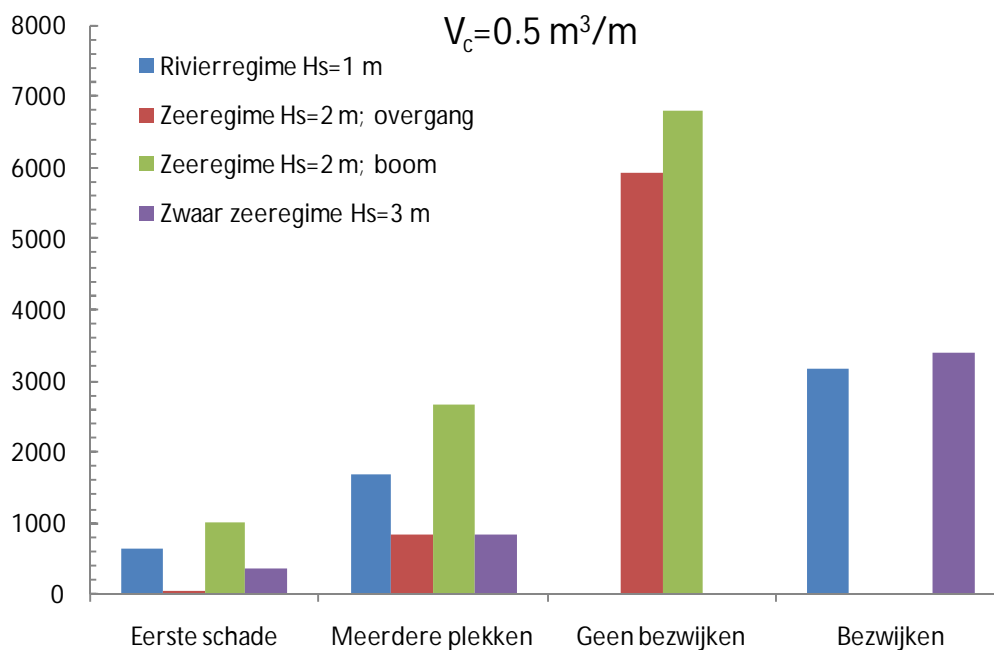
Tabel 2.10 Vechtdijk. Schadecriteria met tijdstip van optreden en bijbehorende cumulatieve schade. Beelden staan in de fotobijlage



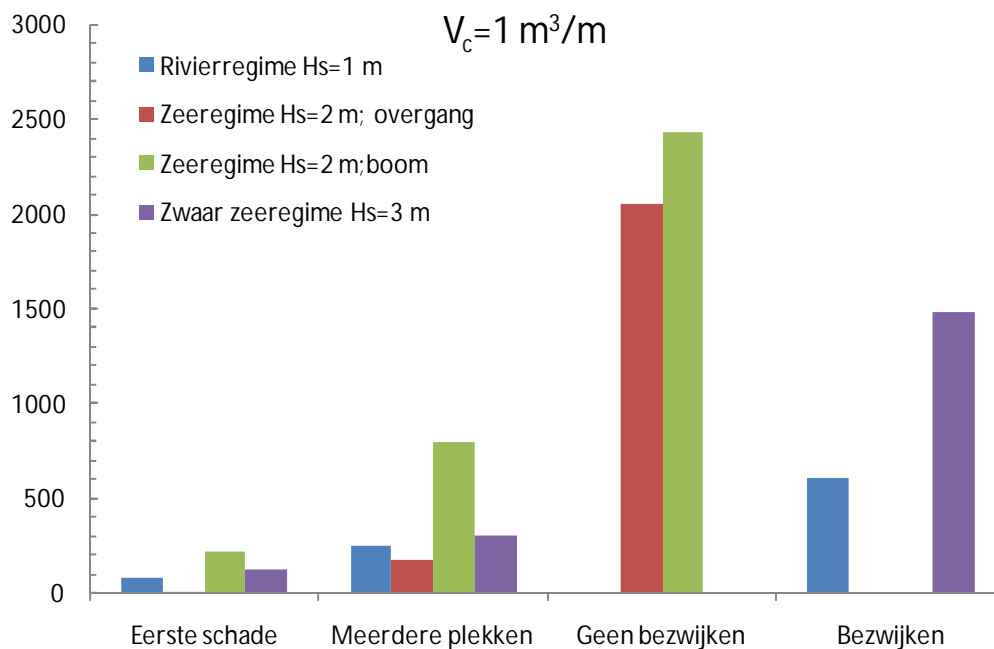
Figuur 2.67 Vergelijking cumulatieve schade voor verschillende schadecriteria;  $V_c = 0 \text{ m}^3/\text{m}$



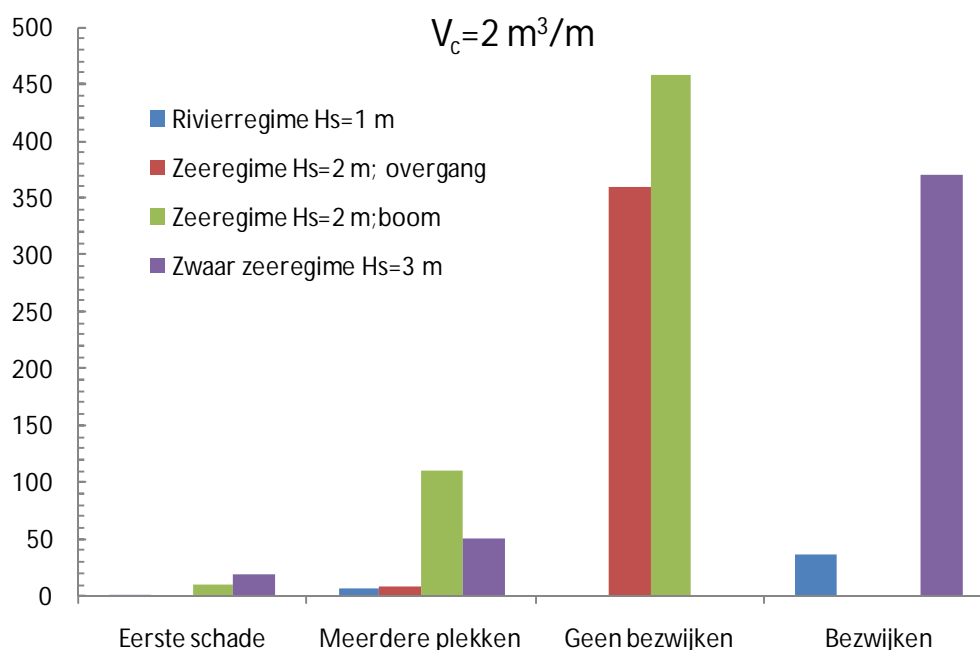
Figuur 2.68 Vergelijking cumulatieve schade voor verschillende schadecriteria;  $V_c = 0.25 \text{ m}^3/\text{m}$



Figuur 2.69 Vergelijking cumulatieve schade voor verschillende schadecriteria;  $V_c = 0.5 \text{ m}^3/\text{m}$



Figuur 2.70 Vergelijking cumulatieve schade voor verschillende schadecriteria;  $V_c = 1 \text{ m}^3/\text{m}$



Figuur 2.71 Vergelijking cumulatieve schade voor verschillende schadecriteria;  $V_c = 2 \text{ m}^3/\text{m}$

Voor het zeeregime zijn twee proeven beschikbaar en de verschillen tussen de twee proeven (proeven 1 en 2, de bruine en groene staven) geven een idee van de spreiding bij herhaling van proeven.

Figuur 2.67 geeft de vergelijking voor  $V_c = 0 \text{ m}^3/\text{m}$ , dus elke golf doet mee voor de cumulatieve belasting. Het rivierregime steekt ver boven de andere uit en het zeer zware zeeregime is de laagste. Het is duidelijk dat deze figuur geen vergelijkbare belastingen geeft voor de verschillende schadecriteria.

Dit is al minder in figuur 2.68 waar de vergelijking wordt gegeven voor  $V_c = 0,25 \text{ m}^3/\text{m}$ . De kritieke snelheid is hierbij 3,1 m/s. Toch is ook hier het rivierregime aan de te hoge kant en het zware zeeregime aan de lage kant.

In figuur 2.69 wordt uitgegaan van  $V_c = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$  met een kritieke snelheid van 4,0 m/s. Kijken we naar het bezwijken van de twee taluds, dan komt het rivier- en zeer zwaar zeeregime erg goed met elkaar overeen. Bij eerste schade en meerdere kalen plekken overheerst het rivierregime nog een klein beetje (als het gemiddelde van de twee zeeregimes wordt genomen). Toch geeft deze figuur een heel aardige vergelijking.

In figuur 2.70 is het kritieke overslaande golfvolume  $V_c = 1 \text{ m}^3/\text{m}$  met een kritieke snelheid van 5 m/s. Bij het bezwijkcriterium is nu het rivierregime een factor 2 kleiner dan het zeer zware zeeregime. Bij begin van schade en meerdere kale plekken is de overeenkomst erg goed, zeker als naar het gemiddelde van de twee zeeregime proeven wordt gekeken. Dus ook deze figuur geeft een goede vergelijking, vooral met het oog op beginnende schade.

In de laatste figuur 2.71 wordt van  $V_c = 2 \text{ m}^3/\text{m}$  uitgegaan met een kritieke snelheid van 6,3 m/s. Nu overheerst het zeer zware zeeregime veel te veel.

Op basis van bovenstaande vergelijking kan worden geconcludeerd dat figuren 2.69 en 2.70 de beste vergelijking geven. Dit betekent dat een kritiek overslaand volume van  $V_c = 0,5\text{-}1 \text{ m}^3/\text{m}$  met kritieke snelheden van 4-5 m/s goede vergelijkbare cumulatieve belastingen geven bij verschillende regimes. De lage waarden passen meer bij bezwijken van het talud en de hoge waarden meer bij begin van schade.

De proeven met het zeeregime geven aan dat als de schade niet door de vele mollengaten op een geconcentreerde plek was geïnitieerd, de cumulatieve belasting bij bezwijken nog wel hoger zou kunnen liggen dan bij proeven 3 en 4.

Gaan we uit van  $V_c = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$  en  $u_c = 4 \text{ m/s}$ , dan zijn bij de Vechtdijk globaal de volgende cumulatieve belastingen verantwoordelijk voor de volgende schadecriteria:

Begin van schade	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Meerdere kale plekken	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Vroeg bezwijken door mollengaten	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Niet bezwijken bij "normaal" talud	$\Sigma(u^2 - u_c^2) < 6000 \text{ m}^2/\text{s}^2$

De hypothese van cumulatieve belastingen lijkt inderdaad te werken. Het talud bij het rivierregime bezweek na 2 uur bij 50 l/s per m. Bij het zeer zware zeeregime was dit al na 1 uur bij 30 l/s per m. In beide gevallen komt de cumulatieve belasting (met  $V_c = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$ ) op ongeveer  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

### 2.3.2 Vechtdijk, schade door taludovergang en boom

Tabel 2.10 geeft ook aan wanneer de ondermijning van de taludovergang begon en wanneer de overgang plotseling bij een grote golf bezweek. Gaan we opnieuw uit van  $V_c = 0,5 \text{ m}^3/\text{m}$  en  $u_c = 4 \text{ m/s}$ , dan ontstaat ondermijning bij  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1296 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , wat dicht in de buurt zit van het schadecriterium "meerdere kale plekken". Die kale plekken hielden het echter langer vol dan de taludovergang, want deze bezweek bij  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 5926 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Dit is echter hoger dan de cumulatieve belasting bij bezwijken van het grastalud als er een concentratie aan mollengaten zit.

Bij de proef met de boom was er duidelijk een wortel geërodeerd bij  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 997 \text{ m}^2/\text{s}^2$  en dit komt precies overeen met meerdere kale plekken op het talud. Zand wordt zichtbaar bij  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 2665 \text{ m}^2/\text{s}^2$  en als het gat rondom de boom niet met doek was afgedekt, dan was dit ook ongeveer de bezwijkbelasting. Deze komt dan goed overeen met de bezwijkbelasting voor de taluds (proeven 3 en 4) met een geconcentreerde locatie met mollengaten.

### 2.3.3 Vechtdijk, schade na hydraulische metingen

Eerder is geconstateerd dat begin van schade aan het talud optreedt bij een cumulatieve belasting van  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , met  $u_c = 4 \text{ m/s}$ , en meerdere kale plekken bij  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Bij de hydraulische metingen is de simulatie van golfoverslag volkomen anders uitgevoerd dan bij de normale proeven. Bij de normale proeven is steeds gedurende zes uur een gemiddeld golfoverslagdebiet gesimuleerd door de daarbij behorende overslaande golfvolumes random over het talud los te laten. Bij de hydraulische metingen is maar een relatief klein aantal overslaande golfvolumes los gelaten en dan ook nog steeds in toenemende grootte. In totaal zijn maar 40 overslaande golfvolumes losgelaten, olopende van 200 l/s per m naar 5500 l/s per m.



Als het idee van cumulatieve schade werkt, zou het ook bij deze serie van hydraulische metingen moeten werken. Voor en na de hydraulische metingen zijn foto's gemaakt en een overzicht wordt in de fotobijlage gegeven met foto's 26-29. Na de hydraulische metingen waren over het talud meerdere (kleine) kale plekken te zien en was onderaan het talud een wat grotere plek ontstaan. De foto's passen het best bij het schadecriterium "meerdere kale plekken op het talud".

De cumulatieve belasting bij de hydraulische metingen, met  $u_c = 4$  m/s, bedraagt  $946 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Dit is vrijwel dezelfde belasting die gevonden is voor meerdere kale plekken met  $\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . De schade bij deze korte meetsessie, met wel een aantal grote overslaande golfvolumes, kan dus goed worden vergeleken met de schade bij de andere proeven, waar gedurende lange tijd een bepaald overslagdebiet is aangehouden. Daarmee is dit een eerste, onafhankelijke, validatie van het concept van cumulatieve belasting.

#### 2.3.4 Evaluatie Delfzijl

In 2007 zijn de eerste proeven met de golfoverslagsimulator uitgevoerd en wel bij Delfzijl. De capaciteit van de simulator was toen nog beperkt tot  $3,5 \text{ m}^3/\text{m}$  en  $50 \text{ l/s}$  per m.

Bij Delfzijl werd ook kale klei getest, alhoewel deze nog wel enige wortels had. In totaal werd  $0,2 \text{ m}$  grastalud van de dijk afgehaald. Bij elke redelijke golf ontstond oppervlakte erosie (kleine kleideeltjes werden meegenomen). Dit resulteerde in totaal in een oppervlakte erosie van orde grootte  $0,05\text{-}0,10 \text{ m}$  over het hele talud. Ook ontwikkelden er zich twee grote gaten. Deze ontwikkeling begon al bij de eerste proef. Op een bepaald moment was het gat zo groot dat het mechanisme head cut erosie ontstond. Op de foto's is duidelijk te zien wanneer dit mechanisme begon, omdat het steile, vrijwel verticale talud, in het gat goed te herkennen is. Foto's van het hele proces zijn in de fotobijlage gegeven (foto's 30-34).

Het grastalud ondervond geen daadwerkelijke schade, zie foto 35. Daarna werd initiële schade aangebracht door de grasmatten over een bepaald oppervlak te verwijderen. Bij de twee grootste gaten van  $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$  en  $0,15 \text{ m}$  diep en  $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$  en  $0,05 \text{ m}$  diep stroopte het gras van het talud. Foto's 36 en 37 geven het begin en het eind van de proef, die alleen met  $50 \text{ l/s}$  per m werd uitgevoerd.

Voor deze schadecriteria zijn cumulatieve belastingen berekend en weergegeven in tabel 2.11. Hierbij is voor kritieke volumes  $V_c$  van  $0$  tot  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  de cumulatieve belasting uitgerekend, zodat later gemakkelijk een keuze gemaakt kan worden welk kritiek volume van toepassing zou zijn.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
Delfzijl	Kale klei	Start head cut erosie mechanisme	na 0,1; 1; 5; 3 uur 10	8230	1949	730	101	20
Delfzijl	Kale klei	5-10 cm oppervlakte erosie	na 0,1; 1; 5; 10	11968	2967	1170	201	39
Delfzijl	Gras	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 20; 30; 50	66474	29124	15611	5739	1585
Delfzijl	Gras	Na initiële schade aangebracht	na 50	27075	14276	8075	3414	1054

Tabel 2.11 Cumulatieve belastingen voor de proeven bij Delfzijl

#### 2.3.5 Evaluatie Boonweg

Bij de Boonweg zijn vier vakken onderzocht met verschillend beheer van het grasland. Twee vakken of secties ondervonden in het geheel geen schade en bij twee secties ontstond bij het hoogste debiet van  $75 \text{ l/s}$  per m het opbolmechanisme, waarbij doorgaande schade vrij snel

optrad. Bij sectie 3 leidde dit nog niet tot een schade waarbij de afdeklaag doorbrak, omdat de proef net op tijd was afgelopen. Bij sectie 4 was dit wel zo.

Bij drie van de vier secties ontstond schade aan de teen bij 50 of 75 l/s per m. Bij sectie 4, waarbij het talud zelf bezweek, ontstond geen schade aan de teen.

Foto's van schades of situaties na de proef zijn opgenomen in de fotobijlage (foto's .38 - 42).

Tabel 2.12 geeft de cumulatieve schade bij begin van schade (opbolmechanisme op talud), bezwijken of aan het einde van de proef.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
Boonweg	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	12302	3426
Boonweg	Sectie 2	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	12302	3426
Boonweg	Sectie 3	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 1 uur 75	60613	26698	15530	6538	1598
Boonweg	Sectie 3	Vrijwel bezweken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	12302	3426
Boonweg	Sectie 4	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5 uur 75	86213	41499	24705	11149	3060
Boonweg	Sectie 4	Bezweken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5:45 uur 75	91013	44274	26425	12014	3334
Boonweg	Sectie 1, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 2 uur 50	35656	14096	7784	2965	610
Boonweg	Sectie 2, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 2 uur 75	67013	30398	17824	7691	1963
Boonweg	Sectie 3, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	5385	1232
Boonweg	Sectie 4, teen	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	12302	3426

Tabel 2.12 Cumulatieve belastingen voor de proeven bij de Boonweg

### 2.3.6 Evaluatie St Philipsland

Op St Philipsland is maar één sectie onderzocht. Er ontstond zowel schade aan het talud als aan de teen en beide zijn ook bezweken. De kleilaag bleek maar 0,4 m dik te zijn. Foto's 43 en 44 in de fotobijlage geven begin van schade en bezwijken. Tabel 2.13 geeft de schadecriteria met de daarbij behorende cumulatieve belastingen.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
St Philipsland	Sectie 1	Begin schade talud	na 0,1; 1; 10; 30; 0:10 uur 50	27150	10016	5285	1855	325
St Philipsland	Sectie 1	Bezwijken talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	5385	1232
St Philipsland	Sectie 1	Begin schade teen	na 0,1; 1; 10; 3 uur 30	17200	5926	3004	990	157
St Philipsland	Sectie 1	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 2 uur 50	35656	14096	7784	2965	610

Tabel 2.13 Cumulatieve belastingen voor de proeven bij St Philipsland

### 2.3.7 Evaluatie Kattendijke

Bij Kattendijke werden twee grastaluds onderzocht en twee taluds met een versterkt systeem, namelijk open steenasfalt en elastocoast. Aan het normale grastalud werd geen schade geconstateerd (sectie 1). Schade ontstond aan de onderhoudsweg van gravel, waarop de meetwagen stond (foto 45). Deze moest worden verplaatst en aan het eind van de proef was een zeer groot gat ontstaan, waardoor de proef moest worden gestopt. Het mechanisme head cut erosie ging vanaf de teen omhoog het talud op, zie foto 46, waarop ook het talud na de proef te zien is.

Bij sectie 2 was initiële schade aangebracht met een mestinjecteur, zowel op de kruin als bij de teen (en een klein stukje talud, zie foto 47). Op het benedentalud ontstond begin van schade bij de eerste snede van de mestinjecteur. De initiële schade bij de teen veroorzaakte verdergaande schade en deze viel daardoor later samen met de schade op het

benedentalud. De proef werd niet met 75 l/s per m doorgezet omdat de teen dicht tegen bezwijken aanzat, overeenkomstig het verloop bij sectie 2. Foto 48 geeft het beeld van teen en benedentalud na de proef. Hierbij moet worden opgemerkt dat de onderhoudsweg van gravel zoveel mogelijk was bedekt en versterkt, zodat de meetwagen kon blijven staan. Dus de grote en doorgaande schade aan de onderhoudsweg kon bij sectie 2 niet optreden.

Zowel open steenasfalt als elastocoast gaven geen schade te zien, waarbij vermeld kan worden dat de belasting werd opgevoerd tot 125 l/s per m (foto 49).

De cumulatieve belastingen zijn in tabel 2.14 gegeven.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
Kattendijke	Sectie 1	Geen schade talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	12302	3426
Kattendijke	Sectie 2, schade injecteur	Begin schade talud	na 0,1; 1; 10; 30	26377	9645	5058	1754	299
Kattendijke	Sectie 2, schade injecteur	Vrijwel bezwijken talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	5385	1232
Kattendijke	Sectie 1	Begin schade teen	na 0,1; 1; 10;	8024	2207	949	226	15
Kattendijke	Sectie 1	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 3 uur 75	73413	34099	20117	8844	2329
Kattendijke	Sectie 2	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	5385	1232
Kattendijke	Open steenasfalt	Geen schade talud	na 30; 75; 125	113522	68642	46181	23307	8483
Kattendijke	Elastocoast	Geen schade talud	na 30; 75; 125	113522	68642	46181	23307	8483

Tabel 2.14 Cumulatieve belastingen voor de proeven bij Kattendijke

### 2.3.8 Evaluatie Afsluitdijk

Bij de Afsluitdijk werden drie secties onderzocht, een volledig grastalud, een klinkerbestrating onderaan het talud en een betonnen trap op het talud.

Karakteristiek aan de proeven van de Afsluitdijk is dat vrij snel de graszode van het talud verdween, waardoor er zeer grote kale plekken ontstonden. Het was echter alleen de bovenste graszode die verdween en er ontstonden op het talud geen gaten. De onderliggende laag bleek zeer erosiebestendig te zijn. Erosie ontstond uiteindelijk wel bij de overgang van het talud naar de teen.

Bij sectie 1, het volledige grastalud, ontstond al schade aan het grastalud van de teen bij 10 l/s per m (foto 50). De eerste schade aan het grastalud zelf ontstond in het begin van de 50 l/s per m proef (foto 51) en meerdere plekken of een groter kaal oppervlak was aanwezig na 4 uur beproeven met dit overslagdebiet (foto 52). Na de volledige proef was er 0,3 m erosie bij de teen. Het grastalud bij de teen was volledig verdwenen en ook deels op het talud, maar zowel talud als teen waren niet bezweken (foto 53).

Bij sectie 2 werd de klinkerbestrating op zand onderzocht. Er bleek al een behoorlijke locale beschadiging op het talud aanwezig en deze plek gaf "begin van schade talud" in het eerste uur van de 10 l/s per m proef (geen foto aanwezig). Een grotere plek was ontstaan na deze proef en daarbij was ook begin van schade ontstaan bij de teen (foto 54). Halverwege de 50 l/s per m proef ontstond de eerste schade bij de bestrating en een uur later moest worden gestopt door de zeer snelle schadeontwikkeling van bestrating op zand (foto 55).

Bij sectie 3 werd een betonnen trap onderzocht. Al vrij snel ontstond de eerste schade aan de teen door stroomconcentratie langs de trap (foto 56). Bij 30 l/s per m ontwikkelde zich de eerste schade op het grastalud (foto 57). De trap bezweek na 1 uur en 15 minuten bij de 75 l/s per m proef (foto 58). De twee erosiekuilen bij de teen waren toen 1,0 m diep (foto 59). Deze diepe erosie werd veroorzaakt door stroomconcentratie langs de trap, maar mogelijk

ook doordat een verticale wand was geslagen om de achterliggende klinkerbestrating te beschermen.

Tabel 2.15 geeft de cumulatieve belasting bij de verschillende schadebeelden.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
Afsluitdijk	Sectie 1	Begin schade	na 1; 10; 30; 1 uur 50	30939	11853	6415	2360	455
Afsluitdijk	Sectie 2	Begin schade	na 1; 1:15 uur 10	2298	577	235	50	3
Afsluitdijk	Sectie 3	Begin schade	na 1; 10; 2 uur 30	14065	4668	2314	736	110
Afsluitdijk	Sectie 1	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30; 4 uur 50	44858	18529	10505	4175	921
Afsluitdijk	Sectie 2	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10	7947	2189	944	226	15
Afsluitdijk	Sectie 3	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30	26300	9627	5052	1754	299
Afsluitdijk	Sectie1	Niet bezwijken van talud	na 1; 10; 30; 50; 75	92536	45181	26993	12302	3426
Afsluitdijk	Sectie 1, teen	Begin schade	na 1; 1 uur 10	2001	492	197	41	3
Afsluitdijk	Sectie 2, teen	Begin schade	na 1; 10	7947	2189	944	226	15
Afsluitdijk	Sectie 3, teen	Begin schade door trap	na 1; 2 uur 10	3190	832	347	78	5
Afsluitdijk	Sectie 1, teen	Erosiekuil 0,30m diep	na 1; 10; 30; 50; 75	92536	45181	26993	12302	3426
Afsluitdijk	Sectie 3, teen	Erosiekuil door trap, 1,0 m diep	na 1; 10; 30; 50; 2 uur 75	66937	30380	17818	7691	1963
Afsluitdijk	Sectie 2, bestrating	Begin schade	na 1; 10; 3 uur 30	17124	5908	2998	990	157
Afsluitdijk	Sectie 2, bestrating	Bezwijken bestrating op zand	na 1; 10; 4 uur 30	20182	7148	3683	1245	204
Afsluitdijk	Sectie 3, trap	Bezwijken trap	na 1; 10; 30; 50; 1:44 uur 75	62137	27605	16098	6826	1689

Tabel 2.15 Cumulatieve belastingen voor de proeven op de Afsluitdijk

### 2.3.9 Eerste evaluatie van het totaalbeeld

Bovenstaande tabellen kunnen worden samengevoegd en ook kunnen de gegevens van de gras- en kleikwaliteit worden toegevoegd. Deze tabel is gegeven als tabel 2.16. Om een verdere evaluatie te kunnen uitvoeren zijn daarna drie deeltabellen gemaakt: voor begin van schade aan het grastalud, voor meerdere kale plekken en voor bezwijken van het grastalud (erosiegaten van minimaal 0,4 m diep of door de kleilaag heen). Deze tabellen zijn gegeven als tabellen 2.17-2.19. Als binnen een bepaalde proef het schadebeeld niet optrad, dan is dit ook meegenomen, want de kritische belasting lag dan in ieder geval hoger dan wat beproefd was.

Proefstrook			Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$			
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$
Delfzijl	Kale klei	Start head cut erosie mechanisme	na 0,1; 1; 5; 3 uur 10	8230	1949	730	10
Delfzijl	Kale klei	5-10 cm oppervlakte erosie	na 0,1; 1; 5; 10	11968	2967	1170	20
Delfzijl	Gras	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 20; 30; 50	66474	29124	15611	573
Delfzijl	Gras	Na initiele schade aangebracht	na 50	27075	14276	8075	34
Boonweg	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	123
Boonweg	Sectie 2	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	123
Boonweg	Sectie 3	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 1 uur 75	60613	26698	15530	653
Boonweg	Sectie 3	Vrijwel bezweken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	123
Boonweg	Sectie 4	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5 uur 75	86213	41499	24705	111
Boonweg	Sectie 4	Bezweken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5:45 uur 75	91013	44274	26425	120
Boonweg	Sectie 1, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 2 uur 50	35656	14096	7784	296
Boonweg	Sectie 2, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 2 uur 75	67013	30398	17824	769
Boonweg	Sectie 3, teen	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	538
Boonweg	Sectie 4, teen	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	123
St Philipsland	Sectie 1	Begin schade talud	na 0,1; 1; 10; 30; 0:10 uur 50	27150	10016	5285	189
St Philipsland	Sectie 1	Bezwijken talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	538
St Philipsland	Sectie 1	Begin schade teen	na 0,1; 1; 10; 3 uur 30	17200	5926	3004	99
St Philipsland	Sectie 1	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 2 uur 50	35656	14096	7784	296
Kattendijke	Sectie 1	Geen schade talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	123
Kattendijke	Sectie 2, schade injecteur	Begin schade talud	na 0,1; 1; 10; 30	26377	9645	5058	175
Kattendijke	Sectie 2, schade injecteur	Vrijwel bezwijken talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	538
Kattendijke	Sectie 1	Begin schade teen	na 0,1; 1; 10;	8024	2207	949	22
Kattendijke	Sectie 1	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 3 uur 75	73413	34099	20117	884
Kattendijke	Sectie 2	Bezwijken teen	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	538
Kattendijke	Open steenasfalt	Geen schade talud	na 30; 75; 125	113522	68642	46181	233
Kattendijke	Elastocoast	Geen schade talud	na 30; 75; 125	113522	68642	46181	233
Afsluitdijk	Sectie 1	Begin schade	na 1; 10; 30; 1 uur 50	30939	11853	6415	236
Afsluitdijk	Sectie 2	Begin schade	na 1; 1:15 uur 10	2298	577	235	50
Afsluitdijk	Sectie 3	Begin schade	na 1; 10; 2 uur 30	14065	4668	2314	73
Afsluitdijk	Sectie 1	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30; 4 uur 50	44858	18529	10505	417
Afsluitdijk	Sectie 2	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10	7947	2189	944	22
Afsluitdijk	Sectie 3	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30	26300	9627	5052	175
Afsluitdijk	Sectie1	Niet bezwijken van talud	na 1; 10; 30; 50; 75	92536	45181	26993	123
Afsluitdijk	Sectie 1, teen	Begin schade	na 1; 1 uur 10	2001	492	197	4
Afsluitdijk	Sectie 2, teen	Begin schade	na 1; 10	7947	2189	944	22
Afsluitdijk	Sectie 3, teen	Begin schade door trap	na 1; 2 uur 10	3190	832	347	78
Afsluitdijk	Sectie 1, teen	Erosiekuil 0,30 m diep	na 1; 10; 30; 50; 75	92536	45181	26993	123
Afsluitdijk	Sectie 3, teen	Erosiekuil door trap, 1,0 m diep	na 1; 10; 30; 50; 2 uur 75	66937	30380	17818	769
Afsluitdijk	Sectie 2, bestrating	Begin schade	na 1; 10; 3 uur 30	17124	5908	2998	99
Afsluitdijk	Sectie 2, bestrating	Bezwijken bestrating op zand	na 1; 10; 4 uur 30	20182	7148	3683	124
Afsluitdijk	Sectie 3, trap	Bezwijken trap	na 1; 10; 30; 50; 1:44 uur 75	62137	27605	16098	682
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 10; 1:58 uur 30	18431	2295	649	86
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 10; 6:00 uur 30	33670	5355	1680	24
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 10; 30; 2:00 uur 50	44894	8634	3085	58
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 10; 30; 2:07 uur 50	45548	8826	3167	60
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 6:00 uur 1	889	171	53	4
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 3:00 uur 10	8266	2087	847	18
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	205
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	21
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	80
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 1:01 uur 50	34903	12806	6790	243
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 2:00 uur 5	1624	655	356	12
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 6:00 uur 5	3674	1502	833	30
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	9530	4141	2412	97
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 1:03 uur 30	12265	5615	3402	148
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Begin ondermijning overgang	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	11834	3105	1296	29
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	205
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Eerste wortel geerodeerd	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	21
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Grote erosie van wortels, zand zichtbaar	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	80
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 5:30 uur 30	28657	9923	5061	169

Tabel 2.16 Totaaloverzicht van schadebeelden, cumulatieve belastingen en gras- en kleikwaliteit van alle uitgevoerde proeven

Proefstrook	Begin schade grastalud		Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$			
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$
Delfzijl	Gras	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 20; 30; 50	66474	29124	15611	573
Boonweg	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 2	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
St Philipsland	Sectie 1	Begin schade	na 0,1; 1; 10; 30; 0:10 uur 50	27150	10016	5285	185
Kattendijk	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Afsluitdijk	Sectie 1	Begin schade	na 1; 10; 30; 1 uur 50	30939	11853	6415	236
Afsluitdijk	Sectie 2	Begin schade	na 1; 1:15 uur 10	2298	577	235	50
Afsluitdijk	Sectie 3	Begin schade	na 1; 10; 2 uur 30	14065	4668	2314	736
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Begin schade	0,1; 1; 10; 1:58 uur 30	18431	2295	649	86
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Begin schade	0,1; 6:00 uur 1	889	171	53	4
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Begin schade	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	217
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Begin schade	0,1; 1; 2:00 uur 5	1624	655	356	125

Tabel 2.17 Overzicht voor begin van schade aan het grastalud. Geel: vastgesteld voor de Vechtdijk 500 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>; oranje: mogelijke kritieke belasting voor het mechanisme; groen: mechanisme niet opgetreden

Proefstrook	Meerdere/grotere kale plekken grastalud		Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$			
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$
Boonweg	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 2	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 3	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 1 uur 75	60613	26698	15530	653
Boonweg	Sectie 4	Begin van schade (opbolmechanisme)	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5 uur 75	86213	41499	24705	1114
Kattendijk	Sectie 1	Geen schade talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Afsluitdijk	Sectie 1	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30; 4 uur 50	44858	18529	10505	417
Afsluitdijk	Sectie 2	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10	7947	2189	944	226
Afsluitdijk	Sectie 3	Meerdere locaties kale plekken	na 1; 10; 30	26300	9627	5052	175
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Meerdere locaties kale plekken	0,1; 1; 10; 6:00 uur 30	33670	5355	1680	249
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Meerdere locaties kale plekken	0,1; 1; 5; 3:00 uur 10	8266	2087	847	180
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Meerdere locaties kale plekken	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	801
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Meerdere locaties kale plekken	0,1; 1; 6:00 uur 5	3674	1502	833	306

Tabel 2.18 Tabel 2.11. Overzicht voor meerdere/grote kale plekken op het grastalud. Geel: vastgesteld voor de Vechtdijk 1000 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>; oranje: mogelijke kritieke belasting voor het mechanisme; groen: mechanisme niet opgetreden

Proefstrook	Bezwingen grastalud (minimaal 0,4 m diep)		Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ of } 6000 \text{ m}^2/\text{s}^2$			
				$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$
Delfzijl	Gras	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 20; 30; 50	66474	29124	15611	573
Boonweg	Sectie 1	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 2	Geen schade	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 3	Vrijwel bezwiken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 75	92613	45199	26999	1230
Boonweg	Sectie 4	Bezwiken na opbolmechanisme	na 0,1; 1; 10; 30; 50; 5:45 uur 75	91013	44274	26425	1200
St Philipsland	Sectie 1	Bezwingen talud	na 0,1; 1; 10; 30; 50	54213	22998	13236	536
Afsluitdijk	Sectie 1	Niet bezwingen van talud	na 1; 10; 30; 50; 75	92536	45181	26993	1230
Vechtdijk	Sectie 3, rivierregime	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 10; 30; 2:07 uur 50	45548	8826	3167	60
Vechtdijk	Sectie 1, dijkovergang	Geen bezwingen talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	209
Vechtdijk	Sectie 2, boom	Geen bezwingen talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 1:01 uur 50	34903	12806	6790	243
Vechtdijk	Sectie 4, zwaar zeeregime	Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 1:03 uur 30	12265	5615	3402	148

Tabel 2.19 Tabel 2.12. Overzicht voor bezwingen grastalud (gaten minimaal 0,4 m diep). Geel: vastgesteld voor de Vechtdijk 3500 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> (bij beschadigingen) en 6000 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> (goed talud); oranje: mogelijke kritieke belasting voor het mechanisme; groen: mechanisme niet opgetreden

De deeltabellen 2.17-2.19 zullen worden gebruikt voor een verdere evaluatie. De resultaten van de Vechtdijk worden daarbij als basis genomen, omdat die zijn vastgesteld voor verschillende hydraulische regimes en omdat ze gevalideerd zijn met het resultaat van de hydraulische metingen (heel weinig maar grote overslaande golfvolumes). De Vechtdijk liet het volgende zien, met een kritieke snelheid  $u_c$  van 4 m/s:

Begin van schade	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Meerdere kale plekken	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Vroeg bezwijken door mollengaten	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Niet bezwijken bij "normaal" talud	$\Sigma(u^2 - u_c^2) < 6000 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Het idee van de cumulatieve belasting is dat verschillende hydraulische regimes met elkaar kunnen worden vergeleken. Om verschillende dijktaluds met elkaar te vergelijken, speelt de kritieke snelheid  $u_c$  een rol. Bij een juist gekozen  $u_c$  die rekening houdt met de zodekwaliteit, zouden bovenstaande schadecriteria moeten ontstaan. De relatie tussen overslaand kritiek golfvolume en de kritieke snelheid is voor de golfoverslagsimulator (en dus voor de uitgevoerde proeven) als volgt:

$V_c = 0 \text{ m}^3/\text{m}$	$u_c = 0 \text{ m/s}$
$V_c = 0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$u_c = 3.1 \text{ m/s}$
$V_c = 0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$u_c = 4.0 \text{ m/s}$
$V_c = 1 \text{ m}^3/\text{m}$	$u_c = 5.0 \text{ m/s}$
$V_c = 2 \text{ m}^3/\text{m}$	$u_c = 6.3 \text{ m/s}$

Hierbij is de definitie van snelheid ( $u$  of  $u_c$ ) de maximale snelheid in een overslaand golfvolume op de binnenkruinlijn, welke orde grootte 1 tot 2 seconden aanhoudt en dan afneemt. Het is geen gemiddelde snelheid in een overslaande golf. De ervaring bij het uitvoeren van de proeven leert dat naast een hoge snelheid in de golf ook het langstrekken van het front van de golf een invloed heeft op het ontstaan van schade. Zeer snel ontstaat de maximale belasting, want deze is direct na het front aanwezig.

In de deeltabellen 2.17-2.19 zijn de gevonden cumulatieve belastingen bij een overslaand kritiek golfvolume van  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}$  (kritieke snelheid van  $4 \text{ m/s}$ ) geel gemaakt. De waarden geven tegelijk de mate van spreiding. Als op andere locaties eenzelfde schade is opgetreden, dan is de kolom gezocht, waarbij de waarde in de buurt ligt van bovenstaande cumulatieve belastingen voor de Vechtdijk. Die cellen zijn oranje gemaakt. Het is ook voorgekomen dat een schadecriterium tijdens de proef helemaal niet werd bereikt. De cumulatieve belasting ligt dan hoger dan die tijdens de proef is gevonden. Deze cellen zijn groen gemaakt. Op deze manier ontstaat een (deels) kwantitatief beeld van schade en belasting.

Bij Delfzijl (proeven nog beperkt tot  $50 \text{ l/s}$  per  $\text{m}$  overslag), tweemaal bij de Boonweg en bij Kattendijke, werd het criterium van begin van schade aan het grastalud niet bereikt. Deze cumulatieve belastingen zijn als ondergrens voor die proeven in alle drie tabellen 2.17-2.19 meegenomen. In vrijwel alle gevallen wordt dan het overslaand kritiek golfvolume van  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  gevonden (met  $u_c = 6,3 \text{ m/s}$ ). Bij Delfzijl was de cumulatieve belasting beperkt tot  $1585 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (bij  $2 \text{ m}^3/\text{m}$ ), maar dit zou mogelijk hoger geweest kunnen zijn als een hoger debiet uitgevoerd had kunnen worden. Bij twee proeven van de Afsluitdijk, waarbij geen schade ontstond, was de cumulatieve belasting bij een overslaand kritiek golfvolume van  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  ongeveer  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

De andere twee proeven op de Boonweg gaven bezwijken te zien, beide voor ook ongeveer een cumulatieve belasting van  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (zie tabel 2.12). Daarnaast gaf de Afsluitdijk veel eerder schade aan het grastalud, maar de dijk was nog lang niet bezweken bij eenzelfde cumulatieve belasting van  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Deze uitkomsten laten wel zien dat er soms nauwelijks ruimte zit tussen begin van schade aan het grastalud en volledig bezwijken (Boonweg) en soms een behoorlijk traject (zoals bij de Afsluitdijk). De vraag is dan of dit gedrag is af te leiden uit de gegevens omtrent de kwaliteit van het grastalud en de klei.

Het gras stroopte vrij snel af van de Afsluitdijk. De cumulatieve belasting waarbij dit gebeurde was soms iets hoger dan bij de Vechtdijk, maar bij een sectie ook lager. Tabellen 2.17 en 2.18 laten zien dat een overslaand kritiek volume van  $1 \text{ m}^3/\text{m}$  ( $u_c = 5 \text{ m/s}$ ) gemiddeld genomen voor begin van schade en iets meer aan het grastalud goed is. Bij St Philipsland ontstonden bij één golf twee kleine gaten. De bijbehorende cumulatieve belasting heeft daar een overslaand kritiek volume van  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  ( $u_c = 6,3 \text{ m/s}$ ).

De doorworteling en bedekking bij Delfzijl was slecht. Die bij de Boonweg goed. Bij Delfzijl was erosiebestendige klei met een laag zandgehalte aanwezig, bij de Boonweg juist een erosiegevoelige klei met veel zand. Kattendijke kwam vrijwel met de Boonweg overeen, met iets minder zand in de klei. Geen van allen gaven schade. Dus wat is hier doorslaggevend geweest? Hierbij moet wel worden gezegd dat de bedekking bij Delfzijl een schatting is. Mogelijk zou de bedekking alsnog kunnen worden bepaald om hier zeker van te zijn.

Bij St Philipsland kwamen doorworteling en kleikwaliteit overeen met Kattendijke en vrijwel met de Boonweg. Alleen was de bedekking bij St Philipsland erg laag (het laagste van alle proeven). Dit talud bezweek bij een cumulatieve belasting van  $5400 \text{ m}^2/\text{s}^2$  als een overslaand kritiek volume van  $1 \text{ m}^3/\text{m}$  wordt aangehouden. Wat betreft bezwijken was St Philipsland, de Vechtdijk niet meegerekend, de zwakste dijk. De meest in het oog springende afwijkende eigenschap van het talud was de grasbedekking. Daarmee zou de grasbedekking wel eens een grote rol kunnen hebben. En mogelijk de doorworteling en klei eigenschappen veel minder.

Als begin van schade aan het grastalud vrij snel begint, wil dat nog niet zeggen dat bezwijken van het talud dichtbij is (Afsluitdijk). Als schade aan het talud pas bij een (zeer) hoge belasting begint, komt het wel voor dat volledig bezwijken daar direct op volgt (Boonweg). Maar de zandige afdeklaag van 0,2 m op de Vechtdijk was wel zwakker dan alle andere dijken.

Op basis van de tabellen 2.17-2.19 kunnen we zeggen dat **bezwijken van een talud optreedt bij een cumulatieve belasting in de orde van  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$** . De volgende kritieke snelheden gelden dan voor de onderzochte dijken:

Delfzijl:	$6.3 \text{ m/s}$ ( $2 \text{ m}^3/\text{m}$ ) - aanname dat het talud meer dan 50 l/s per m kon hebben
Boonweg:	$6.3 \text{ m/s}$ ( $2 \text{ m}^3/\text{m}$ )
St Philipsland:	$5 \text{ m/s}$ ( $1 \text{ m}^3/\text{m}$ )
Kattendijke:	$6.3 \text{ m/s}$ ( $2 \text{ m}^3/\text{m}$ )
Afsluitdijk:	$> 6.3 \text{ m/s}$ ( $> 2 \text{ m}^3/\text{m}$ )
Vechtdijk:	$4 \text{ m/s}$ ( $0,5 \text{ m}^3/\text{m}$ )

Er is natuurlijk meer validatie nodig om bovenstaande conclusie te verfijnen, maar voor de verschillende onderzochte condities (belastinggrootte en sterkte grasbekleding) lijkt een toepasbaar criterium beschikbaar. Verder is nu op basis van het uitgevoerde onderzoek en



de analyse vastgesteld wat mogelijk de kritieke snelheid was voor elke dijk die is onderzocht. Het model heeft echter pas voorspellende waarde als van een specifieke dijksectie inderdaad op basis van specifieke kenmerken de kritieke snelheid kan worden bepaald of geschat. Deze verdere uitwerking hoort niet tot het onderhavig onderzoek.

## 2.4 Conclusies hydraulische belastingen

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat de hydraulische metingen geresulteerd hebben in goede resultaten op basis waarvan een goede indruk kan worden verkregen van de grootte van de parameters in de overslaande golven. Meer in detail kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- LDM's, VFM, DRO's\_turbulentie en surfplanken hebben over het geheel beschouwd goed gefunctioneerd. Aanbevolen wordt deze instrumenten ook bij toekomstige proeven in te zetten. Wel wordt aanbevolen de bemonsteringsfrequentie van de DRO's\_turbulentie te verhogen. Ook wordt aanbevolen meer surfplanken uit te rusten met snelheidsmeters, maar die moeten dan wel vooraf worden gecalibreerd. Verder moet aandacht worden besteed aan de hoogte waarop de surfplanken worden gemonteerd, want dit lijkt van invloed op de laagdiktemeting.
- EMS'én en DRO's\_laagdikte hebben niet goed gefunctioneerd. Het heeft geen zin deze instrumenten bij toekomstige metingen te gebruiken.
- Er zijn aanwijzingen voor luchtinsluiting tussen de binnenkruinlijn en enkele meters lager op het talud als gevolg van loslaten van de overslaande golf bij volumes groter dan 1000 l/s per m. Dit aspect verdient verder onderzoek.
- Trendlijnen zijn afgeleid voor de laagdikten, frontsnelheden en overslagduren als functie van het golfvolume.
- Het luchtgehalte gemeten met de VFM is in de orde van 15 % bij golven van ongeveer 1000 l/s en ongeveer 30 % bij de grootste golven van 5000 l/s per m. Uit het verschil tussen LDM (meting exclusief lucht) en surfplankmeting (meting inclusief lucht) volgt een percentage van ongeveer 10 à 20% voor alle golfvolumes. De VFM metingen zijn puntmetingen, terwijl het verschil tussen LDM en surfplank een dieptegemiddelde meting is en daarmee relevanter voor verdere analyse.
- De gemeten instantane bodemdruk is conform de theorie. Op basis daarvan kan de relatieve turbulentie intensiteit worden voorspeld gegeven laagdikte, stroomsnelheid en luchtgehalte. Aangezien directe metingen van de relatieve turbulentie intensiteit ontbreken is vergelijken van berekende waarden met gemeten waarden niet mogelijk.
- De effectieve cumulatieve belastingmaat lijkt een bruikbare methode als criterium om de sterkte van binnentaluds bij golfoverslag te kwantificeren. Vier schade niveaus voor alle tot nu toe uitgevoerde proeven zijn te relateren aan enkele criteria mits de juiste waarde van de kritieke stroomsnelheid bekend is. Een conservatieve benadering is uit te gaan van een lage kritieke stroomsnelheid.



### 3 Erosie

In het fase 4B verslag (Deltares, 2010b) is een predictie van de erosie gemaakt op basis van eerdere modelontwikkeling in het fase 4A verslag (Deltares, 2010a). In dit hoofdstuk wordt de waargenomen erosie vergeleken met de predictie. Doelstelling daarbij is vast te stellen in hoeverre de predicties juist zijn of dat aanpassingen van de theoretische modellen nodig zijn. Uiteindelijke doel is het bepalen van toelaatbare belastingen op basis waarvan de sterkte van het binnentalud kan worden vastgesteld. Er wordt dan gestreefd naar algemene relaties die ook gelden voor andere locaties dan de onderzochte locaties.

Dit hoofdstuk gaat daarom in op de erosie tijdens de proeven op de Vechtdijk. Allereerst worden in paragraaf 3.1 de proefstroken beschreven en wordt in paragraaf 3.2 beknopt de waargenomen erosie beschreven. Voor meer details wordt verwezen naar het Factual Report van de proeven (Infram, 2009). Vervolgens wordt in paragraaf 3.3 op kwantitatieve wijze de waargenomen erosie vergeleken met de predictie.

Vervolgens wordt in paragraaf 3.4 de cumulatieve belastingmaat als erosiecriteria besproken. In paragraaf 3.5 ten slotte worden conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven.

#### 3.1 Beschrijving proefstroken

De overslagproeven zijn uitgevoerd op vier proefstroken, waarbij naast het effect van een zeer hoog zandgehalte op de erosiebestendigheid van grasbekleding bij overslag ook de invloed van de in het talud opgenomen oprit en de aanwezige boom (NWO, Niet Waterkerend Object) direct onderaan het binnentalud is onderzocht. Bij het onderzoeken van de invloed van de oprit en de boom zijn de kruin en het talud belast met een gelijke belasting (zee-regime) als bij eerdere overslagproeven in o.a. Friesland en Zeeland. Op de andere 2 proefstroken is respectievelijk een rivier-regime en een zwaar zee-regime als belasting toegepast. Op een speciaal daarvoor ingerichte strook zijn hydraulische metingen uitgevoerd. In Figuur 2.1 wordt een overzicht gegeven van de proefstroken en in Tabel 3.1 staat een overzicht van karakteristieke gegevens van de proefvakken met waarden voor significante golfhoogte, piekperiode en aantal inkomende golven.

proefstrook	dijklocatie	Doel proef	golfregime	Hs (m)	Tp (s)	N (-)
1	Buitentalud	Oprit beproeven	Zee	2,0	5,7	4596
2	binnentalud	Erosie rond boom	Zee	2,0	5,7	4596
3	binnentalud	Talud	Rivier	1,0	4,0	6545
4	binnentalud	Talud	Zee	3,0	6,9	3724
HM	binnentalud	Hydraulische metingen	Oplopende volumes (Zie H2)	-	-	-

Tabel 3.1 Overzicht proefstroken

De beproefde waterkering van de Vecht heeft een kern van zand en is afgedekt met een met gras begroeide sterk zandige (gemiddeld 90% zand en 4% lutum) afdeklaag. De dikte van de afdeklaag varieert tussen 20 en 40 cm. Het binnentalud verloopt enigszins hol waardoor de

taludhelling bovenin steiler is dan onderin. De gemiddelde taludhelling is iets steiler dan 1:5 en de taludlengte is ongeveer 14 m.

Het dijkvak waar de golfoverslagproeven zijn uitgevoerd, wordt twee keer per jaar gemaaid waarbij het maaisel wordt afgevoerd. Er is geen sprake van bemesting, begrazing of plaagdierbestrijding. Distels mogen pleksgewijs bestreden worden, maar dit is de afgelopen jaren niet nodig geweest.

Ten behoeve van de erosieontwikkeling op de kruin, het talud en de teen is vóór, tijdens en na de proeven de toestand van de grasmat met behulp van foto's vastgelegd. Daarnaast is het oppervlak van de teststrook en de ontwikkeling van erosiekuilen voor en tijdens de proeven m.b.v. GPS vastgelegd. Tijdens de proeven is bovendien de slijterosie gemeten met een peilnaald, die was voorzien van een voetje om te voorkomen dat de scherpe punt van de peilnaald in het talud zou dringen i.p.v. erop.

In januari 2010 en in maart 2010 heeft Alterra onderzoek verricht naar de zodekwaliteit op vier sublocaties ter plaatse. De sublocaties 1 t/m 4 waren gesitueerd direct naast de proefstroken 1 t/m 4. Zie Tabel 3.2.

Onderdeel	7 januari 2010	23 maart 2010	aanvullend labwerk
- Doorworteling 'handmethode'	ja	ja	nee
- Boormonsters t.b.v. meting worteldichtheid en diameter (scanmethode) en worteldrooggewicht	nee	ja	ja
- Boormonsters t.b.v. meting worteltreksterkte	nee	ja	ja
- Vegetatieopnamen	nee	ja	nee
- Bedekking (rastermethode)	nee	ja	nee
- Bepaling open-plek grootte	nee	ja	nee

Tabel 3.2 Overzicht van de door Alterra uitgevoerde werkzaamheden op de locatie Vechtdijk

De gemiddelde doorwortelingsscore, bepaald via de 'handmethode', valt over de hele 20 cm in de categorie 'goed'. In de diepere bodemlagen (10-20 cm) is in maart een toename van de doorworteling te zien ten opzichte van begin januari 2010. Dit kan worden toegeschreven aan sterke wortelgroei aan het begin van het groeiseizoen, na een strenge winter. Zie Figuren 3.1 t/m 3.4.

De worteldichtheid en het worteldrooggewicht nemen sterk af met de diepte. Wanneer we alle sublocaties samennemen, is de worteldichtheid in de laag 0-10 cm significant hoger dan in de laag 10-20 cm. Hetzelfde geldt voor het drooggewicht van de wortels (dikste wortels zijn niet meegenomen in analyse). De vier sublocaties verschillen niet significant wat betreft worteldichtheid en drooggewicht.

De vier sublocaties verschillen niet significant wat betreft worteldiameter. Wel hebben de wortels in dieptelaag 15-20 cm gemiddeld een significant hogere worteldiameter dan de wortels in de bovenste lagen. Dit wijst op een hogere dichtheid van zeer dunne (zij)wortels op een diepte geringer dan 15 cm.

Opvallend is dat de gemiddelde worteldiameter ongeveer een factor 3 groter is dan de waarden voor dijkgraslandsoorten gerapporteerd door Sprangers en anderen. Dit grote verschil is niet gemakkelijk te verklaren, maar een aantal factoren kan hieraan hebben bijgedragen: (1) Het relatief hoge aandeel kruiden- en boomwortels op de Vechtdijk. Kruiden

en bomen hebben gemiddeld een grotere worteldiameter dan grasachtigen; (2) Verlies van dunne wortels tijdens het spoelproces, wat moeilijk te voorkomen is; (3) De keuze om bij de scan- en beeldverwerkingsprocedure vooral in te zetten op betrouwbare lengtemetingen. Voor het nauwkeuriger meten van diameters moeten de monsters beter worden nageschoond, wat zeer arbeidsintensief is. Mondelinge informatie van Alterra heeft geleerd dat de wijze van bepalen mogelijk minder nauwkeurig is geweest en dat de werkelijke worteldiameter toch gelijk moet zijn aan de eerdere waarden, dus 0,1 à 0,15 mm.

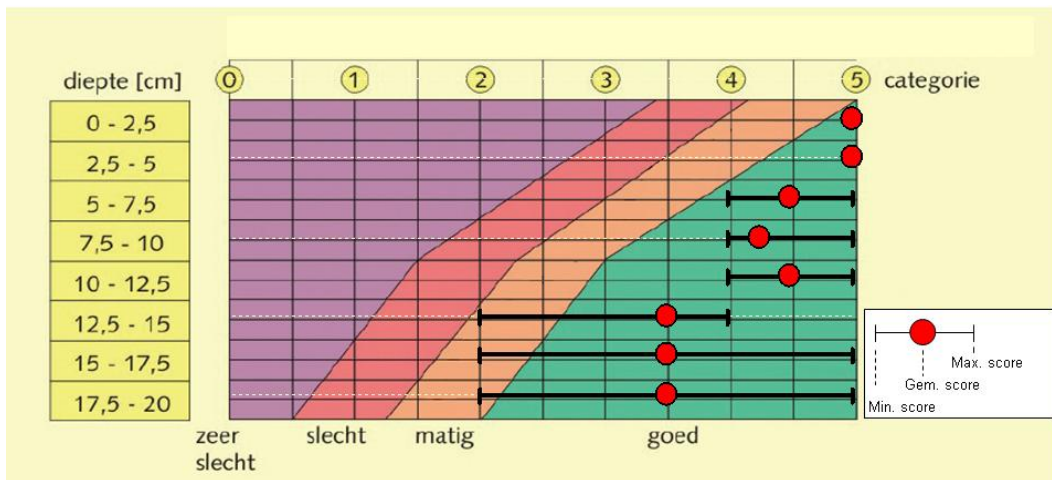
De gemiddelde trekspanning van alle geteste wortels was 13,1 MN/m<sup>2</sup> met een standaardafwijking van eveneens 13,1 MN/m<sup>2</sup>. Diepte en sublocatie hadden een zeer significante invloed op de trekspanning. De trekspanning nam af van ca. 18 MN/m<sup>2</sup> op 0-5 cm diepte tot ca. 8 MN/m<sup>2</sup> op 15-20 cm diepte. De trekspanning was het hoogst in sublocaties 2 en 4 (ca. 16 MN/m<sup>2</sup>) en het laagst in sublocaties 1 en 3 (ca. 10,5 MN/m<sup>2</sup>).

Op basis van de totale soortensamenstelling in maart 2010 vallen alle sublocaties in het VTV-graslandtype 'soortenarme Kamgrasweide' (W2). Door de aanwezigheid van kruiden van voedselarme bodems neigt het graslandtype naar een 'soortenrijke Kamgrasweide' (W3). Door het vroege tijdstip in het jaar (maart) is het heel goed mogelijk dat soorten over het hoofd zijn gezien. Voor optimale herkenning van dijkvegetaties is juni de geschikte periode.

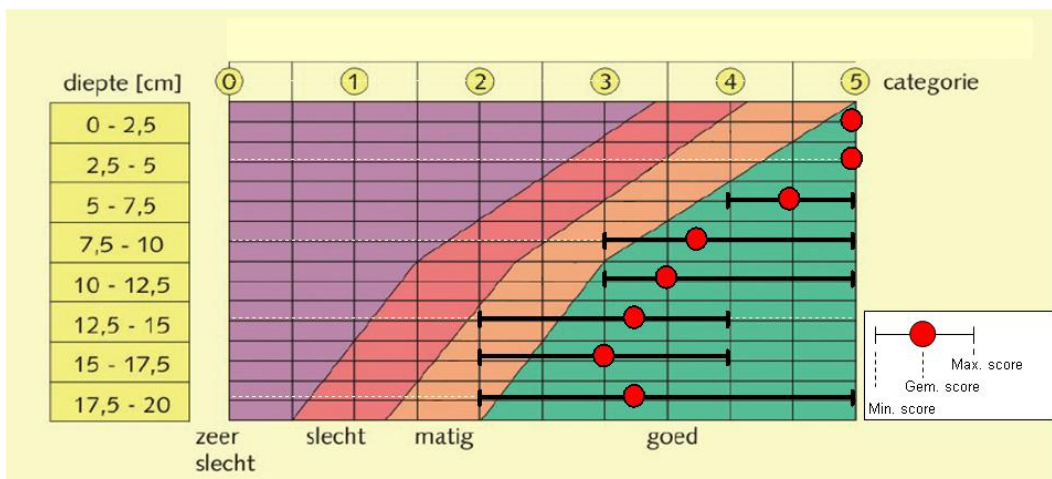
Alle individuele plekken waar bedekking gemeten is voldoen aan de 70 %-norm van het VTV. De gemiddelde gemeten bedekking liep geleidelijk op van sublocatie 1 (gemiddeld 77 %) naar sublocatie 4 (gemiddeld 93 %).

De gemiddelde open-plek-grootte was het kleinst in sublocatie 4 (1,9 cm<sup>2</sup>) en het grootst in sublocatie 2 (4,3 cm<sup>2</sup>). Daarmee scoort de locatie Vechtdijk voor open-plek-grootte volgens Sprangers (1996) 'goed' (sublocatie 4) tot 'matig' (overige sublocaties).

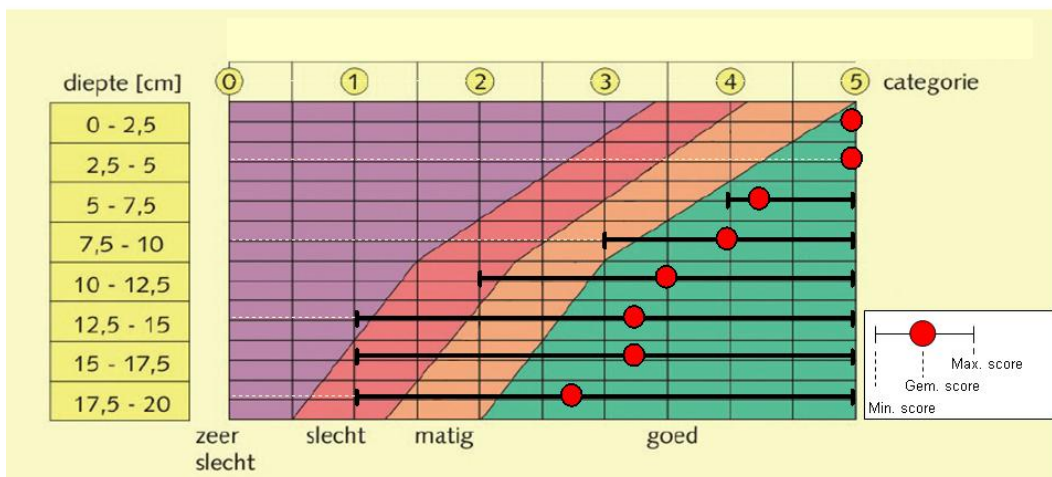
Alles overziende scoort de locatie in zijn geheel ten tijde van de golfoverslagproeven goed voor die variabelen waarvoor een normering voorhanden is (doorworteling, bedekking, open-plek-grootte). Over het geheel genomen is de zodekwaliteit op sublocatie 4 het best. Sublocatie 1, de enige sublocatie op het buitentalud (zuid-geëxponeerd, met dijkovergang van doorgroeistenen), scoort over het geheel genomen het slechtst. Alhoewel de doorwortelingscore ook hier 'goed' is, zijn de worteldichtheid (scanner) en het worteldrooggewicht voor sublocatie 1 het laagst. Deze sublocatie scoort ook het laagst voor de trekspanning en de gemeten bedekking.



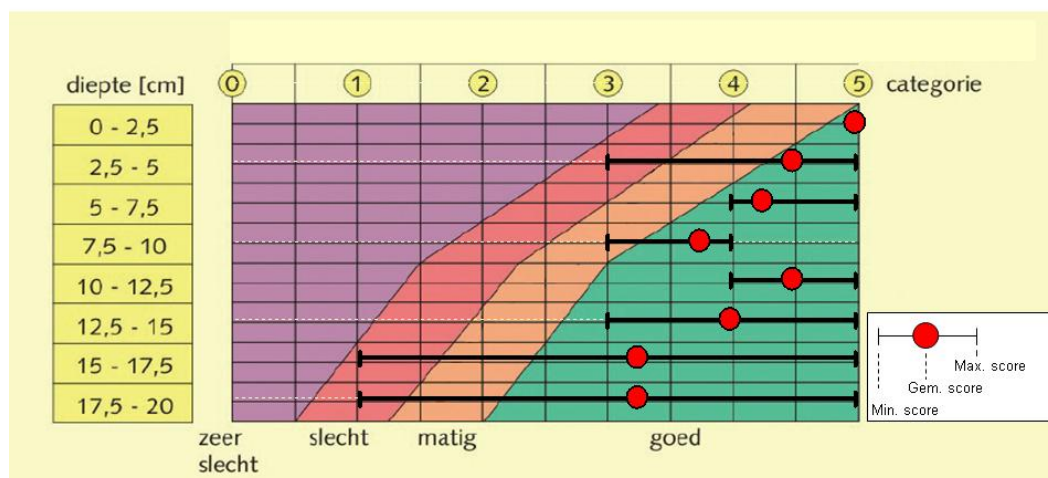
Figuur 3.1 Worteldichtheidsscore Vechtdijk sublocatie 1 op 23 maart 2010 in beoordelingsdiagram van het VTV met kwaliteitsscore 'goed' en n=3



Figuur 3.2 Worteldichtheidsscore Vechtdijk sublocatie 2 op 23 maart 2010 in beoordelingsdiagram van het VTV met kwaliteitsscore 'goed' en n=3



Figuur 3.3 Worteldichtheidsscore Vechtdijk sublocatie 3 op 23 maart 2010 in beoordelingsdiagram van het VTV met kwaliteitsscore 'goed' en n=3



Figuur 3.4 Worteldichtheidsscore Vechtdijk sublocatie 4 op 23 maart 2010 in beoordelingsdiagram van het VTV met kwaliteitsscore 'goed' en  $n=3$

### 3.2 Waargenomen erosie

Op de Vechtdijk is gekeken naar de invloed van het hydraulische regime op erosie van de grasmat en op de invloed van een oprit en een boom op de erosie. Er zijn golfoverslagproeven uitgevoerd voor golfregimes met  $H_s=1, 2$  en  $3$  m (zie hoofdstuk 2), die elk een eigen verdeling van golfoverslagvolumes geven bij een bepaald gemiddeld overslagdebiet. Bij gelijkblijvende kruinhoogte en waterstand leidt een kleine golfhoogte, en daar bij behorende korte golfperiode, tot veel kleine overslagvolumes en leidt een grote golfhoogte tot weinig grote volumes.

In het algemeen kan worden gesteld dat de proeven laten zien dat de grasbekledingen veel weerstand bieden tegen erosie. Bij de kleinere overslagdebieten kregen de golven geen vat op de grasbekleding en ontstonden alleen kale plekken op het talud. Bij de grotere debieten trad erosie van de grasmat op waarbij de grasmat aan de benedenstroomse kant van de erosieplekken losscheurde en zich zo naar beneden toe uit kon breiden.

Op basis van de waarnemingen worden onderstaand de relevante observaties gepresenteerd:

1. Op alle vier de proefstroken zijn de proeven voortijdig beëindigd i.v.m. het bereiken van het afgesproken stopcriterium (erosiediepte  $> 0,3$  m). Aan het eind van alle proeven was een significant deel van het oppervlak aan grasmat verdwenen.
2. De achtergebleven kale zandige grond lag gemiddeld  $0,1$  m lager dan het oorspronkelijke talud, was rijkelijk voorzien van graswortels en mollengaten en was nauwelijks erosiegevoelig.
3. De meeste erosie is geïnitieerd op plekken die door graafactiviteiten van mollen waren verstoord.
4. De (bestrate) oprit bleek veel erosiegevoeliger dan het grastalud.
5. Op de overgang taludteer onderzijde is geen ontgroning opgetreden.
6. Rondom de boom ontstonden grote erosiekuilen die zorgden voor uitspoeling van zand van onder de graszode.

Eerder zijn in Delfzijl, Zeeland, bij de Boonweg in Friesland en op de Afsluitdijk ook proeven uitgevoerd. Omdat de proeven worden geëvalueerd in het bredere kader van SBW worden onderstaand ook die observaties gepresenteerd:

7. Op het talud is na de initiële erosie de grasmat over een groot oppervlak afgescheurd, waarbij verdere erosie van de onderliggende klei niet is opgetreden.
8. Op de berm bij teen talud is vanaf 10 l/s per m schade ontstaan.
9. De schade bij de bestrating op zandfundering is veel groter dan bij de grasbekleding op de berm.
10. Schade bij de taludtrap ontstond al bij 10 l/s per m ter weerszijden van de trap als gevolg van stroomconcentratie.
11. Bij de proeven bij de Boonweg is het opbolmechanisme waargenomen.
12. Een paal (0,15 x 0,15 m<sup>2</sup>) of hek in talud of berm heeft niet tot erosie geleid en is daarmee niet erosiegevoeliger dan een grasbekleding.
13. Erosie van gras op de binnenkruinlijn is waargenomen vanaf 50 l/s per m.
14. Geen enkel taludoppervlak van een binnentalud gaf significante schade bij 50 l/s per m, gedurende 6 uur simulatie (uitgezonderd St.Philipsland).
15. Aan de overgang van de kruin naar het binnentalud is nooit schade ontstaan (uitgezonderd bij de Afsluitdijk).
16. Bij overgangen talud-horizontaal trad schade op; en dat is opnieuw bevestigd.
17. Een beschadiging (gat) door de kleilaag heen tot op het zand geeft direct grote schade, de zandkern spoelt zeer snel uit volgens het head-cut erosie mechanisme.
18. Een significante invloed op de mate van erosie van de wijze van beheer kon niet worden vastgesteld.
19. Goede kale klei, zoals de dijk bij Delfzijl, kan 6 uur 1 l/s per m golfoverslag aan, vervolgens 6 uur 5 l/s per m en daarna 6 uur 10 l/s per m. Bij elke belasting trad er erosie van kleideeltjes op. De voorgeschiedenis telt daarom mee bij de uiteindelijke schade bij 10 l/s per m. De resultaten gelden voor een volledige kleidijk. Als er een kleilaag op een zandkern ligt, dan is het kritieke punt wanneer het gat door de kleilaag heen gaat.
20. Een gat in de klei met een verticaal talud aan bovenstreamse zijde geeft het ontstaan van het mechanisme "head cut erosie". Het verticale talud brokkelt af en het gat wordt naar boven toe groter.
21. Aangebrachte gaten van 15x15 cm gaven in erosiebestendige klei bij 50 l/s per m geen verdergaande schade aan de grasmat. Bij gaten van 40x40 cm (15 cm diep) en 1x1 m (5 cm diep) ontstond uitschuring (geulvorming) aan de onderzijde van het gat tot aan de teen van de dijk.
22. Bij een aantal proefvakken kwamen veelvuldig ook muizen voor. De gangen werden duidelijker zichtbaar na overslag en de ingangen werden soms een beetje uitgehold, maar geen enkele beschadiging door deze dieren heeft tot initiële schade aan het talud geleid.

Opvallend ten opzichte van eerdere proeven was de geringe schade rond de teen (flauw en sterk afgerond). De aanwezigheid van de bestrating op de oprit in proefstrook 1 vormde een aanmerkelijke verzwakking van de waterkering waardoor de proef voortijdig moest worden beëindigd.

Ook de aanwezigheid van een boom in de teen van proefstrook 2 gaf aanleiding tot versterkte erosie vlak voor en naast de boom die zich uitbreidde richting het talud. De schade ontstond aan de voorzijde van de boom. De hier ontstane erosiekuil is opgevuld en afgedekt met doek en krammen om de proef te kunnen doorzetten teneinde de sterkte van het talud zelf te bepalen. De afdekking van de kuil is echter onvoldoende geweest. De erosiekuil heeft zich stroomopwaarts uitgebreid en de proef is uit veiligheidsoverwegingen gestopt.

Het zware zeeregime op proefstrook 4 leidde tot het versneld bereiken van het stopcriterium t.o.v. het rivierregime op proefstrook 3. In tegenstelling tot proefstroken 1 en 2 waar de oprit



en de boom voor de eerste erosie zorgden, is bij beide proefstroken de grasbekleding wel geërodeerd en zijn de proeven vroegtijdig gestaakt door het ontstaan van een erosiegat.

Voor een beschrijving van details ten aanzien van erosie ontwikkeling wordt verwezen naar het Factual Report (Infram 2010). Daar wordt een overzicht gegeven van de erosieontwikkeling aan de hand van foto's en wordt per teststrook een beschrijving gegeven van de waargenomen erosie.

In Tabel 3.3 is als samenvatting per proef aangegeven wanneer en waar de eerste schade optrad als functie van de effectieve cumulatieve belasting (zie hoofdstuk 2).

Tabel 3.4 geeft de maximale slijterosie. De maximale diepte in de erosiekuilen bij de oprit en de boom was ongeveer 0,5 à 1,0 m.

	Belasting (l/s per m)	$\Sigma (u^2 - u_c^2) \text{ m}^2/\text{s}^2$				
		$V_c=0 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.25 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=0.5 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=1 \text{ m}^3/\text{m}$	$V_c=2 \text{ m}^3/\text{m}$
<i>Rivier regime (<math>H_s = 1 \text{ m}</math>)</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 10; 1:58 uur 30	18431	2295	649	86	2
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 10; 6:00 uur 30	33670	5355	1680	249	6
Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 10; 30; 2:00 uur 50	44894	8634	3085	589	35
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 10; 30; 2:07 uur 50	45548	8826	3167	609	37
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>): met overgang</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 6:00 uur 1	889	171	53	4	0
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 3:00 uur 10	8266	2087	847	180	8
Zand komt vrij (door de afdeklaag)						
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme						
Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	2052	359
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>): met boom</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	217	10
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	801	110
Zand komt vrij (door de afdeklaag)						
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme						
Geen bezwijken talud na:	0,1; 1; 5; 10; 30; 1:01 uur 50	34903	12806	6790	2435	457
<i>Zwaar zee regime (<math>H_s = 3 \text{ m}</math>)</i>						
Eerste schade (min. 0,15 m x 0,15 m)	0,1; 1; 2:00 uur 5	1624	655	356	125	19
Meerdere locaties kale plekken (" ")	0,1; 1; 6:00 uur 5	3674	1502	833	306	50
Zand komt vrij (door de afdeklaag)	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	9530	4141	2412	974	201
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 1:03 uur 30	12265	5615	3402	1486	370
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>): met overgang</i>						
Begin ondermijning overgang	0,1; 1; 5; 6:00 uur 10	11834	3105	1296	291	15
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 30; 0:23 uur 50	31965	11396	5926	2052	359
<i>Zee regime (<math>H_s = 2 \text{ m}</math>): met boom</i>						
Eerste wortel geërodeerd	0,1; 1; 5; 4:00 uur 10	9455	2426	997	217	10
Grote erosie van wortels, zand zichtbaar	0,1; 1; 5; 10; 2:00 uur 30	17951	5584	2665	801	110
Gestopt: oncontroleerbaar mechanisme	0,1; 1; 5; 10; 5:30 uur 30	28657	9923	5061	1692	276

Tabel 3.3. Schadecriteria met tijdstip van optreden en bijbehorende cumulatieve schade

proefstrook	linkerzijde	midden	rechterzijde
1	< 0,02 m	< 0,02 m	0,03
2	0,025 m	0,035 m	0,06 m
3	0	0	0,08 m *)
4	0,065 m *)	0	0

\*) erosie is ontstaan bij 50 l/s (tot 30 l/s geen erosie)

Tabel 3.4 Maximale slijterosie

Gegeven het voorgaande lijkt het dat de combinatie gras plus klei/zand verantwoordelijk is voor de sterkte. Bij goed gras op zandige klei treedt geen schade op tot 75 l/s per m. Als er echter schade optreedt dan is de klei minder sterk; zie bij voorbeeld Boonweg. Goede klei geeft problemen voor de doorworteling en geeft dus minder goed gras (wortels kunnen minder makkelijk doordringen). In dat geval scheurt de bovenste 5 à 10 cm van het gras af bij 30 l/s per m, maar verhindert de goede klei verdere erosie van de klei (zie Afsluitdijk).

Kennelijk zijn er dus verschillende mechanismen waarop schade optreedt, maar leidt het tot een vergelijkbare sterkte. Het beheer van de graszode lijkt daarbij van ondergeschikt belang. Uit de proeven bij de Boonweg blijkt het beheer immers niet onderscheidend. Veeleer lijkt de bedekkingsgraad relevant. Bij de proeven in St. Philipsland bijvoorbeeld was sprake van een lage bedekkingsgraad (zie Tabel 2.16) en een snel bezwijken (zie ook foto's 43 en 44 in de fotobijlage).

Ten slotte worden hierna enkele karakteristieke resultaten getoond.



Foto 3.1 Proefstrook 1: ontstaan van Doorgroeisteen t.h.v. linkergat weggeslagen gaten aan de bovenstroomse rand van de verharding



Foto 3.2 Eindresultaat proefstrook 1



Foto 3.3 Strook 2 begin benedenstrooms



benedenstrooms



Foto 3.4 Ondermijning bovenstrooms talud door uitspoelen zand



Foto 3.5 Strook 3 erosie en ondermijning talud zand



Ontstane schade als gevolg van instorten toplaag door uitspoeling



Foto 3.6 Strook 4



Eindsituatie

### 3.3 Evaluatie erosiepredictie

Op grond van de situatie op de Vechtdijk zijn voor de proeven predicties afgegeven voor de volgende mechanismen (Deltares, 2010b):

- A) slijterosie: eroderen van de toplaag waarna een gat op een zwakke plek in de graszode ontstaat (kuilvorming);
- B) abrupt of geleidelijk lokaal losscheuren van een laagdikte van 5 à 10 cm van de grasbekleding (opbolmechanisme bij abrupt losscheuren);
- C) ontstaan van lokale ontgrondingskuilen bij oneffenheden of overgangen naar een horizontaal deel zoals bij de teen van het binnentalud en opritten;
- D) erosie rondom een NWO, in dit geval een boom.

De verschillende mechanismen zijn in het Fase 4B verslag geïllustreerd met foto's.

Na het optreden van de mechanismen kunnen vervolgmecanismen optreden:

- geleidelijk eroderen van de grasmat in benedenstroomse richting (geulvorming);
- uitbreiding van de erosiekuil in bovenstroomse richting ("head-cut erosion").

Voor de gebruikte modellen wordt verwezen naar het Fase 4A rapport, maar de essentiële formules zullen worden herhaald.

De hydraulische condities zijn verschillend per overslaande golf. Voor elk overslagdebiet zijn het aantal en de volumes van de overslaande golven verschillend. In hoofdstuk 2 zijn de effectieve cumulatieve belastingen  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  voor verschillende hydraulische regimes, gemiddelde overslagdebieten en kritieke overslagvolumes, gegeven. Deze cumulatieve belastingen kunnen voor de erosiemechanismen worden gebruikt, maar dat is niet gedaan in de navolgende pagina's. Reden hiervoor is dat de predictiemodellen op dit moment nog niet zijn bepaald als functie van de cumulatieve belasting. Verder is de cumulatieve belastingmaat nog niet geverifieerd. Er is daarom gekozen voor de eerdere werkwijze om voor een bepaald volume een laagdikte, een optredende stroomsnelheid en een tijdsduur aan te nemen. De uiteindelijke erosie volgt door sommatie van de erosie voor iedere afzonderlijke golf. In paragraaf 3.4 zal nader worden ingegaan op de cumulatieve belastingmaat.

#### *Predictie slijterosie toplaag talud, mechanisme A*

De mechanismen A en B treden op het talud op. De erosie  $y_m$  per golf door mechanisme A kan worden geschat met:

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (0,7\alpha U_m - U_c)^2 t_m}{E_{soil}} \quad (3.1)$$

met  $E_{soil} = 6,15 \cdot 10^4 \frac{U_c^2}{\sqrt{gd_a}} \quad (3.2)$

waarin:

$y_m$	maximale ontgrondingsdiepte (m);
$U_m$	representatieve dieptegemiddelde snelheid bij golfoverslag (m/s);
$U_c$	kritische dieptegemiddelde snelheid (m/s);
$t_m$	representatieve duur van de golf (s).
$\alpha$	(= $1,5 + 5r_0$ ) turbulentie constante (-);
$r_0$	relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit (-);
$E_{soil}$	erosieparameter (m/s);
$n$	aantal golven (-);
$d_a$	= 0,004 m.

Uitgaande van  $U_c = 6$  m/s voor een talud 1:5 en uitgaande van een worteldiameter van 0,13 mm is een voorspelling afgegeven van orde 3 cm. Waargenomen is een erosie van 2 à 4 cm (zie Tabel 3.4) met uitschieters naar 8 cm. Op basis daarvan wordt geconcludeerd dat de gemiddelde slijterosie goed kan worden voorspeld. In paragraaf 2.3 is voor de Vechtdijk een kritieke snelheid van 4 m/s afgeleid (nu is gerekend met 6 m/s) en dat zal leiden tot een berekende slijtererosie dicht bij de waargenomen uitschieters.

Falen door mechanisme A is echter niet opgetreden, want uitgangspunt voor falen door slijterosie is een optredende erosie van  $d_{ref} = 10$  cm. De waarde van 10 cm is conservatief en hangt samen met de diepte in de zode waar het aantal wortels significant afneemt.

Tot op heden is bij alle proeven geen slijterosie geconstateerd. Dit lijkt er op te wijzen dat dit mechanisme minder belangrijk is.

In aanvulling hierop nog een opmerking over mechanisme A. Dit zogenaamde open plek model is gebaseerd op een aanwezige open plek als aangrijpingspunt voor de erosie. Toch voorspelt het model dat niet. Eerder is al eens opgemerkt dat er twijfels bestaan over de juistheid van dat model.

### *Predictie losscheuren grasmat talud (opbolmechanisme), mechanisme B*

Losscheuren van de grasmat kan plaatsvinden door vermoeiing of door abrupt losscheuren. Vermoeiing kan worden onderzocht met:

$$U_{0,c} = K_{v,u} U_c \quad \text{met} \quad K_{v,u} = \frac{1}{1,5 + 5r_{0,c}} \left( \sqrt{\frac{\alpha_{\text{soil}} \lambda_{\text{ref}}}{t \sqrt{g d_a}}} + 1 \right) \quad (3.3)$$

waarin:

- $\alpha_{\text{soil}}$  empirische constante (m<sup>2</sup>/s);  $\alpha_{\text{soil}} = 6,15 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s;
- $\lambda_{\text{ref}}$  lengteschaal (m);
- $r_{0,c}$  relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit (-);
- $t$  belastingduur

Gegeven de uitgangspunten is voorspeld dat afscheuren door vermoeiing niet werd verwacht. Tijdens de proeven is dit mechanisme inderdaad ook niet geconstateerd.

Toch is bij de proeven geconstateerd dat de aanwezige mollengaten de inleiding zijn tot afscheuren van de zode. Hierbij is duidelijk sprake van vermoeiing. Het verdient aanbeveling dit nader uit te werken.

Abrupt losscheuren kan worden onderzocht met het turf-element model. Basis daarvoor is de formule:

$$U_c = r_{0,c}^{-1} \sqrt{3,4 \Psi_c \sigma_{0, \text{grass}, c} \cos \theta / \rho} \quad \text{met} \quad \sigma_{0, \text{grass}, c} = \sigma_{r,c} \left( \frac{A_r}{A} \right)_0 \quad (3.4)$$

waarin:

- $A_r$  (=No.  $\frac{1}{4} \cdot \pi (d_r)^2$ ) worteloppervlak (m<sup>2</sup>)
- $A$  (=  $\frac{1}{4} \cdot \pi (d_{\text{boor}})^2$ ) standaardoppervlak volgens VTV-2006
- $g$  (= 9,81 m/s<sup>2</sup>) valversnelling
- $r_{0,c}$  (= 0,17) kritische dieptegemiddelde relatieve turbulentie intensiteit (-)
- $U_c$  kritische dieptegemiddelde snelheid (m/s)
- $\theta$  (= 30°) hoek tussen wortel en verticaal
- $\rho$  (= 1000 kg/m<sup>3</sup>) dichtheid van het water (kg/m<sup>3</sup>)
- $\sigma_{r,c}$  (= 20.10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>) kritische trekspanning van wortels (N/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_{0, \text{grass}, c}$  kritische grassterkte nabij het maaiveld (N/m<sup>2</sup>)
- $\Psi_c$  kritische Shieldsparameter (-)

De predictie gaf aan dat abrupt losscheuren niet was te verwachten en dat is ook niet opgetreden.

*Predictie oprit in talud en overgang talud naar teen, mechanisme C*

De evenwichtsdiepte van de ontgrondingskuil op de overgang naar een oprit of bij teen talud kan worden voorspeld met de formules volgens:

- Hoffmans; en
- Stein.

De formule van Hoffmans luidt:

$$y_{m,e} + h_t = U_{DL} \sqrt{\sin(S) \frac{q U_m}{g}} \quad \text{met} \quad U_{DL} = \frac{23}{\left( U_c \left( \frac{\Delta}{\nu g} \right)^{1/3} \right)^{1/2}} \quad (3.5)$$

en de formule van Stein:

$$y_{m,e} = \frac{C_d^2 C_f \rho_w U_m^2 h_t}{\tau_c} \sin S \quad (3.6)$$

waarin:

$y_{m,e}$	maximale ontgrondingsdiepte in de evenwichtsfase (m);
$U_c$	kritieke maximale dieptegemiddelde snelheid (m/s);
$U_{DL}$	karacteristieke dimensieloze parameter voor grondsterkte (-);
$g$	gravitatieconstante (m/s <sup>2</sup> );
$h_t$	waterdiepte van overslaande stroming (m);
$U_m$	maximale dieptegemiddelde snelheid van overslaande stroming (m/s);
$q$	(= $h_t U_0$ ) instantaan overslagdebiet (m <sup>3</sup> /s/m);
$S$	helling van het binnentalud (-);
$\Delta$	relatieve dichtheid (-);
$\nu$	kinematische viscositeit (m <sup>2</sup> /s).
$C_d$	diffusieconstante (-);
$C_f$	wrijvingsconstante (-);
$\rho_w$	soortelijk gewicht water (kg/m <sup>3</sup> );
$\tau_c$	kritische grondsterkte (N/m <sup>2</sup> );

Uitgaande van  $U_c = 5$  m/s,  $U_m = 7,25$  m/s,  $h_t = 0,4$  m, talud 1:5,  $\tau_c = 7,5$  kN/m<sup>2</sup>,  $C_d = 3,6$  en  $C_f = 0,05$  (Deltares, 2010b) zijn als voorspelde kuildiepten de volgende waarden gepresenteerd:

- Hoffmans formule: 0,4 à 0,6 m
- Stein formule: 0,3 m

Aan de bovenstroomse zijde van de oprit zijn kuildiepten gemeten tot ongeveer 0,5 à 1,0 m. Dat is dus grofweg een factor 1,5 à 2,5 meer dan de voorspelde diepten. De waarschijnlijke oorzaak is dat de kritieke stroomsnelheid lager is dan verondersteld, namelijk 4 m/s (zie hoofdstuk 2). Ook de laagdikte is minder. Als we dit in rekening brengen dan leidt dat met de formule van Hoffmans tot een kuildiepte van ongeveer 0,6 à 0,8 m en dat is gelijk aan de gemeten erosie. Voor de methode Stein is een dergelijke herberekening niet uitgevoerd maar ook dan zullen grotere kuildiepten worden voorspeld.

Bij teentalud is geen erosie ontstaan tijdens de proeven. Dit in tegenstelling tot de voorspelling. De oorzaak dat geen erosie is opgetreden is de geleidelijke overgang van talud naar horizontale berm.

Naast bovengenoemde methoden is er ook de methode Valk voor de predictie van de ontgrondingsdiepte als functie van de tijd. Met deze methode is in het kader van de proeven aan de Vecht geen predictie gemaakt. Dat is ook in deze evaluatie achterwege gelaten omdat de erosie niet als functie van de tijd beschikbaar is.

### *Erosie rondom boom, mechanisme D*

Er zijn twee benaderingen mogelijk:

1. naar analogie met ontgrondingen rond brugpijlers, en
2. op basis van het turf-element model.

Een predictie volgens de eerste methode maakt gebruik van de formules:

$$\frac{y_{m,e}}{b} = 2,0 \quad \text{voor } b/h \ll 1 \quad (3.7)$$

of

$$\frac{y_{m,e}}{h_0} = 1,9 \quad \text{voor } b/h \cong 1 \quad (3.8)$$

waarin:

$y_{m,e}$	ontgrondingsdiepte (m)
$b$	doorsnede boom (m)
$h$	waterdiepte (m)

Op basis van de gegevens (doorsnede boom ongeveer 0,4 m; waterdiepte maximaal 0,4 m) is een ontgrondingsdiepte voorspeld van  $y_{m,e} \approx 0,7$  à 0,8 m. De waargenomen kuildiepte juist bovenstrooms van de boom is in de orde van 0,5 à 1,0 m en klopt dus goed met de voorspelling.

De benadering op basis van het turf-element model maakt gebruik van de modellering voor slijterosie, maar met een verhoogde belasting (turbulentie en stroomcontractie) geïnduceerd door de boom (algemener: een NWO). Het is nog een zeer voorlopig model en daarom is geen predictie gepresenteerd, maar indicatieve berekeningen gaven aan dat er geen erosie zou optreden en dat is dus niet conform de waarneming.

### *Samenvatting*

Er is een aantal kanttekeningen te maken:

1. Als schade op het talud optreedt dan ontstaat er kuilvorming of wordt alleen een grasdikte van 5 à 10 cm afgescheurd. Mechanisme A lijkt daarmee niet relevant. Overigens treedt de schade vaak op bij al aanwezige slechte plekken (mollengaten) of smalle horizontale gedeelten (rijsporen, schapenpaadjes).
2. Afscheuren is wel waargenomen en hierbij lijkt vermoeiing een rol te spelen. De huidige formulering daarvan bij mechanisme B voorspelt dit echter niet. Aanbevolen wordt dit nader uit te zoeken.



3. Schade op overgangen (bij opritten en bij teen) en bij NWO's zoals een boom, blijkt opnieuw maatgevend. De modelvorming voor erosie bij overgangen en bij een NWO lijkt goed, maar invoer van correcte waarden voor de parameters is belangrijk voor een juiste predictie.

Op grond van het voorgaande wordt aanbevolen:

- Het model voor vermoeiing verder aan te passen (mechanisme B).
- De juiste waarde voor de kritieke stroomsnelheid af te leiden als functie van de zode kwaliteit.

### 3.4 Cumulatieve belastingmaat

Doelstelling is een voorspelling van de sterkte te kunnen geven en daartoe moeten belasting en sterkte worden gekoppeld. In paragraaf 2.3 is de effectieve cumulatieve belastingmaat uitgewerkt. Door het vergelijken van de schade is een belastingmaat vastgesteld. Hierop wordt later deze paragraaf terug gekomen, maar het is een empirische methode met een theoretische basis, namelijk de zogenaamde erosion-rate theorie. Nu wordt eerst een meer theoretische aanpak gepresenteerd, overigens eveneens gebaseerd op de erosion-rate theorie.

Bij de modellering is relevant te bedenken dat schade optreedt als de snelheid een zekere kritieke waarde overschrijdt. Deze situatie doet zich voor bij de hogere debieten. Op het talud treedt schade pas op bij debieten groter dan 30 l/s per m en bij teen talud vanaf 10 l/s per m. Daarnaast zien we dat uitbreiding van de schade plaats vindt bij de grotere golven: 3000 l/m en meer.

Uitgaande van een erosion-rate benadering en gebruik makend van de vgl.(3.1) en (3.2) kan de volgende erosiediepte worden afgeleid:

$$z'_m = -(E_{soil})^{-1} \sum_{i=1}^{i=N_w} (\alpha_w \Psi' U_m^2 - U_c^2) t_w \approx -(E_{soil})^{-1} \sum_{i=1}^{i=N_w} \alpha_w \Psi' U_m^2 t_w \quad (3.9)$$

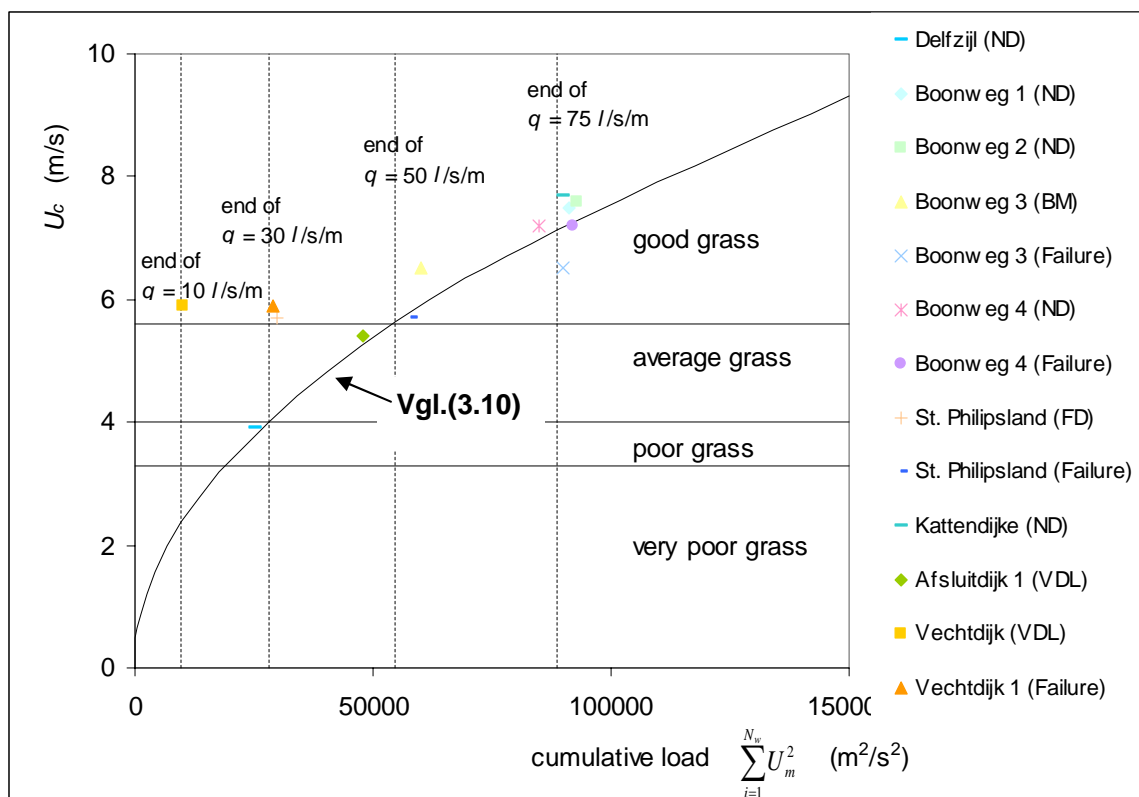
Deze formule kan ook worden geschreven als:

$$\sum_{i=1}^{i=N_w} U_m^2 = C_{damage} U_c^2 \quad \text{met} \quad C_{damage} = \frac{\alpha_{soil} \lambda_{ref}}{\alpha_w \Psi' t_w \sqrt{g d_a}} \quad (3.10)$$

Substitutie van  $d_a = 0.004$  m,  $g = 9.81$  m<sup>2</sup>/s,  $t_w = 3.5$  s,  $\alpha_{soil} = 60 \cdot 10^3$ ,  $\alpha_w = 0.5$ ,  $\lambda_{ref} = 0.1$  m en  $\Psi' = 10$  (stabiliteitsfactor afgeleid uit de CIRIA grafieken), resulteert in  $C_{damage} = 1700$ .

Gegeven een waarde van  $U_c$  kan nu een toelaatbare cumulatieve belasting  $\sum U_m^2$  worden bepaald. In Figuur 3.5 is dit gepresenteerd waarbij alle uitgevoerde proeven zijn vermeld.

Voor de waarde van  $U_c$  is daarbij uitgegaan in alle gevallen van een stroomsnelheid groter dan 5,7 m/s omdat de zodekwaliteit als goed is aangemerkt.



Figuur 3.5  $U_c$  als functie van de cumulative belasting; ND = no damage, BM = bulging mechanism, FD = first damage on toe of slope, VDL = various damaged locations

Uit de figuur blijkt dat dit voor de Vechtdijk (en ook de dijk bij St.Philipsland) niet klopt. De kritieke snelheid moet lager zijn. Een theoretisch betere methode om een waarde voor  $U_c$  te bepalen is met vgl.(3.4). Probleem is echter dat de beschikbare informatie over de zodekwaliteit onvoldoende onderscheidend is en ook geen rekening houdt met het zandige karakter op de Vechtdijk of de meer open zode zoals bij St.Philipsland. Aanbevolen wordt meer aandacht te besteden aan de heterogeniteit van de zode, in het bijzonder de open ruimte zodat de kritieke stroomsnelheid beter kan worden bepaald.

In Hoofdstuk 2 is dus een iets andere benadering gevolgd, namelijk een effectieve cumulatieve belastingmaat volgens  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$ . De eerste term is een maat voor de erosie, de tweede term is in zekere zin een maat voor vermoeiing.

Op basis van een fit aan alle uitgevoerde proeven wordt het volgende resultaat verkregen:

Begin van schade	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Meerdere kale plekken	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Vroeg bezwijken door mollengaten	$\Sigma(u^2 - u_c^2) = 3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Niet bezwijken bij "normaal" talud	$\Sigma(u^2 - u_c^2) < 6000 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Op basis hiervan kan worden gesteld dat bezwijken optreedt bij  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Voor de verschillende proeflocaties zijn de daarbij behorende kritieke stroomsnelheden (gefit aan de data):

Delfzijl:	6.3 m/s
Boonweg:	6.3 m/s
St Philipsland:	5 m/s
Kattendijke:	6.3 m/s
Afsluitdijk:	> 6.3 m/s
Vechtdijk:	4 m/s

Als we deze waarden zouden aanhouden bij het samenstellen van Figuur 3.5 in plaats van de nu gekozen waarde van 5,7 m/s dan blijken alle waarnemingen goed aan te sluiten. Een kritieke waarde van 4 m/s voor de Vechtdijk en een van 5 m/s voor St Philipsland zijn dan zeer reëel.

Zoals al eerder opgemerkt is het probleem nu dus het voorspellen van een correcte waarde voor de kritieke stroomsnelheid  $U_c$ . Verder wordt aanbevolen de beide belastingmaten (effectieve cumulatieve belastingmaat volgens  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  en de cumulatieve belasting  $\Sigma U_m^2$ ) om te werken naar één maat, waarbij de theoretisch onderbouwde volgens vgl.(3.10) de voorkeur heeft.

### 3.5 Conclusies en aanbevelingen

De overslagproeven op de Vechtdijk bevestigen eerdere bevindingen dat de grasbekleding als totaal op de kruin en het talud zonder obstakels of grote (> 15 cm) beschadigingen zeer veel weerstand biedt tegen erosie. Pas bij de grotere overslagdebieten van 30 l/s per en meer krijgen de golven vat op de grasbekleding en ontstaat er schade.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Talud: schade ontstaat als gevolg van de aanwezigheid van mollengaten waarna afscheuren van de zode optreedt. Voorspelling van de erosie niet correct.
- Oprit: maatgevend voor de schade; voorspelde diepte van de erosiekuil correct mits de juiste waarden worden ingevoerd.
- Boom: dit is een verzwakking van het talud en zeer bepalend voor de schade; ook hier geldt dat de methode voor voorspellen van de erosiekuil diepte correct is met de juiste invoergegevens.
- De beide belastingmaten lijken beide zeer bruikbaar; essentieel bij een predictie is dat de kritieke stroomsnelheid goed kan worden voorspeld.
- De vegetatieopnames hebben geleid tot de conclusie dat de zodekwaliteit als goed moet worden beoordeeld. Dit doet geen recht aan de vastgestelde lagere kritieke stroomsnelheid. Aspecten als open ruimte komen onvoldoende tot hun recht.

Op basis van de bevindingen worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Het vermoeiingsmodel lijkt niet goed te voorspellen en aanpassing van dit model is gewenst.
- Het voorspellen van de kritieke stroomsnelheid is niet juist voor graszoden zoals aanwezig op de Vecht met een hoog percentage zand; ook met relatief grote open ruimtes zoals op St.Philipsland levert een voorspelling te hoge waarden op.
- Veelbelovend zijn de resultaten met de beide belastingmaten maar een verdere uitwerking is gewenst. Ook hier is een goed voorspelling van de kritieke snelheid cruciaal.



## 4 Infiltratie

### 4.1 Inleiding

In het navolgende hoofdstuk worden de infiltratiemetingen tijdens de golfoverslagproeven op de Vechtdijk geëvalueerd. Infiltratie leidt tot een waterspanningsopbouw in en onder de bekleding. Deze verhoging van de waterspanningen kan leiden tot instabiliteit van de bekleding. Infiltratie is dus geen faalmechanisme op zich, maar een proces dat kan leiden tot een faalmechanisme.

De waterspanningsmetingen op de Vechtdijk zijn uitgevoerd om het inzicht in het infiltratieproces, met name ook voor een zanddijk, te vergroten. Naast een kleidijk (Delfzijl) en zanddijken met een kleibekleding (Kattendijke, St. Philipsland, Boonweg en Afsluitdijk) was een volledige zanddijk een nog ontbrekende dijkopbouw.

Waterspanningsmetingen in de dijk zijn uitgevoerd bij strook 3 (Figuur 4.1).



- Strook 1 – buitentalu dwergovergang
- Strook 2 – binnentalud boom
- Strook HM – meting hydraulische parameters
- Strook 3 – laag golf regime
- Strook 4 – hoog golf regime

Figuur 4.1 Locatie golfoverslagproeven, alleen bij strook 3 zijn waterspanningsmetingen uitgevoerd.

De proefstroken zijn 4 m breed. Dit is voor het primaire doel van de proeven, onderzoek naar het mechanisme erosie, voldoende. Voor het infiltreren van een heel dijklichaam is het relatief smal. Het oplopen van de waterdruk in de kern van de dijk zal worden beïnvloed door zijdelings afstromen van geïnfiltreerd water, een 3D effect dat moeilijk is te kwantificeren. Het 3D effect is in de predictie niet meegenomen, waardoor de waterspanning volgens de predictie een hoge schatting is. De predictie is hiervoor gecorrigeerd.

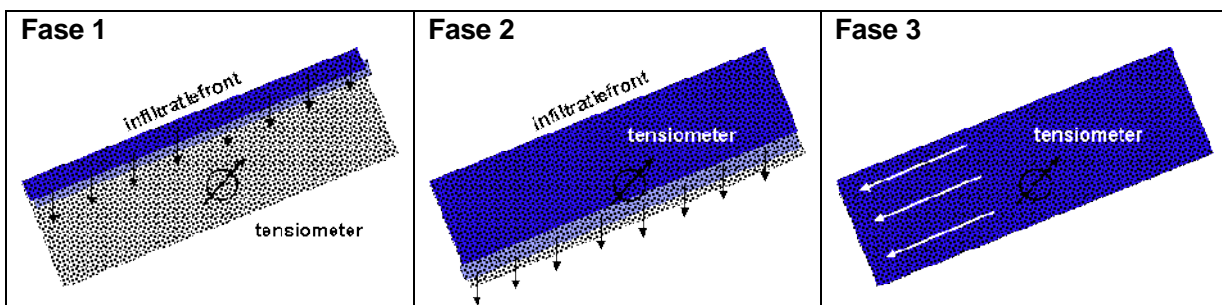
Het doel van de evaluatie is om de modellen, waarmee de waterspanningsopbouw als gevolg van golfoverslag kan worden voorspeld, te valideren. Deze modellen zullen worden opgenomen in het te verschijnen Technisch Rapport Grasbekledingen bij Dijken, waarnaar in het VTV2011 zal worden verwezen voor de gedetailleerde beoordeling van het afschuiven van de bekleding.

### 4.2 Achtergrond waterspanningsopbouw door infiltratie

Voor de stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag is de ontwikkeling van de waterdruk in en onder de bekleding belangrijk. Een drukverdeling waarbij een waterstroming parallel aan het talud ontstaat, is ongunstig voor de stabiliteit. Deze drukverdeling is een aanname bij het Edelman – Joustra stabiliteitscriterium. Een nog ongunstiger situatie kan ontstaan als de

grondwaterstroming een component buitenwaarts, het talud uit, krijgt. Voordat deze situatie wordt bereikt, zijn enkele fasen te onderscheiden (Figuur 4.2):

- 1 Er zijn zuigspanningen aanwezig
- 2 De waterdruk is ongeveer gelijk aan 0 kPa, of iets erboven, en de grond is verzadigd. De grondwaterstroming heeft een snelheidscomponent het talud in gericht, waardoor de drukspanning lager is dan die in het geval van parallelle stroming.
- 3 Het infiltratiefront bereikt een slecht doorlatend laagje, of het freatisch vlak in de kern van de dijk, waardoor de waterdruk kan oplopen.



Figuur 4.2 Schematische weergave fasering opbouw waterdruk in bekleding

De waterdrukverdeling die in Fase 3 optreedt wordt verder ***p\_parallel*** (kPa) genoemd en is gelijk aan  $p_{parallel} = d \cdot \rho_{water} \cdot g \cdot \cos\alpha$ , waarbij  $\alpha$  de taludhelling is en  $d$  de diepte vertikaal onder het taludoppervlak. Dit is de poriëndrukaanname in het stabiliteitscriterium van Edelman – Joustra uit het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.

In het navolgende hoofdstuk worden de drukmetingen ( $p_{max}$ ) uitgezet tegen de  $p_{parallel}$ . De meting ***p\_max*** (kPa) bestaat uit het maximum dat tijdens een overslagproef bij een bepaald gemiddeld golfoverslagdebiet is bereikt. Eventuele heel korte pieken, veroorzaakt door het voorbij komen van een overslagvolume, worden hierbij niet meegenomen.

Bij een druk die lager is dan  $p_{parallel}$  treedt nog steeds infiltratie op. De stabiliteit van de bekledingslaag is bij die situatie hoger dan volgt uit het Edelman Joustra criterium.  $p_{parallel}$  is geen theoretisch maximum. De druk in de bekleding kan hoger zijn. In dat geval bestaat er een gradiënt het talud uit, in welk geval de stabiliteit van de bekleding lager is dan volgt uit het Edelman Joustra criterium.

Waterdrukmetingen in de bekleding en de kern van de dijk zijn eerder uitgevoerd op 7 locaties bij 10 grootschalige proeven (Tabel 4.1). Twee van deze onderzoekslocaties zijn geen SBW proeven geweest. Onder de tabel is voor de niet SBW-proeven kort aangegeven hoe de proefopzet eruit heeft gezien.

Locatie	Soort dijk	Soort proef
Wissenkerke**	Zand met kleibekleding	Afschuifproef
IJsselmeerdijk Ketelbrug***	Zand met kleibekleding	Afschuifproef (toetsing)
Delfzijl	Kleidijk	Golfoverslagproef
Boonweg strook 0	Zand met kleibekleding	Golfoverslag
Boonweg strook 2	Zand met kleibekleding	Golfoverslag
Boonweg	Zand met kleibekleding	Afschuifproef
St. Phillipsland*	Zand met kleibekleding	Golfoverslag
Kattendijke*	Zand met kleibekleding	Golfoverslag
Afsluitdijk	Zand met klei op keileemlaag	Golfoverslag
Afsluitdijk	Zand met klei op keileemlaag	Afschuifproef
* proef geanalyseerd in kader SBW, proef uitgevoerd in opdracht van Projectbureau Zeeweringen		
** <i>Wissenkerke</i> Er zijn 4 afschuifproeven uitgevoerd, drie kijkproeven, één beïnstureerd, op een inlaagdijk van de Thoonpolder. De zanddijk met kleibekleding heeft een stijl talud van circa 1:1,5. Infiltratie werd bereikt door water uit een 15 m lange buis vanaf de kruin over het binnentalud te stromen met een debiet van 1 l/s per m tot circa 2,3 l/s per m'. Bij één van de kijkproeven is afschuiven opgetreden, bij de andere proeven ontstond een scheur ter plaatse van de kruin en een zandvoerende wel op het onderste deel van het talud (GD 1994). De evaluatie van de proef heeft zich gericht op het ontstaan van de scheur op de binnenkruin (GD 1997). Het mechanisme van interne erosie van kernmateriaal, zand, onder de kleibekleding is geanalyseerd door M. Galiana (2005) en heeft ook geleid tot een model, zoals beschreven in Fase 2A Modelontwikkeling Boonweg (Deltares 2008). De metingen van de waterspanningen en het bijhorende proefprogramma (tijd en overstromingsdebiet) zijn helaas niet meer beschikbaar.		
*** <i>IJsselmeerdijk bij de Ketelbrug</i> Geavanceerde toetsing op afschuiven van de bekleding voor overdracht van de dijk aan Waterschap Zuiderzeeland. Belasting van circa 1 l/s per m continu gedurende 12 uur over een dijksectie van circa 30 m. Alleen het bovenste deel van het talud is belast met overloop. De proef was gericht op de hoeveelheid infiltratie. De gevolgen van een hoge waterstand zijn later berekend en opgeteld bij de gevolgen van infiltratie. Er is geen afschuiven opgetreden. Deformaties waren in de orde van enkele millimeters. Infiltratie verliep snel. Binnen enkele uren bereikte het water de zandkern en liep de druk op. De druk is echter veel lager gebleven dan hydrostatisch. Er zijn zandmeevoerende wellen opgetreden op de berm, maar de hoeveelheid getransporteerd zand bleef beperkt.		

Tabel 4.1 Locaties proeven met waterspanningsmetingen

Korte samenvatting van de waarnemingen tot dusver:

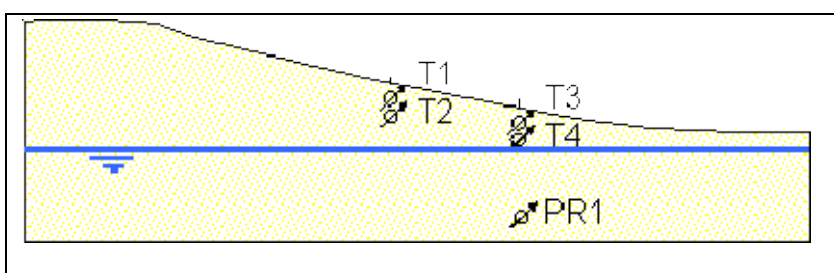
- Golfoverslag met een gemiddeld debiet van 0,1 l/s per m leidt vaak niet tot verzadiging van de bekledingslaag en *in het algemeen* niet tot het bereiken van  $p_{\text{parallel}}$ ;
- Er moet onderscheid worden gemaakt tussen een zanddijk met een kleibekleding en een kleidijk. Door een ondoorlatende kleikern stijgt de waterspanning in de bekleding vele malen sneller dan in een zanddijk met kleibekleding.;
- De (veelal versnelde) proeven met 1 l/s per m hebben voor kleibekleding op een zandkern niet geleid tot een drukverdeling die overeen komt met parallelle grondwaterstroming. Voor Delfzijl (kleidijk) wel.

#### 4.3 Meetopstelling en proefprogramma

De locaties waar de meetinstrumenten zijn geplaatst zijn gebaseerd op de resultaten van Fase 4B Predictie Vechtdijk (Deltares 2010B). Verwacht werd dat de dijk zich vanuit de teen

in de richting van de kruin zou vullen. De beschikbare tensiometers zijn daarom op een kwart en op de helft van het talud geplaatst om dit proces te kunnen volgen.

De waterspanningen in de dijk zijn gemeten met 4 tensiometers en één PR waterspanningsmeter geplaatst in een peilbuis (Figuur 4.3 en Tabel 4.2). Om te controleren of de tensiometers lucht- of waterdruk meten zijn er thetaprobes bij de tensiometers geplaatst. De instrumenten zijn periodiek afgelezen door een datalogger, waardoor het verloop van de waterspanningen met de tijd is verkregen. Om de erosieprocessen tijdens de golfoverslagproef niet te verstoren zijn de meters schuin van buiten de proefstrook onder de proefstrook geplaatst.



Figuur 4.3 Schematische weergave plaatsing tensiometers (T) en waterspanningsmeter in peilbuis (PR)

meetlocatie	sensoren	maaiveld tov NAP [m]	opnemer tov NAP [m]	Diepte opnemer tov maaiveld [m] (vertikaal)
T1	tensio s/n 2441	1,81	1,31	0,50
	theta s/n 2	1,82	1,27	0,55
T2	tensio s/n 2442	1,78	0,80	0,98
	theta s/n 3	1,79	0,77	1,02
T3	tensio s/n 2621	1,12	0,60	0,52
	theta s/n 6	1,11	0,55	0,56
T4	tensio s/n 2445	1,08	0,18	0,90
	theta s/n 1	1,08	0,13	0,95
PR1	PR s/n 554	1,08	-2,36	3,44

Tabel 4.2 Plaatsingsgegevens meetinstrumenten strook 3

De metingen zijn gestart op 11 maart 2010, ruim een week voor aanvang van de proeven op strook 3 (start 18 maart 2010). Deze strook is beproefd met het rivierregime ( $H_s = 1$  m). Dit regime geeft ten opzichte van eerdere proeven bij  $H_s=2$  m, meer en kleinere overslagvolumes. Het proefprogramma is gegeven in Tabel 4.3, overgenomen uit het factual report, Fase 4C Proefuitvoering Vechtdijk.



Debiet (l/s per m)	Sessie	Datum	Start	Eind	Opmerking	
0,1	-	18 maart	7:49	7:56	50 x versneld	
1	-	18 maart	8:12	9:24	5 x versneld	
10	1	0 - 2 uur	18 maart	10:07	12:07	
	2	3 - 4 uur	18 maart	12:46	14:46	
	3	5 - 6 uur	18 maart	15:23	17:23	
30	1	0 - 1 uur	19 maart	8:09	10:09	
	2	3 - 4 uur	19 maart	10:38	12:38	
	3	5 - 6 uur	19 maart	13:05	15:05	
50	1	0 - 2 uur	22 maart	8:24	10:56	Proef tweemaal onderbroken (storing retourpomp)
	2	3 - 4 uur	22 maart	11:46	11:53	EINDE PROEF

Tabel 4.3 Proefprogramma strook 3 uit Fase 4C Proefuitvoering Vechtdijk

De proeven met 0,1 en 1 l/s per 'm zijn versneld uitgevoerd, omdat het aantal overslagvolumes dat in een stormconditie van 6 uur zeer klein is en het voor het mechanisme erosie het geen nut heeft om tussen opvolgende golfoverslagvolumes heel lang te moeten wachten. Door het versneld uitvoeren van de golfoverslagproeven van 0,1 en 1 l/s per 'm wijkt de infiltratietijd af van waarvan is uitgegaan bij de predictie (Deltares 2010B). De infiltratietijd is de tijd gedurende een storm dat het talud nat is en er infiltratie kan optreden. Indien het talud tussen opvolgende golven langer dan 30 à 40 s droog blijft, verdwijnt het waterlaagje van het talud en stopt de infiltratie. Het water dat dan al is geïnfiltreerd, zakt onder invloed van de zwaartekracht verder de dijk in. Boven dit al geïnfiltreerde watervolume neemt het vochtgehalte in de poriën weer af door het toestromen van lucht. Voor de proeven van 0,1 en 1 l/s per 'm is de predictie gecorrigeerd voor het versneld uitvoeren van de proef. De overslagproeven van 0,1 en 1 l/s per m geven dus niet het juiste infiltratiebeeld behorend bij een werkelijk storm van 6 uur, maar dat is ook niet essentieel voor de evaluatie van de proeven.

Een tweede, zeer kleine, afwijking in infiltratietijd tussen de golfoverslagproeven en de predictie wordt veroorzaakt door de karakteristiek van de golfoverslagsimulator. Voor een groot volume moet de simulator lang worden gevuld, zodat vóór een groot volume het talud kan droogvallen. In werkelijkheid is deze eigenaardigheid in de overslagvolumeverdeling niet aanwezig. De verschillen tussen infiltratie tijdens de proef en volgens de predictie staan in Tabel 4.4. De predictie is, waar nodig geacht, aangepast, om toch een vergelijking te kunnen maken.

Gemiddeld overslagdebit (l/s per 'm)	Infiltratietijd predictie (h:mm)	Infiltratietijd golfoverslagproef (h:mm)
0,1	0:30	0:07 (50x versneld)
1	3:43	1:08 (5x versneld)
10	6:00	5:39
30	6:00	5:55
50	6:00	5:58
75	6:00	5:59

Tabel 4.4 Infiltratietijd tijdens de golfoverslagproef en volgens de predictie bij  $H_s=1$  m

## 4.4 Scheidende laag tussen zanddijk en zandondergrond

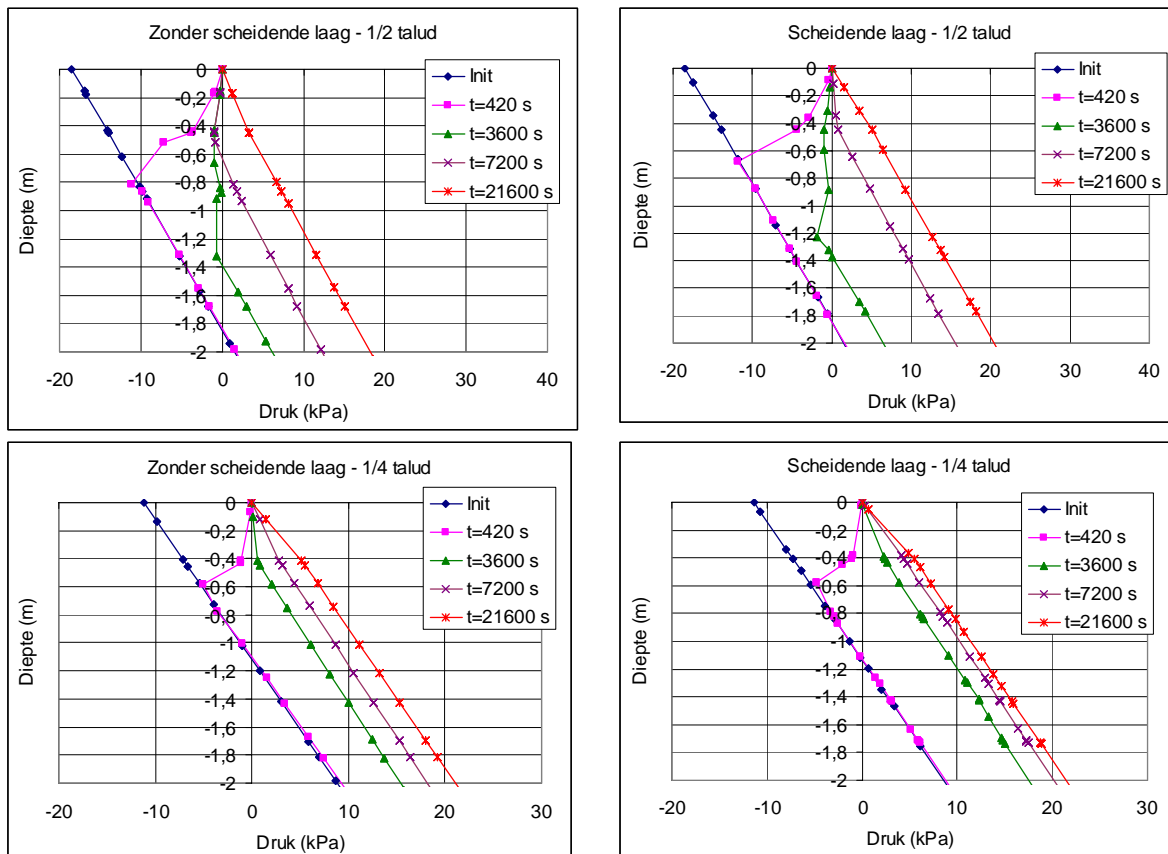
Uit de metingen in het zandpakket onder de dijk volgt dat er tussen de zanddijk en de zandondergrond een scheidende laag aanwezig is (zie hiervoor 4.6.2). Met deze scheidende laag is in de predictie (Fase 4B van het onderzoek Deltares 2010b) geen rekening gehouden.

De scheidende laag heeft een positief effect op de drukopbouw onder het dijktalud, omdat het een barrière vormt voor het wegstromen van water in de ondergrond. De druk zal sneller kunnen oplopen dan waarvan is uitgegaan bij de predictie.

Er zijn, in het kader van de evaluatie, twee aanvullende predictieberekeningen met PlaxFlow gemaakt met als doel om het effect van de aanwezigheid van de scheidende laag te kunnen schatten. Met deze schatting is bij de evaluatie rekening gehouden (zie paragraaf 4.6).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor het scenario van continu infiltratie gedurende 6 uur. De geometrie in de berekening is iets vereenvoudigd en het rekenmesh is iets grover gekozen. De berekeningen zijn daarmee niet helemaal gelijk aan de predictieberekening uit Fase 4B (Deltares 2010b), maar zijn voldoende gedetailleerd voor het doel van het schatten van de invloed van de scheidende laag.

De berekeningsresultaten zonder scheidende laag (links) en met scheidende laag (rechts) staan in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Effect scheidende laag op drukopbouw (kPa) in de dijk voor bepaalde tijdstippen gedurende 6 uur infiltratie.

De berekeningsresultaten laten zien dat er een duidelijk verschil is tussen de situatie met en zonder scheidende laag. Het verschil is het grootst halverwege het talud (bovenste twee grafieken).

De aanwezigheid van de scheidende laag zorgt ervoor dat het infiltratiefront iets eerder een barrière tegenkomt, waardoor de druk korter na aanvang van infiltratie begint op te lopen. Voordat het infiltratiefront de scheidende laag bereikt is er echter geen verschil. Op de helft van het talud (T1 en T2) is dat tussen 1 en 2 uur. Voor een kwart van het talud (T3 en T4) is dat tussen 7 min en 1 uur.

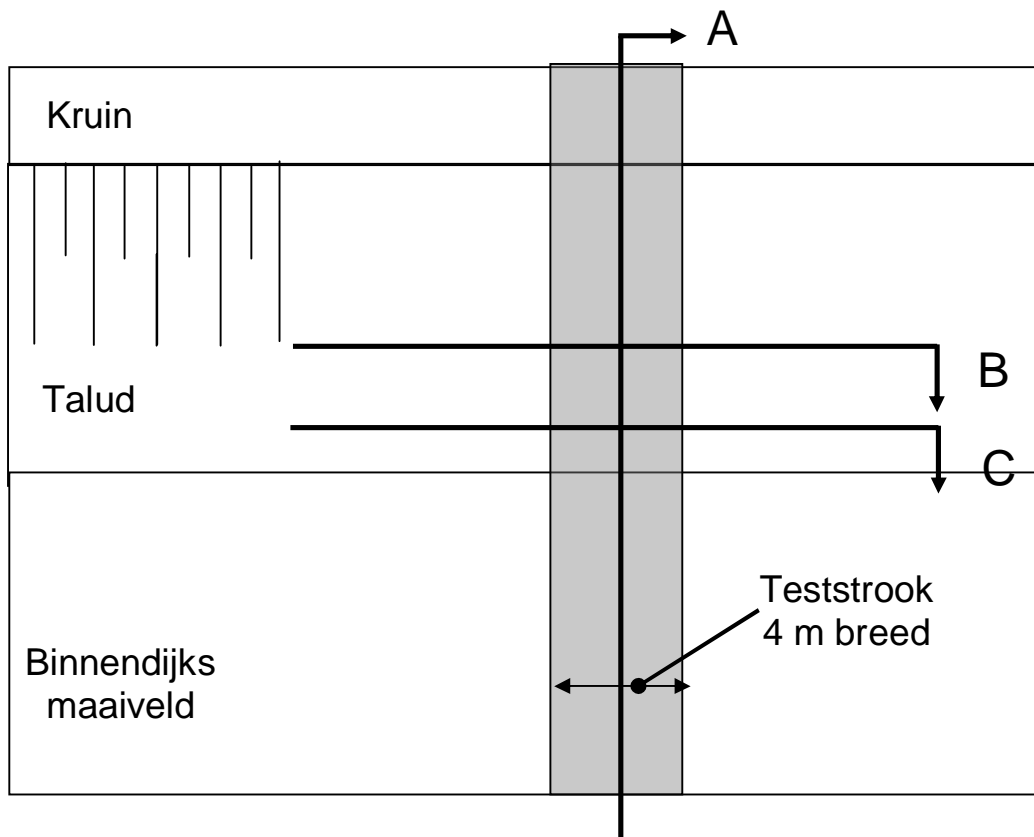
Nadat het infiltratiefront de scheidende laag heeft bereikt, treedt er een verschil op in waterspanningsopbouw. Door de scheidende laag gaat dat sneller dan in het geval zonder de scheidende laag. Na 6 uur heeft de waterspanning onderaan het talud zijn maximum bereikt. Het verschil tussen de situatie met en zonder scheidende laag is dan weer verdwenen. Halverwege het talud wordt dit maximum na 6 uur nog niet bereikt en blijft er tot het einde van de infiltratietijd een verschil aanwezig.

Bij de evaluatie van de metingen aan de hand van de predictie (Fase 4B in Deltares 2010b) dient er rekening mee te worden gehouden dat, afhankelijk van het meetpunt dat wordt beschouwd en de infiltratietijd, er een versnelling van de drukopbouw is door de aanwezigheid van de scheidende laag. De gemeten drukken liggen als het ware voor (in tijd) op de predictie.

#### **4.5 3D effect**

Omdat de proefstrook een beperkte breedte heeft van 4 m zal zijdelings afstromen van geïnfiltreerd water de opbouw van de waterdruk verminderen ten opzichte van een 2D situatie. De predictie (Deltares 2010b) die is gemaakt met een 2D programma geeft daarom een overschatting van de drukopbouw.

Het 3D effect is geschat door het uitvoeren van twee aanvullende 2D berekeningen met PlaxFlow, in de richting loodrecht op proefstrook, ter hoogte van de plekken waar de waterspanningen zijn gemeten (Figuur 4.5). Hiermee is gekeken hoeveel de zijdelingse afstroming vanuit de 4 m strook ongeveer is en wat het effect is op de drukopbouw onder de strook.



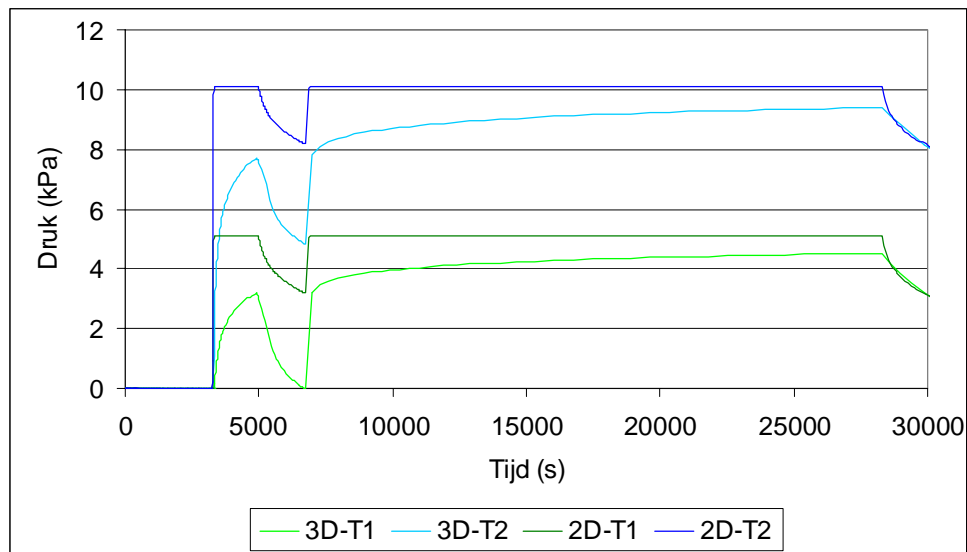
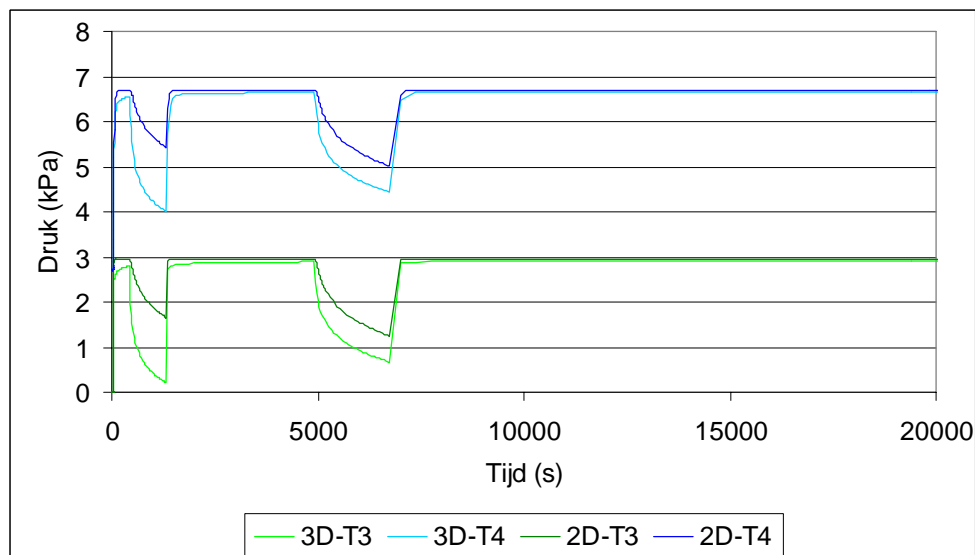
Figuur 4.5 Schematische weergave van de doorsneden (B en C) voor aanvullende berekeningen voor de schatting van het 3D effect

Doorsnede A in Figuur 4.5 geeft de 2D berekening van de predictie aan. Voor de sneden B en C op respectievelijk  $\frac{1}{2}$  en een  $\frac{1}{4}$  van het talud ter hoogte van respectievelijk T1/ T2 en T3/ T4 zijn berekeningen gemaakt voor het geval dat er over 4 m infiltratie optreedt en voor het geval er over onbeperkte breedte infiltratie optreedt. Het verschil tussen deze uitkomsten geeft de schatting voor het 3D effect.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het volgende infiltratieprogramma, dat dekkend is voor de evaluatie van de uitgevoerde golfoverslagproeven:

- 7 min (420 s) infiltratie
- 15 min (900 s) droog
- 1 uur (3600 s) infiltratie
- 30 min (1800 s) droog
- 6 uur (21600 s) infiltratie
- 6 uur (21600 s) droog

De berekeningsresultaten zijn verwerkt tot grafieken die een schatting geven van de waterspanning in de tensiometers T1 tot en met T4 (Figuur 4.6).

**Snede B****Snede C**

Figuur 4.6 Schatting 3D effect door middel van berekeningen van de waterdruk (kPa) ter plaatse van de tensiometers T1 tot en met T4 tegen de tijd (s)

De resultaten maken inzichtelijk dat het 3D effect afhankelijk is van:

- 1 De plek op het talud (Snede B en snede C). Bepalend is de verhouding tussen de strookbreedte en de (verticale) afstand tussen het maaiveld en de scheidende laag. Indien deze verhouding klein is, dan kan de horizontale afstroming moeilijk plaatsvinden, vanwege de relatief beperkte laagdikte waarover dit moet gebeuren.
- 2 De infiltratietijd. Aanvankelijk is het verhang in dijkrichting groot en verloopt de zijdelingse afstroming snel, maar na verloop van tijd wordt de zone naast de proefstrook ook verzadigd, waardoor het verhang afneemt en daarmee ook de zijdelingse afstroming afneemt.

De schatting van het 3D effect, waarbij het effect van de scheidende laag is meegenomen staat samengevat in Tabel 4.5.

Infiltratietijd	Snedes B Locatie T1	Snedes B Locatie T2	Snedes C Locatie T3	Snedes C Locatie T4
7 min	-*	-*	-2%	-2%
1 uur	-40%	-24%	0%	0%
6 uur	-11%	-7%	0%	0%

\* berekeningen geven geen bruikbare waarde, omdat het infiltratiefront binnen 7 min niet de diepte van de tensiometer bereikt.

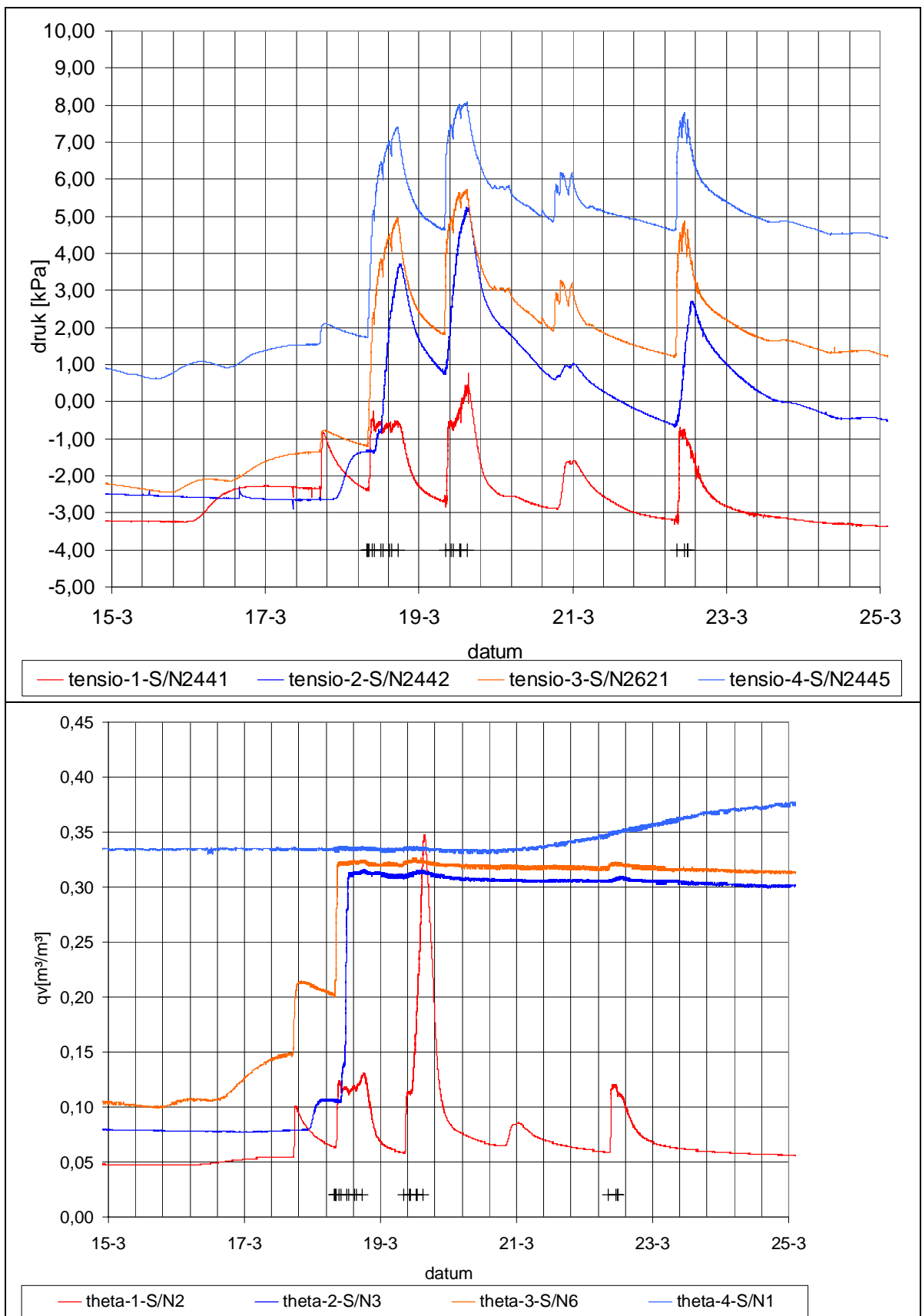
Tabel 4.5 Schatting 3D effect, afhankelijk van locatie op het talud (locaties T1, 2, 3 en 4) en duur van de infiltratie

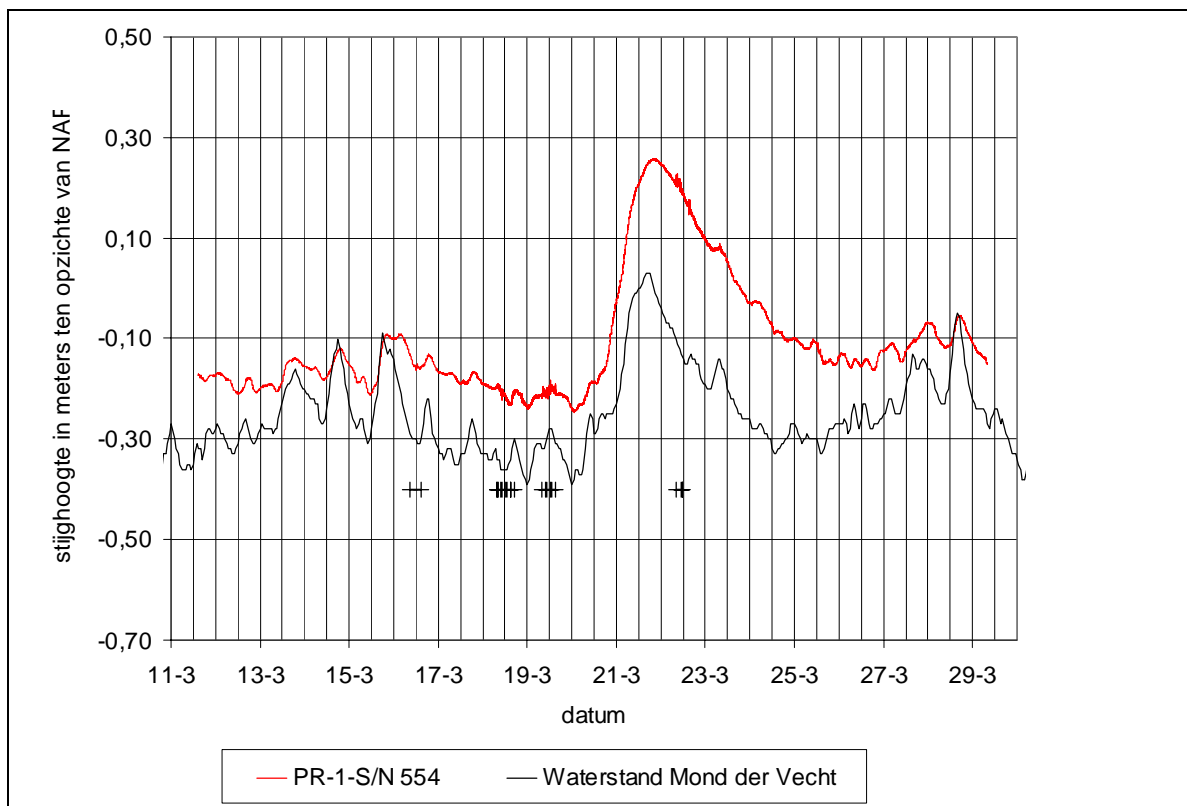
De predictie met PlaxFlow dient te worden gecorrigeerd voor het 3D effect door de in Tabel 4.5 aangegeven percentages in rekening te brengen. Omdat het 3D effect, het zijdelings afstromen van water, de waterdruk vermindert zijn de percentages negatief.

## 4.6 Drukmetingen

### 4.6.1 Volledige tijdreeksen

In de onderstaande drie grafieken in Figuur 4.7 zijn achtereenvolgens de volledige tijdreeksen van de tensiometers (T1 – T4), theta-probes 1-4 en de waterspanningsmeter in de peilbuis (PR1) gegeven. De momenten waarop de proeven plaatsvonden zijn met zwarte balkjes in de figuur aangegeven op de -4.00 kPa lijn. De analyse van de metingen volgt in de volgende paragrafen.





Figuur 4.7 Volledige tijdreeksen van de waterspanningsmetingen en vochtgehaltemetingen (Thetaprobes) op proefstrook 3

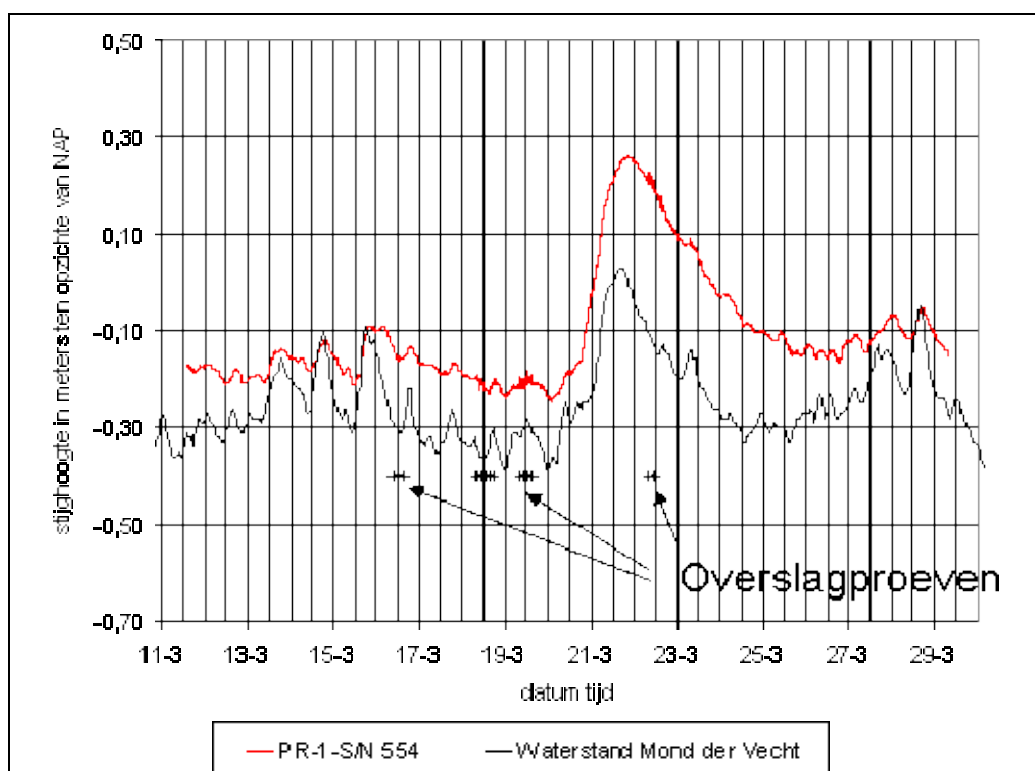
De grafieken in Figuur 4.7 betreffen de volledige meetreeksen van plaatsing tot verwijderen van de meters. De golfoverslagproeven betreffen slechts een klein deel van deze tijd, aangegeven met zwarte balkjes in de grafieken. De analyse van de metingen vindt plaats in de onderstaande subparagrafen.

#### 4.6.2 Metingen in diepe zand en initieel freatisch vlak

Met het diepe zand wordt bedoeld de zandlaag onder NAP. Op basis van het grondonderzoek (Etten 2010) was een open verbinding verwacht tussen de zanddijk en de onderliggende zandlaag (zand op zand). Ter plaatse van het voorland en de kruin was wel een dunne scheidende laag aangetroffen, maar binnendijks niet. De scheidende laag ter plaatse van de kruin was zodanig dun (ca. 20 cm) dat er werd getwijfeld of deze laag in horizontale richting uitgestrekt zou zijn.

Gezien de meting van de stijghoogte in de diepe zandlaag met peilbuis PR1, binnendijks, filter op NAP -2,36 m, moet worden geconcludeerd dat er toch een scheidende laag aanwezig is tussen de zanddijk en de onderliggende zandlaag (Figuur 4.8). De stijghoogte bleek niet te reageren op de uitgevoerde golfoverslagproeven, maar geeft een aanzienlijke respons op de buitenwaterstand.





Figuur 4.8 Meting waterdruk in diepe zandlaag (PR-1) en de waterstand bij meetstation Mond der Vecht

De weinig gedempte en vertraagde respons van de stijghoogte in het diepe zand binnendijs op de buitenwaterstand is alleen te verklaren als de zandlaag opgesloten is door een scheidende laag van slecht doorlatend materiaal, zoals klei of leem. Alleen in dat geval is slechts weinig waterstroming nodig voor een aanpassing van de stijghoogte in binnenwaartse richting en kan de respons op enkele tientallen meters (circa 40 m) van het buitenwater nog zo groot zijn. Voor de indringing van waterstandvariaties bij freatisch berging, in een open zandpakket, is relatief veel waterstroming nodig omdat de poriën moeten worden gevuld. Omdat hiervoor een relatief groot debiet nodig is, gaat dit veel langzamer.

Opvallend is dat de gemiddelde stijghoogte in het zandpakket circa 10 cm hoger is dan de rivierwaterstand. Er zijn verschillende mogelijke verklaringen voor deze afwijking, zoals de locatie van het meetstation Mond der Vecht, dat een aantal kilometer stroomafwaarts ligt van de proeflocatie. De meting duidt echter op een kleine grondwaterstroming in de richting van de Vecht, wat mogelijk is indien het omringende maaiveld wat hoger ligt dan het gemiddelde rivierpeil. Een uitgebreide studie naar de respons op de buitenwaterstand is echter geen onderdeel van deze studie.

De aanwezigheid van de scheidende laag heeft invloed op de ontwikkeling van de waterspanning als gevolg van infiltratie. Door de scheidende laag kan het vertikaal in de dijk geïnfiltrerde water minder makkelijk wegstromen, waardoor de druk sneller kan oplopen. Hiermee is bij de predictie, Fase 4B, geen rekening gehouden.

Bij de predictie is uitgegaan van een initieel freatisch vlak van NAP -0,15 m op basis van een waarneming tijdens het uitvoeren binnendijs beringen in januari 2010 (Etten 2010). Deze grondwaterstand wordt onderschreven door de meting met PR-1.

Tensiometer T4, geplaatst op NAP +0,2 m, geeft direct na plaatsing een positieve waterdruk. Ook de thetaprobe 4 geeft aan dat de poriën direct zijn verzadigd. De druk van T4 (ca. 1 kPa) komt overeen met een stijghoogte van NAP +0,3 m. Dit betreft een schijnwaterstand nabij deze opnemer, waarschijnlijk water dat op de scheidende laag blijft staan.

#### 4.6.3 Meting waterspanning in de dijk vs predictie PlaxFlow

Alleen als de waterdruk in of onder de dijkbekleding oploopt kunnen stabiliteitsproblemen ontstaan. Volgens de predictie zou de dijk vanuit de teen in de richting van het talud volstromen. Dit zou zich vertalen in een waterdruk die eerst ter plaatse van de teen en later halverwege het talud zou oplopen tot nabij hydrostatisch en ter plaatse van de teen zelfs iets hoger. Het verhang kan hier namelijk een component in de richting het talud uit krijgen, waarbij de stijghoogte net onder het taludoppervlak dus hoger is dan het taludoppervlak zelf.

De waterdrukmetingen worden vergeleken met  $p_{\text{parallel}}$ . Dit is de druk die hoort bij een parallelle grondwaterstroming (Tabel 4.6). De stijghoogte onder het taludoppervlak is dan precies gelijk aan het taludoppervlak, gezien in de richting loodrecht op het talud. Deze druk zit als aanname in het Edelman Joustra stabiliteitscriterium. Een gemeten druk die lager is dan  $p_{\text{parallel}}$  duidt op een stroming die het talud in is gericht, wat gunstig is voor de stabiliteit van de bekleding. Een druk die hoger is op een stroming die het talud uit is gericht, wat ongunstig is voor de stabiliteit.

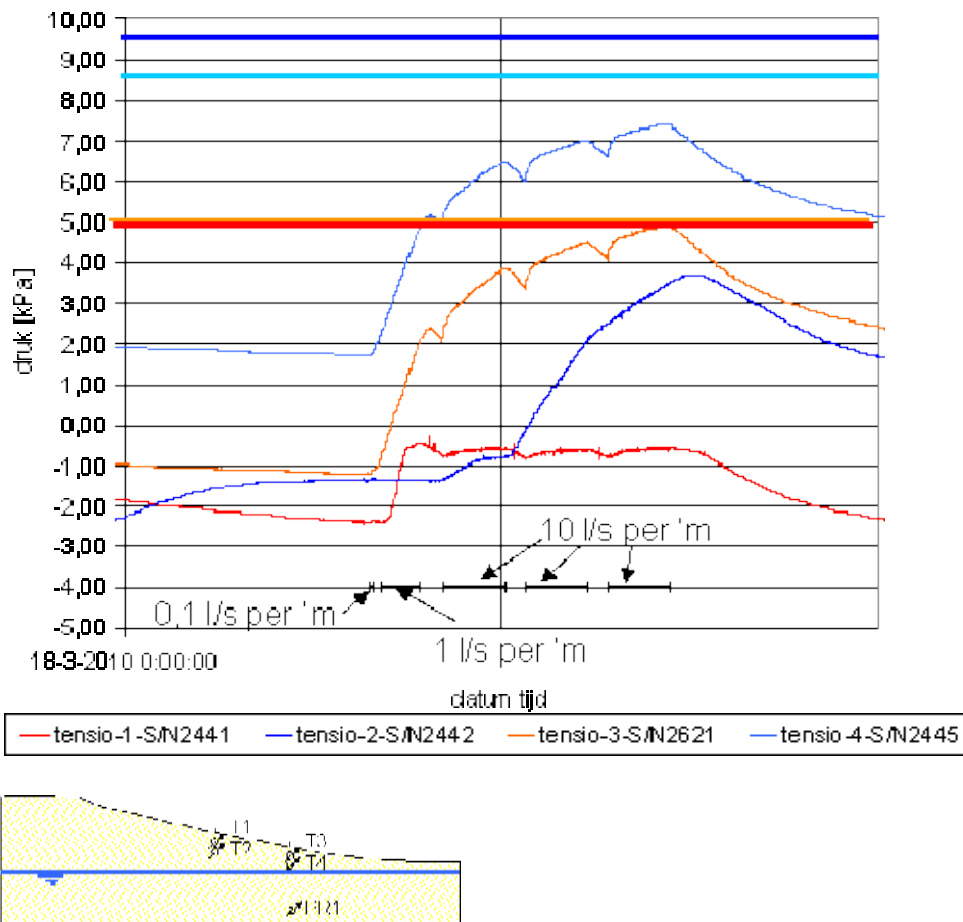
Meetlocatie	sensoren	diepte opnemer tov maaiveld [m] (vertikaal)	$P_{\text{parallel}}$ (kPa)
T1	tensio s/n 2441	0,50	4,9
T2	tensio s/n 2442	0,98	9,5
T3	tensio s/n 2621	0,52	5,0
T4	tensio s/n 2445	0,90	8,7

Tabel 4.6 Waterdruk overeenkomend met een parallelle grondwaterstroming

De drukmetingen tegen de tijd staan in Figuur 4.9 (0,1 – 1 – 10 l/s per 'm), Figuur 4.13 (30 l/s per 'm) en Figuur 4.15 (50 l/s per 'm). In de figuren is de druk overeenkomende met parallelle stroming aangegeven met een horizontale streep. De aangegeven drukken  $p_{\text{parallel}}$  voor T1 en T3 liggen zo dicht bij elkaar dat deze gedeeltelijk over elkaar vallen (4,9 kPa aangegeven in rood en 5,0 kPa in oranje).

Zoals aangegeven in 4.4 moet de predictie uit Deltares 2010b worden gecorrigeerd voor de aanwezigheid van een scheidende laag. Door deze laag zal de drukopbouw sneller gaan dan volgens de predictie. Waar nodig is dit aangegeven in de tekst.

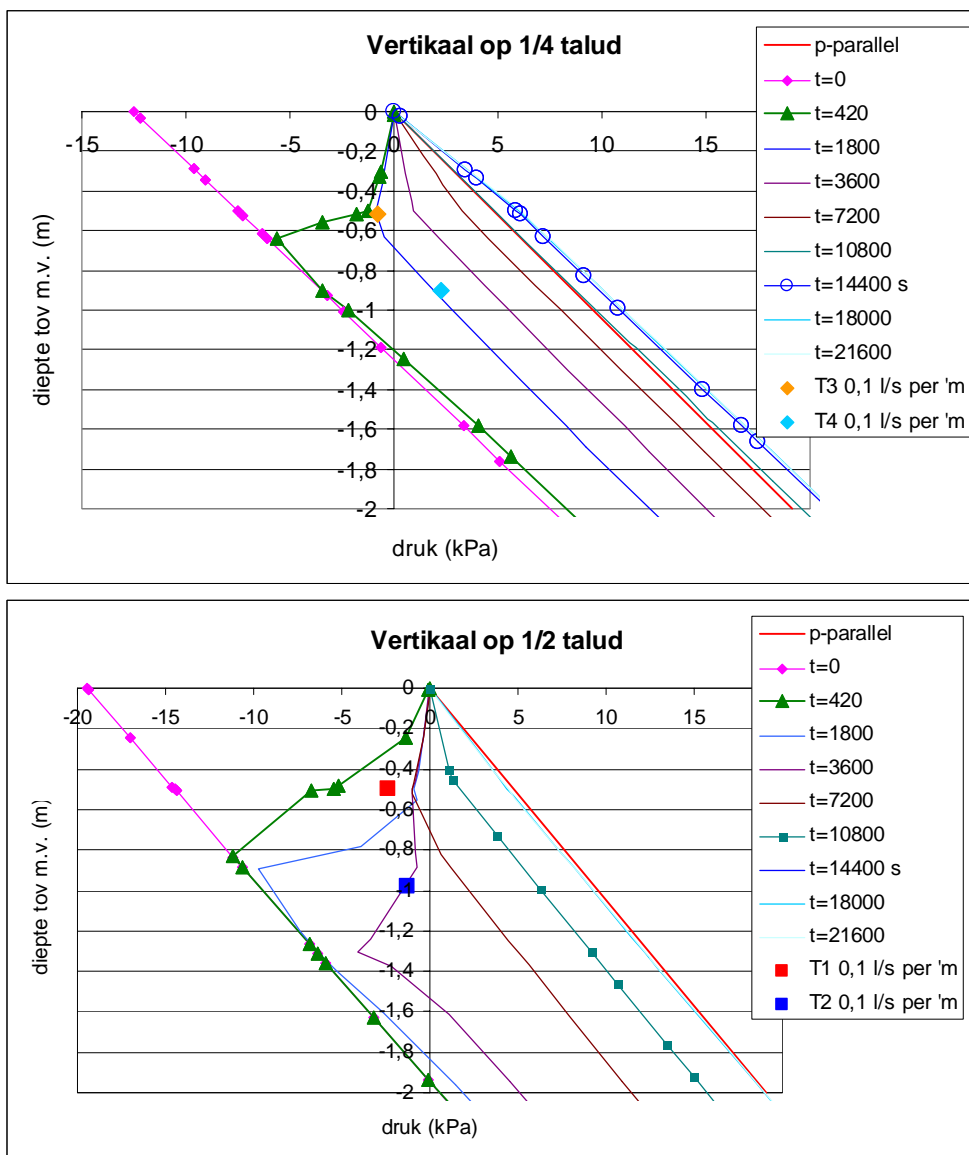
Zoals aangegeven in 4.5 moet de predictie uit Deltares 2010b worden gecorrigeerd voor het 3D effect dat optreedt als gevolg van de beperkte strookbreedte. De correctie wordt indien nodig in de tekst aangegeven.



Figuur 4.9 Poriëndruk proefstrook 3 tijdens 0,1; 1 en 10 l/s per m proef

De eerste proef was de **0,1 l/s per 'm** proef, die 50x versneld is uitgevoerd. De proef bevatte 33 golven die in 7 minuten (=420 seconden) over het talud spoelde. Er is slechts een zeer geringe reactie gemeten op deze proef, wat ook werd verwacht volgens de predictie, Fase 4B (Deltares 2010B). Na 6 tot 9 minuten na aanvang van de proef reageerde de tensiometers. De verwachte stijging van de druk volgens de predictie, na correctie voor het versnellen van de proef, en de bereikte maximale druk tijdens de proef staan in Figuur 4.10.

Door de beperkte duur van de versnelde proef is geen correctie van de predictie nodig voor de aanwezigheid van de scheidende laag (4.4) en het 3D effect (4.5). Het infiltratiefront heeft de scheidende laag nog niet bereikt en ook het 3D effect is daardoor nog nauwelijks aanwezig.



Figuur 4.10 Predictie drukverloop (kPa) tegen diepte onder maaiveld (m) en de metingen met tensiometers (kPa) bij de 0,1 l/s per 'm proef (7 min = 420 s infiltratietijd)

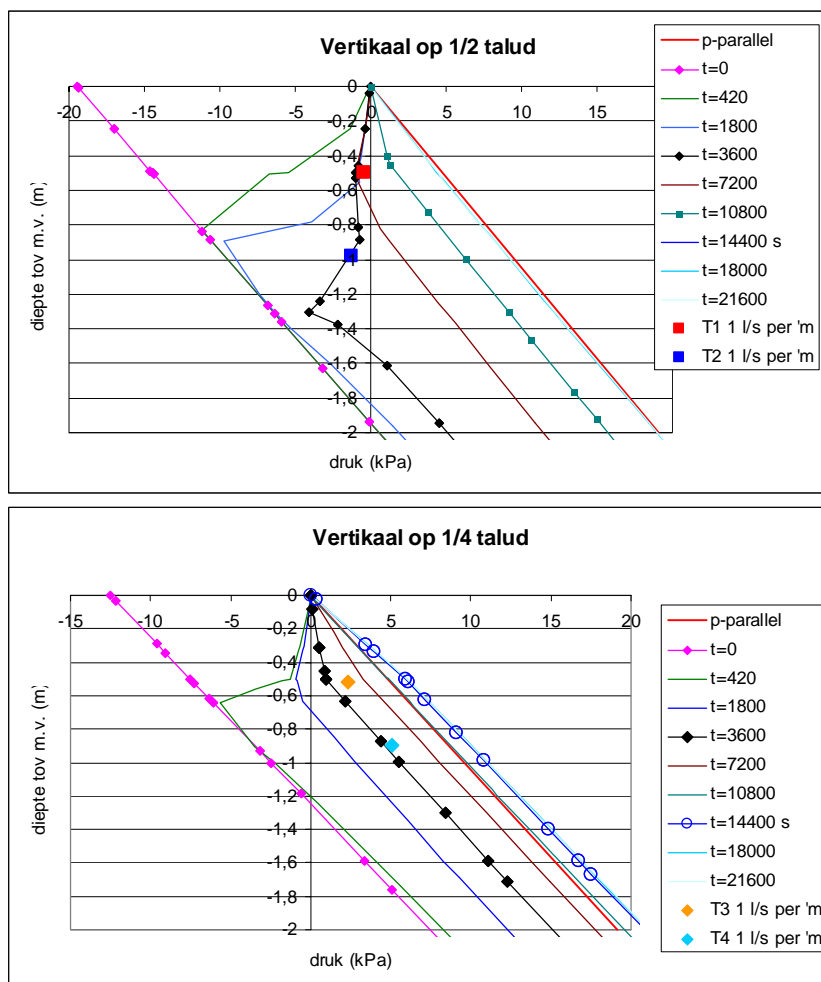
Onderaan, op ¼ van het talud, werden na 7 min (420 s) zuigspanningen verwacht boven het initiële freatisch vlak. Tensiometer T4 geeft echter al een drukspanning. De oorzaak is eerder gegeven in paragraaf 4.6.2. Er bevindt zich een schijnwaterstand op een afsluitende laag, die ervoor zorgt dat zelfs voor aanvang van de proef al een drukspanning aanwezig is. Op de helft van het talud wordt een kleine zuigspanning gemeten, wat conform de verwachting was.

De kleinste overslagvolumes gedurende 0,1 l/s per 'm zorgen voor minder dan het verwachte infiltratiepotentieel, omdat al het water al is geïnfiltreerd voordat het water de teen bereikt. Het infiltratiepotentieel is gelijk aan de verblijftijd van een waterlaagje op het talud, keer de taludlengte keer de infiltratiecapaciteit. Het potentiële infiltratievolume van het 16 meter lange talud gedurende de verblijftijd van 40 s is gelijk aan  $16 \times 40$  keer de infiltratiecapaciteit, die in het kader van de predictie was bepaald op  $0,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ , ofwel  $0,04 \text{ l/s}/\text{m}^2$ . Dit levert een potentieel infiltratievolume van  $16 \times 40 \times 0,04 = 25,6 \text{ l/m}$ . Omdat de kleinste volumes kleiner zijn dan 25 liter per 'm (9 van de 33 volumes), zal de infiltratie hierdoor iets minder zijn dan

verwacht. Tijdens de proeven is ook waargenomen dat de kleinste volumes de teen niet bereiken. Voor rivierdijken, waarbij veel kleine volumes voorkomen, kan deze limiet op de infiltratiehoeveelheid in rekening worden gebracht.

De **1 l/s per 'm** proef is 5x versneld uitgevoerd, 298 volumes in 1:12 uur. Uitgaande van een verblijftijd van 40 s per volume geeft dit een infiltratietijd van 1:08 uur. Door het versneld uitvoeren van de proef volgden de volumes elkaar veel sneller op dan in werkelijkheid, waardoor de infiltratietijd veel korter is dan de 3:43 uur uit de predictie. Als gevolg van de proef lopen de waterspanningen in de dijk op (Figuur 4.9).

De verwachte drukopbouw na (circa) 1 uur (=3600 seconden), volgens de voor tijd gecorrigeerde predictie, en de gemeten maximale drukopbouw gedurende de proef staan in Figuur 4.11.



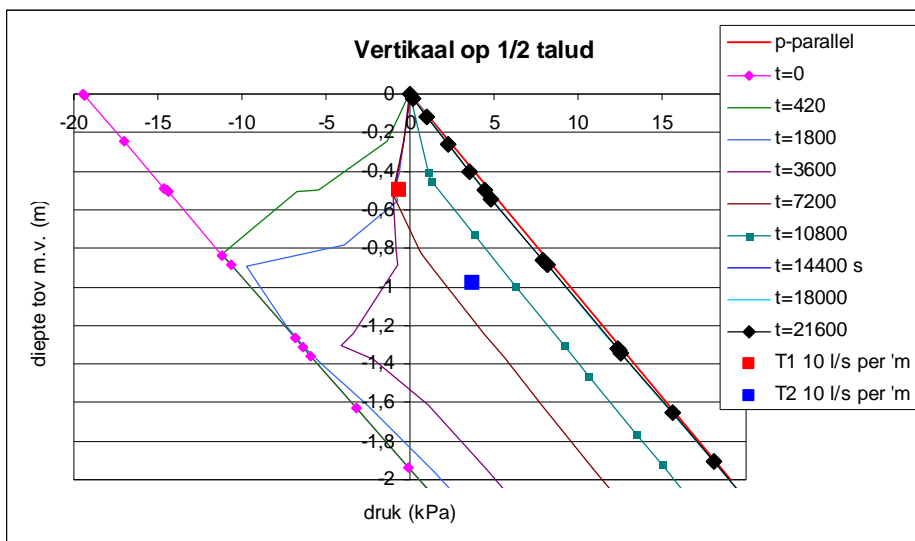
Figuur 4.11 Predictie drukverloop (kPa) tegen diepte onder maaiveld (m) en de metingen met tensiometers (kPa) bij de 1 l/s per 'm proef (circa 3600 s infiltratietijd)

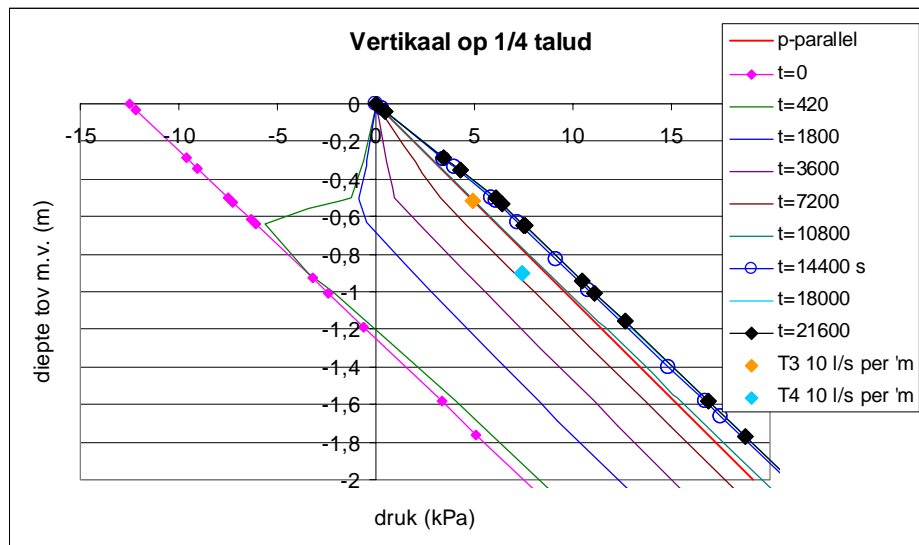
De correctie voor het 3D effect, -40% voor T1 en -24% voor T2, levert geen wijziging van de predictie op, omdat de waterdruk nog nauwelijks is opgelopen. Voor de verticaal onderaan het talud hoeft geen 3D effect in rekening te worden gebracht.

Voor de verticaal halverwege het talud geldt na 1 uur nog geen correctie als gevolg van de aanwezigheid van de scheidende laag. Voor de verticaal onderaan het talud zou moeten worden uitgegaan van de predictie voor  $t=7200$  s in plaats van  $3600$  s.

Voor de verticaal halverwege het talud komen de metingen overeen met de gecorrigeerde predictie. In de tensiometers halverwege het talud wordt nog een kleine zuigspanning gemeten, wat ook werd verwacht. Onderaan, op circa  $\frac{1}{4}$  van het talud, zijn de spanningen opgelopen tot een drukspanning die ongeveer 50% is van  $p_{\text{parallel}}$ . In vergelijking met de predictie voor  $7200$  s (inclusief correctie voor de aanwezigheid van de scheidende laag en 3D effect) zijn de waterspanningen iets lager dan voorspeld.

De **10 l/s per 'm** proef is in drie sessies van 2 uur uitgevoerd, totaal 1568 volumes in 6 uur. Uitgaande van een verblijftijd van 40 s per volume geeft dit een infiltratietijd van 5:39 uur, terwijl voor de predictie is uitgegaan van 6 uur. De sessie van 10 l/s per 'm is kort na de sessie van 1 l/s per 'm uitgevoerd (Figuur 4.9), waardoor moet worden gekeken naar de gesommeerde infiltratietijd van 6:39 uur. De metingen kunnen daarom het beste worden vergeleken met de predictie voor 6 uur, ofwel 21600 seconden (Figuur 4.12). De toename van de waterspanningen na 6 uur is overigens volgens de predictie zeer gering.





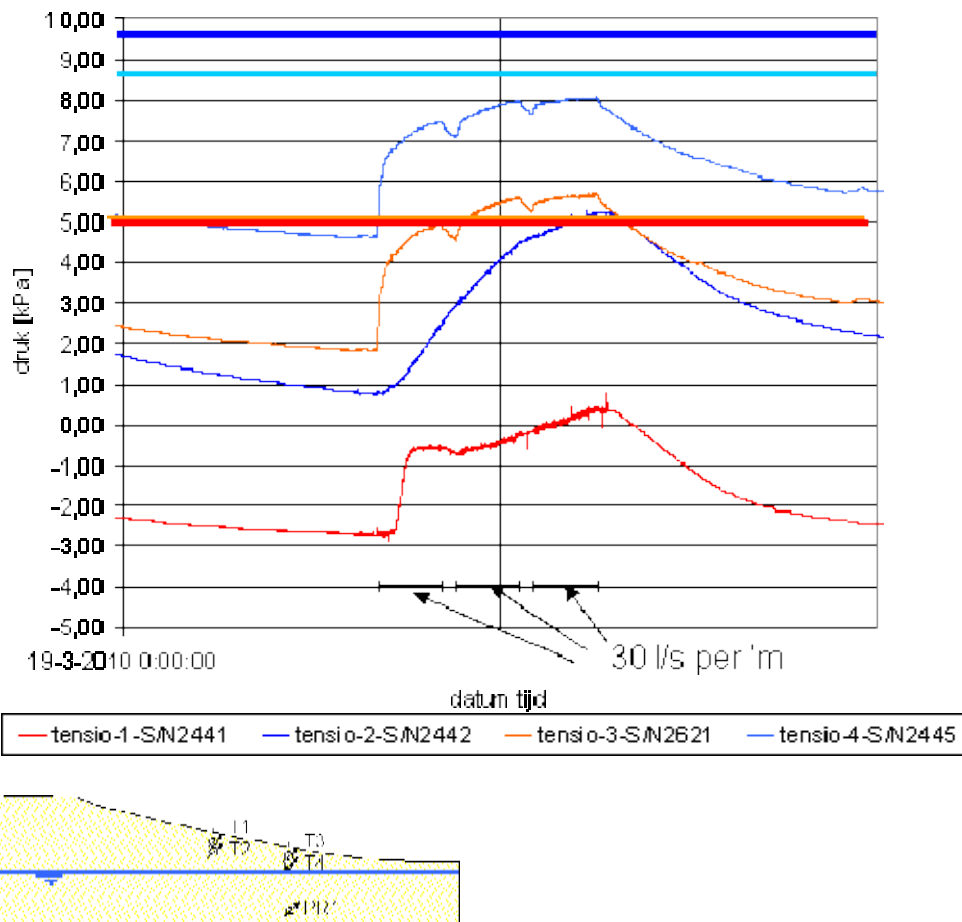
Figuur 4.12 Predictie drukverloop (kPa) tegen diepte onder maaiveld (m) en de metingen met tensiometers (kPa) bij de 10 l/s per 'm proef (circa 21600 s infiltratietijd)

De druk halverwege het talud blijft achter ten opzichte van de voorspelling. De drukken komen meer overeen met het beeld dat werd verwacht na 2 uur (7200 seconden). Gedeeltelijk kan dit worden verklaard door de beperkte breedte van de proefstrook, waardoor 3D effecten een significante rol speelt, ondanks de beperkte hoogte van de dijk. Volgens de schatting in paragraaf 4.5 zou de predictie met circa 10% moeten worden gereduceerd als gevolg van het 3D effect. Anderzijds zou als gevolg van de aanwezigheid van de scheidende laag (paragraaf 4.4) de predictie juist circa 10% moeten worden verhoogd, waardoor deze niet meegenomen effecten elkaar voor de vertikaal halverwege het talud juist opheffen.

De druk onderaan het talud benadert de druk bij parallelle stroming, wat ook iets lager is dan de verwachting. De correcties van de predictie voor het 3D effect en de aanwezigheid van de scheidende laag zijn in dit geval beiden 0%.

Het terugvallen van de druk tussen de sessies van 2 uur, op de momenten dat de erosieschade aan het talud wordt vastgelegd, heeft nauwelijks invloed op de uiteindelijk bereikte druk aan het einde van de proef (Figuur 4.9). De drukopbouw na aanvang van een sessie gaat heel snel. Binnen enkele minuten is de druk terug op het niveau van het einde van de vorige sessie. Daarna wordt de stijging van de druk voortgezet met dezelfde snelheid als waarmee de vorige sessie eindigde.

De drukmeting tijdens de **30 l/s per 'm** proef zijn uitgevoerd op 19 maart 2010 (Figuur 4.13). Er zijn in 6 uur tijd, in drie sessies van 2 uur 2207 golfvolumes over het talud gestroomd. De effectieve infiltratietijd was 99%, 5 uur en 56 minuten.

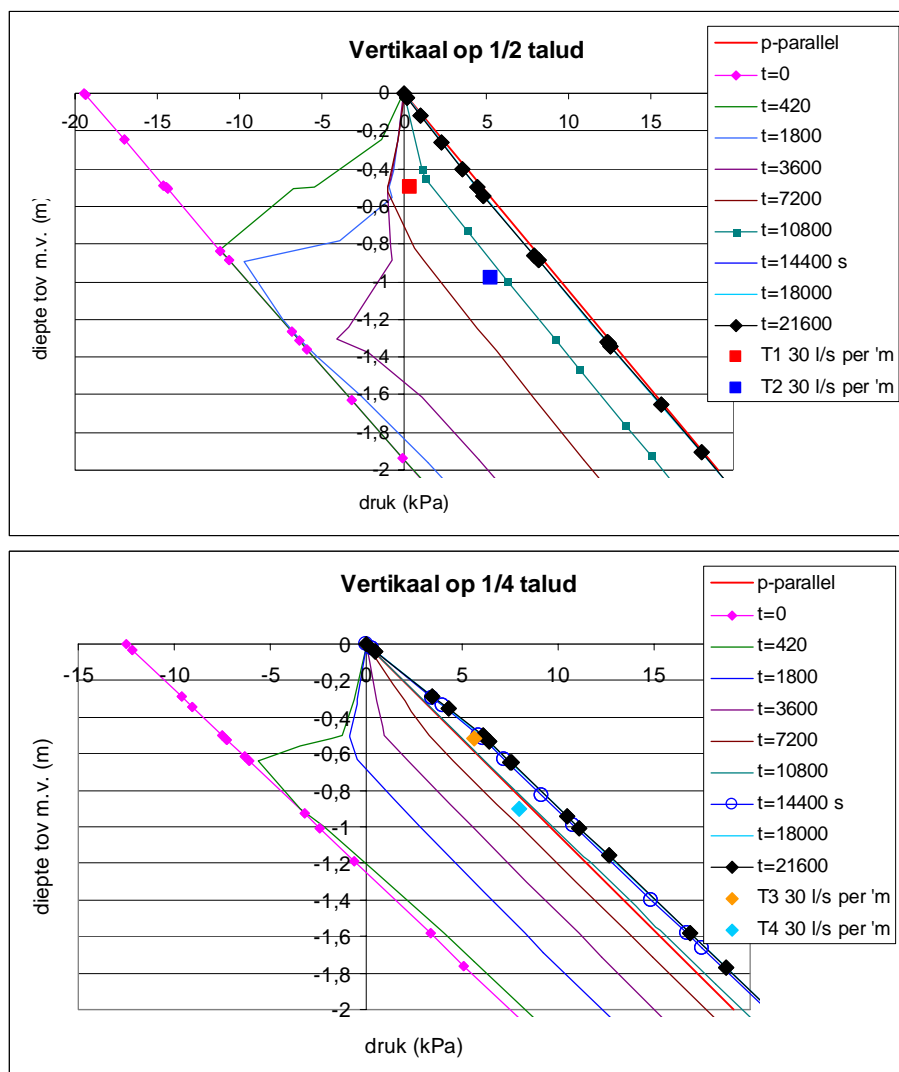


Figuur 4.13 Poriëndruk proefstrook 3 tijdens 30 l/s per m proef

Bij gelijke situaties bij aanvang van de proef zou de ontwikkeling van de waterdruk bij 10 en bij 30 l/s per 'm niet veel van elkaar moeten verschillen, omdat de infiltratietijd niet veel verschilt. De drukken zijn voor aanvang van de 30 l/s per 'm proef echter nog relatief hoog als gevolg van de proeven van de vorige dag. Aan het begin van de proeven op 18 maart 2010 gaf alleen T4 een drukspanning, voor de 30 l/s per 'm proef op 19 maart geven ook T2 en T3 nog een drukspanning, duidend op volledig verzadigd materiaal tot een niveau boven dat van opnemers T2 en T3. De hoge initiële drukken hebben een duidelijke positieve invloed op de snelheid waarmee de drukken aanvankelijk stijgen. De uiteindelijk bereikte hoogste druk is ook iets hoger dan bij de 10 l/s per 'm proef, wat eveneens kan worden verklaard door de reeds gedeeltelijke verzadiging van de dijk voor aanvang van de proef.

De maximale drukmetingen zijn uitgezet tegen de verwachting in Figuur 4.14.





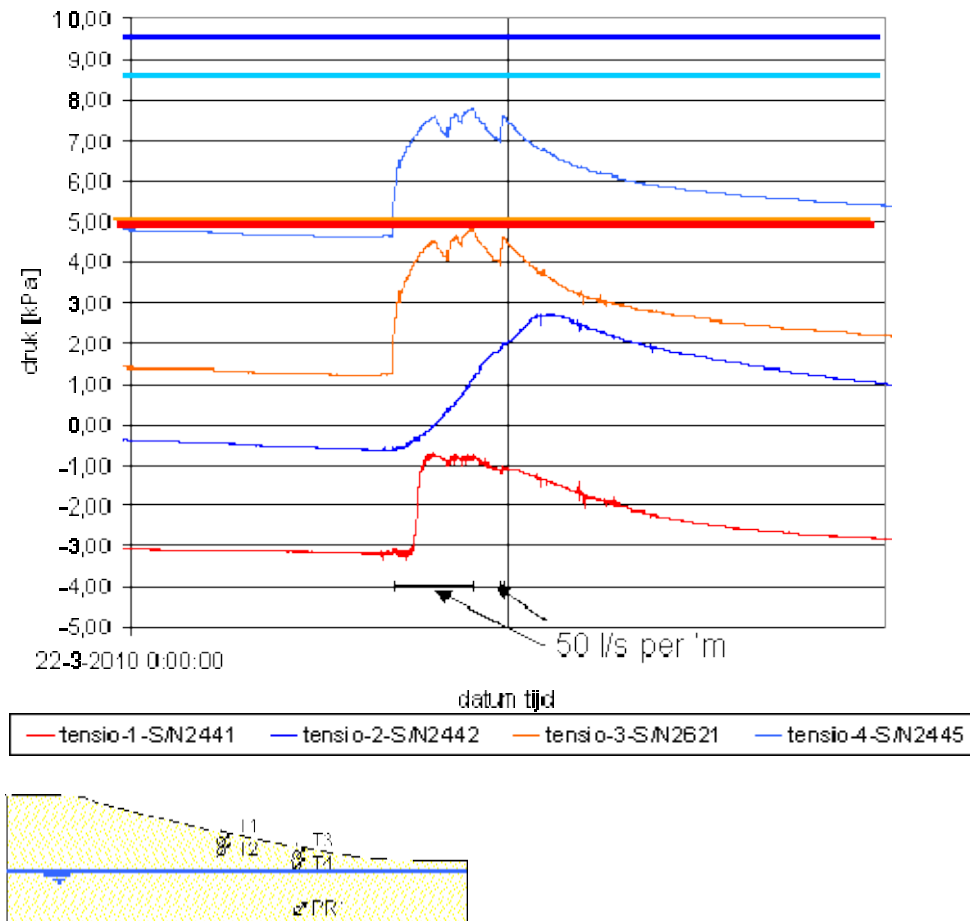
Figuur 4.14 Predictie drukverloop (kPa) tegen diepte onder maaiveld (m) en de metingen met tensiometers (kPa) bij de 30 l/s per 'm proef (circa 21600 s infiltratietijd)

De druk halverwege het talud blijft, net als bij de 10 l/s per 'm proef achter bij de verwachting. Net als voor de 10 l/s per 'm proef geldt dat de predictie circa 10% zou moeten worden verlaagd als gevolg van het 3D effect, maar circa 10% zou moeten worden verhoogd als gevolg van de aanwezigheid van de scheidende laag. De predictiemethode heeft dus geleid tot een conservatieve schatting van de drukopbouw.

De druk op ¼ van het talud neemt iets toe ten opzichte van de vorige dag met de 0,1; 1 en 10 l/s per 'm proeven, ondanks de langere infiltratietijd de van vorige dag. De oorzaak ligt in de drukken bij aanvang van de proef. De grond was bij aanvang van de proef nog grotendeels, of zelfs volledig, verzadigd, waardoor de stijging van de waterspanningen na aanvang van de proef heel snel kon verlopen. De correcties van de predictie voor het 3D effect en de aanwezigheid van de scheidende laag zijn in dit geval beiden 0%.

De laatste proef was met **50 l/s per 'm**, uitgevoerd op 22 maart. Deze proef is 2x onderbroken vanwege storingen aan de retourpomp en is ten slotte aan het begin van de

tweede sessie van 2 uur gestaakt vanwege schade aan het talud. De tijdreeks staat in Figuur 4.15.

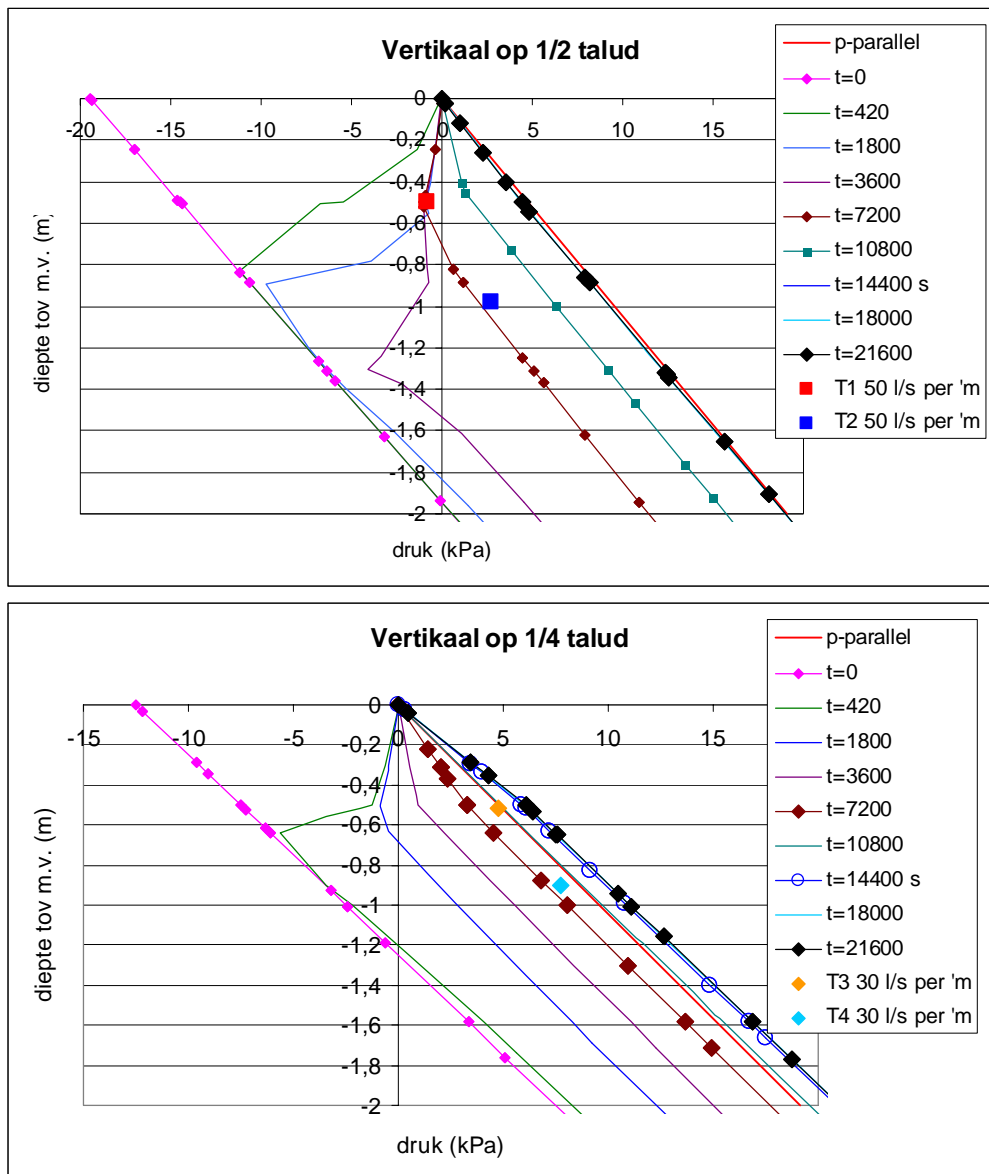


Figuur 4.15 Poriëndruk proefstrook 3 tijdens 50 l/s per m proef (één sessie met enkele onderbrekingen en start tweede sessie, waarna de proef is gestaakt)

De waterspanningen voor aanvang van de proef waren minder dan bij de 30 l/s per 'm proef, maar nog aanzienlijk hoger dan voor de aanvang van de golfoverslagproeven op 18 maart. Omdat de 50 l/s per 'm proef na het weekend is begonnen heeft het water meer tijd gehad om weg te stromen. Halverwege het talud (T1 en T2) wordt een zuigspanning gemeten. Het freatisch vlak bevindt zich dus onder het niveau van T2 (NAP +0,8 m). Op ¼ van het talud worden drukspanningen gemeten, die overeen komen met een stijghoogte van NAP +0,7 m. Bij aanvang van de proeven op 18 maart lag het freatisch vlak, boven de scheidende laag, op circa NAP +0,3 m, in de orde van enkele decimeters lager dan bij aanvang van de 50 l/s per 'm proef.

Op ¼ van het talud loopt de druk tijdens de 50 l/s per 'm proef op tot bijna  $p_{\text{parallel}}$ , wat volgens verwachting is indien wordt gecorrigeerd voor de beperkte proefduur van 2 uur (Figuur 4.16). De correctie voor het 3D effect is voor dit geval 0%. Door aanwezigheid van de scheidende laag zou bij een infiltratieduur van 7200 s moeten worden gekeken naar die van 1 uur langer (10800 s). In dat geval komen de gemeten drukken van T3 en T4 exact overeen met de gecorrigeerde predictie.

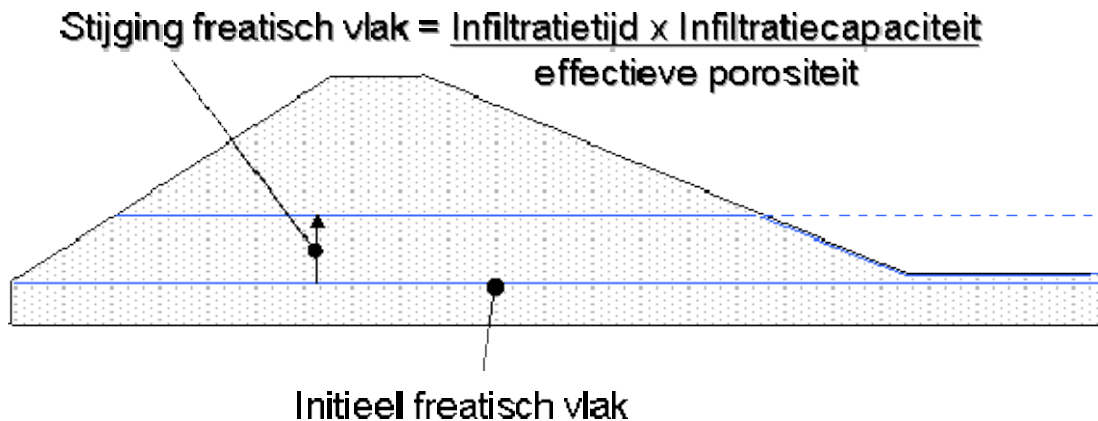
Halverwege het talud komende de metingen exact overeen met de verwachting na 2 uur infiltratie. De correctie van de predictie voor 3D effecten is circa -30% voor T1 en circa -15% voor T2. De aanwezigheid van de scheidende laag resulteert echter in een correctie met het tegenovergestelde effect. Het 3D effect en het effect van de scheidende laag vallen voor dit geval tegen elkaar weg.



Figuur 4.16 Predictie drukverloop (kPa) tegen diepte onder maaiveld (m) en de metingen met tensiometers (kPa) bij de 50 l/s per 'm proef (circa 7200 s infiltratietijd)

#### 4.6.4 Meting waterspanning in de dijk vs predictie eenvoudige 3 stappenmethode

In paragraaf 4.6.3 zijn de metingen vergeleken met de predictie op basis van PlaxFlow. In het predictierapport (Deltares 2010B) is tevens met een eenvoudige, 3 stappen, methode de potentiële drukopbouw in de dijk gegeven. De eenvoudige methode wordt geïllustreerd in Figuur 4.17.



*Figuur 4.17 Schematische weergave van de eenvoudige methode voor de bepaling van de potentiële stijging van het freatisch vlak in de dijk ten opzichte van een initiële ligging van het freatisch vlak*

Zoals aangegeven in Figuur 4.17 wordt uitgegaan van een freatisch vlak op het maaiveld op plekken waar uit de berekening volgt dat deze boven het maaiveld uit zou stijgen.

De resultaten van de eenvoudige methode, gecorrigeerd voor de eerder aangegeven afwijkingen tussen het proefprogramma waarvan is uitgegaan bij de predictie en het uiteindelijk toegepaste proefprogramma, staan in de onderstaande tabel.

Proef	Infiltratie tijd (uu:mm)	Infiltratiecapaciteit (m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> )	Infiltratievolume (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Stijging Freatisch vlak (m)	Initieel freatisch vlak (m tov NAP)	Stijghoogte (m tov NAP)
0,1 l/s per 'm	420 s (0:07)	0,4x10 <sup>-4</sup>	0,017	0,06	0,36	0,42
1 l/s per 'm (aansluitend op 0,1 l/s per 'm)	4.500 s (1:15)	0,4x10 <sup>-4</sup>	0,18	0,6	0,36	0,96
10 l/s per 'm (aansluitend op 1 l/s per 'm)	24.840 s (6:54)	0,4x10 <sup>-4</sup>	0,99	3,3	0,36	3,66
30 l/s per 'm	21.240 s (5:54)	0,4x10 <sup>-4</sup>	0,85	2,8	0,78	3,58
50 l/s per 'm (voortijdig afgebroken)	7.200 s (2:00)	0,4x10 <sup>-4</sup>	0,30	1,0	0,69	1,69

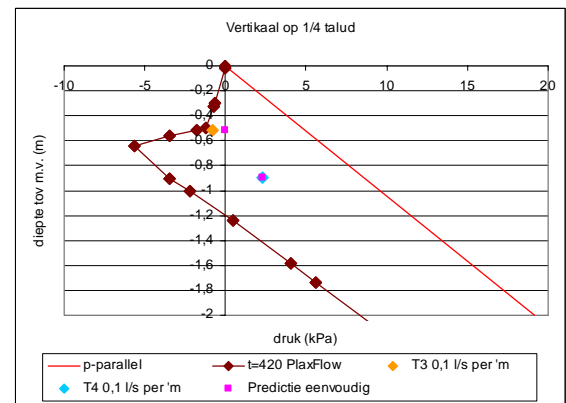
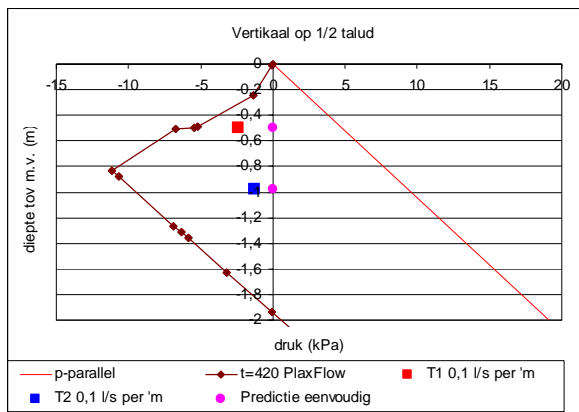
*Tabel 4.7 Predictie potentiële stijghoogte (m tov NAP) in de dijk op basis van eenvoudige 3 stappen methode*

Bij de berekening van de stijging van het freatisch vlak (kolom 5) is in Fase 4B Predictie Vechtdijk uitgegaan van een effectieve porositeit van 0,3 (-). De porositeit van het zand n (-) is gelijk aan 0,4; maar een gedeelte van de poriën is onder dagelijkse omstandigheden al gevuld met water.

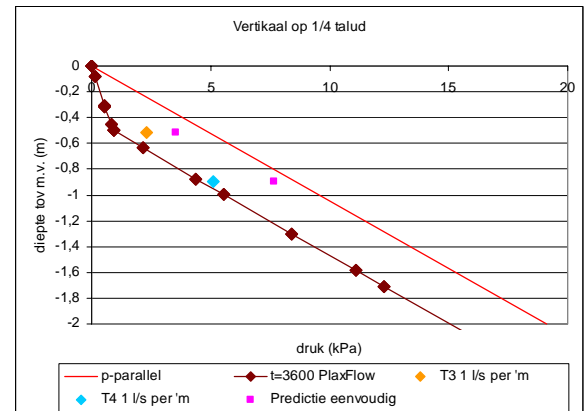
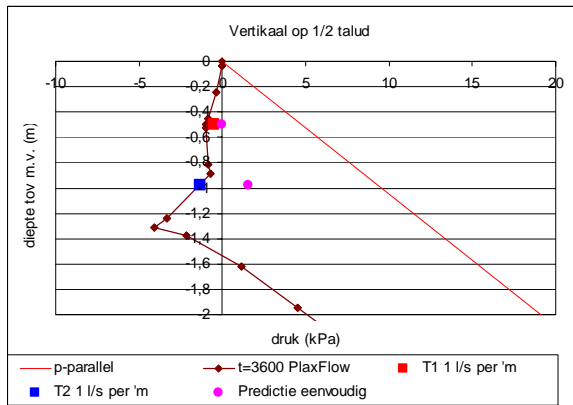
De ligging van het initiële freatische vlak (kolom 6) is gecorrigeerd voor het achtergebleven water van voorgaande proeven. Bij de toetsing van een dijk zal moeten worden uitgegaan

van een voorzichtige schatting van de initiële ligging van het freatisch vlak, conform de vigerende technische rapporten, waarbij rekening wordt gehouden met variaties van het binnendijkse waterpeil en eventuele opbolling als gevolg van neerslag.

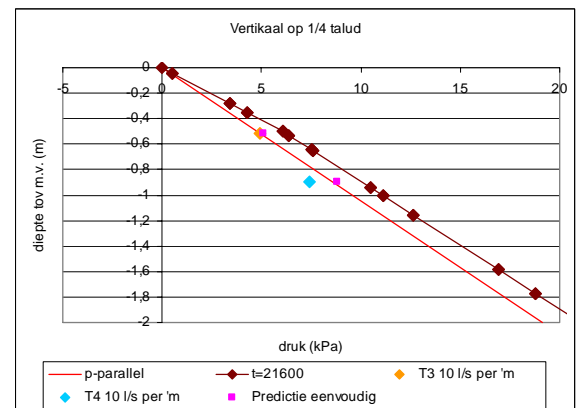
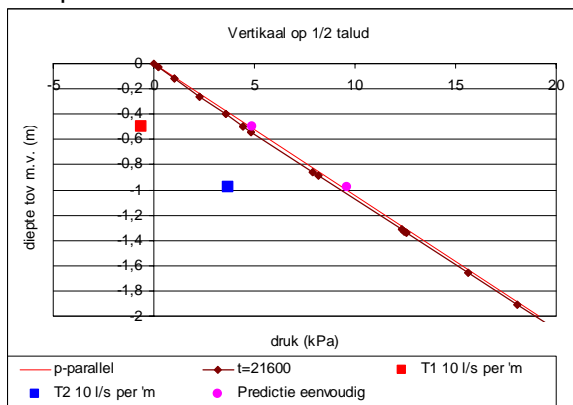
De gecorrigeerde predictie volgens de eenvoudige methode is uitgezet tegen de metingen en de predictie volgens PlaxFlow (Figuur 4.18). De grafieken starten bij de proef met 0,1 l/s per 'm, dan 1 – 10- 30 en ten slotte 50 l/s per 'm.



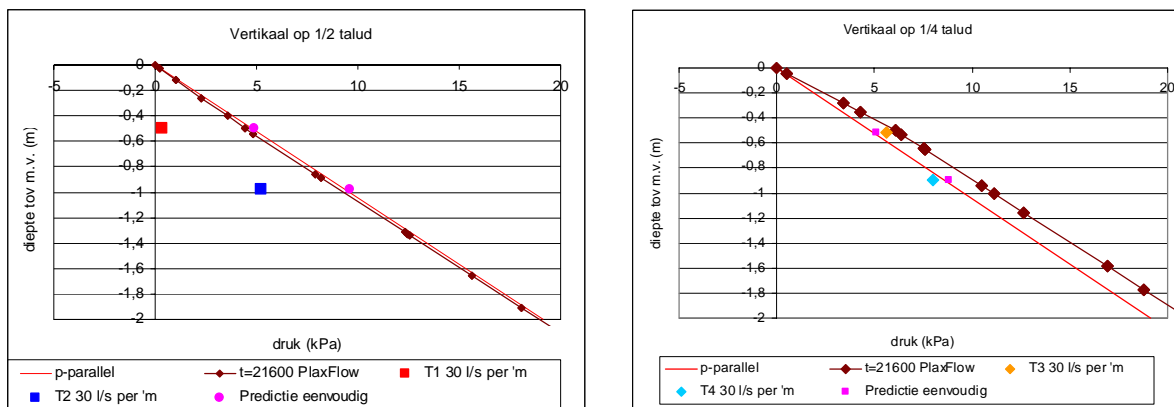
**0,1 l/s per 'm**



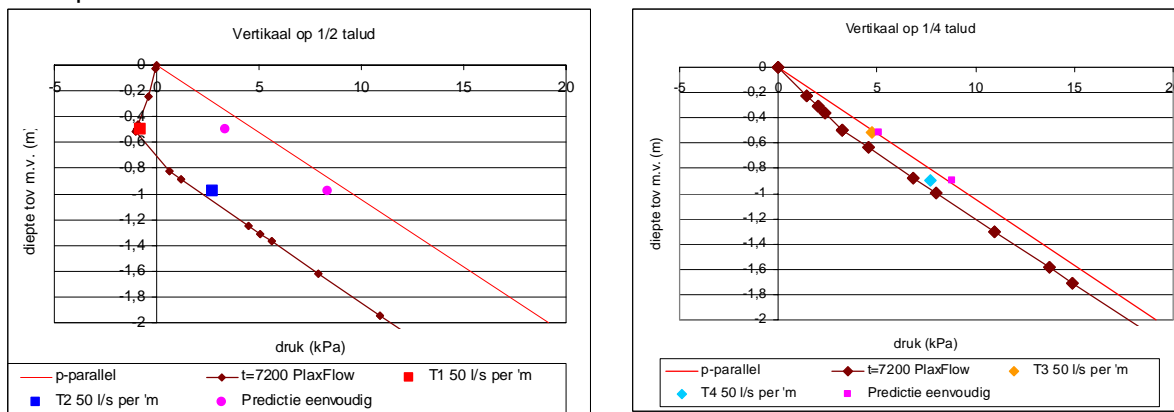
**1 l/s per 'm**



**10 l/s per 'm**



30 l/s per 'm



(50 l/s per 'm na 2 uur afgebroken)

Figuur 4.18 Gemeten maximale waterdruk tijdens een golfoverslagproef (kPa), predictie waterdruk volgens PlaxFlow (kPa) en predictie waterdruk volgens eenvoudige methode (kPa) tegen de diepte onder het maaiveld (m)

De predictie met de eenvoudige methode blijkt minder nauwkeurig dan de (gecorrigeerde) predictie met PlaxFlow. Tevens geeft de eenvoudige methode conservatievere resultaten dan PlaxFlow, wat overigens in de lijn der verwachting is. Het afstromen van water wordt bij de eenvoudige methode niet meegenomen, bij PlaxFlow wel.

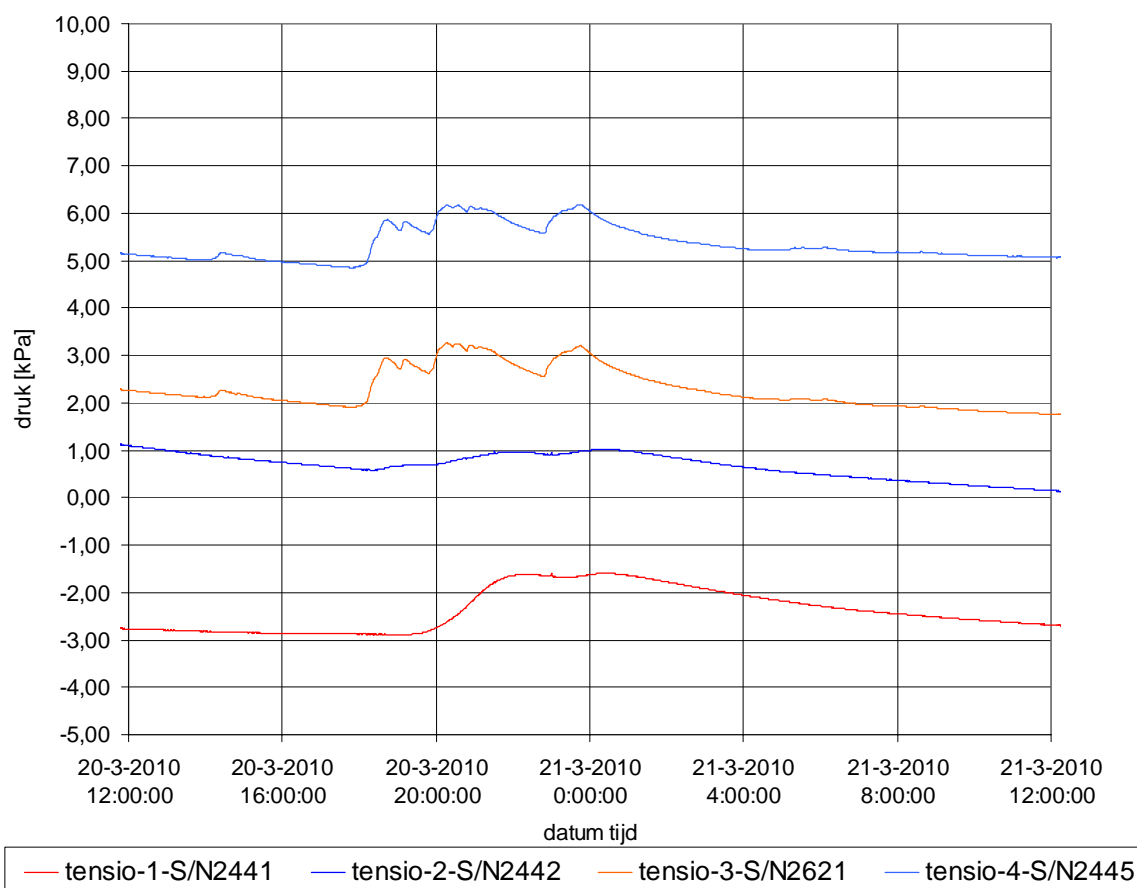
Net als bij de vergelijking van de metingen met de resultaten van PlaxFlow (paragraaf 4.6.3) geldt hier de kanttekening dat de grondwaterstroming bij de golfoverslagproeven 3D is, terwijl de modellen 2D zijn. Door de beperkte breedte van de proefstrook van 4 m zal het water dat na verticale infiltratie het freatisch vlak bereikt ook horizontaal, in dijkrichting, gaan afstromen, waardoor de metingen lager zullen zijn dan in een 2D situatie.

Belangrijk voor het 3D effect is de verhouding tussen de proefstrookbreedte (4 m) en lengtemaat tussen initieel freatisch vlak en de ligging van het maaiveld. Indien de proefstrook relatief breed is ten opzicht van de verticale lengtemaat, dan is het 3D effect op de toename van de waterspanning relatief gering. Voor de tensiometers op 1/4 van het talud is dit 0,7 m en voor de meters op 1/2 van het talud 1,5 m. Het 3D effect voor de meters T1 en T2 is dan ook veel groter, wat ook duidelijk blijkt uit de metingen.

#### 4.6.5 Invloed neerslag

Tijdens de golfoverslagproeven bij strook 3 is geen noemenswaardige neerslag gevallen.

In de avond van zaterdag 20 maart 2010, tussen de 30 en de 50 l/s per 'm proef reageren de tensiometers op neerslag (Figuur 4.19).



Figuur 4.19 Invloed neerslag in weekend tussen 30 en 50 l/s per 'm proef

De tensiometers onderaan het talud (T3 en T4) geven nog een drukspanning vanwege de voorgaande golfoverslagproeven. De tensiometers bevinden zich onder het freatisch vlak ter plaatse van de teen van de dijk. Beide tensiometers geven een stijging van circa 1 kPa aan, wat duidt op een stijging van het freatisch vlak van 0,1 m.

Deze stijging is te verklaren door neerslag. Volgens het geografische overzicht van de dagelijkse neerslag van het KNMI is de volgende hoeveelheden geregistreerd: van 20-03-2010 08:00 uur tot 21-03-2010 08:00 uur 31 mm, wat een regenbui is die ongeveer eens per jaar voorkomt. Met een effectieve porositeit van 0,3 (-) geeft deze 31 mm regen exact 0,1 m stijging van het freatisch vlak.

#### 4.7 Samenvatting evaluatie infiltratie

De belangrijkste bevindingen ten aanzien van de evaluatie van infiltratie zijn puntsgewijs samengevat:

- De stijghoogte in het diepere zand onder de dijk blijkt weinig gedempt te reageren op de buitenwaterstand en geheel niet op de golfoverslagproeven. Hieruit blijkt dat de aanname van een zanddijk op een zandondergrond niet correct was en dat er wel degelijk een scheidende laag aanwezig is tussen de zanddijk en de zandondergrond.

Op deze scheidende laag is ook een tweede freatisch vlak aanwezig op circa NAP +0,3 m. Het effect hiervan op de waterspanningen in de dijk is dat deze eerder dan verwacht oplopen. De predictie volgens de eenvoudige methode en de predictie met PlaxFlow zijn hierop in het kader van de evaluatie aangepast.

- De voor het proefprogramma, scheidende laag en 3D effecten gecorrigeerde predictie met PlaxFlow is relatief nauwkeurig gebleken. De waterspanningen bij de raai halverwege het talud blijven achter als gevolg van een relatief groot 3D effect, ten opzichte van de schatting van het 3D effect bij de teen van de dijk.
- De schatting van de relevante parameters, met name de verzadigde doorlatendheid van het zand van de dijk en de schatting van de infiltratietijd op basis van de verdeling van overslagvolumes, is goed gebleken. De veldinfiltratieproef, die is gebruikt voor de bepaling van de infiltratiecapaciteit, leidt tot een goede schatting van de verzadigde doorlatendheid.
- De infiltratiecapaciteit is wederom van gelijke orde van grootte als bij alle eerdere proeven en valt ook binnen de range die wordt aangegeven in het Technisch Rapport Klei bij Dijken. Dat de Vechtdijk een volledige zanddijk is maakt kennelijk niet uit. De verzadigde doorlatendheid van klei met bodemstructuur is van gelijke orde als die van zand.
- De eenvoudige methode voor de predictie van de potentiële stijging van het freatisch vlak geeft een iets hogere voorspelling dan de voorspelling met PlaxFlow en geeft daarmee ook een marge aan de veilige kant.
- Belangrijk bij het maken van de predictie is om gebruik te maken van de effectieve porositeit. Dit staat voor het watervolume dat nodig is om van zand met een natuurlijk watergehalte te komen tot volledig verzadigd zand. Zand zal onder dagelijkse omstandigheden al tot op zekere hoogte vochtig zijn, zeker in het seizoen waarin hoge waterstanden worden verwacht. Deze effectieve porositeit kan worden bepaald met standaard grondonderzoek (bepaling watergehalte en porositeit). Als een eerste schatting kan 0,3 worden gebruikt voor zand.
- Een tweede belangrijk aandachtspunt bij de voorspelling van de potentiële stijging van het freatisch vlak als gevolg van golfoverslag, is een goede schatting van de initiële ligging van het freatisch vlak. Een scheidende laag met een schijnwaterstand kan hoger liggen dan de interpolatie tussen polderpeil en buitendijks peil. Verder dient rekening te worden gehouden met opbolling als gevolg van neerslag.
- De kleinste overslagvolumes kunnen kleiner zijn dan de infiltratiecapaciteit van het talud. De infiltratiecapaciteit van de grond vermenigvuldigd met de taludlengte en de verblijftijd van het volume op het talud is dan groter dan het overslagvolume. Omdat hiermee geen rekening wordt gehouden bij de zogenaamde eenvoudige methode kan de predictie mogelijk iets worden aangescherpt door hiermee wel rekening te houden.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

#### 5.1.1 Hydraulische parameters

- In het algemeen kan worden geconcludeerd dat de hydraulische metingen geresulteerd hebben in goede resultaten op basis waarvan een goede indruk kan worden verkregen van de grootte van de parameters in de overslaande golven.
- LDM's, VFM, DRO's\_turbulentie en surfplanken hebben goed gefunctioneerd. Dit geldt ook voor de surfplanken uitgerust met snelheidsmeters.
- EMS'en en DRO's\_laagdikte hebben niet goed gefunctioneerd. Het heeft geen zin deze instrumenten bij toekomstige metingen te gebruiken.
- Er zijn aanwijzingen voor luchtinsluiting tussen de binnenkruinlijn en enkele meters lager op het talud als gevolg van loslaten van de overslaande golf bij volumes groter dan 1000 l/s per m. Dit aspect verdient verder onderzoek.
- Trendlijnen zijn afgeleid voor de laagdikten, frontsnelheden en overslagduren als functie van het golfvolume.
- Het luchtgehalte gemeten met de VFM is in de orde van 15 % bij golven van ongeveer 1000 l/s en ongeveer 30 % bij de grootste golven van 5000 l/s per m. Uit het verschil tussen LDM (meting exclusief lucht) en surfplankmeting (meting inclusief lucht) volgt een percentage van ongeveer 10 à 20% voor alle golfvolumes. De VFM metingen zijn puntmetingen, terwijl het verschil tussen LDM en surfplank een dieptegemiddelde meting is en daarmee relevanter voor verdere analyse.
- De gemeten instantane bodemdruk is conform de theorie. Op basis daarvan kan de relatieve turbulentie intensiteit worden voorspeld gegeven laagdikte, stroomsnelheid en luchtgehalte. Aangezien directe metingen van de relatieve turbulentie intensiteit ontbreken is vergelijken van berekende waarden met gemeten waarden niet mogelijk.
- De effectieve cumulatieve belastingmaat lijkt een bruikbare methode als criterium om de sterkte van binnentaluds bij golfoverslag te kwantificeren. Vier schade niveaus voor alle tot nu toe uitgevoerde proeven zijn te relateren aan enkele criteria mits de juiste waarde van de kritieke stroomsnelheid bekend is. Een conservatieve benadering is uit te gaan van een lage kritieke stroomsnelheid.

#### 5.1.2 Erosie

- De overslagproeven op de Vechtdijk bevestigen eerdere bevindingen dat de grasbekleding als totaal op de kruin en het talud zonder obstakels of grote (> 15 cm) beschadigingen zeer veel weerstand biedt tegen erosie.
- Op het talud is de schade geïnitieerd door de aanwezigheid van mollengaten waarna afscheuren van de zode optreedt. De predictiemethode voorspelt dit niet en is om die reden dan ook niet bruikbaar op dit moment.
- De oprit blijkt evenals de overgang bij de berm bij de eerdere proeven maatgevend voor de schade. De predictiemethoden voor de diepte van de erosiekuil op basis van de gemodificeerde formules van Hoffmans (formule 3.5) en Stein (formule 3.6) lijken bruikbaar. Overigens trad bij de Vecht geen erosiekuil op bij de berm onderaan het talud omdat deze overgang geen knik kende maar afgerond was.
- Een boom is een verzwakking van het talud en zeer bepalend voor de schade; ook hier geldt dat de methode voor voorspellen van de erosiekuildiepte naar analogie met brugpijlers (formule 3.8) bruikbaar blijkt. Bedacht moet echter worden dat dit slechts is gebaseerd op één golfoverslag experiment.

- De beide belastingmaten lijken beide zeer bruikbaar; essentieel bij een predictie is dat de kritieke stroomsnelheid goed kan worden voorspeld. Er is een voorkeur voor de effectieve cumulatieve belasting maat volgens  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  in combinatie met een conservatieve schatting van de kritieke stroomsnelheid van  $u_c = 4$  m/s omdat deze min of meer empirische methode gebaseerd is op alle onderzochte dijksecties. Bezwijken blijkt dan te verwachten voor een waarde van  $\Sigma(u^2 - u_c^2)$  van minimaal  $3500 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (na 6 uur). Begin van schade zal uiteraard ontstaan bij een veel lagere waarde, bijvoorbeeld  $500 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .
- De vegetatieopnames hebben geleid tot de conclusie dat de zodekwaliteit als goed moet worden beoordeeld. Dit doet geen recht aan de vastgestelde lagere kritieke stroomsnelheid. Aspecten als open ruimte komen onvoldoende tot hun recht.

### 5.1.3 Infiltratie

- De predictie van de opbouw van waterspanningen met behulp van PlaxFlow blijkt relatief nauwkeurig. Hierbij geldt de kanttekening dat achteraf is gecorrigeerd voor een scheidende laag tussen de dijk en de onderliggende afzettingen die eerder niet was meegenomen. Deze laag werd pas aangetoond door de meting van de drukhoogte in het zandpakket onder de dijk. Ook voor het 3D effect is gecorrigeerd.
- De eenvoudige methode voor het bepalen van de potentiële stijging van het freatisch vlak geeft een conservatieve schatting, zowel ten opzichte van de PlaxFlow modellering als ten opzichte van de metingen.
- De infiltratiecapaciteit van de volledige zanddijk is van gelijke orde van grootte als van alle eerdere proeflocaties (zanddijken met kleibekleding). Tevens valt de infiltratiecapaciteit binnen de range die wordt gegeven in het Technisch Rapport Klei bij Dijken. Voor zanddijken en dijken met een extreem hoog zandgehalte hoeft geen afwijkende veilige waarde van de infiltratiecapaciteit te worden gegeven ( $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$ ).
- De methode waarmee de infiltratiecapaciteit is bepaald blijkt ook geschikt voor zanddijken. Deze methode bestaat uit het vertikaal in het dijktafstand steken van een stalen buis met een diameter van 0,4 m, waarna wordt gemeten hoe snel een hierin aangebrachte water laag in de dijk infiltreert.
- De verblijftijd van een overslagvolume op het talud blijkt op de Vechtdijk in de orde van 40 s te liggen. Dit is circa 10 s langer dan bij eerdere proeven (circa 30 s), wat resulteert in een langere infiltratietijd. Voor flauwere taluds dient rekening te worden gehouden met dit effect.
- De potentiële stijging van het freatisch vlak is afhankelijk van het poriënvolume dat moet worden gevuld om van een veldvochtige grond te komen tot volledige verzadiging. Na eerdere proeven op zanddijken (met kleibekleding) blijkt dat ook voor de Vechtdijk een effectieve porositeit van 0,3 kan worden aangehouden. Dit betekent dat ongeveer een kwart van de poriën al gevuld is.
- Voor de bepaling van de potentiële ligging van de freatische lijn is het belangrijk om te weten wat de initiële ligging is, voor aanvang van golfoverslag. Hierbij dient rekening te worden gehouden met de eventuele aanwezigheid van scheidende laag tussen de dijk en de ondergrond en met het effect van regen (opbolling).

## 5.2 Aanbevelingen

### 5.2.1 Hydraulische parameters

- Aanbevolen wordt LDM's, VFM, DRO's\_turbulentie en surfplanken ook bij toekomstige proeven in te zetten. Wel wordt aanbevolen de bemonsteringsfrequentie

van de DRO's\_turbulentie te verhogen. Aanbevolen wordt ook meer surfplanken uit te rusten met snelheidsmeters, maar die moeten dan wel vooraf worden gecalibreerd. Verder moet aandacht worden besteed aan de hoogte waarop de surfplanken worden gemonteerd, want dit lijkt van invloed op de laagdiktemeting.

- EMS'en en DRO's\_laagdikte hebben niet goed gefunctioneerd. Het heeft geen zin deze instrumenten bij toekomstige metingen te gebruiken.

### 5.2.2 Erosie

- Het vermoeiingsmodel lijkt niet goed te voorspellen en aanpassing van dit model is gewenst.
- Het voorspellen van de kritieke stroomsnelheid met formule 3.4 is niet juist voor graszoden zoals aanwezig op de Vecht met een hoog percentage zand; ook met relatief grote open ruimtes zoals op St.Philipsland levert een voorspelling te hoge waarden op.
- Aanbevolen wordt ook om de gevoeligheid van de formule voor de kritieke stroomsnelheid te onderzoeken voor de waarden van de diverse coëfficiënten.
- Veelbelovend zijn de resultaten met de beide belastingmaten maar een verdere uitwerking is gewenst. Beide methoden zijn in essentie gelijk en aanbevolen wordt dan ook de methoden in elkaar om te zetten. De empirische methode krijgt dan een theoretische grondslag.
- Aanbevolen wordt bij de vegetatieopnamen de bedekking en de open plek grootte nadrukkelijker te onderzoeken.

### 5.2.3 Infiltratie

- De infiltratietijd is afhankelijk van de verblijftijd van een overslagvolume op het talud. Deze blijkt afhankelijk van de taludhelling. Aanbevolen wordt om de invloed van de taludhelling op de verblijftijd mee te nemen bij de bepaling van de infiltratietijd.
- De ligging van het initiële freatische vlak is belangrijk bij de bepaling van de ligging zoals deze kan worden als gevolg van golfoverslag. De schematisatie van een freatisch vlak als gevolg van een hoge waterstand, eventueel gecombineerd met regen, wordt beschreven in de vigerende Technische Rapporten Waterkerende Grondconstructies en Waterspanningen bij Dijken. Aanbevolen wordt om na te gaan of de inhoud van deze rapporten aansluit bij de bevindingen tijdens de golfoverslagproeven, met name ten aanzien van de aspecten: effect scheidende laag onder zanddijk en het effect van neerslag in combinatie met golfoverslag.
- De bepaling van de infiltratiecapaciteit is belangrijk. Een veilige waarde is  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$ . Standaard doorlatendheidbepalingen in het laboratorium op kleine monsters leidt voor klei tot veel te lage waarden. De infiltratiecapaciteit kan in het veld worden bepaald. Aanbevolen worden om een beschrijving te geven van een goede methode voor de bepaling van de infiltratiecapaciteit.
- Aanbevolen wordt om met de huidige stand van zaken ten aanzien van de eenvoudige methode nog na te gaan of er generiek een nog eenvoudiger toets kan worden uitgevoerd, zonder dat er een infiltratiecapaciteit en infiltratietijd hoeft te worden bepaald. Dit zou een uitbreiding kunnen zijn op de eenvoudige toetsing.
- Er is geen onderzoek uitgevoerd naar de sterkte van klei met bodemstructuur, terwijl dit naast de waterspanningen een belangrijke parameters is. Dit is zeker het geval voor kleidijken met een wat steiler talud. Aanbevolen wordt om dit onderwerp mee te nemen in de volgende ronde SBW onderzoek.



## 6 Referenties

Alterra, Begroeiing en doorworteling van graslandzode op de Vechtdijk, gemeten voor en tijdens de golfoverslagproeven van maart 2010, Wageningen, augustus 2010

Etten, R.J., SBW-Golfoverslagproeven Factual report grondonderzoek Vechtdijk, 1201541-001-GEO-0002, Deltares 2010

Deltares 2010A, SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 4A Modelontwikkeling Vechtdijk, 1201541-000-GEO-0021, juni 2010

Deltares 2010B, SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 4B Predictie Vechtdijk, 1201541-000-GEO-0023, juni 2010

Infram 2010, Factual Report Overslagproef Vechtdijk, projectnummer 09i068, augustus 2010.



## **A Fotorapportage**



Foto 1. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Vooraf



Foto 2. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Eerste schade





Foto 3. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Meerdere kale plekken.



Foto 4. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Meerdere kale plekken.



Foto 5. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto 6. Vechtdijk. Rivierregime, proef 4; Gestopt, bezwaken talud.



Foto 7. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Vooraf.



Foto 8. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Eerste schade talud.



Foto 9. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Meerdere locaties kale plekken talud.



Foto 10. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Talud na de proef niet bezwiken.



Foto 11. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Begin ondermijning van de overgang.



Foto 12. Vechtdijk. Zeeregime met overgang, proef 1; Proef gestopt, overgang bezweken.



Foto 13. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Vooraf.



Foto 14. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Eerste schade aan talud.



Foto 15. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Meerdere kale plekken talud.



Foto 16. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Gestopt, talud niet bezweken.



Foto 17. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Eerste boomwortel geërodeerd.



Foto 18. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Grote erosie boomwortels, zand komt vrij.





Foto 19. Vechtdijk. Zeeregime met boom, proef 2; Gestopt, headcut erosie bovenstrooms van boom.



Foto 20. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Vooraf.



Foto 21. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Eerste schade talud.



Foto 21. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Meerdere kale plekken talud.



Foto 23. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto 24. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Zand komt vrij door afdeklaag.



Foto 25. Vechtdijk. Zeer zwaar zeeregime, proef 3; Gestopt, talud bezwaken.



Foto 26. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Vooraf.



Foto 27. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Foto 28. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Foto 29. Vechtdijk. Hydraulische metingen; Na de metingen.



Foto 30. Delfzijl. Kale klei. Vooraf met kleine beschadigingen in het midden.



Foto 31. Delfzijl. Kale klei. Net voordat het rechtse gat zich ontwikkelt tot head cut erosie.



Foto 32. Delfzijl. Kale klei. Ontwikkeling van head cut erosie bij het rechtse gat.



Foto 33. Delfzijl. Kale klei. Vrijwel aan het eind van de proef.





Foto 34. Delfzijl. Kale klei. Na de proef.



Foto 35. Delfzijl. Grastalud. Voor (links) en na de proef (rechts).



Foto 36 Delfzijl. Grastalud. Initiële schade aangebracht op het talud.



Foto 37. Delfzijl. Grastalud. Afstropen van het gras beneden de initiële schade.



Figuur 38. Boonweg. Sectie 1. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen



Figuur 39. Boonweg. Sectie 2. Na de proef, geen schade aan het talud wel aan de teen.



Figuur 40. Boonweg. Sectie 3. Na de proef, schade aan het talud en aan de teen.



Figuur 41. Boonweg. Sectie 4. Begin van schade (opbolmechanisme) aan het talud.



Figuur 42. Boonweg. Sectie 4. Na de proef, bezweken talud en geen schade aan de teen.



Figuur 43. St Philipsland. Begin van schade aan het talud (twee plekken)



Figuur 44. St Philipsland. Talud bezweken en ook de reeds afgedekte teen.



Figuur 45. Kattendijke. Sectie 1. Schade aan teen voordat meetwagen moest worden verplaatst.



Figuur 46. Kattendijke. Sectie 1. Aan het einde van de proef. Geen schade aan het talud, bezwijken van teen met onderhoudsweg, leidende tot headcut erosie op het talud.



Figuur 47. Kattendijke. Sectie 2. Initiële schade door mestinjecteur op benedentalud.



Figuur 48. Kattendijke. Sectie 2. Benedentalud met teen, na de proef. De onderhoudsweg was afgedekt en kon niet worden beschadigd.



Figuur 49. Kattendijke. Elastocoast. Proef met 125 l/s per m.





Figuur 50. Afsluitdijk. Sectie 1. Begin van schade aan teen.



Figuur 51. Afsluitdijk. Sectie 1. Begin van schade aan het talud.



Figuur 52. Afsluitdijk. Sectie 1. Meerdere kale plekken op talud en gras verdwenen bij teen.



Figuur 53. Afsluitdijk. Sectie 1. Erosie van de teen 0,30 m diep; talud wel kaal, maar niet bezweken.



Figuur 54. Afsluitdijk. Sectie 2. Grotere/meerdere kale plekken op talud. Begin schade teen.



Figuur 55. Afsluitdijk. Sectie 2. Bezwijken van de klinkerbestrating op zand.



Figuur 56. Afsluitdijk. Sectie 3. Begin van schade aan de teen.



Figuur 57. Afsluitdijk. Sectie 3. Meerdere/grotere kale plekken op het talud.



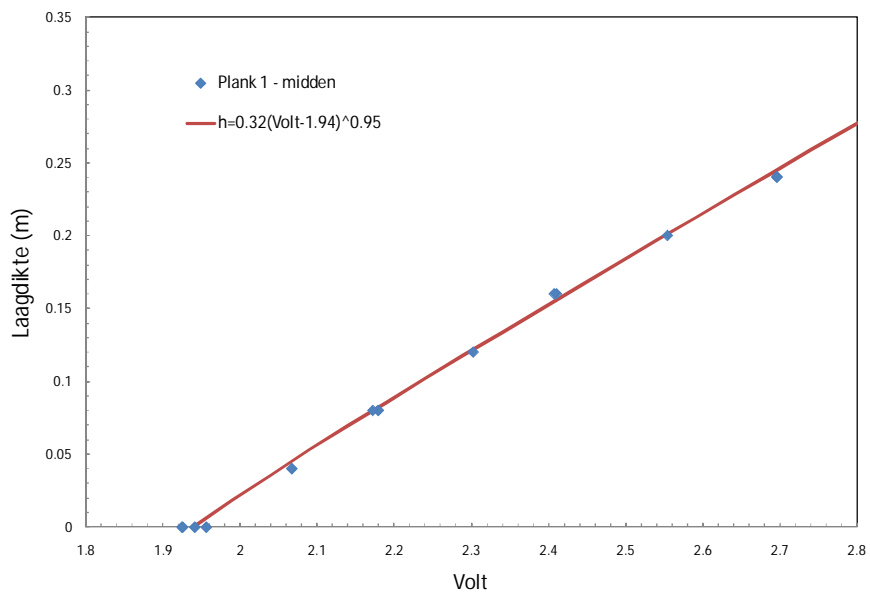
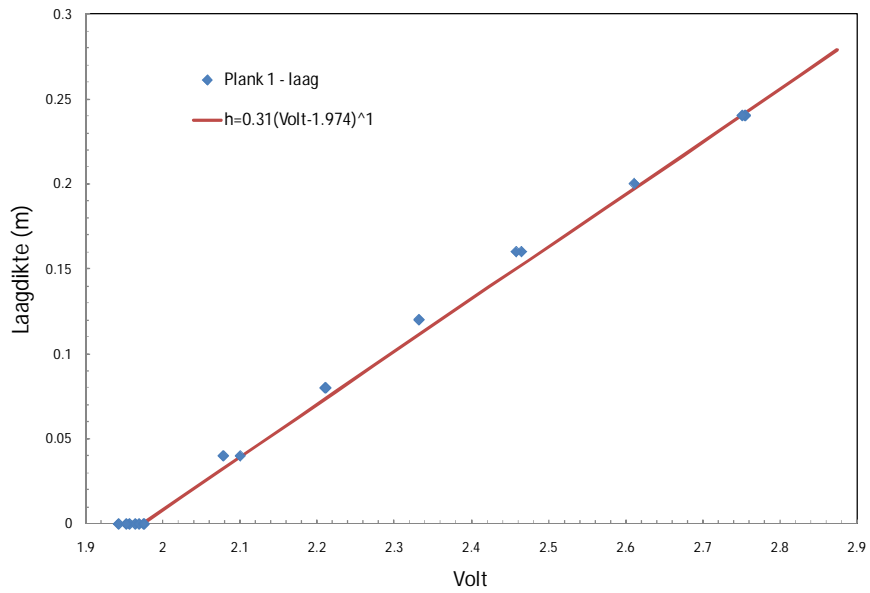
Figuur 58. Afsluitdijk. Sectie 3. Bezwijken van de trap.



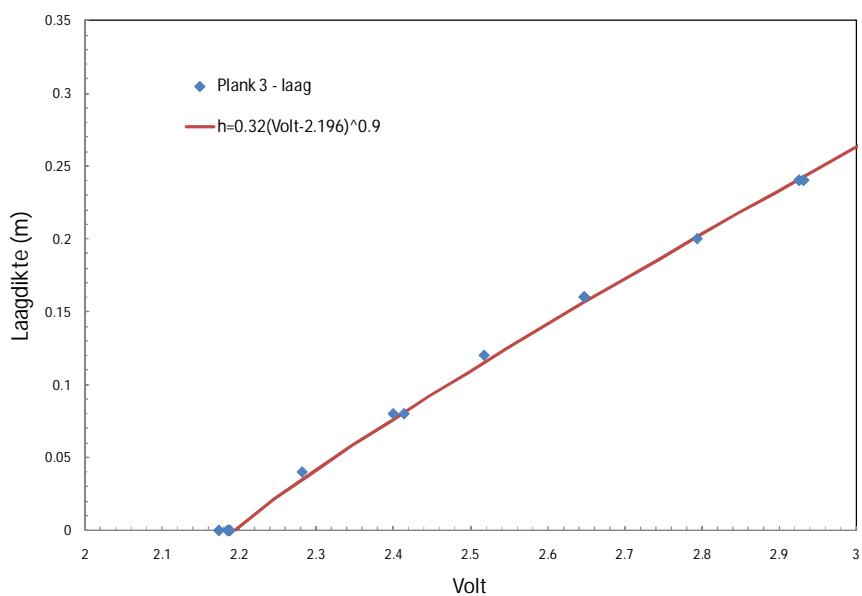
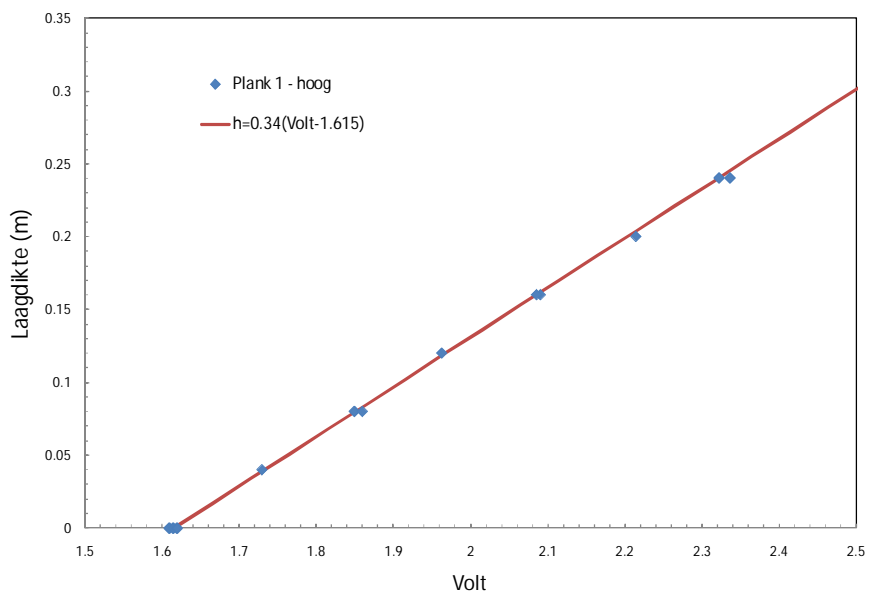
Figuur 59. Afsluitdijk. Sectie 3. Erosiekuilen, 1,0 m diep door stroomconcentratie langs de trap.

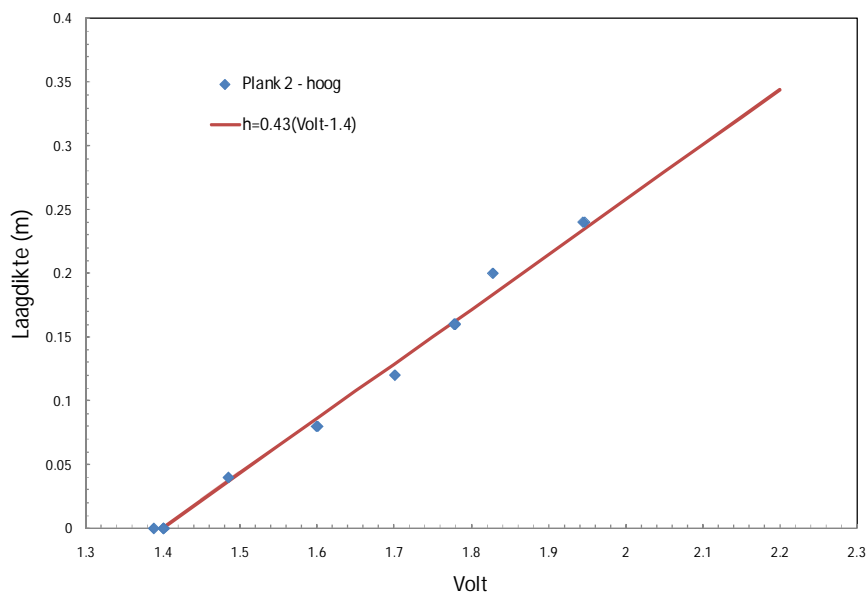
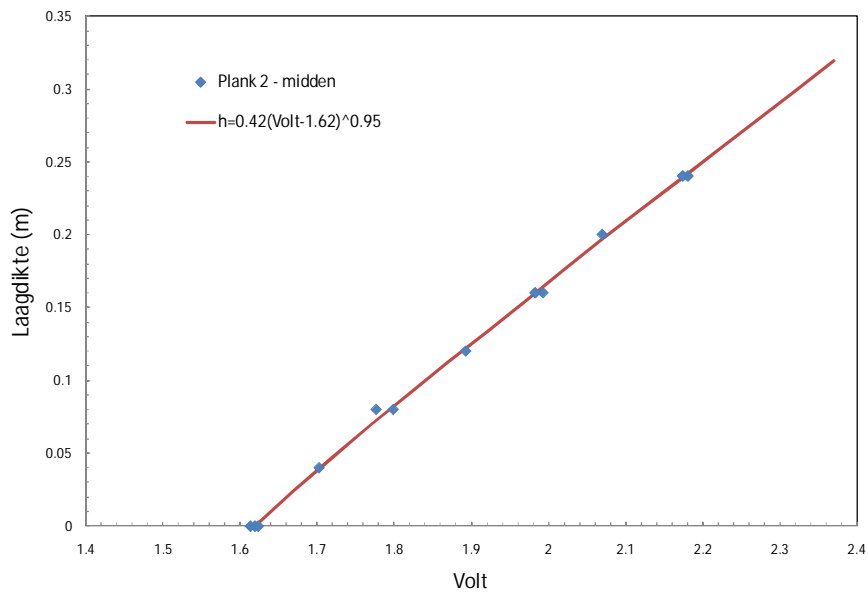
## **B Metingen met de surfplanken**

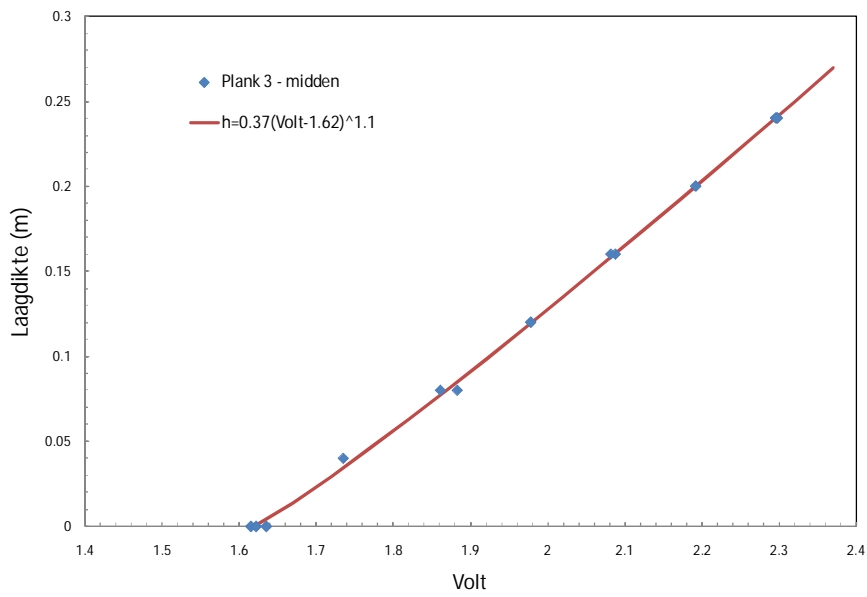
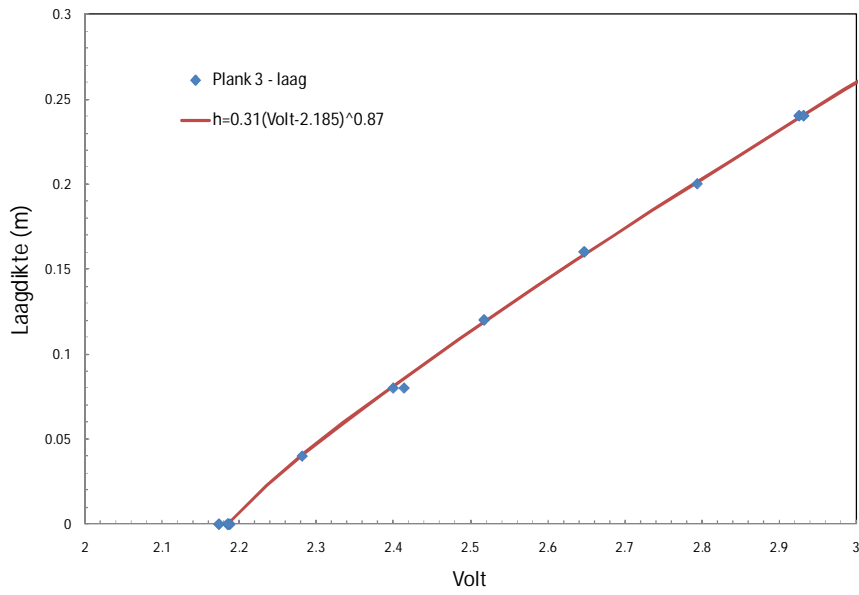
## Annex 1 Calibratie van de laagdikte van de surfplanken

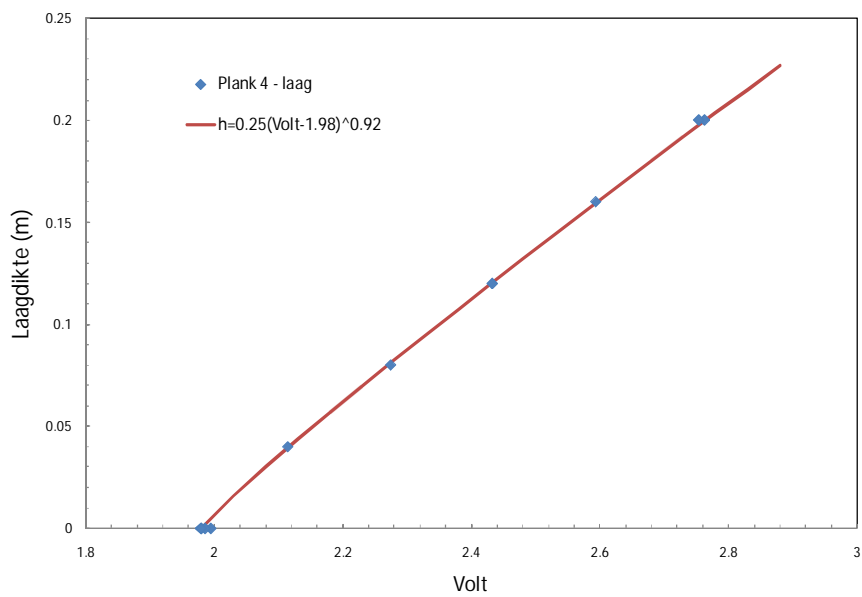
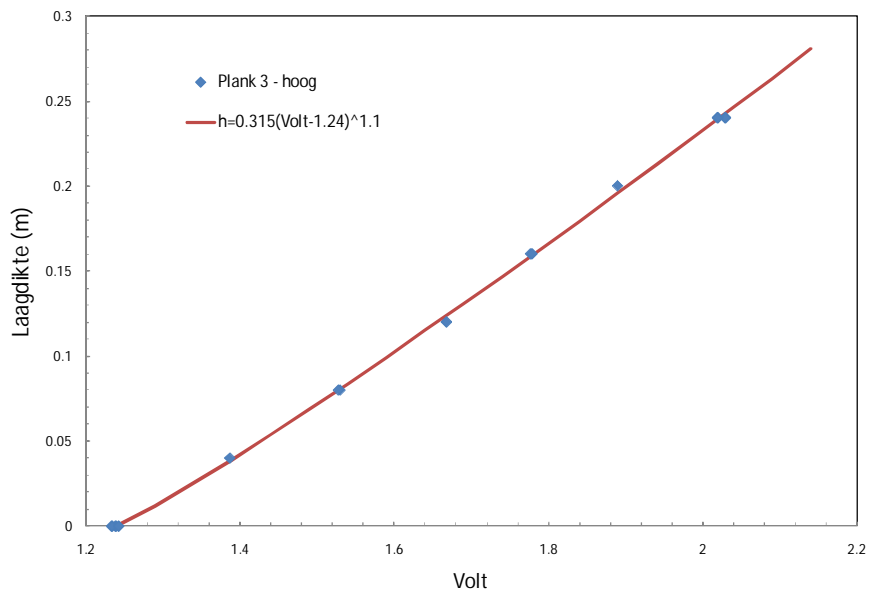


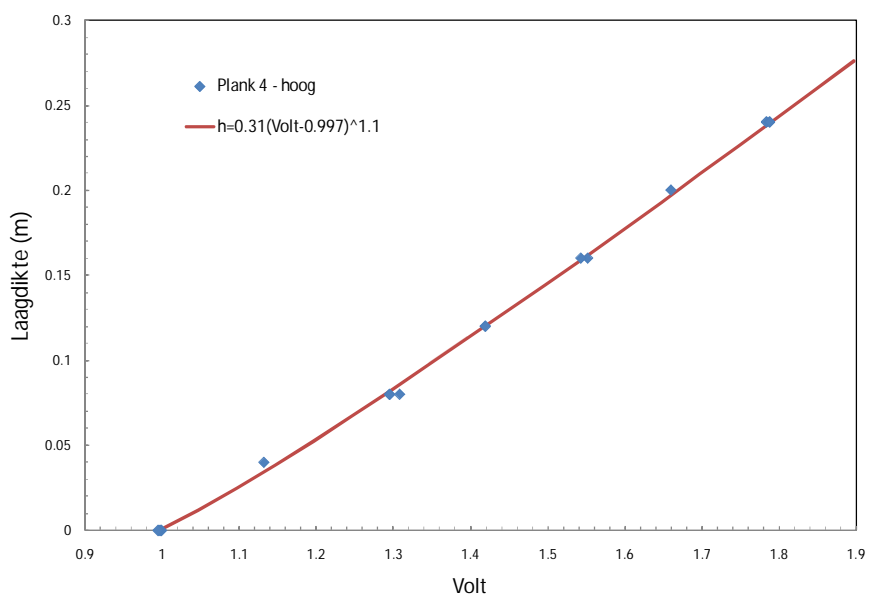
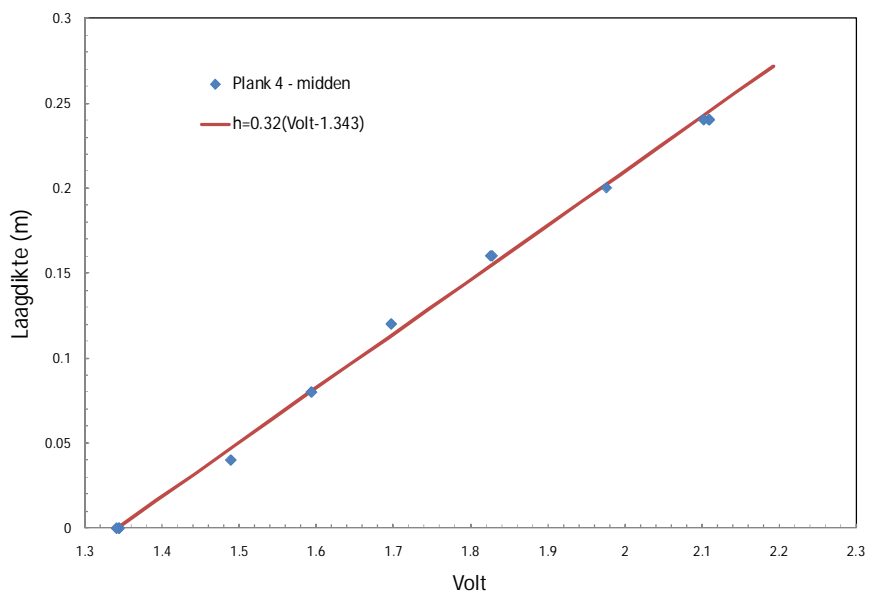


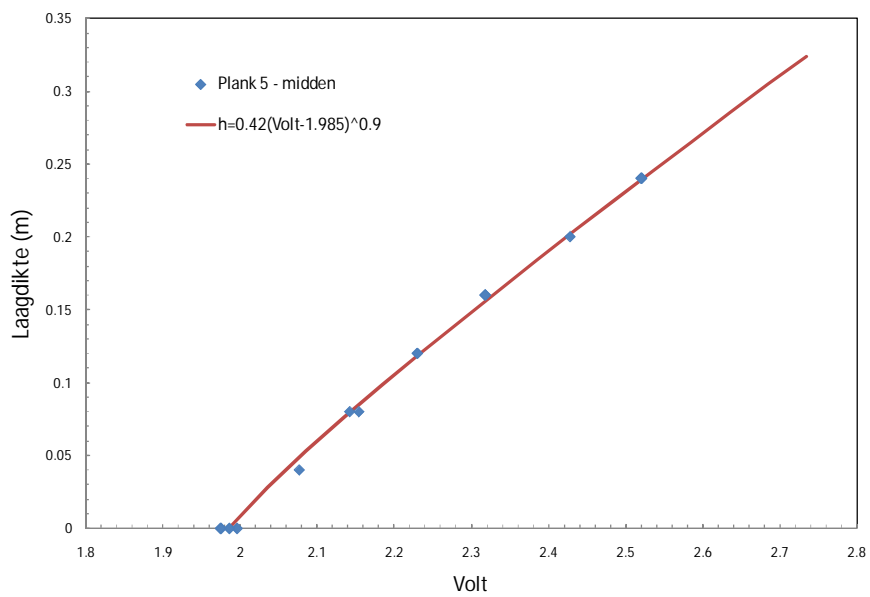
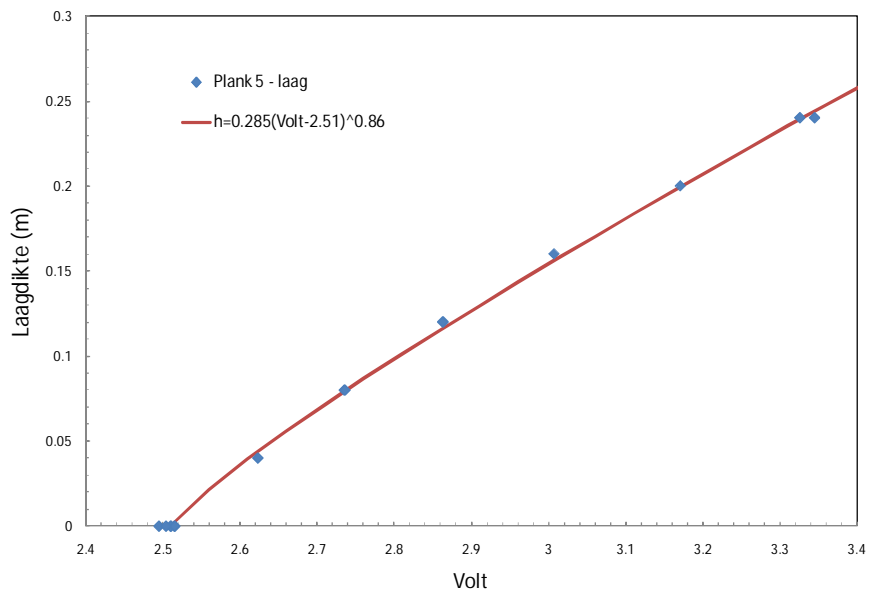


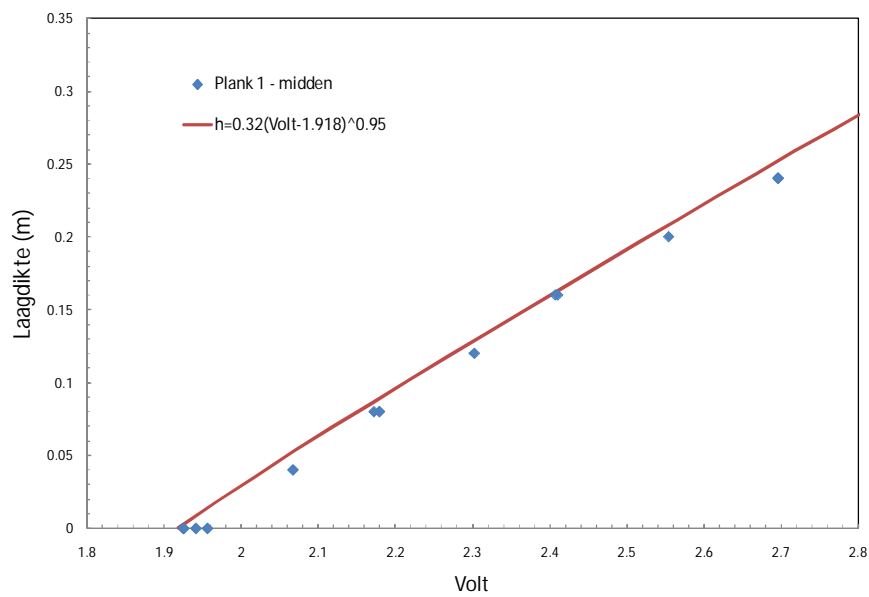
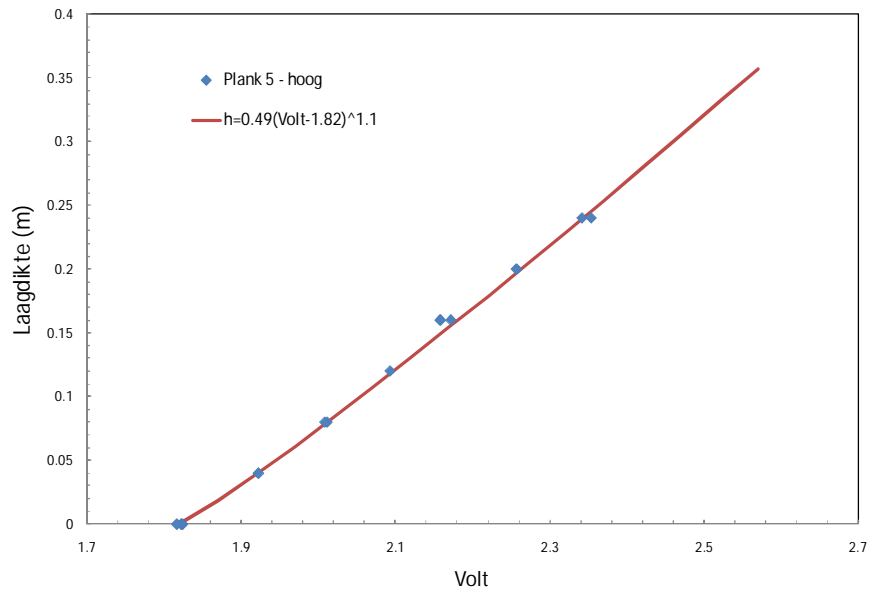




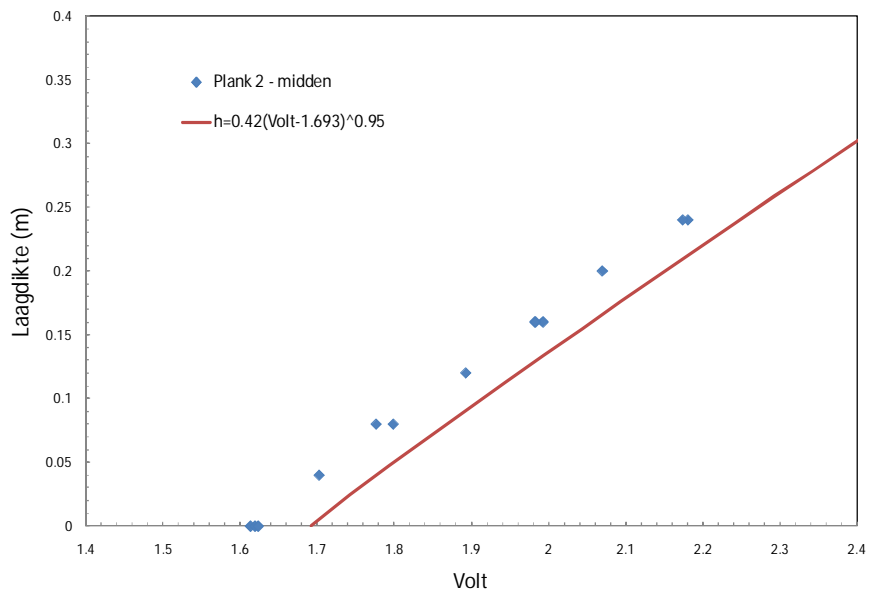








Verschoven nulpunt bij plank 1, middensessie

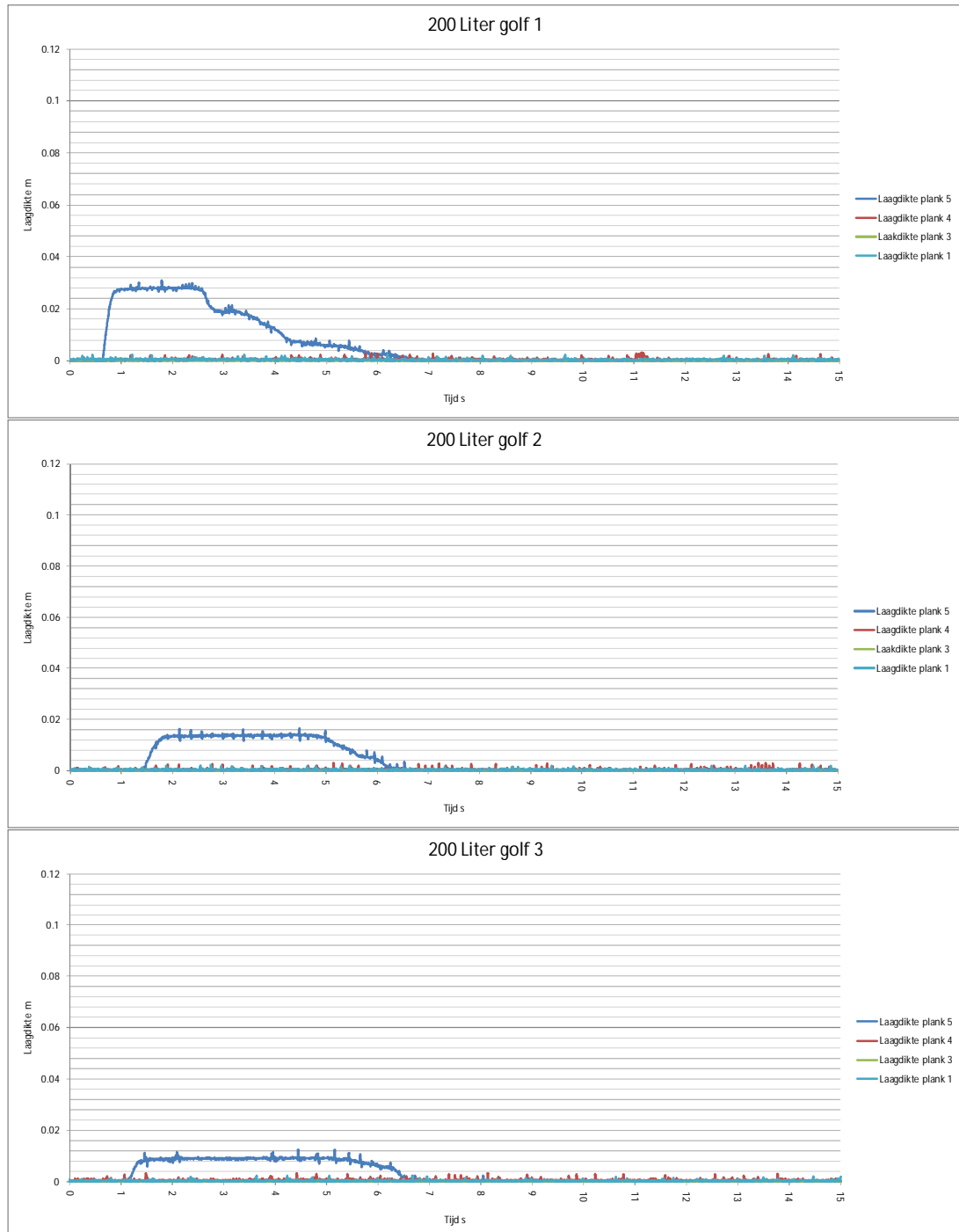


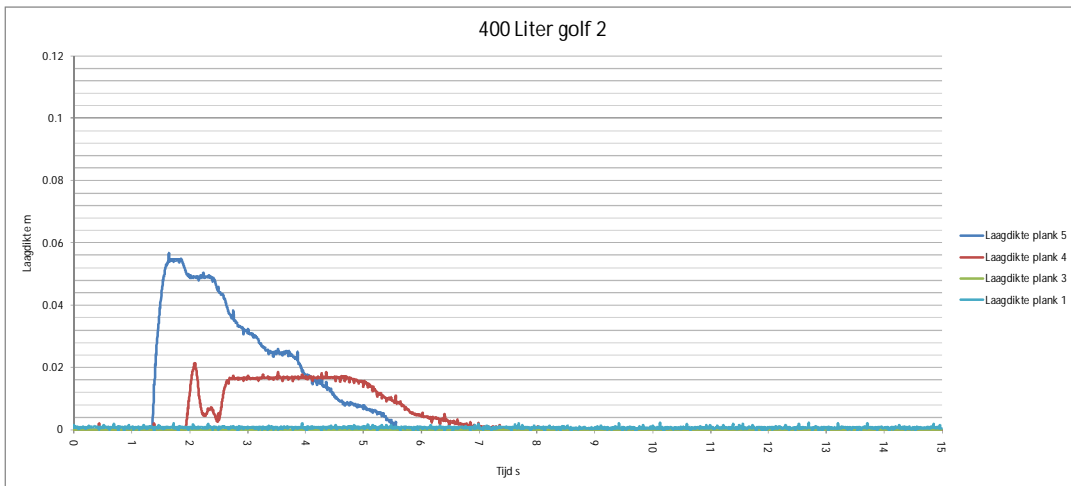
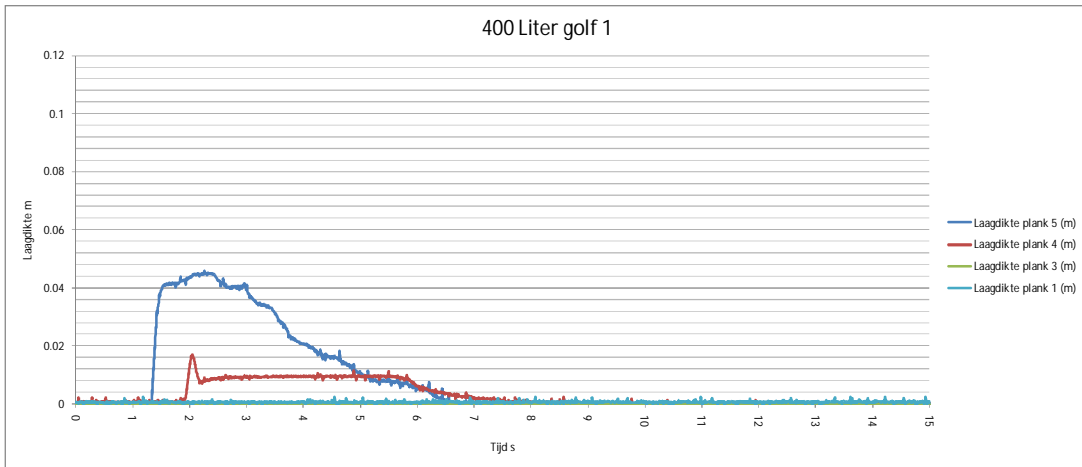
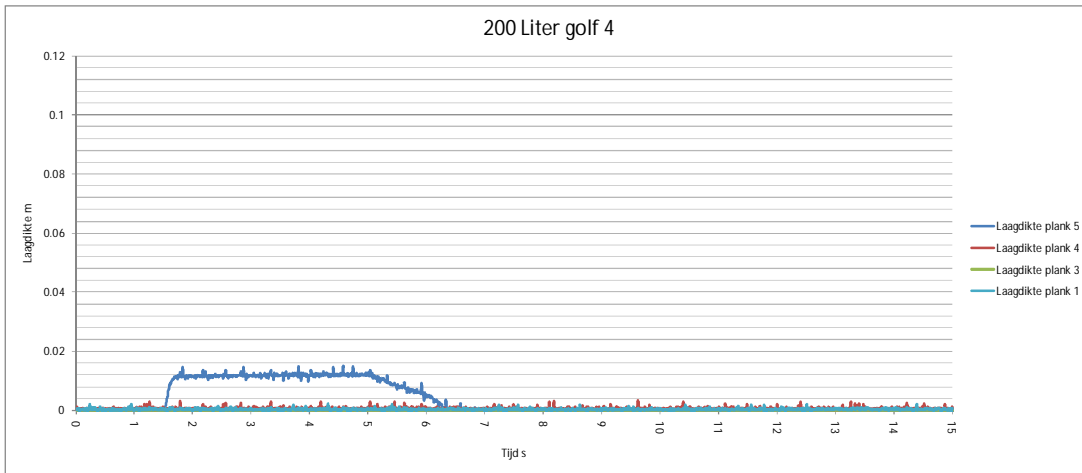
Verschoven nulpunt bij plank 2, middensessie

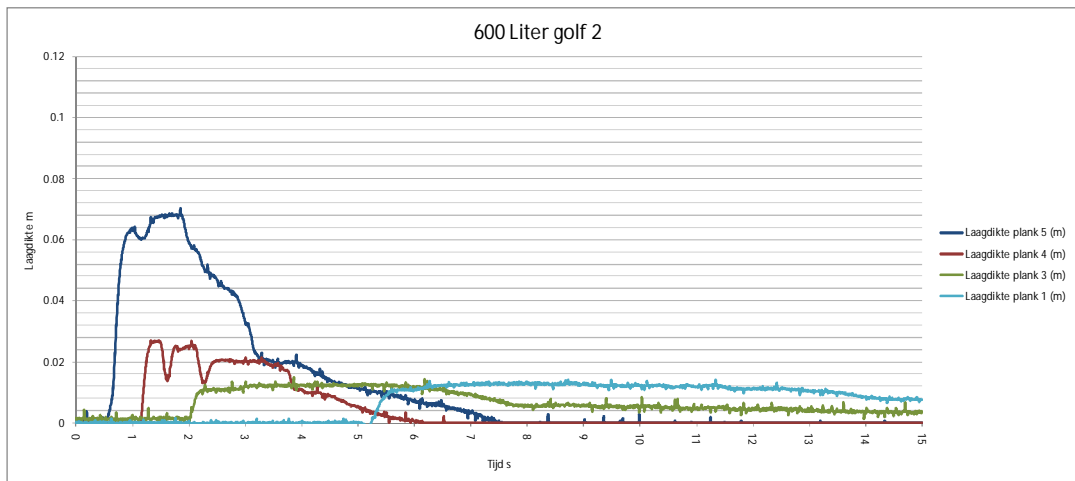
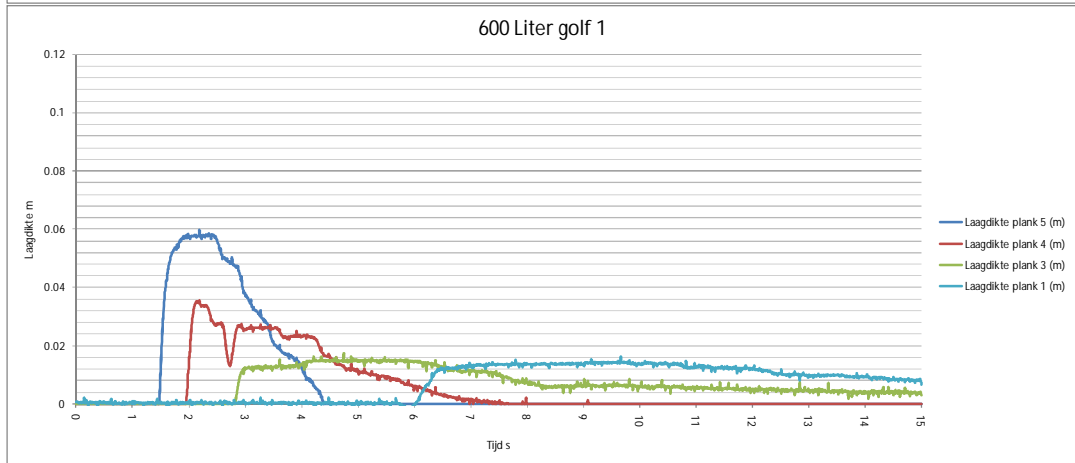
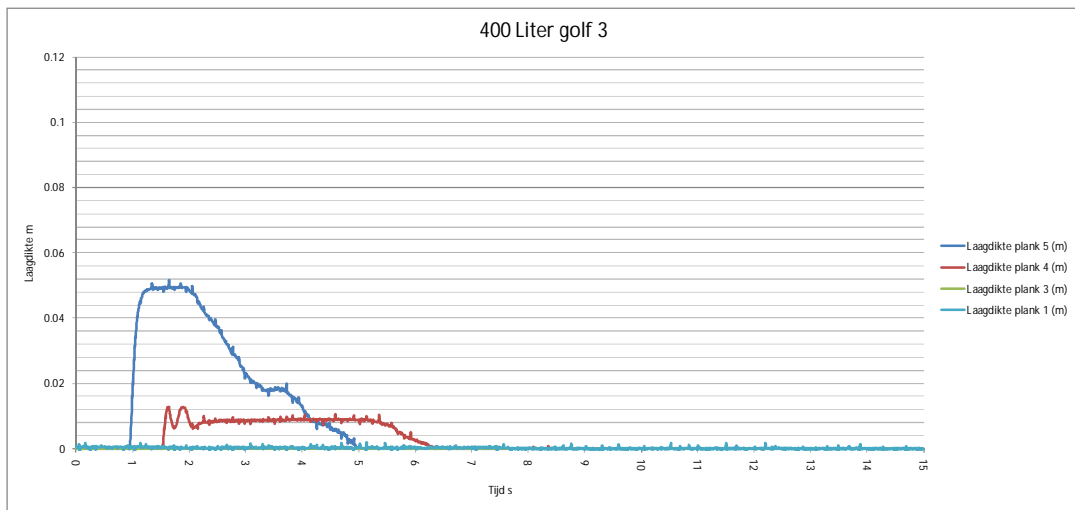


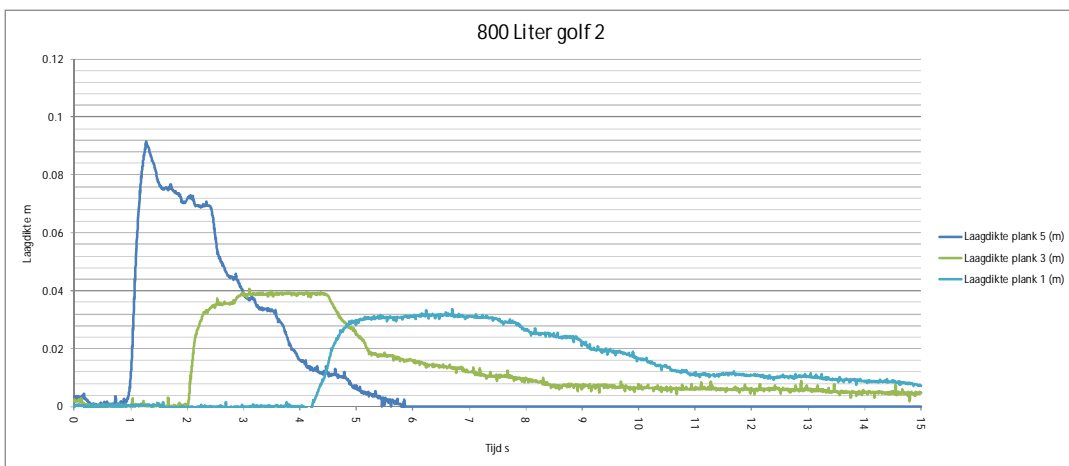
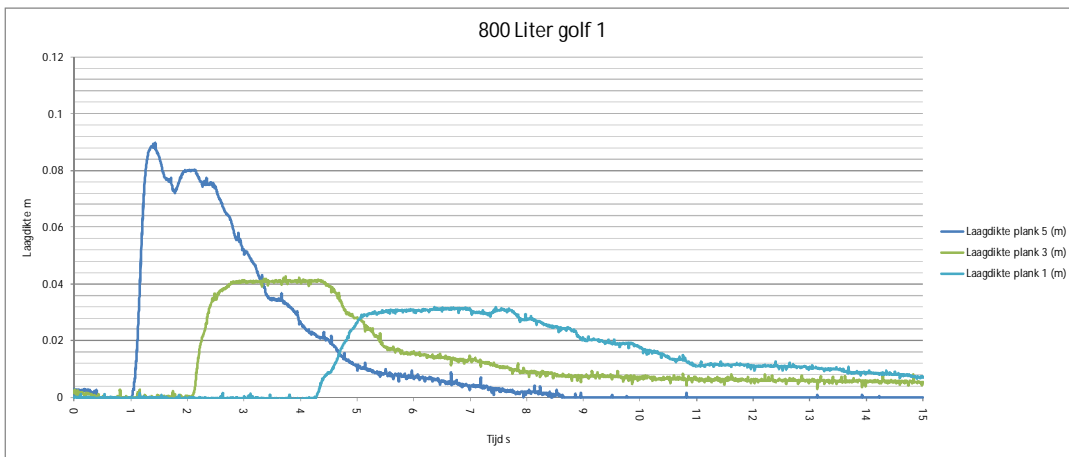
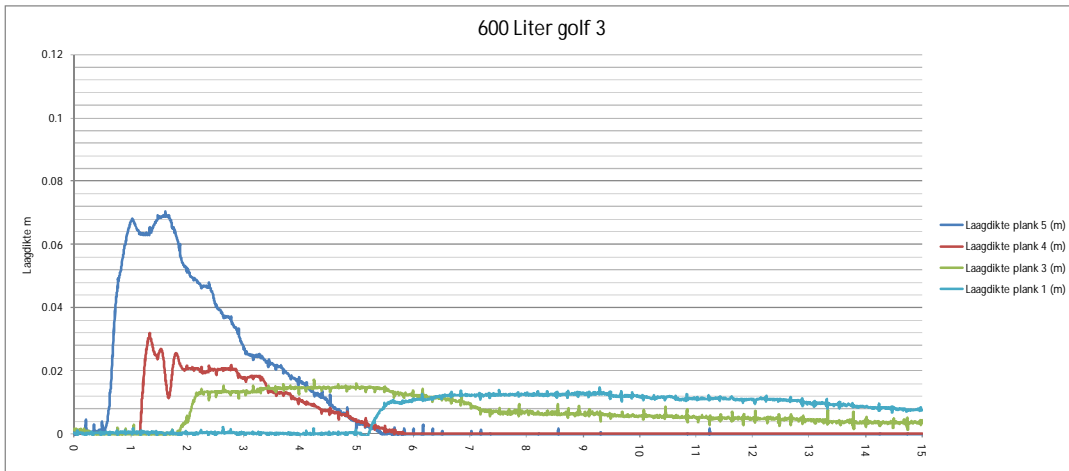
## **Annex 2**

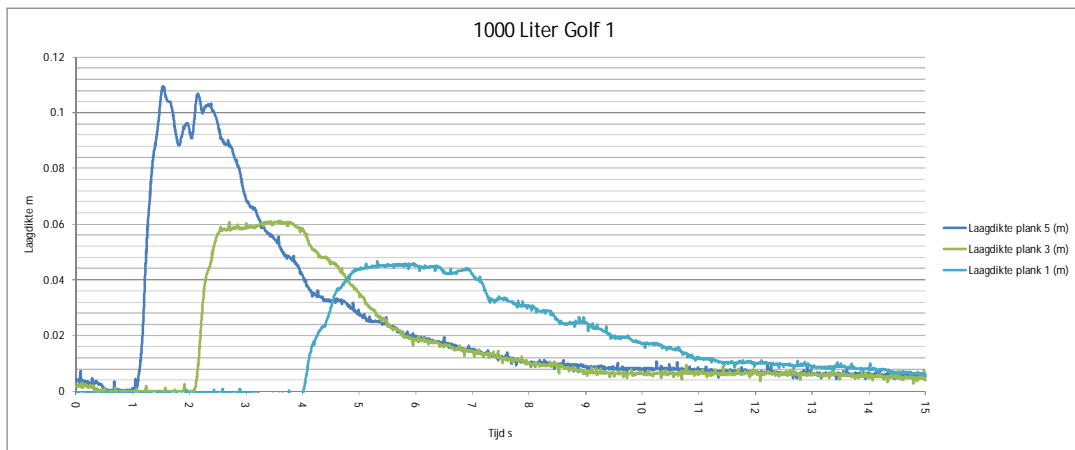
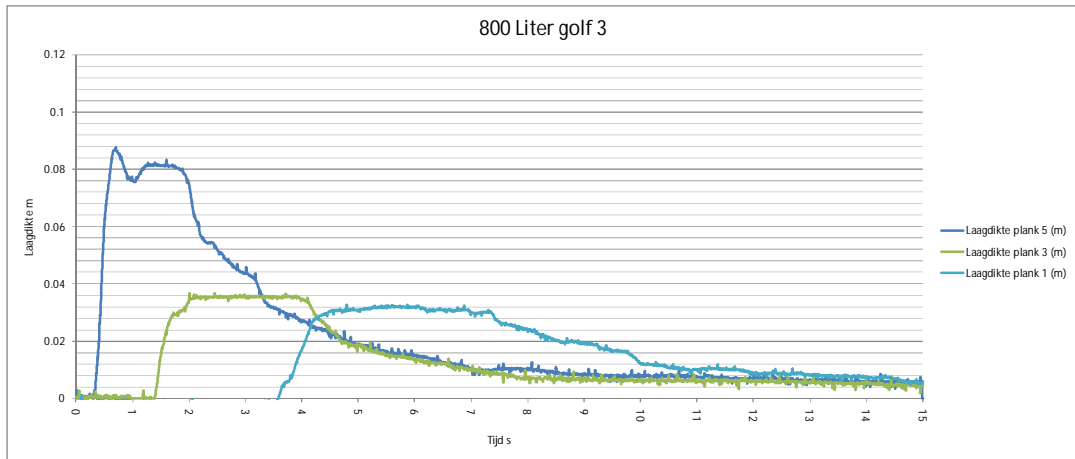
### **Meetsignalen van laagdikte en snelheid**



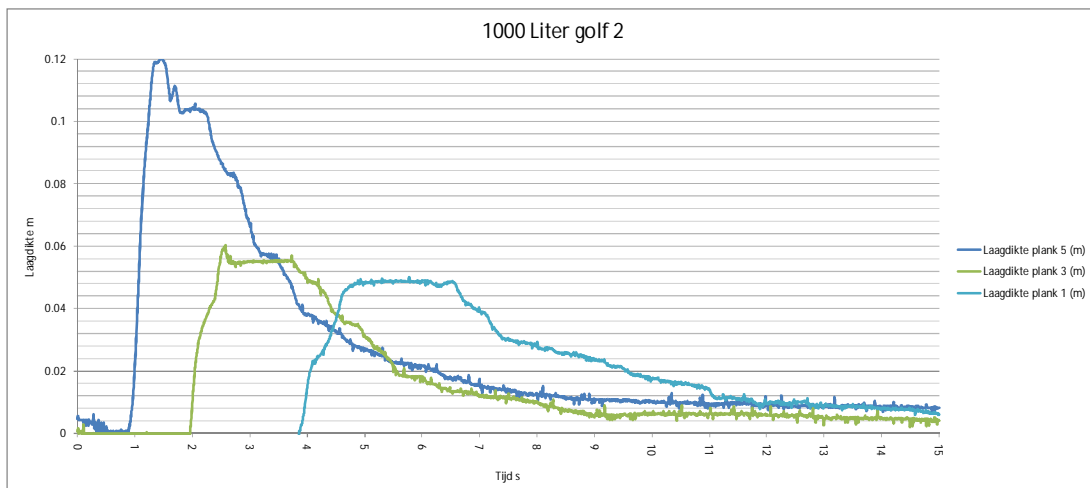




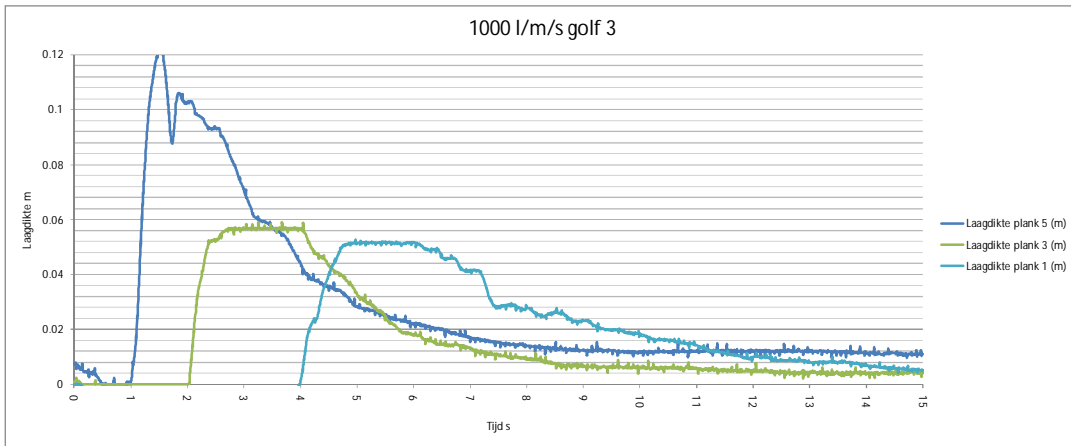




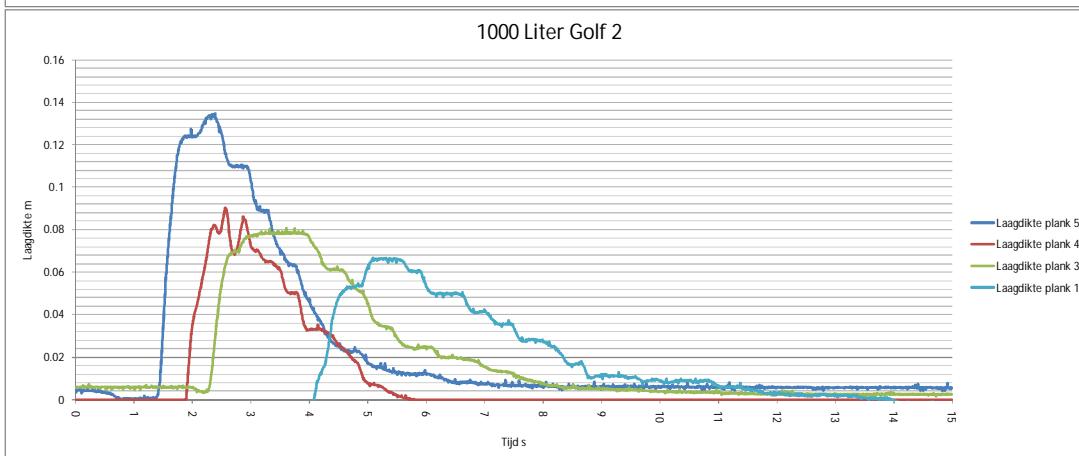
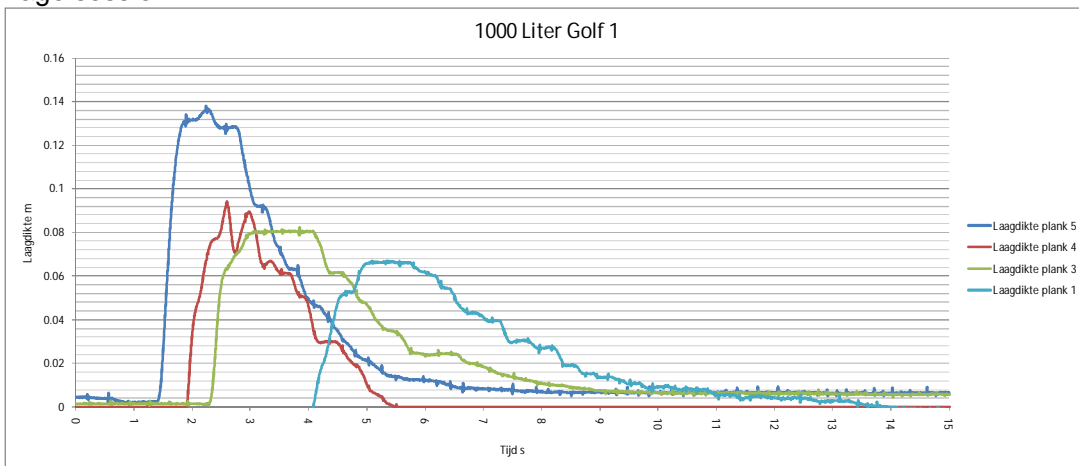
Lage sessie

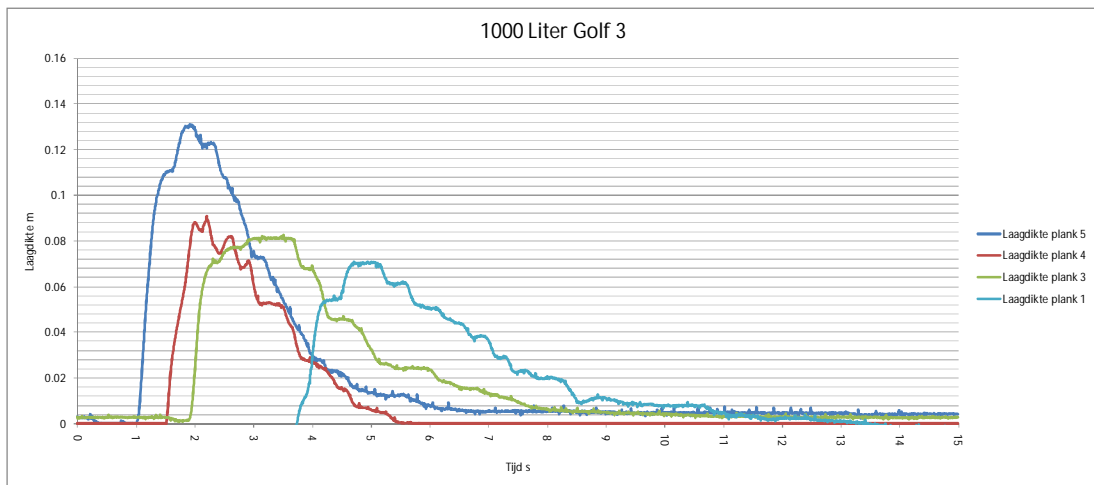


Lage sessie

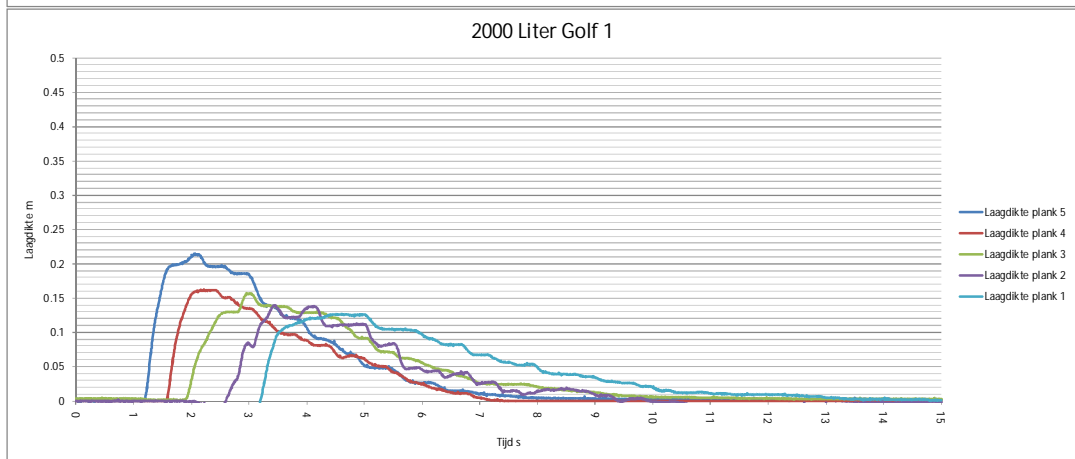
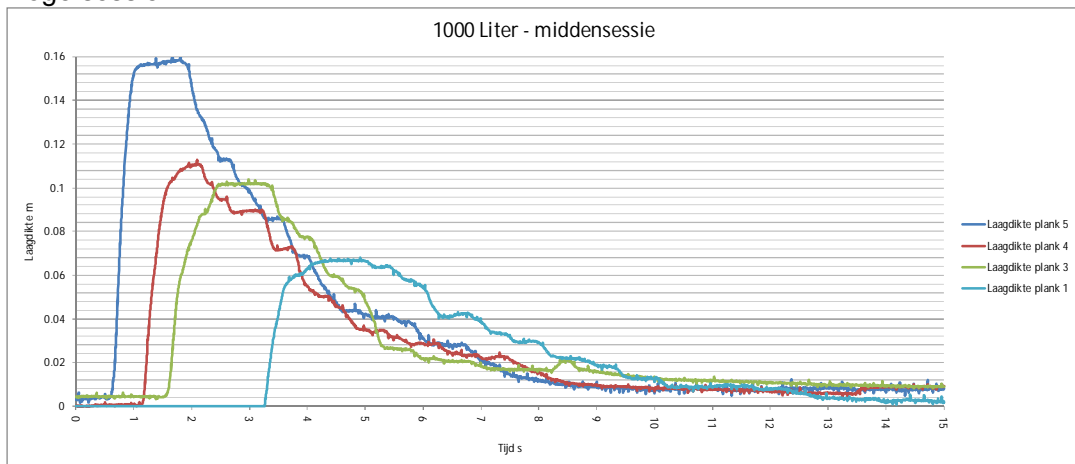


## Lage sessie

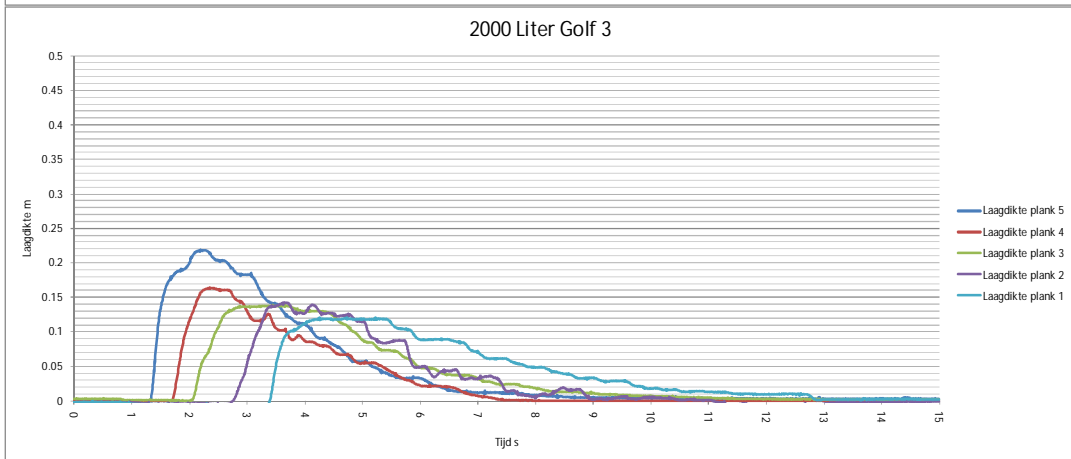




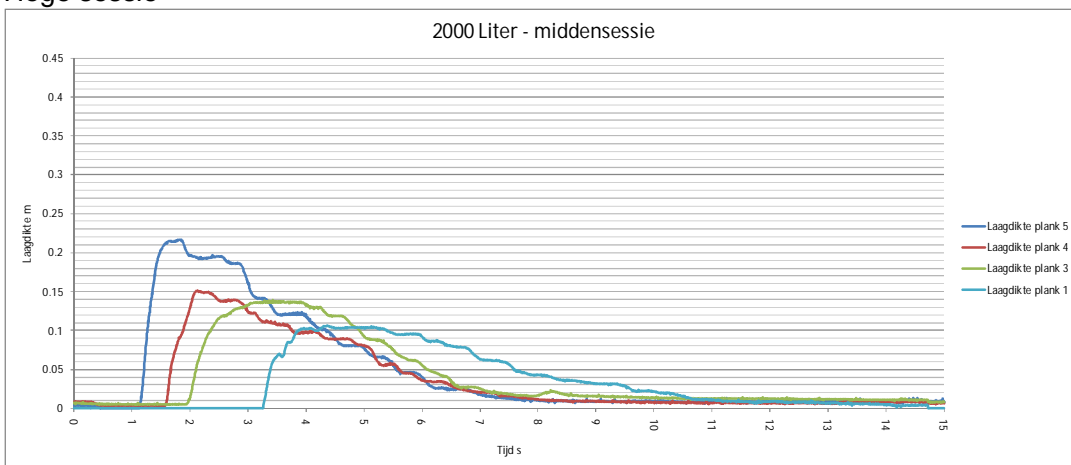
**Hoge sessie**

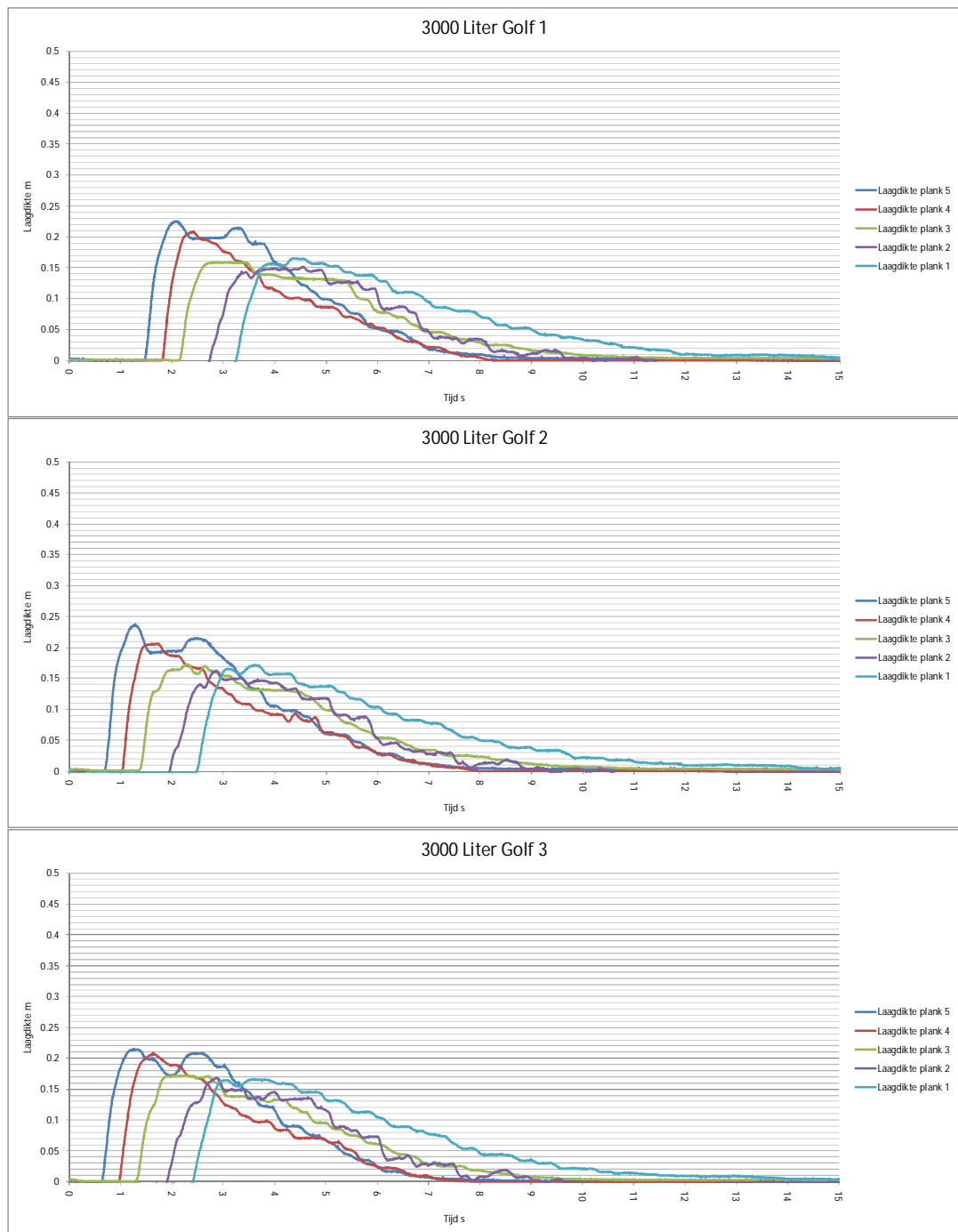




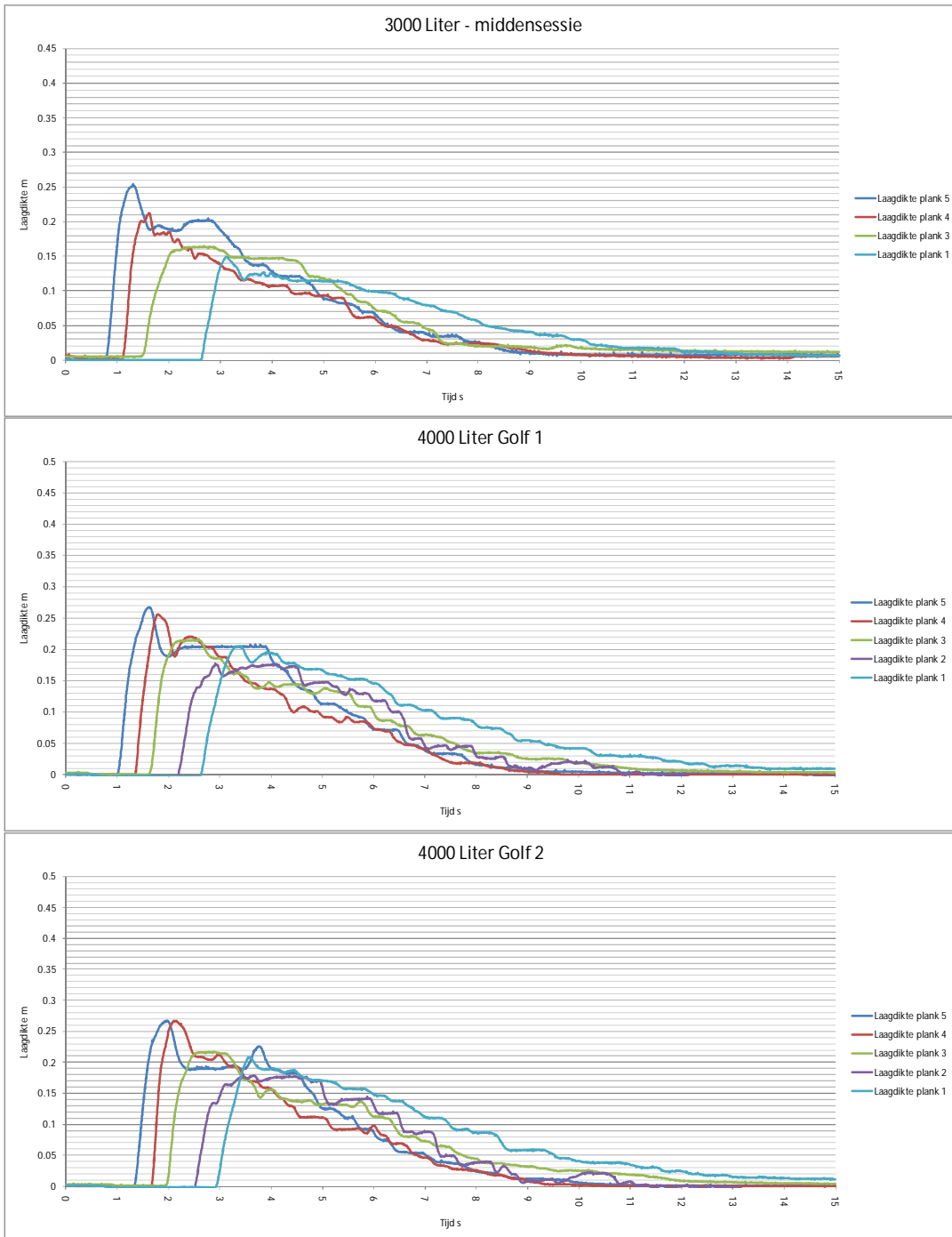


## Hoge sessie



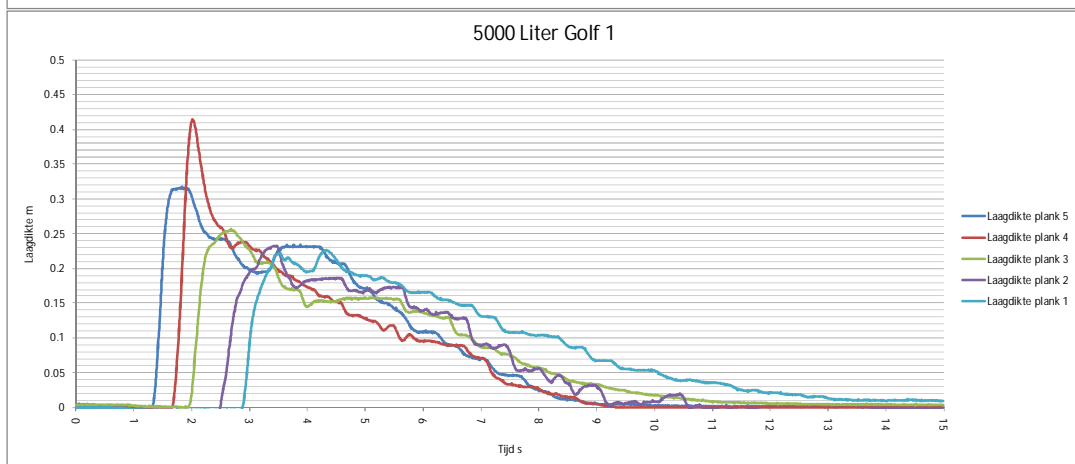
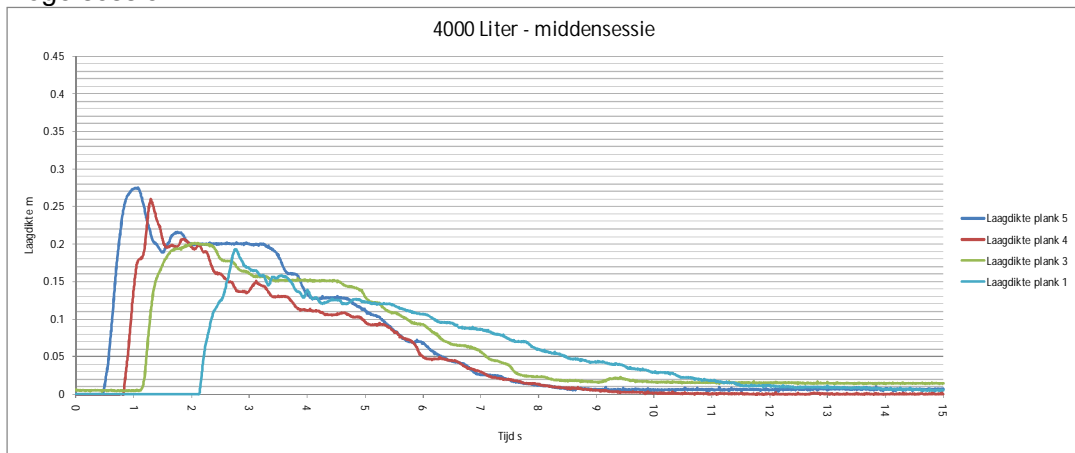


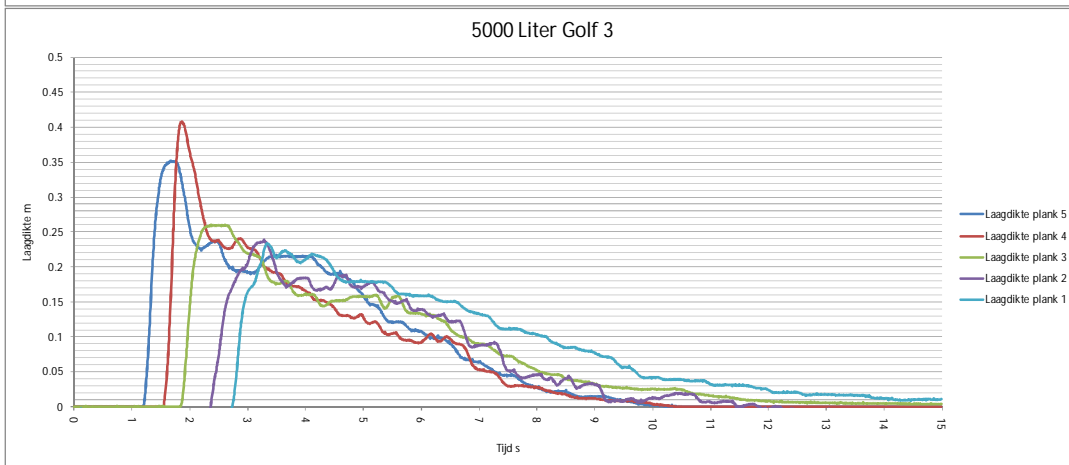
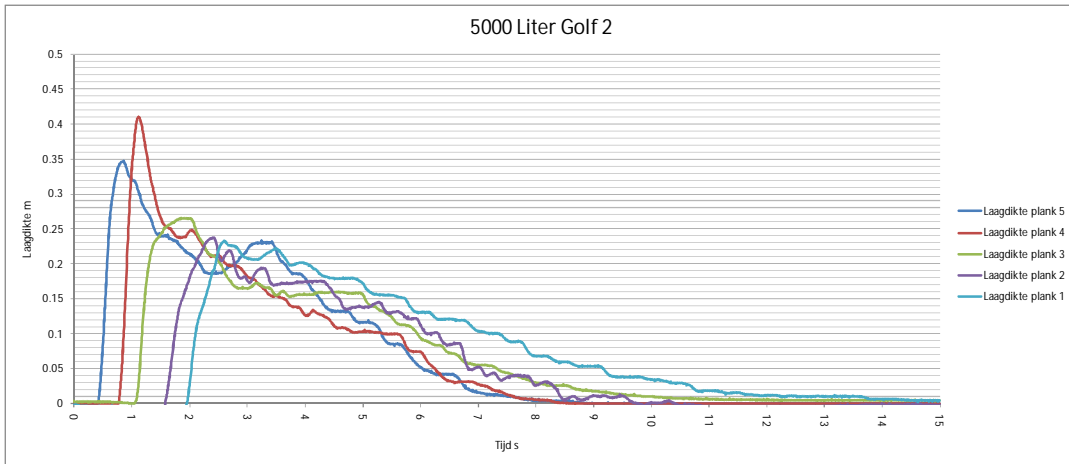
Hoge sessie



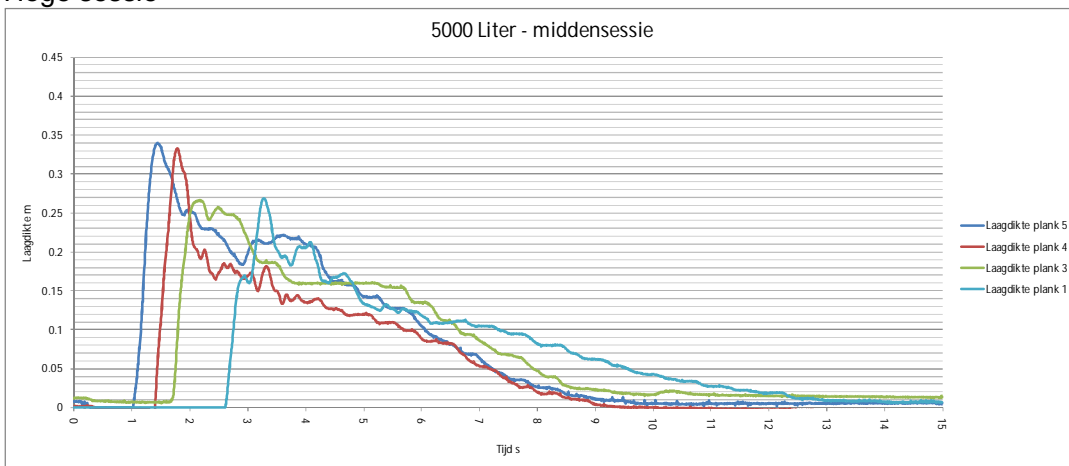


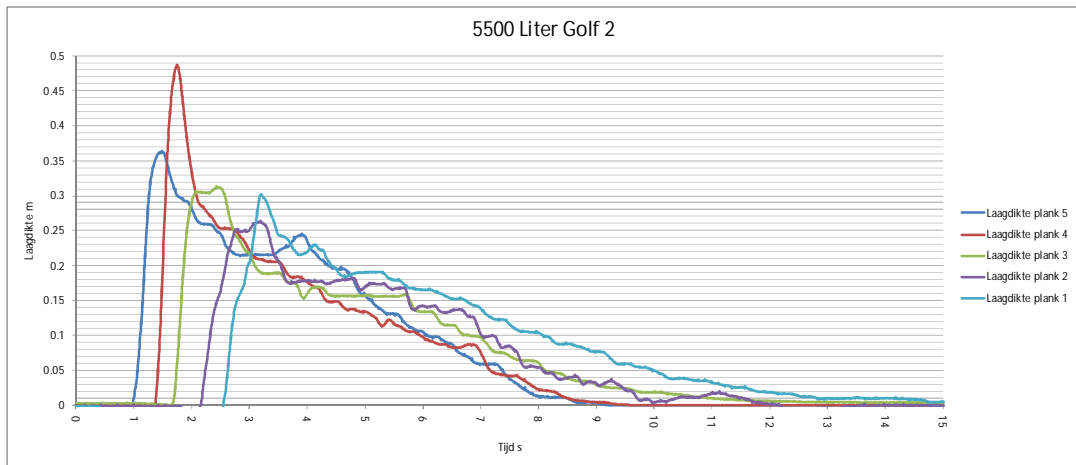
### Hoge sessie

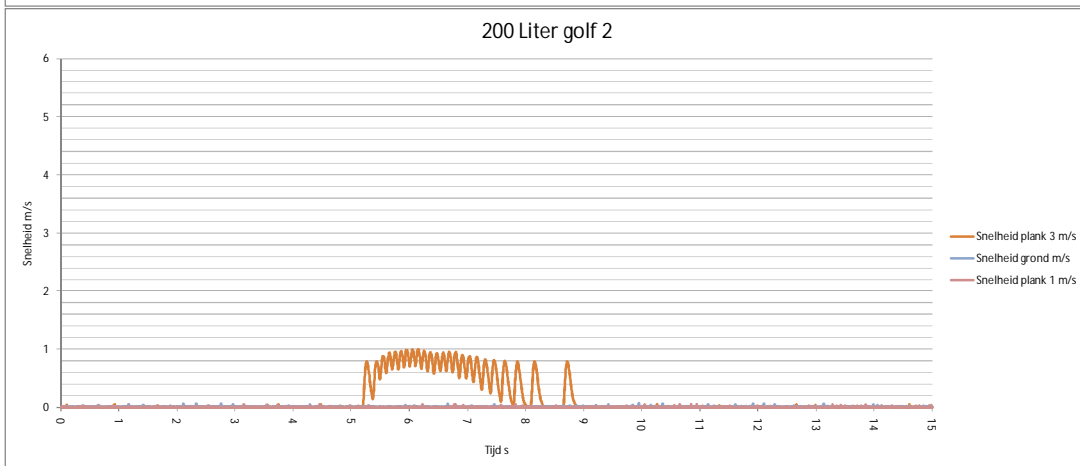
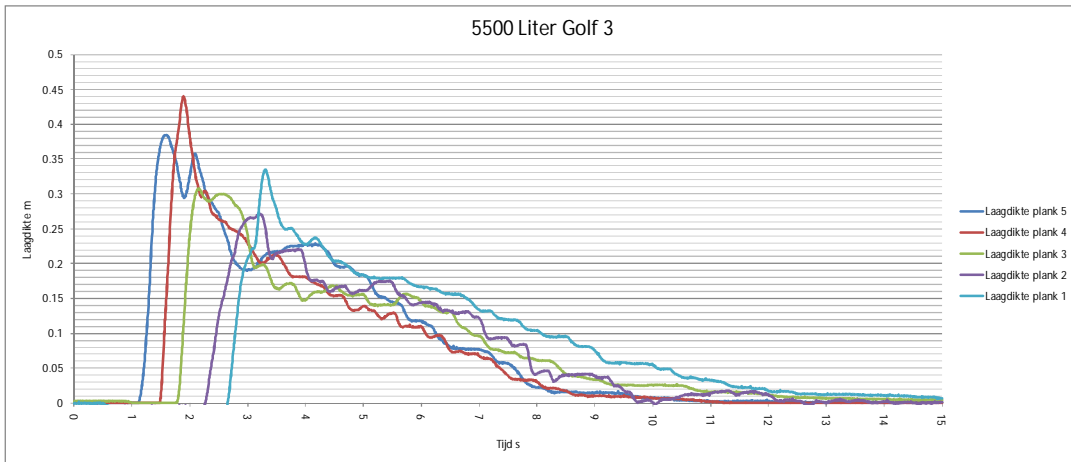


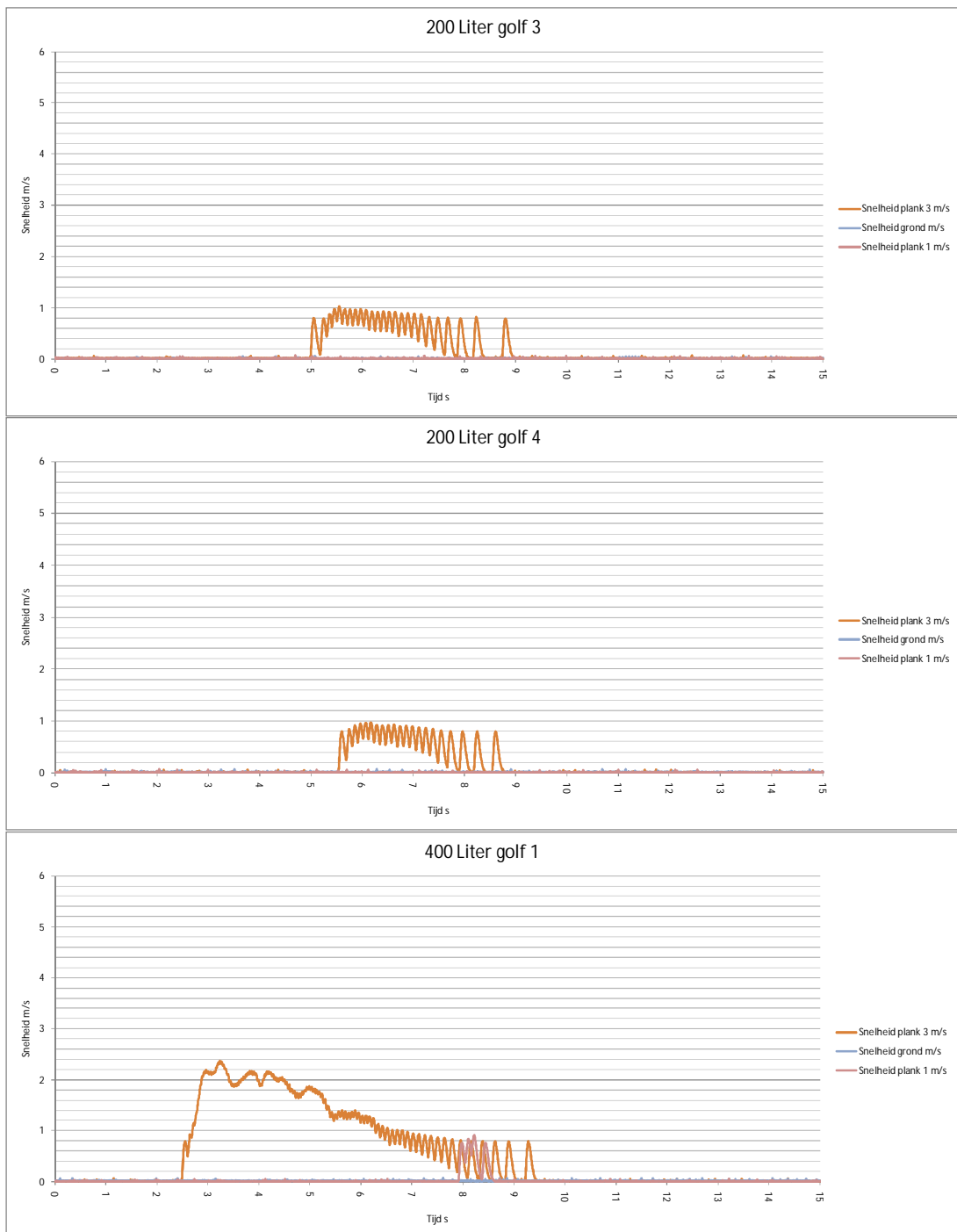


## Hoge sessie

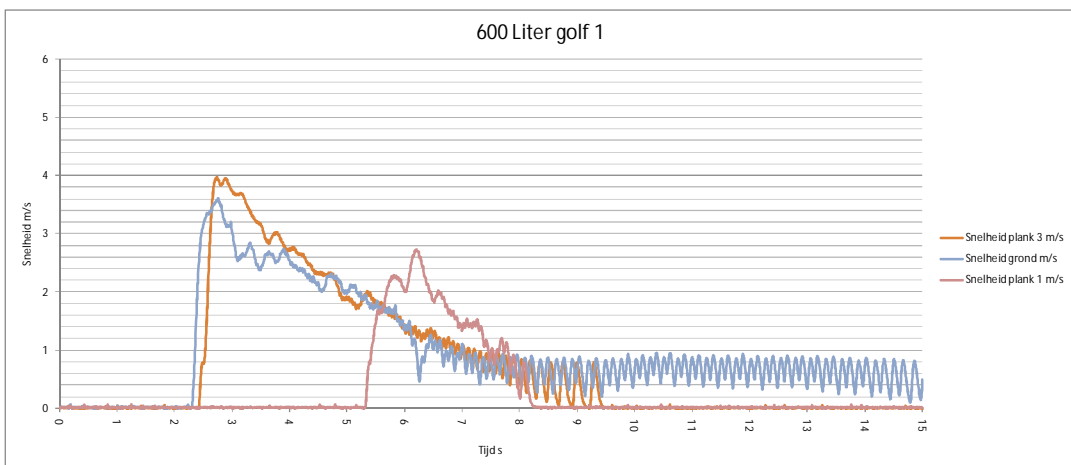
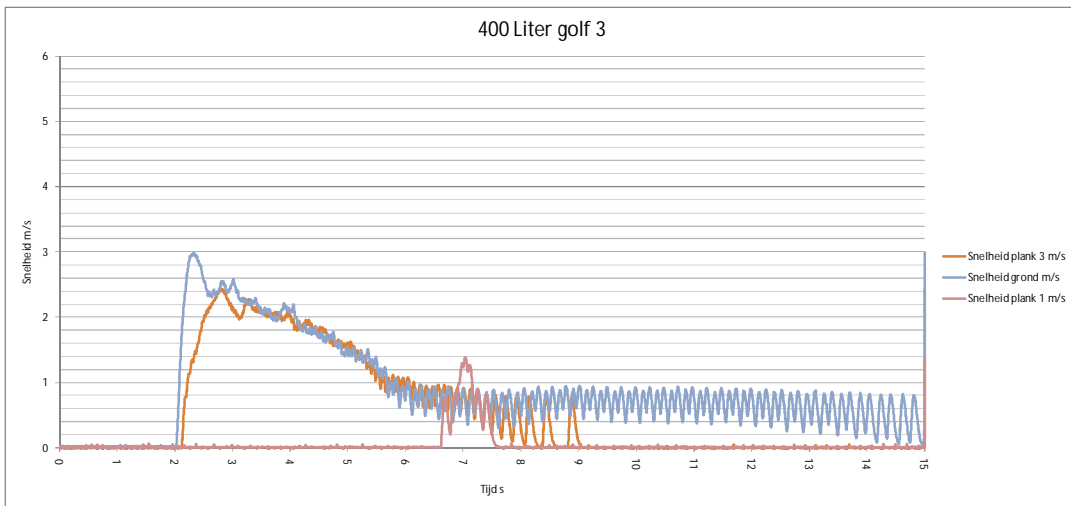
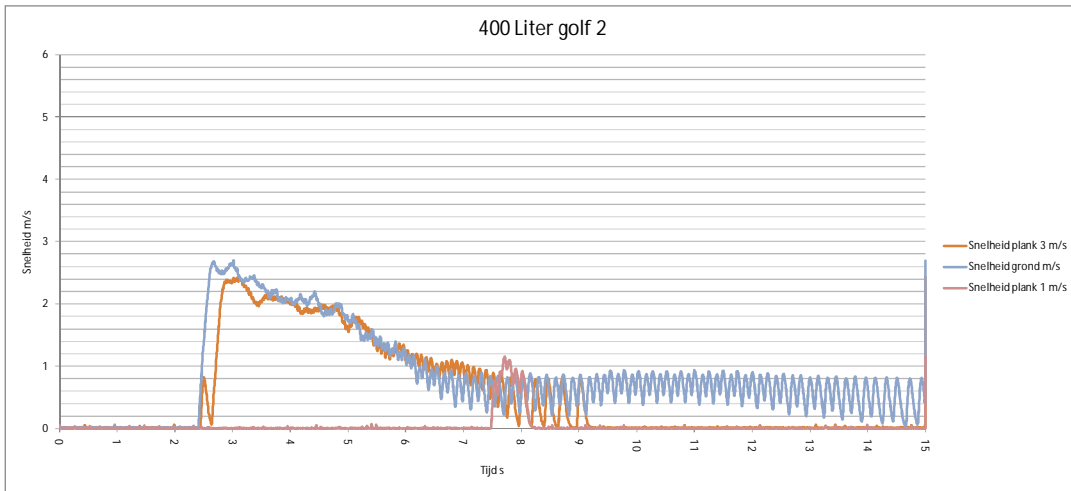


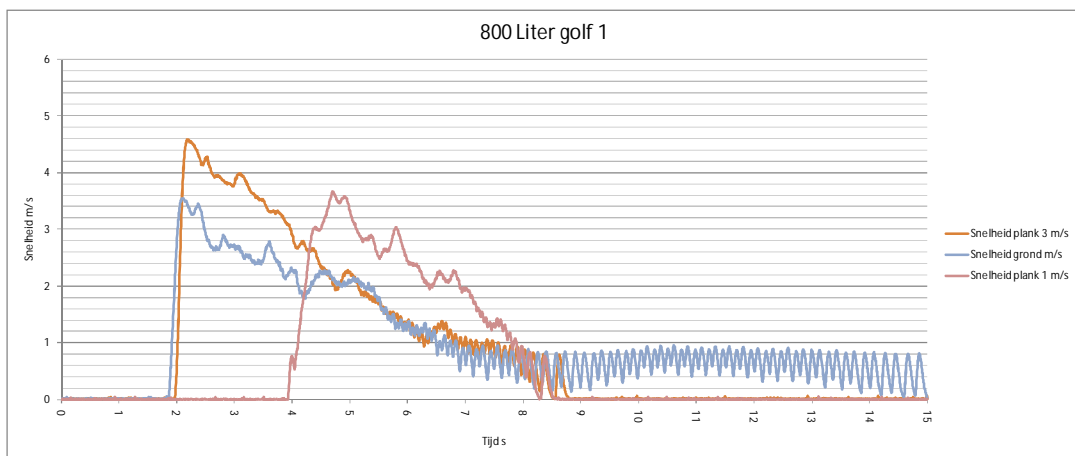
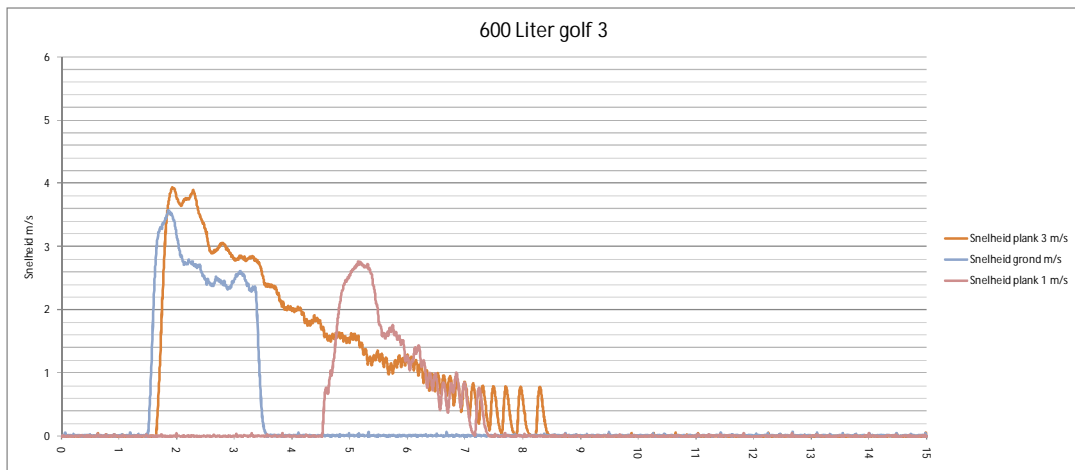
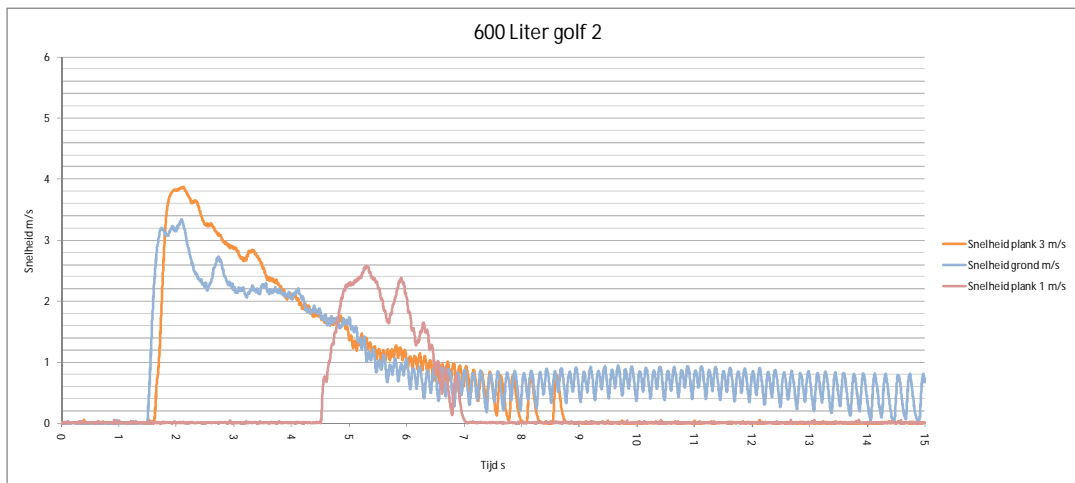


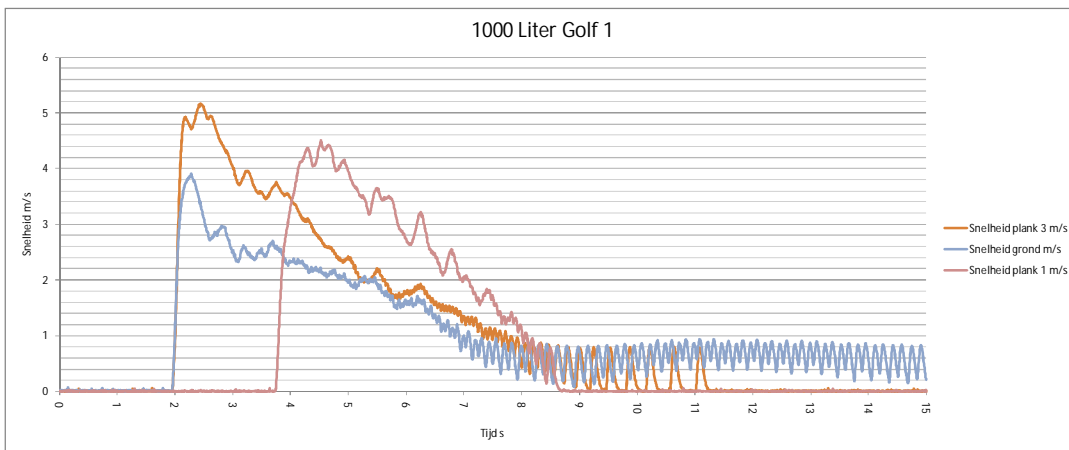
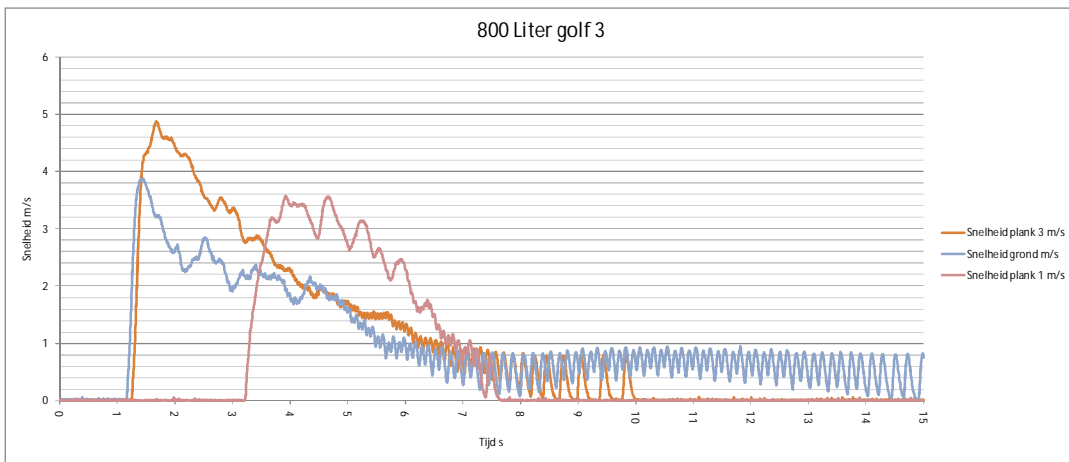
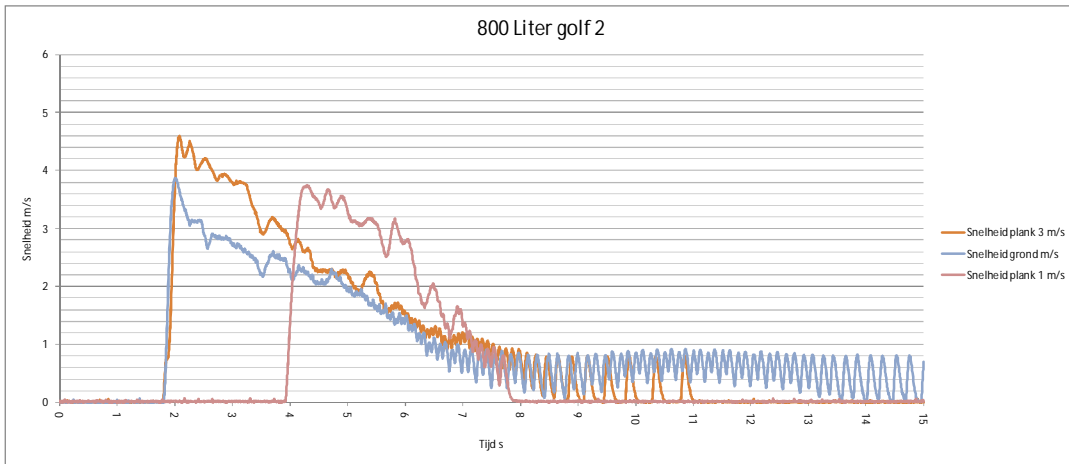




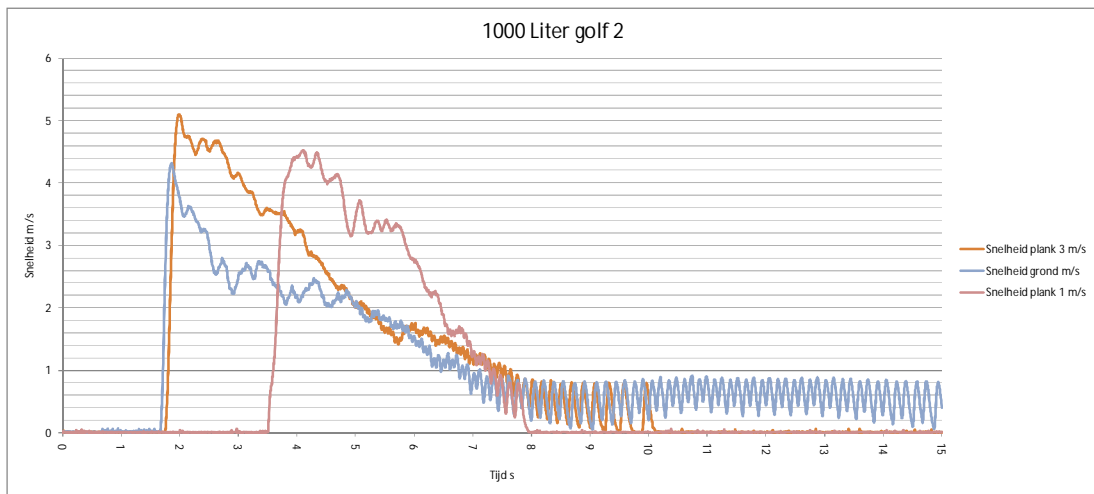




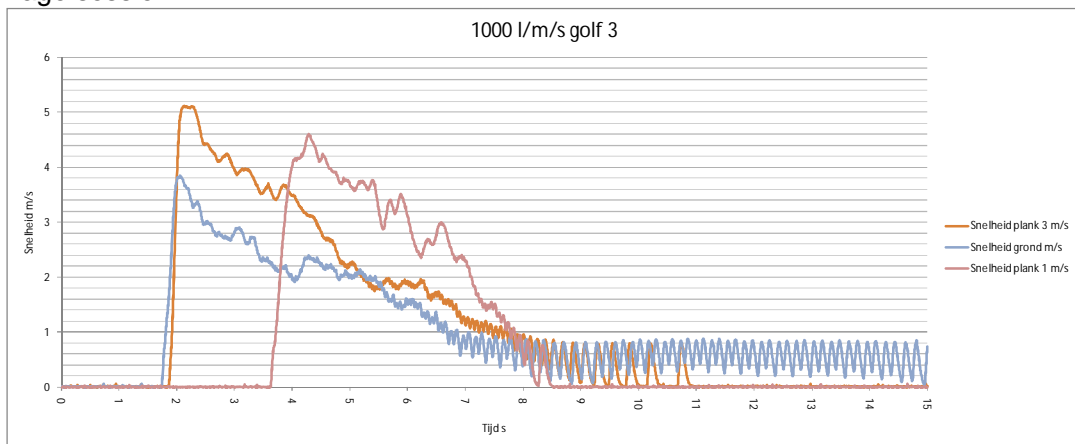




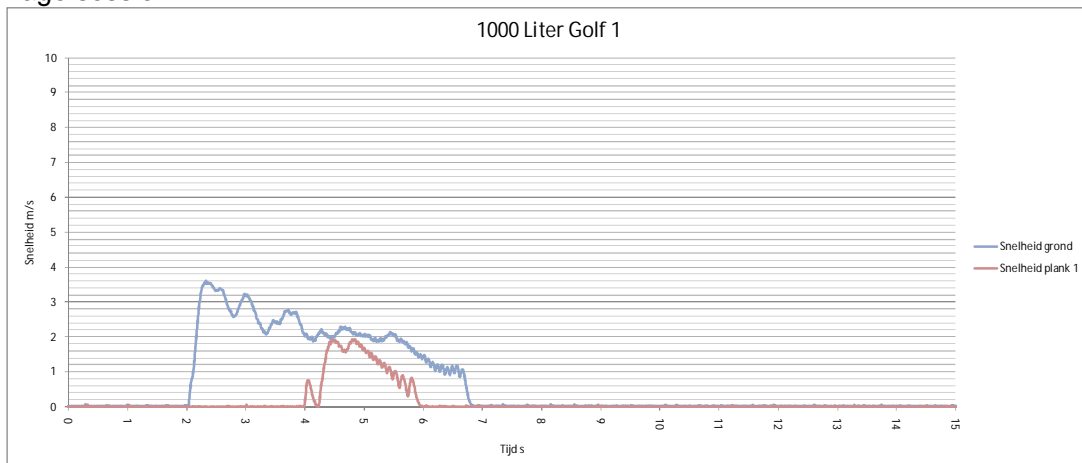
Lage sessie

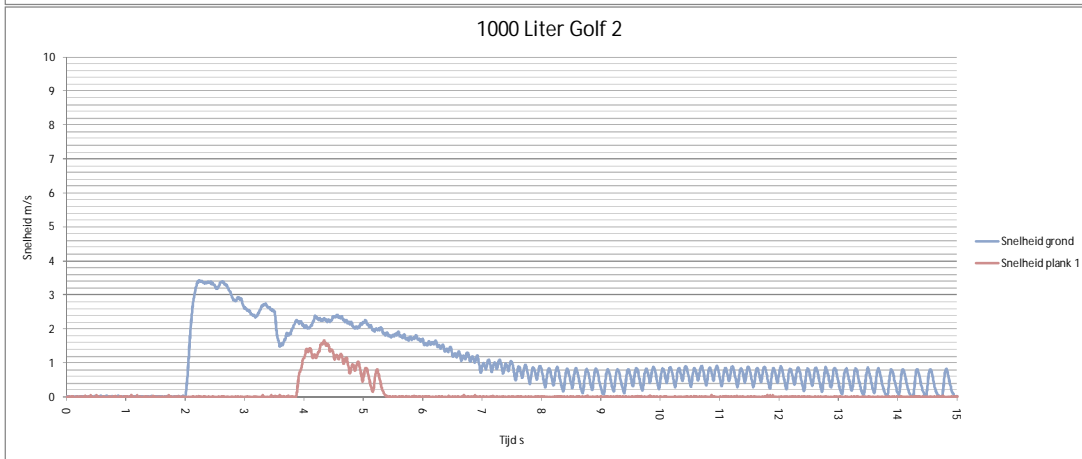
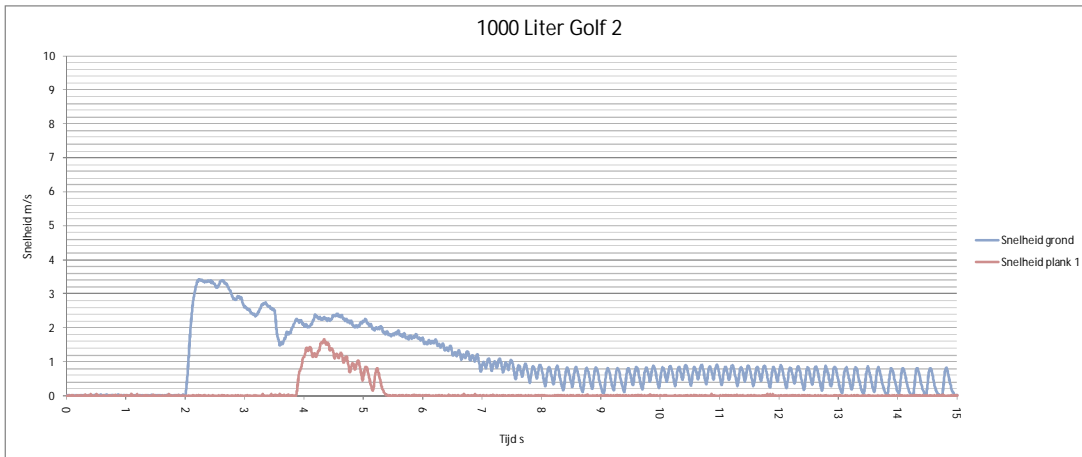


Lage sessie

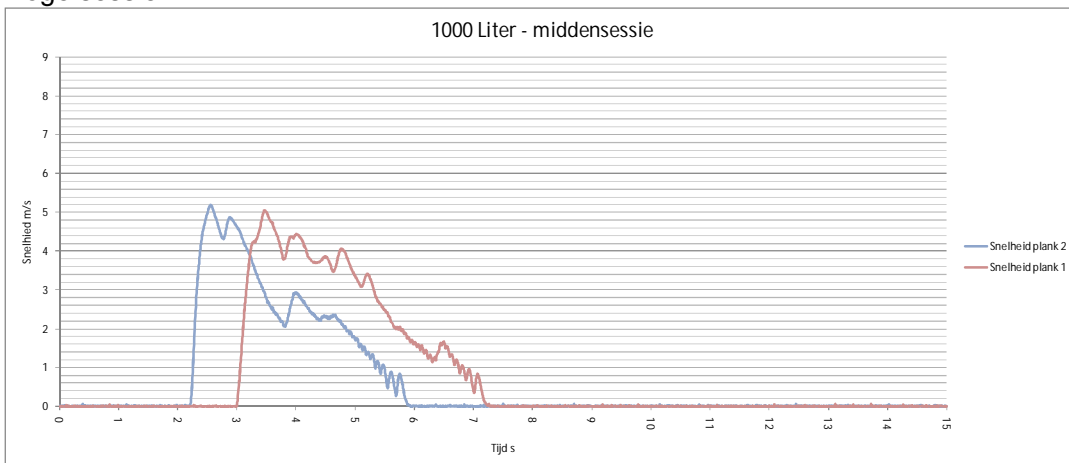


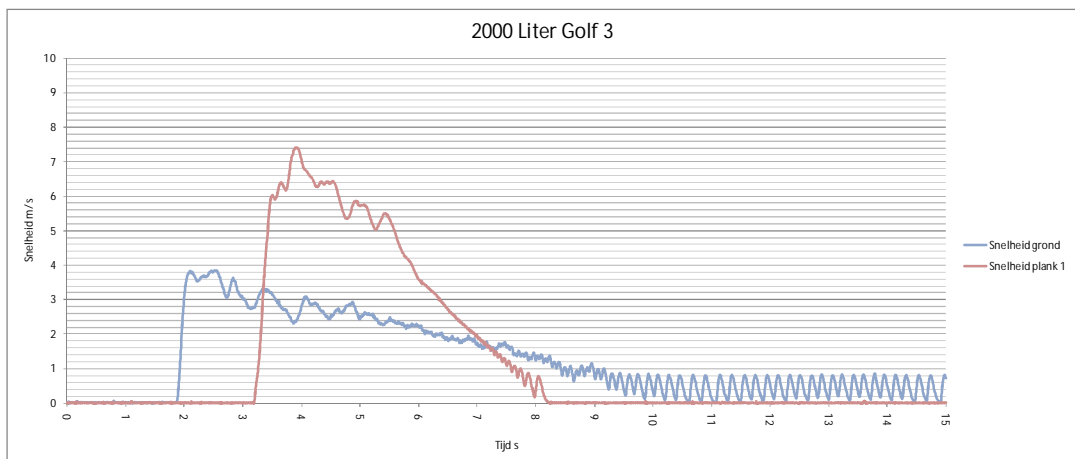
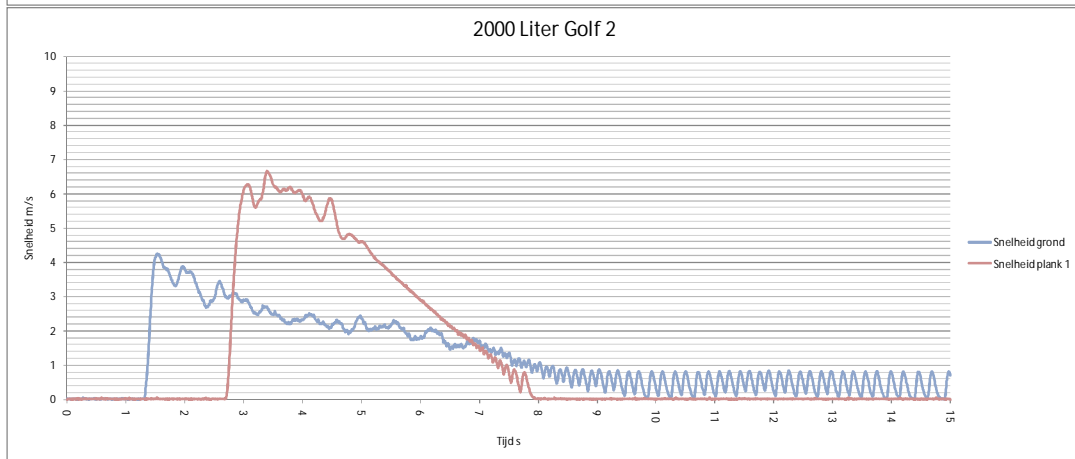
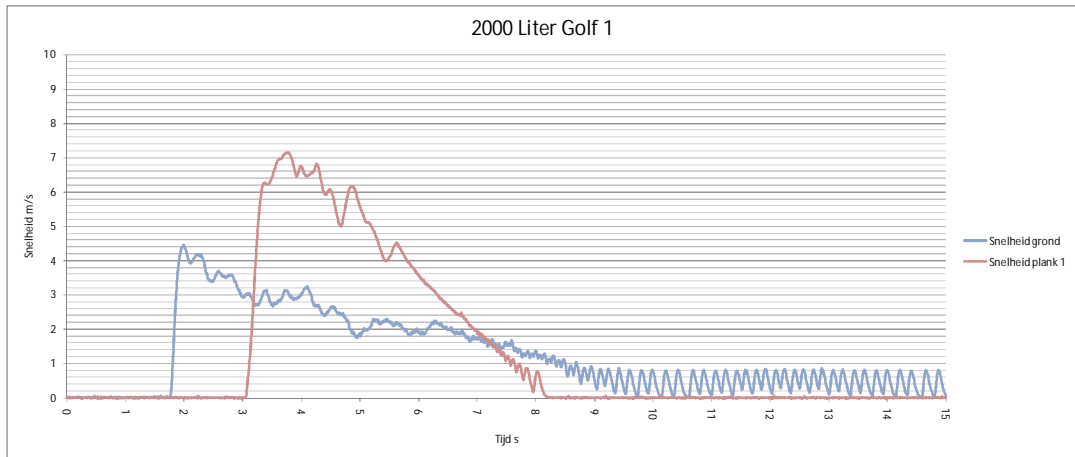
Lage sessie



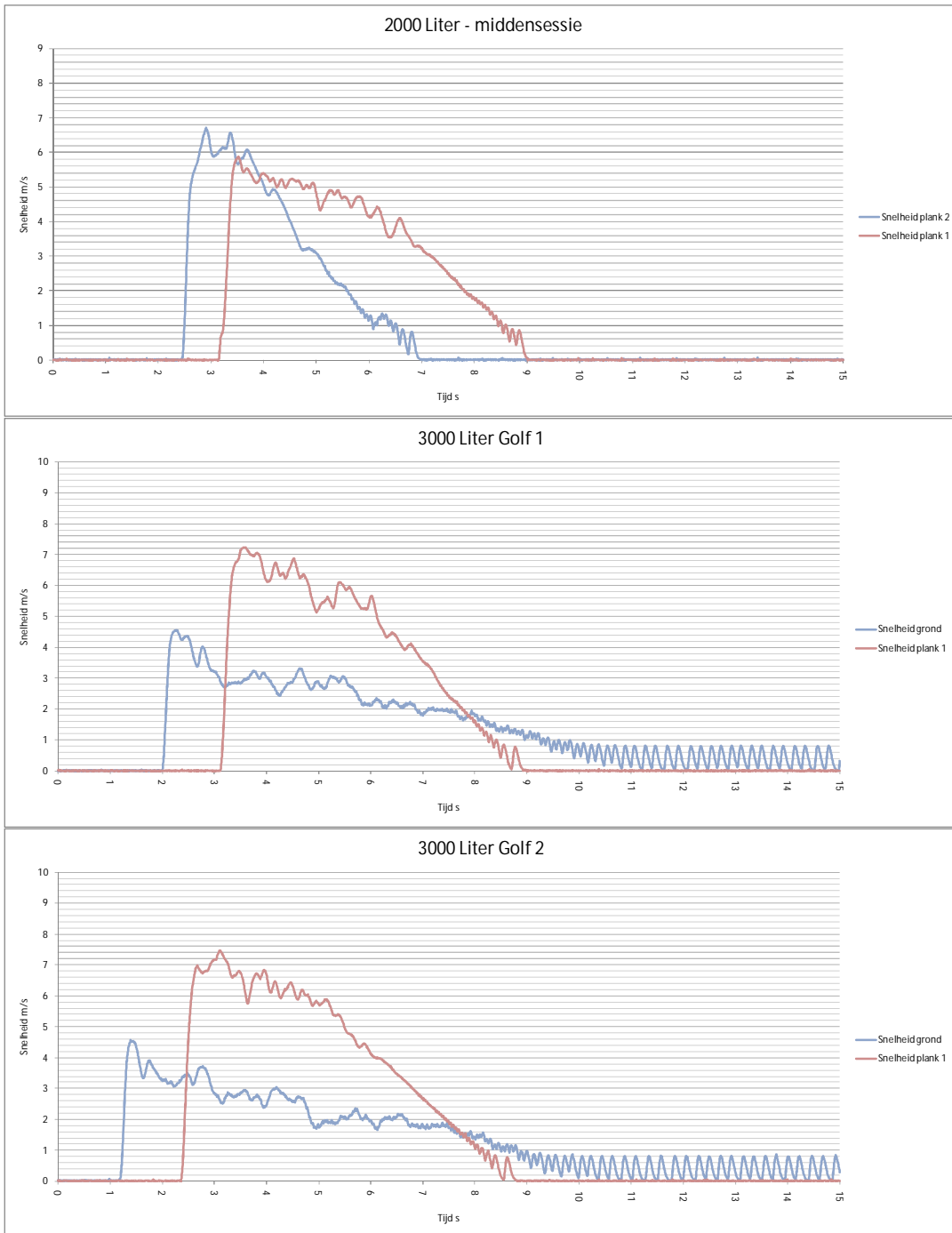


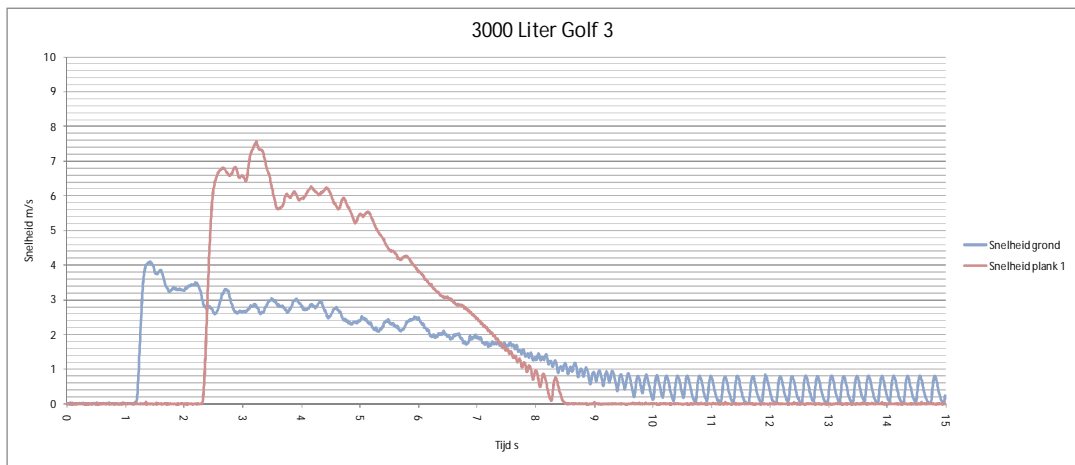
## Hoge sessie



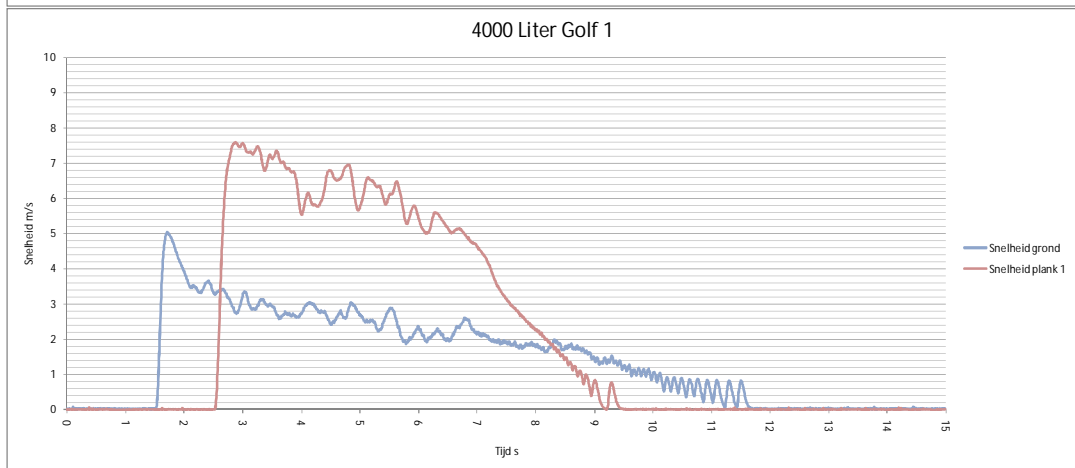
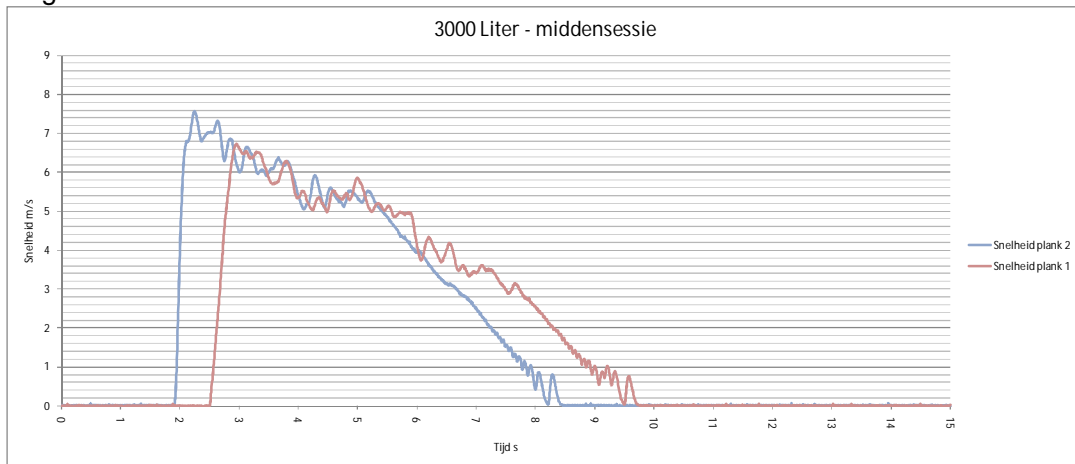


Hoge sessie

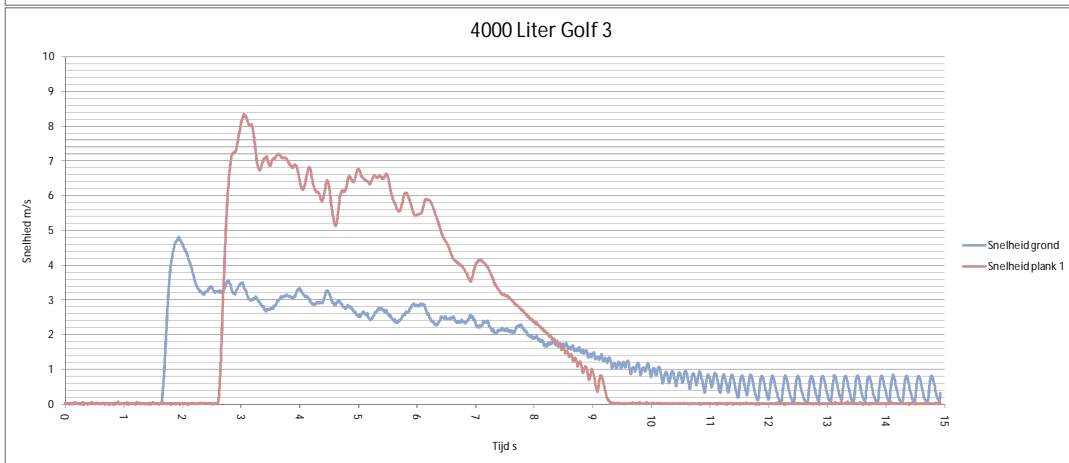




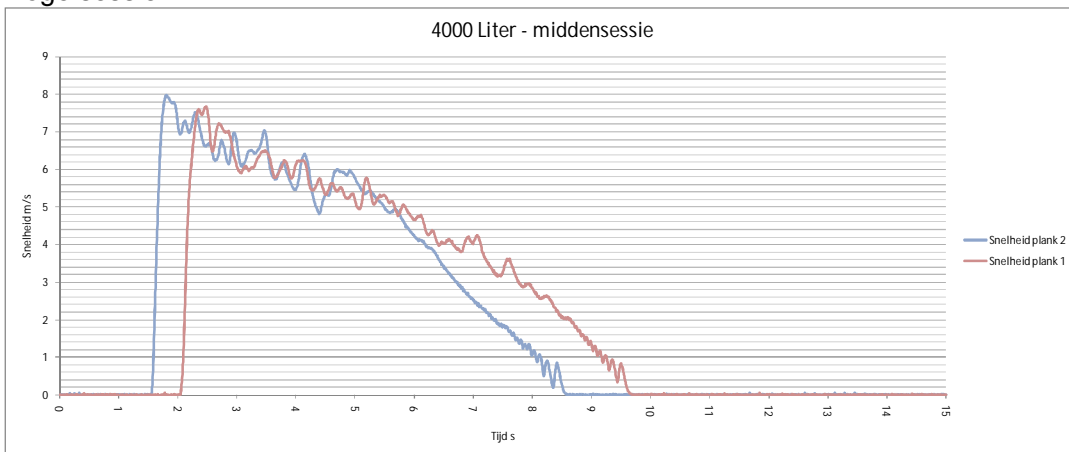
**Hoge sessie**

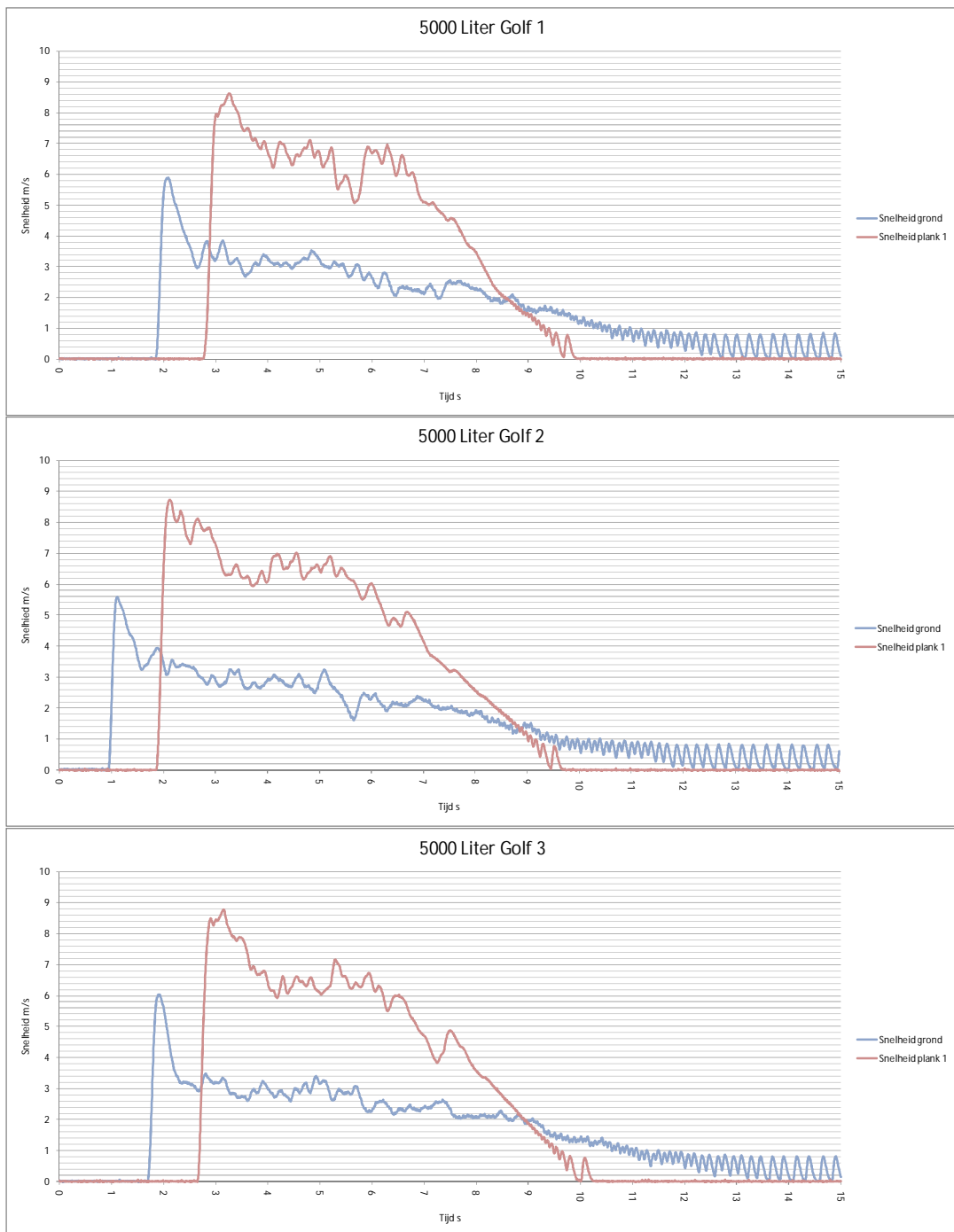




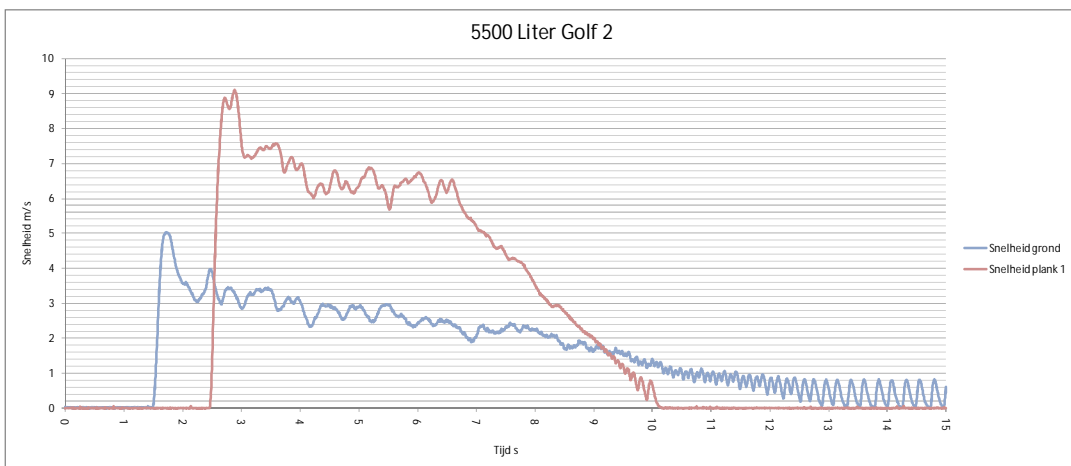
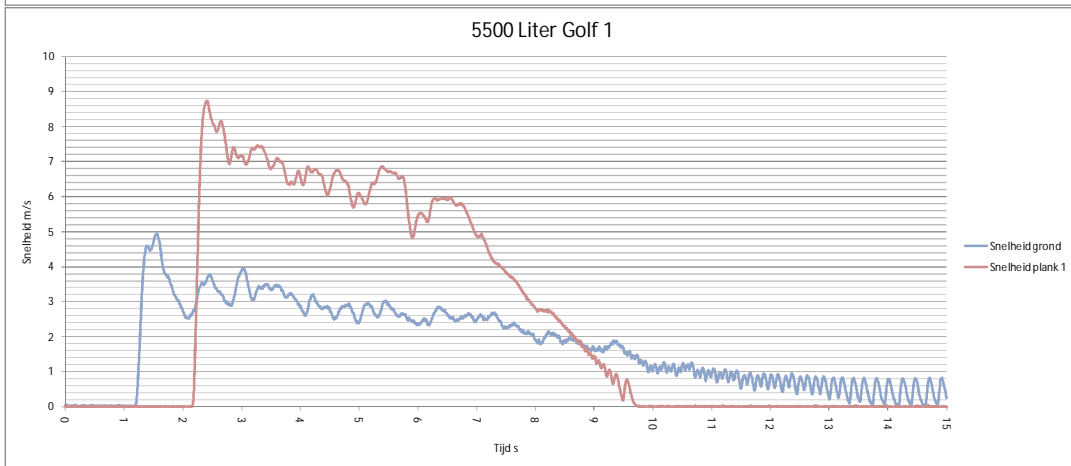


## Hoge sessie





Hoge sessie

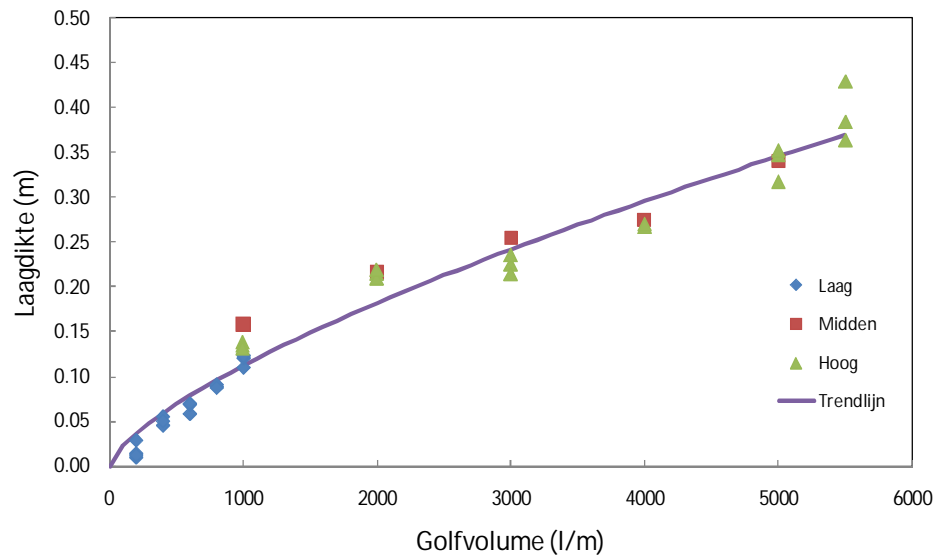




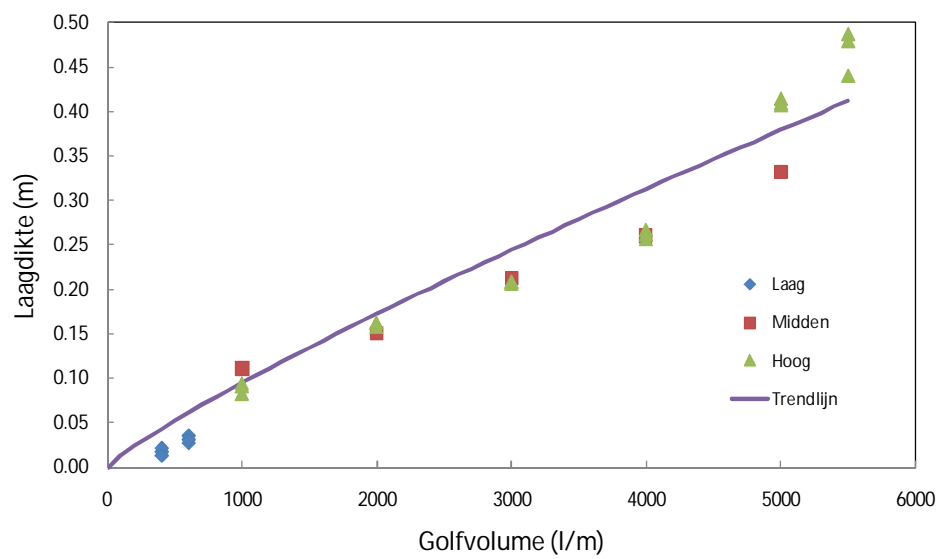
## **Annex 3**

**Maximale laagdikten, snelheden en overslagtijden als functie van  
golfvolume  
Niet aangepaste meetreeksen**

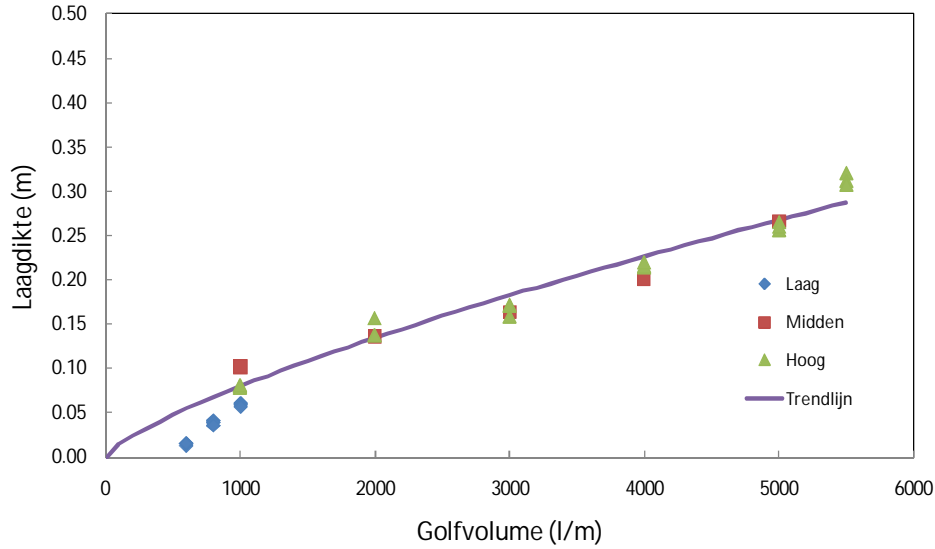
Laagdikte Plank 5



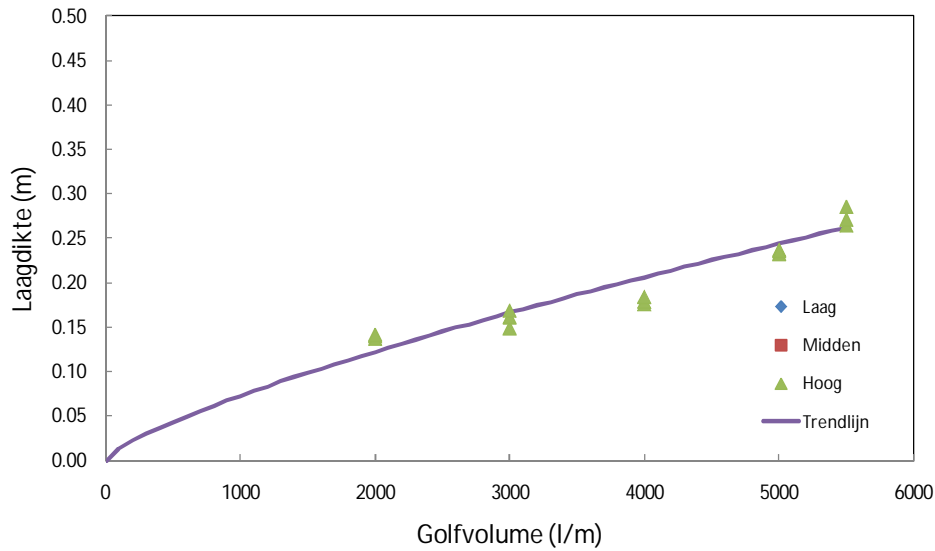
Laagdikte Plank 4



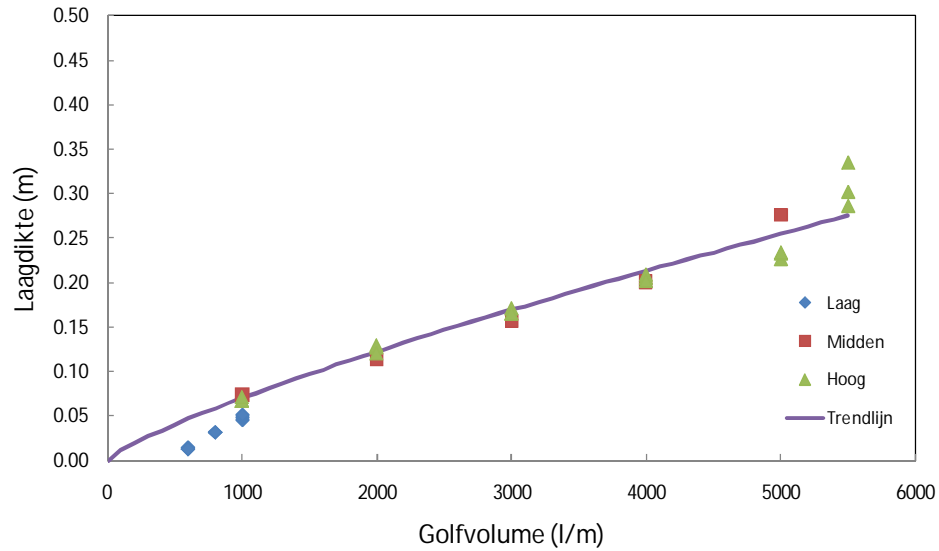
### Laagdikte Plank 3



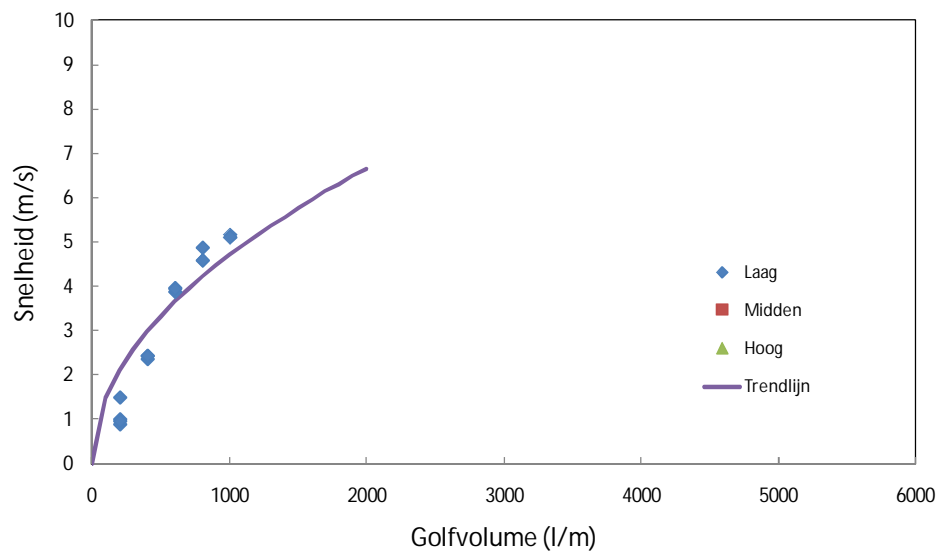
### Laagdikte Plank 2



Laagdikte Plank 1

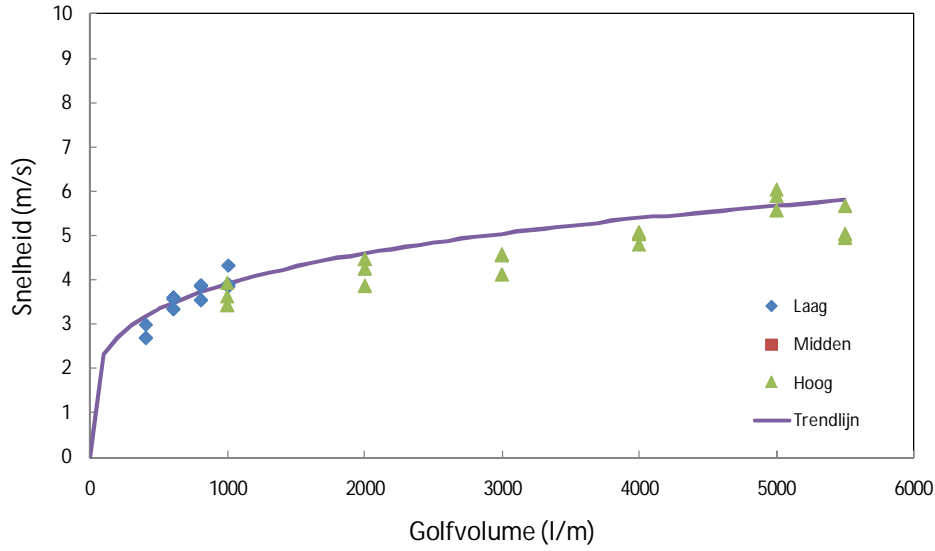


Snelheid Plank 3

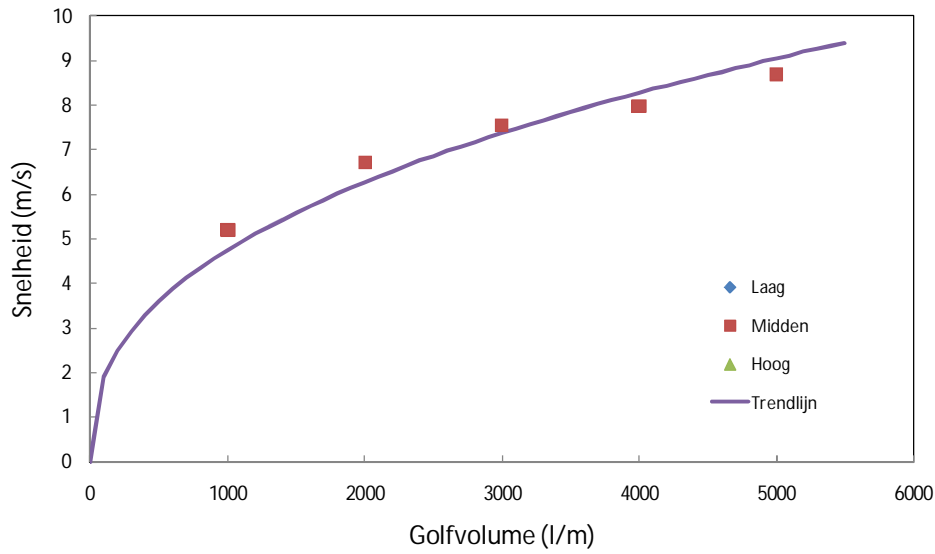




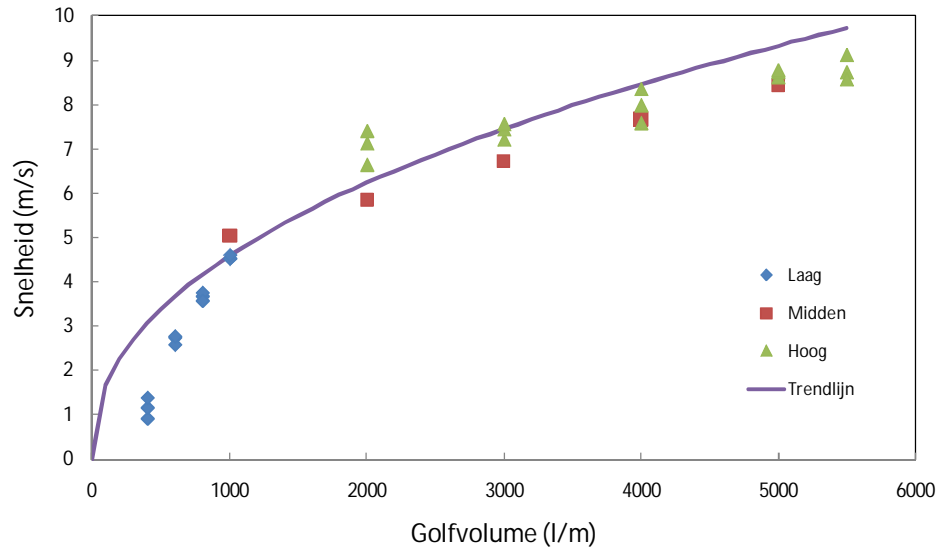
### Snelheid Grond



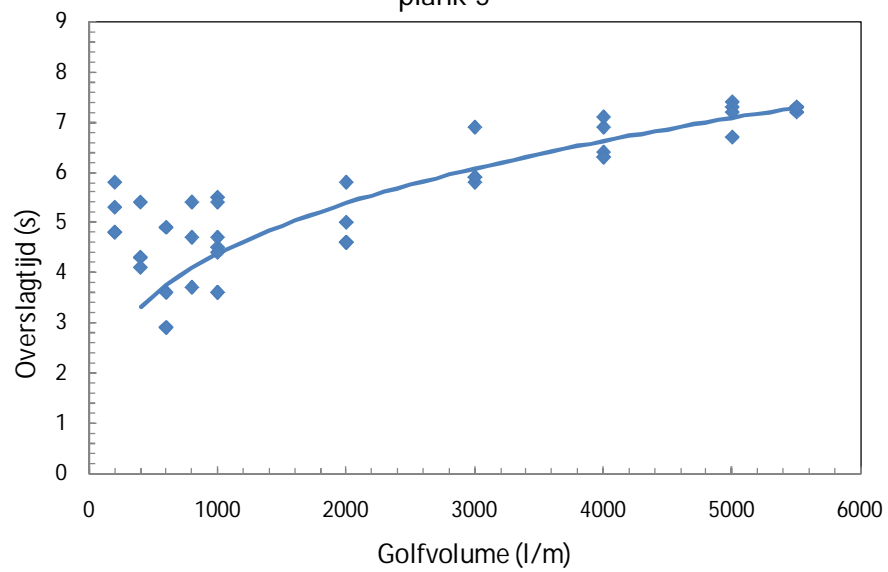
### Snelheid Plank 2

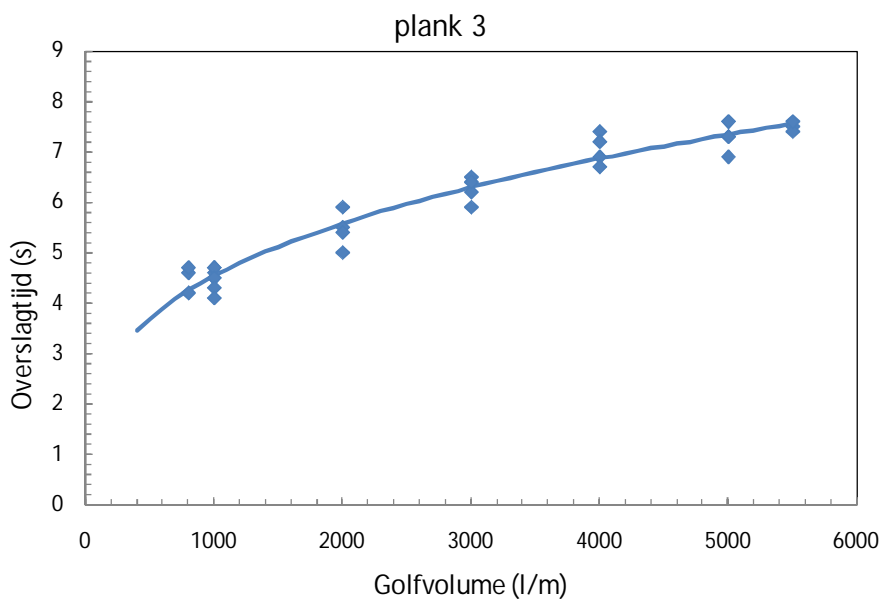
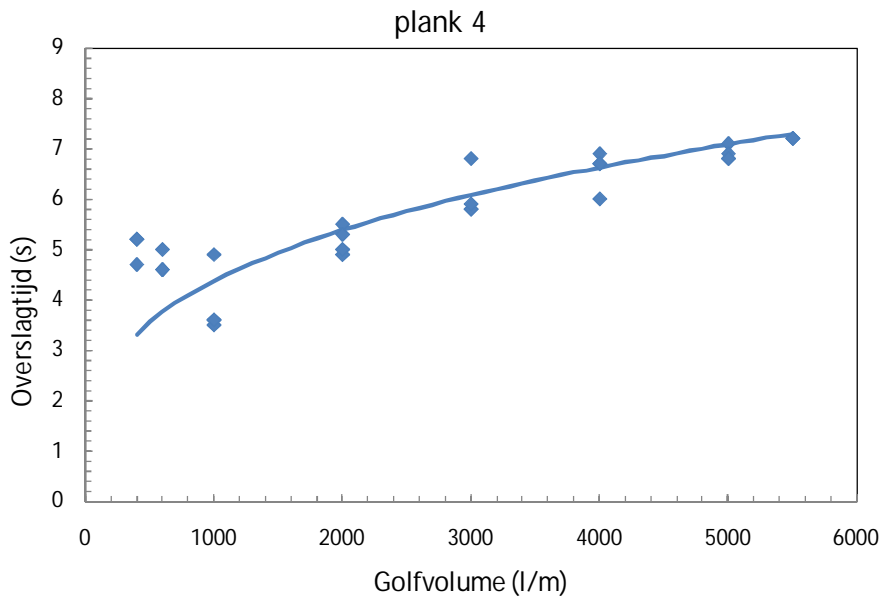


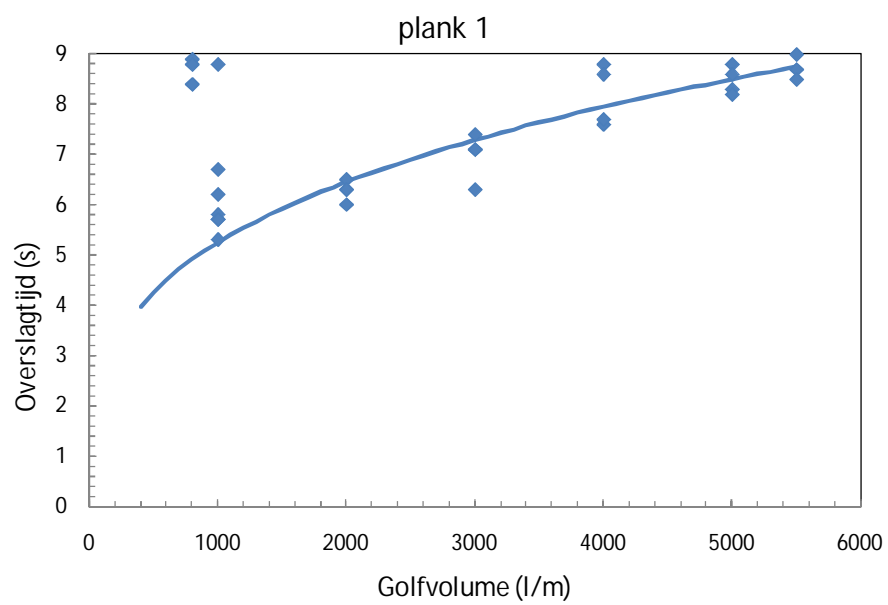
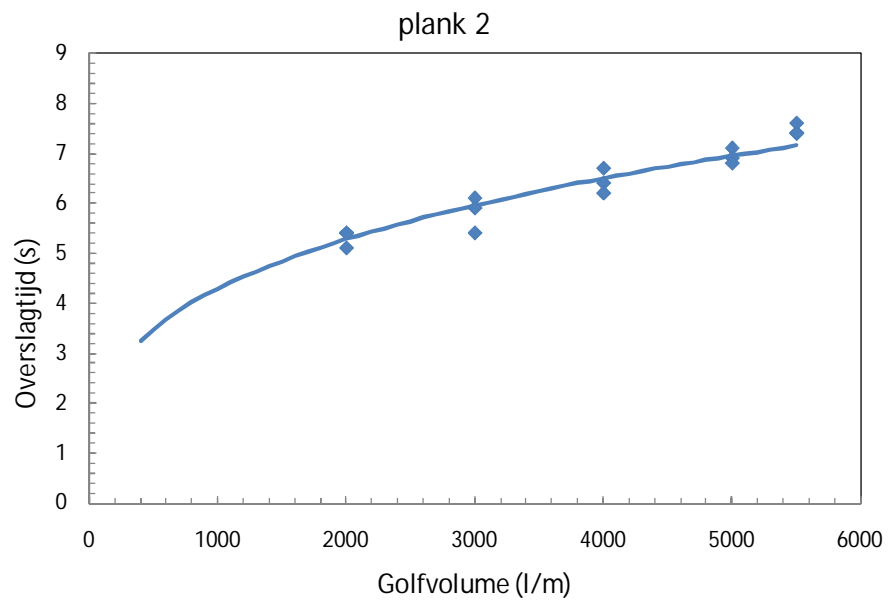
Snelheid Plank 1



plank 5



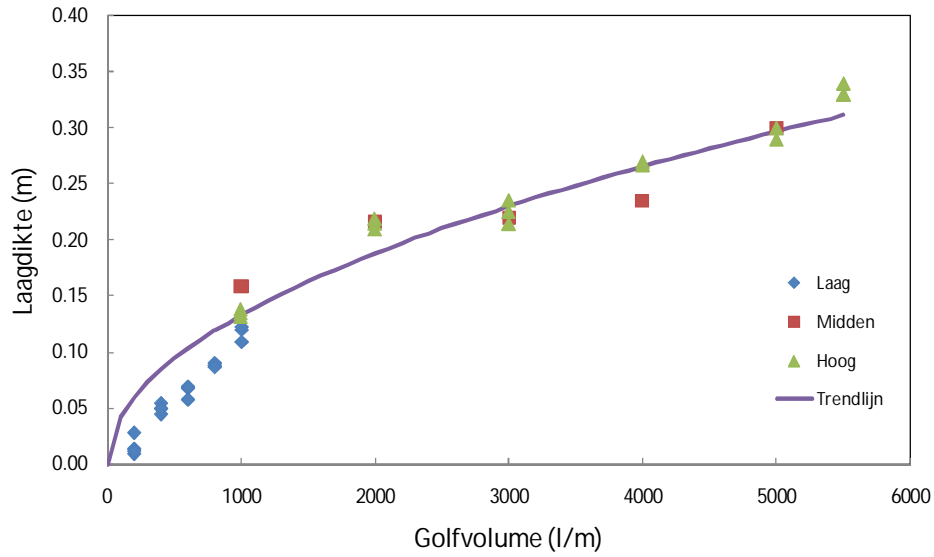




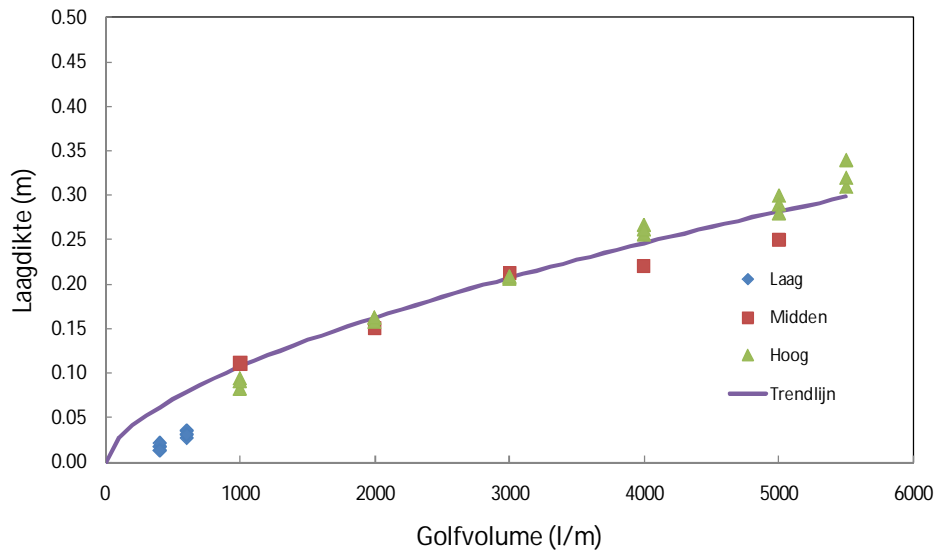
## **Annex 4**

### **Maximale laagdikten als functie van golfvolume Aangepaste meetreeksen**

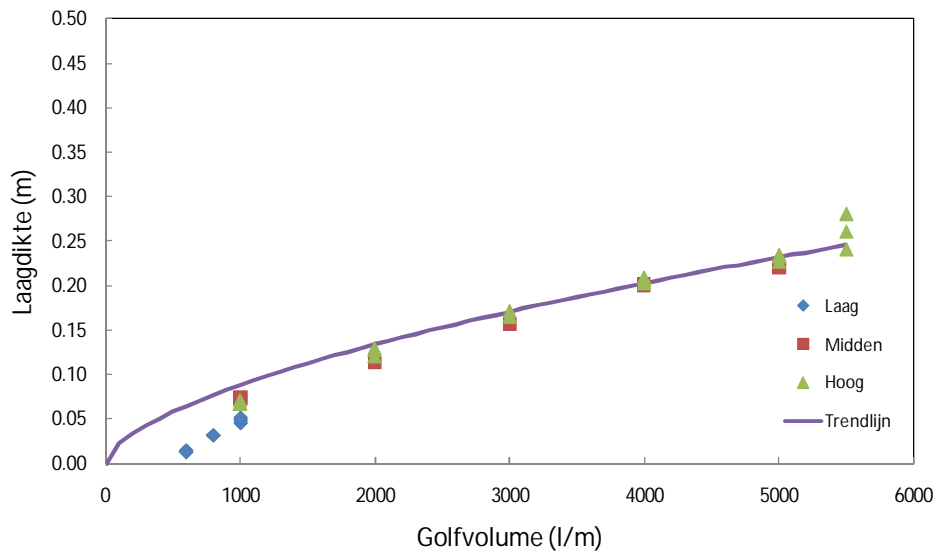
Laagdikte Plank 5



Laagdikte Plank 4



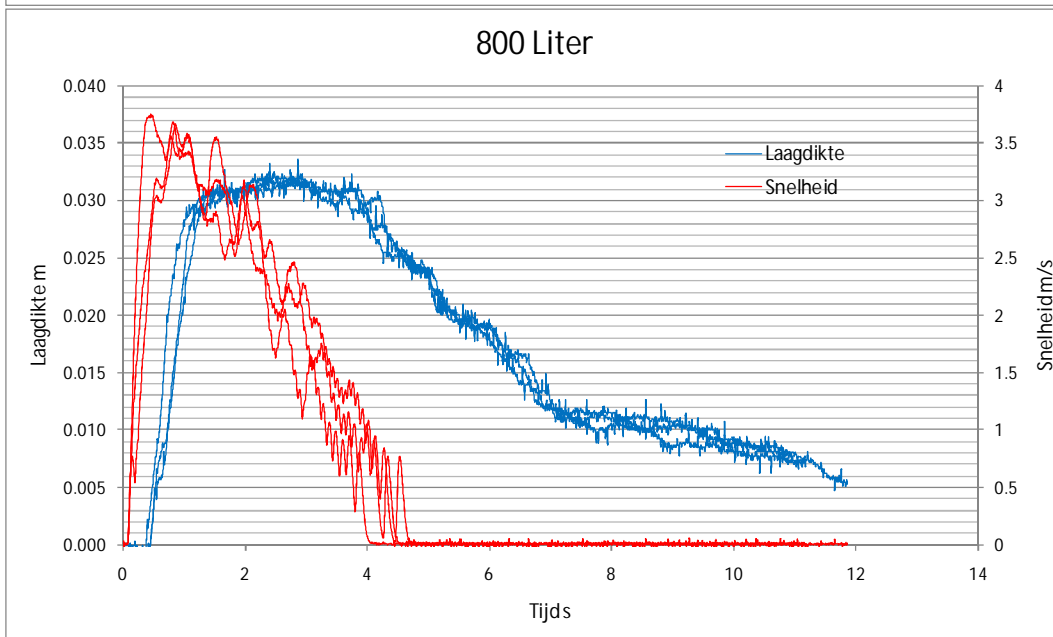
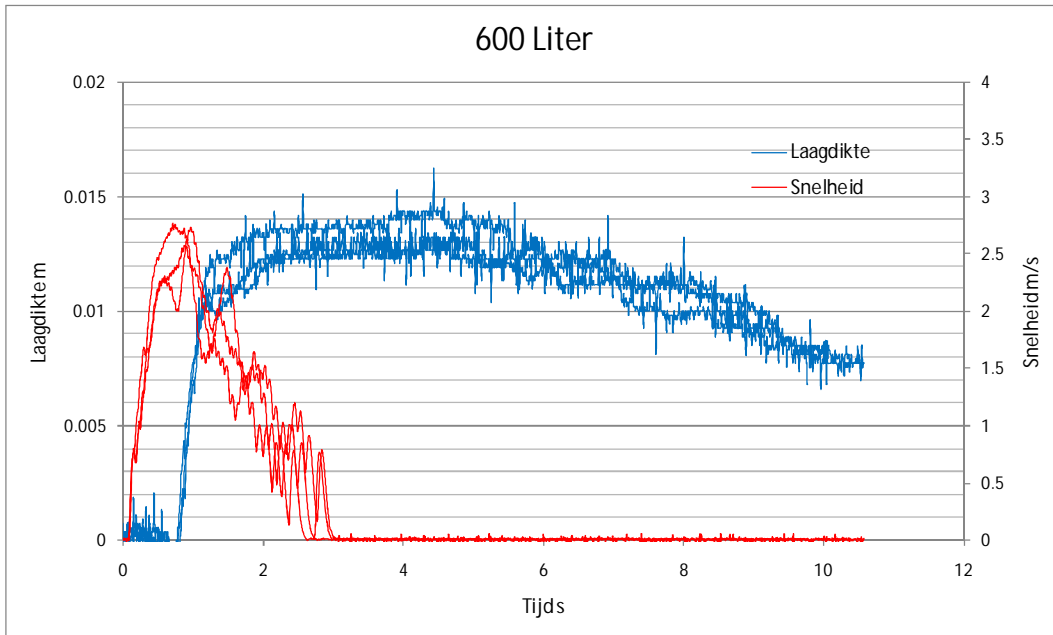
### Laagdikte Plank 1

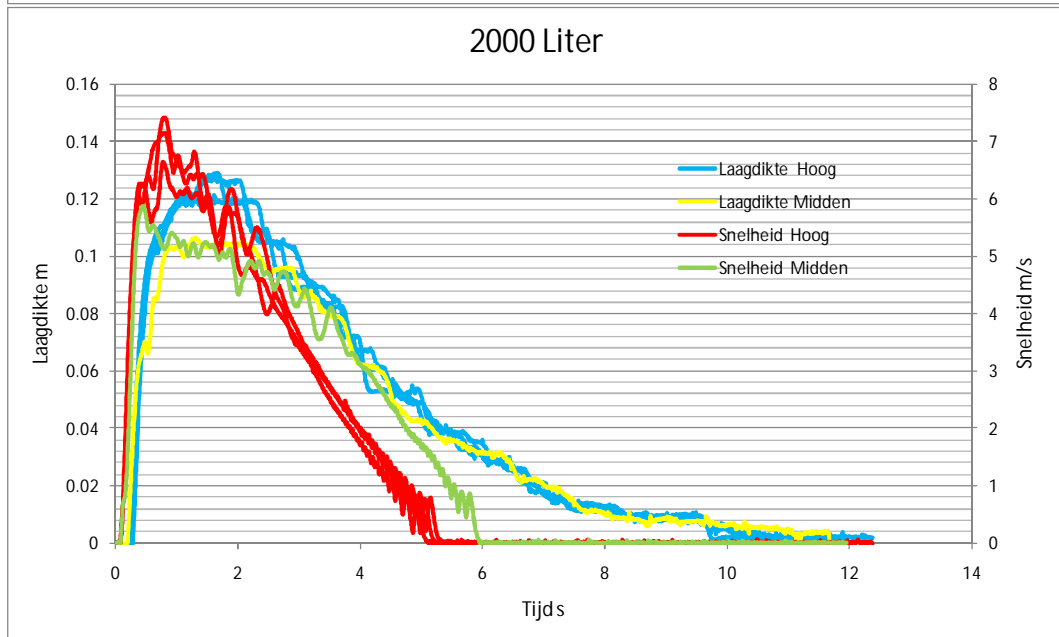
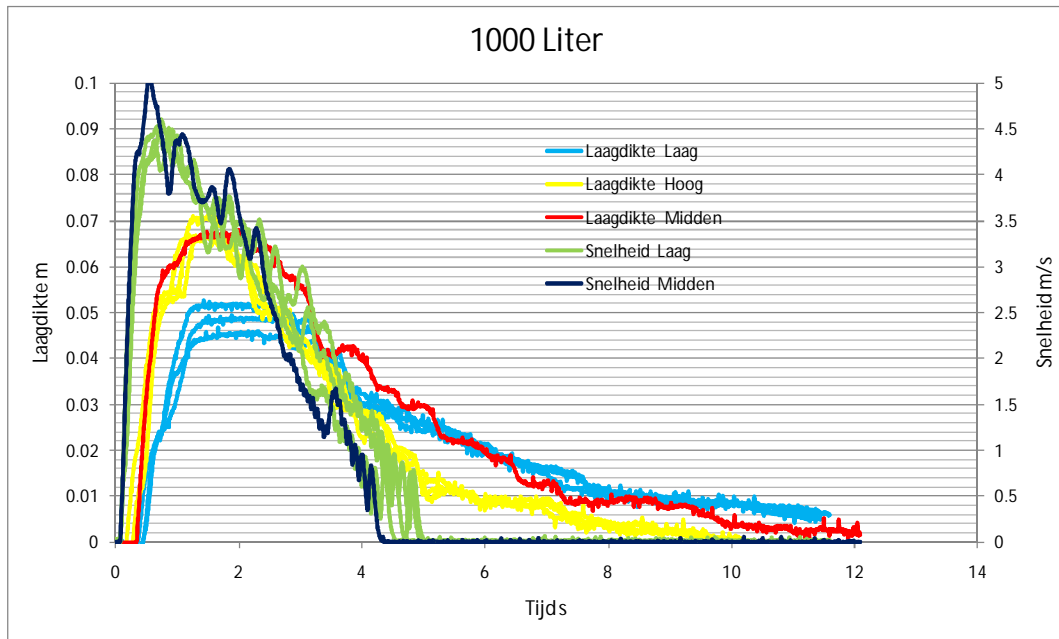


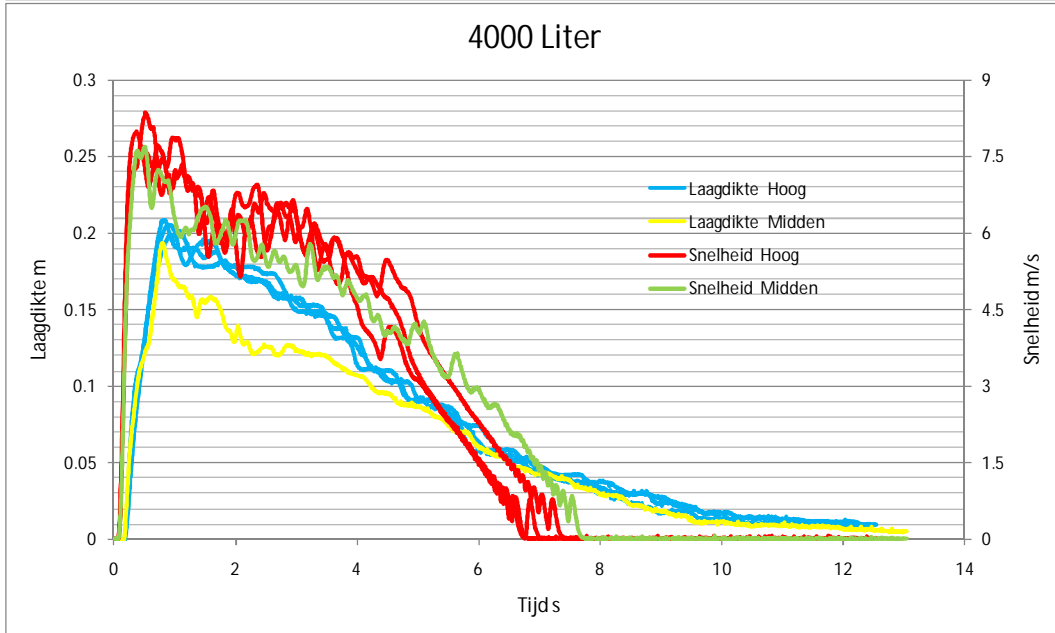
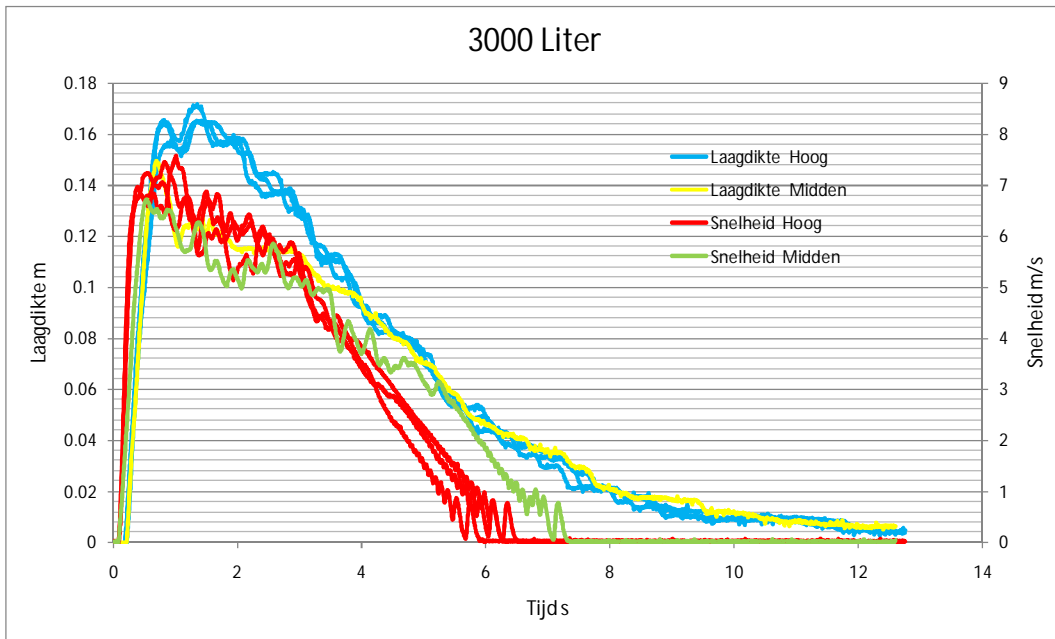
## **Annex 5**

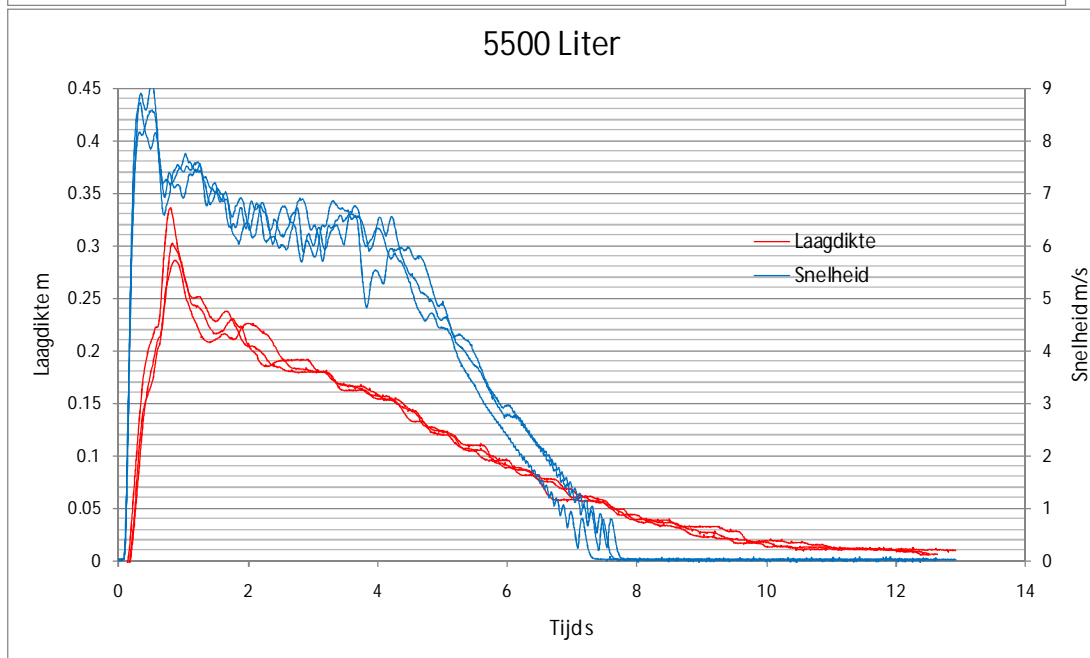
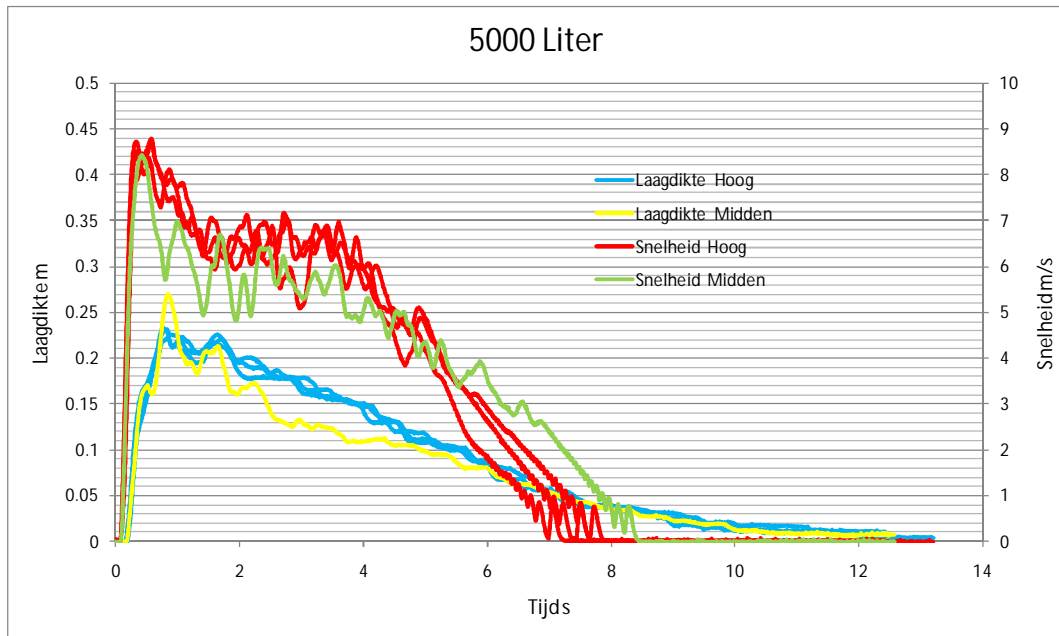
### **Laagdikten en snelheden plank 1 gecombineerd**





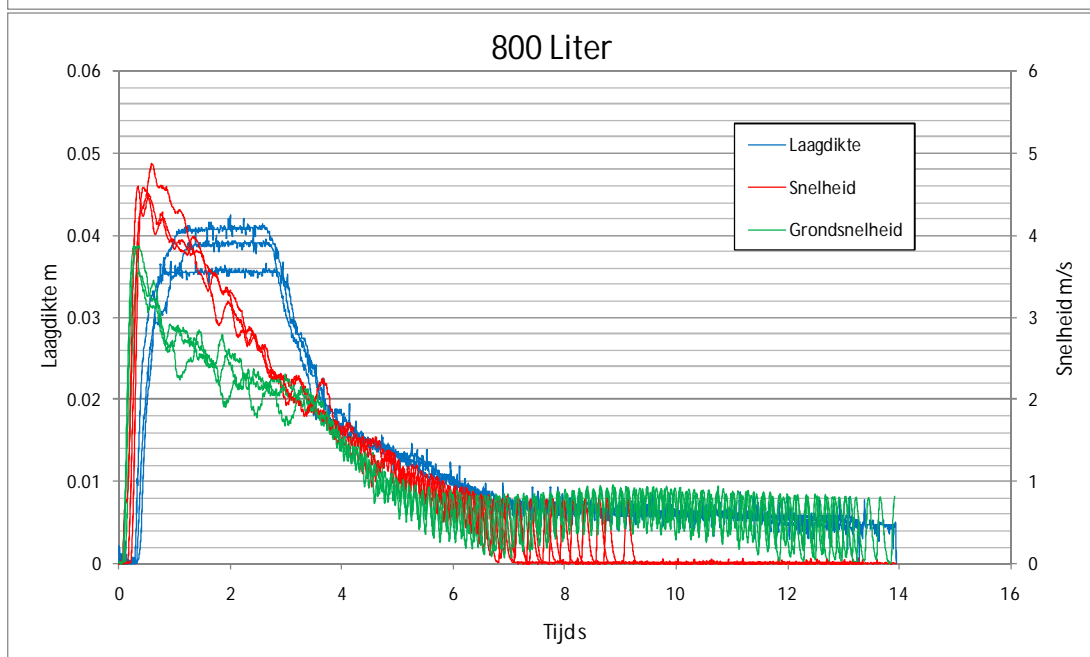
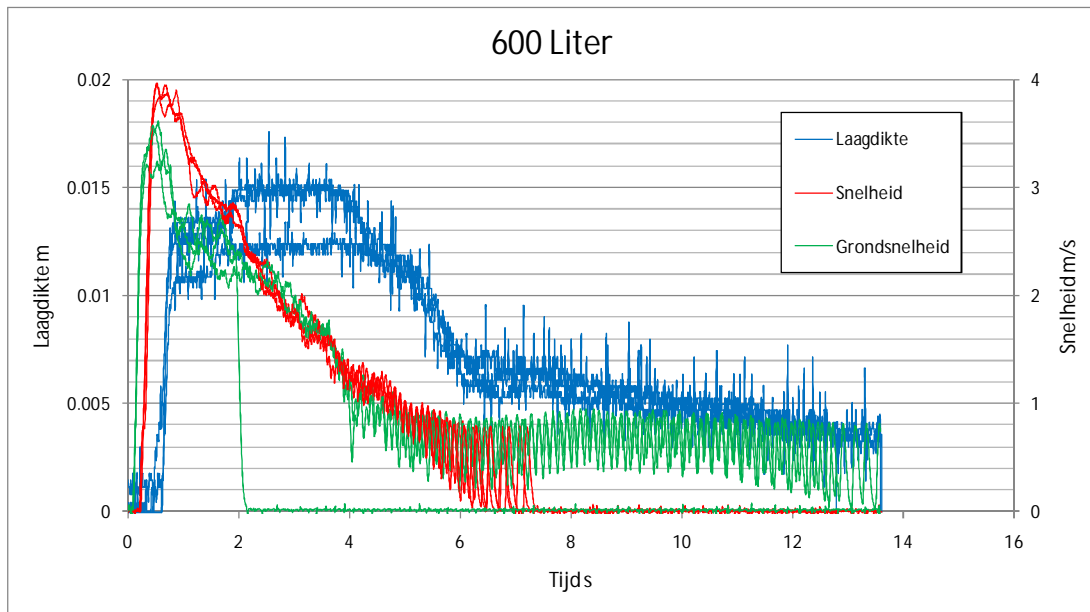






## **Annex 6**

### **Laagdikten en snelheden plank 3 gecombineerd**



## C Evaluatie proefopstelling Vechtdijk

In het kader van het programma SBW zijn in maart 2010 golfoverslagproeven op de Vechtdijk uitgevoerd. Met deze proeven wordt inzicht verkregen in onder andere het effect van een zeer hoog zandgehalte op de erosiebestendigheid van de grasmat bij golfoverslag.

### Locatie

- Vanwege de lokale omstandigheden was het opbouwen van de proefopstelling lastig. Zo moest het overslaande water worden opgevangen en worden teruggepompt naar de Berkummerkolk. Hiertoe zijn twee grondwallen opgeworpen en is in het omsloten gebied (het gebied tussen de Vechtdijk, de Dijkzichtweg en de opgeworpen grondwallen) op het laagste punt een container ingegraven waarin de retourpomp is geplaatst. De gekozen proefopstelling heeft naar verwachting gewerkt.
- Hoewel het een mooie locatie voor het uitvoeren van de proeven was, bleek de bereikbaarheid lastig. Zo waren veel rijplaten (meer dan vooraf gedacht) noodzakelijk om te voorkomen dat de grasmat kapot zou worden gereden. Jammer genoeg is ondanks het gebruik van rijplaten als gevolg van logistieke problemen, de slechte draagkracht van de zandgrond en de invallende dooi alsnog het nodige kapot gereden (ondanks aandringen van het uitvoeringsteam bij de kraanmachinisten om rij schade te voorkomen). Hoewel, gelet op het belang hiervan voor de proeven, de afstemming met de verschillende partijen niet altijd even makkelijk is te realiseren, moet hier bij vervolgprouven meer aandacht aan worden besteed.
- Alle schade is achteraf weer naar tevredenheid van het WGS hersteld,
- Als gevolg van de slechte bereikbaarheid van de locatie moet het grote materiaal in onderdelen met een kraan worden aangevoerd.

### Pompen

- Bij de uitvoering van de proeven op de verschillende proefstroken is noodgedwongen gebruik gemaakt van een tweetal regelbare centrifugaalpompen met een capaciteit van 900 en 600 m<sup>3</sup>/uur (Buitenkamp kon de gevraagde pomp met een capaciteit van 1200 m<sup>3</sup>/uur niet leveren). Het gebruik van de 2 pompen bracht extra kosten en dubbele werkzaamheden met zich mee. De voorkeur gaat daarom uit naar het gebruik van één pomp.
- Indien proeven met 75 l/s per m moesten worden uitgevoerd zouden beide pompen parallel worden geschakeld, zodat er voldoende debiet zou zijn. Met alleen de pomp met een capaciteit van 900 m<sup>3</sup>/uur konden proeven met 75 l/s per m niet worden uitgevoerd. Aangezien er geen proeven met 75 l/s per m zijn uitgevoerd was een en ander achteraf niet noodzakelijk. Vooraf was overigens niet in te schatten of proeven met 75 l/s per m moesten worden uitgevoerd.

### Generator

- Vooraf werd verondersteld dat de afstand tussen de pomp en de generator niet al te groot kon zijn. Zoals bij de vorige proeven was ook nu het uitgangspunt dat de generator zo dicht

mogelijk bij de pomp moest staan. Bij het opbouwen van de proefopstelling bleek verrassend genoeg dat de generator zowel de in de Berkummerkolk geplaatste pompen als de in de container geplaatste pomp kon voeden. Bij eventuele vervolgprouven kan dus flexibeler worden omgegaan met het plaatsen van de generator ten opzichte van de locatie van de pompen.

- In het vervolg moeten de verschillende mogelijkheden beter afgestemd worden met de leverancier van de pompen en generator.

## Debietmeter

- Omdat bij alle overslagproeven tot nu toe is gebleken dat het bepalen van het debiet m.b.v. de peilbuizen een consistentere beeld geeft. Hierdoor is toepassing van een debietmeter feitelijk overbodig. Bij vervolgprouven hoeft dan ook geen debietmeter meer geplaatst te worden. Het debiet wordt zowel bij het instellen van het debiet als bij het controleren tijdens de proeven bepaald aan de hand van de snelheid van vullen van de simulator.

## Geleideschotten

- Ten behoeve van een optimale stroomgeleiding van een gemiddelde golfhoogte is bij de plaatsing van de geleideschotten rekening gehouden met de dwarscomponent als gevolg van de op het buitentalud bij proefstrook 1 aanwezige oprit. Hiertoe de zijn geleideschotten op het talud gebogen aangebracht. Het is echter niet aantoonbaar of dit optimaal heeft gewerkt.

## Simulator

- Als gevolg van tijdsdruk is bij het hijsen van de simulator lichte schade aan de simulator ontstaan. De bevestiging van de hijsdraad aan de simulator is niet correct uitgevoerd. Gelukkig bleef de schade beperkt tot een kleine materiële beschadiging. Vanwege de veiligheid van personeel en materieel mag tijdsdruk nooit leiden tot te snel uitgevoerde kraanwerkzaamheden.

## Retourpomp

- De retourpomp heeft over het algemeen goed gewerkt. Mogelijk zou afvoeren van het overslaande water problematisch worden als proeven met 75 l/s per m moesten worden uitgevoerd. Waarschijnlijk had dan gebruik moeten worden gemaakt van de berging van het omsloten gebied (bij bereiken maximale berging zou de proef dan moeten worden onderbroken om het overtollige water af te voeren).
- De sensor die, vanwege het gevaar van opdrijven van de container, de retourpomp op tijd moest uitschakelen, heeft enkele keren niet gewerkt omdat die onder het aangevoerde zand was verdwenen. In die situaties moest in een enkel geval om wateroverlast te voorkomen de proef tijdelijk onderbroken worden.
- Bij de laatste sessie op proefstrook 4 is de voedingkabel van de retourpomp losgeslagen en in de pomp opgezogen. De kabel raakte hierbij beschadigd en moesten de proeven tijdelijk worden onderbroken. Hoewel dit waarschijnlijk niet had kunnen worden voorkomen heeft het tot de extra kosten als gevolg van schade geleid.



#### Informatiebord

- Het ontwerpen van de informatieborden kost elke keer als gevolg van afstemming tussen de betrokken communicatieafdelingen onevenredig veel moeite en tijd. Immers ten opzichte van vorige versies zou er weinig aan de borden gewijzigd hoeven te worden. Ook hiervoor geldt dat de informatie op de borden locatiespecifiek gemaakt moet worden. Voorgesteld wordt dat opdrachtgever vroegtijdig de gewenste tekst aanlevert en dat het ontwerp, zoals dat er nu ligt, wordt gehandhaafd.

#### Draaiboek

- Het draaiboek wordt opgesteld door Infram en wordt daarnaast aangevuld met inhoudelijke expertise van Deltares en de Rijkswaterstaat Waterdienst. Aangezien het draaiboek ook een contractdocument tussen Deltares en de Waterdienst is geworden, wordt vervolgens ook nog door juristen van betrokken partijen naar de inhoud gekeken. Daar bovenop komt nog dat ook het waterschap de nodige inbreng heeft. Opstellen heeft daardoor een tijdrovend iteratief karakter, waardoor het elke keer weer veel tijd en moeite kost om het draaiboek naar de zin van de verschillende partijen op te stellen. Mogelijk dat ten behoeve van vervolgprouwen eerst afspraken kunnen worden gemaakt over de juridische context met Deltares en de Waterdienst over. Immers, het enige verschil met voorgaande versies is dat het draaiboek locatiespecifiek wordt gemaakt.

-

#### Startoverleg

- Het uitvoeringsteam spreekt de wens uit om in een vroeg stadium voorafgaand aan de overslagprouwen een startoverleg te plannen waarbij naast de uitvoering ook de invulling van het draaiboek wordt besproken. Bij dit startoverleg dient in ieder geval één vertegenwoordiger van iedere partij aanwezig is.

#### Simulator

- Zoals bij de prouwen op de Afsluitdijk is voor het simuleren van de momentane overslagen de klep van de simulator automatisch aangestuurd middels een Programmable Logic Controller (PLC). De PLC heeft naar tevredenheid gewerkt.

#### Beveiliging

- Er zijn geen problemen geweest wat betreft diefstal en vernieling. Voor het eerst is een systeem met draadloze bewakingssensoren aangelegd. Dit bleek veel sneller te (de-)monteren. De beveiliging heeft overigens niet tot problemen geleid. Wel gaat het afmelden van de alarmopvolging nog steeds niet goed. Waar de oorzaak van dit (administratieve) probleem ligt is niet duidelijk. Een evaluatie met BPN over de geleverde dienst is gewenst.

#### Camera's

- Voor de prouwen is het bij de prouwen op de Afsluitdijk beproefde camerasysteem gebruikt. Hierbij zijn de op de kantelmasten geplaatste camera's aan weerszijden van de proufstrook geplaatst. Voorafgaand aan de prouwen zijn connectoren in de kantelmasten aangepast (solidere uitvoering) en zijn de sleuven boven in de kantelmast groter gemaakt, zodat de camera met aansluitsnoer losgekoppeld kon worden van de mast. Ook zijn nieuwe

beschermkappen geplaatst (de oude plastic doorzichtige beschermkappen bleken erg kwetsbaar, waardoor onverklaarbaar snel schuurplekken ontstonden en het onmogelijk maakte om opnamen te maken in de richting waar zich schuurplekken bevonden). Bovendien is bij gebrek aan beter een provisorische regenkap aangebracht.

- Vanaf het moment dat de pompen draaiden was, hoewel een stuk minder dan bij de proeven op de Afsluitdijk, een lichte storing op de opgenomen beelden zichtbaar. Waarschijnlijk ligt dit probleem toch nog steeds aan de connectoren.
- Problemen met de voeding van de hard disc recorder heeft er toe geleid dat het maken van back-ups problemen heeft opgeleverd. De recorder is ondertussen gerepareerd door de fabrikant.

#### Planning

- Als gevolg van aanhoudende vorst, is de start van de proeven enkele keren uitgesteld. Het voorstel tot uitstel is onderbouwd met betaalde adviezen van de weerkamer van Meteo Consult en vervolgens voorgelegd aan de projectleider van Deltares. Een en ander heeft geleid tot een uitstel van enkele weken en heeft extra tijd en geld gekost. Mogelijk dat eerstvolgende proeven vroeger dan wel later in het stormseizoen (of daarbuiten) gepland zouden moeten worden. Op basis van de laatste onderzoeksresultaten van Alterra blijkt immers dat de onderzoeksperiode ruimer is dan het stormseizoen alleen.
- Eenmaal gestart zijn de proeven sneller uitgevoerd dan de planning. Dit mede als gevolg van het niet uitvoeren van de grootste debieten. Mede hierdoor is een extra proef haalbaar gebleken.

#### (Nood)maatregelen

- Zoals bij eerdere uitgevoerde proeven zijn ook bij deze proeven maatregelen getroffen om:
  - o Te voorkomen dat de proef voortijdig beëindigd moet worden (bijv. afdekken beschadigen na teen talud); en
  - o Te zorgen dat in geval van schade de proef alsnog kan worden doorgezet (bijv. afdekken van erosie rondom boom op proefstrook 2 om het talud nog langer te kunnen beproeven.

Dergelijke maatregelen blijken in de praktijk goed te werken en dienen dus ook bij vervolgprouven te worden toegepast.

#### Samenwerking met derden

##### *RWS Waterdienst*

- Mede dankzij een enthousiaste projectleider verliep de samenwerking met RWS Waterdienst goed.

##### *Deltares*

- In het draaiboek is opgenomen dat er tijdens de uitvoering van de proeven zo veel mogelijk een vertegenwoordiger van Deltares aanwezig zou zijn. In de praktijk bleek Deltares minder vaak aanwezig te zijn dan vooraf verwacht. Dit heeft in de uitvoering echter niet tot problemen geleid.
- Bij de proeven op de Vechtdijk heeft Deltares gevraagd de "slijterosie" te meten. Hoewel er geen eenduidige en algemeen aanvaarde omschrijving van slijterosie is, heeft het uitvoeringsteam een mechanisme bedacht waarmee de slijterosie kon worden gemeten. Het bleek uiteindelijk lastig om gedefinieerd te meten. Daarnaast was er ook geen visie m.b.t. waar de te meten (de locaties om de slijterosie te meten zijn arbitrair gekozen). Wanneer bij eerstvolgende proeven weer de slijterosie gemeten dient te worden, is het noodzakelijk om voorafgaand aan de proeven goed af te stemmen hoe en waar de slijterosie te meten.
- De samenwerking verliep verder naar behoren.

#### WGS

- Medewerkers van WGS (o.a. Johan Elshof en Marc Bruins Slot) hebben veel interesse getoond tijdens de proeven. Opgemerkt moet worden dat de samenwerking voorafgaand aan de proeven enigszins stroef verliep. WGS was terughoudend aangezien zij geen goed beeld konden vormen wat men moest verwachten van de te verwachten schade. Tijdens de uitvoering van de proeven bleek de terughoudendheid verdwenen en is de samenwerking uitermate constructief geweest.

#### *Zeeverkenners + hondenvereniging*

- Goede samenwerking.

#### *Omwonenden*

- Het afvoeren van de proefopstelling heeft bij verschillende omwonenden tot de nodige frustratie geleid aangezien door onvoorziene omstandigheden de Dijkzichtweg tijdelijk geblokkeerd is geweest. Het is dus wenselijk om in het vervolg contact te nemen met omwonenden en hun te informeren.

#### *Aannemer Doornwaard*

- De samenwerking met Doornwaard verliep prima.

#### *Buitenkamp*

- Zoals gebruikelijk verliep de samenwerking met Buitenkamp prima.

#### *BKF*

- De service van BKF is goed en de samenwerking verloopt soepel.

#### *BPN*

- Zowel in de voorbereiding als tijdens de uitvoering was BPN slecht bereikbaar en slordig in het nakomen van afspraken

#### *Bezoekers*

- Tijdens de proeven hebben zich veel bezoekers gemeld. Omdat bezoeken veelal niet zijn gepland vraagt het ontvangen van bezoekers relatief veel tijd van het uitvoeringsteam. Desalniettemin hebben de vele bezoekers de uitvoering van de proeven niet gefrustreerd. Bij vervolgprouven zou het fijn zijn als er een gastenboek aanwezig is, zodat achteraf een goed beeld is te vormen van wie interesse heeft getoond in de proeven.
- Er was veel interesse vanuit het buitenland (VS, Duitsland en België).

#### *Persdag*

- De door RWS georganiseerde persdag was slecht georganiseerd. De afdeling communicatie heeft bij het plannen van de persdag geen contact gezocht met de bij de proeven betrokken partijen.

#### *Uitvoeringsteam*

- Het uitvoeringsteam bestond uit vier personen en heeft naar tevredenheid gewerkt. Met een vierde man in het uitvoeringsteam was consistente registratie en verwerking van meetdata

en foto's mogelijk en kon gelijktijdig aan de verslaglegging worden gewerkt. De sfeer en de onderlinge samenwerking was meer dan goed en dus voor vervolg vatbaar.

Extra aandachtspunten/suggesties voor de volgende keer

- Aanschaf kruiwagen voor transport zware onderdelen over het onderzoeksterrein.
- Aanschaf langere UTP-kabel (ca. 50 m) t.b.v. logger surfplank.
- T.b.v. nummering proefstroken moeten metalen bordjes worden gemaakt, die op de geleideschotten kunnen worden geschroefd. De bordjes worden voorzien van plakcijfers/-letters.
- Twee lange peilbuizen (te monteren na het opstellen van de simulator), om de controle van de debieten nauwkeuriger te kunnen uitvoeren
- Uitschuifbare ladder/trap.
- Fotoportaalje voor op de simulator (zodat overzichtsfoto's vanaf de simulator gezien altijd vanuit het zelfde standpunt kunnen worden genomen).
- Geplastificeerde bordjes met daarop de overslagdebieten en sessies van de verschillende proeven.