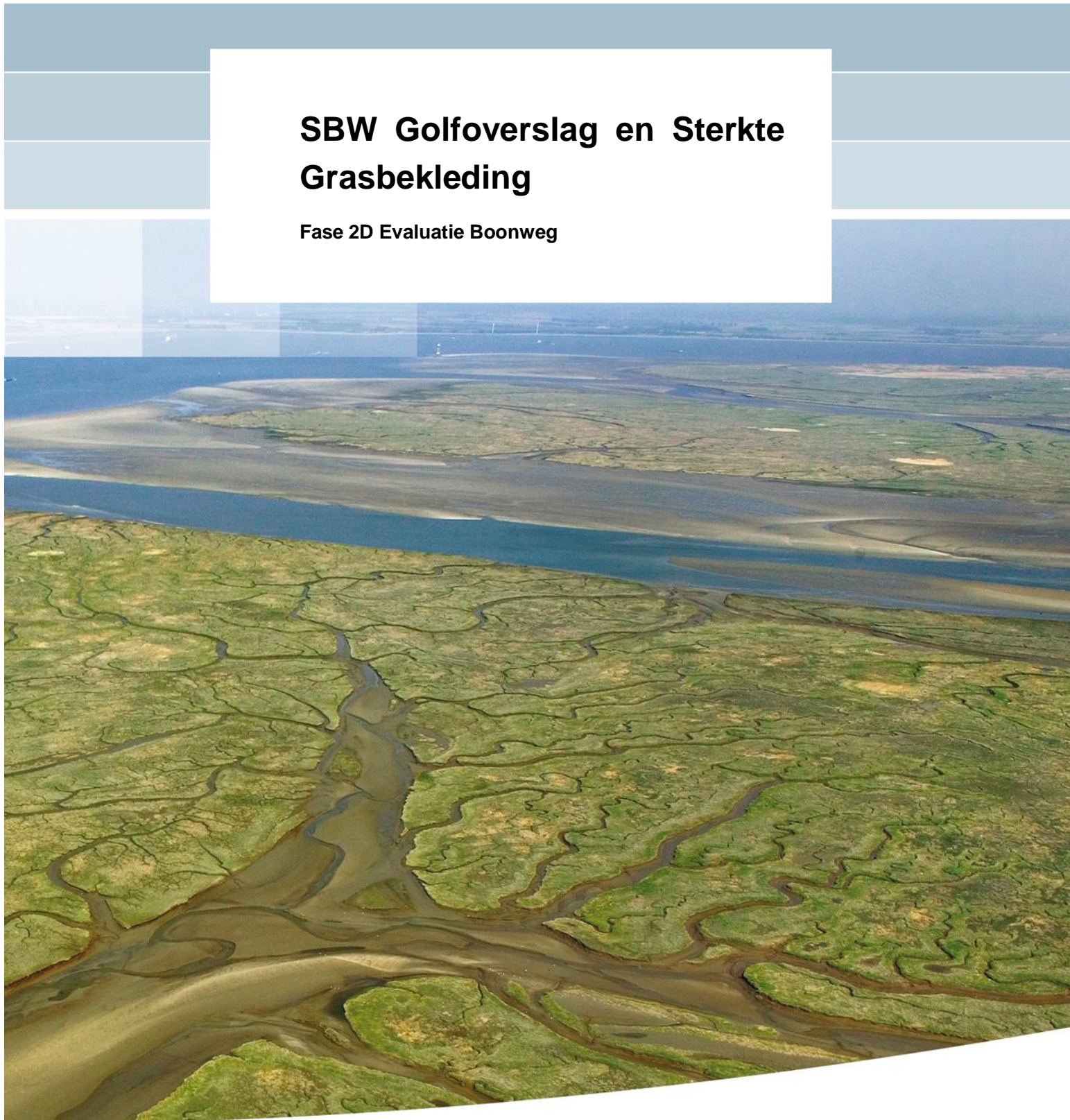


SBW Golfverslag en Sterkte Grasbekleding

Fase 2D Evaluatie Boonweg



SBW Golfverslag en Sterkte Grasbekleding

Fase 2D Evaluatie Boonweg

Andre van Hoven
Henk Verheij
Jentsje van der Meer
Gosse Jan Steendam

Titel

SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1001189-014	1001189-014-GEO-0001	111

Trefwoorden

Golfoverslag, grasbekleding, erosie, golfoverslagsimulator, SBW, Sterkte en belastingen waterkeringen, afschuiven bekleding, infiltratie, tensiometer, zuigspanning

Samenvatting

In februari en maart 2008 zijn golfoverslagproeven uitgevoerd op de Friese Waddenzeedijk bij St. Jacobiparochie bij de Boonweg. Op deze locatie zijn gedurende 15 jaar drie testvakken op verschillende manieren beheerd, wat zou moeten leiden tot grasmatten met verschillende kwaliteit. De drie stroken en een referentiestrook met regulier beheer zijn beproefd met de golfoverslagsimulator met een stapsgewijs oplopende belasting tot 75 l/s per meter gedurende 6 uur. Eén strook kon deze hoogste belasting niet tot het einde verdragen. Hier trad een nog niet eerder gezien opbolmechanisme op. De overgang van talud naar berm bleek als eerste schade te ondervinden, maar dit breide zich niet uit tot de zandkern. In september 2008 is op dezelfde locatie een afschuifproef uitgevoerd. Door middel van een constant overloopdebiet over sectie 30 m is het talud nat gehouden. Verwacht werd dat door infiltratie de zandkern zich zou vullen en dat hierdoor na circa 12 uur de bekleding zou afschuiven. Dit is niet gebeurd. Na 56 uur liepen de waterspanningen nog maar zeer langzaam op en is de proef gestopt. In deze rapportage worden de voorspellingen en de proefuitkomsten geëvalueerd. De belangrijkste aanbevelingen zijn: uitvoeren van afzonderlijke proeven naar de hydraulische aspecten, verder ontwikkelen surfplank voor meten laagdikten, erosiemetingen concentreren op de overgang van talud naar een horizontaal deel, modelleren opbolmechanisme en erosie bij overgang.

Referenties

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

Versie	Datum	Auteur	Paraaf Review f	Paraaf Goedkeuring	Paraaf
1	2009-03-23	Andre van Hoven Jentsje v. d. Meer Henk Verhey	Jan Blinde Bas Hofland		
2	2009-07-12	Andre van Hoven, Jentsje v.d. Meer, Henk Verheij en Gosse Jan Steendam	Jan Blinde Bas Hofland	Harm Aantjes	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Werkwijze	3
1.3	Proeven Boonweg	4
1.4	Leeswijzer	5
2	Evaluatie proefopstelling en proefuitvoering	7
2.1	Proefopstelling	7
2.1.1	Meetcabine	7
2.1.2	Bezoekersvoorziening	8
2.1.3	Bezoekers	8
2.1.4	Afsluiting	8
2.1.5	Beveiliging	9
2.1.6	Camerasysteem	9
2.1.7	Fotocamera	10
2.1.8	Monitoring meet- en registratieapparatuur	11
2.1.9	Bordes	11
2.1.10	Geleideschotten en zandzakken	11
2.1.11	Storm	12
2.1.12	Golfoverslagsimulator	12
2.1.13	Pompen en leidingen	12
2.1.14	Stroom- en hydrauliekvoorziening	13
2.1.15	Verlichting	13
2.2	Proefuitvoering	13
2.2.1	Bemensing	14
2.2.2	Samenwerking met opdrachtgever en waterschap	14
2.2.3	Samenwerking met onderaannemers	14
3	Evaluatie meting hydraulische parameters	15
3.1	Proefuitvoering	15
3.2	Data processing	16
3.2.1	Ruwe data meetopnemers	16
3.2.2	Filtering	18
3.2.3	Bepaling events	19
3.2.4	Koppelen events	21
3.2.5	EMS-metingen	24
3.2.6	Signaalanalyse EMS-sensoren	27
3.3	Resultaten metingen	29
3.3.1	Teststrook 1	29
3.3.2	Teststrook 3	37
3.4	Analyse hydraulische belasting	43
3.5	Conclusies	51
4	Evaluatie graserosie	53
4.1	Waargenomen vormen van erosie	53
4.2	Predictie erosie	61
4.3	Conclusies	63

5	Evaluatie infiltratie en afschuiven	64
5.1	Infiltratie golfoverslagproef	64
5.1.1	Samenvatting predictie	64
5.1.2	Waarnemingen tijdens de golfoverslagproef	67
5.1.3	Waterspanningsmetingen	67
5.2	Infiltratie afschuifproef	83
5.3	Evaluatie afschuiven	94
6	Conclusies en aanbevelingen	95
6.1	Conclusies	95
6.1.1	Proefopstelling en proefuitvoering	95
6.1.2	Hydraulische belastingen	95
6.1.3	Graserosie	95
6.1.4	Infiltratie en afschuiven	96
6.2	Aanbevelingen	97
6.2.1	Proefopstelling en proefuitvoering	97
6.2.2	Hydraulische belastingen	97
6.2.3	Graserosie	97
6.2.4	Infiltratie en afschuiven	98
Bijlage(n)		
A	Opbolmechanisme Memo Van der Meer Consulting	103

1 Inleiding

1.1 Kader

De Wet op de Waterkering schrijft voor dat de beheerders elke vijf jaar hun primaire waterkeringen moeten toetsen. Afhankelijk van de aard en toestand van de waterkering passen ze een eenvoudige toetsing, een gedetailleerde toetsing of een geavanceerde toetsing toe. Om de wettelijke taakstelling goed te kunnen uitvoeren dienen er “scherpe” toetsregels beschikbaar te zijn om de sterkte van de waterkeringen te kunnen beoordelen in relatie tot de maatgevende hydraulische belastingen. Naast onzekerheid in de voorspelling van de randvoorwaarden zijn ook onzekerheden in de rekenregels en modellen die de faalmechanismen beschrijven. Als gevolg hiervan zijn thans “scherpe” toetsregels nog niet in voldoende mate beschikbaar. Dit leidt tot ongewenste situaties: waterkeringen kunnen mogelijk ten onrechte worden afgekeurd en op kostbare wijze versterkt, waterkeringen worden ten onrechte goedgekeurd en bieden minder veiligheid dan waarop gerekend wordt, of een toetsing levert “geen oordeel” op, wat politiek en maatschappelijk ongewenst is.

Dit resulteert in een behoefte tot het verkleinen van de onzekerheden door het verbeteren van kennis en inzicht in faalmechanismen voor de in Nederland gebruikte typen waterkeringen. Daarmee direct samenhangend bestaat er een behoefte tot het verbeteren van de kennis van de mogelijke hydraulische belastingen. Vaak zijn veldmetingen noodzakelijk om theoretische modellen te kunnen ontwikkelen, kalibreren en valideren. Resultaten van veldmetingen kunnen hiermee tot nieuwe inzichten leiden. Het doel van het SBW programma, dat is opgebouwd uit drie subprogramma's Faalmechanismen, Randvoorwaarden en Veldmetingen&Data, is daarom als volgt geformuleerd:

Het invullen van de belangrijkste kennisleemtes voor een scherper beeld van de veiligheid van primaire waterkeringen tegen overstromingen.

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het Rijkswaterstaatproject 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 Technische Rapport, Toetsregels voor het VTV 2011 en een doorkijk naar 2012 – 2016. De planning van het project staat in Figuur 1.1.

Fase	Activiteit	2007	2008	2009	2010	2011
1D	Evaluatie Delfzijl	■				
2A	Modelaanpassingen Boonweg	■	■			
2B	Predictie Boonweg		■			
2C-G	Draaiboek en proefneming Boonweg-overslag		■	■		
2C-A	Draaiboek en proefneming Boonweg-afschuiven		■	■		
2D	Evaluatie Boonweg		■	■		
3A	Modelaanpassingen Afsluitdijk		■	■		
3B	Predictie Afsluitdijk		■	■		
3C	Draaiboek en proefneming Afsluitdijk		■	■		
3D	Evaluatie Afsluitdijk		■	■		
4A	Modelaanpassingen Petten			■	■	
4B	Predictie Petten			■	■	
4C	Draaiboek en proefneming Petten			■	■	
4D	Evaluatie Petten			■	■	
5A	Modelaanpassingen Zeeland - afschuiven				■	■
5B	Predictie Zeeland - afschuiven				■	■
5C	Draaiboek en proefneming Zeeland-overslag		■			
5C	Draaiboek en proefneming Zeeland-afschuiven		■			■
5D-G	Evaluatie Zeeland-overslag		■	■		
5D-A	Evaluatie Zeeland-afschuiven					■
7D-1	Evaluatie Golfoverslagbak Petten	■				
7A-2	Modelaanpassing Golfoverslagbak Petten		■			
7D-2	Evaluatie Golfoverslagbak Petten		■			
7A-3	Modelaanpassing Golfoverslagbak Petten		■			
7D-3	Evaluatie Golfoverslagbak Petten		■	■		
7A-4	Modelaanpassing Golfoverslagbak Petten			■		
7D-4	Evaluatie Golfoverslagbak Petten			■	■	
7A-5	Modelaanpassing Golfoverslagbak Petten				■	
7D-5	Evaluatie Golfoverslagbak Petten				■	■
8	Technisch rapport (eindproduct)			■	■	
9	Toetsregel in VTV (eindproduct)				■	
10	Doorkijk 2012 - 2016 (eindproduct)					■
	Deense rekenregel: vertaling + analyse	■	■			■
	Uitvoeringsplan 2008	■	■			
	Uitvoeringsplan 2009		■			
	Uitvoeringsplan 2010			■		
	Uitvoeringsplan 2011				■	

Figuur 1.1 Planning

Het onderzoek dat in het kader van dit project wordt uitgevoerd bestaat uit drie onderdelen:

- Erosie van de grasmat op het binnentalud
- Afschuiven van de grasbekleding (gras + klei) van het binnentalud
- Golfoverslag.

Golfoverslag wordt onderzocht met behulp van de golfoverslagbak die op het buitentalud van de zeedijk bij Petten is aangelegd.

Afschuiven en erosie van de grasmat worden onderzocht met behulp van grootschalige proeven op bestaande dijken. Voor erosieproeven wordt de golfoverslagsimulator ingezet, waarmee volumes tot maximaal 22.000 liter over een 4 m brede strook kunnen worden losgelaten. De afschuifproeven vinden plaats op een bredere strook van circa 30 m met behulp van een buis waaruit een gelijkmatig debiet stroomt.

Het project is ingedeeld in fasen met een nummering bestaande uit een cijfer (1-7) en een letter (A-D). Het cijfer staat voor de proeflocatie, de letter voor de fase binnen de Kolb-cyclus (zie Paragraaf 1.2).

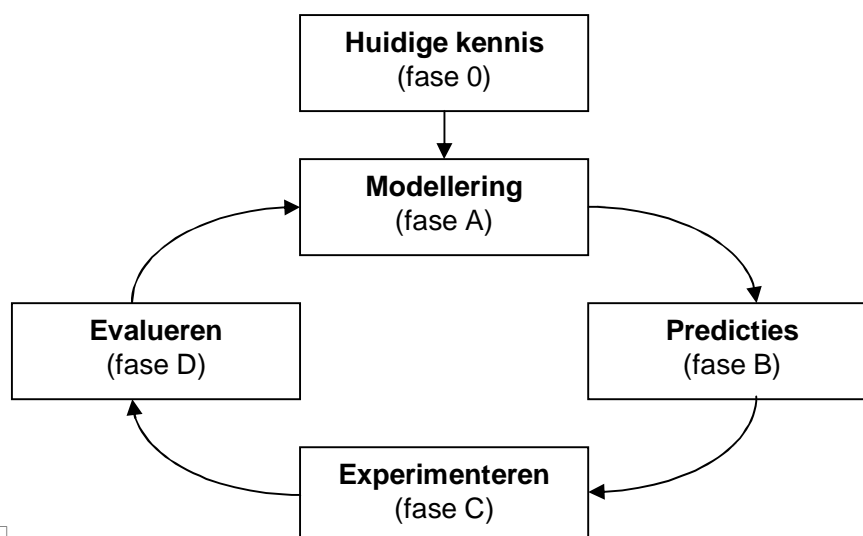
Fase 1	Delfzijl
Fase 2	Boonweg
Fase 3	Afsluitdijk
Fase 4	Rivierdijk
Fase 5	Zeeland
Fase 6	Petten
Fase 7	Golfoverslagbak Petten

De volgorde is gewijzigd ten opzichte van het eerder genoemde projectplan uit 2007. De IJkdijk, voormalig 6-1 en 6-2 zijn uit het programma verwijderd. De huidige Fase 6 Petten is onzeker in verband met mogelijke beperkingen die worden opgelegd bij de proefuitvoering. Hier zal mogelijk een alternatieve locatie voor worden gezocht. De rivierdijk, Fase 4, is toegevoegd. Fase 7 betreft een jaarlijks terugkerende fase waarbij de stormgegevens en metingen van golfoverslag van het voorgaande winterseizoen worden geanalyseerd.

Onderhavig rapport betreft Fase 2D Evaluatie Boonweg.

1.2 Werkwijze

Het eindproduct, 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>).



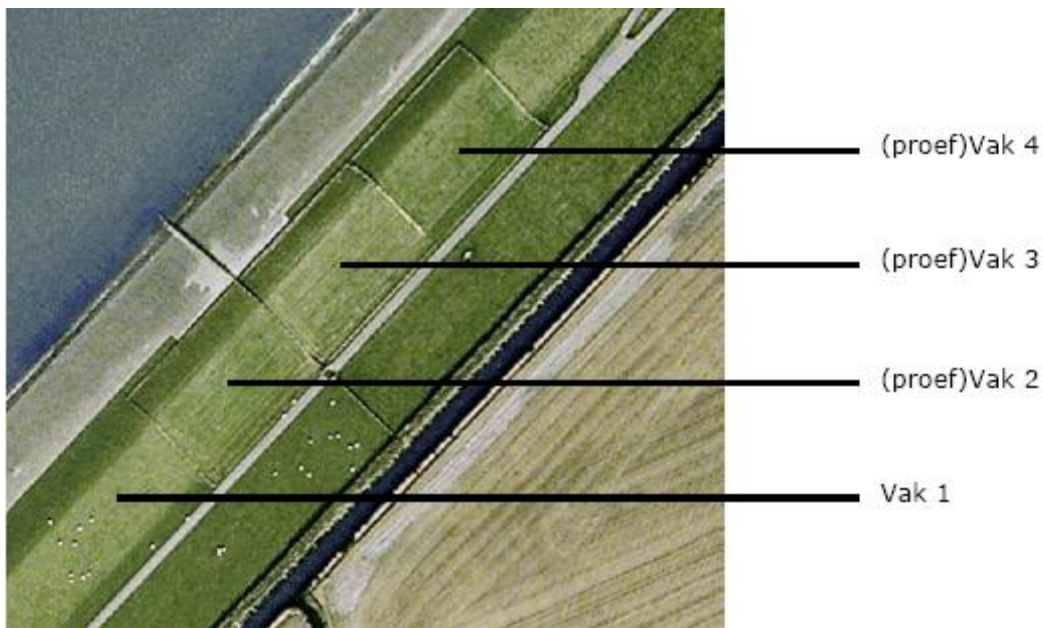
□
Figuur 1.1 Kolb - cyclus

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).

1.3 Proeven Boonweg

Op de Friese Waddenzeedijk nabij de Boonweg (Fase 2) zijn in februari 2008 golfoverslagproeven uitgevoerd en in september een afschuifproef.

De golfoverslagproeven vonden plaats op 4 proefvakken die gedurende 15 jaar op een verschillende manier zijn beheerd (Figuur 1.2). De golfoverslagproeven worden uitgevoerd met de golfoverslagsimulator die overslagvolumes tot 5.500 liter per meter over de kruin en het binnentalud van de dijk kan laten stromen. De strookbreedte bij deze proeven is 4 m. Er is gekeken naar erosie van de grasmat en de klei. In de proefvakken 1 en 3 zijn waterspanningsmetingen uitgevoerd in de kleibekleding en in de zandkern.



Vak	Beheer
Vak 1	regulier beheer zeedijk: periodiek beweiden met een lage schapendichtheid, lage bemesting (ca. 70 kg N/ha)
(proef)Vak 2	2x intensief beweid, 1 x gehoid, geen extra bemesting
(proef)Vak 3	geen beweiding, 2x gehoid, geen extra bemesting
(proef)Vak 4	gehoid, beweid, gehoid, geen extra bemesting

Figuur 1.2 Proefvakken golfoverslagproeven Boonweg (foto Google Earth)

In september 2008 is een afschuifproef uitgevoerd op een 30 m brede proefstrook net ten zuiden van proefvak 1. Met behulp van een buis met gaten is gedurende 56 uur een regelmatig overloopdebiet over de dijk gestroomd, met als doel om de bekleding en een deel van de zandkern te verzadigen.

In onderhavige evaluatie (Fase 2D) zal de predictie (Fase 2B) naast de proefresultaten (Fase 2C) worden gelegd.

1.4 Leeswijzer

De evaluatie van de proeven bij de Boonweg is verdeeld in 5 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 bevat de evaluatie van de werking van de proefopstelling en de proefuitvoering. In hoofdstuk 3 wordt aandacht besteed aan de meting van hydraulische parameters op het talud, zoals de stroomsnelheid en de waterlaagdikte. Hoofdstuk 4 bevat de evaluatie van de erosie van gras en hoofdstuk 5 de evaluatie van de gemeten waterspanningen in de dijk. In hoofdstuk 6 staan de conclusies en aanbevelingen.

2 Evaluatie proefopstelling en proefuitvoering

2.1 Proefopstelling

In het Factual Report (Infram 2008), zijn de golfoverslagproeven in Friesland beschreven. Daarbij is aandacht besteed aan de (theoretische) achtergrond van de proeven. Het principe van de golfoverslagsimulator wordt daar beschreven met het uitgangspunt dat de simulaties gelden voor zee- en meerdijken met een golfhoogte van ongeveer 2 m. Verder wordt de achtergrond gegeven voor golfoverslag, overslagverdelingen en formules voor laagdiktes, snelheden en verblijftijden van overslaand water op de kruin. Tot slot worden de aanpassingen aan de simulator beschreven die uitgevoerd zijn na de eerste proeven in Delfzijl, 2007. Dit betreft het nieuwe en aanpasbare onderstel voor de simulator en de vergroting van de bak van 3,5 m³ per m naar 5,5 m³ per m. De bediening van de simulator is handmatig gebeurd, maar nu is de gehele overslagverdeling gesimuleerd en niet zoals bij Delfzijl, in blokken met vaste overslagvolumes. In deze paragraaf zullen de aspecten die betrekking hebben op de proefopstelling worden geëvalueerd.

2.1.1 Meetcabine

De meetcabine is op een platte wagen gezet, waarbij tussen de assen zoveel ruimte aanwezig was dat het water van de 4 m brede proefsectie ongestoord onder de wagen door kon stromen. Met de meetcabine recht voor en deels boven de proefsectie wordt een prima overzicht verkregen op de proefsectie. Daarnaast is het gemakkelijk om het geheel over korte afstanden, met een tractor, te verplaatsen. Dit geheel heeft goed gewerkt.

De meetcabine is tijdens de uitvoering op een proefsectie gestut geweest met behulp van een viertal stutten. Dit was nodig omdat de camera, die de gehele proef heeft opgenomen, aan de meetcabine was bevestigd. Als de meetcabine niet gestut zou zijn geweest zou elke beweging in de meetcabine door onder meer de wind geleid hebben tot beweging van de camera, waardoor de opname verstoord zou worden. Behalve het stabiliseren van de meetcabine zijn de stutten ook gebruikt voor het horizontaal stellen van de cabine. Opgemerkt moet worden dat het stutten vrij provisorisch is gebeurd en naar gelang het inzicht van dat moment en de mogelijkheden. Als de meetcabine vaak moet worden verplaatst, dan is de wijze van stutten voor verbetering vatbaar.

De meetcabine was voorzien van opname- en uitleesapparatuur en een hard disc recorder voor de opslag van de videobeelden. Daarnaast was er een printer aanwezig en was de bediening van de overslagsimulator (joystick) in de cabine geplaatst. Alle apparatuur is ook daadwerkelijk (zonder problemen) gebruikt. Alle bekabeling van de camera's en de meetapparatuur op en in de proefstrook kon door een hoog gelegen luik, voor een eventuele aan te koppelen airco, in de meetcabine worden gebracht. De locatie van dit gat als kabeldoorvoer was niet optimaal. Beter zou zijn wanneer de bekabeling via een luik in de vloer naar binnen kon worden gebracht.

De indeling van cabine was niet optimaal. De cabine bestond in feite uit drie ruimten (twee relatief grote ruimten en één ruimte met keuken en toilet). Eén grote ruimte (nabij het luik voor kabeldoorvoer) is gebruikt om de meetapparatuur te plaatsen. In de andere grote ruimte (direct bij binnenkomst) is de bediening van de simulator geplaatst. Door de vele bezoekers die ook in de cabine kwamen werd de proefuitvoering enigszins gestoord. Bovendien kon de

bediener van de joystick mensen niet te woord staan wanneer hij alleen in de cabine aanwezig was, omdat hij de volledige aandacht bij het volgen van de stuurlijst nodig had.

De ruimte met keuken en toilet was geheel overbodig, waardoor de twee andere ruimtes in feite groter konden. Ook bevonden zich slechts aan één zijde van de cabine ramen, waardoor vanuit de cabine geen zicht was op wat er achter de cabine gebeurde. Wél handig was de extra deur in het midden van cabine. Deze bevond zich ter hoogte van het midden van de proefstrook, waardoor vanuit de cabine tevens een goed zicht op de proefstrook verkregen kon worden.

2.1.2 Bezoekersvoorziening

Voor bezoekers was een ruimte ingericht waarin stoelen en tafels aanwezig waren. Deze ruimte kon tevens worden gebruikt als lunchgelegenheid. Bovendien was daarin de schaalversie van de overslagsimulator opgebouwd. De bezoekersruimte bestond uit een twee geschakelde units van elk 6x3 m en bood plaats aan ca. 20 bezoekers.

Van deze ruimte is onder andere gebruik gemaakt bij een persbijeenkomst. Tevens werd er regelmatig geluncht door medewerkers van faciliterende en toeleverende bedrijven. Daarnaast is de keet gebruikt door projectgroepleden om te kunnen werken en vergaderen.

De ruimte bleek meer dan groot genoeg voor het gestelde doel, maar stond te ver van de proefopstelling af, waardoor een extra generator moest worden gehuurd, omdat bekabeling vanaf de generator niet voorhanden was. Het feit dat de bezoekersruimte zich te ver van de proefopstelling bevond was min of meer noodgedwongen. Omdat de proefopstelling steeds verplaatst werd, moest een vaste locatie voor de niet verplaatsbare bezoekersruimte gekozen worden. De enige mogelijkheid was om de geschakelde units nabij de vierde proefstrook te plaatsen, welke als laatst beproefd zou worden. Hierdoor was de afstand aan het begin van proeven ruim 200 m. Handiger is om, indien mogelijk, de bezoekersruimte dichterbij de proefopstelling te plaatsen.

2.1.3 Bezoekers

De aanwezigheid van de bezoekersruimte heeft er niet voor gezorgd dat het uitvoeringsteam ongestoord zijn werk kon doen in de meetcabine. Regelmatig kwamen bezoekers, al dan niet begeleid door een projectgroepmedewerker de meetcabine in. Dit heeft de uitvoeringploeg enigermate gestoord bij de uit te voeren werkzaamheden. Dit heeft onder andere veroorzaakt dat het overslagschema niet altijd exact gevolgd is. Praten en geconcentreerd de overslagvolumes loslaten, bleek soms moeilijk. In het vervolg moet het uitvoeringsteam en bezoekende projectgroepleden er meer op toezien dat er zo weinig mogelijk 'gasten' in de meetcabine komen. Aan de andere kant moet dit ook niet te strikt zijn omdat het uitvoeringsteam en de projectgroep er soms baat bij hebben dat sommige bezoekers de meetkeet bezoeken. Er moet daarom naar een passende mix in de oplossing worden gezocht. Dat kan door de simulator bijvoorbeeld te automatiseren waardoor de aandacht niet continu bij de klok hoeft te zijn. Dit naast een meer selectievere toelating van de 'gasten'.

2.1.4 Afsluiting

Ondanks het feit dat het terrein zichtbaar was afgesloten voor doorgaand verkeer, schroomden wandelaars en fietsers niet het verbod te negeren en, na het werkterrein te zijn overgestoken, hun weg over de asfaltweg of fietspad te vervolgen.

Wel is duidelijk dat bij eventuele ongevallen de passanten willens en wetens risico's hebben genomen en kan de verantwoordelijkheid cq. aansprakelijkheid niet bij de beheerder of uitvoerende partij worden gelegd.

2.1.5 Beveiliging

De meetcabine was voorzien van beveiligingsapparatuur, bestaande uit een brandmelder, bewegingsmelders en deurcontacten op de toegangsdeuren die via een modem verbonden waren met een meldkamer. Verder was er een abonnement met een beveiligingsorganisatie die voor de alarmopvolging zorgde. Het omliggende terrein was in eerste instantie voorzien van camerabeveiliging. Omdat bij een niet fysiek afgesloten testgebied het aantal alarmeringen, als gevolg van loslopende dieren, toevallige passanten en mogelijk ook voorbijvliegende vogels uiteindelijk te groot bleek, is dat deel van de beveiliging uitgeschakeld. Bovendien bleken de voor de beveiliging gebruikte infrarood camera's niet afdoende te werken. De camera's zijn daarna vervangen door niet-infrarood bewakingscamera's omdat die functionaliteit voor de registratiedoeleinden niet nodig was

Het aanbrengen van de beveiliging op locatie heeft veel tijd gekost om alles werkend te krijgen. Toen echter alles eenmaal werkend was, zijn weinig tot geen problemen met de beveiliging voorgevallen. Wel bleek de beweeglijkheid van de meetcabine tijdens storm een probleem te zijn, omdat hierdoor de bewegingsmelders werden geactiveerd. Als alle deuren en ramen zijn voorzien van deur- en raamcontacten en het verzekeringstechnisch niet noodzakelijk is zijn bewegingsmelders overbodig, omdat dan niemand binnen kan komen zonder dat het alarm afgaat. Wel is het dan zo dat bewegingen binnen de bewaakte ruimte niet worden gedetecteerd.

De bediening van de simulator en de klok werden elke avond en in het weekend in de meetcabine opgeborgen. Computers, meetdata en de fotocamera werden nooit in de meetcabine achtergelaten bij het verlaten van de testlocatie.

De verlichting is bij afwezigheid van het uitvoeringsteam ('s nachts en in het weekend) tevens als beveiligingsmiddel gebruikt om ongewenst bezoek van derden te ontmoedigen.

Tijdens de proeven hebben geen noemenswaardige incidenten plaatsgevonden. Onduidelijk is of dit is toe te schrijven aan de gebruikte beveiliging. Het uitvoeringsteam is echter wel overtuigd van de preventieve werking die van de aangebrachte beveiligingsapparatuur uitgaat.

2.1.6 Camerasysteem

Voor het filmen van de proeven is gebruik gemaakt van de bewakingscamera's. Deze camera's zijn gebruikt omdat deze geschikt zijn voor continue buitengebruik en geven een globaal beeld van de proefstrook. Er kon niet flexibel worden ingezoomd op mogelijke erosieplekken of beginnende en voorschrijdende schade. De proefstrook is in zijn geheel met één camera opgenomen met een frequentie van 10 beelden per seconde. Deze frequentie kon worden ingesteld. De reguliere frequentie van de gebruikte opnameapparatuur is 25 Hz. Het terugbrengen van de frequentie is gedaan om zo de benodigde opslagcapaciteit te beperken, waardoor alle proeven in zijn geheel konden worden opgenomen op een HD-recorder.

Omdat de HD-recorder met behulp van een LAN-kabel direct was aangesloten op een laptop konden de beelden, die ook op de monitor gevolgd konden worden, opgenomen worden. De registraties zijn aan het eind van elke dag overgezet naar een externe harde schijf.

Bij globale analyse achteraf is gebleken dat enkele opnames corrupt zijn. De oorzaak hiervan is onbekend.

De mogelijkheden om de opnames met opnamefrequentie van 10 Hz te analyseren voor frontsnelheden lijken beperkt. Een eerste poging lijkt er op te wijzen dat de ingestelde frequentie niet exact overeenkomt met de werkelijke frequentie. Daarnaast is in de opnames geen tijdregistratie opgenomen anders dan de externe klok op de proeflocatie (die overigens wel voortdurend in beeld is). Deze klok geeft de tijd in seconden. Het feit dat alleen hele seconden kunnen worden afgelezen en er met de gebruikte applicatie voor de beeldanalyse niet exact 10 beelden per seconde worden gegeven maakt het vrijwel onmogelijk een nauwkeurige analyse van de frontsnelheid uit te voeren met behulp van de met de camera's verkregen opnames.

Hoewel de scherpte van het merendeel van de opnames achteraf matig waren, bleken de beelden bruikbaar om een indicatie te krijgen van de uitbreiding van de schade in de tijd. Detailanalyse lijkt voornamelijk niet mogelijk. Wellicht dat betere beeldanalysesoftware hier mogelijkheden biedt. Indien vaststellen van de frontsnelheid tot de vereisten behoort, moet er een ander camerasysteem worden toegepast en moet er een goede beeldverwerkingsapplicatie worden gebruikt. Voor vervolgprouwen dienen aan het camerasysteem en de vereiste beeldverwerking duidelijkere eisen te worden gesteld en moeten er vooraf testen worden uitgevoerd.

Er was op de testlocatie een reservecamera aanwezig, die oorspronkelijk bedoeld was voor camerabewaking. De camera is echter niet gebruikt voor het opnemen van de proeven. Daarnaast was er een niet waterdichte hand-held videocamera aanwezig om optredende schade in detail op te nemen. Hiermee zijn goede beelden gemaakt. Echter deze beelden zijn niet continu gemaakt en de positie van waar gefilmd is niet altijd dezelfde geweest (wat overigens geen vereiste was). Er is getracht om een goed beeld op te nemen van de ontwikkeling van de opgetreden schades. Dit is goed gelukt.

2.1.7 Fotocamera

Om de ontwikkeling van de grasmat in de tijd vast te leggen zijn met een 10 megapixel breedbeeld compactcamera met groothoeklens voor de eerste sessie (T0 situatie) en na iedere sessie (detail)foto's gemaakt van het proefvak. Om de positie op de grasmat vast te leggen is gebruikt gemaakt van een raster van 2 x 4 meter. Het raster was onderverdeeld in vlakken van 1 m². Bij elke foto is de locatie op het talud mee gefotografeerd. Hiertoe is een bordje met de locatie (1, 2, ...) op het raster geplaatst.

Het raster heeft goed gewerkt. Echter bleken de op het talud aanwezige meetinstrumenten vaak een sta in de weg bij het (ver)plaatsen van het raster. Daarnaast is het raster in combinatie met de meetinstrumenten onhandelbaar voor één persoon. Hierdoor dienen minimaal 2 personen betrokken te zijn bij het maken van de foto's (bij voorkeur 3, zodat 2 personen het raster kunnen verplaatsen en 1 de foto's maakt).

Behalve foto's van het proefvak voor en tussen de sessies, zijn tijdens de sessies in geval van schade tussen de overslaande golven door foto's gemaakt om de schadeontwikkeling in beeld te brengen. Bij de uitwerking van het factual report is hiervan veel profijt ondervonden.

Achteraf is geconstateerd dat na iedere sessie geen overzichtsfoto's zijn gemaakt van het gehele proefvak. Wanneer dergelijke foto's waren gemaakt had ook een overzicht van de ontwikkeling van de grasmat in de tijd over het gehele talud gezien gegeven kunnen worden. Dergelijke foto's geven een extra dimensie bij de uitwerking en aanbevolen wordt om deze bij een volgende proef wel te maken.

2.1.8 Monitoring meet- en registratieapparatuur

De beelden van de camera zijn realtime gemonitord. Hiertoe was een monitor in de meetcabine aanwezig.

Met behulp van een kabelverbinding tussen de datalogger van Deltares en de meetcabine konden op dit beeldscherm ook de meetdata van de tensiometers en de peilbuizen worden gemonitord. Op deze wijze kon gecontroleerd worden of de instrumenten een signaal leverden. Dit heeft goed gewerkt. Omdat interpretatie van het signaal de taak van Deltares was kon de juiste werking van de instrumenten niet op de proeflocatie gecontroleerd worden. Aanbevolen wordt om niet alleen het signaal afleesbaar te maken, maar ook de hieruit berekende waterdruk (tensiometers) en stijghoogte (peilbuizen).

2.1.9 Bordes

Op het talud is een vlak bordes met leuningen langs de meetsectie geplaatst, zodat het talud voor het uitvoeringsteam en bezoekers gemakkelijk toegankelijk was. Het opbouwen van het bordes kost relatief veel tijd. Het bordes echter is zeer effectief.

2.1.10 Geleideschotten en zandzakken

Om een 4 meter brede proefstrook te creëren zijn vanaf de uitstroomopening geleideschotten geplaatst door een loonbedrijf. Hiertoe zijn houten palen in het talud geslagen en zijn de schotten aan de binnenzijde hiervan bevestigd (de palen staan zo niet in de proefstrook, waardoor randeffecten tot een minimum zijn beperkt). Omdat de geleideschotten voor de volgende proefstrook al geplaatst konden worden op het moment dat op de ene proefstrook de proeven nog werden uitgevoerd konden de verplaatsingen snel worden uitgevoerd. Dit werd als zeer efficiënt ervaren.

Om te voorkomen dat veel water onder de schotten door zou lekken zijn aan de achterzijde van de schotten zandzakken geplaatst. In eerste instantie waren deze zandzakken abusievelijk gevuld met fijn zand. De zandzakken spoelden echter bij grote volumes lekkend water gemakkelijk leeg. Om dit te voorkomen zijn de zandzakken later gevuld met grof zand. Het probleem was hiermee deels verholpen. Vooral ook omdat op het talud de zakken gemakkelijk wegspoelden

Bij wijze van test zijn de schotten in de graszode geslagen, nadat met behulp van een spade sleufjes gestoken waren. Hierdoor werd de lekkage onder het schot door aanzienlijk gereduceerd en waren de zandzakken minder noodzakelijk. Het steken van sleuven speelt mogelijk randeffecten in de kaart. Beter zou kunnen zijn de schotten aan de buitenzijde te voorzien van een metalen strip die in de grond gedrukt kan worden, zodat geen sleuven gestoken hoeven te worden.

Omdat de schotten met een sleg in de zode werden geslagen zijn veel schotten beschadigd. Ook hier is wel een verbetering te bedenken.

2.1.11 Storm

Tijdens de uitvoering van de proeven is er sprake van storm geweest. Hoewel de simulator met spanbanden al gefixeerd was aan twee betonblokken van elk 4 ton, is de simulator tijdens de storm extra gefixeerd met de bak van een mobiele kraan. Dit heeft goed gewerkt.

2.1.12 Golfoverslagsimulator

Na de eerste proeven in Delfzijl zijn aanpassingen gemaakt aan de simulator. Een van deze aanpassingen is een onderstel waarop de simulator wordt geplaatst en welke hydraulisch op hoogte is te stellen. Hierdoor kan de simulator na plaatsing op de dijk nauwkeurig verticaal worden gesteld. Ook het eventueel bijstellen na enige verzakking is daardoor gemakkelijk. Het onderstel is een uitstekende aanpassing aan de simulator gebleken.

Het plaatsen van de geleideplaten / uitstroomplaten bleek, vooral bij "nat" weer, niet gemakkelijk. De zware platen moesten tussen het onderstel gemanoeuvreerd worden en met bouten worden vastgezet. Makkelijker zou zijn geweest wanneer deze platen middels een soort van geleideconstructie op hun plaats konden worden gebracht.

De aansluiting van de houten geleideschotten aan de simulator gaf problemen. De grote kracht van het water leidde ertoe dat de schotten regelmatig lossloegen. Door de schotten aan de buitenkant van de geleideplaten van uitstroomconstructie van de simulator met slotbouten vast te zetten, is dit probleem grotendeels opgelost.

Omdat er vanuit de meetcabine geen zicht was op de klep van de simulator, was onduidelijk wanneer de klep helemaal open dan wel dicht was. Om dit probleem voor de bediener van de klep te verhelpen, is een elektrische schakelaar (microswitch) op de simulator geplaatst, zodat aan de hand van de op de joystick aangebrachte led-verlichting kon worden gezien of de klep open (groen licht) of dicht (rood licht) was. Dit werkte zeer goed.

2.1.13 Pompen en leidingen

Voor de watervoorziening is gebruik gemaakt van een regelbare elektrische dompelpomp met een maximaal debiet van 1.200 m³/uur. De debietregeling is gebeurd met een bij de pomp behorende frequentieregelaar. De pompcapaciteit was voldoende voor 75 l/s per m. Bij erg kleine debieten was regeling met de frequentieregelaar niet meer mogelijk. De ondergrens ligt bij ongeveer 70-100 m³ per uur. Bij kleinere debieten is met een in de persleiding opgenomen afsluiter de weerstand in het systeem vergroot.

De configuratie was zo geplaatst dat twee proefstroken konden worden bediend vanuit de zelfde plaatsing van de pomp in de sloot. Alleen het leidingdeel op kruin behoefde te worden aangepast aan de andere posities van de overslagsimulator. Voor de andere twee proefstroken zijn behalve de simulator ook de pomp, leidingen en generator verplaatst. De pompconfiguratie heeft goed gewerkt.

Omdat het kanaal waarin de pomp was geplaatst uit loskorrelig bodemmateriaal bestond en de aanzuigmond naar beneden gericht was, heeft de pomp op de eerste locatie zich ca. 2 m

kunnen ingraven. Met veel inspanning en met behulp van een telekraan is de pomp weer op zijn plaats gebracht. Om te voorkomen dat de pomp zich opnieuw zou ingraven is de zuigmond meer omhoog gebracht. Om aanzuiging van lucht te voorkomen is om het midden van een eventuele draaikolk af te dekken, een grote bal boven het aanzuigpunt gebracht. Aanbevolen wordt om de pomp op een fundatieplaat te plaatsen.

Omdat de in de aanvoerleiding geplaatste debietmeter niet goed werkte (de meter gaf ca. 50% te weinig aan), is bij de instelling van het gewenste debiet ook gebruik gemaakt van een chronometer en de op de simulator aangebrachte schaalverdeling.

2.1.14 Stroom- en hydrauliekvoorziening

Ten behoeve van de stroomvoorziening van de pomp, verlichting, verwarming en meet- en regelapparatuur, is een dieselgenerator met ruim voldoende vermogen gebruikt. De generator was aangesloten op een milieutank. Tijdens de proeven is de milieutank meermalen bijgevuld met dieselolie. Een van deze vullingen is waarschijnlijk niet helemaal schoon geweest. Na deze vulling is het bij de proeven op de laatste proefstrook enkele malen voorgekomen dat het brandstoffilter dermate vervuild was dat de generator afsloeg. Nadat het filter was vervangen deden de problemen zich niet meer voor. Verder heeft de generator naar behoren gefunctioneerd.

Opgemerkt dient te worden dat de gebruikte "paddestoel" met elektrische aansluitingen, zich niet in een afgesloten ruimte heeft bevonden. Aangezien onder meer de beveiliging hierop is aangesloten, is dit een zeer kwetsbaar onderdeel van de stroomvoorziening, omdat zo gemakkelijk de stroom ten behoeve van de beveiliging kan worden afgesloten. In die situatie zal het beveiligingssysteem overigens wel een sabotage alarm naar de meldkamer geven, omdat het alarmsysteem voorzien is van een accu. Ook is het mogelijk ter plaatse een slijptol aan te sluiten waarmee de aanwezige niet beveiligde containers opengebroken kunnen worden.

Om de kleppen van de simulator te bedienen met de joystick vanuit de meetcabine is een hydrauliekvoorziening geplaatst op de kruin naast de simulator. Deze hydraulische aggregaat heeft goed voldaan.

2.1.15 Verlichting

De testsecties zijn alle voorzien van verlichting. De installatie bestond uit twee paar bouwlampen (4x 1000 W). De twee lichtinstallaties waren bevestigd op zowel de meetcabine als de overslagsimulator. Met behulp van deze installatie kon 's ochtends vroeg worden begonnen en tot de avond goed worden doorgewerkt. Ook tijdens donkere dagen heeft de extra verlichting bijgedragen aan een goed zicht op de testsecties. De verlichting is bij afwezigheid van het uitvoeringsteam ('s nachts en in het weekend) tevens gebruikt om ongewenst bezoek van derden te ontmoedigen.

2.2 Proefuitvoering

De kleinere overslagdebieten van 0,1 en 1 l/s per m zijn versneld uitgevoerd (zie Infram 2008). De overslagverdeling zelf is dan wel voor elk debiet goed gesimuleerd, maar de tijd tussen de 'overslaande golven' is verkort. Aangezien alleen de tijd tussen de overslagen wordt verkort en niet de belasting zelf, wordt ervan uitgegaan dat deze wijze van uitvoeren

geen consequenties heeft voor de resultaten. Met deze aanpassing is deze pomp met een relatief groot vermogen bruikbaar. Tevens leverde dit tijdwinst op.

De overslagsimulator is uitsluitend handmatig bediend. Dat was ook de beslissing na de evaluatie van Delfzijl. Wel zijn de stuurfiles zodanig aangepast dat in totaal een continue-verdeling van overslagvolumes is gesimuleerd en geen “getrapte” verdeling zoals in 2007 bij de proeven in Delfzijl. Het voordeel van handbediening is dat er steeds iemand is die precies weet wat er gebeurt en ook direct kan ingrijpen als er iets mis gaat. Het nadeel is dat, hoewel de stuurfile wel zo goed mogelijk wordt gevolgd, er toch afwijkingen zitten in de tijd waarin de simulator daadwerkelijk is geopend. En met name bij het correleren van metingen aan overslagvolumes is het eigenlijk gewenst om precies te weten of inderdaad op het juiste tijdstip de simulator is geopend. Verder is het een zeer arbeidsintensieve bezigheid, die gedurende lange tijd grote concentratie vereist. Ook dit kan, samen met het veelvuldig aanwezig zijn van bezoekers, leiden tot onnauwkeurigheid in afwerken van de stuurlijst. Vanuit deze ervaringen is het aan te bevelen de besturing te automatiseren.

De besturing is tijdens de uitvoer van de proeven uitgebreid met verklikkerlampjes die aangaven wanneer de vlinderklep van de simulator gesloten of geheel geopend was.

De combinatie simulator / instelbare pomp heeft prima gewerkt. Wel zijn door de vergroting van de simulator tot 22 m³ de krachten op de simulator vergroot. Dit geldt met name voor het gedeelte beneden de vlinderklep, waar het water uit een volle bak met grote kracht naar beneden valt. Hier en daar is de constructie verbogen, zijn lasnaden losgeraakt en lekt de uitstroombegeleiding. Dit alles is te verhelpen met een goede onderhoudsbeurt, waarbij mogelijk ook hier en daar versterkingen worden aangebracht.

2.2.1 Bemensing

Bij de uitvoering van de proeven zijn altijd minimaal 3 personen aanwezig geweest. Naast de uitvoering van de proef, die in principe kan worden uitgevoerd door twee personen, moet gedurende de proeven snel en adequaat ingespeeld kunnen worden op eventuele schadeontwikkeling of problemen. In veel gevallen kon de proef doorgang vinden wanneer het probleem door de andere leden van de uitvoeringsploeg werd opgelost. Daarnaast gng er gedurende de proeven veel tijd zitten in de organisatie van de logistiek van de eerstvolgende verplaatsingen, die moeilijk exact te plannen zijn. De bezetting gedurende de proeven is positief ervaren. Het uitvoeringsteam was goed op elkaar ingespeeld, zodat bij eventuele nieuwe proeven snel en effectief gewerkt kon worden. Desalniettemin heeft elke locatie andere kenmerken en kan men altijd voor locatiespecifieke verrassingen komen te staan.

2.2.2 Samenwerking met opdrachtgever en waterschap

De opdrachtgever van de proeven is niet actief betrokken geweest bij de proefuitvoering. Het waterschap is faciliterend geweest in de zin van het beschikbaar stellen van de locatie van de proef. Daarnaast werd op verzoek assistentie verleend indien daar aanleiding toe was.

2.2.3 Samenwerking met onderaannemers

Samenwerking met onderaannemers als Buitenkamp, BKF en loonwerkbedrijf Klaas Bijlsma is soepel verlopen.

3 Evaluatie meting hydraulische parameters

3.1 Proefuitvoering

Gecombineerde laagdikte/frontsnelheidsmeters hebben zowel de laagdikte van het overstromend water gemeten, als de frontsnelheid van de overslaande golf. De instrumenten of opnemers bestaan uit twee sensoren op onderlinge afstand van ongeveer 50 cm. De frontsnelheid moet achteraf door dataprocessing worden bepaald. De instrumenten bleken na de proeven bij de Boonweg enigszins gecorrodeerd. Voorafgaand aan de proeven in Zeeland zijn de instrumenten schoon gemaakt.

Om de frontsnelheid te bepalen zijn steeds twee laagdiktemeters of sensoren met onderlinge afstand van 50 cm in een frame geplaatst. Als de twee sensoren evenwijdig aan de stroomrichting werden geplaatst werd door de invloed van de middensteun op de tweede meter geen goed signaal ontvangen. Op die manier kon dus geen frontsnelheid worden gemeten.

Om de laagdiktemeters in het veld te ijken, zijn visuele metingen uitgevoerd. Hiertoe is getracht om ter hoogte van de laagdiktemeters de laagdikte af te lezen aan de hand van een op de steunen van de laagdiktemeters aangebrachte schaalverdeling. Deze metingen konden dan achteraf vergeleken worden met de gemeten waarden. Vooral bij grote volumes bleek de aflezing onnauwkeurig. Daarnaast bleek de aflezing sterk persoonsgebonden. Het wordt dan ook niet aanbevolen de laagdikte met het blote oog te af te schatten.

Met een zelfgemaakte prototype laagdiktemeter, bestaande uit een gekromde plank die over het overslaande water "surft", is geprobeerd een betere schatting van de laagdikte te geven. Deze provisorische "surfplank" lijkt op het eerste oog zijn werk goed te doen en is daarom, in aangepaste vorm, een serieus alternatief voor de draadgolfhoogtemeters.

Er zijn ook experimentele metingen uitgevoerd met een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS). Dit ondanks dat bekend was dat de snelheid mogelijk niet goed gemeten zou worden. Mogelijk zouden de metingen wel geschikt zijn om de mate van turbulentie vast te stellen.

Evaluerend kan worden gezegd dat het redelijk veel moeite kost om voor elke proef de meetinstrumenten goed mee te laten draaien en dat het erg veel werk kost om een goede dataprocessing uit te voeren. Wellicht kan het meten op een eenvoudiger manier gebeuren. Het is belangrijk dat op verschillende dijken, met verschillende taludhellingen en vegetaties, de laagdikte, frontsnelheid en verblijftijd worden bepaald. Maar het is niet persé noodzakelijk dit gedurende elke proef te doen.

Het is mogelijk beter helemaal niet tijdens een reguliere proef te meten, maar alleen op een bepaald moment met een aantal vaste overslagvolumes en deze ten behoeve van de reproduceerbaarheid enkele malen te herhalen. Hiermee is tijdens de proeven enige, maar niet consistente ervaring, opgedaan. Voor die dijk wordt dan eenduidiger en eenvoudiger de relatie tussen overslagvolume en hydraulische parameters vastgelegd. De dataprocessing wordt dan ook veel eenduidiger en eenvoudiger. En als het toch maar om een relatief klein aantal overslagvolumes gaat, is het zelfs te overwegen om in aanvulling op de metingen met de gebruikte instrumenten, met bijvoorbeeld een videocamera en afbakening op de zijwand de metingen uit te voeren. Dit is overigens ook een optie als metingen met instrumenten om de een of andere reden niet mogelijk zijn.

Het niet meten tijdens een reguliere proef heeft verder als voordeel dat de proeven zelf en het vastleggen van eventuele schadeontwikkeling, door het ontbreken van meetportalen en instrumenten, beduidend sneller en beter kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast is gebleken dat de opnemers tijdens de proef snel vervuild raken met losgewoeld gras, en dat tijdens daadwerkelijke erosie van de grasmat stukken graszode de opnemers (kunnen) vernielen.

Bij de evaluatie van de metingen van Delfzijl zijn ook nieuwe formules ontwikkeld voor laagdikte, snelheid en verblijftijd. Deze zijn ook in het Factual Report (Infram 2008), gegeven. De lijnen voor laagdikte, snelheid en verblijftijd voor verschillende overslagdebieten liggen niet op elkaar. Het is zo dat consequent bij een hoger overslagdebiet de lijnen voor alle drie hydraulische grootheden lager liggen. Integratie van snelheid en laagdikte over tijd levert volume. En doordat de lijnen consequent verschillen, kan de integratie niet voor alle overslagdebieten kloppen. De formules zijn dus fysisch nog niet correct. Aanbevolen wordt hier aandacht aan te besteden.

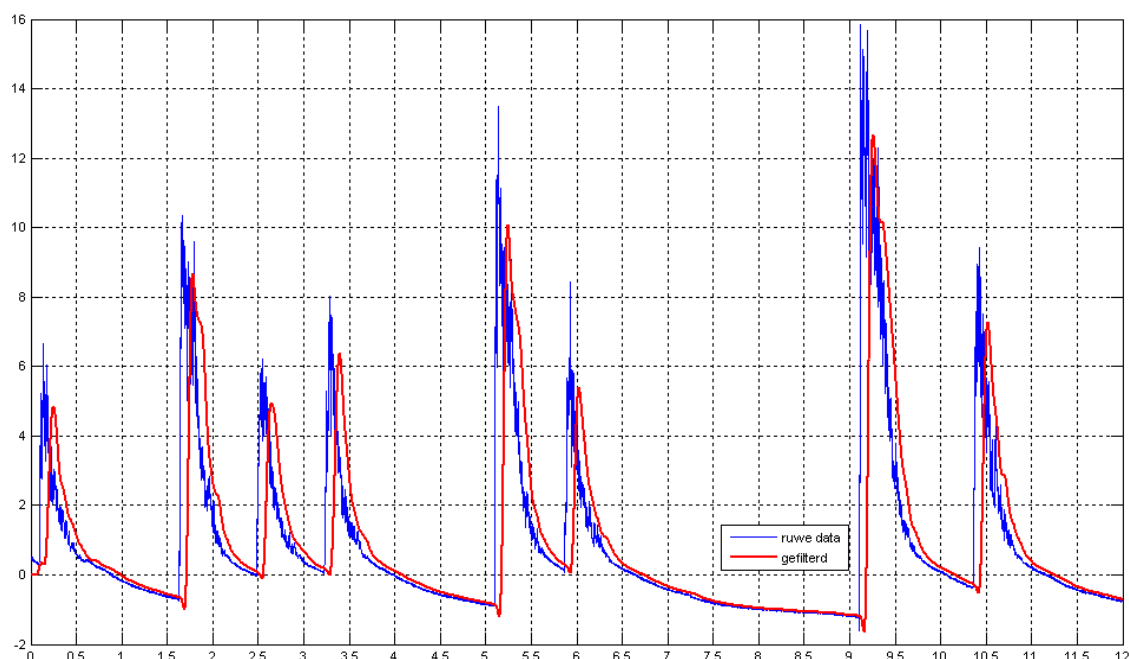
3.2 Data processing

3.2.1 Ruwe data meetopnemers

De laagdiktemetingen hebben een groot volume aan ruwe meetgegevens opgeleverd. Deze zijn in ASCII bestanden opgeslagen. Als voorbereiding zijn alle kolommen (zijnde 13) in deze bestanden naar aparte datafiles uitgeschreven, zodat elke file één kolom bevat met maximaal een tijdserie van een half uur. Voor elk half uur hebben we dus 13 datafiles met één kolom. Dit zijn:

- Kolom 1 → file met tijdstappen
- Kolom 2 → file met data voor laagdikteopnemer 1
- Kolom 3 → file met data voor laagdikteopnemer 2
- Kolom 4 → file met data voor laagdikteopnemer 3
- Kolom 5 → file met data voor laagdikteopnemer 4
- Kolom 6 → file met data voor laagdikteopnemer 5
- Kolom 7 → file met data voor laagdikteopnemer 6
- Kolom 8 → file met data voor laagdikteopnemer 7
- Kolom 9 → file met data voor laagdikteopnemer 8
- Kolom 10 → file met data voor laagdikteopnemer 9
- Kolom 11 → file met data voor laagdikteopnemer 11
- Kolom 12 → file met data voor snelheidsopnemer 1 (EMS-1)
- Kolom 13 → file met data voor snelheidsopnemer 2 (EMS-2)

Onderstaande Figuur 3.1 is een voorbeeld van het ruwe (en het gefilterde) signaal van opnemer 1.

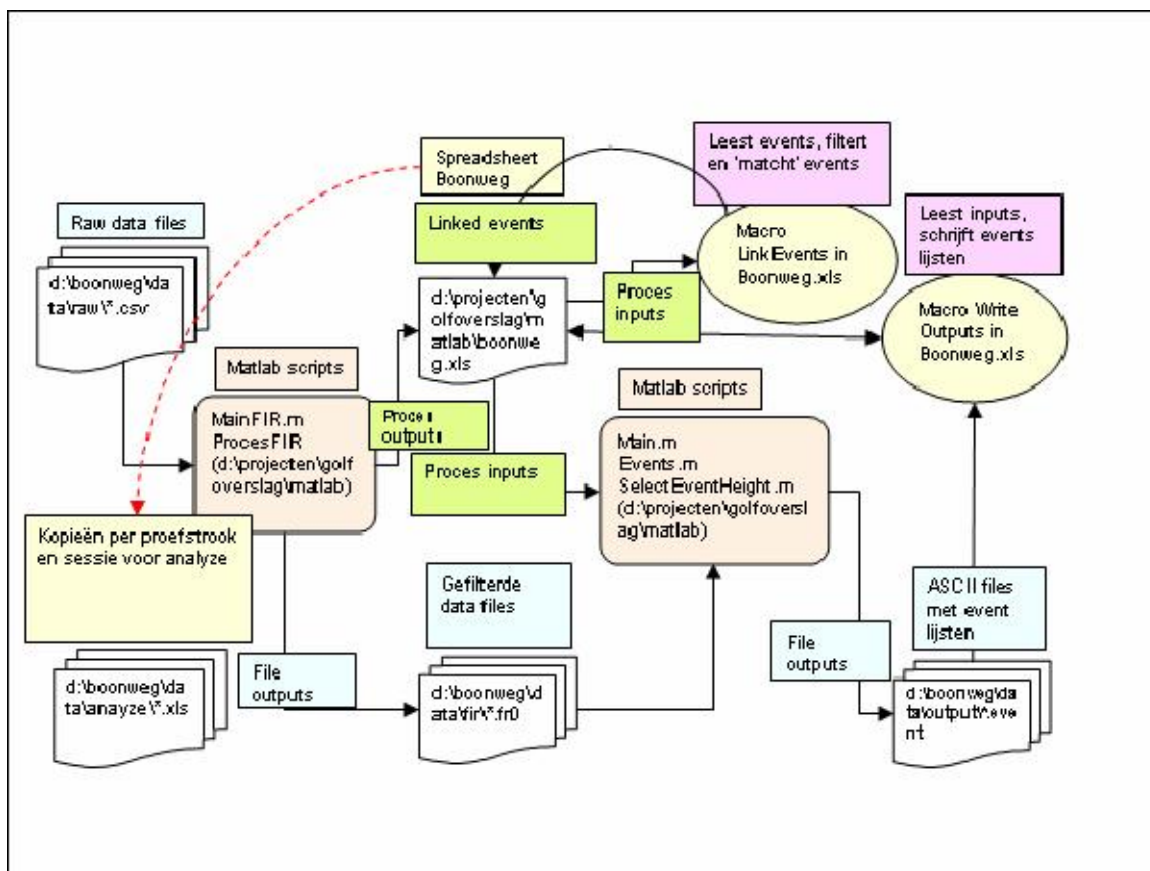


Figuur 3.1 Voorbeeld laagdikte signaal, ruw en gefilterd, sensor 1 (verticale as: laagdikte in dm; horizontale as tijd in $\times 10$ s)

Nu bevat niet elke file (kolom) relevante informatie. De laagdikteopnemers zijn paarsgewijs opgesteld. Het signaal van de tweede opnemer, die benedenstrooms van de eerste opnemer staat, geeft te veel verstoring. Daarom is ervoor gekozen om alleen de signalen van de eerste opnemer te gebruiken. Dit zijn sensoren 1, 3, 5, 7 en 9 (in de files met kolomnummers 2, 4, 6, 8, 10). De signalen van de snelheidsopnemers worden nog niet gebruikt. Daarover later meer in een aparte paragraaf.

Met een sample rate van 1000 Hz betekent dit maximaal 1.800.000 records voor een meetperiode van een half uur. Omdat een sessie orde twee uur duurt, zijn voor een sessie ongeveer 4 datafiles aanwezig. In de naamgeving van de files wordt het voorgaande weergegeven door het nummer van de kolom te gebruiken en een automatisch gegenereerd volgnummer per half uur per sessie. Een voorbeeld:

file: zeeland083-02.csv. Dit betekent volgnummer 83 met kolomnummer 2, ofwel sensor 1. De extensie CSV geeft aan dat het om ruwe data gaat. Extensie FR0 betreft gefilterde data en extensie EVENT betreft de gevonden golven (events) in de gefilterde data. In Figuur 3.2 wordt in een stroomschema het proces weergegeven om van ruwe data tot de gegevens te komen waarmee analyses kunnen worden uitgevoerd.



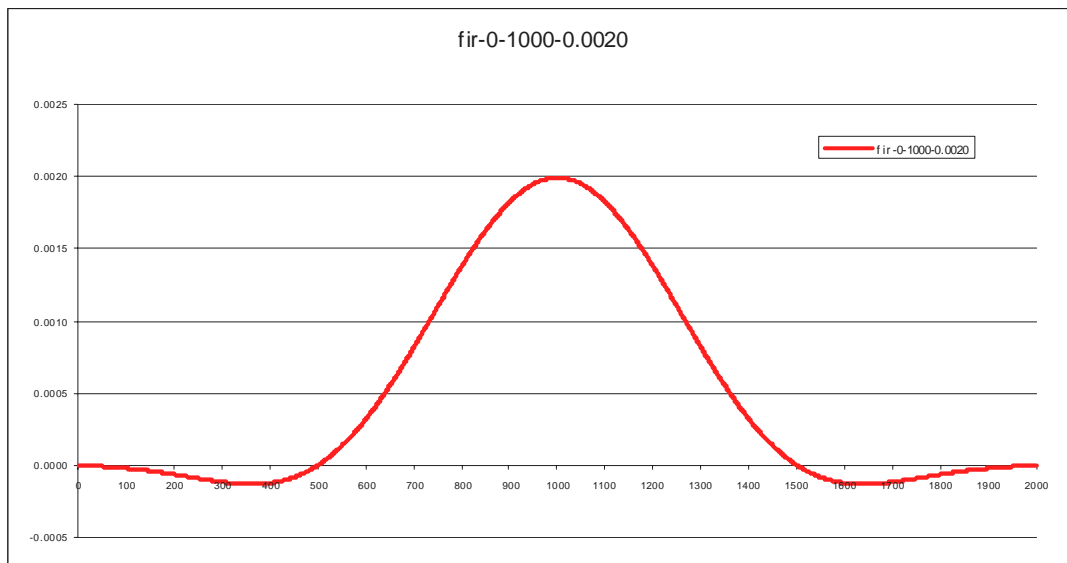
Figuur 3.2 Stroomdiagram bewerking meetresultaten

De figuur geeft weer hoe van ruwe bestanden met MatLab-programmatuur gefilterde bestanden worden gemaakt. Voorts is te zien hoe, eveneens met MatLab-programmatuur, lijsten met events worden afgeleid. Daarna worden deze lijsten met gebruik van Excel macro's in Excel geïmporteerd. Afsluitend worden met Excel macro's de tabellen met events gekoppeld aan de stuurlijsten die ook in het Excel spreadsheet zijn opgenomen. Hierna wordt elk van de stappen afzonderlijk besproken.

3.2.2 Filtering

De ruwe data bevat ruis, rimpels en golven. Alvorens met het afleiden van events te beginnen moet de ruwe data gefilterd worden. In de praktijk zijn goede ervaringen opgedaan met een zogeheten FIR-filter (Eng. Finite Impulse Response). FIR is een term die aangeeft dat de impulsresponsie van een (digitaal) filter eindig is. Bij het aanleggen van een puls op een FIR-filter zal het uitgangssignaal na een bepaalde tijd gelijk aan nul worden; de impulsresponsie is dus eindig. Dit in tegenstelling tot het uitgangssignaal van een IIR-filter (infinite impulse response) dat nooit uitdempt. Dit FIR filter moet alleen de ruis verwijderen. Rimpels en golven moeten blijven. In feite werkt het filter als een laag-doorlaat filter (LPF-filter) waarbij alleen de hoogste frequenties worden afgevangen. De processing toolbox van Matlab bevat een filter design omgeving waarin de parameters van het FIR-filter kunnen worden ingesteld om het gewenste resultaat te bereiken.

Voor de filtering van de ruwe data is het FIR-filter gebruikt aangegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 FIR-filter voor het filteren van ruwe laagdikte metingen (verticale as filter resolutie; horizontale as aantal samples)

De instellingen van de parameters voor het FIR-filter zijn:

- Aantal filtertaps = 1000 samples
- Filter resolutie = 0.002 s

3.2.3 Bepaling events

De gefilterde signalen zijn gebruikt om events af te leiden. In eerste instantie is getracht de events te bepalen op basis van de stijg- en daalsnelheden van de golfvlakken. Dit bleek niet goed te werken. Het zelfde gold voor het bepalen van de nulverschuiving, hetgeen bleek uit visuele checks van enkele signalen. Het zou te ver voeren om alle files per stuk te checken (enkele honderden). Daarom is overgegaan op een meer pragmatische aanpak: het stijgen van de waterhoogte boven een bepaald niveau (start threshold) en het dalen beneden een bepaald niveau (end threshold). De thresholds zijn afhankelijk te stellen van het signaal zelf. Ieder signaal is weer anders en bevat, ook na filtering, soms nog duidelijke ruis. Daarom is de volgende werkwijze gekozen:

Nulverschuiving (zero shift)

Deze wordt afgeleid uit het minimum van het signaal. De eerste 4 seconden van het signaal worden daarbij buiten beschouwing gelaten omdat daarin soms startproblemen optreden. Op basis van het minimum alleen wordt de nulverschuiving vaak als te groot bepaald door geïntroduceerde afwijkingen door de FIR filtering. Daarom is ook een gemiddelde over het gehele signaal bepaald. Dit gemiddelde ligt een bepaalde waarde hoger dan het minimum. We corrigeren de nulverschuiving met het verschil tussen *mean* en *min*, vermenigvuldigd met een factor. Deze factor (*zero shift correction factor*) staat default op 0.5, maar kan per bestand apart ingesteld worden, een soort fine tuning dus.

Drempelwaarde start event (threshold start)

De drempelwaarde voor de start van het event wordt afgeleid uit het bepaalde gemiddelde (*mean*) van het signaal, gecorrigeerd met een factor, *threshold start correction factor*. Deze staat default ingesteld op 2.0 maar kan per bestand apart ingesteld worden.

Drempelwaarde einde event (threshold end)

De drempelwaarde voor de einde van het event wordt afgeleid uit het bepaalde gemiddelde (*mean*) van het signaal, gecorrigeerd met een factor, *threshold end correction factor*. Deze staat default ingesteld op 1.5 maar kan per bestand apart ingesteld worden.

De betrokken Matlab scripts zijn aangepast, en in drie delen opgesteld:

- Main.m: regelt invoer en aanroep van script Events.m
- Events.m: leest de signaal data, bepaalt de zero shift, corrigeert het signaal met de zero shift, roept de event detectie module SelectEventHeight.m aan en schrijft event data naar files
- SelectEventHeight.m: bepaalt de thresholds, detecteert events en bepaalt de event properties (tijdstip, laagdikte en duur)

Het aantal gevonden events verschilt tussen de opnemers. Er kunnen diverse mogelijke oorzaken worden bedacht waarom de signalen tussen de opnemers verschillen. Een belangrijk verschil is natuurlijk de locatie t.o.v. de overslagbak. De golf die langs komt vervormt als functie van plaats en tijd. Te zien is dat, hoe verder een opnemer verwijderd is van de kruin, hoe minder events worden onderscheiden.

Voor de analyse zijn voor elke proefstrook (track) en sessie (session) aparte spreadsheets aangemaakt op basis van een kopie van geselecteerde sheets en het macro 'Writeoutputs' uit het 'moeder' spreadsheet 'Boonweg.xls'.

Een voorbeeld van een stukje inhoud van één van de sheets uit de spreadsheets is hier gegeven:

Inputs			Outputs opnemer #01. L=				2.71
#Event (#)	Time (s)	Volume (l)	Event (#)	Start (s)	Duration (s)	Height (dm)	
1	52	550	74.001	68.800	7.408	3.029	
2	62	97	74.002	81.800	3.732	0.992	
3	92	310	74.003	108.900	6.690	2.519	

De eerste 3 kolommen met titel 'Inputs' bevat een aangepaste opzet van de stuurlijsten. Hiervan is met name de 'Time' kolom in dezelfde eenheid gezet als de 'Start' kolom van de met MatLab geproduceerde eventlijsten. Voor elk van de 5 opnemers zijn voorts 4 kolommen weergegeven. In de header van de opnemerkolommen staat na 'L=' de afstand in meters van de opnemer t.o.v. de golfoverslagsimulator gegeven.

In de kolom 'Event' van de opnemers staat het eventnummer gegeven als: nummer van de file en het nummer van het event in die file gescheiden door een punt. Dit is gedaan om enige voeling te houden met de herkomst van het betrokken event. In de kolom 'Start' staat het moment van het uitstijgen van de waterstand boven de begin drempelwaarde (threshold start). De kolom 'Duration' geeft aan hoe lang het vervolgens duurt voordat de waterstand beneden de eind drempel (threshold end) komt. De kolom 'Height' geeft de laagdikte aan, na correctie met de nulverschuiving (zero shift).

De lengten van de lijsten tussen de opnemers verschillen. Blijkbaar zijn de signalen dermate verschillend dat bij eenzelfde instelling van de parameters een verschillend aantal events worden gevonden. Dit is niet verwonderlijk, alleen zou de correlatie onderling en met het input signaal (stuurlijsten) bij te grote verschillen moeilijker kunnen worden. Zo valt op dat bij de eventlijsten van 75 l/s/m (sheets 'Outputs75') opnemer 11 een duidelijk afwijkend patroon te

zien geeft t.o.v. van de andere opnemers. Het is de meest stroomafwaarts gelegen opnemer en heeft in principe het meeste last van de verstoringen bovenstreams.

3.2.4 Koppelen events

Voor het koppelen van events aan de stuurlijsten, zijn macro's geschreven in Excel. De macro's beschrijven de procedure voor het automatisch afleiden van de koppeling tussen events en de losgelaten input volumes. Deze is als volgt (hierbij wordt het spreadsheet 'Boonweg.xls' als voorbeeld gebruikt):

- We kijken eerst naar de koppeling tussen de input volumes en de gevonden events bij de eerste sensor. Dit om de tijdsverschuiving tussen het openen van de stortbak en het inschakelen van de meetopnemers te kunnen bepalen. Dit gebeurt op basis van een set significante events, meestal de grotere volumes en hogere golven. Hierbij worden de frequentie verdelingen van de input volumes en de events van de eerste sensor bepaald. Het aantal klassen is als invoer gegeven en is default gesteld op 20. Invoer geschiedt overigens in het sheet 'LinkControl' van het spreadsheet 'Zeeland.xls'.
- Vervolgens wordt gekeken naar de waarnemingen, die beneden p % van het totaal, voorkomen. De waarde van p kan zowel voor de input volumes als voor de gevonden events bij de eerste sensor als invoer gegeven worden. Dit levert n input volumes op en m events.
- Bij elk n input volume wordt uit de m events een event gezocht dat qua tijdstempel het dichtst bij (maar wel ná) de tijdstempel van het input volume valt. Als criterium daarbij geldt dat de gevonden tijdsverschuiving maximaal t seconden mag afwijken. De waarde van t wordt als invoer opgegeven en dient als startwaarde. De procedure levert een verbeterde inschatting van de tijdsverschuiving op.
- Wanneer alle n input volumes en m events doorzocht zijn, wordt van de gevonden tijdsverschuivingen het rekenkundig gemiddelde bepaald. Dit is de berekende tijdsverschuiving tussen de input volumes en de events van de eerste sensor. Deze berekende waarde wordt naar de invoersheet 'LinkControl' geschreven.
- Met de berekende tijdsverschuiving worden voor alle input volumes uit de gebruikte stuurlijsten de best passende events voor de eerste sensor gezocht. Dit wordt ook gedaan voor de volgende sensoren. Daarbij wordt ook de tijdsverschuiving tussen de opeenvolgende sensoren gebruikt. De waarden hiervan worden ook in het sheet opgegeven. Voor het 'matchen' van de events van de sensoren wordt rekening gehouden met de tijdsverschuiving en de marge van x % waarbinnen het tijdsverschil mag liggen. De opgegeven tijdsverschuivingen tussen de sensoren (ca. 0.4 - 1.0 sec) zijn visueel afgeleid uit de eventlijsten. Met de ingestelde defaultwaarden worden bruikbare resultaten gevonden.
- Uiteindelijk worden alleen de input volumes naar het uitvoersheet geschreven waarbij minimaal één sensor een passend event liet registreren. De namen van de invoer- en uitvoersheets worden opgegeven in het controlsheet 'LinkControl'. Let wel: de sheets worden niet automatisch gegenereerd. Ze moeten met de hand van te voren leeg worden aangemaakt. Er worden standaard namen gebruikt, een voorbeeld: sheet 'Outputs30' bevat de 'grosslist' van gevonden events voor de 30 l/s proef bij een bepaalde sessie (session) en proefstrook (track). De gefilterde en passende events worden dan geschreven naar sheet 'Linked30'.

Het voorgaande is de procedure zoals opgesteld voor de verwerking van alle metingen. Bij de resultaten van St. Philipsland en van Kattendijke is gebleken dat het niet goed mogelijk was om een goede match te vinden tussen input volumes en de gemeten events op basis van de

hierboven beschreven procedure. Dit leidde ertoe dat de procedure, waarmee de koppeling tussen de events en de input volumes wordt afgeleid, aangepast is. Hiervoor was een bijstelling van de uitgangspunten nodig op basis van wat de metingen laten zien en logisch redeneren. De timeshift procedure is zodanig aangepast dat ook achteruit in de tijd gezocht kan worden. Dit kan een negatieve waarde voor de timeshift opleveren, waarbij het volgende is aangenomen:

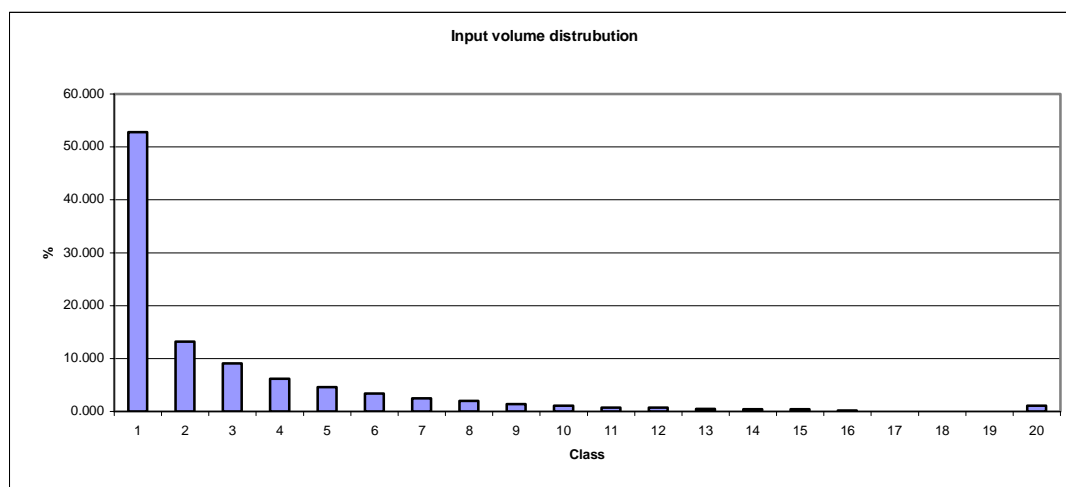
- Er is een negatieve timeshift: als de meetopstelling later wordt aangezet dan de golfoverslagsimulator; of,
- Er is een positieve timeshift: als de meetopstelling eerder wordt aangezet dan de golfoverslagsimulator.

Verder is de mogelijkheid geboden om een "harde" timeshift op te drukken. Dit kan handig zijn als de procedure niet tot een bevredigende oplossing komt, maar bij visuele check van de data wél een redelijk af te leiden timeshift gezien wordt. De automatische zoekacties worden dan overgeslagen in de procedure.

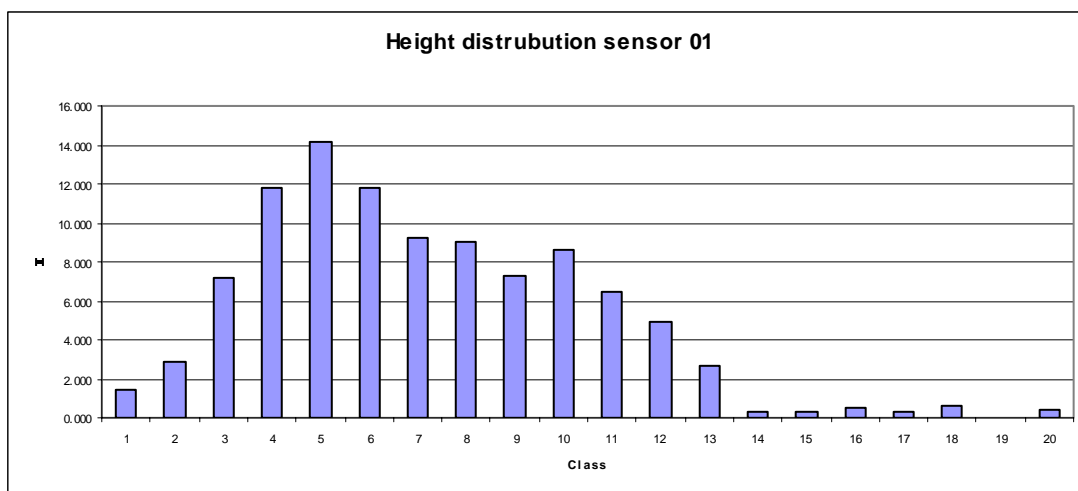
Bij de verwerking van de golfoverslagmetingen is ervan uitgegaan dat het handig is om inputs, procedures en outputs zo veel mogelijk in één spreadsheet te plaatsen. Om de gegevens hanteerbaar te houden, is wel per sessie én per proefstrook een apart spreadsheet ingericht. In elke spreadsheet zijn procedures aanwezig om:

- De event files (ASCII) te laden en samen met de stuurlijsten per input volume naar een spreadsheet weg te schrijven, en;
- De events in de aldus ontstane spreadsheet te koppelen aan de input volumes.

De resultaten van de tweede stap kunnen gecontroleerd worden aan de hand van de uitvoer in het sheet 'Debug'. In dit sheet worden lijsten gepresenteerd van de n hoogste volumes en m hoogste laagdiktes. Zoals eerder is besproken wordt de lengte van deze lijsten bepaald door een op te geven p % van het totaal. De lijsten bevatten de waarden van de input volumes die voorkomen beneden dit percentage. Het sheet bevat ook de grafieken van de klassen zowel voor input volumes als gevonden events. Het aantal klassen staat standaard op 20. De figuren 3.4.en 3.5 zijn voorbeelden daarvan.



Figuur 3.4 Klassenindeling inputvolume bij 75 l/s per m



Figuur 3.5 Klassenindeling laagdikte bij sensor 1 met 75 l/s

De verdeling van de laagdikte lijkt meer naar een normale verdeling te neigen terwijl die van de input volumes een meer gangbaar verloop laat zien: de meeste waarnemingen in de eerste klasse met een snel afnemend aantal waarnemingen in de hogere klassen. Om het mogelijk te maken om bij de laagdikte ook de match met de hoogste laagdiktes uit te voeren, kan de gebruiker instellen vanaf welke klasse het 'matchen' van events met volumes zal plaatsvinden. Als we in bovenstaande figuur 3.5 van 4 % van de waarnemingen uitgaan, zullen ook klassen 1 en 2 meedoen. In die klassen zitten juist waarnemingen met kleine laagdiktes. Om dat te voorkomen stellen we bijv. in dat we de klassen hoger dan 2 in de berekeningen meenemen. We zien dat klasse 3 al een percentage heeft van ruim 7 % en dus niet meer meetelt. Pas vanaf klasse 12 vallen de waarnemingen binnen het gestelde percentage van 4 %. Op die manier weten we zeker dat we met de set van hoogste waarnemingen werken.

Uit de procedure wordt de best passende tijderschuiving (timeshift) tussen de start van het input volume en de start van het (meest waarschijnlijk) daarbij horende event bepaald. Zoals eerder gesteld, gebeurt dit op basis van het n aantal hoogste input volumes en m aantal hoogste laagdiktes van sensor 1. Daarvan wordt een rekenkundig gemiddelde bepaald. Vervolgens worden de waarnemingen van de opvolgende sensoren aan die van sensor 1 gekoppeld. Hierbij wordt uitgegaan van een vaste reistijd tussen de opeenvolgende sensoren. Deze reistijd is goed visueel af te leiden uit de waarnemingen en is tussen de sensoren steeds gelijk. In het sheet 'LinkControl' worden deze reistijden in het veld 'Average dT between sensors (s)' opgegeven als één string. Hierbij is de eerste waarde een startwaarde voor het zoekalgoritme van de 'match' procedure tussen de input volumes en de events van sensor 1. Een voorbeeld van de string:

25.000;0.869;0.869;0.869;0.869

Met één golfoverslagsimulator en 5 sensoren geven we 5 waarden op, gescheiden door een ;-teken. De waarde 0.896 geldt dus voor de reistijden tussen sensoren 1 en 3, 3 en 5, 5 en 7 en, 7 en 9 en wordt in seconden opgegeven.

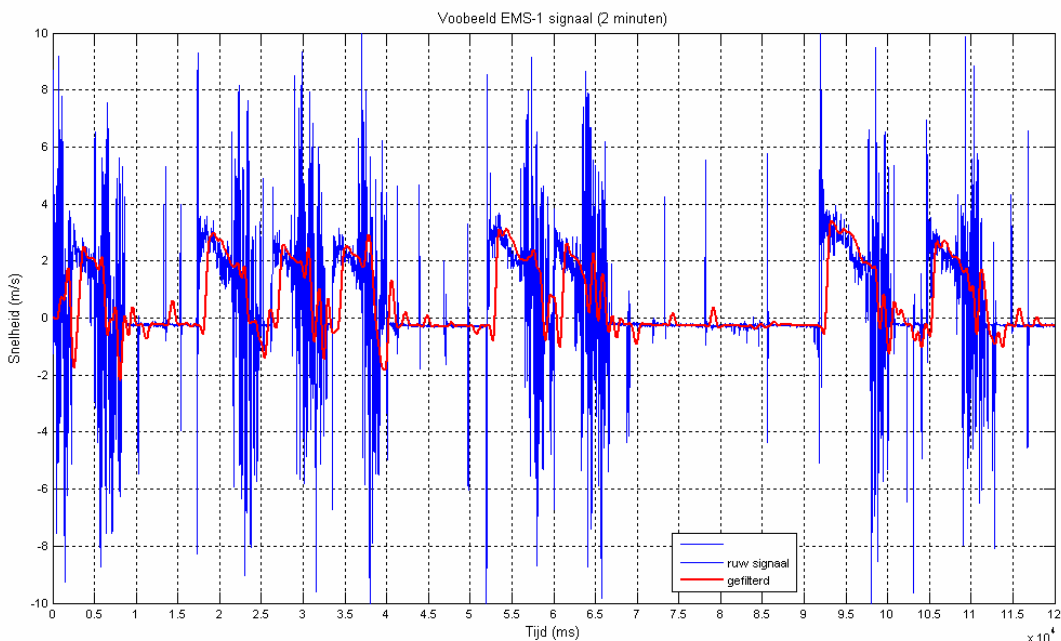
3.2.5 EMS-metingen

Naast laagdiktemetingen zijn ook snelheidsmetingen gedaan met EMS-opnemers. Deze opnemers zijn niet in het officiële meetprogramma opgenomen, maar hebben meegedraaid om ze in situ te kunnen beoordelen op bruikbaarheid.

Om de metingen van de EMS-opnemers te kunnen analyseren, is eenzelfde weg bewandeld als voor de laagdiktemetingen is gedaan. Eerst zijn de ruwe signalen gefilterd met de FIR-methode. Daarbij zijn dezelfde instellingen van het filter aangehouden als bij het signaal van de laagdiktemetingen. Vervolgens zijn op basis van de gefilterde bestanden met de reeds opgestelde Matlab-scripts resultaatfiles (ASCII) met events aangemaakt. De instellingen en resultaten worden weer bijgehouden in een centraal spreadsheet 'BoonwegEMS.xls'. Voor het bepalen van de events was het nodig de instellingen voor de zero shift correction aan te passen omdat het EMS signaal een zeer onrustig beeld te zien geeft. Na bepaling van de events en de koppeling van de events aan de instroomvolumes kan het volgende worden opgemerkt:

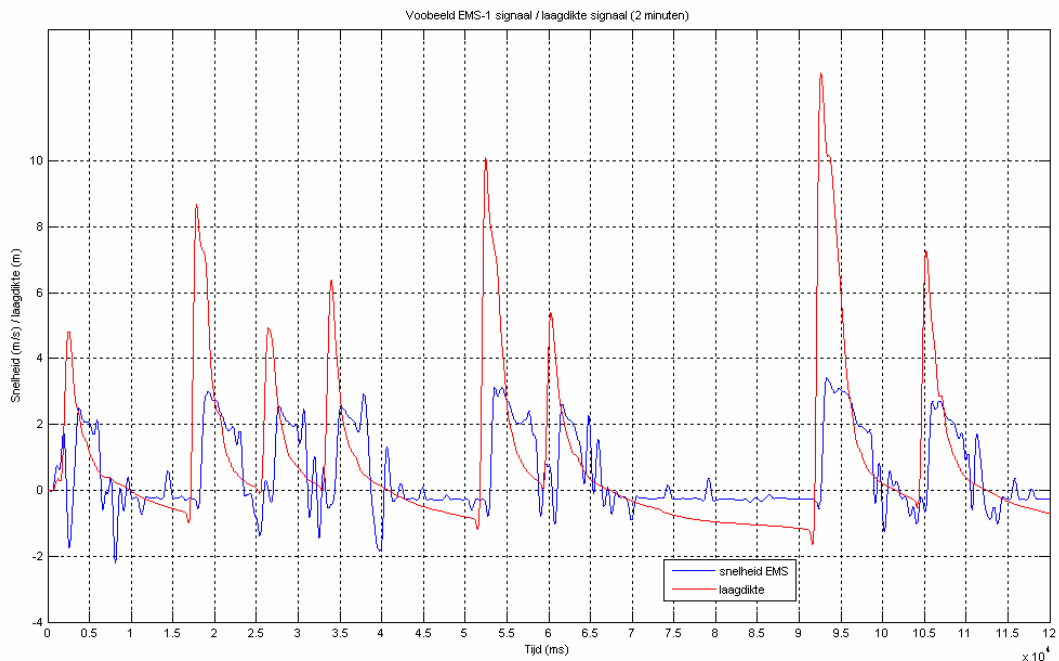
- De metingen kunnen op basis van deze event bepaling niet gekoppeld worden aan de overslagvolumes; er lijkt geen relatie te bestaan tussen snelheidspieken en overslagvolumes.

Dit geeft aanleiding om de EMS-signalen aan een nader onderzoek te onderwerpen. Als voorbeeld zijn in Figuur 3.6 de eerste 2 minuten van een EMS signaal gegeven, zowel ruw (blauw) als gefilterd (rood).



Figuur 3.6 Voorbeeld EMS signaal, ruw en gefilterd (verticale as: snelheid in m/s; horizontale as tijd in 10^4 ms = $\times 10$ s)

Als we de gefilterde signalen van EMS en laagdiktemeter (zie Figuur 3.1) combineren, ontstaat Figuur 3.7.

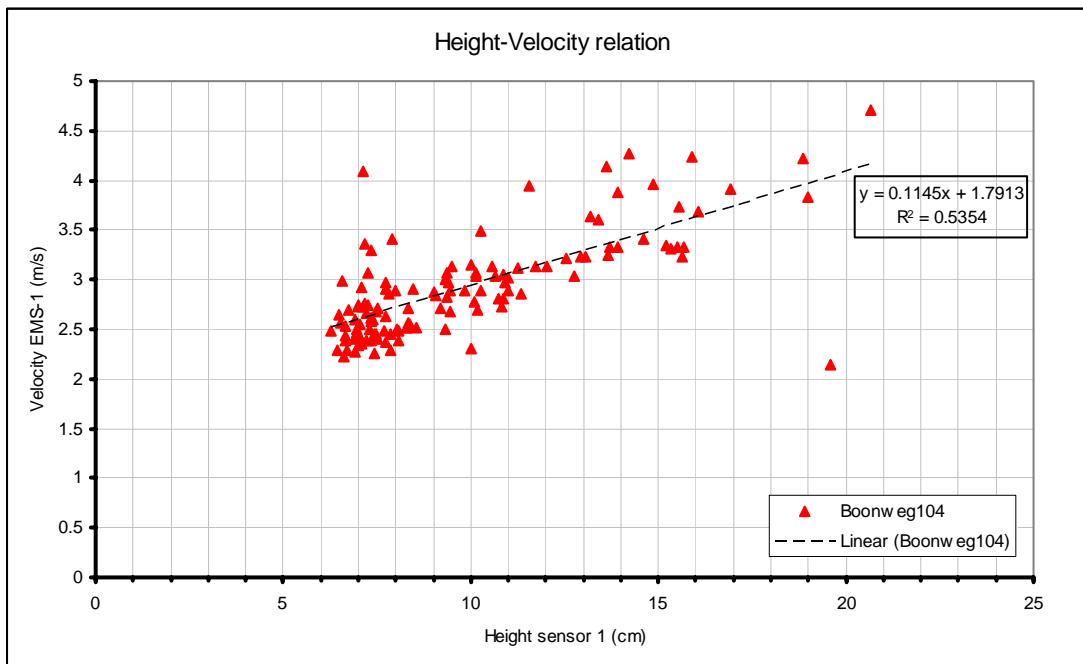


Figuur 3.7 Voorbeeld gecombineerd EMS- en laagdikte-sigitaal (verticale as: snelheid in m/s en laagdikte in dm; horizontale as tijd in 10^4 ms = $\times 10$ s)

Er is een goede overeenkomst in de tijd te zien tussen het EMS-sigitaal en het laagdikte sigitaal. Het EMS-sigitaal geeft na de piek verstoringen te zien en schiet zelfs door tot onder de nullijn. Het event-algoritme dat voor het sigitaal van de laagdikte is gebruikt kan hier niet zonder meer worden toegepast, getuige de resultaten van de eerste poging van het koppelen van snelheidsevents aan de overslagvolumes. Het hier getoonde voorbeeld geeft echter wel aanleiding nogmaals de EMS-signalen te bewerken, met name als het gaat om het bepalen van events. De Matlab-scripts, die bij de bepaling van de golfhoogtevents zijn gebruikt, moeten dan worden aangepast, en wel zodanig dat de verstoringen na de snelheidstop niet als nieuw event worden gezien. Dit kan bereikt worden door:

- de automatische bepaling van de nulpuntsverschuiving (zero shift) uit te zetten, omdat het sigitaal daarvoor niet geschikt is. In plaats daarvan stellen we de nulpuntsverschuiving gelijk aan 0. We krijgen daarmee een afwijking (orde 0.25 m/s in het voorbeeld), maar de procedure wordt meer robuust. De afwijking kunnen we later corrigeren;
- een hogere correctiefactor voor de begin-drempelwaarde te nemen. Zo worden de verstoringen aan het eind van het event niet als apart event gezien; en,
- als eind-drempelwaarde de doorgang door de nullijn te nemen. Dus, zodra het EMS-sigitaal ≤ 0 dan wordt dit als einde van het snelheidsevent gezien.

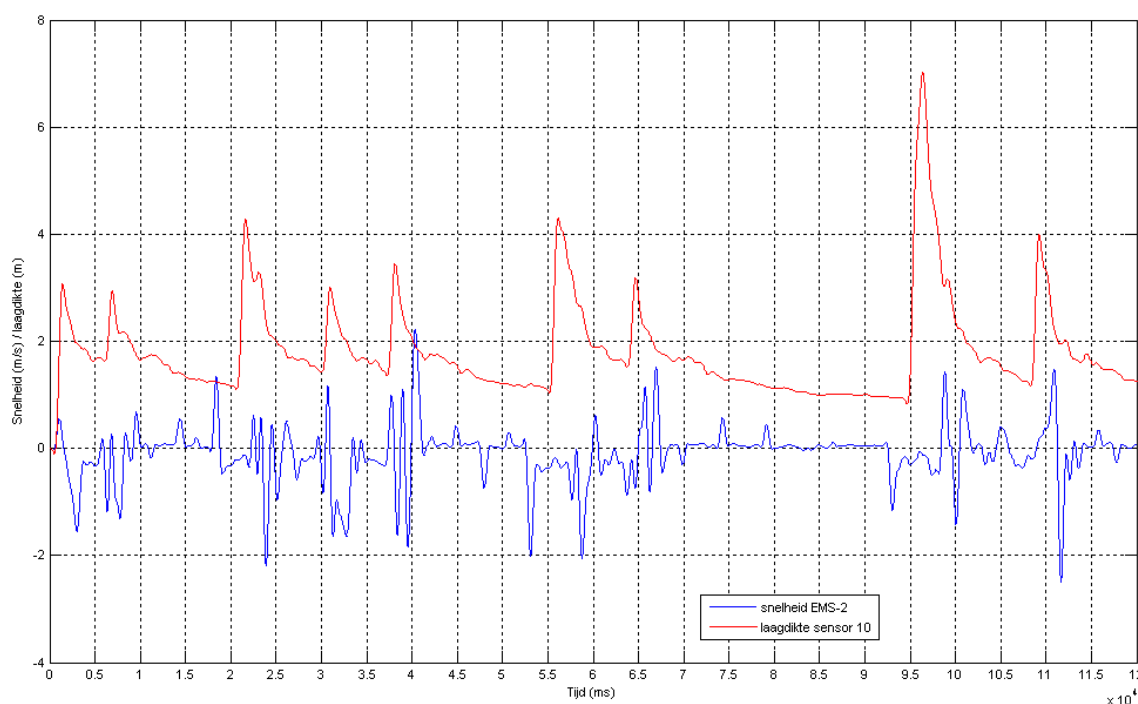
Om dit te testen is proef Boonw104 weer als voorbeeld genomen. Als correctiefactor voor de begin-drempelwaarde is 4.0 aangehouden. Dit was 1.4 bij de golfevent bepaling. Als resultaat worden ongeveer evenveel events gevonden als bij de bepaling van de golfhoogte events. Als test zijn vervolgens met de hand de events gematched. In onderstaande figuur is het verband tussen de snelheid van EMS-1 en de laagdikte van sensor 1 gegeven.



Figuur 3.8 Verband EMS- en laagdikte-sigitaal

Er is een redelijk verband te zien, met een oplopende snelheid bij een toenemende laagdikte, maar lineaire regressie geeft een lage R^2 waarde. De spreiding is vrij groot. Ook valt op dat de waarde van de snelheden (2.2 – 4.5 m/s) enigszins lager ligt dan de waarde van de snelheden die uit de looptijden van de golfvronten is bepaald tussen sensor 1 en 3. Die laatste varieert tussen 3 en 6 m/s (zie de grafiek van teststrook 3 bij 50 l/s, Figuur 3.27).

Op basis van de resultaten voor de bewerking van het EMS-1 signaal voor Boonw104 zijn de EMS-metingen van de proeven aan de Boonweg opnieuw bewerkt en is getracht de events opnieuw te koppelen aan de overslagvolumes. De resultaten hiervan zijn na de resultaten van de laagdikte metingen voor proefstrook 3 gegeven (blz 34 e.v.). Overigens laten die resultaten steeds een verschil zien tussen de hoogte van de waarden van EMS-1 en die van EMS-2. Onderstaande grafiek laat de metingen van opnemer EMS-2 samen met de metingen van sensor 10 zien voor de eerste 2 minuten van proef Boonw104 (50 l/s er m).



Figuur 3.9 Gecombineerde EMS-1 en EMS-2 signalen

Te zien is dat het signaal van de EMS-2 opnemer beduidend anders is dan dat van de EMS-1 opnemer. Ook voor de andere proeven geven de meetresultaten dit beeld te zien. Er worden zelfs negatieve snelheden geregistreerd. Geconcludeerd kan worden dat EMS-2 niet goed heeft gefunctioneerd.

Bij het bekijken van de grafieken die hierna volgen, is het handig om de opstelling van de meetinstrumenten aan de Boonweg te noemen. Die was als volgt:

Locatie t.o.v. geleidebak	Afstand (m)
LDFS1	2.71
EMS1	2.79
LDFS2	7.07
LDFS3	11.84
EMS2	11.92
LDFS4	16.64
LDFS5	21.20

Ten aanzien van de metingen met de EMS-opnemers dient opgemerkt te worden dat er alleen van een goed signaal sprake kan zijn zolang de opnemer niet droogvalt. Als dit laatste gebeurt, wordt het signaal zeer onrustig, wordt regelmatig kleiner dan nul en verliest zijn geloofwaardigheid.

3.2.6 Signaalanalyse EMS-sensoren

De metingen van de EMS-sensoren kunnen mogelijk ook een indruk geven over de mate van turbulentie tijdens het passeren van de golven. Bij verschillende debieten is gekeken naar de standaarddeviatie en de relatieve turbulentie van het signaal. Hiervoor is enige bewerking van het signaal nodig. We gaan uit van het ruwe signaal en gebruiken slechts een gedeelte

bijvoorbeeld de eerste 2 minuten. Daarvan gebruiken we vervolgens die gedeelten waarbij we zeker weten dat de EMS-sensor onder water is gedompeld. Dat zijn de momenten waarop een golf (event) passeert. Die gedeelten knippen we uit het signaal en we bepalen daarvoor ook een voortschrijdend gemiddelde. Dit voortschrijdende gemiddelde trekken we van het ruwe signaal af om een genormaliseerd signaal te verkrijgen. Op deze manier zijn de signalen van elk van de stukken onderling vergelijkbaar en kan een objectieve indruk worden verkregen van de standaarddeviatie en de relatieve turbulentie, r_0 . De laatste parameter wordt berekend door de standaardafwijking door het gemiddelde te delen, dus $r_0 = \text{stdDev} / \text{Average}$. Dit is gedaan voor representatieve proeven van 30 l/s/m, 50 l/s/m en 75 l/s/m. Voor 10 l/s/m is geen goede EMS-1 registratie beschikbaar. In onderstaande tabellen zijn de resultaten gegeven.

**Kenmerken EMS-1 signaal eerste 2 minuten
(120000 samples)**

f:\Boonweg\data\raw\boonw089-12.csv

q=30 l/s/m

Event (#)	StdDev (m/s)	Average (m/s)	R_0 (-)
1	0.347	2.508	0.139
2	0.332	2.052	0.162
3	0.339	2.062	0.164
4	0.271	2.356	0.115
5	0.318	2.275	0.140
6	0.326	2.128	0.153
7	0.411	2.220	0.185
8	0.212	1.996	0.106
9	0.330	2.517	0.131
10	0.259	2.183	0.119
11	0.259	2.183	0.119

Mean	standard	deviation:	0.310
Overall	average	:	2.225
Overall	R_0	:	0.139

**Kenmerken EMS-1 signaal eerste 2 minuten
(120000 samples)**

f:\Boonweg\data\raw\boonw104-12.csv

q=50 l/s/m

Event (#)	StdDev (m/s)	Average (m/s)	R_0 (-)
1	0.291	2.215	0.132
2	0.352	2.441	0.144
3	0.280	2.212	0.126
4	0.280	2.206	0.127
5	0.255	2.549	0.100
6	0.321	2.218	0.145
7	0.324	2.656	0.122
8	0.325	2.340	0.139

Mean	standard	deviation:	0.303
Overall	average	:	2.355
Overall	R_0	:	0.129

**Kenmerken EMS-1 signaal eerste 2 minuten
(120000 samples)**

f:\Boonweg\data\raw\boonw111-12.csv

q=75 l/s/m

Event (#)	StdDev (m/s)	Average (m/s)	R_0 (-)
1	0.297	2.020	0.147
2	0.345	2.515	0.137
3	0.367	2.697	0.136
4	0.251	2.500	0.100
5	0.247	2.434	0.102

Mean	standard	deviation:	0.301
Overall	average	:	2.433
Overall	R_0	:	0.124

Te zien is dat de standaardafwijking ongeveer 0.3 m/s is, terwijl de relatieve turbulentie 0.12 á 0.13 bedraagt. Het betreft hier overigens wel metingen in een punt, en geen over de verticaal gemiddelde waarden. Het beeld over de verschillende debieten is vrij consistent.

Opgemerkt moet worden dat onduidelijk is of dit resultaat bruikbaar is. Als de geregistreeerde gemiddelde snelheid niet correct is, dan wil dat niet a priori betekenen dat ook de standaardafwijking niet correct is. In dat geval is wel de relatieve turbulentie niet correct. Toepassen van voorgaande vraagt dus voorzichtigheid.

Verder lijkt een relatieve turbulentie van 0.12 á 0.13 op basis van visuele waarnemingen veel te laag.

3.3 Resultaten metingen

Er zijn alleen hydraulische metingen verricht op de teststroken 1 en 3. Eerst worden de resultaten van teststrook 1 gegeven, daarna die van teststrook 3.

3.3.1 Teststrook 1

Voor de analyse van de metingen is een aantal figuren opgesteld. Deze worden achtereenvolgens gepresenteerd.

De locaties van het hart van de meetportalen ten opzichte van de uitstroomopening van de overslagsimulator waren:

meetportaal 1 (sensoren 1 en 2):	2,71 m
meetportaal 2 (sensoren 3 en 4):	7,07 m
meetportaal 3 (sensoren 5 en 6):	11,84 m
meetportaal 4 (sensoren 7 en 8):	16,64 m
meetportaal 5 (sensoren 9 en 10):	21,20 m

De EMS snelheidsmeters stonden op:

EMS-1: 2,79 m

EMS-2: 11,92 m

Beschikbaar zijn metingen tijdens de overslagdebieten van $q=0.1, 1.0, 10, 30, 50$ en 75 l/s per meter.

Bosman (2007) heeft analytische verbanden tussen laagdikten en overslagvolumes en snelheden en overslagvolumes bepaald als functie van de positie ten opzichte van de binnenkruinlijn. De formules zijn toegepast op de metingen door de overslagvolumes als invoervariabele aan te bieden, waarna de verwachte laagdikte of snelheid uitgerekend kan worden. Met de uitkomsten van de verwerking zijn grafieken gemaakt waarmee we relaties proberen te leggen tussen verschillende aspecten van de data, bijvoorbeeld als volgt:

- Relatie tussen overslagvolume en laagdikte, frontsnelheid en golfduur bij $0.1, 1.0, 10, 30, 50$ en 75 l/s/m;
- Relatie tussen overslagvolume en laagdikte, frontsnelheid en golfduur voor alle debieten per proefstrook;
- Correlaties voor laagdikte en snelheid tussen de sensoren;
- Verhoudingen van laagdiktes en snelheden in relatie tot de afstand van de kruin;
- Relatie van de snelheid tot de laagdikte per sensor en debiet; en,
- De relatie van de EMS-snelheidsmetingen met de overslagvolumes.

Relatie laagdikte en volume teststrook 1

De relatie tussen laagdikte en volume is over het algemeen goed zichtbaar. Vaak zijn events echter niet goed te koppelen aan de inputvolumes. Dit vertaalt zich in puntenwolken op willekeurige plekken in de grafieken. De verschillende debieten laten ook een verschillend beeld zien. In alle gevallen geldt dat de waarnemingen van sensor 9 onderaan het talud zeer onrustig zijn en meestal slecht aan de stuurlijsten zijn te koppelen.

Als voorbeeld is in figuur 3.12 voor de laagdiktemetingen bij $q=30$ l/s/m ook het formuleverloop van Bosman gegeven samen met de gefitte lijn op basis van de theorie van Bosman met aangepaste coëfficiënten. Verder is als voorbeeld getracht logaritmische curve fitting toe te passen om een indruk te krijgen van de mogelijke kwaliteit (r^2) van een dergelijke fitting. De vergelijking die wordt gevonden is:

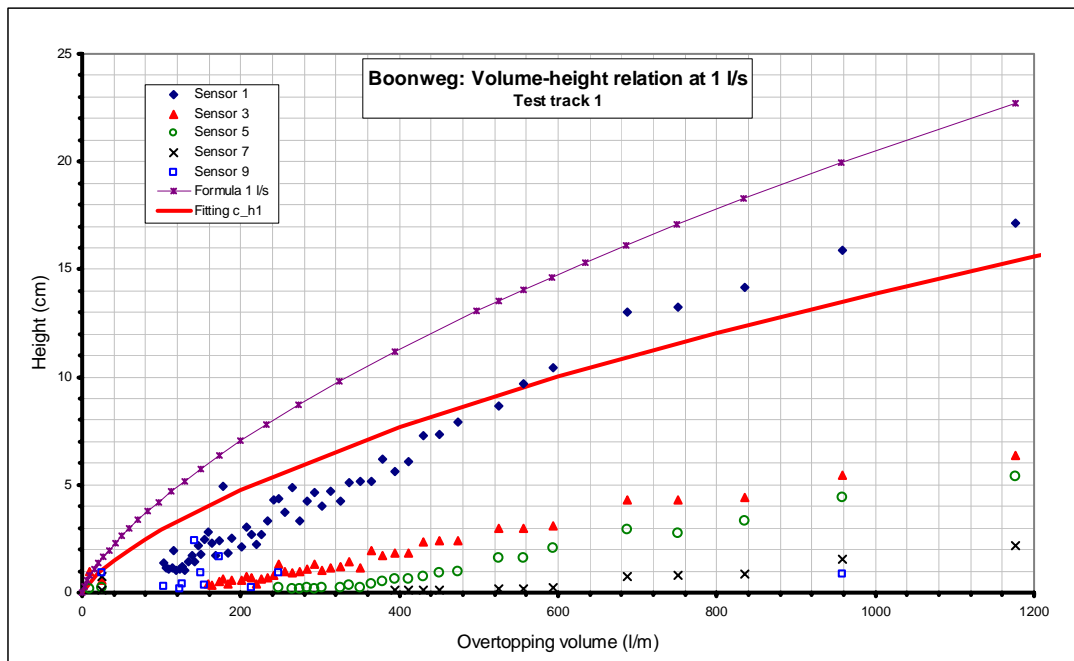
$$H = 4.06 \times \ln(V) - 14.87$$

Waarin:

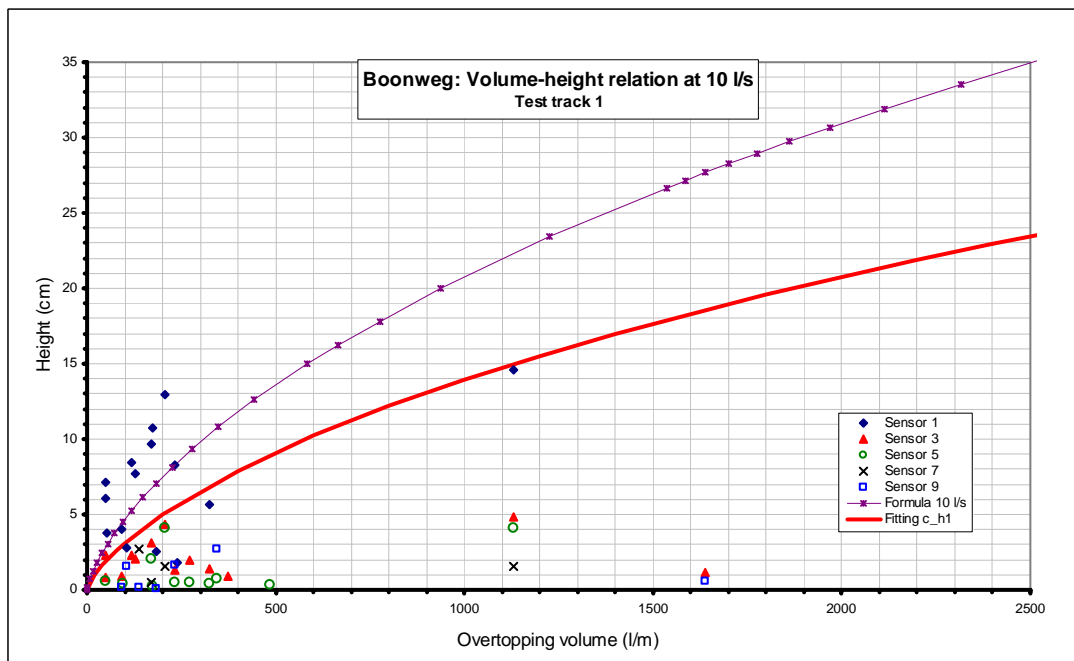
H = laagdikte in cm

V = volume in l/m

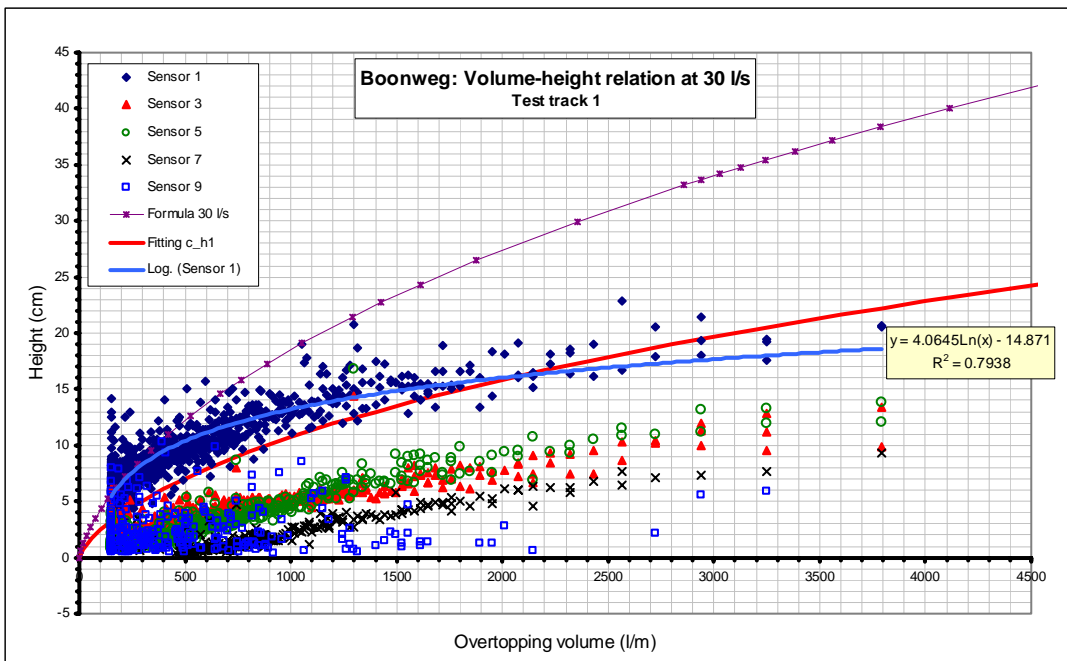
Met $r^2 = 0.79$ is dit een redelijke fitting voor de metingen van sensor 1 maar het heeft geen wetenschappelijke achtergrond. Daarvoor is de benadering van Bosman waarbij coëfficiënten kunnen worden afgeregeld beter geschikt.



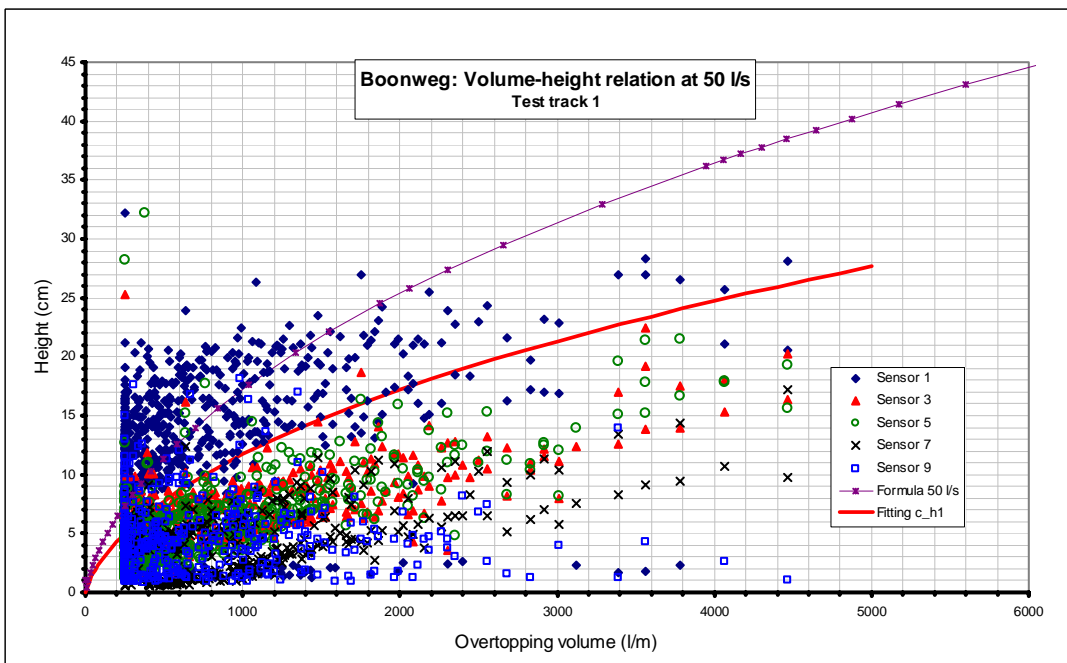
Figuur 3.10 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 1 l/s/m in teststrook 1



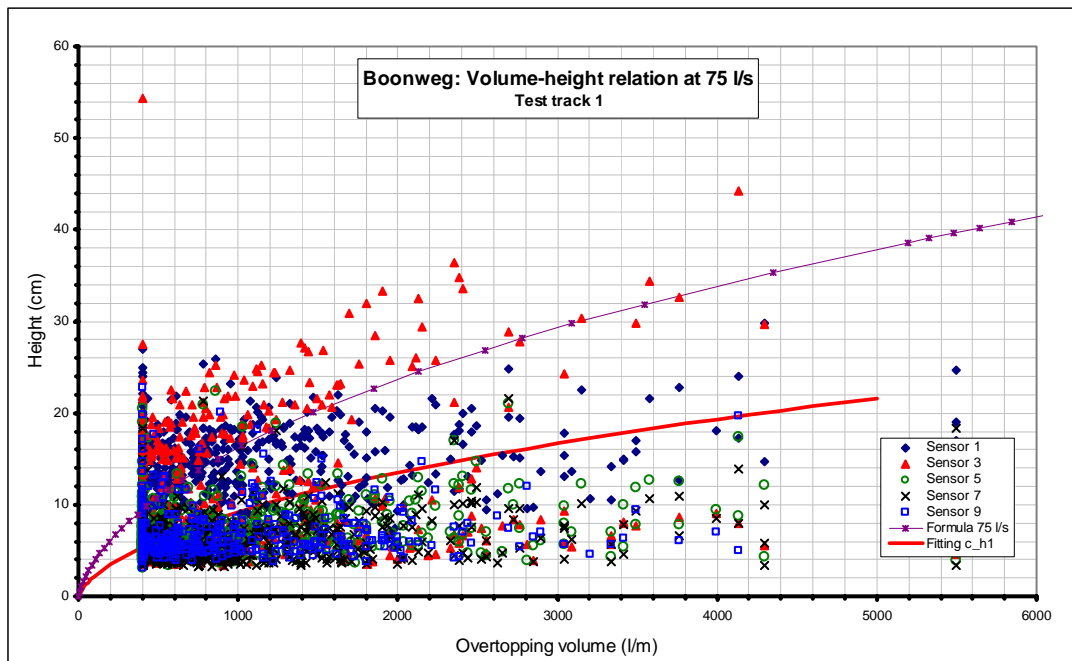
Figuur 3.11 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 10 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.12 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 30 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.13 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 50 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.14 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 75 l/s/m in teststrook 1

Relatie frontnelheid en volume teststrook 1

Hieronder worden de relaties per debiet tussen overslagvolume en frontnelheid gegeven voor proefstrook 1. De frontnelheid is afgeleid van de begintijdstippen van de gevonden laagdikte events van de eerste opnemers van twee opeenvolgende portalen.

De relatie tussen frontnelheid en volume is ook hier over het algemeen goed zichtbaar. Events zijn minder goed te koppelen aan de inputvolumes. Immers, voor het bepalen van de snelheid tussen twee sensoren heb je voor allebei een golf nodig die aan hetzelfde inputvolume gekoppeld is. Bij het koppelen van de laagdikte aan een inputvolume is dat niet per sé nodig. Daarom zien we bij het koppelen van snelheidsevents minder punten dan bij het koppelen van de golven zelf. De verschillende debieten laten weer een verschillend beeld zien, waarbij het beeld bij de snelheden vaak anders is dan bij de laagdikten. In alle gevallen geldt dat de waarnemingen voor sensortraject 7-9 onderaan het talud zeer onrustig zijn en meestal slecht aan de stuurlijsten zijn te koppelen. In onderstaande samenvatting zijn de belangrijkste observaties per debiet gegeven. We gaan daarbij uit van de volgende benamingen:

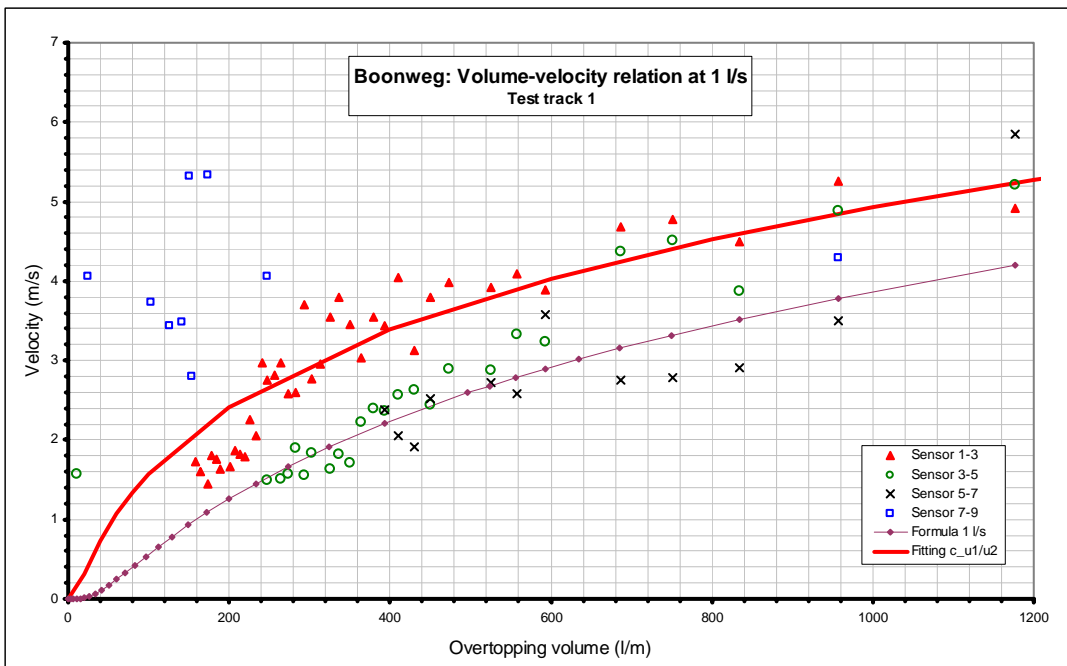
sensortraject 1-3 = traject 1

sensortraject 3-5 = traject 2

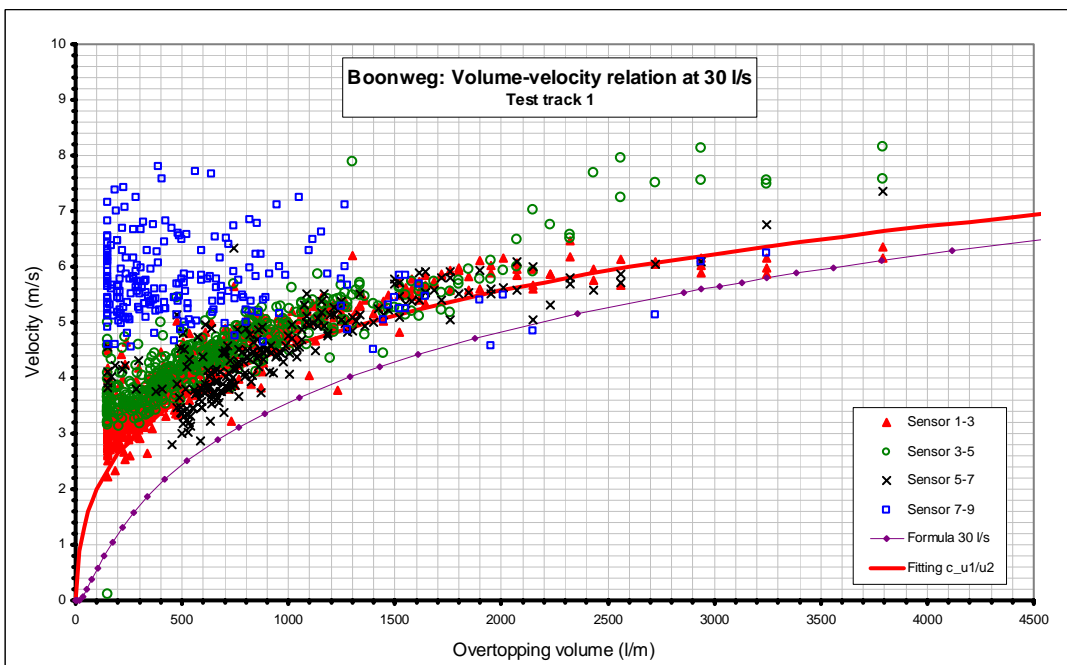
sensortraject 5-7 = traject 3

sensortraject 7-9 = traject 4

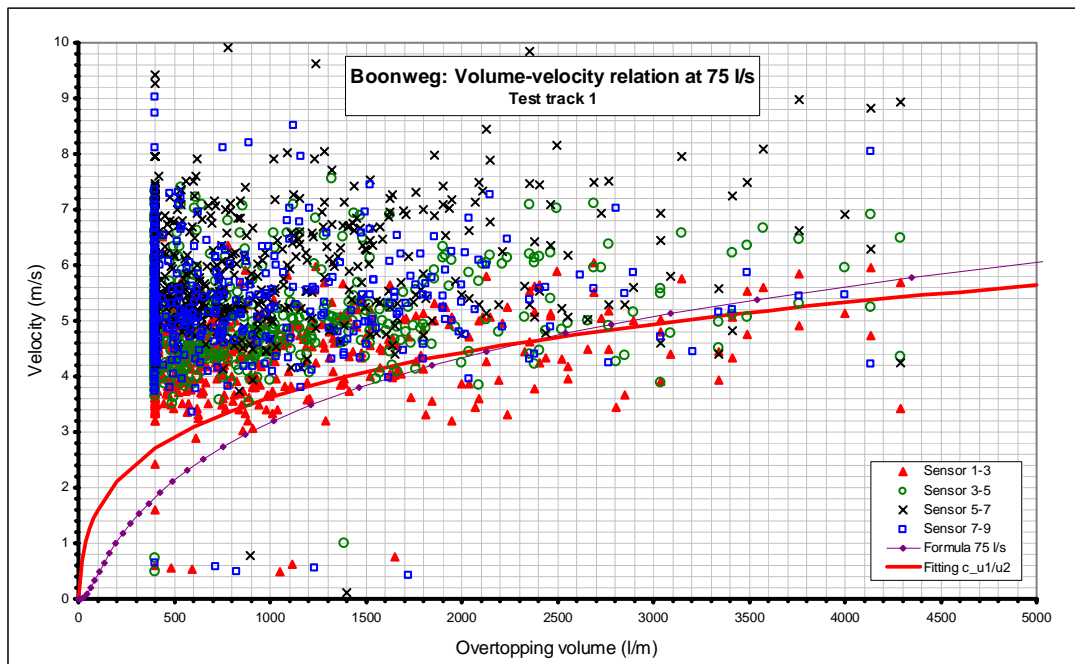
Het algemene beeld is dat de snelheden op het talud stroomafwaarts eerder toenemen dan afnemen. Dat beeld verschilt echter per debiet.



Figuur 3.15 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 1 l/s/m in teststrook 1

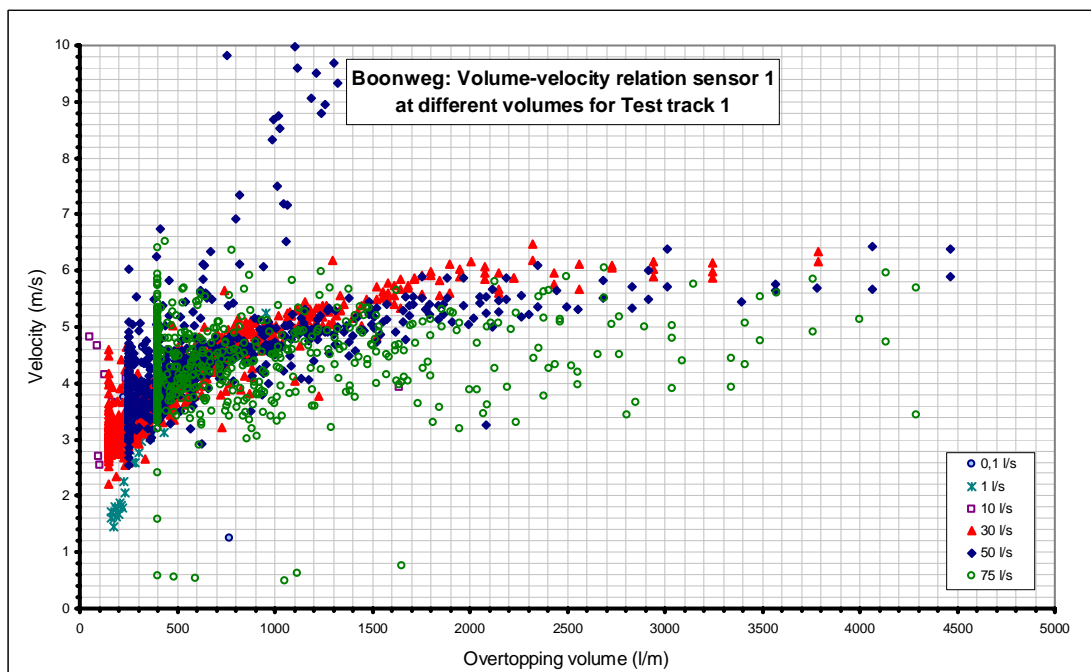


Figuur 3.16 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 30 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.17 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 75 l/s/m in teststrook 1

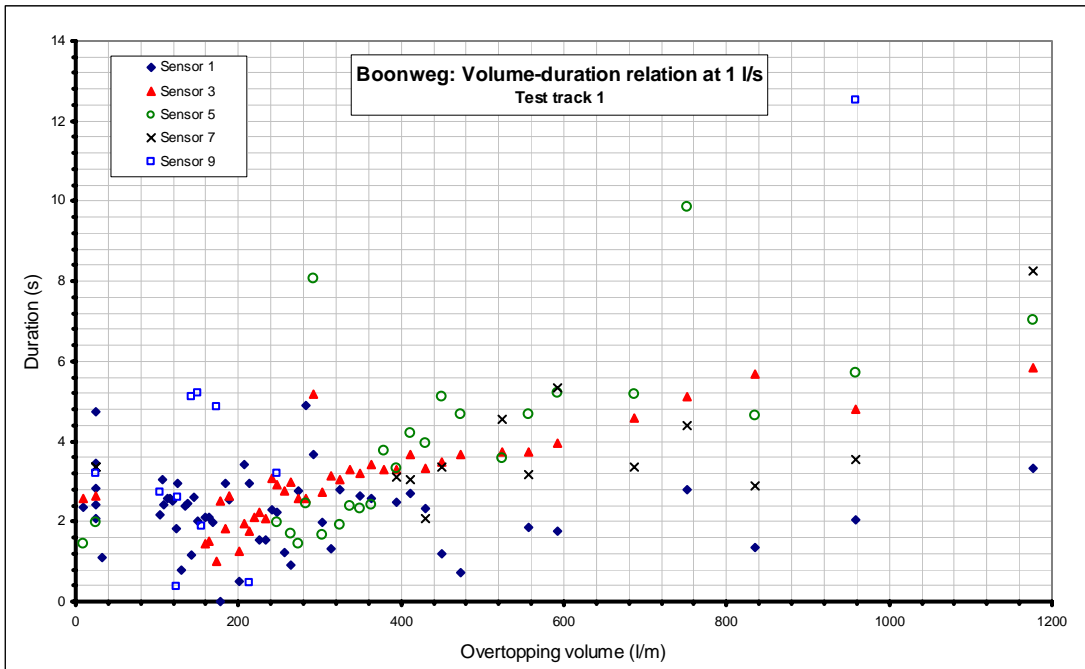
De volgende figuur vergelijkt de frontsnelheid bij laagdiktemeter 1 voor de verschillende debieten.



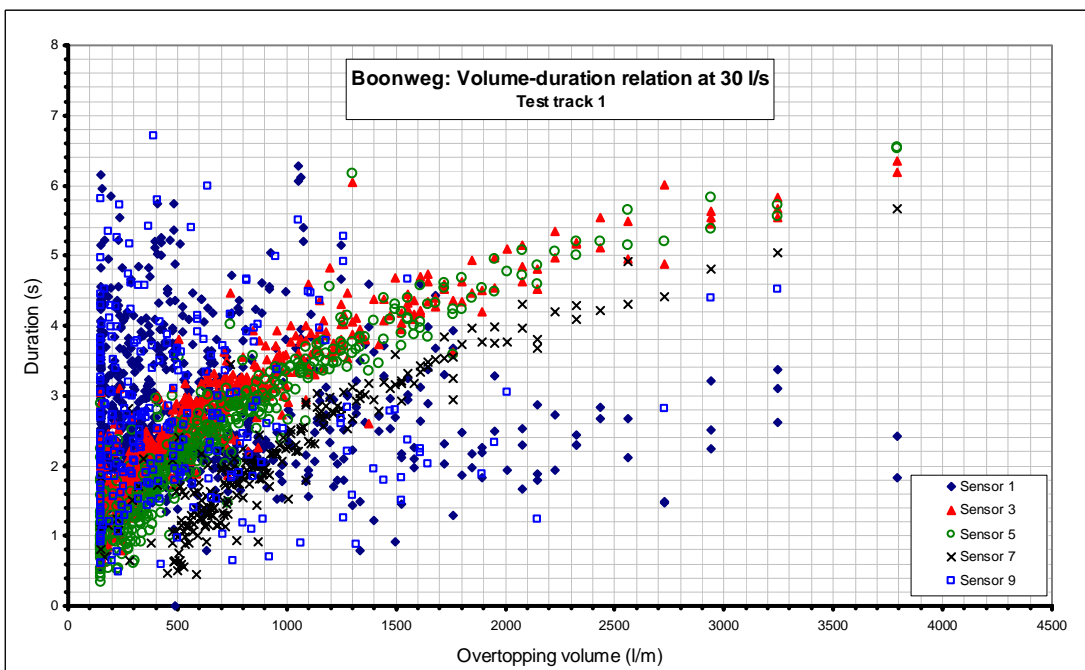
Figuur 3.18 Frontsnelheid bij sensor 1 voor verschillende debieten in teststrook 1

Relatie volume-golfduur

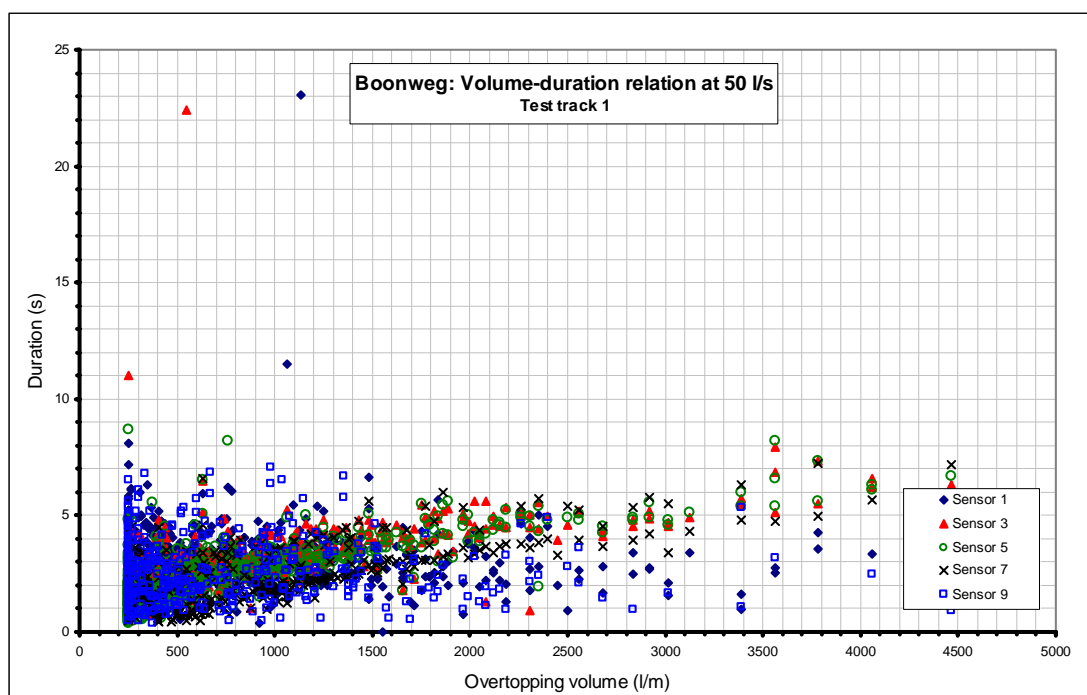
Hieronder worden de relaties per debiet tussen overslagvolume en golfduur gegeven voor proefstrook 1.



Figuur 3.19 Voorbeeld tijdsduur bij 1 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.20 Voorbeeld tijdsduur bij 30 l/s/m in teststrook 1



Figuur 3.21 Voorbeeld tijdsduur bij 50 l/s/m in teststrook 1

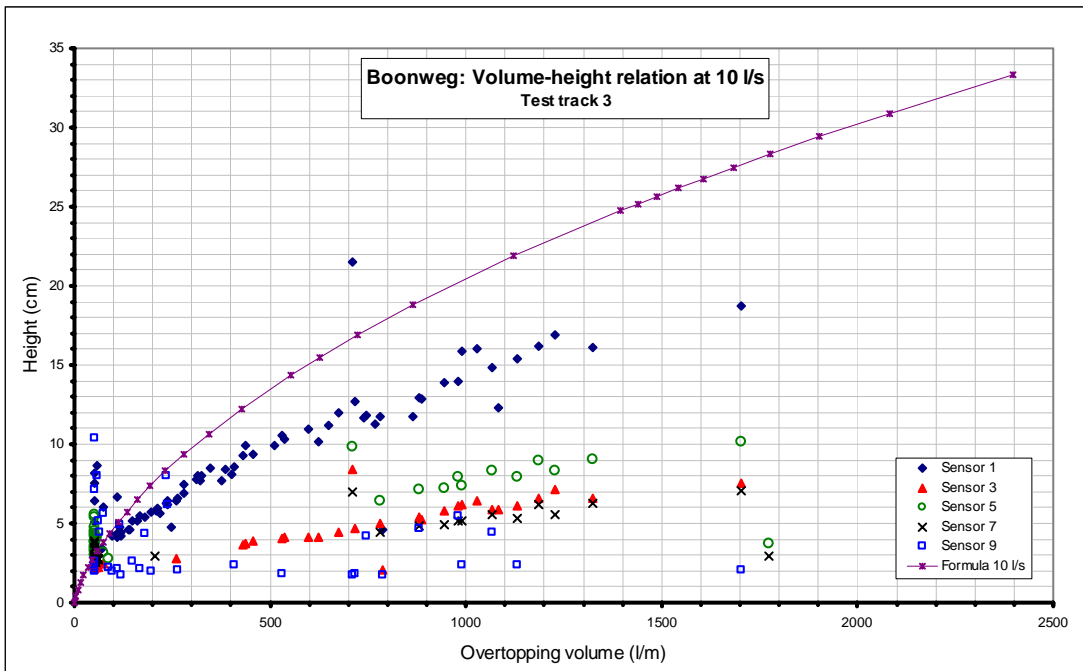
3.3.2 Teststrook 3

Voor teststrook 3 zijn metingen beschikbaar van 10, 30, 50 en 75 l/s/m en metingen met de twee EMS snelheidopnemers. In het geheel zijn voor deze debieten minder metingen beschikbaar dan voor teststrook 1.

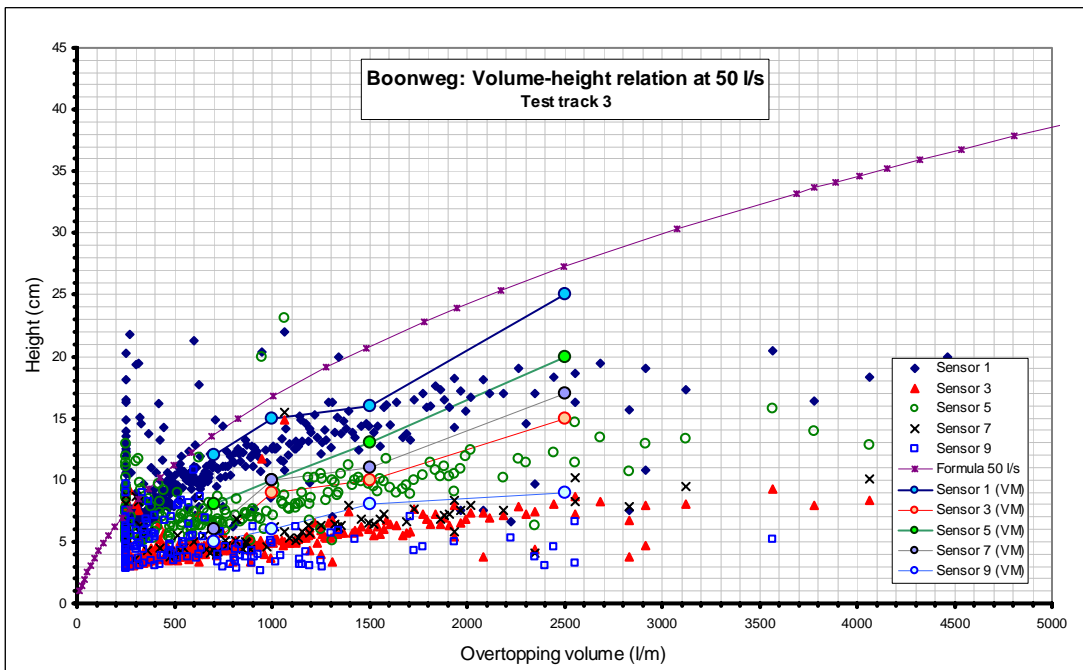
Relatie laagdikte en volume teststrook 3

De relatie tussen laagdikte en volume is over het algemeen minder goed zichtbaar dan bij teststrook 1. Met name bij $q=30$ en $q=75$ l/s/m zijn de relaties slecht zichtbaar. Vaak zijn events echter niet goed te koppelen aan de inputvolumes. Dit vertaalt zich in puntenwolken op willekeurige plekken in de grafieken, vooral in de buurt van de oorsprong. De verschillende debieten laten ook een verschillend beeld zien. In alle gevallen geldt dat de waarnemingen van sensor 9 onderaan het talud zeer onrustig zijn en meestal slecht aan de stuurlijsten zijn te koppelen. Dat beeld kwam ook naar voren bij de metingen van teststrook 1.

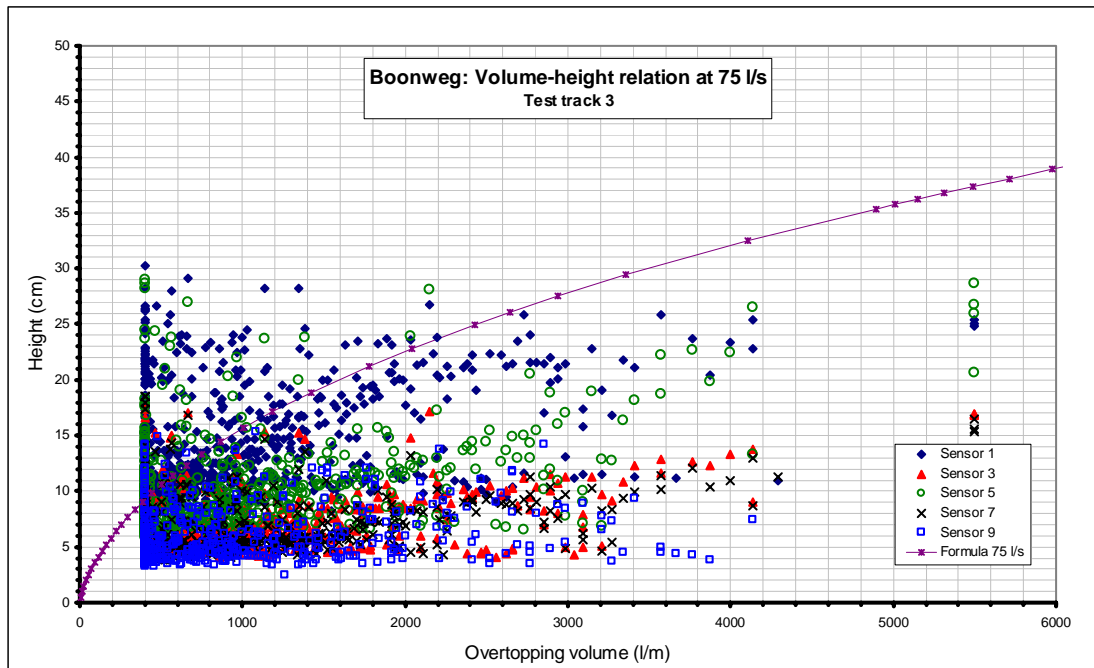
Als voorbeeld verwijzen we naar figuur 3.23 voor de laagdiktemetingen bij $q=50$ l/s/m. De metingen liggen enigszins verspreid, maar het is mogelijk iets te zeggen over het verloop. Zoals is te zien, geven de verschillende sensoren slechts een bescheiden toename te zien bij hogere debieten. Het verloop van de Bosman formule is steiler. In de figuur zijn ook visuele metingen opgenomen, die ter plaatse van de sensoren zijn gedaan. Daaruit komt over het algemeen dat de resultaten van de visuele metingen tot soms wel een factor 2 (sensor 3) hoger liggen dan de sensormetingen. Onduidelijk is waarom de instrumenten dit niet juist weergeven.



Figuur 3.22 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 10 l/s/m in teststrook 3



Figuur 3.23 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 50 l/s/m in teststrook 3 en visueel waargenomen laagdikte

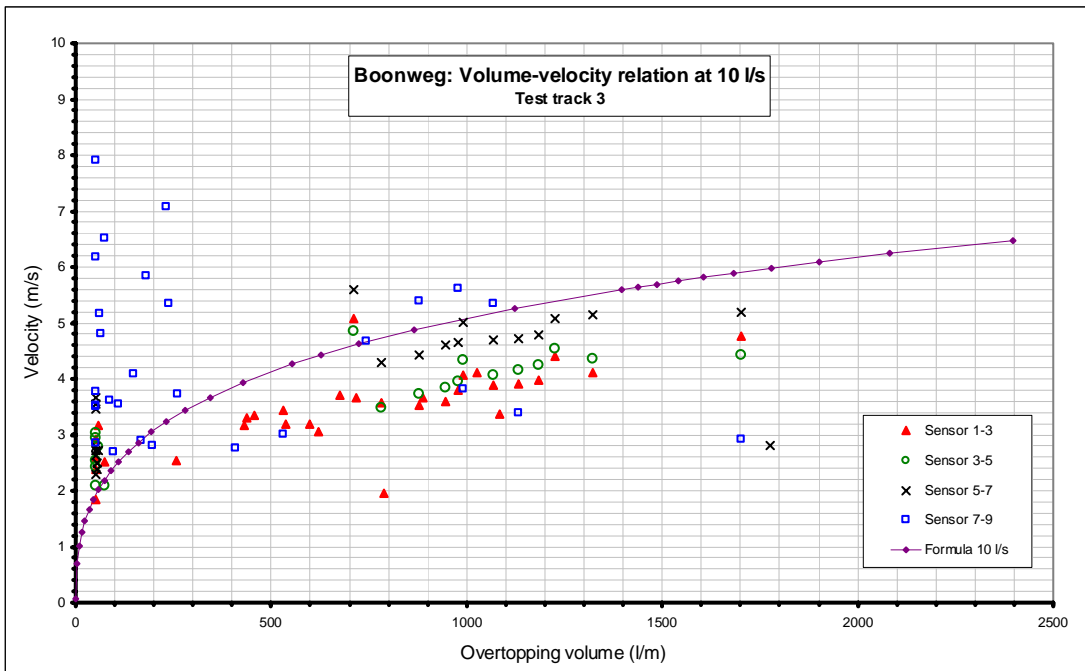


Figuur 3.24 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 75 l/s/m in teststrook 3

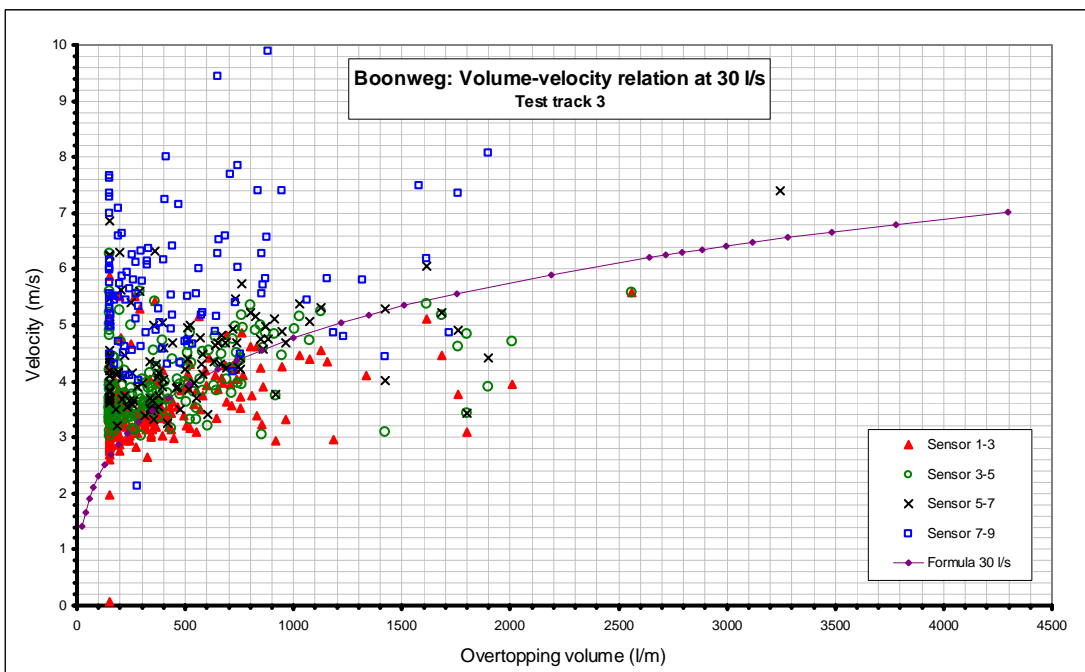
Relatie frontsnelheid en volume teststrook 3

De relatie tussen frontsnelheid en volume is met name bij de hogere debieten goed zichtbaar. Events zijn echter in het algemeen minder goed te koppelen aan de inputvolumes. Immers, voor het bepalen van de snelheid tussen twee sensoren heb je voor allebei een golf nodig die aan hetzelfde inputvolume gekoppeld is. De verschillende debieten laten een verschillend beeld zien, waarbij juist de lagere debieten, $q=10$ en $q=30$ l/s/m een minder duidelijk beeld te zien geven. In alle gevallen geldt dat de waarnemingen voor sensortraject 7-9 onderaan het talud zeer onrustig zijn en meestal slecht aan de stuurlijsten zijn te koppelen. We gaan daarbij, evenals bij teststrook 1, uit van de volgende benamingen:

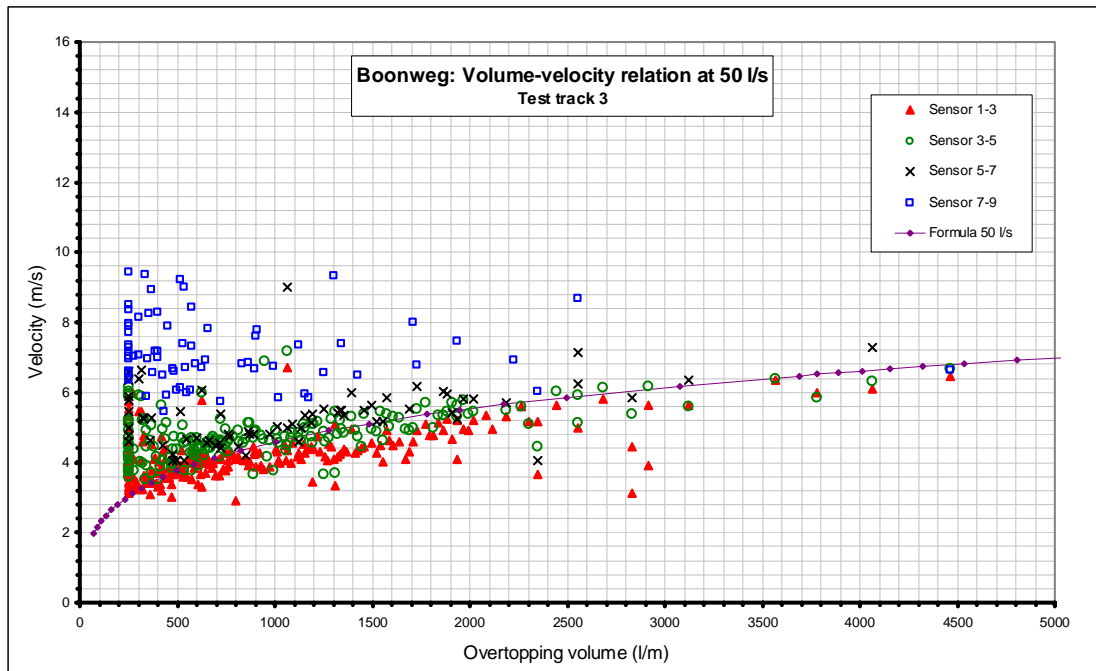
- sensortraject 1-3 = traject 1
- sensortraject 3-5 = traject 2
- sensortraject 5-7 = traject 3
- sensortraject 7-9 = traject 4



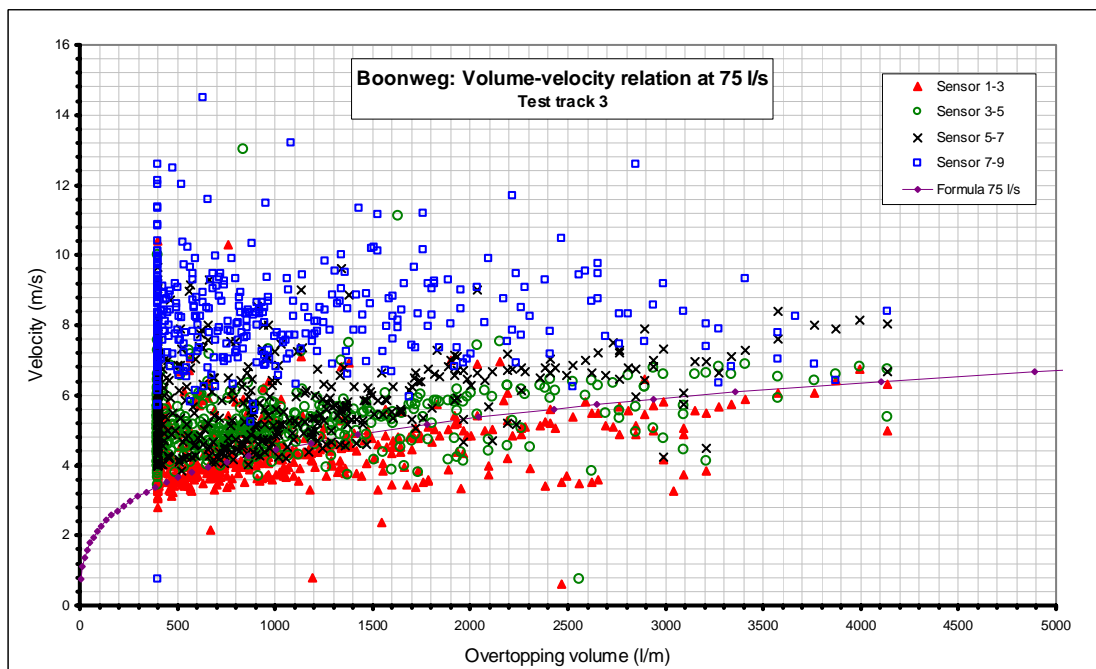
Figuur 3.25 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 10 l/s/m in teststrook 3



Figuur 3.26 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 30 l/s/m in teststrook 3

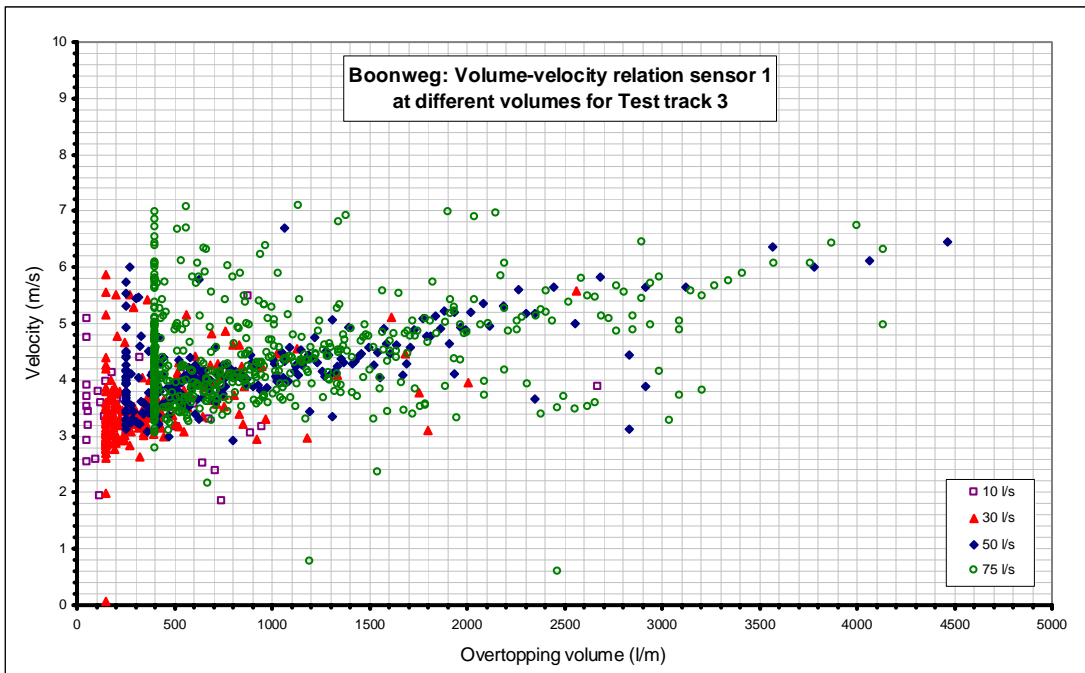


Figuur 3.27 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 50 l/s/m in teststrook 3



Figuur 3.28 Voorbeeld afgeleide frontsnelheden bij 75 l/s/m in teststrook 3

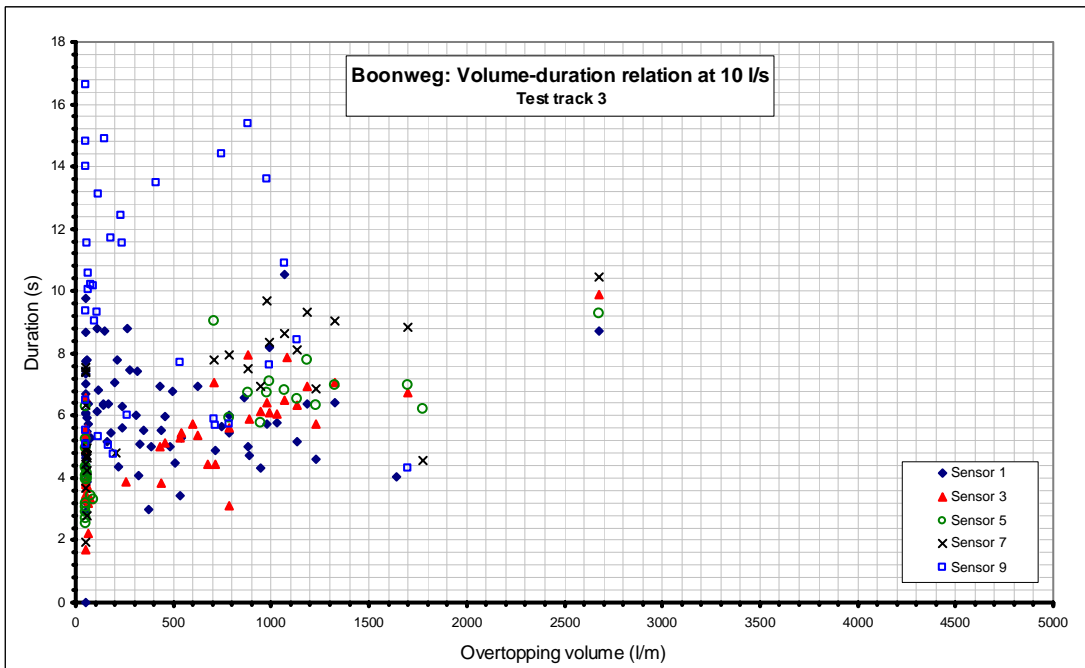
De volgende figuur vergelijkt de frontsnelheid bij laagdiktemeter 1 voor de verschillende debieten.



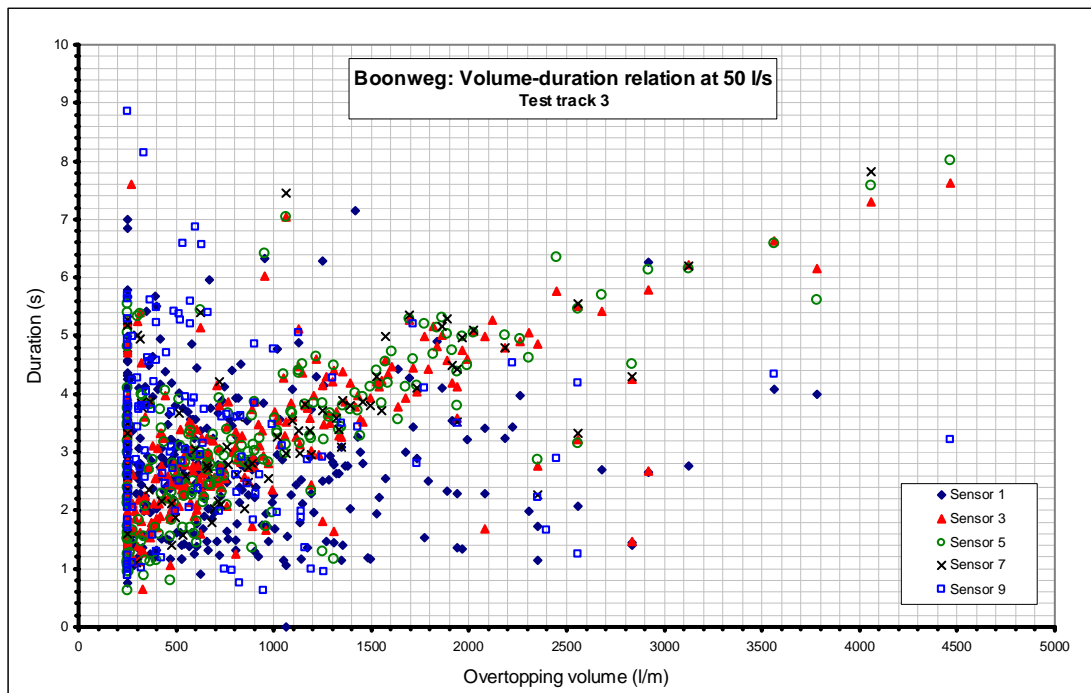
Figuur 3.29 Frontsnelheid bij sensor 1 voor verschillende debieten in teststrook 3

Relatie volume-golfduur

Hieronder worden de relaties per debiet tussen overslagvolume en golfduur gegeven voor proefstrook 3.



Figuur 3.30 Voorbeeld tijdsduur bij 10 l/s/m in teststrook 3



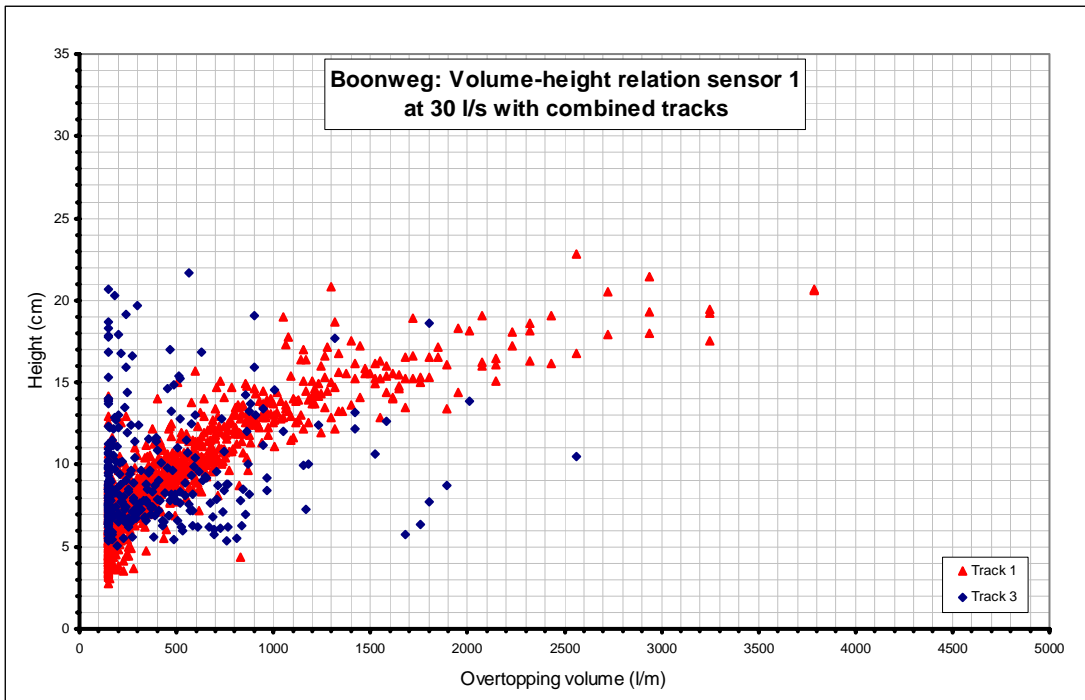
Figuur 3.31 Voorbeeld tijdsduur bij 50 l/s/m in teststrook 3

3.4 Analyse hydraulische belasting

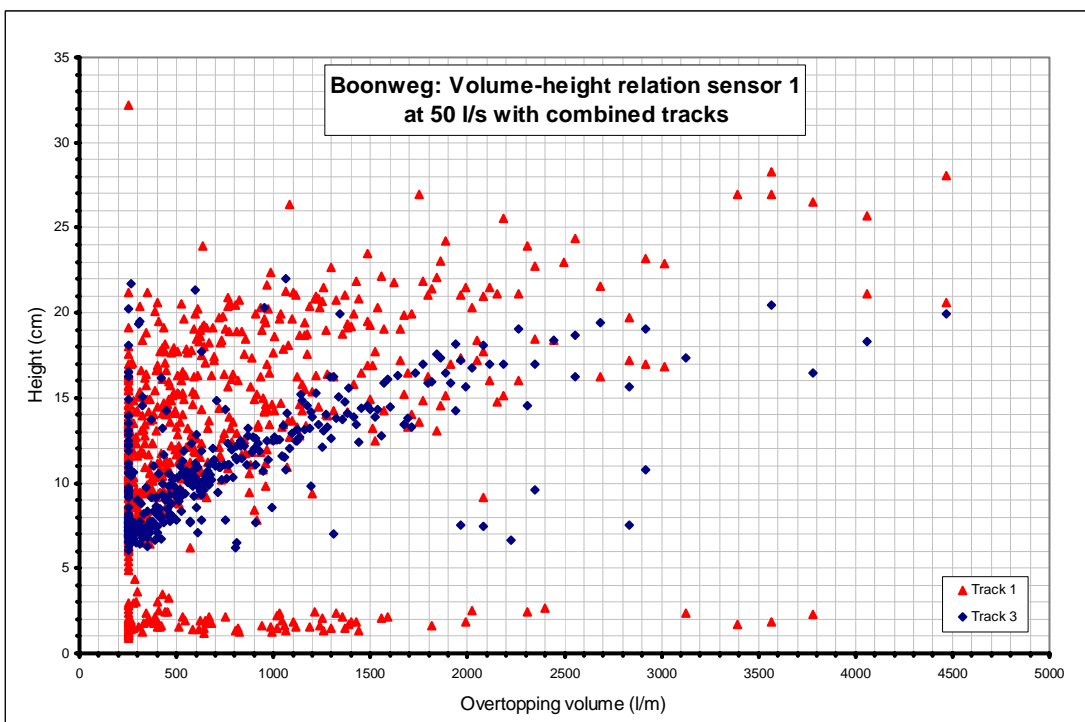
Op basis van de registraties moet worden vastgesteld dat de waargenomen hydraulische verschijnselen slecht tot niet interpreteerbaar zijn. Conclusies kunnen dan ook niet worden getrokken. Aanbevolen wordt om de hydraulische metingen afzonderlijk van de erosiemetingen te doen en tevens meerdere instrumenten in te zetten. Dat laatste biedt de mogelijkheid om registraties onderling te relateren en op die wijze betrouwbaarder registraties te krijgen. Toch worden in deze paragrafen enkele verbanden getoond.

Relatie volume-laagdikte

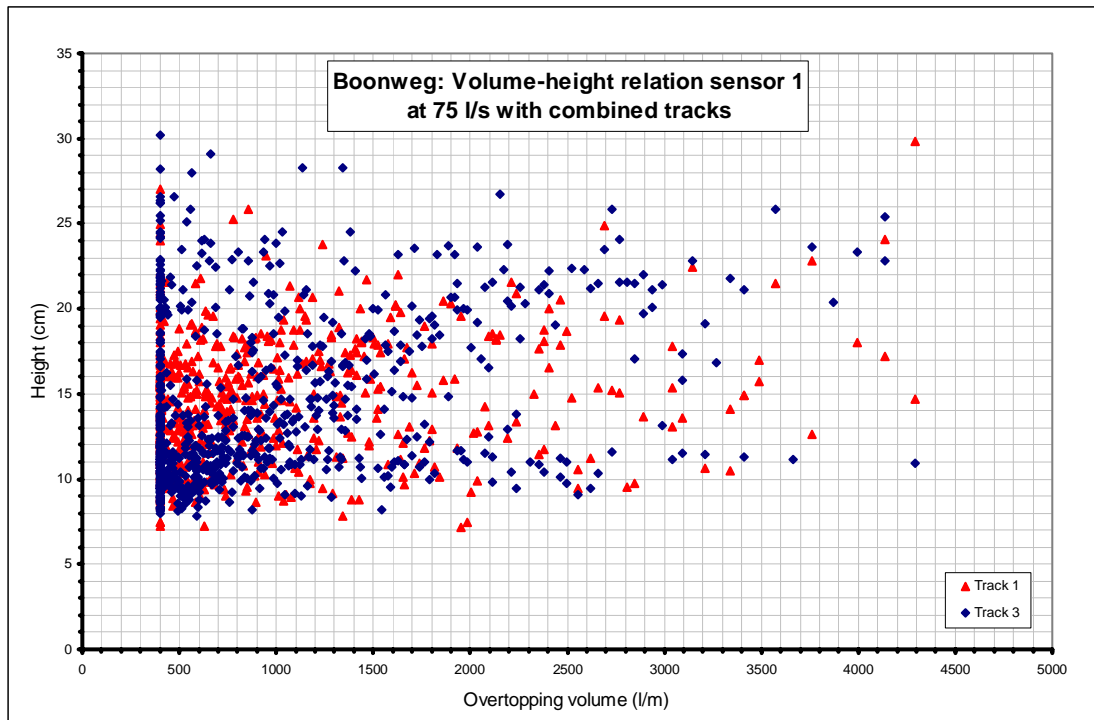
Voor proefstroken 1 en 3 hebben we voor sensor 1 de resultaten in één figuur gezet, maar apart voor de debieten 10, 30, 50 en 75 l/s. De Figuren 3.32 t/m 3.34 geven het resultaat voor 30, 50 en 75 l/s. Uit de resultaten blijkt duidelijk dat de spreiding zeer groot is per overslaand volume.



Figuur 3.32 Voorbeeld laagdiktemetingen bij 30 l/s/m



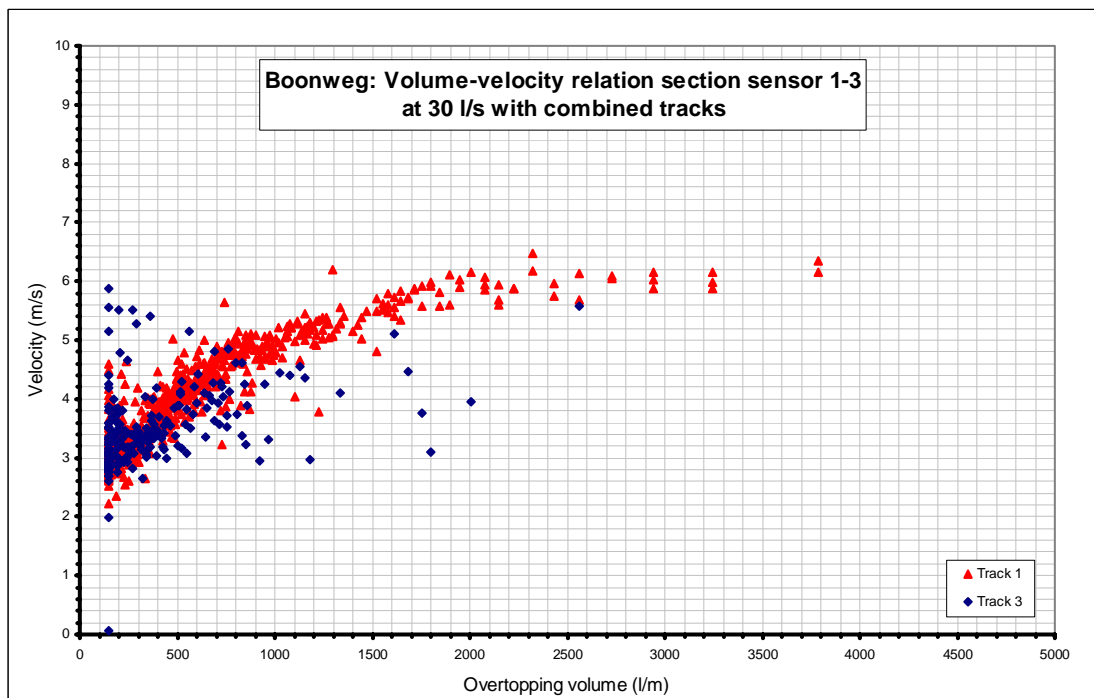
Figuur 3.33 Laagdikte bij sensor 1 bij 30 l/s/m



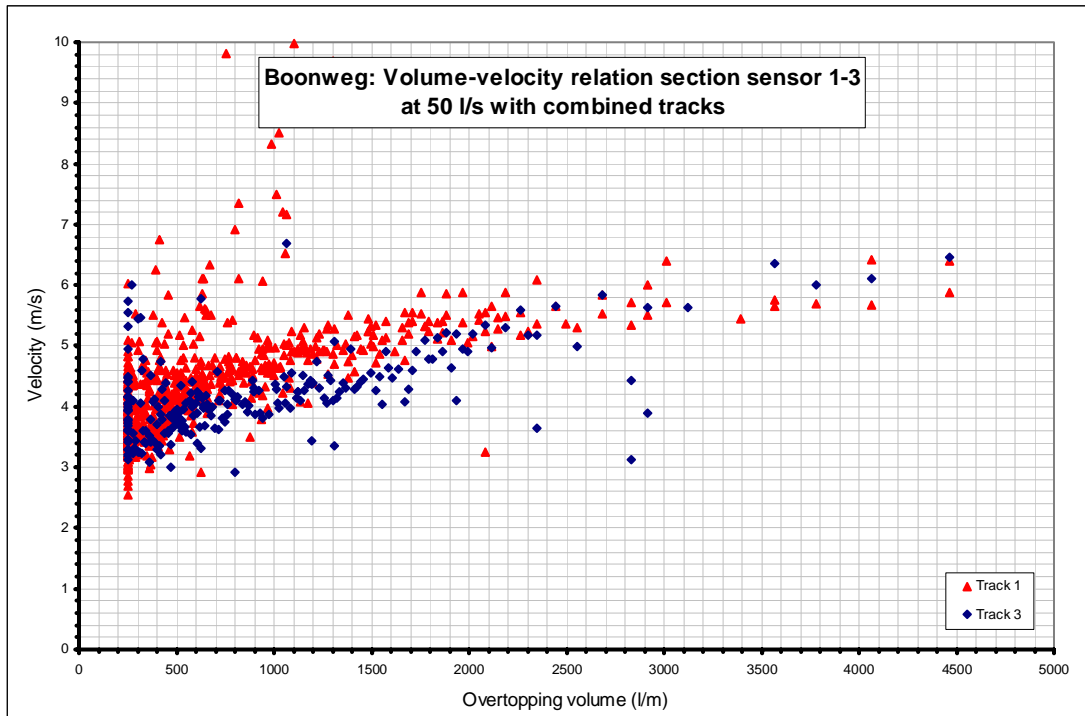
Figuur 3.34 Laagdikte bij sensor 1 bij 75 l/s/m

Relatie volume-snelheid

Analoog aan de laagdikte zijn per debiet ook de frontsnelheden voor proefstroken 1 en 3 voor het traject sensor 1 – sensor 3 in één figuur gezet. De resultaten staan in onderstaande figuren. In tegenstelling tot de laagdikten is de spreiding veel minder.



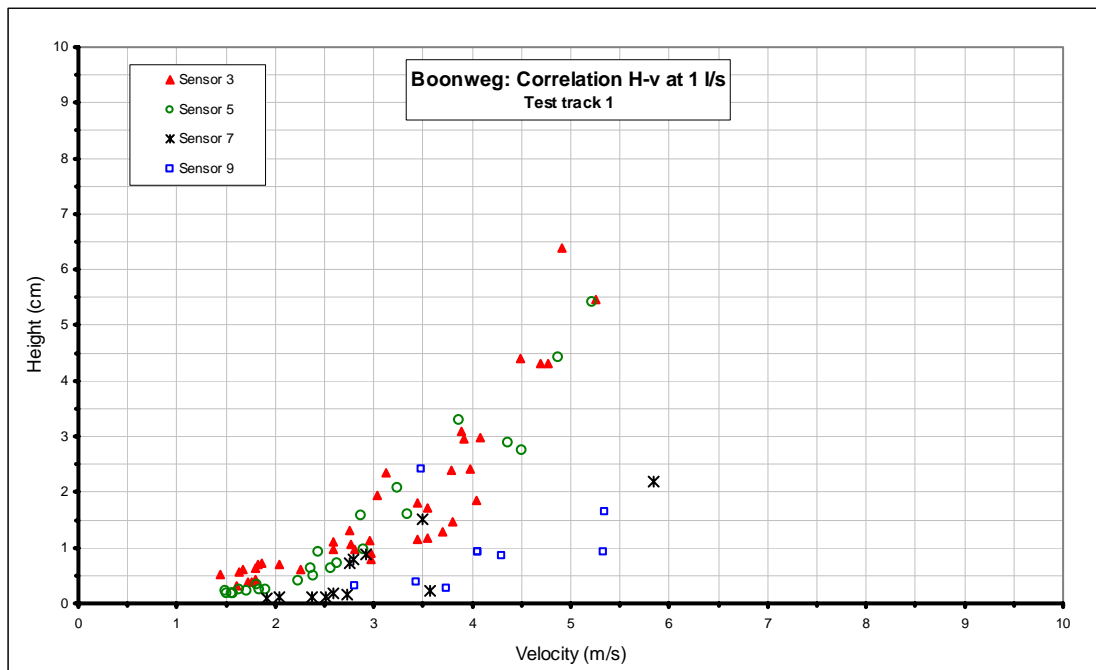
Figuur 3.35 Frontsnelheid bij sensor 1 bij 30 l/s/m



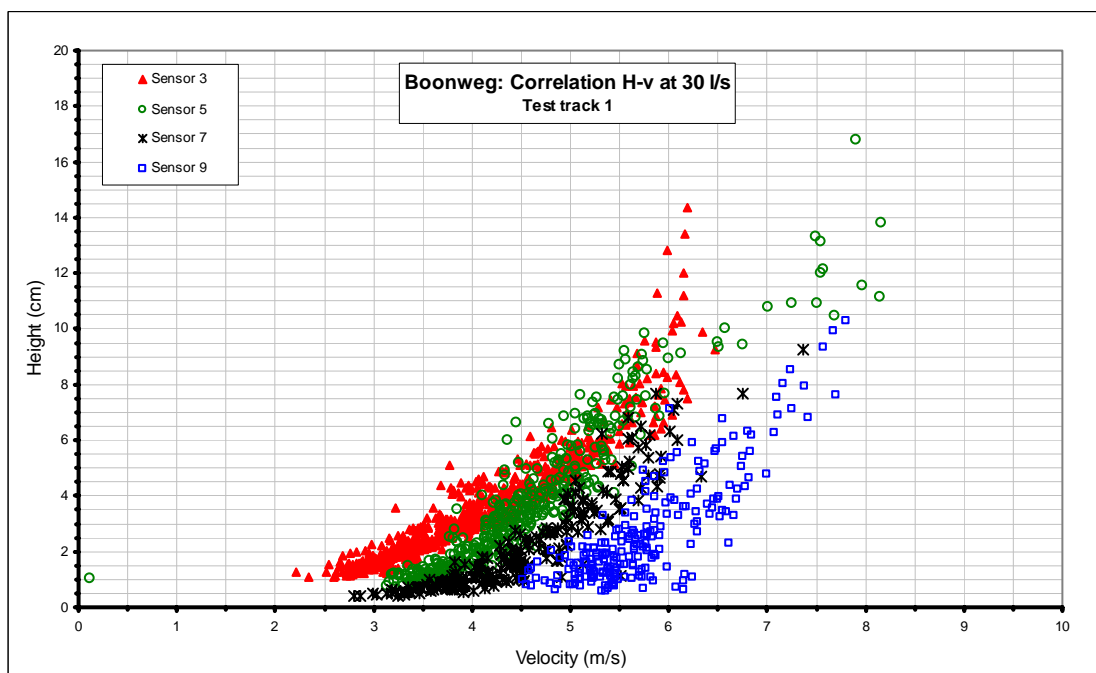
Figuur 3.36 Laagdikte bij sensor 1 bij 50 l/s/m

Correlatie tussen laagdikte en frontsnelheid

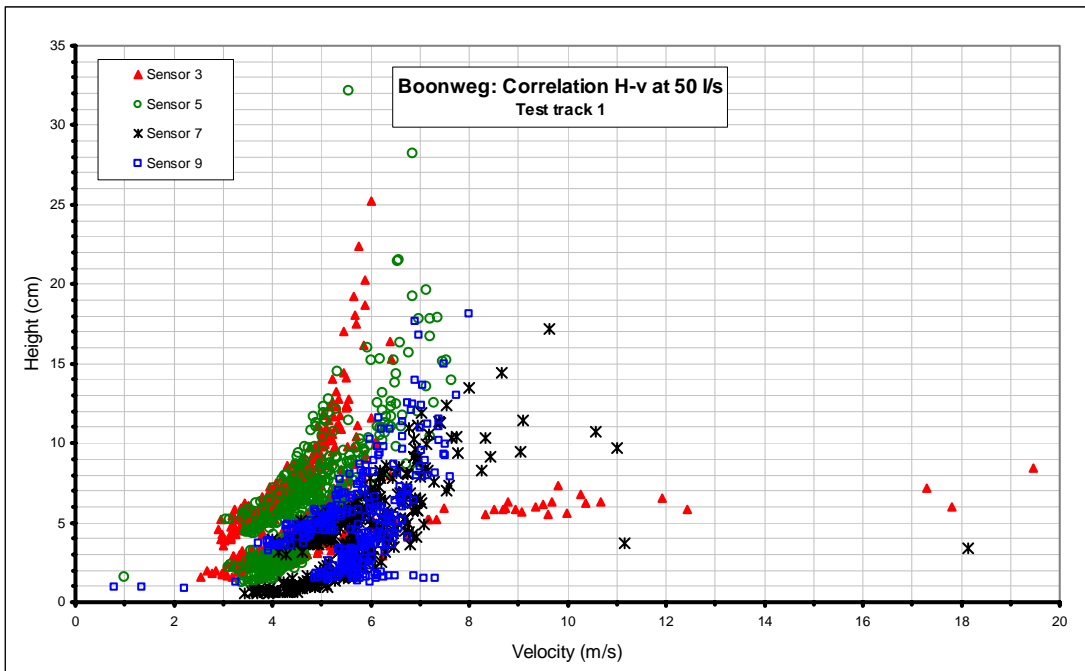
De Figuren 3.37 t/m 3.40 tonen de correlaties per debiet tussen laagdikte en frontsnelheid voor proefstrook 1. De frontsnelheid is afgeleid van de begintijdstippen van de gevonden events van de eerste opnemers in twee opeenvolgende portalen. Duidelijk blijkt in alle figuren het verband tussen laagdikte en frontsnelheid. In algemene zin kan worden geconcludeerd dat bij afnemende laagdikte de snelheid toeneemt. Dat zou betekenen dat de continuïteit kan zijn gewaarborgd, maar dat kan niet rechtstreeks uit de figuren worden afgeleid.



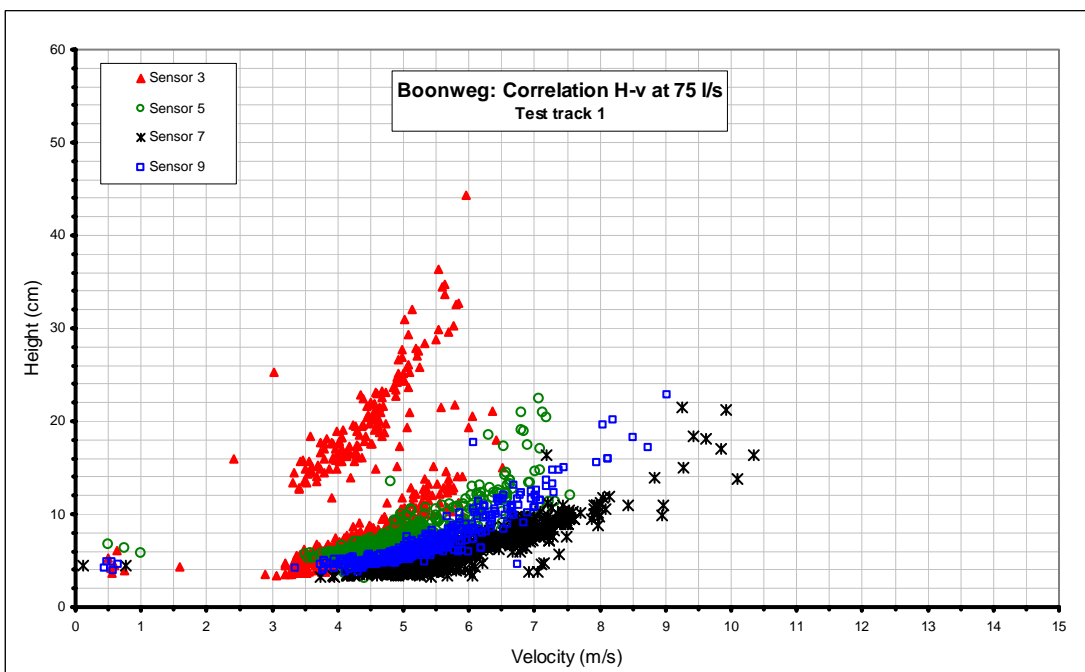
Figuur 3.37 Laagdikte versus frontsnelheid langs talud bij 1 l/s/m bij teststrook 1



Figuur 3.38 Laagdikte versus frontsnelheid langs talud bij 30 l/s/m bij teststrook 1



Figuur 3.39 Laagdikte versus frontsnelheid langs talud bij 50 l/s/m bij teststrook 1

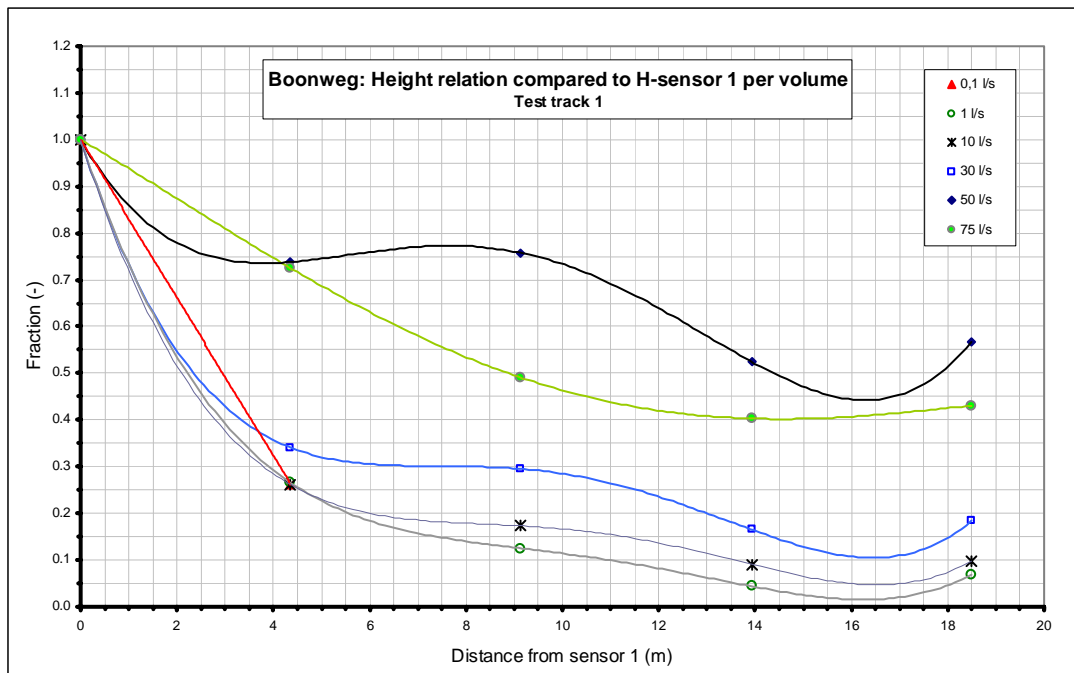


Figuur 3.40 Laagdikte versus frontsnelheid bij 75 l/s/m bij teststrook 1

Correlatie tussen laagdikte sensoren 3 t/m 9 en laagdikte sensor 1

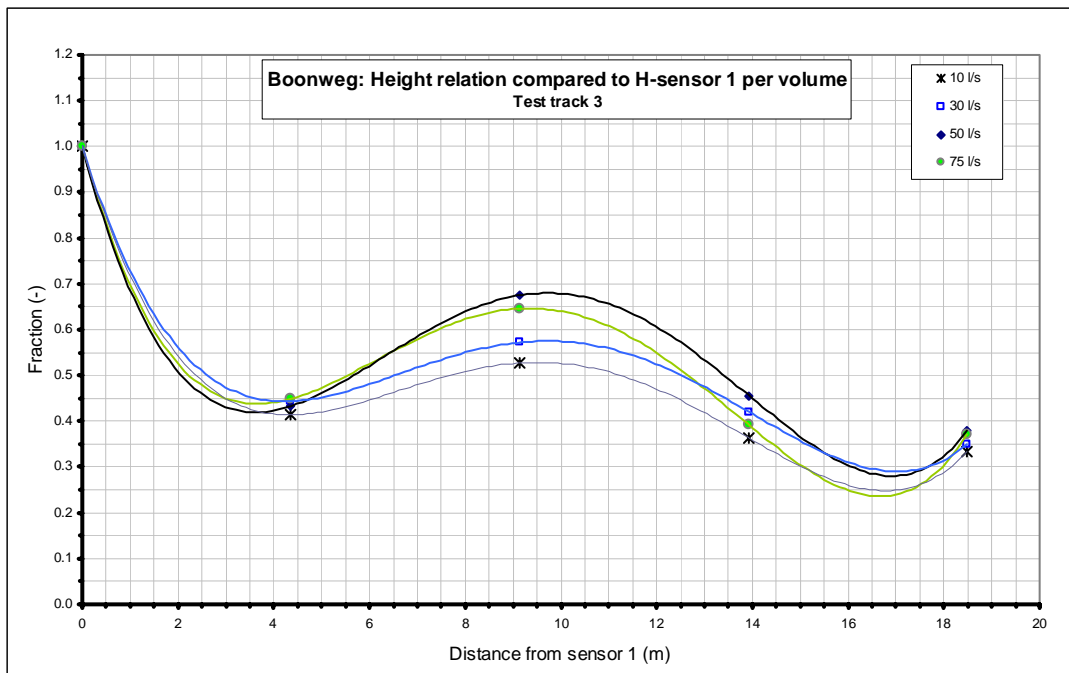
In onderstaande figuren 3.41 en 3.42 zijn voor de laagdikte de belangrijkste observaties per debiet samengevat. Het algemene beeld is dat de laagdikte op het eerste taludgedeelte na de kruin het sterkst afneemt t.o.v. de gemeten laagdikte bij de kruin. Overigens geldt ook dat hoe kleiner het debiet, hoe groter de afname is.

Het valt op dat het verloop bij $q=50$ l/s/m zich afwijkend gedraagt, met name t.p.v. sensor 5. Bij alle debieten geldt dat de laagdikte afneemt op het talud maar bij de laatste sensor, beneden bij de teen, weer oploopt. Sensor 3 heeft naar alle waarschijnlijk niet goed gefunctioneerd.



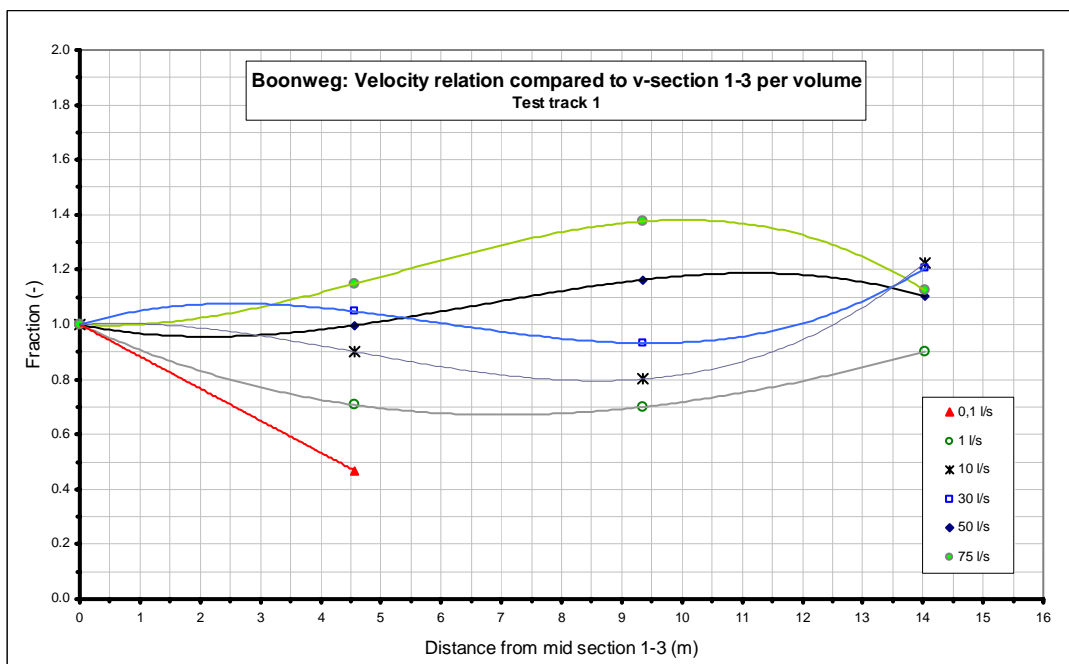
Figuur 3.41 Verhoudingen laagdikte per sensor t.o.v. de laagdikte op de kruin (=1.00) bij verschillende debieten

Hetzelfde geldt voor teststrook 3 (zie Figuur 3.42): een sterke afname t.o.v. de gemeten laagdikte bij de kruin (tot ongeveer 0.45 maal de waarde bij de kruin). Stroomafwaarts bij sensor 3 vindt bij alle debieten een toename plaats tot 0.52 á 0.68 maal de waarde bij de kruin. Daarna neemt de laagdikte stroomafwaarts verder af. Het is echter ook niet uitgesloten dat sensor 2 niet goed heeft gefunctioneerd.

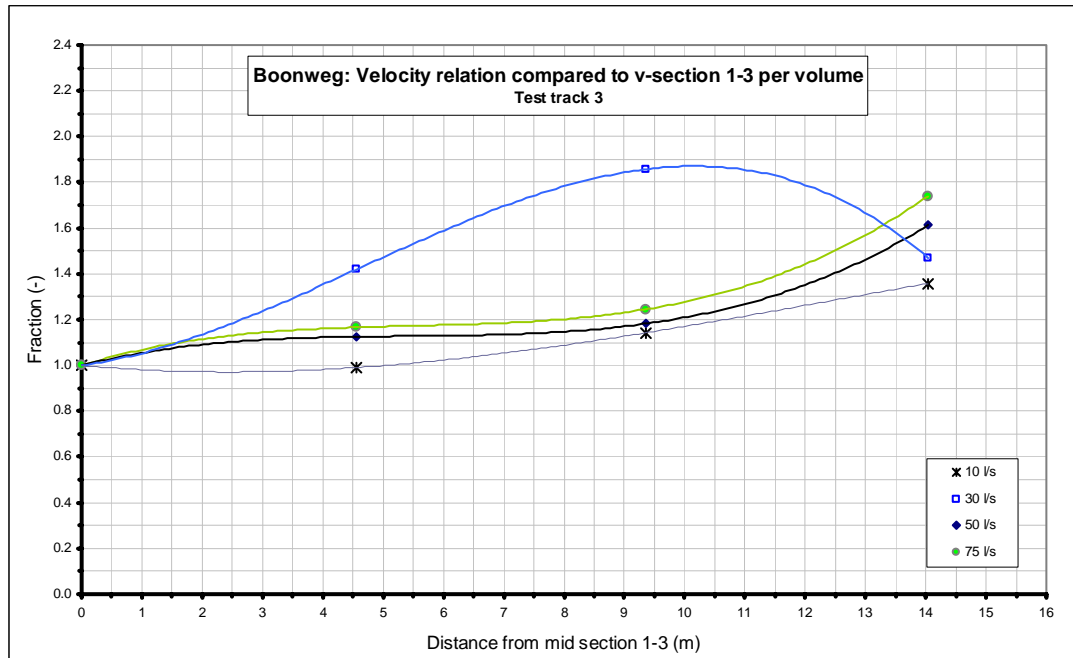


Figuur 3.42 Verhoudingen laagdikte per sensor t.o.v. de laagdikte op de kruin (=1.00) bij verschillende debieten

Correlatie tussen snelheid sensortrajecten 3-5 t/m 7-9 en snelheid sensortraject 1-3
 Analoog is het verloop van de frontsnelheid weergegeven. Er zijn aanzienlijke verschillen te constateren tussen de teststroken 1 en 3. Het algemene beeld lijkt dat de snelheden op het talud stroomafwaarts eerder toenemen dan afnemen.



Figuur 3.43 Verhoudingen snelheid per traject t.o.v. de snelheid juist na de kruin (=1.00) bij verschillende debieten



Figuur 3.44 Verhoudingen snelheid per traject t.o.v. de snelheid juist na de kruin (=1.00) bij verschillende debieten

3.5 Conclusies

Op basis van de registraties en de (beperkte) analyse worden de volgende conclusies getrokken:

- De opnemers met twee sensoren per opnemer voor het registreren van laagdikten en frontsnelheden hebben slecht bruikbare registraties opgeleverd. Conclusies ten aanzien van laagdikten en frontsnelheden als functie van het overslaande volume zijn daarom niet te trekken. Dit maakt het leggen van verbanden met geconstateerde erosie uiteraard ook niet mogelijk.
- De oorzaak van de slechte signalen is onduidelijk. Voorshands is er geen reden te twifelen aan de juistheid van de registraties zelf en de wijze waarop de overslaande volumes werden gerealiseerd via de stuurlijsten. Wel bleek het onmogelijk op eenduidige wijze de relevante meetsignalen van een overslaande golf te koppelen aan het overslaande volume volgens de stuurlijst. Bij een bepaald aantal overslaande golven zijn er verschillen tussen stuurlijsten enerzijds en registraties anderzijds wat betreft de totale tijd en de tijden tussen individuele golven. Het bleek op geen enkele wijze mogelijk hiervoor te corrigeren.
- Wat betreft de laagdiktemeters blijkt het nauwelijks tot niet mogelijk om het signaal van de tweede sensor op de meetportalen te isoleren zodat met de afstand tussen de voorste en achterste opnemer de frontsnelheid kan worden bepaald. De oorzaak hiervan is de sproei van de bevestigingsstaaf van het gehele instrument. Er wordt gewerkt aan een zodanige modificatie van de bevestiging van het gehele meetinstrument dat de centrale bevestigingsstaaf overbodig is.
- Metingen met de EMS sensoren komen niet overeen met de berekende snelheden uit de laagdikte metingen. De reden hiervan is niet duidelijk; mogelijk speelt het luchtgehalte een rol.

- Hoewel de gemeten signalen voor detailanalyses onbruikbaar zijn, kan wel worden vastgesteld dat:
 - Laagdiktes tot orde 0,30 m voorkomen, en
 - Maximale stroomsnelheden tot zeker 9 m/s mogelijk zijn.
 - Geregistreeerde relatieve turbulentie is gemiddeld 0,12 à 0,13 met een absolute waarde van 0,3 m/s (stroomsnelheid 2 à 2,5 m/s). Deze turbulentie lijkt veel te laag.Visuele waarnemingen ondersteunen deze bevindingen.

Op grond van de waarnemingen is de conclusie dat de hydraulische meetinstrumenten wel werken en waterlaagdiktes en frontsnelheden meten, maar de juistheid van de waarden lijkt niet correct. De registraties sluiten aan bij visuele waarnemingen en verwachtingen als wordt uitgegaan van de voorste opnemer. Voor de frontsnelheden betekent dit dat de waarde wordt bepaald over ongeveer 4,5 m. Het blijkt namelijk nauwelijks tot niet mogelijk om het signaal van de tweede opnemer zodanig te interpreteren dat over de afstand tussen de voorste en achterste opnemer de frontsnelheid kan worden bepaald. De oorzaak hiervan is de splitsende werking van de bevestigingsstaaf van het gehele instrument.

Het koppelen van de stuurlijsten aan events is lastig en zeer arbeidsintensief. Het lijkt redelijk gelukt. Het koppelen heeft te maken met de handmatige bediening van de overslagsimulator. Om betere resultaten te verkrijgen dient de simulator te worden geautomatiseerd.

Verder wordt aanbevolen om afzonderlijke hydraulische en erosie metingen uit te voeren. Dit maakt het koppelen van de registraties aan een overslaand volume eenduidiger. Daarnaast wordt aanbevolen om meerdere instrumenten in te zetten zodat de afhankelijkheid van een enkel instrument wordt opgeheven.

4 Evaluatie graserosie

Voor een beschrijving van details ten aanzien van erosie ontwikkeling wordt verwezen naar het Factual Report (Infram 2008). 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 het navolgende wordt de waargenomen erosie geëvalueerd.

Er zijn vier teststroken onderzocht:

- 1 normaal regulier beheer (nb)
- 2 twee maal weiden beheer (ww)
- 3 twee maal hooien beheer (hh)
- 4 beheer met hooien en naweiden (hw).

In paragraaf 4.1 wordt de waargenomen erosie geëvalueerd, waarna in paragraaf 4.2 de waargenomen erosie wordt vergeleken met de predictie.

4.1 Waargenomen vormen van erosie

Bij de proeven zijn de volgende vormen waargenomen:

- Erosie bij de overgang naar een horizontaal deel aan de teen van het talud.
- Abrupt afscheuren gras (opbolmechanisme).
- Erosie in benedenstroomse richting na het ontstaan van een initiële schade, en later na het ontstaan van een aanzienlijk gat met een verticaal boventalud ook in bovenstroomse richting.

De hierna getoonde foto's geven een beeld van de opgetreden schade.

Figuur 4.1 geeft het eindresultaat van teststrook 1. Na 75 l/s per m was er geen schade aan het talud. Schade ontstond wel na 4 uur van 50 l/s per m op de overgang van talud naar teen. Daar bleek een oud klinkerpaadje aanwezig te zijn. De schade zette zich voort bij 75 l/s per m (rechter foto).

Hetzelfde gebeurde bij teststrook 2; Figuur 4.2. Daar ontstond de schade echter pas in het laatste uur van de 75 l/s per m test.



Figuur 4.1 Eindsituatie teststrook 1 (rechts overgang bij teen talud)



Figuur 4.2 Eindsituatie teststrook 2 (rechts overgang bij teen talud)

Op teststrook 3 (Figuren 4.3 t/m 4.4) gebeurde iets onverwachts in het tweede uur van de 75 l/s/m proef. De grasmat voelde toen sponzig aan (mogelijk was dat ook al eerder het geval) en het vermoeden bestaat dat klei tussen de wortels uit is geërodeerd. Op een bepaald moment is waarschijnlijk de kracht van de overtrekkende golf zo groot geweest dat de wortels zijn afgescheurd. Er ontstond een opbolling en die is bij een van de volgende golven opengeslagen en nam een deel van de grasmat mee. In het laatste uur ontstond nog een opbolling en de twee beschadigingen kwamen uiteindelijk samen. Er ontstond een flink gat (ook bij teen talud) maar niet door de kleilaag heen.



Figuur 4.3 Initiële schade teststrook 3



Figuur 4.4 Eindresultaat teststrook 3

Bij teststrook 4 deed zich in het laatste uur van de 75 l/s per m proef eveneens het opbolmechanisme voor. Zie Figuren 4.5 t/m 4.10. Het duurde 5 minuten voordat een grote golf de opbolling openbrak.

Figuur 4.8 toont een zode met wortels en klei. Daaruit blijkt dat de wortels zijn geknapt op een diepte waar het aantal wortels minder is dan daarboven. Dat is overigens niet te zien, maar te concluderen uit het feit dat er nog een zekere dikte kleilaag is te zien. Het nog aanwezig zijn van de kleilaag geeft aan waarom de “bol” zo waterdicht is, want de grasmat zelf is natuurlijk niet waterdicht. Figuur 4.9 toont een gat in de klei met een vertikaal talud. Hier zal het gat zich in bovenstroomse richting (dus in de richting van de kruin) uitbreiden (headcut erosie) en de zandkern bereiken.

De eindsituatie werd bereikt na 5 uur en 51 minuten testen met 75 l/s per m, zie Figuur 4.10. De zandkern is zeker 1 m diep weggespoeld en aan de rechter zijde staat de zijwand van de testsectie op instorten. De getoonde situatie is 45 minuten na het ontstaan van de eerste “bol”.

Duidelijk is op deze foto ook het headcut mechanisme te zien.



Figuur 4.5 Initiële schade teststrook 4



Figuur 4.6 Schade direct na openbreken bol; teststrook 4



Figuur 4.7 Vorming van een tweede bol direct na het ontstaan van het gat; teststrook 4



Figuur 4.8 Enkele minuten na het openslaan van de tweede bol; teststrook 4



Figuur 4.9 Ongeveer 5 minuten na losbreken tweede bol; teststrook 4



Figuur 4.10 Eindsituatie teststrook 4

Samengevat zijn er twee (deels) onverwachte vormen van erosie opgetreden:

1. erosie/ontgraving op de overgang naar een horizontaal deel;
2. opbolmechanisme.

Het eerste mechanisme is duidelijk, maar was niet eerder onderkend. Het lijkt er op dat dit mechanisme maatgevend is voor schade aan binnentaluds door overslaande golven. Aanbevolen wordt dit mechanisme bij volgende proeven nader te onderzoeken.

Het laatste mechanisme dat is waargenomen is wat inmiddels het opbolmechanisme wordt genoemd. Daarbij scheurt zeer plotseling een stuk gras af. In het navolgende wordt dit verder beschreven. Bij de vier proeflocaties aan de Boonweg is bij twee locaties het opbolmechanisme elk tweemaal voorgekomen. Dit waren locaties 3 en 4. Op locatie 3 is nooit beweiden en op locatie 4 maar eenmaal per jaar. Tijdens de proef werd geconstateerd dat de grasmatten "sponzig" werd, mogelijk door het eroderen van losse klei- en zanddeeltjes uit de bovenste paar centimeter. Dit was niet geconstateerd op locaties 1 (normaal beheer) en locatie 2 (tweemaal beweiden). Het opbolmechanisme op locatie 3 ontstond snel en binnen enkele minuten werd de "bol" door een grote golf weggeslagen. Daardoor zijn nauwelijks foto's gemaakt.

Op 6 maart 2008 vond op teststrook 4 de proef met een overslagdebiet van 75 l/s per m plaats. In de laatste twee uur van de proef ontstond het opbolmechanisme tweemaal. Van begin van schade tot het stoppen van de proef vanwege bezwijken binnentalud, duurde precies 1 uur. De eerdere foto's geven een overzicht. Onderstaand in

chronologische volgorde wat er gebeurde, met een korte omschrijving, tijdstip van de foto en nummer van de foto (Bijlage A).

Omschrijving	Tijdstip	Foto nr
Eerste tekenen van een bol	13:02	1970
Bol iets groter in oppervlak	13:05	1982
Duidelijke spleet zichtbaar waar water in kan komen	13:09	1993
Opening aan bovenkant, breder oppervlak bol	13:12	2002
Bol komt op twee plekken meer omhoog	13:16	2008
Bol komt meer omhoog	13:18	2015
Duidelijke opbolling	13:22	2029
Grote golf slaat de bol weg en onmiddellijke vorming tweede bol	13:23	2025/2037/2038
Is de "plak" al gescheurd?	13:24	2045
Bol wordt groter en ontstaat duidelijk beneden de eerste	13:25	2047
Lekkende bol	13:25	2051
Grote bol	13:25	2052
Wegslaan van de tweede bol	13:25	2053/2054/2055
Kleibekleding bloot	13:27	2060
Wegslaan andere stukken, vergroting kaal kleioppervlak	13:28	2066/2067
Nog vlak kleioppervlak, geen klif	13:36	2111
Wel een klifje	13:37	2112
Uitbreiding klif	13:38	2120/2126
Kliferosie, head cut erosie gestart, zandkern niet bereikt	13:48	2138
Verdieping gat, bijna op zand	13:50	2145
Nu wel op het zand	13:55	2151/2154
Gat over volle breedte open kleilaag	13:56	2158/2160
Uitbreiding in breedte en diepte	13:57	2165
Verdere uitbreiding	14:00	2169
Verdere uitbreiding	14:03	2174
Proef gestopt	14:05	2176/2178
Doorgaande head cut (instabiel klif), zonder water	14:11	2179/2180
Instabiel klif	14:12	2182
Instabiel klif	14:14	2185
Gat van boven gezien	14:16	2190
Wortels in het bovenste deel van de kale klei		2189
Uitgeslagen plaggen		2196/2198

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

1. Geen enkel binnentalud van een proefvak gaf significante schade bij 50 l/s per m, gedurende 6 uur simulatie.
2. Aan de overgang van de kruin naar het binnentalud is nooit schade ontstaan.
3. Bij overgangen talud-horizontaal trad schade op.
4. 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.
5. Een significante invloed op de mate van erosie van de wijze van beheer kon niet worden vastgesteld.

Eerder zijn in Delfzijl ook proeven uitgevoerd. Omdat de proeven worden geëvalueerd in het bredere kader van SBW worden onderstaand ook die observaties gepresenteerd:

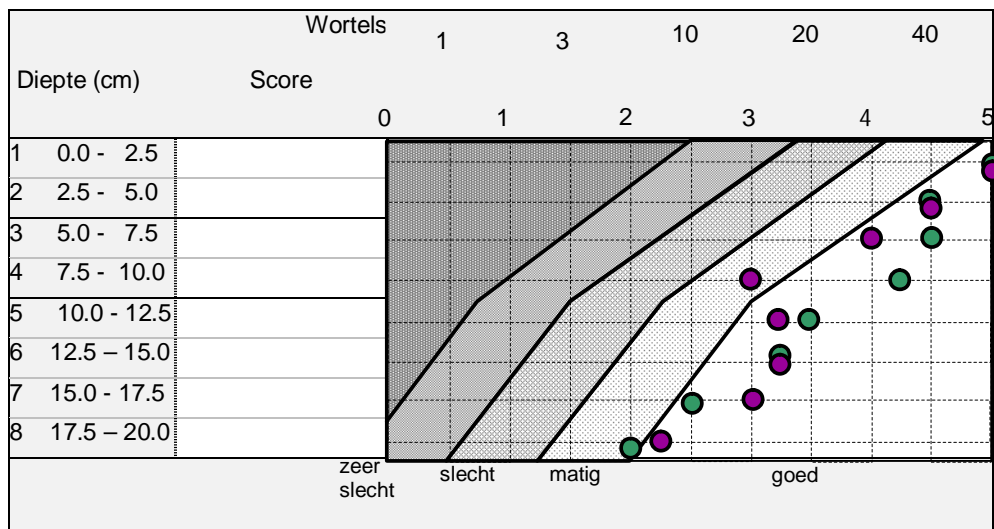
6. Goede kale klei, zoals de dijk bij Delfzijl, kan 6 uur 1 l/s per m golfoverslag aan, vervolgens 6 uur 5 l/s per m en daarna 6 uur 10 l/s per m. Bij elke belasting trad er erosie van kleideeltjes op. De voorgeschiedenis telt daarom mee bij de uiteindelijke schade bij 10 l/s per m. De resultaten gelden 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.
7. Een gat in de klei met een verticaal talud aan bovenstroomse zijde geeft het ontstaan van het mechanisme "head cut erosie". Het verticale talud brokkelt af en het gat wordt naar boven toe groter.
8. 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.
9. 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.

Op basis van de waarnemingen kan worden geconcludeerd dat de waargenomen erosie op de taluds deels overeenkomt met de verwachtingen en de ervaringen bij de eerdere proeven, dat wil zeggen er treedt geen schade op. Anderzijds is een nieuw mechanisme waargenomen: het opbolmechanisme. Daarnaast is geconstateerd dat de overgang naar een horizontale berm zeer schadegevoelig is.

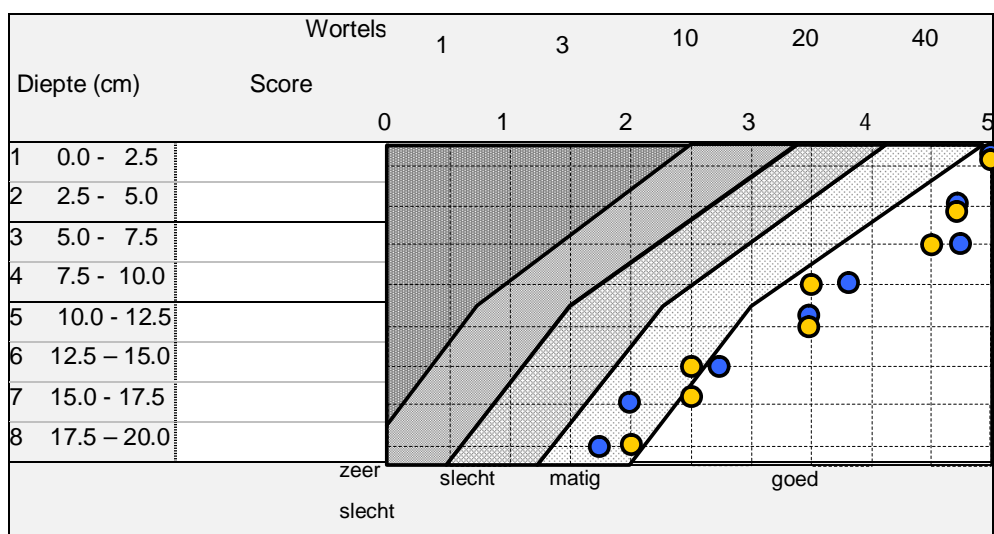
4.2 Evaluatie van erosiepredictie

Er zijn voorafgaand aan de proeven predicties opgesteld. Deze zullen in de volgende paragraaf worden vergeleken met de waargenomen erosie. Overigens zijn de predicties uitsluitend gedaan voor graserosie op het talud, omdat voor de andere erosiemechanismen geen methodes beschikbaar zijn of dat deze niet eerder zijn waargenomen (opbolmechanisme).

Per proefvak zijn er 4 boringen uitgevoerd om de hoeveelheid wortels te bepalen. De resultaten staan in onderstaande Figuur 4.11 en Figuur 4.12. Opvallend is dat vrijwel alle metingen in de score "goed" vallen, behalve bij de proefvakken 2 en 3 waar dat het geval is tot 12,5 cm diep. Dit betekent dat er in de bovenste laag van de zode meer dan 60.000 wortels per m² aanwezig zijn en er sprake is van een goede kwaliteit gras.



Figuur 4.11 Wortelverloop van proefvak 1 (regulier beheer) en proefvak 2 (2 maal weiden)



Figuur 4.12 wortelverloop van proefvak 3 (2 maal hooien) en proefvak 4 (hooien en weiden)

Behalve het aantal wortels zijn ook andere gegevens van de graszode verzameld, zoals bedekkingsgraad. Informatie hierover staat in Alterra (2008).

Ten behoeve van de predictie is voor de eigenschappen van de klei uitgegaan van klei met een waarde voor de cohesie van $c_{min} = 0,25 \text{ kN/m}^2$.

Op basis van het voorgaande is de erosie in 6 uur voor de verschillende overslaggebieden voorspeld (SBW, 2007):

- q = 0,1 l/s/m: $y_m = 0 \text{ m}$ (in 6 uur)
- q = 1 l/s/m: $y_m = 0 \text{ m}$ (in 6 uur)
- q = 10 l/s/m: $y_m = 0 \text{ m}$ (in 6 uur)
- q = 30 l/s/m: $y_m = 0 - 0,004 \text{ m}$ (in 6 uur)
- q = 50 l/s/m: $y_m = 0 - 0,007 \text{ m}$ (in 6 uur)
- q = 75 l/s/m: $y_m = 0 - 0,010 \text{ m}$ (in 6 uur)

Geconcludeerd is dat bij een goede, gesloten grasmat bij alle overslaggebieden geen falen zal optreden, want de erosie blijft kleiner dan 0,10 m. Bij overslaggebieden tot 10 l/s/m zal geen erosie optreden; bij grotere overslaggebieden zal de erosie beperkt blijven tot circa 10 mm. Het voorgaande is in overeenstemming met het gegeven dat er geen erosie is waargenomen op het talud. Echter ook op het talud is het opbolmechanisme waargenomen, en op de overgang naar een horizontaal deel ontgronding. Aanbevolen wordt hiervoor modellen te ontwikkelen.

Een voorspelling van de vervolgschade door headcut erosie was niet gemaakt, omdat er geen erosie van de graszode werd verwacht.

4.3 Conclusies en aanbevelingen

Op grond van het voorgaande kan worden geconcludeerd dat de resultaten niet helemaal conform de verwachtingen zijn geweest. Wel is zoals voorspeld geen directe erosie geconstateerd op het talud, maar er is wel een nieuw mechanisme gezien, het zogenaamde opbolmechanisme. Daarnaast is erosie vastgesteld bij de teen van het talud (inclusief headcut erosie).

Meer in detail op basis van proeven bij de Boonweg, maar ook in Zeeland en bij Delfzijl:

1. Het lijkt aannemelijk dat een binnentalud van klei met gras bij een overslag van 30 l/s per m of minder nooit door erosie zal bezwijken.
2. Ook lijkt het dat de erosiebestendigheid van het binnentalud vooral wordt bepaald door de combinatie van gras en klei. Belangrijk is vooral dat er gras aanwezig is. De variabiliteit van de graszode heeft wel invloed, maar mogelijk minder dan we hadden verwacht. Een significante invloed op de erosie van de wijze van beheer (er waren immers vier proefvakken met verschillende beheer vormen) is niet vastgesteld.
3. Overgangen talud-horizontaal zijn de belangrijkste aanleiding voor initiële en doorgaande schade. Bij de proeven is dit vaak de overgang van benedentalud naar het horizontale maaiveld (teen van de dijk) of onderhoudsweg geweest. Schade ontstond altijd bij een overslaggebied van 30 l/s per m of meer (bij de Boonweg bij 50 l/s per m). Als de schade helemaal beneden aan de dijk ontstaat en zich in bovenstroomse richting uitbreidt, dan moet er veel tijd zijn voordat de kruin wordt bereikt en een doorbraak veroorzaakt.
4. Een gat in de kleilaag dat de onderliggende zandkern bereikt, veroorzaakt bij een groot overslaggebied (50 l/s per m of meer) een snelle doorgaande erosie. Dit is niet geconstateerd bij kleinere overslaggebieden om de eenvoudige reden dat bij kleinere overslaggebieden nooit wezenlijke schade aan het binnentalud is opgetreden.
5. Berekeningen van de erosie op het talud geven geen tot nauwelijks schade. Dit komt dus overeen met de waarnemingen voor vlakke taluds. Voor overgangen is geen vergelijking gemaakt vanwege het ontbreken van een methode. Deze is momenteel nog in ontwikkeling.

Op basis van de bevindingen worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Erosiometingen uitvoeren bij de overgang van talud naar horizontaal deel omdat dat een erosiegevoelige locatie blijkt;
- Modelleren van de erosie op de overgang van talud naar horizontaal deel en van het opbolmechanisme.

5 Evaluatie infiltratie en afschuiven

Voor de evaluatie van de infiltratiemetingen zijn de uitgevoerde metingen vergeleken met de predictieberekeningen (Deltares 2008).

Er zijn twee soorten metingen uitgevoerd: 1) meting van de waterdruk in de bekledingslaag van het binnentalud en hier net iets onder en 2) meting van de stijghoogte in de zandkern. Daarnaast kan onderscheid worden gemaakt tussen de golfoverslagproeven en de afschuifproef. De volgende proeven zijn voorzien van meetinstrumenten:

- 1 Golfoverslagproef, referentiestrook 1, 6 tensiometers voor meting van de waterdruk in en net onder de bekleding en 1 PR meter voor de meting van de stijghoogte in de zandkern van de dijk.
- 2 Golfoverslagproef, proefstrook 3, 6 tensiometers voor meting van de waterdruk in en net onder de bekleding en 1 PR meter voor de meting van de stijghoogte in de zandkern van de dijk.
- 3 Afschuifproef, proefstrook 4, 6 tensiometers voor meting van de waterdruk in en net onder de bekleding en 4 PR meters voor de meting van de stijghoogte in de zandkern van de dijk.

De evaluatie van de infiltratiemetingen bij de golfoverslagproef staat in 5.1 de evaluatie van de metingen bij de afschuifproef staat in 5.2.

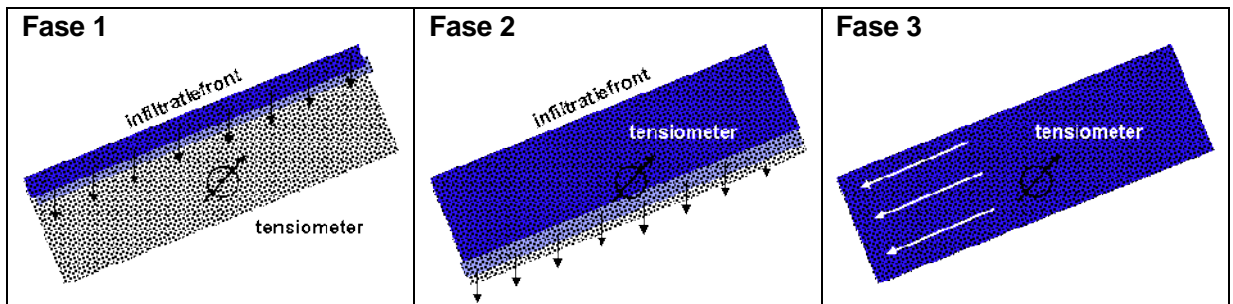
5.1 Infiltratie golfoverslagproef

5.1.1 Samenvatting predictie

De predictie voor infiltratie van de overslagproeven (Deltares 2008) is kort samengevat in Tabel 5.1. Er is bij de predictie geen onderscheid gemaakt tussen proefstrook 1 en proefstrook 3. De opbouw van de dijk, de bekleding en geometrie zijn vergelijkbaar met elkaar.

Voor de stabiliteit van de bekledingslaag is de opbouw van de waterdruk belangrijk. In het meest ongunstige geval treedt een drukverdeling op, waarbij een waterstroming parallel aan het talud ontstaat, of zelfs een situatie met uittredend water. Voordat deze situatie wordt bereikt, zijn enkele fasen te onderscheiden (Figuur 5.1):

- 1 Er zijn zuigspanningen aanwezig
- 2 Er zijn drukspanningen aanwezig en de grond is volledig verzadigd. De grondwaterstroming heeft een grote snelheidscomponent het talud in gericht, waardoor de drukspanning lager is dan die in het geval van parallelle stroming.
- 3 Er zijn drukspanningen aanwezig die overeenkomen met de spanningsverdeling bij parallelle stroming.



Figuur 5.1 Schematische weergave fasering opbouw waterdruk in bekleding

In Tabel 5.1 is aangegeven in welke van deze fasen de bekleding zich volgens de predictie bevindt. Tevens is aangegeven hoelang de infiltratie in de infiltratieberekening heeft geduurd als percentage van de proefduur. Het percentage van de tijd dat het talud nat is, is berekend met behulp van de formule hiervoor uit het VTV, Katern 8, Hoofdstuk 4.

Tabel 5.1 Samenvatting predictie golfoverslagproef proefvak 1 en 3

Proef	Percentage talud nat	Waterspanningsbeeld (-)
0,1 l/s per m (10x versneld; 6 uur in 36 min))	2,8%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in. • Alleen zuigspanningen in de bekleding. • Waterspanning in de kern neemt niet toe.
1 l/s per m (6 uur)	24%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in. • In een groot deel van de bekleding is de grond 100% verzadigd, maar er heerst nog een zuigspanning in de bekleding. • Waterspanning in de kern neemt niet of nauwelijks toe.
10 l/s per m (6 uur)	48%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in. • Bekleding volledig verzadigd. • Er heerst een drukspanning, maar lager dan die hoort bij een parallelle stroming. • Toename stijghoogte in zandkern ter plaatse van de teen met 0,8 m.
30 l/s per m (6 uur)	60%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in. • Bekleding en zand tot 0,5 m onder de bekleding volledig verzadigd. • Drukspanning in bekleding, maar lager dan die hoort bij een parallelle stroming. • Toename stijghoogte in zandkern ter plaatse van de teen met 2 m.
50 l/s per m (6 uur)	65%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in voor bovenste circa 3/4 van het talud. Parallelle stroming voor onderste circa 1/4 van het talud. • Drukspanning in bekleding die hoort bij een parallelle stroming voor onderste circa 1/4 van het talud. • Toename stijghoogte in zandkern ter plaatse van de teen tot circa 1/4 van de taludhoogte.
75 l/s per m (6 uur)	69%	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale stroming het talud in voor bovenste circa 2/3 van het talud. Parallelle stroming voor onderste circa 1/3 van het talud. • Drukspanning in bekleding die hoort bij een parallelle stroming voor onderste circa 1/3 van het talud. • Toename stijghoogte in zandkern ter plaatse van de teen tot circa 1/3 van de taludhoogte.

Bij deze samenvatting van de resultaten wordt opgemerkt dat de predictieberekeningen zijn gemaakt met een 2D model, terwijl de stroming in de dijk bij een slechts 4 meter brede teststrook 3D zal zijn. De predictie bij de golfoverslagproeven is dan ook niet bedoeld de

waterspanningsopbouw in de bekleding, niet in de zandkern. Vlak onder het taludoppervlak, in de kleibekleding, zijn de 3D effecten nog gering.

Bij de predictie voor de 1 l/s per m proef is uitgegaan van een proefperiode van 6 uur, waarbij gedurende 24% van de tijd het talud nat zou zijn (5200 s). De proef is echter 5x versneld uitgevoerd, dus 5 l/s per m in 1,2 uur in plaats van in 6 uur. Dit is niet helemaal correct, maar dit zou bij de predictieberekening neer komen op 35% van 1,2 uur is gelijk aan 1500 s, wat minder dan 1/3 van de tijd is die is aangehouden bij de predictie. De predictie zal wat dat betreft dus een overschatting geven van infiltratie.

5.1.2 Waarneming: grote infiltratie bij eerste overslagvolumes

Bij aanvang van de 0,1 l/s per m proef (10x versneld uitgevoerd) is waargenomen dat de eerste golfoverslagvolumes van 150 l per m de teen van de dijk niet bereikte. De volledige volumes, totaal circa 300 l per m, werden opgenomen in de bekleding.

De eerste paar overslagvolumes vullen de allergrootste (muizen)gaten en scheuren in de bovenste decimeter van de bekleding. De structuur van de grond is hier heel los. Het volume van de macroporiën is in de orde van 15% van het grondvolume (Deltares 2008). Bij een taludlengte van 22 m gaat het dan om een volume aan makkelijk te vullen grote poriën van $0,1 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 15\% = 0,33 \text{ m}^3$ per m (330 l per m). Dit is redelijk in overeenstemming met de waarneming.

Hieruit kan een infiltratiesnelheid worden geschat bij aanvang van de proef voor de bovenste. Met een taludlengte van circa 22 m en een verblijftijd op het talud van naar schatting 5 seconden is de infiltratiesnelheid gelijk aan $150 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ per m / 22 m / 5 s = $1,4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Dit is orde een factor 100 groter dan volgt uit de infiltratieproeven en waarmee de predictieberekeningen zijn gekalibreerd.

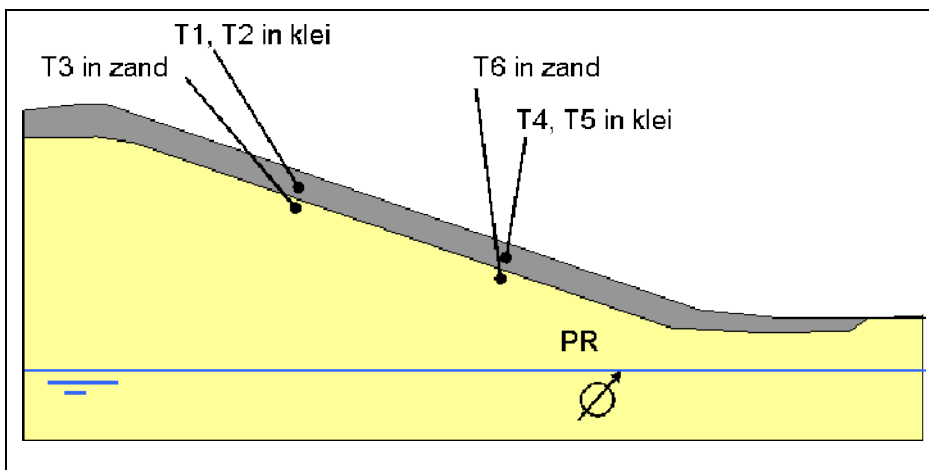
Deze detaillering in het infiltratieproces is wel meegenomen bij de calibratie van de predictieberekeningen, maar niet in de uiteindelijke predictie zelf (zie Deltares 2008). De reden hiervan is dat deze detaillering niet belangrijk is voor de infiltratie van water door de kleibekleding in de zandkern. Deze indringing wordt namelijk gedomineerd door de diepere, slechter doorlatende laagjes in de kleibekleding.

5.1.3 Waterspanningsmetingen

In de proefstroken 1 en 3 zijn waterspanningsmetingen verricht met tensiometers in de bekleding en net onder de bekleding in de zandkern. Diep in de zandkern is een PR-waterspanningsmeter geplaatst om ligging en eventueel de stijging van het freatisch vlak in de zandkern te meten (Tabel 5.2 en Figuur 5.2).

Tabel 5.2 Plaatsingsgegevens opnemers bij proefstrook 1 en 3 en waterdruk overeenkomend met het geval van een parallelle grondwaterstroming

opnemer	serienummer	vertikale diepte tov maaiveld [m]	Waterdruk overeenkomend met geval van parallelle grondwaterstroming (kPa)	opnemer is geplaatst in de
Strook 1				
T1	S/N2450	0,32	2,8	dijkbekleding
T2	S/N2451	0,58	5,1	dijkbekleding
T3	S/N2446	0,84	7,4	zand
T4	S/N2440	0,43	3,8	dijkbekleding
T5	S/N2442	0,64	5,6	dijkbekleding
T6	S/N2443	0,81	7,1	zand
PR	PR-359	2,50		zand
Strook 3				
T1	S/N2441	0,43	3,8	dijkbekleding
T2	S/N2444	0,65	5,7	dijkbekleding
T3	S/N2448	0,83	7,3	zand
T4	S/N2449	0,33	2,9	dijkbekleding
T5	S/N2621	0,51	4,5	dijkbekleding
T6	S/N2622	0,71	6,2	zand
PR	S/N472	2,97		zand



Figuur 5.2 Schematische weergave plaatsing opnemers proefstrook 1 en 3

De waterspanningsmetingen van de opnemers 1 tot en met 6 zijn per dag weergegeven in de onderstaande figuren.

De meetresultaten van de PR meters zijn gebruikt om te controleren of er onverhoed toch (micro)stabiliteit problemen zouden ontstaan, en indien dit het geval was, een meting te hebben op het moment dat dit zou gebeuren. Vanwege de geringe breedte van de proefstrook werd er echter geen grote stijging van het freatisch vlak in de zandkern verwacht. Uit de metingen is dit ook gebleken. De stijghoogte is beperkt gebleven tot circa NAP +1,2 m

(strook 1) en NAP +1,25 m (strook 3), wat ongeveer 0,4 m onder het teenniveau is. De metingen worden verder niet meer behandeld.

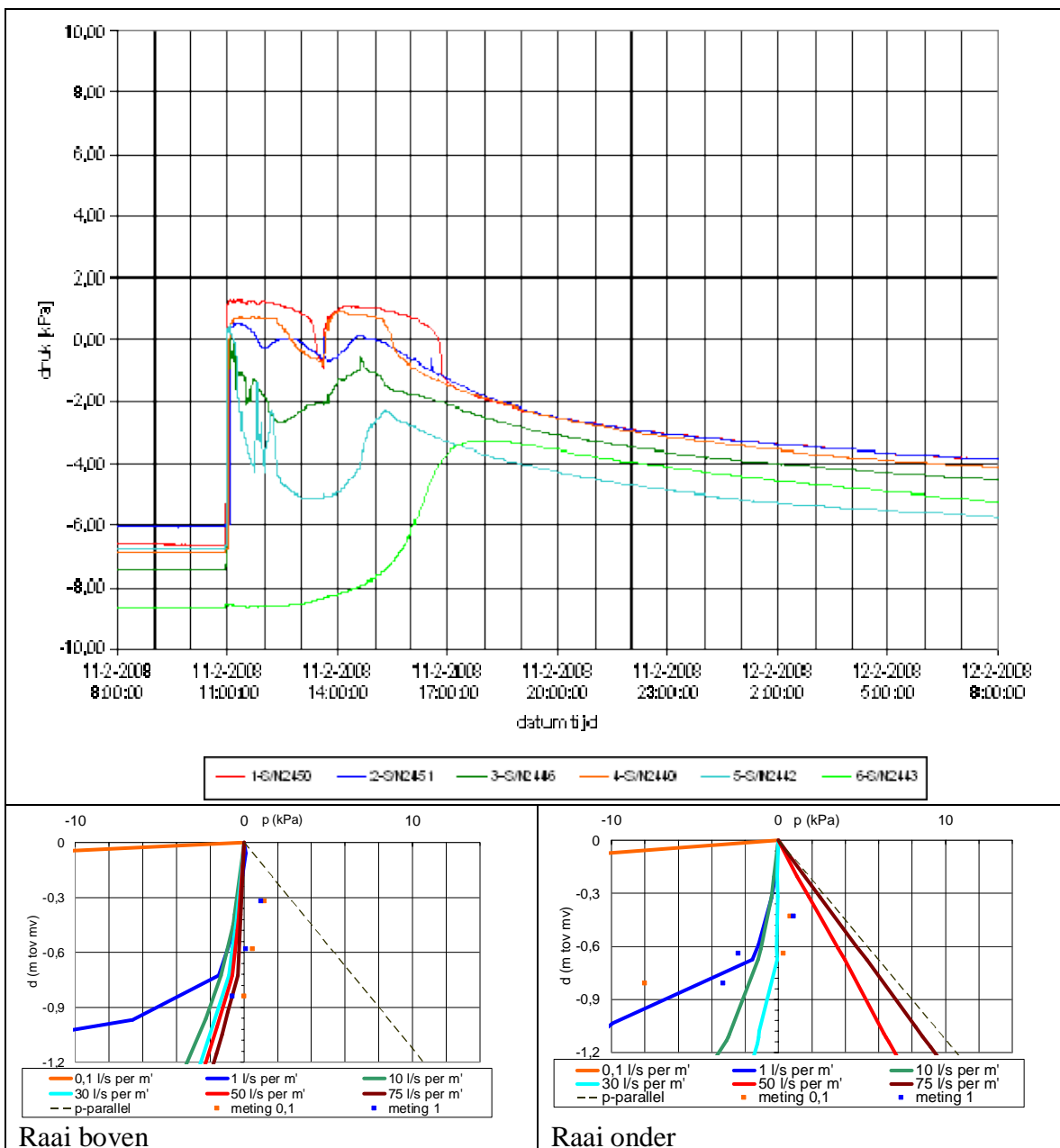
Voor de evaluatie van de waterspanningsmetingen zijn de volgende figuren gemaakt:

<p>Meting tijd tegen waterdruk T1 tot en met T6</p>	
<p>Predictie druk vs diepte + hoogst gemeten waterdruk bovenste raai T1, T2 en T3</p>	<p>Predictie druk vs diepte + hoogst gemeten waterdruk onderste raai T4, T5 en T6</p>

De predictie is gegeven als druk p (kPa) tegen diepte d (m tov maaiveld). De predictie geldt telkens voor het einde van de proef bij een bepaald overslagdebiet. In de figuren zijn de lijnen voor elk van de proeven gegeven (0,1; 1, 10, 30, 50 en 75 l/s per m²). Tevens is de lijn gegeven die de druk weergeeft in het geval van een parallel aan het talud gerichte grondwaterstroming. In deze figuur zijn de hoogst gemeten drukken per opnemer tijdens de betreffende proef gegeven. Elke opnemer geeft een druk op de diepte waarop deze is geïnstalleerd. Hierbij zijn de drukpieken bij de hogere overslagdebieten buiten beschouwing gelaten. Deze drukpieken duren kort en worden veroorzaakt door de op het talud aanwezige waterlaagdikte als er net een volume-front voorbij raast. Deze waterlaagdikte is niet meegenomen in de predictie, omdat deze maar weinig invloed heeft op de hoeveelheid water die in de dijk infiltreert (Deltares 2008).

Proefstrook 1

In proefstrook 1 is begonnen op 11 februari met de 0,1 en 1 l/s per m proeven. Dinsdag 12 februari is gestart met 10 l/s per m, maar deze proef is na 1,5 uur gestaakt in verband met het zichzelf ingraven van de pomp. Aan het einde van de dag is het talud schoon gespoeld, wat ook duidelijk is te zien in de metingen. Woensdag 13 februari is de 10 l/s per m proef in een keer achter elkaar (6 uur) uitgevoerd. Tevens is een start gemaakt met een sessie van 2 uur 30 l/s per m. 14 februari zijn twee sessies van 2 uur 30 l/s per m uitgevoerd en een van 50 l/s per m. 15 februari zijn twee sessies van twee uur 50 l/s per m uitgevoerd en is een start gemaakt met 75 l/s per m. Deze laatste proef is afgemaakt op zaterdag 16 februari.

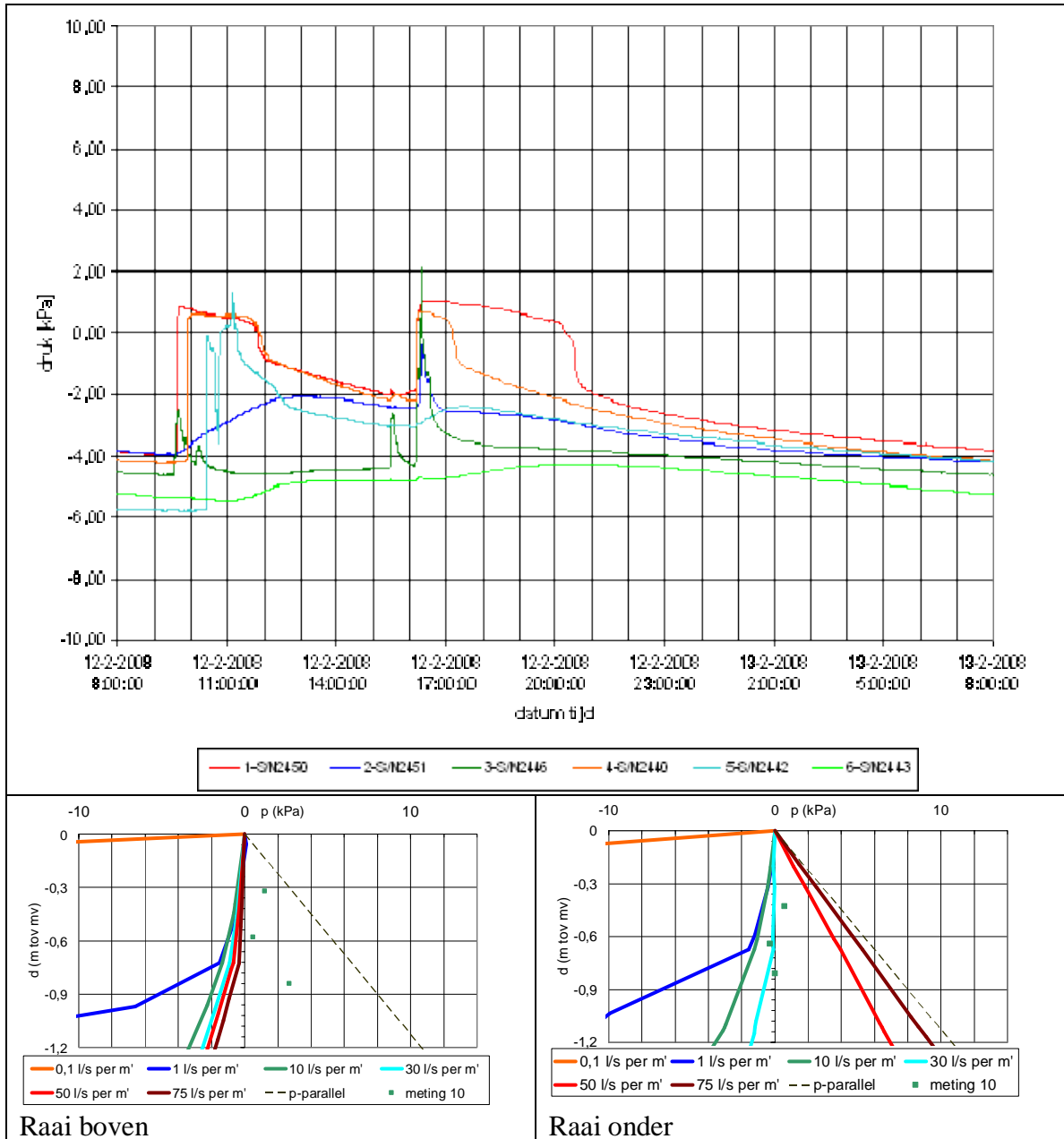


Figuur 5.3 Teststroom 1 0,1 en 1 l/s per m

Op maandag 11 februari 2008 zijn de versnelde 0,1 l/s per m (10x versneld; 36 min) en de 1 l/s per m (5x versneld; 1,2 uur) uitgevoerd. De verdeling (36 min vs 1,2 uur) is niet terug te vinden in de metingen, hetgeen onverklaarbaar is. De ondiepst gelegen opnemers (1 en 4), en daarmee theoretisch het snelst reagerend, geven een proefduur aan die ongeveer aan elkaar gelijk is. Eveneens opvallend is dat de gemeten waterspanning tijdens de 1 l/s per m proef voor bijna alle opnemers lager is dan voor de 0,1 l/s per m proef. Ook dit is niet verklaarbaar.

Met uitzondering van de opnemers 1, 2 (bovenaan het talud) en 4 (onderaan het talud) blijven de opnemers een zuigspanning aangeven. De opnemers 1,2 en 4 geven een drukspanning, maar deze is veel minder dan die overeenkomt met een parallelle grondwaterstroming.

De belangrijkste conclusie is dat de waterspanning in de kleibekleding bij zowel 0,1 als bij 1 l/s per m lang niet de kritische waarde bereikt die hoort bij een parallelle grondwaterstroming.



Figuur 5.4 Teststroom 1 10 l/s per m (1,5 uur) en schoonspoelen talud

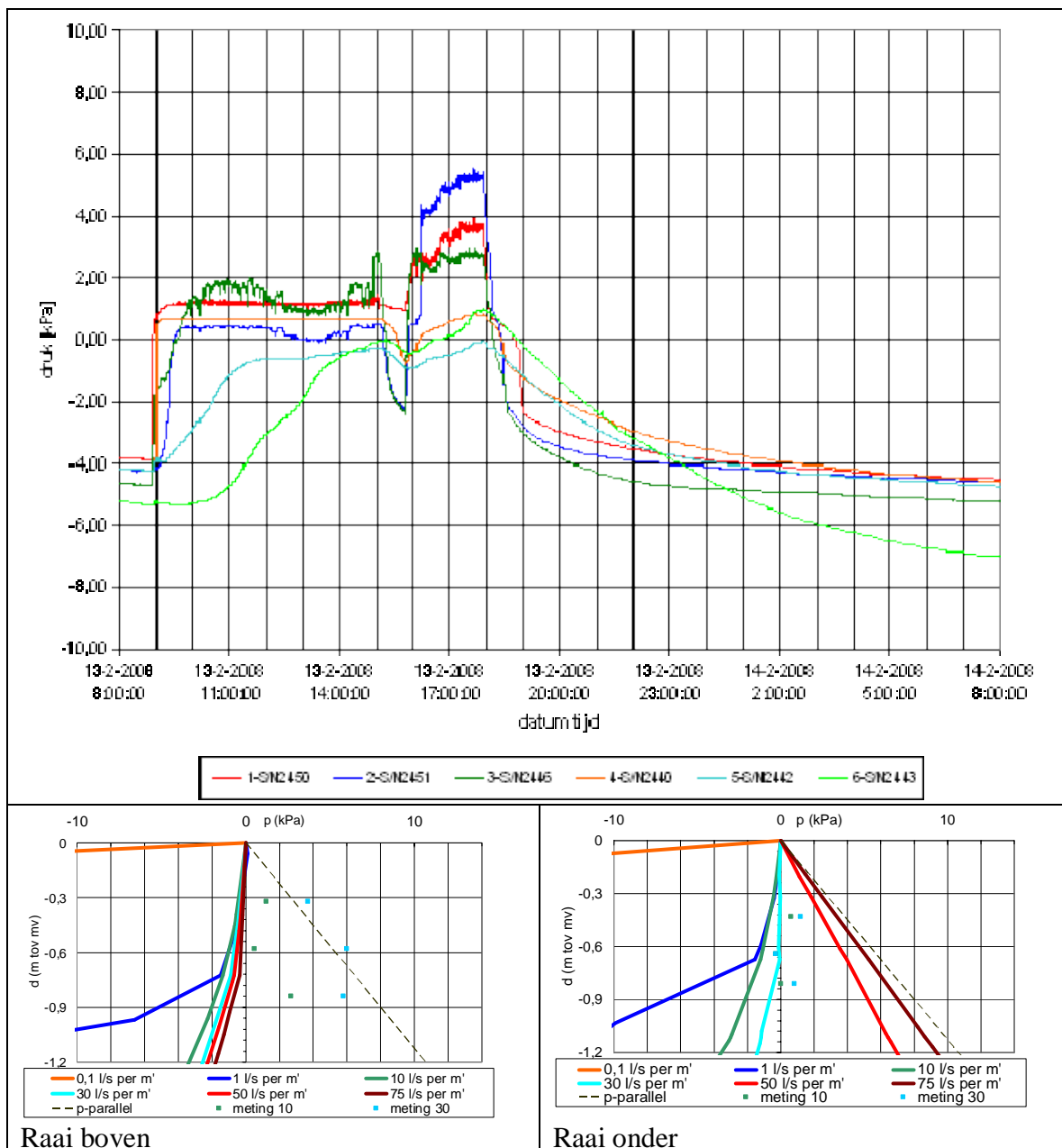
Op 12 februari is de proef van 10 l/s per m gestart. Deze is na circa 1,5 uur gestaakt omdat de pomp zich ingroef in de zandbodem van de teensloot, waardoor er veel zand op het talud terecht kwam. Aan het einde van de dag is het talud schoongespoeld. Het effect van deze activiteiten is duidelijk zichtbaar in de metingen.

Opvallend is de relatief langzame reactie van opnemer 2, die de dag eerder wel snel reageerde, en bij verdere proeven wederom snel zal reageren. Zoals eerder waargenomen

op de proeflocaties in Zeeland kan dit worden verklaard door het dichtslibben van de macroporiën door afslibbaar materiaal van het talud of in dit geval materiaal dat vanuit de teensloot op het talud was gekomen. Deze deeltjes kunnen de grotere poriën verstoppen. Bij op volgende proeven (bijvoorbeeld al de volgende dag) lijkt de verstopping dan ineens weer voorbij. Er kan in elk geval worden geconcludeerd dat er gedurende de golfoverslagproeven processen spelen die niet worden meegenomen bij de modellering.

De gemeten waterspanningen blijven ver onder de druk die hoort bij een voor de stabiliteit ongunstige parallelle grondwaterstroming.

13 februari is de 10 l/s per m proef aaneengesloten uitgevoerd en is aan het einde van de dag de eerste twee uur van de 30 l/s per m proef uitgevoerd (Figuur 5.5).



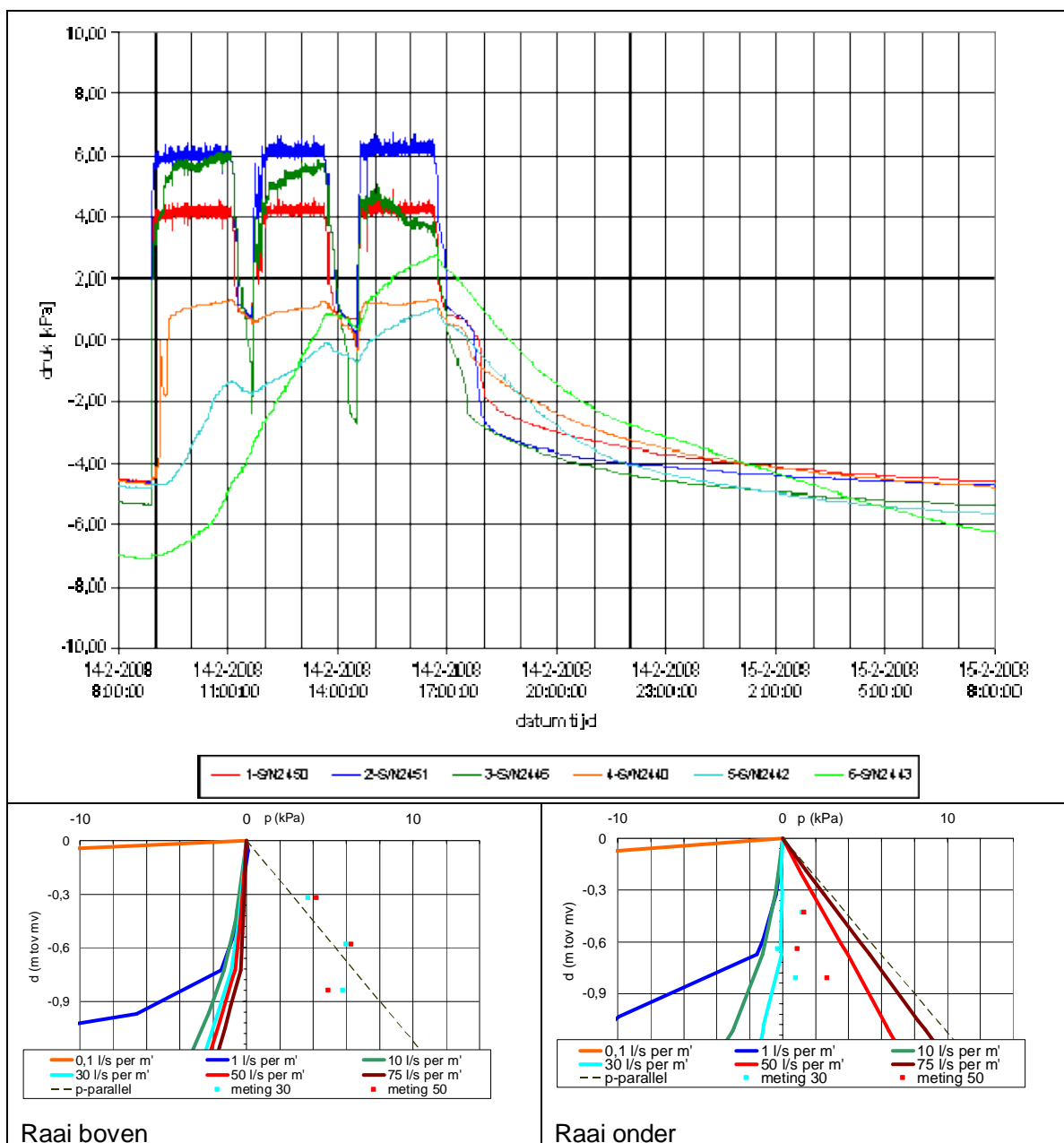
Figuur 5.5 Teststrook 1 10 l/s per m 6 uur continu en 2 uur 30 l/s per m

Bij 10 l/s per m blijft de waterspanning voor alle opnemers ver beneden de waterdruk die hoort bij een waterstroming parallel aan het talud.

Volgens de predictie zou er ter plaatse van de meetraaien op 1/3 en 2/3 van het talud, in de bekleding en er net onder, nog een zuigspanning aanwezig moeten zijn aan het einde van de proef met 10 l/s per m. Dit blijkt niet het geval. Met uitzondering van opnemers 5 en 6 worden kleine drukspanningen gemeten. Een mogelijke verklaring is een afname van de doorlatendheid onder de onderste opnemer die net in het zand staat. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Het zand kan door de manier van aanbrengen (opgespoten en daarna onder profiel gebracht) enigszins gelaagd zijn ten aanzien van korrelverdeling en pakking. Dit is echter niet geconstateerd tijdens het uitvoeren van het grondonderzoek in het kader van de predictie.

De verhoogde overslagintensiteit tijdens de eerste sessie van 30 l/s per m laat de waterspanningen verder stijgen en vooral ter plaatse van de bovenste meetraai. Aan het einde van de eerste sessie van 2 uur geeft de minst diepe opnemer (rood) 3,7 kPa, wat overeenkomt met een stijghoogte die enkele centimeters boven het maaiveld uitkomt. Dit betekent dat er een buitenwaarts gerichte grondwaterstroming aanwezig is, maar het kan ook zijn dat de veldijking van de waterspanningmeter onnauwkeurigheid is geweest. Een onnauwkeurigheid van enkele centimeters stijghoogte wordt niet uitgesloten. Het bepalen van de maaiveldhoogte met enkele centimeters nauwkeurigheid is bijvoorbeeld al moeilijk vanwege de aanwezigheid van graspollen en onregelmatigheden in de grond. Daarnaast kan de nulpuntijking onnauwkeurig zijn door een afwijking van de plaatsingshoek ten opzichte van de geplande 45°. Het is echter waarschijnlijk dat de druk overeenkomend met een parallelle grondwaterstroming wel wordt gehaald.

De middelste opnemer (blauw) geeft 5,2 kPa, wat ongeveer overeenkomt met de druk die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Bovenaan het talud is de drukverdeling in de klei gelijk aan of zelfs ongunstiger dan die hoort bij een parallelle grondwaterstroming. Onderaan het talud is deze situatie nog niet bereikt. Als wordt gekeken naar de predictie, dan zou juist worden verwacht dat de onderste raai als eerste deze ongunstige spanningssituatie zou bereiken. Een verklaring voor dit verschil kan zijn gelegen in een variatie van de opbouw van de kleibekleding over het talud. Bovenaan het talud kan de opbouw zodanig zijn dat de doorlatendheid sterk afneemt richting de onderzijde van de bekleding, terwijl dit onderaan het talud niet het geval is. Deze doorlatendheid is afhankelijk van variaties in de dikte van de kleilaag en de samenstelling. Uit het grondonderzoek dat in het kader van de predictie is gemaakt, was al wel gebleken dat er een grote variatie van de kleilaagdikte aanwezig was, terwijl voor de predictie (onder andere vanuit praktische overwegingen) is uitgegaan van gemiddelde parameters en een gemiddelde kleilaagdikte.



Figuur 5.6 Teststroom 1 2 sessies 2 uur 30 l/s per m en 2 uur 50 l/s per m

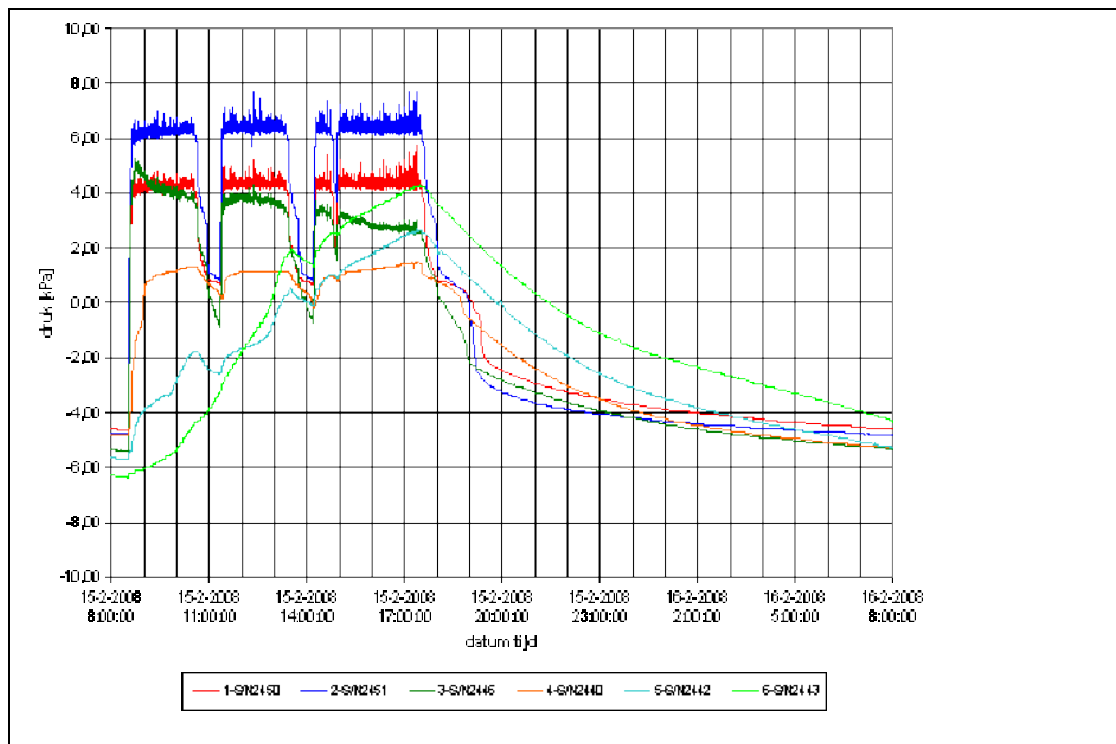
Tijdens de volgende twee sessies van 30 l/s per m en 50 l/s per m bereiken de opnemers 1 en 2 beiden een waterdruk die hoger ligt dan de voor de stabiliteit ongunstige waarde bij een parallelle grondwaterstroming. Opnemer 1 bereikt een druk van 4,2 kPa en opnemer 2 bereikt 6,2 kPa (beiden waarden zijn exclusief de kortdurende pieken). De stijghoogte ter plaatse van opnemer 1 is daarmee 10 cm boven het maaiveld en de stijghoogte bij opnemer 2 5 cm boven het maaiveld. Deze metingen zijn ver boven de predictie. Gedeeltelijk kan dit worden verklaard door de eerder genoemde onnauwkeurigheid van de meting. Het is echter zeker dat bovenaan het talud de waterdruk zeer ongunstig is. De eerder genoemde afnemende doorlatendheid van de kleibekleding kan hiervan de oorzaak zijn.

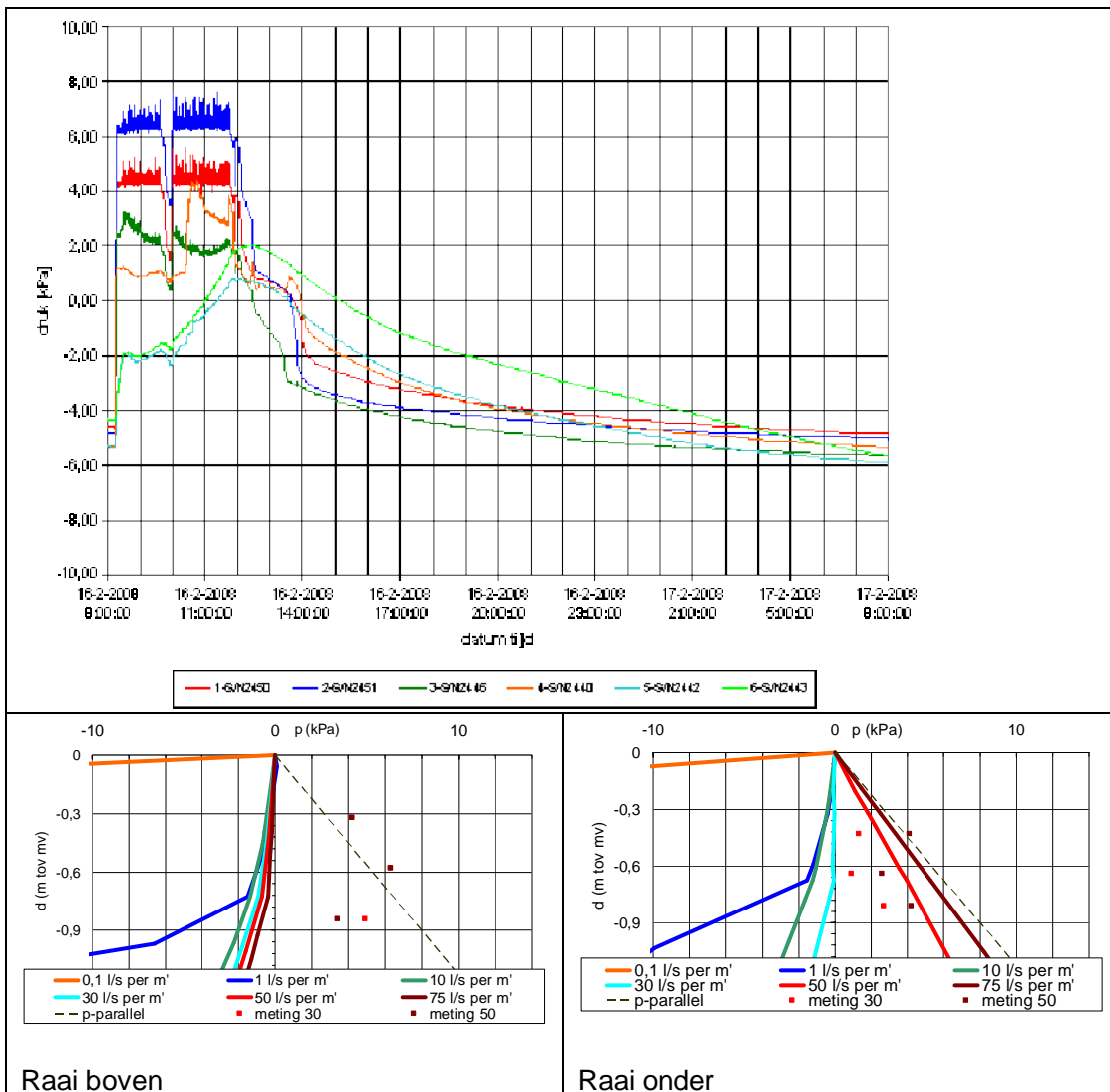
Net onder de kleibekleding is de stijghoogte een stuk lager dan het maaiveld, wat ook werd verwacht op basis van de predictieberekeningen. Een evenwichtswaarde van de druk (met

uitzondering van de pieken) wordt snel na aanvang van de proefsessies bereikt en zijn dus meer een gevolg van de intensiteit van opvolgende golven dan van de duur van de proef. Voor de opnemers 4 en 5 onderaan het talud lijkt de duur van de proefsessies wel uit te maken.

Het verschil in de reactie tussen de opnemers bovenaan het talud en onderaan het talud is niet goed verklaarbaar. Op basis van de predictie zou juist het omgekeerde worden verwacht. Bij eerdere proeven (Zeeland/ Delfzijl) zijn ook onverklaarbare verschillen gevonden tussen metingen in de bovenste en onderste raai. Het is goed mogelijk dat de metingen afhankelijk zijn van toevalligheden rondom de opnemer, zoals aansluiting van de zandomhulling op wormgaten en grote scheuren. Opnemer 4 (oranje) zit bijvoorbeeld maar enkele centimeters dieper dan opnemer 1 (rood), terwijl opnemer 4 relatief langzaam reageert en opnemer 1 zo snel reageert dat ook individuele golfvolumes worden geregistreerd.

Opnemer 3, die net onder de kleibekleding in het zand staat in de bovenste raai, geeft per sessie een afnemende drukspanning. Hiervoor is geen verklaring. Er spelen duidelijk processen die niet worden meegenomen in de sterk vereenvoudigde predictiemodellen. Tussen de proefsessies daalt de druk in opnemer 3 vrij snel tot een zuigspanning. Dit komt wel overeen met de predictie.



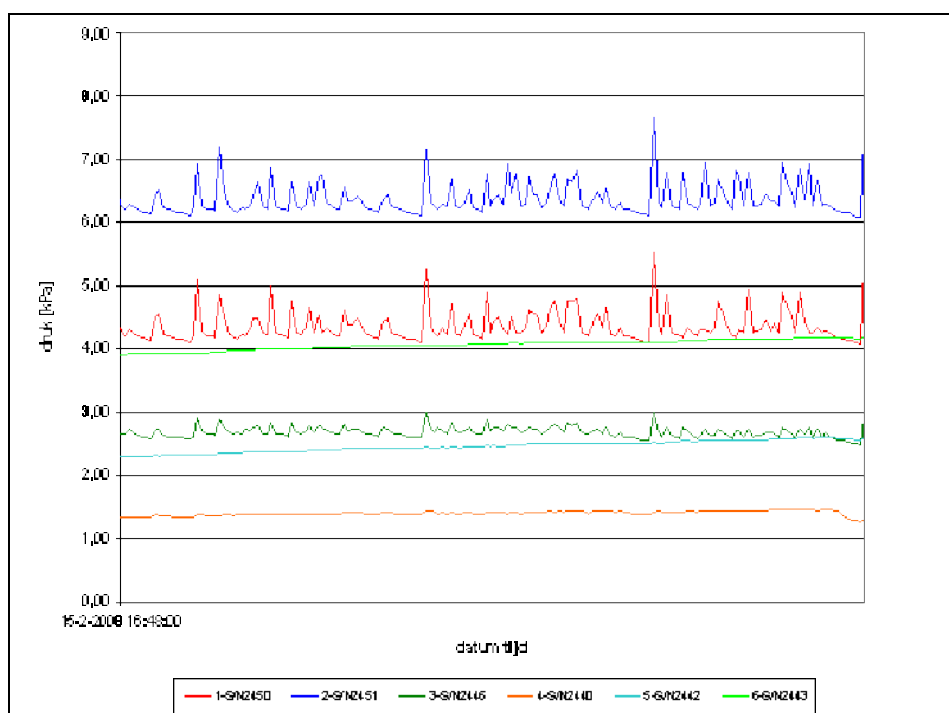


Figuur 5.7 Teststrook 1: 2 sessies 2 uur 50 l/s per m en start 75 l/s per m en in de tweede grafiek het restant van de 75 l/s per m proef

Vanaf 30 l/s per m en hoger geven de waterspanningsmeters ongeveer hetzelfde beeld. De waterspanningen zijn alleen enkele tienden kPa hoger bij de hogere overslagdebieten. De metingen van deze proeven worden daarom niet verder apart behandeld.

De metingen komen niet overeen met de predictieberekeningen. De bovenste raai geeft waterspanningen die hoger zijn en onderste raai geeft waterspanningen die lager zijn dan volgt uit de predictie. Dit betekent dat de ongunstige waterspanningsverdeling juist optrad bovenaan het talud en niet, zoals verwacht, onderaan het talud.

Vooral door de opnemers 1 en 2 worden pieken in de druk gemeten die zeer waarschijnlijk worden veroorzaakt door de waterlaag op het talud tijdens de overslaggebeurtenissen. In Figuur 5.8 is een uitvergroting gegeven van de 75 l/s per m sessie. De meetfrequentie is elke 10 s.



Figuur 5.8 Teststrook 1 Uitvergroting van sessie 75 l/s per m

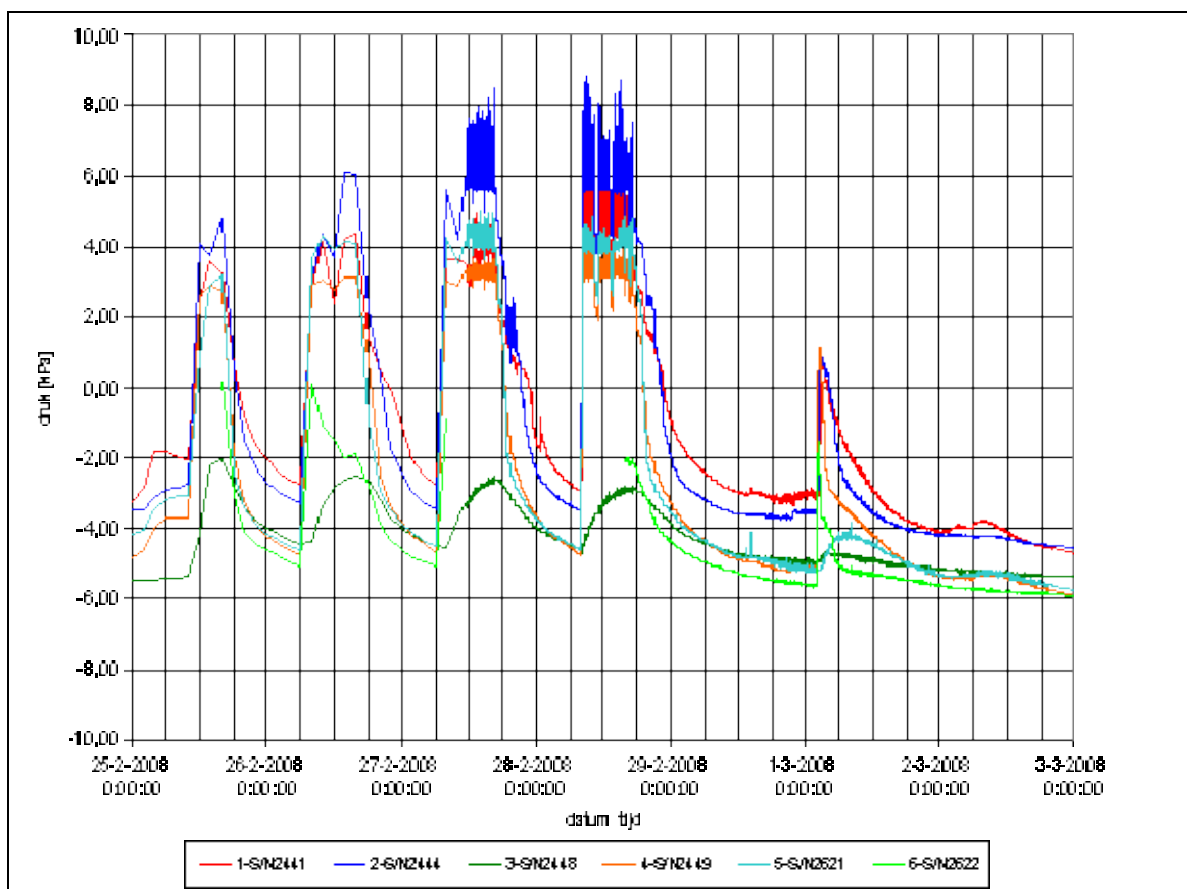
De momenten dat de drukpieken optreden in de opnemers 1, 2 en 3 komen overeen. De amplitude van de pieken in opnemer 1 en 2 zijn ongeveer gelijk, in opnemer 3 is de amplitude duidelijk lager. De grootste piek heeft een amplitude van circa 1,5 kPa, ofwel een drukhoogte van 15 cm waterkolom. De opnemers onderaan het talud meten geen drukpieken, wat wijst op een hoge demping van het signaal, hetgeen wordt veroorzaakt door een slechte doorlatendheid en/of een grote bergingscapaciteit. Het grondonderzoek dat in het kader van de predictie is uitgevoerd geeft hier geen uitsluitsel over.

De indringing van drukwisselingen op het taludoppervlak in de bekleding is afhankelijk van de doorlatendheid van het bekledingsmateriaal en de mogelijkheid van waterberging (stijfheid van de grond en of graszode). Indien de druk onder het taludoppervlak de drukwisseling op het talud vertraagd volgt, dan kan de situatie ontstaan waarbij er een kortdurende buitenwaarts gerichte drukgradiënt aanwezig is op het moment dat de waterlaagdikte op het talud afneemt na het passeren van het overslagvolumefront. Deze gradiënt levert een aandrijvende kracht voor het erosieproces en wordt ook meegenomen bij de modelering (zogenaamde turf element model – Fase 2A Modelontwikkeling Boonweg).

Proefstrook 3

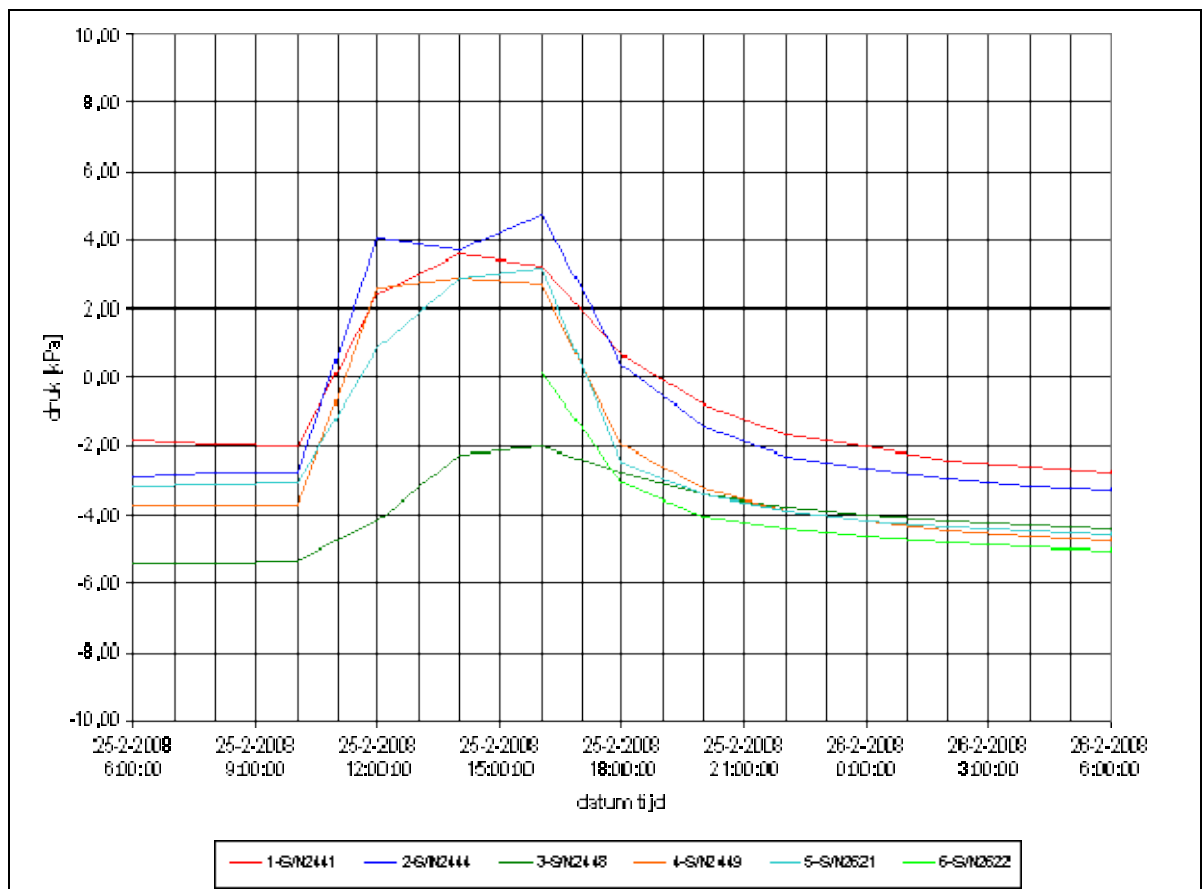
Tijdens de proefneming op teststrook 3 zijn gedurende de eerste 2,5 dagen alleen metingen uitgevoerd met een lage frequentie (elke 2 uur). Dit is gekomen doordat de frequentie van de meetapparatuur niet is verhoogd. Om te voorkomen dat dit bij volgende proeven weer gebeurt zal de procedure rondom de metingen moeten worden opgenomen in het draiboek.

Het detailniveau van de metingen is helaas te laag om goede conclusies te kunnen trekken over de verschillen in de waterspanningsopbouw bij 1, 10 en 30 l/s per m (Figuur 5.9).



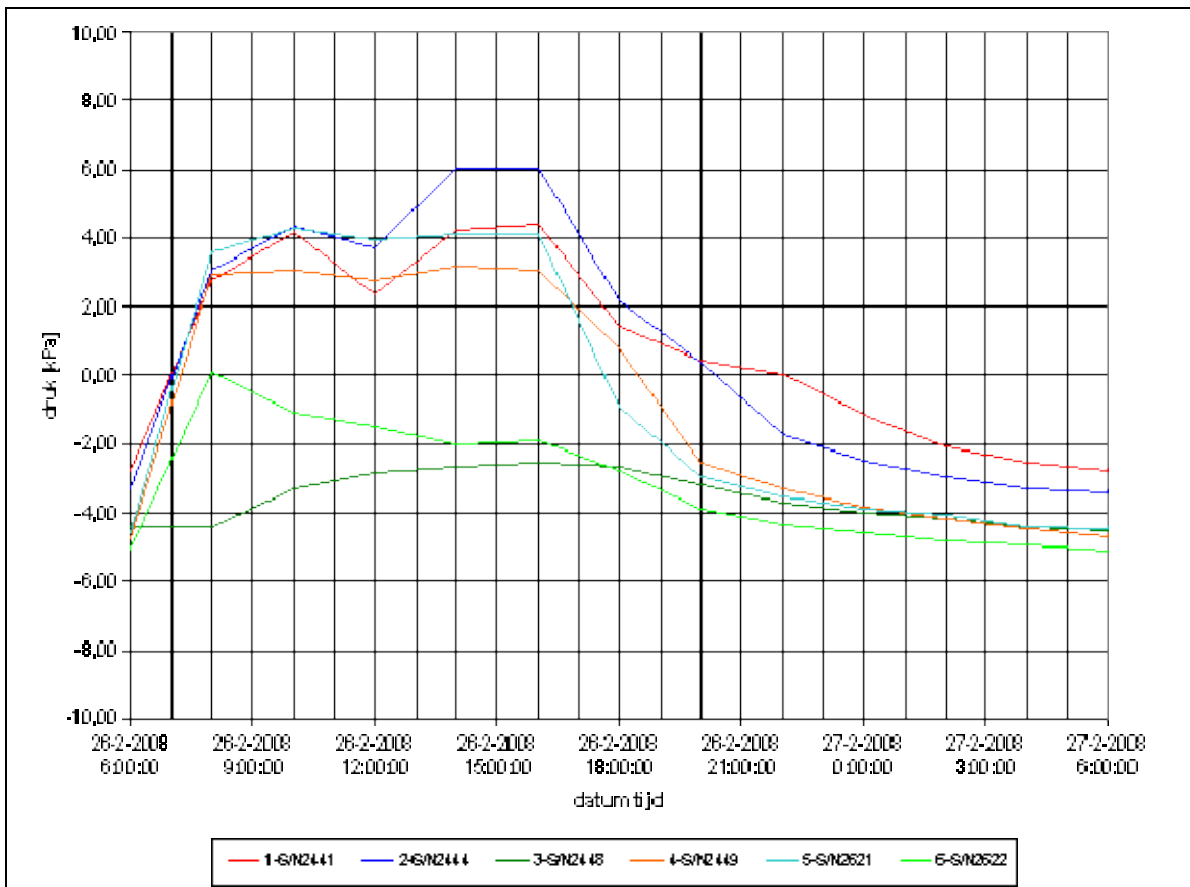
Figuur 5.9 Teststrook 3 meting met lage frequentie 25, 26 en 27 februari (gedeeltelijk)

Op maandag 25 februari zijn de proeven van 0,1 l/s per m (10x versneld), 1 l/s per m (5x versneld) en de eerste sessie van 2 uur 10 l/s per m uitgevoerd. De metingen gedurende deze dag geven onvoldoende detail om de afzonderlijke proeven hierin te kunnen zien.



Figuur 5.10 Teststrook 3: 0, 1; 1 en 2 uur 10 l/s per m (meting met lage frequentie)

Opnemer 6 (in het zand net onder de bekleding, raai onderaan het talud) geeft alleen een registratie vanaf 16:00. 28 en 29 februari geeft deze opnemer weer geen signaal, daarna lijkt hij weer correct te werken. De oorzaak van deze storing is onbekend.

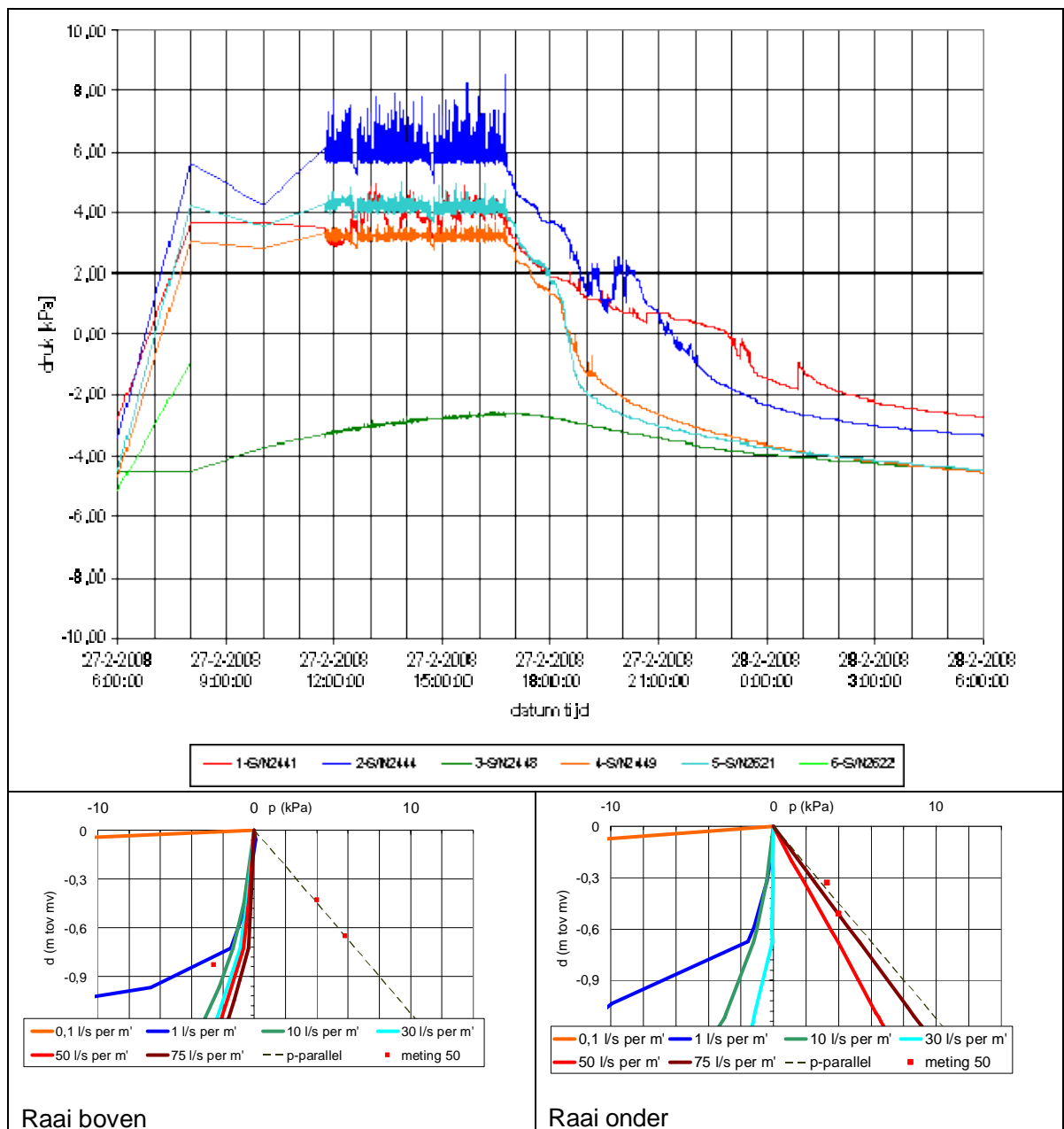


Figuur 5.11 Teststrook 3: 1 sessie van 2 uur 10 l/s per m en 3 van 30 l/s per m (meting met lage frequentie)

De opnemers 1 en 2 geven hetzelfde beeld als teststrook 1. De druk in de kleibekleding bij 30 l/s per m is gelijk aan, of zelfs iets hoger dan die hoort bij een stroming parallel aan het talud. Voor opnemer 1 (rood) is deze kritische druk 3,8 kPa en voor opnemer 2 (blauw) is dit 5,7 kPa. In tegenstelling tot teststrook 1 blijft opnemer 3 een zuigspanning aangeven.

De meetraai onderaan het talud geeft een waterdruk die gelijk aan of iets lager is dan die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Voor opnemer 4 (oranje) is deze kritische druk 2,9 kPa (meting 3,1 kPa) en voor opnemer 5 is deze druk 4,5 kPa. (meting 4,1 kPa). Net onder de bekleding wordt een zuigspanning gemeten.

De volgende dag is de proef met 50 l/s per m uitgevoerd (Figuur 5.12). Gedurende deze proef is de meetfrequentie verhoogd naar 1 meting per 10 s.



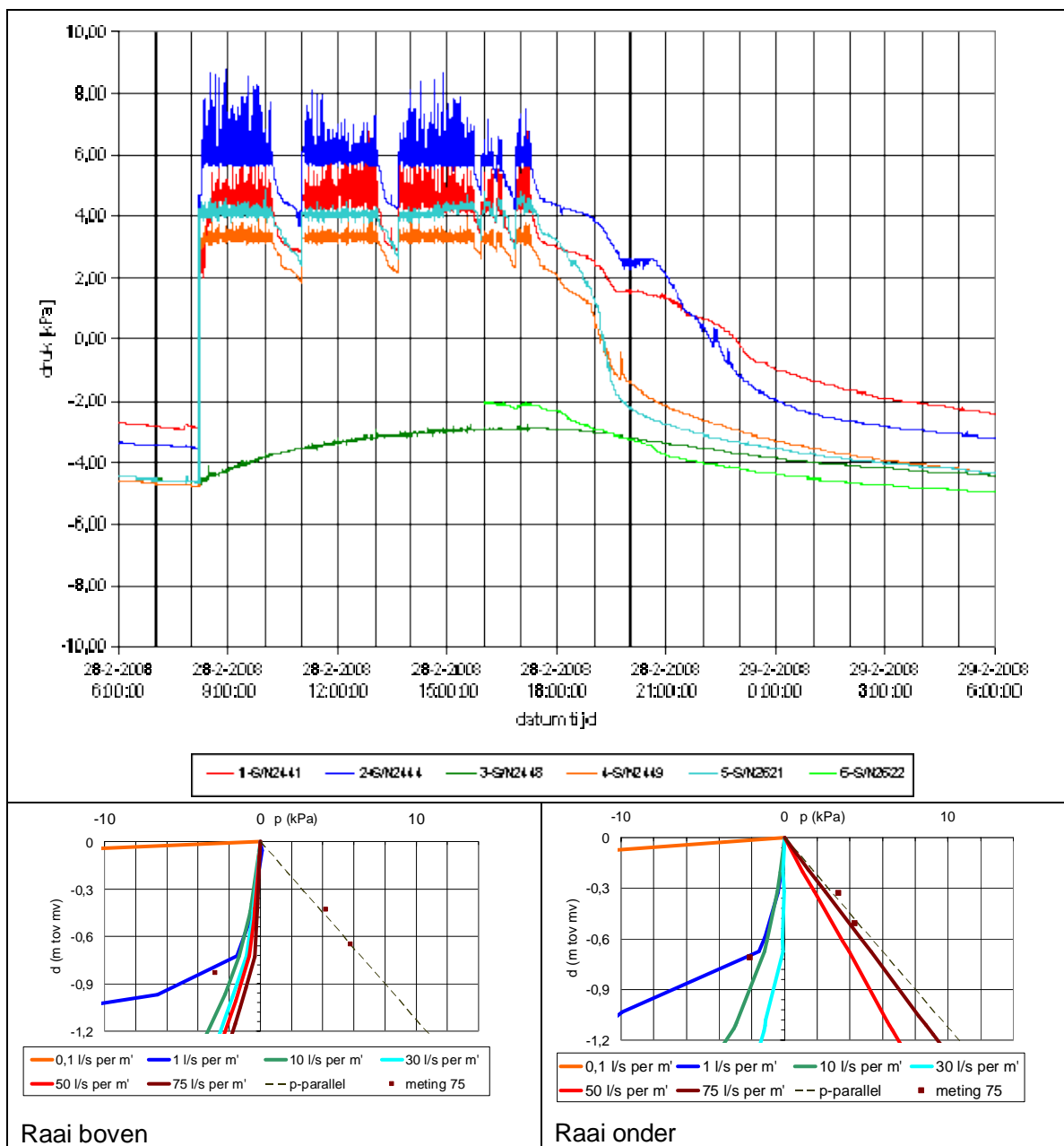
Figuur 5.12 Teststrook 3: 3 sessie van 2 uur 50 l/s per m (aanvankelijk meting met lage frequentie)

De opnemers 1 en 2 geven hetzelfde beeld als teststrook 1. De druk in de kleibekleding bij 50 l/s per m is gelijk die hoort bij een stroming parallel aan het talud. Voor opnemer 1 (rood) is deze kritische druk 3,8 kPa (meting 4,0 kPa) en voor opnemer 2 (blauw) is dit 5,7 kPa (meting 5,8 kPa). In tegenstelling tot teststrook 1 blijft opnemer 3 een zuigspanning aangeven. De metingen zijn veel hoger dan de predictie. Net als bij strook 1 kan de oorzaak zijn gelegen in een sterk afnemende doorlatendheid onderin de kleibekleding.

De meetraai onderaan het talud geeft een waterdruk die gelijk aan of iets lager is dan die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Voor opnemer 4 (oranje) is deze kritische druk 2,9 kPa (meting 3,1 kPa) en voor opnemer 5 is deze druk 4,5 kPa. (meting 4,1 Pa). Net onder de bekleding wordt een zuigspanning gemeten. Deze metingen komen redelijk overeen met de predictie.

De proeven met 30 l/s per m en 50 l/s per m geven hetzelfde meetbeeld.

In de hele bekleding, of in elk geval in de twee meettraaien, is een drukverdeling aanwezig die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Dit betekent dat er een weerstand – slecht doorlatende laag/ laagje - aanwezig is tussen de middelste opnamer en de zandkern. De drainage van water richting de zandkern is onvoldoende om de ongunstige drukverdeling in de bekleding te voorkomen. Dit komt niet overeen met de predictieberekeningen en is niet in lijn met hoe hiermee wordt omgegaan in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.



Figuur 5.13 Teststroom 3: 3 sessie van 2 uur 75 l/s per m (en enige voortzetting van 75 l/s per m tbv meting waterlaagdikte)

De opnemers 1 en 2 geven ongeveer hetzelfde beeld als bij de voorgaande proeven op teststrook 3, maar de drukken zijn gemiddeld enkele tienden kPa hoger. De druk in de kleibekleding bij 75 l/s per m is iets hoger dan die hoort bij een stroming parallel aan het talud. Voor opnemer 1 (rood) is deze kritische druk 3,8 kPa (meting 4,3 kPa) en voor opnemer 2 (blauw) is dit 5,7 kPa (meting 5,8 kPa). Opnemer 3 blijft wederom een zuigspanning aangeven.

De meetraai onderaan het talud geeft een waterdruk die gelijk aan of iets lager is dan die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. Voor opnemer 4 (oranje) is deze kritische druk 2,9 kPa (meting 3,3 kPa) en voor opnemer 5 is deze druk 4,5 kPa. (meting 4,1 kPa). Opnemer 6, net onder de bekleding in het zand, heeft een tijd geen metingen doorgegeven, maar gezien de zuigspanning aan het einde van de proef, zal hier gedurende de hele proef een zuigspanning aanwezig zijn geweest.

De pieken in de drukmetingen zijn groter dan op teststrook 1. De grootste piek wordt gemeten door opnemer 2 en is 3 kPa, wat ongeveer gelijk is aan 30 cm waterkolom. Opvallend is dat de pieken in de minder diepe opnemer 1 aanvankelijk kleiner zijn dan die in de middelste opnemer 2, wat later tijdens de proef weer omdraait. Dit heeft waarschijnlijk te maken met eerder genoemde processen die zich afspelen tijdens de golfoverslag, maar die niet worden meegenomen in de modellering.

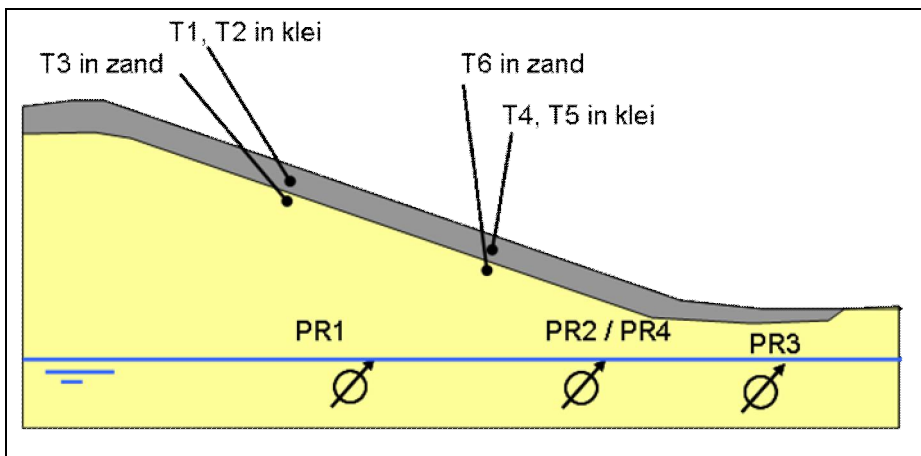
5.2 Infiltratie afschuifproef

De plaatsingsgegevens van de tensiometers (T) en waterspanningsmeters (PR) staan in Tabel 5.3. Schematisch zijn de plaatsen aangegeven in Figuur 5.14. De opnemers T1, T2 en T3 stonden van onderaf gezien op 2/3 van de taludhoogte, de opnemers T4, T5 en T6 op 1/3 van de taludhoogte. De bovenste twee opnemers stonden in de kleilaag, de derde er net onder. De opnemers zijn elk in een eigen boorgat geplaatst welke is afgedicht met zwelkorrels. Onderin de boorgaten van T1, T2 en T3 zijn respectievelijk thetaprobe1, 2 en 3 geplaatst. Thetaprobes meten het volume water/ volume grond. Hieruit kan worden opgemaakt of de drukvariaties van de tensiometers bestaan uit waterdruk of luchtdruk.

De opnemers PR1, PR2 en PR3 stonden midden in het testvak. De opnemers staan onder het dagelijkse grondwaterniveau in de zandkern van de dijk. PR1 stond halverwege het talud. vanaf de teenlijn gezien stond PR2 op 3 m op het talud en PR3 op 3 m op de berm. PR4 stond in het dwarsprofiel ter hoogte van PR2, maar op de rand van het vak. Deze meter was voor de controle van randeffecten. Deze meting moest antwoord geven op de vraag of het vak breed genoeg was om niet teveel last te hebben van het zijdelings afstromen van water.

Tabel 5.3 Plaatsingsgegevens opnemers bij afschuifproef

opnemer	serienummer	hoogte opnemer tov. NAP [m]	maaiveld tov. NAP [m]	vertikale diepte tov maaiveld [m]	opnemer is geplaatst in de
T1	S/N-2451	6,46	6,72	0,26	dijkbekleding
T2	S/N-2621	6,29	6,72	0,43	dijkbekleding
T3	S/N-2450	5,84	6,74	0,90	zand
T4	S/N-2446	4,04	4,27	0,23	dijkbekleding
T5	S/N-2443	3,84	4,27	0,43	dijkbekleding
T6	S/N-2442	3,54	4,24	0,70	zand
PR1	S/N-343	-0,49	5,42	5,91	zand
PR2	S/N-331	-0,48	2,58	3,06	zand
PR3	S/N-326	-0,45	1,58	2,03	zand
PR4	S/N-469	-0,50	2,71	3,21	zand



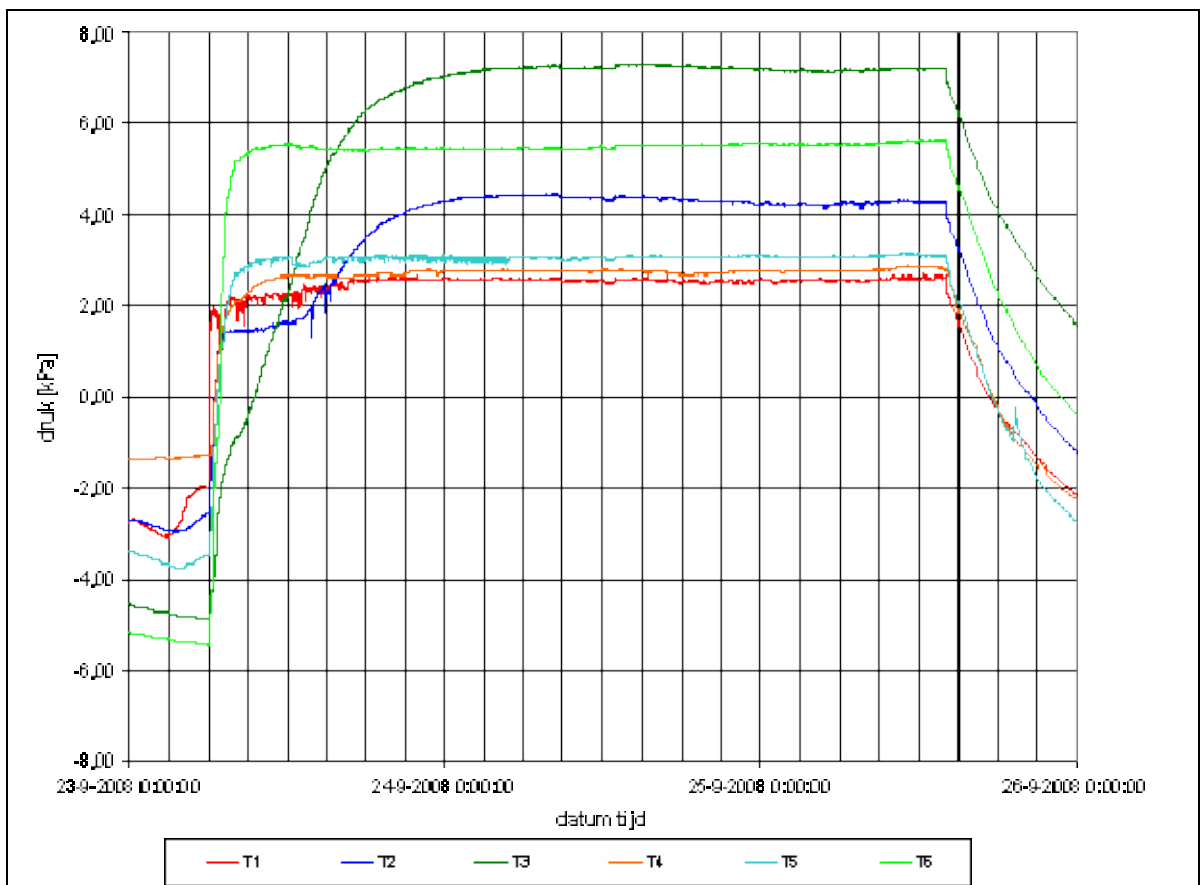
Figuur 5.14 Schematische weergave plaatsing opnemers

De metingen zijn gestart op 16 september 2008 18:00 en zijn geëindigd 29 september 2008 08:00. Voorafgaand aan de proef is op 19 september een systeemtest uitgevoerd. De infiltratie van het talud is gestart op 23 september circa 6 uur en is gestopt op 25 september om circa 14 uur. De infiltratieproef heeft 56 uur lang geduurd.

Gedurende deze 56 uur is ervoor gezorgd dat het talud nat bleef, dat wil zeggen dat er op het hele talud tot aan de teen een dun laagje water aanwezig was. Dit laagje was onderaan het talud misschien maar enkele mm dik en stroomde tussen de grasplantjes door. Tussen de teen van de dijk en de weg bevindt zich een verdieping, waardoor hier een plas ontstond. Tijdens de proef is een paar keer het overstroombediet verkleind totdat er geen water meer over de weg stroomde. Op deze manier is bepaald hoe groot het infiltratiedebiet vanaf de kruin tot aan de weg precies was. Na deze metingen is het debiet weer opgevoerd om er zeker van te zijn dat over voldoende wateraanbod was.

De dijk is een zanddijk met een kleibekleding. Voor de stabiliteit van de kleibekleding is de waterspanning in de bekleding en in het zand net onder de bekleding van belang. In het algemeen wordt er bij een zanddijk met kleibekleding van uitgegaan dat de kleibekleding een orde minder doorlatend is dan de zandkern (TAW 2001). Dit heeft als gevolg dat er in de kleibekleding zelf geen ongunstige drukopbouw kan ontstaan, omdat het water dat in de kleilaag infiltreert makkelijk naar de zandkern kan draineren. Het mechanisme dat in dit geval wel kan optreden is het afdrukken van de bekleding door een drukopbouw in de zandkern. In het kader van Fase 2B van dit project, Predictie Boonweg (Deltares 2008), is grondonderzoek uitgevoerd waaruit blijkt dat de kleibekleding door bodemstructuur ongeveer even doorlatend is als de zandkern. Aanbevolen wordt om de gevolgen hiervan, en mogelijk zelfs het minder doorlatend zijn van de kleibekleding dan de zandkern nader te onderzoeken.

De meting van de waterspanningen in de bekleding gedurende de proef staan in Figuur 5.15.



Figuur 5.15 Meting waterspanning (kPa) in de bekleding bij de afschuifproef

Aanvankelijk geven alle opnemers een zuigspanning van enkele kPa. Na aanvang van de proef neemt de druk snel toe. Na enkele uren is de waterspanning in de bekleding ongeveer gestabiliseerd. Een uitzondering hierop is opnemer T2 die na ca. 13:00 door stijgt, om pas op de 24 september te stabiliseren. Ook de opnemer net onder de bekleding bovenaan het talud (opnemer 3) doet er tot 24 september over om de evenwichtswaarde te bereiken.

Een verklaring voor de hapering van opnemer T2 is niet gevonden. Het lijkt er op dat er vlak na aanvang van de proef in de omgeving van T2, bovenaan het talud, een plotselinge afname van de doorlatendheid rondom de opnemer optreedt, waarna deze weer langzaam toeneemt. Ook opnemer T1, geplaatst boven T2 geeft in deze periode een onrustig beeld, maar laat niet dezelfde hapering zien.

Een relatief trage reactie van T3 is niet vreemd, omdat deze opnemer relatief diep onder het taludoppervlak zit en hoog in de dijk. Er zou echter worden verwacht dat ook T6 trager zou reageren dan T4 en T5 en dit is niet het geval. Waarschijnlijk worden de verschillen veroorzaakt door toevallige variaties in doorlatendheid van het dijksmateriaal rondom de opnemers.

De gemeten gestabiliseerde waterdrukken zijn samen met de druk die hoort bij een stroming parallel aan het talud en de waarden volgens de predictie opgenomen in Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Waterdruk bij grondwaterstroming parallel aan het talud (kPa) en gemeten waterdruk (kPa) voor de tensiometers in en net onder de kleibekleding

Opnemer	Druk bij grondwaterstroming parallel aan talud (kPa)	Meting (kPa)	Predictie na 56 uur (kPa)
T1	2,3	2,5	2,0
T2	3,8	4,2	3,4
T3	7,9	7,2	7,1
T4	2,0	2,8	2,1
T5	3,8	3,1	3,9
T6	6,1	5,6	6,4

In de kleibekleding wordt bovenaan het talud (T1 en T2) wordt een waterspanning gemeten die hoger is dan die hoort bij een stroming parallel aan het talud. Dit is mogelijk als er een stroming aanwezig is met een component het talud uit, wat ongunstig is voor de stabiliteit van de bekleding. Dit betekent echter automatisch dat er (ergens) boven de meetraai een grondwaterstroming is met een component het talud in, wat gunstig is voor de stabiliteit van de bekleding. Een tweede mogelijkheid voor deze meting is de onnauwkeurigheid in de plaatsingsgegevens. Dit kan enkele centimeter schelen (enkele tienden kPa) in verband met de eerder genoemde moeilijkheden bij het bepalen van het exacte maaiveldniveau en de hoek waaronder de opnemers zijn geplaatst.

De waterspanning in het zand (T3) blijft iets achter bij de druk die overeenkomt met een parallelle grondwaterstroming, wat ook werd verwacht. Opvallend is wel dat dit de eerste keer is dat in het zand net onder de bekleding een forse waterspanning wordt gemeten. Bij de golfoverslagproeven bij de Boonweg, maar ook bij eerdere golfoverslagproeven op een kleibekleding op een zandkern in Zeeland (Infram 2008) was de waterspanning onder de kleilaag aanzienlijk lager. Dit kan gedeeltelijk worden verklaard door de duur van de proef die bij een afschuifproef aanzienlijk langer is dan bij een golfoverslagproef. De reactie van de waterspanningsmeter T3 is relatief langzaam, wat ook is te zien bij de golfoverslagproeven (5.1). Tijdens de onderbrekingen van de golfoverslagproeven elke twee uur en 's nachts, daalt de waterspanning weer. Bij een overslaggebeurtenis van 6 uur zou ook volgens de meting in Figuur 5.15 de druk beperkt blijven tot 2 à 3 kPa.

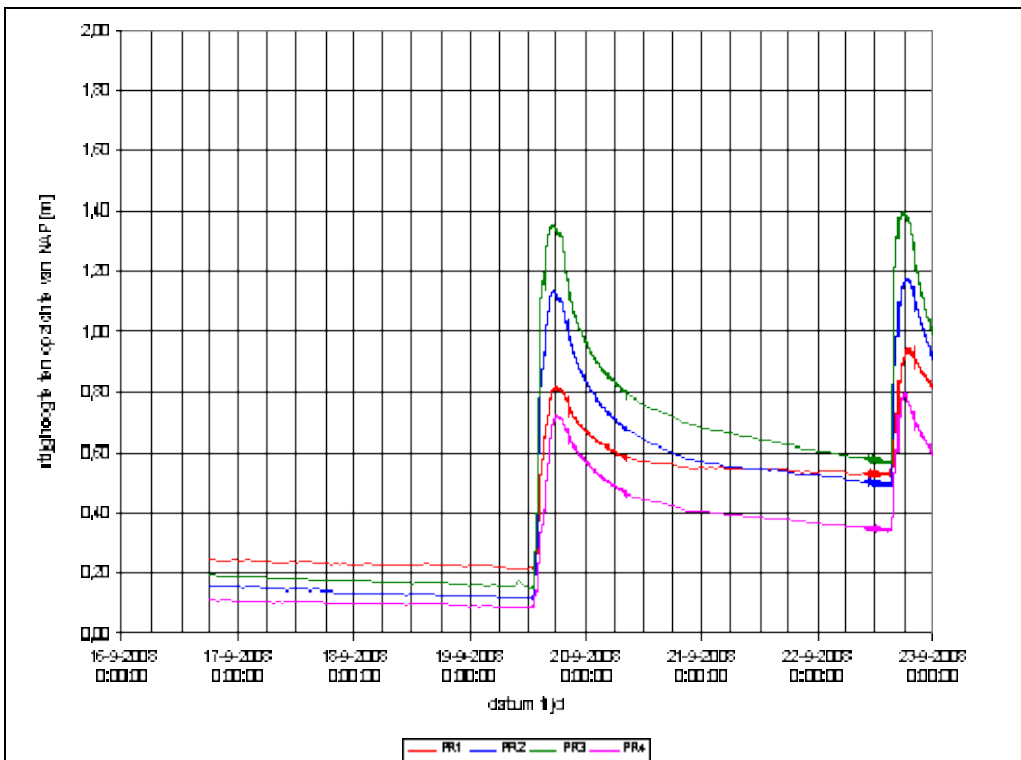
Onderaan het talud (T4, T5 en T6) wordt alleen in de bovenste helft van de kleilaag (T4) een waterspanning gemeten die hoger is dan die hoort bij een parallelle grondwaterstroming. De waterspanning iets dieper in de kleibekleding (T5) blijft hierbij achter. Volgens de predictie zou hier een waterspanning moeten optreden die hoger is, behorend bij een uittredende grondwaterstroming. Ook in het zand net onder de bekleding (T6) blijft de waterspanning achter bij de predictie.

Het totaalbeeld dat de metingen in en net onder de bekleding geven bij het bereiken van de evenwichtsstand is als volgt:

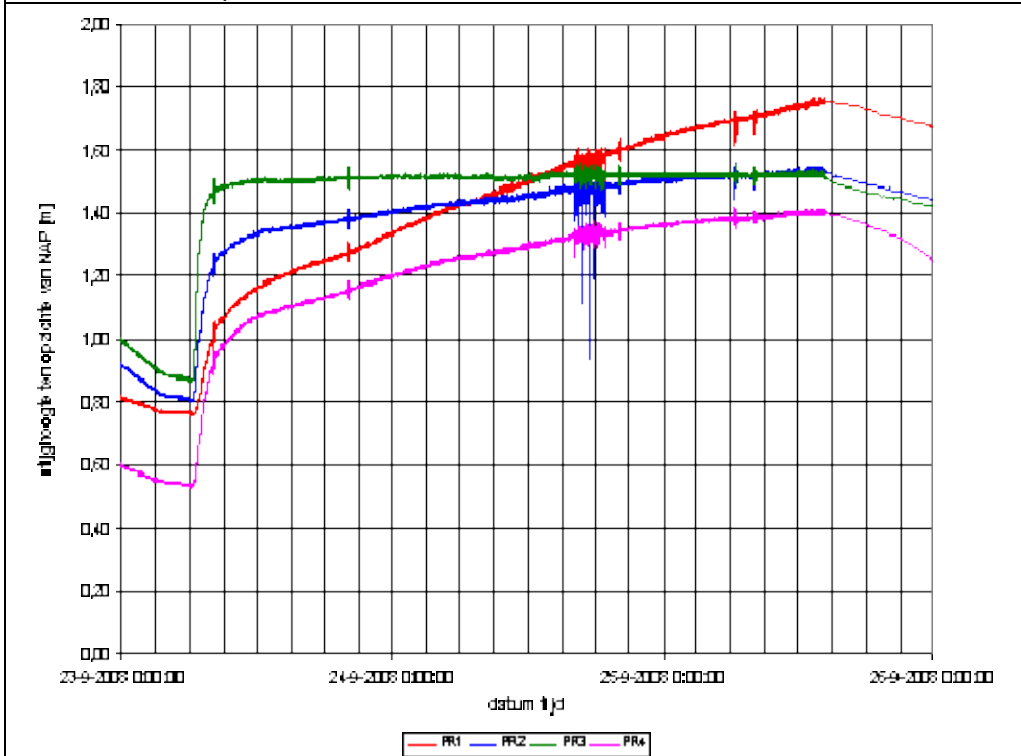
- Een drukverdeling die nog ongunstiger is dan die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud wordt bereikt op delen van het talud, maar juist niet waar dat volgens de predictie werd verwacht. Dit kan worden verklaard door een grondwaterstromingsbeeld dat afhankelijk is van lokale variaties in de doorlatendheid van het bekledingsmateriaal.
- Dat op sommige plekken op het talud de drukverdeling minder gunstig is betekent automatisch dat op andere plekken deze juist gunstiger is. Er kan bij de gebruikte proefopzet namelijk niet meer water uit de dijk stromen dan dat er door infiltratie op het talud instroomt.
- De relatief hoge gemeten waterdruk in de kleibekleding duidt op een afnemende doorlatendheid van de kleibekleding met de diepte onder het taludoppervlak. Deze afname van de doorlatendheid vindt plaats ergens in de onderste circa 1/3 van de bekleding.

Een variatie van doorlatendheid binnen de bekleding, zowel in de diepte als in het vlak van het talud, is niet meegenomen bij de predictieberekeningen. Een afnemende doorlatendheid met de diepte is wel onderkend (Deltares 2008), maar is mede vanwege beperkingen van het rekenmodel niet meegenomen. Hiervoor zou het nodig zijn om de bekledingslaag van circa 60 cm dikte onder te verdelen in 3 of 4 sublaagjes. Deze laagjes zijn zo dun, ten opzichte van de afmetingen van de hele dwarsdoorsnede van de dijk, dat ze niet goed kunnen worden gemodelleerd. Bij de predictie is het belangrijker geacht om de hoeveelheid water die via de kleibekleding de zandkern bereikt goed te modelleren, omdat het verwachte mechanisme zou worden veroorzaakt door het toenemen van de waterdruk in de zandkern. Hiertoe is de kleibekleding gemodelleerd als één laag met equivalente parameters zodanig dat de hoeveelheid infiltratie overeen kwam met de buisinfiltratieproeven.

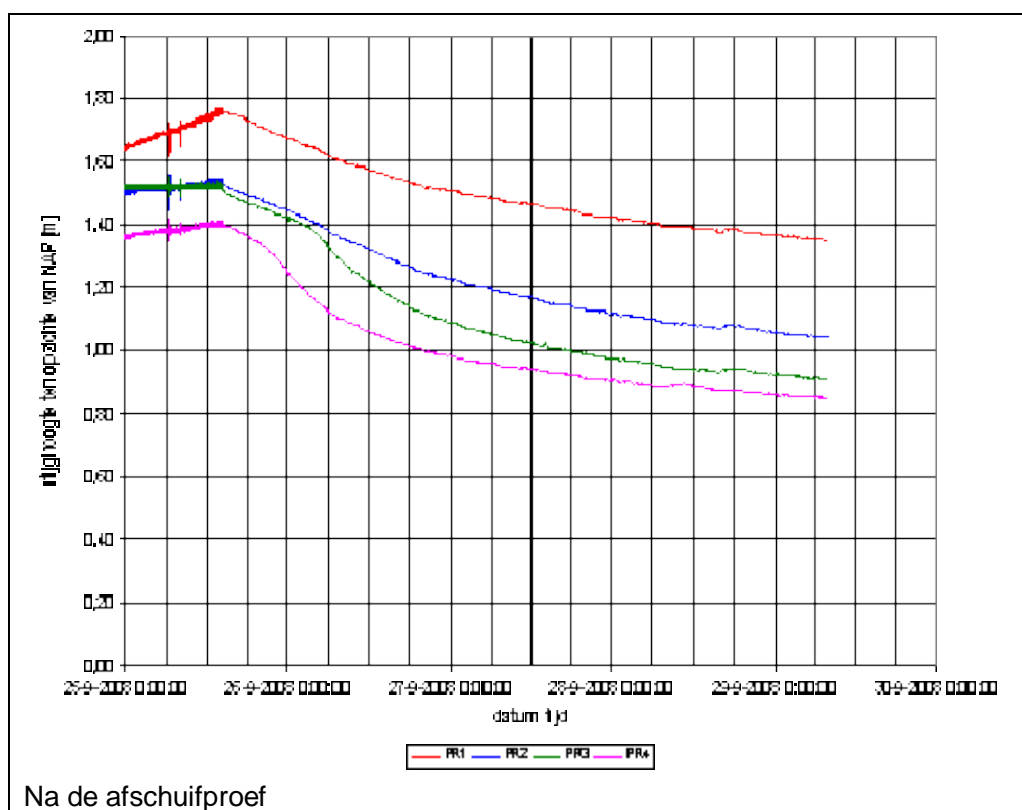
Met behulp van 4 waterspanningsmeters (PR1 tot en met PR4) is de waterdruk in de kern van de dijk gemonitord. De metingen voor, tijdens en na de afschuifproef staan in Figuur 5.16.



Voor de afschuifproef



Tijdens de afschuifproef



Na de afschuifproef

Figuur 5.16 Meting stijghoogte in zandkern (m tov NAP) voor, tijdens en na de afschuifproef

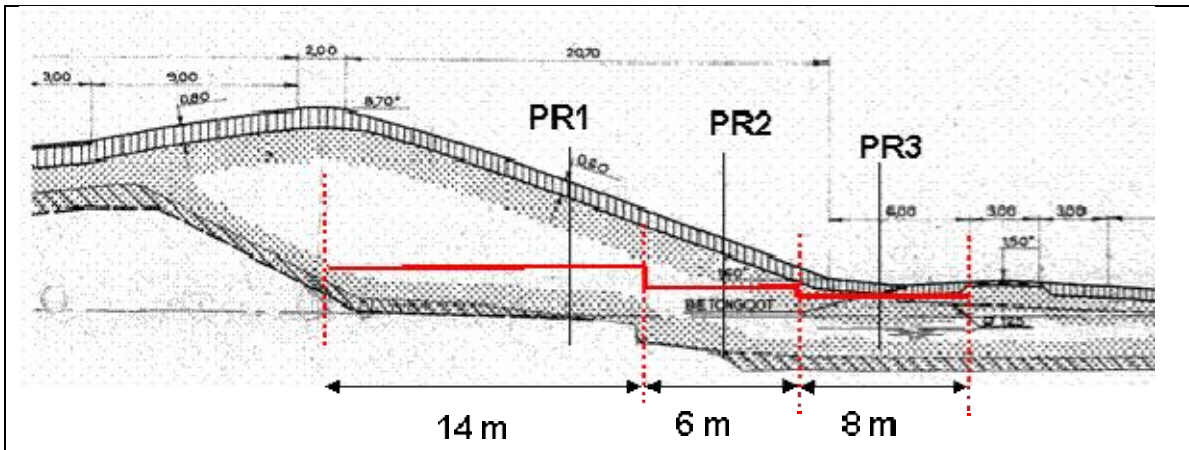
De bovenste grafiek geeft de stijghoogte voorafgaand aan de afschuifproef. Initieel is de stijghoogte in het zand gelijk aan circa NAP +0,2 m. Dit is circa 0,7 m hoger dan een lineaire interpolatie tussen het gemiddelde Waddenzeepeil en de teensloot, waarvan bij de predictieberekeningen is uitgegaan. De stijging kan worden veroorzaakt door infiltratie van regenwater en door niet lineaire effecten bij de indringing van het getij. Verwacht wordt dat met name de regen zorgt voor enige opbolling van het freatisch vlak in de dijk.

Voorafgaand aan de afschuifproef is het overloopsysteem getest (Infram 2008a), wat duidelijk zichtbaar is in de bovenste grafiek van Figuur 5.16. Het uitvoeren van de testen heeft geleid tot een toename van de stijghoogte aan het begin van de afschuifproef tot circa NAP +0,55 m aan de rand van het proefgebied (PR4) en NAP +0,8 m in het midden van het proefgebied (PR1, 2 en 3). Dit is circa 1,3 m hoger dan de initiële situatie in de predictieberekening.

In het eerste uur na aanvang van de afschuifproef neemt de stijghoogte in de zandkern relatief snel toe (29 cm/uur voor PR3), waarna een afvlakking van de stijging optreedt. Na circa 3 uur bereikt PR3, ter plaatse van de teen de maximale waarde, die gelijk is aan het maaiveldniveau. De meters PR2 en PR4 geven na de initiële snelle stijging een bijna lineair toenemende stijghoogte, waarbij PR2 een hogere stijghoogte geeft, maar PR4 iets sneller toeneemt (PR2 circa 4 mm/uur en PR4 circa 6,7 mm/uur). PR1 geeft na de initiële snelle stijging een toename van de stijghoogte met circa 12 mm per uur.

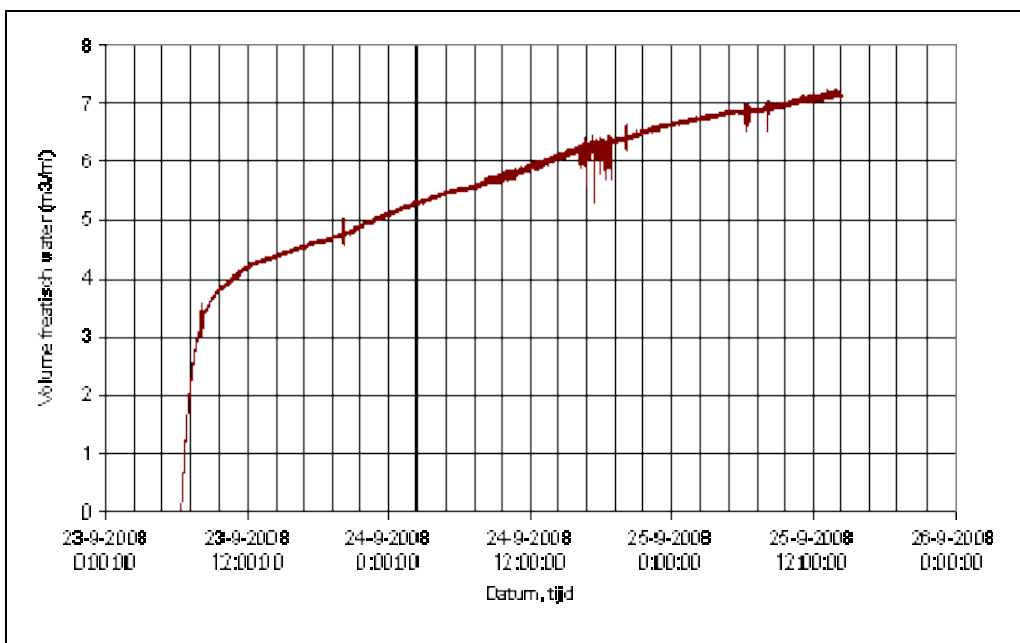
De stijging van het freatisch vlak in de dijk geeft aan welk debiet er wordt toegevoegd aan het freatisch water. Voor de verzadiging van elke m^3 zand is $0,31 m^3$ water nodig (Deltares 2008). Voor een schatting van het debiet dat binnen het proefvakgebied (van kruin tot weg en vakbreedte van 30,6 m) wordt toegevoegd aan het freatisch water, is het proefvak verdeeld in deelstukken. Voor elk van de deelstukken wordt aangenomen dat de stijging gemiddeld gelijk

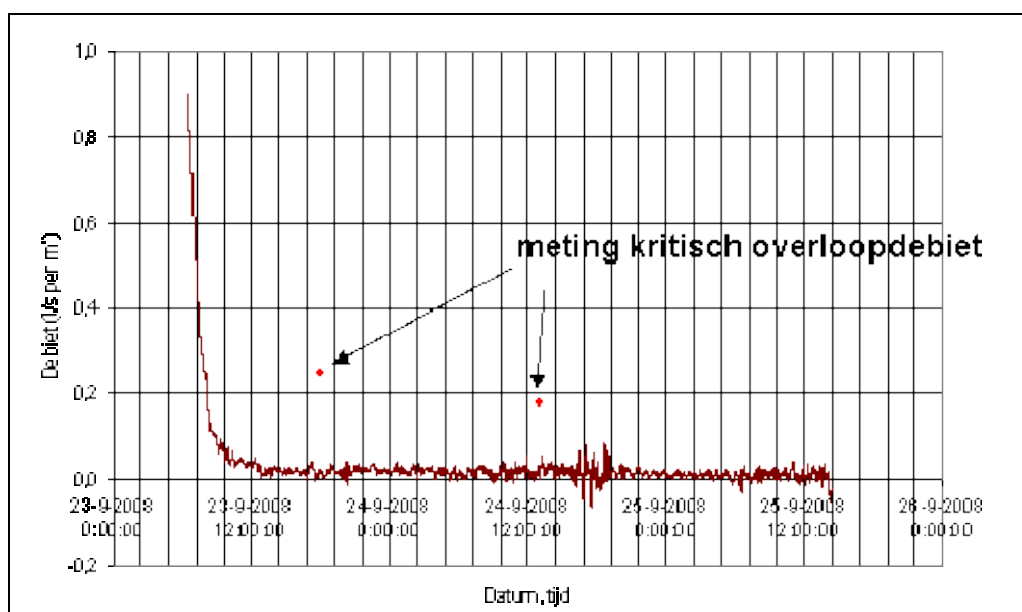
is aan de meting van de PR meter in dat deelstuk (Figuur 5.17). Het iets sneller stijgende freatisch vlak aan de zijrand van het proefvak (PR4) is hierbij buiten beschouwing gelaten.



Figuur 5.17 Schematisatie ten behoeve van debietenbeschouwing afschuifproef

De berekende toename van het freatisch watervolume in de zandkern gedurende de proef per strekkende meter dijk, en het hieruit berekende debiet staan in Figuur 5.18. Tevens zijn twee punten opgenomen van het kritisch overloopdebiet. Tijdens de afschuifproef is ervoor gezorgd dat het talud overal en altijd nat was. Twee keer is het debiet zodanig geknepen dat er geen water meer over de weg liep. Al het water dat over de kruin en het talud werd gepompt werd op dat moment opgenomen door de dijk. Het bijbehorende kritische debiet was 0,25 l/s per m en 0,18 l/s per m (Infram 2008a).





Figuur 5.18 Boven: Berekende toename van het volume freatisch water (m^3/m')
Onder: Berekend debiet dat wordt toegevoegd aan het freatisch water (l/s per m') en twee meetpunten kritisch debiet tijdens proef (Infram 2008a)

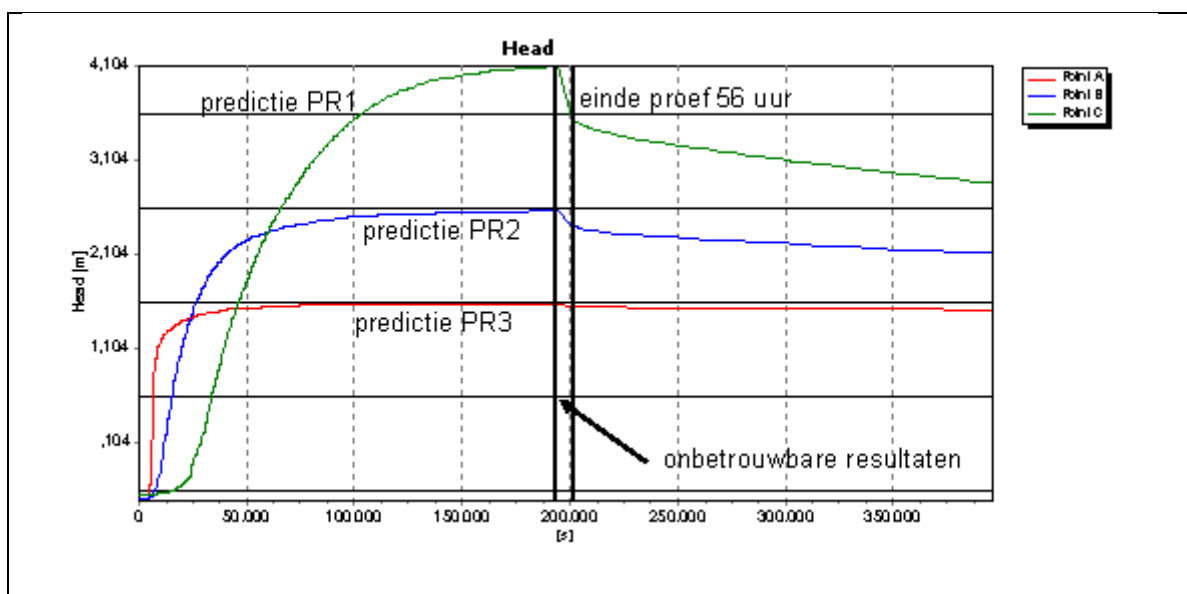
Uit de metingen blijkt dat er water uit het proefvakgebied verdwijnt. De metingen liggen namelijk aanzienlijk hoger dan de schatting van het infiltrerend debiet op basis van de metingen met PR1, PR2 en PR3. Het tijdens de afschuifproef bepaalde kritische overloopdebiet (circa 0,2 l/s per m) is ongeveer een factor 10 hoger dan volgt uit de stijging van het freatisch vlak in de zandkern (0,02 l/s per m).

Een deel van het water zorgt voor een verhoging van de verzadigingsgraad van de kleibekleding, zonder dat dit wordt gemeten als een stijging van het freatisch vlak. Aangezien de kleibekleding relatief dun is en er na enkele uren nauwelijks meer een toename van de waterspanning wordt gemeten (Figuur 5.15) wordt echter niet verwacht dat de kleibekleding water blijft 'opzuigen'.

Een mogelijke verklaring voor het 'verlies' van water is een relatief lage verticale doorlatendheid van de zandkern, ten opzichte van de horizontale doorlatendheid. Hierdoor wordt het freatisch vlak langzaam gevoed, terwijl het water relatief makkelijk zijdelings kan afstromen. Dit is mogelijk door een gelaagdheid in het zand die kan zijn ontstaan tijdens het opspuiten van het zandlichaam. In de Begemannboringen en de profielkuilen die in het kader van de predictie zijn gemaakt is hiervoor geen aanwijzing gevonden. Dit onderzoek was echter beperkt tot een geringe diepte onder de kleibekleding. Een aanwijzing dat er toch sprake kan zijn van een horizontale gelaagdheid is, onder andere, de relatief hoge waterspanning in het zand vlak onder de bekleding (Figuur 5.15). Daarnaast is op een locatie op enkele kilometers van de Boonweg (nabij Zwarte Haan) hoog in de dijk schijnwaterspiegel waargenomen, waartegen destijds maatregelen zijn genomen in de vorm van een drainage. Voor de predictieberekening is echter geen rekening gehouden met een horizontale gelaagdheid van de zandkern.

De predictie van de stijghoogte van PR1, 2 en 3 staat in Figuur 5.19. Vlak voor het einde van de proef is de numerieke oplossing niet geconvergeerd. De onbetrouwbare resultaten zijn verwijderd (gebied rond 200.000 sec). De predictie voor PR4 bestaat uit een schatting voor

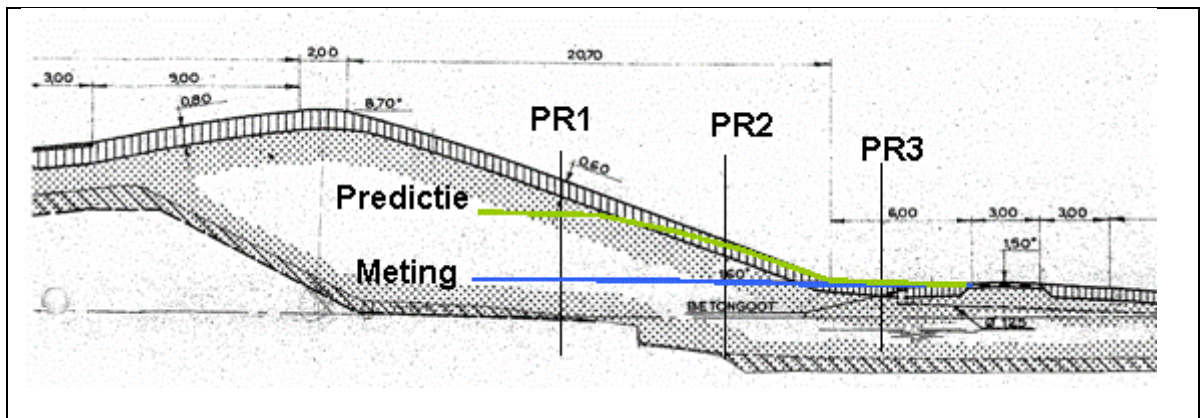
ten opzichte van PR2 en is niet opgenomen in de figuur. Er zijn namelijk geen 3D berekeningen gemaakt naar de grondwaterstroming en de waterspanningen. Er is een schatting van 3D effecten gemaakt door in twee richtingen een 2D berekening te maken, namelijk voor het dwarsprofiel en in de lengterichting van de dijk (Deltares 2008). Hieruit volgt dat voor PR4 (rand van het proefvak) een stijghoogte wordt verwacht die bij aanvang van de proef 15% achterloopt op PR2 (midden van het vak) en aan het einde van de proef nog circa 5%. Het achterlopen van de stijghoogte aan de rand van het vak, maar de relatief snellere stijging naarmate de proef vordert blijkt overigens ook uit de metingen (PR2 en PR4 in Figuur 5.16).



Figuur 5.19 Predictie stijghoogte (m tov NAP) PR1, PR2 en PR3 tijdens en na afloop van de afschuifproef

De berekende stijghoogte ter plaatse van PR3 bereikt na 15.000 s (4:10 uur) circa 90% van de gestabiliseerde waarde (NAP +1,6 m = maaiveldniveau). Tijdens de proef ging dit iets sneller, in circa 2:30, maar het aanvangsniveau van het freatisch vlak was ruim een meter hoger dan in de predictieberekening. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk een opbolling door neerslag en de systeemtest voorafgaand aan de afschuifproef.

De berekende stijghoogte ter plaatse van PR1 en PR2 is veel hoger dan tijdens de proef is gemeten. PR1 bereikt aan het einde van de proef een stijghoogte van NAP +1,75 m, wat iets hoger is dan het binnendijks maaiveldniveau. Volgens de predictieberekening zou de stijghoogte hier tijdens de proef moeten zijn opgelopen tot NAP +4,1 m (tenzij eerder bezwijken van de bekleding zou optreden). Schematisch is het verschil in stijghoogte weergegeven in Figuur 5.20.



Figuur 5.20 Schematische weergave predictieberekening en gemeten stijghoogte ter plaatse van PR1, 2 en 3.

De mogelijke verklaring voor het relatief langzaam toenemen van de stijghoogte ten opzichte van de predictie is de eerder genoemde gelaagdheid in de zandkern van de dijk, waardoor de horizontale doorlatendheid aanzienlijk groter is dan de verticale doorlatendheid. Dit verschil zorgt voor een relatief moeizame verticale infiltratie en een relatief eenvoudig horizontale afstroming van water.

Volgens de predictie, gebaseerd op buisinfiltratieproeven, zou het infiltratiedebiet na aanvang van de proef vrij snel moeten afnemen tot $2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ à $1,9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Voor een taludlengte (inc. stuk berm) van 28 m is dit 0,5 à 0,7 l/s per m'. Dit is ongeveer 3x zoveel als is gemeten (kritische overloopdebiet uit Figuur 5.18). Indien de verticale doorlatendheid van de zandkern een factor 3 is onderschat, mogelijk als gevolg van horizontale laagjes met minder doorlatend materiaal, dan kan dit de meting van het kritisch overloopdebiet verklaren.

De gelaagdheid van de zandkern kan voor een deel het verschil verklaren tussen het gemeten kritische overloopdebiet en de gering toename van de stijghoogte in de kern van de dijk. De zijdelingse afstroming van water kan hierdoor namelijk veel groter zijn dan wordt verwacht bij een gelijke doorlatendheid in verticale en horizontale richting. Het debiet dat zijdelings, in dijkrichting, het proefvak uitstroomt, is ongeveer gelijk aan het verhang ter plaatse van de rand keer de horizontale doorlatendheid keer de zandpakketdikte tot aan de het freatisch vlak (circa 3 m) keer de breedte van het zandpakket (circa 20 m). Het verschil in stijghoogte tussen PR2 en PR4 (rand van het proefvak) is gelijk aan 0,15 m. Volgens de predictie zou dit stijghoogteverschil voornamelijk optreden rondom de buitenste 5 m van het proefvak. Het zijdelings uitstromend debiet, bij een (predictie)-doorlatendheid van $1,9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, wordt hiermee $3,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Omdat dit aan beide kanten van het proefvak optreedt, wordt dit totaal circa $0,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (= 0,07 l/s). Ten opzichte van het kritische overloopdebiet (Figuur 5.18), van 0,2 l/s per m', ofwel 6 l/s in heel het proefvak van 30 m breed, is dit maar 1%. Het is echter wel mogelijk dat de horizontale doorlatendheid (gebaseerd op een verticale buisinfiltratieproef) tot een factor 10 is onderschat. In dat geval wordt het uitstromend debiet een factor 10 hoger. Het is onwaarschijnlijk dat de doorlatendheid veel meer dan een factor 10 is onderschat, zodat het zijdelings afstromen door een gelaagdheid van de zandkern het verschil niet volledig kan verklaren.

Verlies van water in de dwarsrichting van de dijk wordt laag geschat, omdat aan de buitenzijde van de dijk een slecht doorlatende oude dijk kern aanwezig is. De aanwezigheid van deze kern is echter niet met grondonderzoek vastgesteld, maar is gebaseerd op de ontwerptekeningen. De afstroming van water in binnenwaartse richting wordt niet hoog

geschat, omdat het verhang maximaal gelijk is aan het maaiveldverloop van de binnenberm, wat heel gering is.

Er is geen eenduidige sluitende verklaring voor de gering toename van de stijghoogte in de kern van de dijk, op basis van de bekende gegevens over de dijk. Infiltratie naar de zandkern gaat veel langzamer dan werd aangenomen op basis van de buisinfiltratieproeven die in het kader van de predictie zijn uitgevoerd. Het is belangrijk om bij een dijkopbouw zoals bij de Boonweg, een zandkern met een kleibekleding, ook dieper in de dijk te weten of er een gelaagdheid aanwezig is die de verticale infiltratie van water kan hinderen. Een sondering kan een indicatie geven van de gelaagdheid. Beter is het om een boring uit te voeren, zodat met laboratoriumonderzoek (korrelverdelingen/ doorlatendheidsproeven) ook een kwantitatieve inschatting van de verticale en horizontale doorlatendheid kan worden gemaakt.

5.3 Evaluatie afschuiven

Tijdens de afschuifproef zijn geen vervormingen gemeten buiten de ruis die een gevolg is van het meetsysteem. Gezien de geringe waterspanningsopbouw in de kern van de dijk is dit geen verrassing. Volgens de predictie had afschuiven moeten optreden, maar dat zou een gevolg zijn geweest van een veel hogere waterdruk in de kern van de dijk. De predictie is misgegaan bij de infiltratie. Of afschuiven zou zijn opgetreden indien de hogere waterspanning wel was bereikt blijft onbekend.

6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de evaluatie zijn een aantal conclusie te trekken en aanbevelingen voor de volgende proeven te geven.

6.1 Conclusies

6.1.1 Proefopstelling en proefuitvoering

- Proefopstelling en proefuitvoering hebben naar behoren gefunctioneerd.
- Het camerasysteem heeft goed gefunctioneerd, maar de opnames zijn uitsluitend bruikbaar voor uitbreiding van de schade in de tijd.
- Foto's maken van de schade is lastig door de aanwezigheid van meetinstrumenten.
- De simulator is met de hand bediend. Nadeel daarvan is dat afwijkingen in tijd optreden gedurende de tijd dat deze is geopend.

6.1.2 Hydraulische belastingen

- De laagdiktemeters (opnemers met twee sensoren per opnemer voor het registreren van laagdikten en frontsnelheden) hebben slecht bruikbare registraties opgeleverd. Conclusies ten aanzien van laagdikten en frontsnelheden als functie van het overslaande volume zijn daarom niet te trekken.
- De oorzaak van de slechte signalen is onduidelijk. Voorshands is er geen reden te twifelen aan de juistheid van het registreren zelf en de wijze waarop de overslaande volumes werden gerealiseerd via de stuurlijsten. Wel bleek het onmogelijk op eenduidige wijze de relevante meetsignalen van een overslaande golf te koppelen aan het overslaande volume volgens de stuurlijst. Bij een bepaald aantal overslaande golven zijn er verschillen tussen stuurlijsten enerzijds en registraties anderzijds wat betreft de totale tijd en de tijden tussen individuele golven. Het bleek op geen enkele wijze mogelijk hiervoor te corrigeren.
- Wat betreft de laagdiktemeters blijkt het nauwelijks tot niet mogelijk om het signaal van de tweede sensor op de meetportalen te isoleren zodat met de afstand tussen de voorste en achterste opnemer de frontsnelheid kan worden bepaald. De oorzaak hiervan is de sproei van de bevestigingsstaaf van het gehele instrument.
- Metingen met de EMS sensoren komen niet overeen met de berekende snelheden uit de laagdikte metingen. De reden hiervan is niet duidelijk.
- Een prototype surfplank lijkt een goede aanvulling op de laagdiktemeters.
- Hoewel de gemeten signalen voor detailanalyses onbruikbaar zijn, kan wel worden vastgesteld dat:
 - Laagdiktes tot orde 0,30 m voorkomen, en
 - Maximale stroomsnelheden tot zeker 9 m/s mogelijk zijn.
 - Geregistreerde relatieve turbulentie is gemiddeld 0,12 à 0,13 met een absolute waarde van 0,3 m/s (stroomsnelheid 2 à 2,5 m/s), maar dit lijkt veel te laag. Visuele waarnemingen ondersteunen deze bevindingen.

6.1.3 Graserosie

- De waargenomen erosie van gras op het talud volgens het mechanisme met gelijkmatige erosie is conform de verwachtingen zijn geweest. Erosie is vastgesteld bij de teen van het talud (inclusief head-cut erosie) en op het talud bij de hogere overslaggebieden.
- Het lijkt aannemelijk dat een binnentalud van klei met gras bij een overslag van 30 l/s per m of minder nooit door erosie zal bezwijken. Alleen verder onderzoek kan deze conclusie meer definitief maken.

- Bevestigd wordt dat de erosiebestendigheid van het binnentalud vooral wordt bepaald door de combinatie van gras en klei. De variabiliteit van de graszode heeft wel invloed, maar mogelijk minder dan we hadden verwacht. Dit zou kunnen betekenen dat ook de wijze van beheer maar weinig invloed heeft op de sterkte van het binnentalud.
- Er is een nieuw mechanisme waargenomen, namelijk het opbollen van een stuk graszode en het vervolgens in één keer losscheuren van dit stuk zode. Dit is twee keer waargenomen.
- Overgangen talud-horizontaal zijn de belangrijkste aanleiding voor initiële en doorgaande schade. Bij de proeven is dit vaak de overgang van benedentalud naar het horizontale maaiveld (teen van de dijk) of onderhoudsweg geweest. Schade ontstond altijd bij een overslagdebiet van 30 l/s per m of meer. Als de schade helemaal beneden aan de dijk ontstaat moet er veel tijd zijn om een doorbraak te veroorzaken. Andere overgangen van talud naar horizontaal geven hetzelfde beeld.
- Een gat in de kleilaag die de onderliggende zandkern bereikt, veroorzaakt bij een groot overslagdebiet (50 l/s per m of meer) een snelle doorgaande erosie. Dit is niet geconstateerd bij kleinere overslagdebieten om de eenvoudige reden dat bij kleinere overslagdebieten nooit wezenlijke schade aan het binnentalud is opgetreden.
- Berekeningen van de erosie op het talud geven geen tot nauwelijks schade. Dit komt overeen met de waarnemingen voor vlakke taluds. Voor overgangen is geen vergelijking gemaakt vanwege het ontbreken van een predictiemethode voor dit mechanisme. Deze is momenteel nog in ontwikkeling.

6.1.4 Infiltratie en afschuiven

- 0,1 en 1 l/s per m leiden niet tot de ongunstige situatie van een grondwaterstroming parallel aan het talud.
- Er is een groot verschil tussen de waterspanningsopbouw in de bekleding tijdens 10 l/s per m en 30 l/s per m. Boven de 30 l/s per m (50 en 75 l/s per m) neemt de waterspanning in de bekleding slechts een klein beetje toe. Bij eerdere proeven lag het grote verschil tussen de proeven met 1 l/s per m en 10 l/s per m.
- De waterdruk in de bekleding bij 30, 50 of 75 l/s per m neemt nauwelijks meer toe. Alleen de zeer tijdelijke drukpieken als gevolg van de waterlaag op het talud worden nog groter, vanwege de hogere frequentie van grotere overslagvolumes.
- Bij één van de twee teststroken waarbij tensiometers zijn geplaatst werd een waterdruk in de bekleding bereikt die overeen komt of zelfs iets hoger was dan die hoort bij een grondwaterstroming parallel aan het talud. De drainerende werking van de zandkern onder de kleibekleding is niet voldoende om dit te voorkomen. Dit komt niet overeen met de predictieberekeningen en is ook niet in lijn met wat hierover wordt aangenomen in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.
- Er worden in de kleibekleding waterdrukpieken gemeten die worden veroorzaakt door de waterlaag op het talud. De grootste pieken zijn in de orde van 1,5 – 3 kPa, wat ongeveer overeenkomt met 15 à 30 cm waterkolom. Deze drukverhoging op het taludoppervlak dringt op sommige plekken zeer makkelijk (zonder veel demping en zonder veel vertraging) in de bekleding, tot 0,4 à 0,8 m diepte onder het taludoppervlak, terwijl op andere plekken geen pieken worden gemeten. Dit heeft gevolgen voor de drukgradiënt in de richting loodrecht op het talud, wat een aandrijvende kracht is in het erosiemodel.
- Net onder de bekleding zijn in de zandkern waterdrukken gemeten die bijna overeenkomen met de ongunstige situatie van een parallelle grondwaterstroming. Dit kan worden verklaard door een variatie van doorlatendheid in de zandkern, die een gevolg is van verschillen in korrel diameter en pakking.

- Er spelen processen bij golfoverslag die niet worden meegenomen in de modellering van infiltratie. Uit de metingen blijkt soms ineens een vertraagde of juist versnelde respons. Dit kan worden verklaard door een verandering van de doorlatendheid van de bekleding door het wegspoelen van materiaal of juist het dichtslibben van macroporiën. Het zal nagenoeg onmogelijk zijn om dergelijke effecten mee te nemen in een modellering.
- De waterdrukmetingen in en net onder de bekleding bij de golfoverslagproeven tonen een afhankelijkheid van toevalligheden in doorlatendheid rondom het meetpunt. De bovenste en onderste raai en opnemers op verschillende dieptes onder het taludoppervlak geven onverklaarbare verschillen.
- Er zijn gedurende enkele dagen geen metingen uitgevoerd door één van de meters. Dit is een tijd onopgemerkt gebleven.
- De meetfrequentie is gedurende een paar dagen op een lage frequentie gebleven tijdens de proeven, waardoor de metingen niet goed zijn te interpreteren. Het is belangrijk om de procedures rondom metingen mee te nemen in de draaiboeken voor de proef.

6.2 Aanbevelingen

6.2.1 Proefopstelling en proefuitvoering

- Aanbevolen wordt de golfoverslagsimulator te automatiseren.
- Ook is het noodzakelijk groot onderhoud aan de simulator te plegen.
- Aanbevolen wordt om na elke proefsessie een overzichtsfoto van de golfoverslagproefstrook te maken.
- Aanbevolen wordt om het meetsignaal van de tensiometers en peilbuizen (volts) op locatie afleesbaar te maken in waterdruk en stijfhoogte.

6.2.2 Hydraulische belastingen

- Aanbevolen wordt afzonderlijke proeven te doen naar de hydraulische aspecten. Dit maakt het leggen van een koppeling van hydraulische parameters met een optredend overslagvolume eenduidiger, maar is ook efficiënter bij het maken van foto's van opgetreden schades tijdens de proeven.
- Laagdikten en snelheden zijn essentiële grootheden en verdienen meer aandacht. Aanbevolen wordt de "surfplank" verder te ontwikkelen, maar ook te bezien of het mogelijk is het luchtgehalte te meten. Verder wordt aanbevolen de zoektocht voort te zetten naar een geschikter instrument om snelheden te meten. Tenslotte is het zinvol de ophanging van de sensoren van de laagdiktemeters zodanig aan te passen dat de registratie van de tweede sensor niet wordt verstoord door de ophangstaaf.

6.2.3 Graserosie

- Het lijkt er op dat de overgang van een talud naar een horizontaal deel de meest schadegevoelige plek is. Aanbevolen wordt een model op te stellen voor de optredende erosie/ontgroning.
- Het waargenomen nieuwe opbolmechanisme vereist modellering zodat voor de volgende proeven een predictie kan worden opgesteld.

- Bij volgende erosiemetingen de aandacht concentreren op de overgang van een talud naar een horizontaal deel.

6.2.4 Infiltratie en afschuiven

- Het gebruikte predictiemodel voor infiltratie is het Van Genuchten stromingmodel voor onverzadigde grondwaterstroming, zoals opgenomen in het eindige elementenprogramma PlaxFlow. Dit is op dit het meest geavanceerde model dat voorhanden is. Er zijn twee zaken die het echter zeer moeilijk en misschien zelfs onmogelijk maken om een exacte predictie te maken voor de metingen.
 1. De grondwaterstroming in de dijk vindt plaats in een gestructureerde grond, die met bulkparameters wordt beschreven. Hiermee wordt de waterdruk berekend die gemiddeld op een bepaalde diepte onder het taludoppervlak aanwezig is in de grote structuren. Dit is ook de waterdruk die belangrijk is bij het bepalen van de stabiliteit van de bekleding. De meting wordt echter uitgevoerd in een heel klein stukje grond rondom de meetsensor, waardoor de invloed van toevallig aanwezige structuren in de grond bepalend kunnen zijn voor de uitkomst van de meting. Het is enerzijds onmogelijk om een soort gemiddelde druk te meten en het is anderzijds onmogelijk om alle structuren minutieus te modelleren.
 2. Een tweede probleem is dat tijdens de proef processen optreden die niet kunnen worden gemodelleerd. Als gevolg van de golfoverslagproeven lijkt de bekleding plaatselijk te kunnen dichtslibben of juist schoonspoelen. Dit proces is echter afhankelijk van kleine, niet modelleren, variaties in belasting, grond, gras en taludgeometrie.

Door de reeks met metingen echter steeds uit te breiden wordt toch een beeld verkregen van de grondwaterstroming en drukopbouw in een kleibekleding met bodemstructuur bij golfoverslag. Het wordt dan ook aanbevolen om metingen in de kleibekleding te blijven uitvoeren, op verschillende dieptes in de bekleding en op verschillende plekken in de teststrook.

- Tijdens de afschuifproef is er onvoldoende stijging van het freatisch vlak in de kern van de dijk geweest om bezwijken van de bekleding te veroorzaken. Er verdween klaarblijkelijk meer water door zijdelingse afstroming (mogelijk geholpen door een onvoorziene horizontale gelaagdheid van de zandkern) dan door de kleibekleding kon indringen. De opstelling is wat dat betreft niet goed geweest. Bij een volgende proef wordt aanbevolen om dit effect beter te onderzoeken. Enerzijds kan er worden gekeken hoe er meer water in de kern kan worden gekregen (dit verstoort echter het onderzoek ten aanzien van de snelheid van infiltratie) anderzijds kan worden gekeken hoe de zijdelingse afstroming kan worden verminderd. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door het aanbrengen van een scherm, of het verbreden van het proefvak.
- Er is onvoldoende inzicht in de variatie van de doorlatendheid in de kern van de dijk, om een goede verklaring te geven over de geringe toename van het freatisch vlak in de kern van de dijk. Zowel ten opzichte van de predictieberekening als ten opzichte van de meting van het kritisch overloopdebiet blijft de stijging van het freatisch vlak achter. Bij dijken met een opgespoten zandkern wordt voor een goede predictie aanbevolen om ook dieper in de dijk, niet alleen de eerste meter onder de bekleding, beschikking te hebben over een grondboring waarop laboratoriumonderzoek kan worden uitgevoerd (korrelverdeling en doorlatendheidsproeven).
- De kleibekleding is niet altijd minder doorlatend dan de zandkern, zoals opgenomen in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. De kleibekleding kan een doorlatendheid hebben die van gelijke orde is als de zandkern, zoals in het geval van de

Boonweg. Het is ook niet denkbeeldig dat de bekleding zelfs minder doorlatend is dan de zandkern. Dit heeft gevolgen voor de waterspanningsopbouw in de bekleding en in de zandkern en heeft daardoor ook gevolgen voor de stabiliteit van de bekleding. Aanbevolen wordt om dit aspect bij volgende proeven nader te onderzoeken en in het kader van het maken van het Technisch Rapport (Fase 8) deze problematiek verder uit te werken.

- Tijdens de proef moet alert worden gereageerd op het niet functioneren van waterspanningsmeters. Er zijn metingen verloren gegaan. Aanbevolen wordt om de controle van de werking van de meters op te nemen in het draaiboek van de proefuitvoering.

Referenties

TAW 2001 Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, TAW juni 2001

Deltares 2008. SBW Golfverslag en sterkte grasbekleding, Fase 2B Predictie Boonweg, CO-423891.57 definitief, december 2008

Infram, 2008. Factual Report. Golfverslagproeven Boonweg. Rapport 08i011 van 08-09-2008.

Infram, 2008a. Factual Report. Afschuifproef Friese Waddenzeedijk nabij de Boonweg, Rapport 08i037, december 2008.

A Opbolmechanisme Memo Van der Meer Consulting



MEMO

Aan: SBW-projectgroep
Van: Jentsje van der Meer
Onderwerp: Opbolmechanisme Boonweg
Kenmerk: vdm09313.121208.1
Datum: 12 december 2008

Bijlage(n):
Status:

Op 6 maart 2008 vond de overslagproef op de Boonweg plaats met een overslagdebit van 75 l/s per m. In de laatste twee uur van de proef ontstond het opbolmechanisme tweemaal. Van begin van schade tot het stoppen van de proef vanwege bezwijken binnentalud, duurde precies 1 uur. Ik heb meer dan 200 foto's van dit gebeuren gemaakt. De foto's geven ook het tijdstip van opname, waardoor de gebeurtenissen in de tijd zijn te plaatsen. Onderstaand in chronologische volgorde wat er gebeurde, met een korte omschrijving, tijdstip van de foto en nummer van de foto. Alle foto's op groot formaat zijn voor Deltares op 2 cd's gezet (1 GB) en van de foto's in de lijst zijn kleinere bestanden gemaakt welke per mail (zip-file) zijn verstuurd. Als het zinnig is, kan ik ook een documentje maken met onder genoemde foto's.

Omschrijving	Tijdstip foto	Fotonummer(s)
Eerste tekenen van een bol	13:02	1970
Bol iets groter in oppervlak	13:05	1982
Duidelijke spleet zichtbaar waar water in kan komen	13:09	1993
Opening aan bovenkant, breder oppervlak bol	13:12	2002
Bol komt op twee plekken meer omhoog	13:16	2008
Bol komt meer omhoog	13:18	2015
Duidelijke opbolling	13:22	2029
Grote golf slaat de bol weg en onmiddellijke vorming tweede bol	13:23	2025/2037/2038
Is de "plak" al gescheurd?	13:24	2045
Bol wordt groter en ontstaat duidelijk beneden de eerste	13:25	2047
Lekkende bol	13:25	2051
Grote bol	13:25	2052
Wegslaan van de tweede bol	13:25	2053/2054/2055
Kleibekleding bloot	13:27	2060
Wegslaan andere stukken, vergroting kaal kleioppervlak	13:28	2066/2067
Nog vlak kleioppervlak, geen klif	13:36	2111
Wel een klifje	13:37	2112
Uitbreiding klif	13:38	2120/2126
Kliferosie, head cut erosie gestart, zandkern niet bereikt	13:48	2138
Verdieping gat, bijna op zand	13:50	2145
Nu wel op het zand	13:55	2151/2154
Gat over volle breedte open kleilaag	13:56	2158/2160
Uitbreiding in breedte en diepte	13:57	2165
Verdere uitbreiding	14:00	2169
Verdere uitbreiding	14:03	2174
Proef gestopt	14:05	2176/2178
Doorgaande head cut (instabiel klif), zonder water	14:11	2179/2180
Instabiel klif	14:12	2182
Instabiel klif	14:14	2185
Gat van boven gezien	14:16	2190
Wortels in het bovenste deel van de kale klei		2189
Uitgeslagen plagen		2196/2198

SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding
Fase 2D Evaluatie Boonweg - Bijlage Opbolmechanisme foto's



Eerste tekenen van een bol 13:02 1970

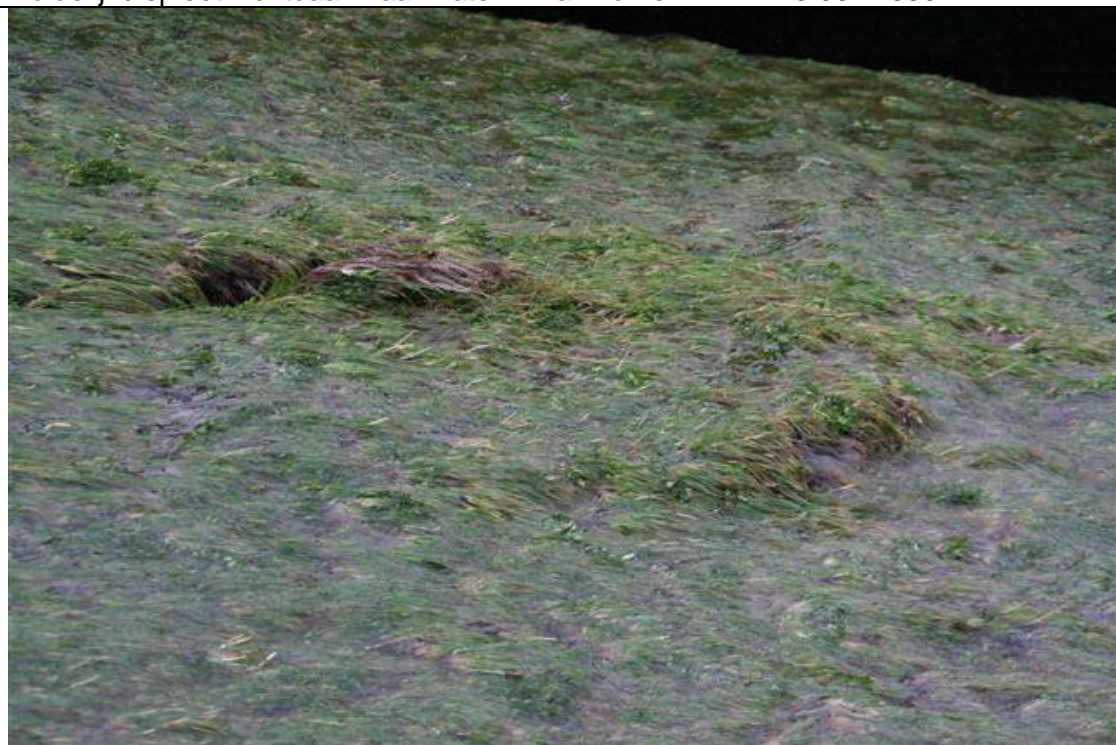


Bol iets groter in oppervlak 13:05 1982



Duidelijke spleet zichtbaar waar water in kan komen

13:09 1993



Opening aan bovenkant, breder oppervlak bol

13:12 2002



Bol komt op twee plekken meer omhoog 13:16 2008



Bol komt meer omhoog 13:18 2015



Duidelijke opbolling 13:22 2029



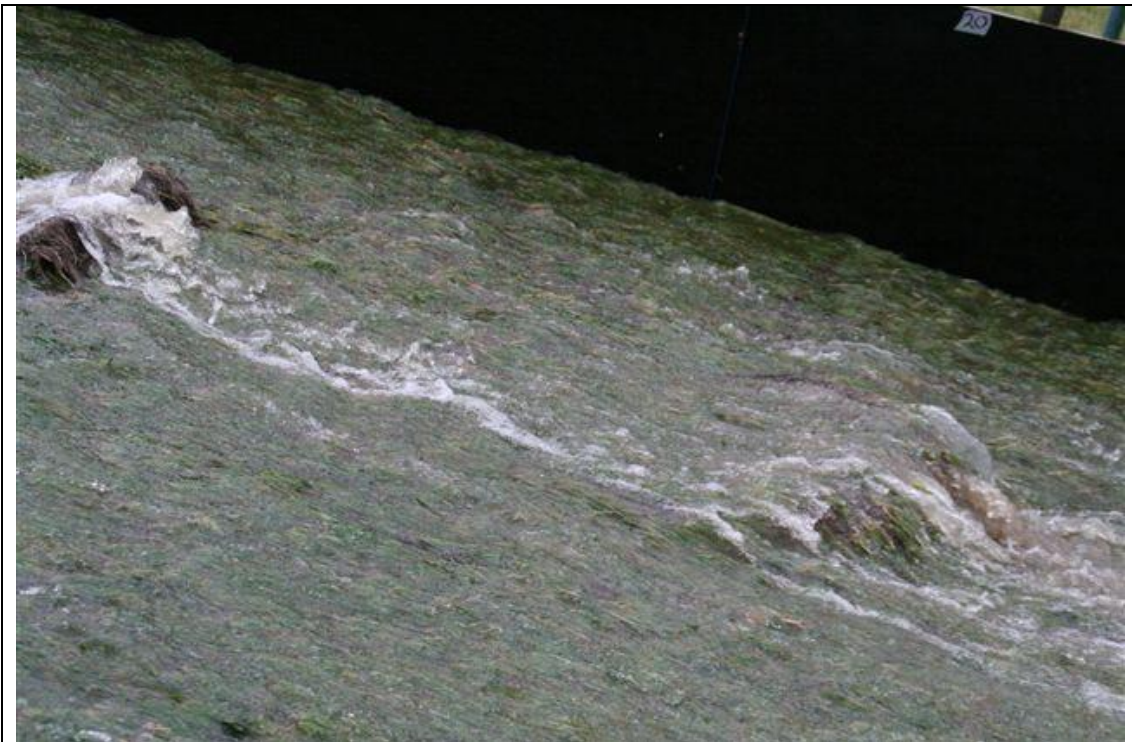
Grote golf slaat de bol weg en onmiddellijke vorming tweede bol 13:23



Grote golf slaat de bol weg en onmiddellijke vorming tweede bol 13:23



Is de "plak" al gescheurd? 13:24 2045



Bol wordt groter en ontstaat duidelijk beneden de eerste 13:25 2047



Lekkende bol 13:25 2051



Grote bol 13:25 2052



Wegslaan van de tweede bol 13:25



Wegslaan van de tweede bol 13:25



Wegslaan van de tweede bol 13:25



Kleibekleding bloot 13:27 2060



Wegslaan andere stukken, vergroting kaal kleioppervlak 13:28 2066/2067



Wegslaan andere stukken, vergroting kaal kleioppervlak 13:28 2066/2067



Nog vlak kleioppervlak, geen klif 13:36 2111



Wel een klifje 13:37 2112



Uitbreiding klif 13:38 2120/2126



Uitbreiding klif 13:38 2120/2126



Kliferosie, head cut erosie gestart, zandkern niet bereikt 13:48 2138



Verdieping gat, bijna op zand 13:50 2145



Nu wel op het zand 13:55 2151/2154



Nu wel op het zand 13:55 2151/2154



Gat over volle breedte open kleilaag 13:56 2158/2160



Gat over volle breedte open kleilaag 13:56 2158/2160



Uitbreiding in breedte en diepte 13:57 2165



Verdere uitbreiding 14:00 2169



Verdere uitbreiding 14:00 2174



Proef gestopt 14:05 2176/2178



Proef gestopt 14:05 2176/2178



Doorgaande head cut (instabiel klif), zonder water 14:11 2179/2180



Doorgaande head cut (instabiel klif), zonder water 14:11 2179/2180



Instabiel klif 14:12 2182



Instabiel klif 14:14 2185



Gat van boven gezien 14:16 2190



Wortels in het bovenste deel van de kale klei

2189



Uitgeslagen plaggen

2196/2198



Uitgeslagen plaggen

2196/2198