

# Factual Report

---

Golfoverslagproeven Zeeuwse zeedijken

**OPDRACHTGEVER:** Projectbureau Zeeweringen

08-09-2008

---



# Factual Report

---

Golfoverslagproeven Zeeuwse zeedijken

**OPDRACHTGEVER:** Projectbureau Zeeweringen

**PROJECTNUMMER:** 08i011

**VERSIE:** Definitief

08-09-2008



**INFRAM B.V.**

**Postbus 16**

**8316 ZG MARKNESSE**

**Tel.: 0527 – 24 11 20**

**Fax: 0527 – 24 11 19**

**[www.infram.nl](http://www.infram.nl)**

---



---

## Projectgegevens

<b>Titel:</b>	Factual Report
<b>Versie:</b>	Definitief
<b>Opdrachtgever:</b>	Projectbureau Zeeweringen
<b>Projectnummer:</b>	08i011
<b>Partners:</b>	Deltares, Van der Meer Consulting, Royal Haskoning, Alterra
<b>Omschrijving project:</b>	Het doel van dit onderzoek is het, met behulp van een golfoverslagsimulator, testen van de erosiebestendigheid van de aanwezige grasbekleding van het binnentalud op een tweetal locaties in Zeeland: St. Philipsland en Kattendijke (Zuid-Beveland). Om inzicht te krijgen in de sterkte van harde bekledingsmaterialen (Elastocoast® en open steenasfalt) bij extreme golfoverslag zijn op de locatie bij Kattendijke tevens twee overslagproeven gedaan op het binnentalud van de zeedijk waarop beide materialen zijn aangebracht. Tevens is de invloed van een initiële beschadiging, als gevolg van sneden met een mestinjecteur, beproefd. Alle overslagproeven zijn in de periode medio maart – april 2008 uitgevoerd.
<b>Uitgevoerd door:</b>	ing. J.J. Bakker ir. R.J.C. Mom ir. G.J. Steendam





# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1 Doel	3
1.2 Leeswijzer	3
<b>2 Golfverslagproeven</b>	<b>5</b>
2.1 Locatie	5
2.2 Proefstroken	6
2.3 Proefopstelling	8
2.4 Proeven	10
2.5 Uitvoering	11
<b>3 De golfverslagsimulator</b>	<b>13</b>
3.1 Inleiding	13
3.2 Hydraulische belasting bij golfverslag	13
3.3 Ontwerp van de simulator	20
3.4 Aanpassing van de simulator	22
3.5 Bediening van de simulator	23
<b>4 Gras- en grondonderzoek</b>	<b>27</b>
4.1 Grasonderzoek	27
4.2 Grondonderzoek	27
<b>5 Metingen</b>	<b>29</b>
<b>6 Erosieontwikkeling</b>	<b>31</b>
6.1 Inleiding	31
6.2 Video	31
6.3 Foto's	31
6.4 Beschrijving T0-situatie teststrook	32
6.5 Erosievormen	32
<b>7 St. Philipsland: erosiebestendigheid grasbekleding</b>	<b>35</b>
7.1 Inleiding	35
7.2 Nulopname	35
7.3 Uitvoering	35
7.4 Resultaten	36
<b>8 Kattendijke, sectie 1: erosiebestendigheid grasbekleding</b>	<b>43</b>
8.1 Inleiding	43
8.2 Nulopname	43

8.3	Uitvoering	43
8.4	Resultaten	43
<b>9</b>	<b>Kattendijke, sectie 2: invloed initiële schade aan teen en kruin</b>	<b>47</b>
9.1	Inleiding	47
9.2	Nulopname	47
9.3	Uitvoering	47
9.4	Resultaten	47
<b>10</b>	<b>Kattendijk, sectie 3 en 4: overslagbestendigheid harde bekledingen</b>	<b>51</b>
10.1	Inleiding	51
10.2	Resultaten	51
<b>11</b>	<b>Observaties en voorlopige conclusies</b>	<b>53</b>
11.1	Observaties en voorlopige conclusies gebaseerd op proeven Zeeuwse dijken	53
11.2	Observaties en voorlopige conclusies, gebaseerd op alle overslagproeven	54

## BIJLAGEN

- A. Tekeningen**
- B. Nulmetingen**
  - B.1 Proefstrook St. Philipsland
  - B.2 Proefstrook 1 Kattendijke
  - B.3 Proefstrook 2 Kattendijke
- C. Samenvatting proeven**
- D. Overzicht metingen**
- E. Voorlopige conclusies golfverslagproeven**
- F. Fotoreportage**
- G. Rapportage Alterra (Grasonderzoek)**
- H. Rapportage Deltares (Grondonderzoek en monitoring)**



## Samenvatting

Om de erosiebestendigheid van de lokaal aanwezige bekleding van het binnentalud van de zeedijk te testen, zijn, in opdracht van Projectbureau Zeeweringen, in de periode medio maart/april 2008 golfoverslagproeven uitgevoerd op een tweetal locaties in Zeeland: St. Philipsland en Kattendijke (Zuid-Beveland). Deze golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met behulp van een golfoverslagsimulator.

Om inzicht te krijgen in de sterkte van harde bekledingsmaterialen bij golfoverslag is op een tweetal proefstroken van het binnentalud van de zeedijk op de locatie op Zuid-Beveland een tweetal harde bekledingen (Elastocoast® en open steenasfalt (osa)) aangebracht. Tevens is de invloed van een initiële beschadiging van de kruin en teen van de dijk, als gevolg van sneden met een mestinjecteur, beproefd. Voor de invloed van palen op het binnentalud tijdens golfoverslag is een oriëntatieproef met twee palen uitgevoerd.

De beproefde zeedijken hebben beiden een kern van zand waarop een kleilaag is aangebracht. In St. Philipsland is deze kleilaag circa 0,4 m dik. Op Zuid-Beveland is de kleilaag dikker: 0,75 m. Het binnentalud van de dijk op St. Philipsland is steiler dan in Kattendijke (respectievelijk 1:2,4 en 1:3).

Volgens de huidige rekenregels hangt de erosiebestendigheid van een grasmatbekleding ondermeer af van de conditie van de grasmat en de doorworteling van de zode. Om die reden is de graszode uitvoerig getest door Alterra. In februari en maart 2008 is van een aantal monsters en volgens het VTV2006 door Alterra de doorworteling van de op het binnentalud aanwezige grasbekleding bepaald. Op basis van de doorworteling scoort de zodekwaliteit van de dijkvakken op St. Philipsland en Zuid-Beveland "goed". Tevens is er een vegetatieopname gedaan en zijn zodeparameters bepaald.

Naast het onderzoek door Alterra heeft Deltares een grondonderzoek uitgevoerd. Op basis van de uitkomsten van het laboratoriumonderzoek bleken de monster volgens de regels van het TR Klei voor dijken weinig erosiebestendig (c3). Naast de erosiebestendigheid is ook de kleilaagdikte onderzocht. Deze bleek op St. Philipsland gemiddeld dikker te zijn dan op de zeedijk in Kattendijke (respectievelijk 0,6 en 0,5 m). Gedurende de proeven is de infiltratie van het overslagwater in het dijkslichaam en het verloop van het freatisch vlak gemeten. Daarnaast is door Deltares de laagdikte van de overslaande golven geregistreerd en is de (front)snelheid bepaald.

Ten behoeve van de erosieontwikkeling van het talud is vóór, tijdens als na de proeven de toestand van de grasmat met behulp van foto's en filmcamera's vastgelegd.

### Constateringen/observaties

Enkel op St. Philipsland heeft als gevolg van golfoverslag schade op het binnentalud plaatsgevonden. Deze schade trad op tijdens de proef met 50 l/s per m. Bij de kleinere overslagdebieten leidde de overslag op beide beproefde zeedijken niet tot schade.

Op Zuid-Beveland is voornamelijk (grote) schade ontstaan ter plaatse van de onderhoudsweg. Als gevolg van terugschrijdende erosie (head cut erosie) is op het eerste proefvak het talud uiteindelijk ook aangetast. Zodra de zandkern bloot kwam te liggen, ontstond er door het uitspoelen van het zand grote schade. Het talud brokkelde langzaam maar zeker af, waardoor het ontstane gat naar boven toe groter werd. Overgangen (van talud naar horizontaal) bleken een bron voor initiële schade te vormen

De proeven bij Kattendijke laten zien dat, ondanks de aanwezigheid van molshopen en -gaten, de grasmat uiteindelijk niet bezweek bij grote overslagdebieten.

De sneden met de mestinjecteur in de teen van de dijk hebben lichte schade ten gevolg gehad. De ter plaatse van de teen ontstane schade is begonnen bij de eerste injectorsnede. De ontstane schade heeft echter niet geleid tot verder schade. Los van de messneden is een groot gat ontstaan aan de teen van de dijk en had de initiële schade als gevolg van het eruit slaan van een oppervlakkig in het binnentalud geslagen paal tot meer schade kunnen leiden.

Zowel Elastocoast® als open steenasfalt blijken, mits goed aangebracht, zeer overslagbestendig: een overslagdebiet van 125 l/s per m heeft geen enkele vorm van schade opgeleverd bij beide harde dijkbekledingen.

#### Voorlopige conclusies

Naast de proeven in Zeeland zijn ook proeven uitgevoerd in Groningen en Friesland. Bij een aantal proeven zijn de binnentaluds bij zware golfoverslag bezweken. Analyse van de resultaten zal bij de evaluatie van deze proeven plaatsvinden. De uiteindelijke conclusies komen in 2011 in de nieuwe VTV terecht.

Binnen het project WV21 zijn op verzoek van Rijkswaterstaat Waterdienst door Van der Meer Consulting in samenwerking met de projectgroep "Golfoverslag en sterkte grasbekledingen", de eerste voorlopige conclusies uit de uitgevoerde overslagproeven tot nog toe opgesteld voor het onderdeel "doorbraakvrije dijken". Deze conclusies zijn als bijlage bij dit factual report opgenomen.

# 1 Inleiding

## 1.1 Doel

De doelloelstelling van dit onderzoek is het testen van de erosiebestendigheid van de lokaal aanwezige bekleding van het binnentalud

Om het doel te bereiken zijn in de periode medio maart – april 2008 golfoverslagproeven uitgevoerd op een tweetal locaties in Zeeland: St. Philipsland en Kattendijke (Zuid-Beveland). Deze golfoverslagproeven zijn uitgevoerd met behulp van een golfoverslagsimulator.

Om inzicht te krijgen in de sterkte van harde bekledingsmaterialen bij golfoverslag is op een tweetal proefstroken van het binnentalud van de zeedijk op de locatie op Zuid-Beveland een tweetal harde bekledingen (Elastocoast® en open steenasfalt (osa)) aangebracht.

Tevens is de invloed van een initiële beschadiging van de kruin en teen van de dijk, als gevolg van sneden met een mestinjecteur, beproefd. Voor de invloed van palen op het binnentalud tijdens golfoverslag is een oriëntatieproef met twee palen uitgevoerd

Dit rapport beschrijft de uitvoering en de eerste resultaten, met name observaties, van deze proeven met deze golfoverslagsimulator. Een verdergaande evaluatie en modellering van schademechanismen zal in het kader van het project Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) worden opgepakt.

## 1.2 Leeswijzer

Na de een korte inleiding in hoofdstuk 1 volgt een beschrijving van de golfoverslagproeven in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de golfoverslagsimulator. Een korte samenvatting van de gras- en bodemonderzoek(en) wordt gegeven in hoofdstuk 4, waarna in hoofdstuk 5 de metingen beschreven worden. Alvorens de resultaten van de proeven te bespreken in de hoofdstukken 7 t/m 10 wordt in hoofdstuk 6 kort ingegaan op de wijze waarop erosieontwikkeling van de bekleding is waargenomen. De observaties van de proeven op de grasbekleding op St. Philipsland en Zuid-Beveland worden beschreven in respectievelijk hoofdstukken 7 en 8. De invloed van initiële schade is beschreven in hoofdstuk 9. De resultaten van de proeven op de harde dijkbekleding Elastocoast® en open steenasfalt worden gezamenlijk beschreven in hoofdstuk 10. Hoofdstuk 11 geeft de conclusies van de proeven op de Zeeuwse dijken weer.



## 2 Golfoverslagproeven

### 2.1 Locatie

De proeven zijn uitgevoerd op een tweetal locaties in Zeeland. De eerste proef is uitgevoerd op een proefvak op de zeedijk nabij St. Philipsland (zie Figuur 2-1). De andere proeven zijn uitgevoerd op een viertal proefvakken op de zeedijk nabij Kattendijke op Zuid-Beveland. De locatie van dit onderzoek is weergegeven in Figuur 2-2.



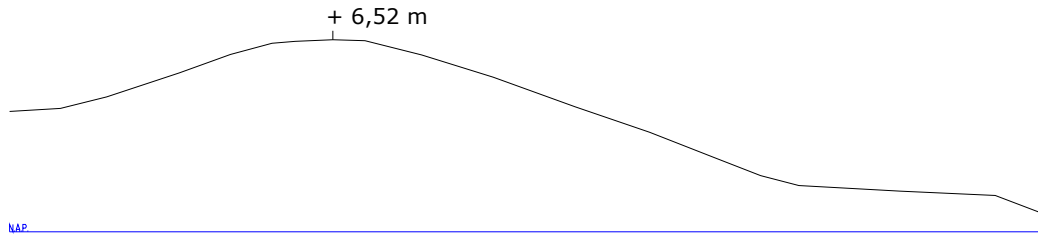
**Figuur 2-1** Overzicht locatie St. Philipsland (bron: Google Earth)



**Figuur 2-2** Overzicht locatie Zuid-Beveland (bron: Google Earth)

De beproefde zeedijken hebben beiden een kern van zand waarop een kleilaag is aangebracht. In St. Philipsland is deze kleilaag circa 0,4 m dik. Op Zuid-Beveland is de kleilaag dikker: 0,75 m. Het binnentalud van de dijk op St. Philipsland is steiler dan in Kattendijke. Op St. Philipsland heeft het talud een helling van 1:2,4 en een lengte van ongeveer 13 m. Op Zuid-Beveland is de

helling 1:3 en de lengte ongeveer 15 m. In Figuur 2-3 is een doorsnede van het dijkprofiel ter plaatse van de eerste proefstrook in Kattendijke weergegeven. In Bijlage A zijn de dijkprofielen ter plaatse van alle proefstroken op Zuid-Beveland weergegeven. Van St. Philipsland zijn geen dijkprofielen aanwezig, omdat deze niet zijn ingemeten.



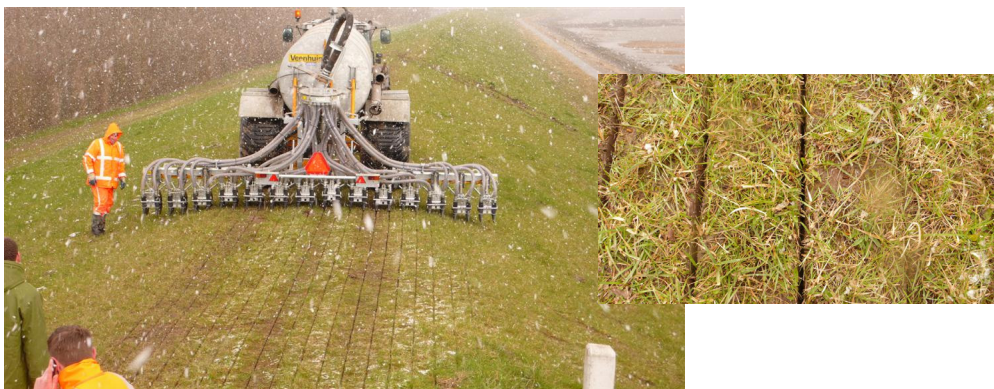
**Figuur 2-3** Dwarsprofiel zeedijk Kattendijke

In Kattendijke ligt onderaan de teen van de dijk een onderhoudsweg bestaande uit mijnsteen op een met zand opgevuld cunet. Het cunet is aan beide zijden begrensd door een dam van erosie bestendige klei. In de teen van de dijk bevindt zich een drainage die bestaat uit een grindkoffer met een geperforeerde drainagebuis.

## 2.2 Proefstroken

In totaal zijn 5 stroken op de Zeeuwse dijken beproefd. Zowel de proefstrook op St. Philipsland als de eerste proefstrook op Zuid-Beveland hebben betrekking op het testen van de erosiebestendigheid van de aanwezige grasbekleding. Op beide stroken is door het Waterschap Zeeuwse eilanden regulier beheer toegepast. Voor St. Philipsland betekent dit nog beweiding nog extra bemesting en 1x hooien. Op Zuid-Beveland wordt het binnentalud van de zeedijk ook niet beweïd. Wel wordt hier ruim 300 kg / ha aan bemesting toegepast en wordt 3 keer per jaar gehooïd.

Op de tweede proefstrook op Zuid-Beveland is de invloed van initiële schade bij mestinjectie op de sterkte van de grasbekleding ter plaatse van de teen en binnenkruin van de dijk beproefd. Hiertoe zijn met een mestinjecteur op de binnenkruin en teen van de dijk sneden van circa 5 cm diep gemaakt (zie Figuur 2-4).



**Figuur 2-4** Het aanbrengen van initiële schade met een mestinjecteur

Tevens is naar het effect van de aanwezigheid van palen op het binnentalud gekeken, door in het begin van de proef op het talud een tweetal houten palen oppervlakkig in de grond te slaan (circa 0,30 m diep).

Ten behoeve van de proeven met de harde bekledingen is op de derde en vierde proefstrook op Zuid-Beveland de graszoden verwijderd (zie Figuur 2-5). Om erosie van de onderliggende kleilaag te voorkomen is, alvorens de Elastocoast® en open steenasfaltbekleding door de aannemer is aangebracht, een geotextiel op de kale klei aangebracht.



**Figuur 2-5** Het verwijderen van de graszoden

Elastocoast® is een mengsel van stenen en polyurethaan (kunststof). Door deze polyurethaan te mengen met granulaat wordt een permanente elastische verbinding met steen aangeaan. Behalve elastisch is het dijkbekledingsmiddel Elastocoast® net als open steenasfalt poreus, waardoor overdruk en daarmee beschadiging van de bekleding klein is. Het vloeibare, uit twee componenten bestaande polyurethaan is op locatie geroerd en gemengd met granulaat, waarna een laag van circa 15 cm dik is aangebracht op het talud (zie Figuur 2-6).

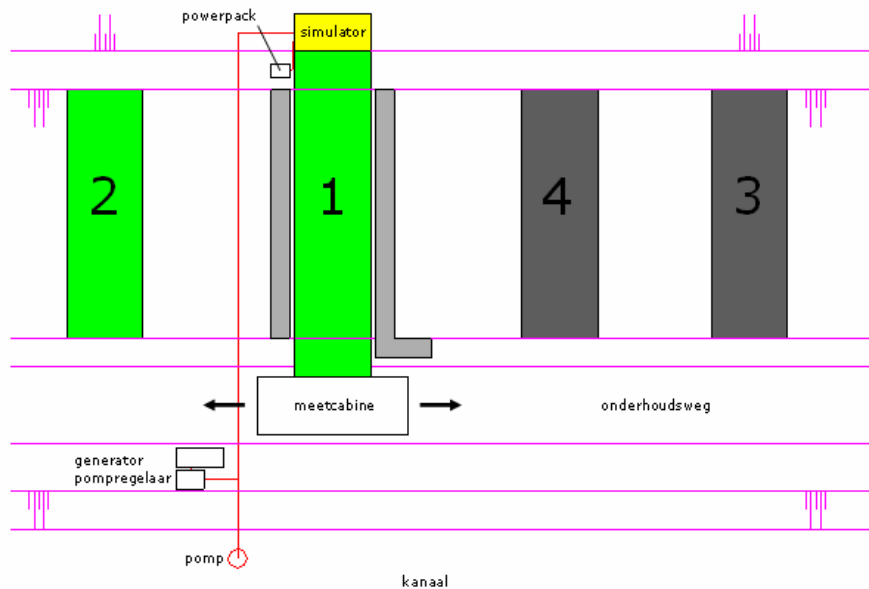


**Figuur 2-6** Elastocoast®

Hoewel nog niet is onderzocht wat de precieze samenstelling van de 16 – 22 mm dikke laag open steenasfalt was, is door de aannemer aangegeven dat de temperatuur van het mengsel bij aanbrengen van de laag op het talud 145°C bedroeg. Het betreft kalksteen met een omhulling van asphaltmastiek (de kalksteen is gebroken natuursteen, zand is natuurzand / ecozand, zwakke vulstof en bitumen 70 tot 100 penetratie (0,1mm)).

## 2.3 Proefopstelling

Figuur 2-7 laat een schematische weergave van de proefopstelling in Kattendijke zien.



**Figuur 2-7** Schematische weergave proefopstelling Kattendijke

De golfoverslagsimulator is op beide locaties met een telescoopkraan op de kruin van de te testen dijksectie geplaatst en aangesloten op het watercirculatiesysteem. Door de meetcabine op een platte wagen op de onderhoudsweg te plaatsen kon het overslagdebiet ongestoord onder de meetcabine door en kon de gehele proef vanuit de meetcabine goed geobserveerd worden.

Aan weerskanten van het 4 meter brede proefvak zijn voor het geleiden van het water schotten bevestigd aan een palenrij. Om randeffecten te voorkomen zijn de geleideschotten aan de binnenzijde van de palenrij bevestigd. Om het talud enigszins toegankelijk te houden is aan de buitenzijde van deze geleideschotten een bordes geplaatst. Omdat het talud van de locatie op St. Philipsland steil was (1:2,5) is hier een trap geplaatst.

Figuur 2-8 geeft een impressie van de proefopstelling op St. Philipsland.



**Figuur 2-8** Impressie proefopstelling St. Philipsland



Het watercirculatiesysteem pompt water via leidingen naar de simulator. In St. Philipsland is het waterpeil in de achterliggende sloot opgezet, aangezien er onvoldoende waterdiepte voor de pomp aanwezig was. Hiertoe is de sloot over een lengte van ca. 200 m afgedamd en is water vanuit een naburige watergang in de sloot gepompt. Om dit proces te versnellen is tevens water aangevoerd met giertanks. Op Zuid-Beveland was dit probleem niet aan de orde aangezien de ter plaatse aanwezige watergang voldoende diep en breed was.

Ter bescherming van het talud van de sloot en het achterliggende akkerland zijn op St. Philipsland draglineschotten geplaatst (zie Figuur 2-9).



**Figuur 2-9** Draglineschotten ter bescherming van het talud (St. Philipsland)

De centrifugaalpomp pompt water uit de sloot / het kanaal via een persleiding naar de simulator. De benodigde minimum- en maximumcapaciteit van het circulatiesysteem is gerelateerd aan het proevenschema met de golfoverslagsimulator. Voor de proeven waren de volgende capaciteiten noodzakelijk:

- T1 0,1 l/s per m (1,44 m<sup>3</sup>/uur); (NB: Teststrookbreedte 4 m : 0,1x4x3600 = 1440 l/uur)
- T2 1 l/s per m (14,4 m<sup>3</sup>/uur);
- T3 10 l/s per m (144 m<sup>3</sup>/uur);
- T4 30 l/s per m (288 m<sup>3</sup>/uur);
- T5 50 l/s per m (720 m<sup>3</sup>/uur); en
- T6 75 l/s per m (1080 m<sup>3</sup>/uur)

De capaciteit van de door Buitenkamp geleverde regelbare pomp was reeds getest gedurende de proeven op de Friese Waddenzeedijk (februari – medio maart). De capaciteit van een enkele pomp bleek ook op beide locaties in Zeeland toereikend om een overslagdebiet van 75 l/s per m te verkrijgen bij de gewenste opvoerhoogte. Het kleinste debiet dat feitelijk is toegepast is 144 m<sup>3</sup>/uur, omdat vanwege het geringe aantal overslaande golven bij T0 en T1 de proeven respectievelijk 100 en 10 keer versneld zijn uitgevoerd. In vergelijking tot de proeven op de Friese Waddenzeedijk zijn beide proeven respectievelijk 10 en 2 keer sneller uitgevoerd. Dit omdat bij proeven met deze overslagdebieten was gebleken dat er geen erosie optrad.

Voor het testen van de sterkte van de harde bekledingen is het maximale debiet opgevoerd naar 125 l/s per m (1800 m<sup>3</sup>/uur). Hiertoe zijn op Zuid-Beveland twee extra dieselpompen ingezet welke de extra benodigde capaciteit konden leveren.

Het pompdebiet wordt niet gemeten met een debietmeter, maar aan de hand van de snelheid van vullen van de simulator (peilschaal en chronometer). Tijdens de proeven is veelvuldig het ingestelde debiet aan de hand van de peilschaal, die langs de simulator is aangebracht, gecontroleerd en eventueel bijgesteld om de afwijkingen van het debiet tijdens de proef (als gevolg van bijvoorbeeld lekkage) te minimaliseren.

## 2.4 Proeven

De proeven zijn primair gericht op de bepaling van de erosiebestendigheid van de op de kruin en het binnentalud aanwezige bekleding en de daaronder gelegen kleilaag bij golfoverslag

Op elk van de 5 proefstroken is in 6 proeven het overslagresultaat van een globale schatting van de hydraulische randvoorwaarden van deze dijksecties gesimuleerd (zie ook §3.2.2). Dat wil zeggen de bij de duur van die storm (6 uur) behorende golfoverslag over de kruin en binnentalud. De proeven zijn uitgevoerd met een toenemend gemiddeld golfoverslagdebiet (l/s per m). Daarbij vormt de eerste het ontwerpcriterium van de kruinhoogte en wordt met de daarna komende proeven een steeds hogere waterstand, en daarmee een kleinere vrijboordhoogte, gesimuleerd met bijbehorend groter overslagdebiet.

- T1 6 uur storm bij een overslagdebiet van 0,1 l/s per m;
- T2 6 uur storm bij een overslagdebiet van 1 l/s per m;
- T3 6 uur storm bij een overslagdebiet van 10 l/s per m;
- T4 6 uur storm bij een overslagdebiet van 30 l/s per m;
- T5 6 uur storm bij een overslagdebiet van 50 l/s per m;
- T6 6 uur storm bij een overslagdebiet van 75 l/s per m

Het werkelijke aantal proeven dat uitgevoerd is, was afhankelijk van de schadeontwikkeling (erosie van de grasbekleding) als gevolg van golfoverslag. In geval van zeer grote schade (erosie tot op de zandkern en / of afschuivingen) is de proef, en daarmee de eventuele rest van de proevenserie, beëindigd en de proefopstelling verplaatst naar de volgende proefstrook.

Gezien het gering aantal overslaande golven bij de proeven met een overslagdebiet van zowel 0,1 als 1 l/s per m, zijn beide proeven respectievelijk 100 en 10 keer versneld uitgevoerd. Bij de andere proeven is overslag gesimuleerd gedurende een totale periode van 6 uur (real-time). Bij deze proeven is over het algemeen elke twee uur de proef onderbroken (dus na 2 en 4 uur) om de erosieontwikkeling visueel en fotografisch vast te leggen. In die gevallen waarin geen significante schade optrad, is in overleg met de dagelijkse leiding veelal besloten de proeven niet te onderbreken.

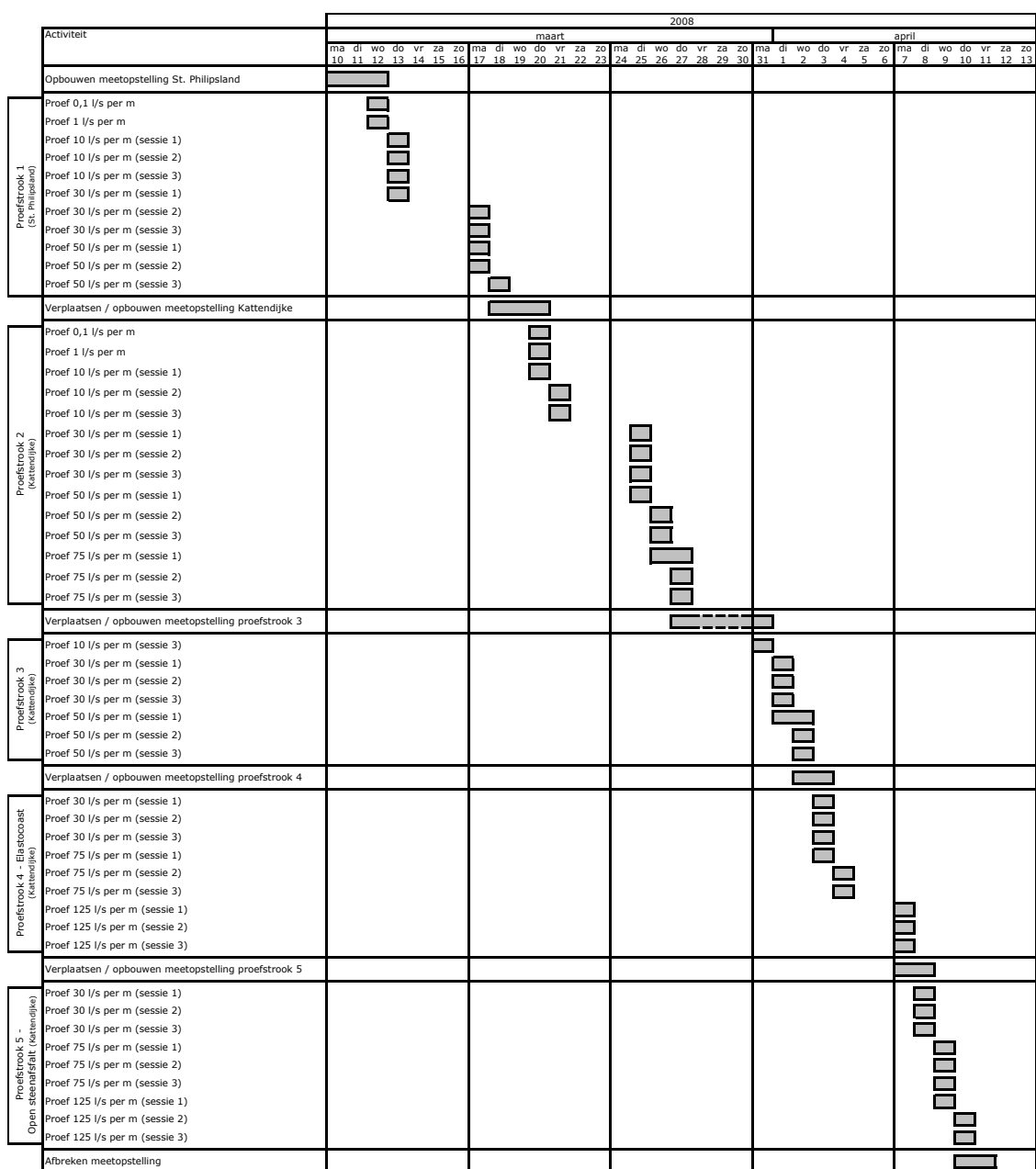
## 2.5 Uitvoering

De proeven zijn uitgevoerd in de periode medio maart – april 2008. In Figuur 2-9 is een tijdschema van de werkelijke uitvoering van de proeven op de Zeeuwse dijken weergegeven. Nadat de proeven op een proefstrook waren uitgevoerd werd de gehele proefopstelling verplaatst naar de volgende proefstrook. In totaal is de simulator vier keer verplaatst. Eén keer na afronding van de proeven op St. Philipsland, en 3 keer op Zuid Beveland naar de volgende proefstrook. Vervolgens is de gehele proefopstelling afgebroken en afgevoerd. Voor het verplaatsen van de proefopstelling is gebruik gemaakt van een telescoopkraan (zie Figuur 2-10).



**Figuur 2-9** Plaatsen simulator met behulp van een telescoopkraan (St. Philipsland)

FACTUAL REPORT – DEFINITIEF - 08-09-2008



Figuur 2-10 Uitvoering overslagproeven St. Philipsland en Kattendijke

## 3 De golfoverslagsimulator

### 3.1 Inleiding

Het idee van de golfoverslagsimulator is in 2006 binnen het Europese onderzoeksprogramma ComCoast opgepakt. Dit heeft geresulteerd in het ontwerp en de bouw van de simulator en het toepassen in een eerste serie proeven op een dijk bij Delfzijl. Met de ervaring in Delfzijl zijn in 2007 verbeteringen aangebracht aan de simulator en vervolgens zijn de proeven uitgevoerd op de Friese Waddenzeedijk (zie Infram rapport 07i107B) en dus de dijken in Zeeland.

De werking van de golfoverslagsimulator is gebaseerd op de kennis die we hebben van het fenomeen golfoverslag. Daarnaast is de proefuitvoering aangepast aan de Nederlandse situatie en dan met name op de situatie met zeedijken (en dus niet met rivierdijken). Dit hoofdstuk is niet uitputtend omtrent het onderwerp golfoverslag, noch omtrent de ontwikkeling en bouw van de golfoverslagsimulator, omdat beide onderwerpen uitgebreid zijn gerapporteerd. Voor golfoverslag is dit het TAW Technisch Rapport Golfploop en golfoverslag bij dijken (2002) en meer recentelijk de Overtopping Manual (2007). Voor de ontwikkeling en bouw van de golfoverslagsimulator is dit het ComCoast rapport Design, construction, calibration and use of the wave overtopping simulator (2007).

Dit hoofdstuk geeft wel een samenvatting van golfoverslag, de Nederlandse situatie bij zeedijken en het principe en ontwerp van de simulator op hoofdlijnen. Tot slot beschrijft het de aanpassingen aan de simulator, die zijn uitgevoerd op basis van de eerste proeven in Delfzijl en de bediening van de simulator.

### 3.2 Hydraulische belasting bij golfoverslag

#### 3.2.1 Overzicht relevante parameters

Golfoverslag wordt veroorzaakt door golven die de dijk bereiken en zo hoog oplopen dat ze over de kruin van de dijk slaan. De relevante hydraulische parameters die uiteindelijk de golfoverslag bepalen, zijn hier de golfcondities en de geometrie van de dijk. Dit zijn golfhoogte, golfperiode en steilheid, stormduur en het buitentalud tot aan de kruin. Uiteindelijk bepaalt dan de vrije kruinhoogte hoeveel golfoverslag zal plaats vinden. Voor een specifieke locatie kunnen deze parameters worden bepaald. Voor meer toegepast onderzoek, zoals het SBW-onderzoek, wordt niet naar een specifieke locatie gekeken, maar naar een "gemiddelde" situatie die representatief wordt geacht. Dus de toetsituaties voor de Boonweg worden *niet* beschouwd, wel de gemiddelde hydraulische condities bij de zeedijk.

Golfoverslag zelf wordt ook weer door een aantal parameters beschreven. De meest bekende is het gemiddeld overslagdebiet: de hoeveelheid water die in een storm over de dijk slaat, gedeeld door de stormduur. Belangrijke waarden in Nederland zijn 0,1; 1 en 10 l/s per m breedte. In werkelijkheid slaan golven onregelmatig over de dijk en elke overslaande golf brengt meer of minder water met zich mee. Belangrijke parameters zijn hier de verdeling van de overslaande volumes water per golf en het verloop van de snelheid en laagdikte tijdens een overslag. Voor de

goede werking van de golfoverslagsimulator moeten deze parameters *op de kruin* bekend zijn en de simulator moet deze zo getrouw mogelijk simuleren. Als ze immers op de kruin goed worden gesimuleerd, dan zorgt de "natuur" er voor dat het op het binnentalud ook goed is.

### 3.2.2 Gemiddelde hydraulische condities bij zeedijken

Bij het vaststellen van hydraulische randvoorwaarden voor de proeven met de golfoverslagsimulator, binnen het SBW (of eerder ComCoast) kader, is het niet van belang de precieze toetsrandvoorwaarden bij de betreffende dijk te kennen. Het Hydraulisch Randvoorwaardenboek geeft toetsrandvoorwaarden af voor alle dijkringgebieden. Een globale schatting van hydraulische randvoorwaarden bij zeedijken is voorlopig genoeg. De achtergrond voor de keuze is onderstaand samengevat.

- Ter plaatse van de Boonweg (dijkring 6, vakken 20-23) wordt een golfhoogte van 1,85 m afgegeven. Er is geen golfperiode bekend. Voor het ontwerp van de nieuwe waterkering in Harlingen zijn ontwerprandvoorwaarden afgeleid op basis van uitgevoerde SWAN-berekeningen. Een golfhoogte van 2,6 m heeft hier een piekperiode van 6,4 s. Dit geeft een golfsteilheid van  $s_{op} = 0,041$ .
- In de Westerschelde worden voor dijkringgebied 30 (Zuid-Beveland) golfhoogtes afgegeven van orde 2-3 m met een periode van 8,4 s. Golfhoogtes tot 2,5 m vallen de dijkvakken vrij loodrecht aan, hogere golfhoogtes komen onder een grote hoek met de dijk in.
- In Zeeuws Vlaanderen worden golfhoogtes rondom 2 m afgegeven, soms tot boven 3 m. De volgende combinaties van golfhoogtes en golfperiodes worden vermeld:
  - $H_s = 1,75 \text{ m}; T = 4,4 \text{ s}$
  - $H_s = 2,4 \text{ m}; T = 5,3 \text{ s}$
  - $H_s = 3,2 \text{ m}; T = 5,9 \text{ s}$

Welke periode bedoeld wordt, is niet gegeven. De golfsteilheden worden achtereenvolgens  $s = 0,058; 0,055$  en  $0,059$ . Deze hoge waarden geven aan dat waarschijnlijk de gemiddelde golfperiode wordt bedoeld, want de gevonden steilheden zijn met een piekperiode fysisch niet mogelijk (te steil).

Globaal kan worden gesteld dat een golfhoogte in de buurt van 2 m vaak als toetsrandvoorwaarde wordt afgegeven. Een golfsteilheid van  $s_{op} = 0,04$  met de piekperiode, komt overeen met de Waddenzee. Als wordt gesteld dat  $T_p = 1,2 T_m$ , waarbij  $T_m$  de gemiddelde periode is, dan wordt met deze gemiddelde periode een golfsteilheid gevonden van  $s_{om} = 0,058$ . Dat komt goed overeen met de golfsteilheid die in de Westerschelde wordt gegeven. Voor een golfhoogte van  $H_s = 2 \text{ m}$  betekent dit een piekperiode van 5,7 s en een gemiddelde periode van 4,7 s.

Dit zijn randvoorwaarden die vrij vaak voorkomen. Maar zowel hogere als lagere randvoorwaarden komen voor. Voor het bepalen van de overslagcondities voor de proeven op zeedijken, is dit echter voldoende. Een stormpiek kan maximaal ruwweg op 6 uur worden aangehouden (vaak korter) en een buitentalud ongeveer op 1:4. Dit alles samengevat levert de volgende uitgangssituatie voor het bepalen van golfoverslag:

$H_s = 2,0$  m;  $T_p = 5,7$  s ( $S_{op} = 0,04$ );  $T_m = 4,7$  s ( $T_p = 1,2 T_m$ )  
maximale stormduur is 6 uur (4600 golven in een totale proef)  
buitentalud van de dijk 1:4

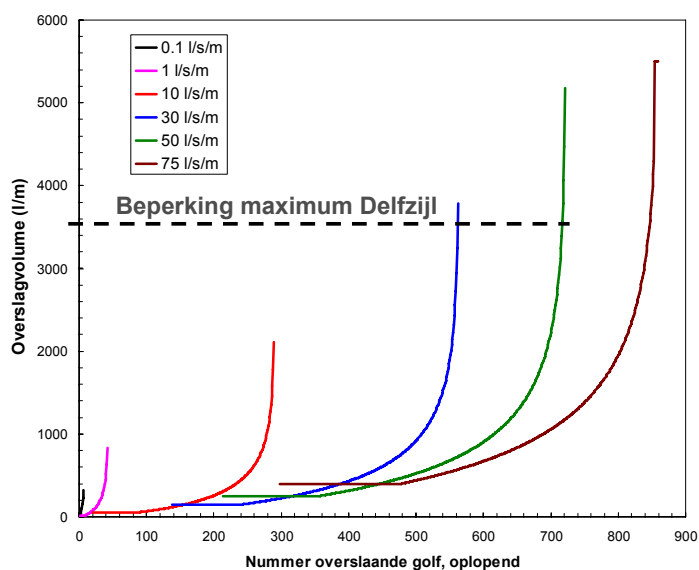
Deze golfcondities zijn gebaseerd op zeedijken. Maar ook bij de grote meren (IJssel- en Markermeer) is dit een redelijke schatting van voorkomende (toets of ontwerp) golfhoogtes. Echter niet voor het rivierengebied, waar de golven vaak veel kleiner zijn. Het rivierengebied wordt bij deze proefopzet dus buiten beschouwing gelaten.

### 3.2.3 Gemiddelde overslagdebieten en overslagverdelingen

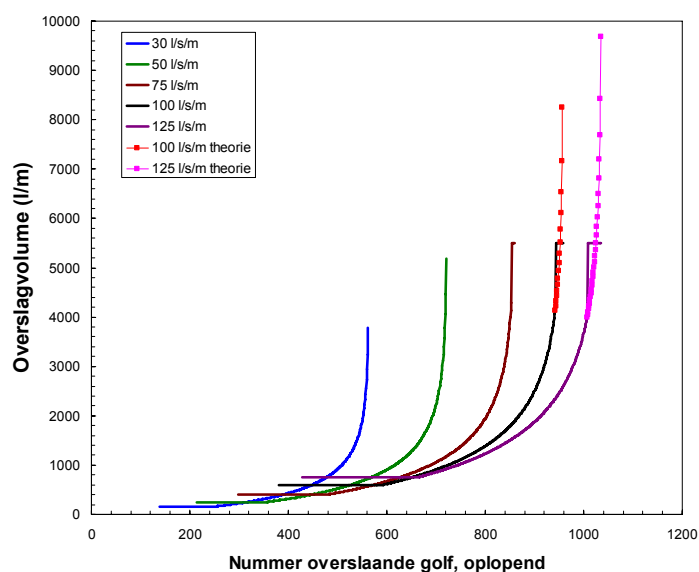
Voor de helling van het buitentalud van de dijk is een verloop van 1:4 aangehouden. Voor de proeven is uitgegaan van een maximale duur van de piek van de storm van 6 uur. Bij de proeven is dit opgedeeld in 3 perioden van 2 uur, om mogelijke schadeontwikkeling in de tijd goed te kunnen volgen. Ten behoeve van verdere berekeningen in deze paragraaf, is een stormduur aangenomen van 2 uur. Met deze waarden en de golfcondities uit de vorige paragraaf, kan de golfoverslag berekend worden voor iedere gegeven vrije kruinhoogte. Bij de berekeningen, en dus ook bij de proeven, wordt dus gespeeld met de vrije kruinhoogte, het verschil tussen kruinhoogte en waterstand. Er wordt niet gekeken of deze waterstand bij de beproefde dijk daadwerkelijk kan optreden, het is een aanname dat de benodigde waterstand optreedt om een gewenst overslagdebiet in de proef te simuleren.

De overslagformules zijn gegeven in het TAW-rapport (2002). Deze worden hier niet behandeld. De golfoverslagdebieten die vaak beschouwd worden bij het ontwerpen of toetsen van dijken zijn 0,1, 1 and 10 l/s per m breedte. Voor ComCoast en het SBW-programma zijn veel grotere overslagdebieten van belang, omdat gebleken is dat schade aan binnentaluds alleen bij veel grotere overslagdebieten plaats vindt. In Zeeland zijn ook overslagbestendige systemen getest en daar is een gemiddeld overslagdebiet van 125 l/s per m opgelegd. De range die beschouwd wordt, loopt dus van 0,1 l/s per m tot en met 125 l/s per m. Het TAW-rapport (2002), samen met het programma PC-Overslag, geeft de mogelijkheid om golfoverslag in al zijn facetten uit te rekenen. Bij gegeven dijk en golfcondities kunnen achtereenvolgend worden berekend: het 2%-golfoploopniveau, het percentage overslaande golven, het gemiddeld overslagdebiet en ook de afzonderlijke volumes water die per golf over de dijk slaan.

Figuren 3-1 en 3-2 geven overslagverdelingen bij verschillende gemiddelde overslagdebieten, die bij de proeven zijn gesimuleerd.



**Figuur 3-1** In de proeven gesimuleerde overslagverdelingen voor gemiddelde overslagdebieten tussen 0,1 en 75 l/s per m



**Figuur 3-2** In de proeven gesimuleerde overslagverdelingen voor gemiddelde overslagdebieten tussen 30 en 125 l/s per m, en theoretische maxima voor de twee grootste debieten

Het uitgangspunt is een proefduur van 2 uur (die driemaal wordt herhaald). In Figuur 3-1 zijn de overslagverdelingen gegeven voor overslagdebieten die lopen van 0,1 l/s per m naar 75 l/s per m. Het laatste debiet van 75 l/s per m is het maximum dat is toegepast op de dijken met een grastalud, in Friesland en Zeeland. Uitgaande van 2 uur simulatie en een gemiddelde golfperiode van 4,7 s, is het aantal "inkomende golven" in totaal ongeveer 1500. In de figuur is het aantal *overslaande* golven uitgezet, dit is dus een percentage van het totaal aantal inkomende golven, omdat niet elke golf over de dijk slaat. Hoe groter het gemiddeld overslagdebiet hoe groter het



aantal overslaande golven. Op de horizontale as is het aantal overslaande golven uitgezet met voor elke golf het overslaand volume in l per m breedte.

Er is een groot verschil in aantal overslaande golven en de grootte van de overslagen. Bij 0,1 l/s per m zijn er maar 3 overslaande golven met een maximum golf die kleiner is dan 400 l per m. Bij 1 l/s per m gaan er ongeveer 40 golven over de dijk met een maximum golf van 800 l per m. Pas bij 10 l/s per m gaan er veel meer golven over dijk, namelijk ongeveer 300 en de grootste golf geeft dan iets meer dan 2 m<sup>3</sup> per m. Bij 75 l/s per m overslagdebiet is het aantal overslaande golven opgelopen tot 850, wat meer dan de helft van het aantal golven is. De grootste overslaande golf is dan ongeveer 5,5 m<sup>3</sup> per m. In Delfzijl was de maximum capaciteit van de overslagsimulator kleiner (3,5 m<sup>3</sup> per m) en zijn de proeven daar toentertijd ook beperkt tot een overslagdebiet van 50 l/s per m.

De gesimuleerde overslagverdelingen beginnen niet allemaal in het nulpunt. Theoretisch loopt de verdeling daar wel naar toe. Bij de proefuitvoering is uitgegaan van een daadwerkelijk gemiddeld overslagdebiet, wat ook constant in de simulator werd gepompt. In werkelijkheid is het mogelijk dat drie grote golven binnen enkele golfperioden over de dijk slaan. Het "gemiddeld" overslagdebiet is in die periode van orde een halve minuut veel groter dan het gemiddelde over bijvoorbeeld 1 of 2 uur. Dit kan moeilijk door de overslagsimulator worden gedaan, omdat juist daar van een over de hele proefperiode durende constant overslagdebiet (lees: pompdebiet) wordt uitgegaan. Er is minimaal ongeveer 5 seconden nodig voordat een volgende golf kan worden gesimuleerd. Het toegepaste overslagdebiet geeft dan ongeveer aan wat de kleinste overslaande golf is, die nog kan worden gesimuleerd. Bij 50 l/s per m is dat in Figuur 3-1 ongeveer 250 l per m (5 s maal 50 l/s per m).

Er werd tijdens de proeven een aantal van deze minimum overslaande golven gesimuleerd, die qua overslaande hoeveelheid in totaliteit gelijk was aan de totale theoretische hoeveelheid. Als voorbeeld: bij 75 l/s per m wordt in Figuur 3-1 aangegeven dat er ongeveer 200 golven zijn gesimuleerd met een overslaand volume van elk 400 l per m. Dit is gelijk aan de totale hoeveelheid overslaand water die theoretisch door de 500 kleinste golven wordt geproduceerd.

Figuur 3-2 spitst zich toe op de grootste overslagdebieten die zijn gesimuleerd. Bij de laatste proeven in Zeeland naar overslagbestendige systemen, is besloten het overslagdebiet te verhogen om de waarde van de proeven voor deze systemen zo hoog mogelijk te laten zijn. Het maximum dat is bereikt, met behulp van 2 extra pompen, is 125 l/s per m. In werkelijkheid is de inhoud de simulator begrensd en dus ook het volume van de grootste golf. De simulator kan een volume van 5,5 m<sup>3</sup> per m aan. Figuur 3-2 geeft aan dat er theoretisch 10 overslaande golven zijn die een groter overslaand volume zouden moeten hebben. Hiervan zijn er 4 die boven een volume van 7 m<sup>3</sup> per m uitgaan. Deze 10 grote golven zijn deels gecompenseerd door niet 10, maar 28 golven van 5,5 m<sup>3</sup> per m te simuleren. Toch geeft dit een zekere afwijking in de simulatie van de belasting.

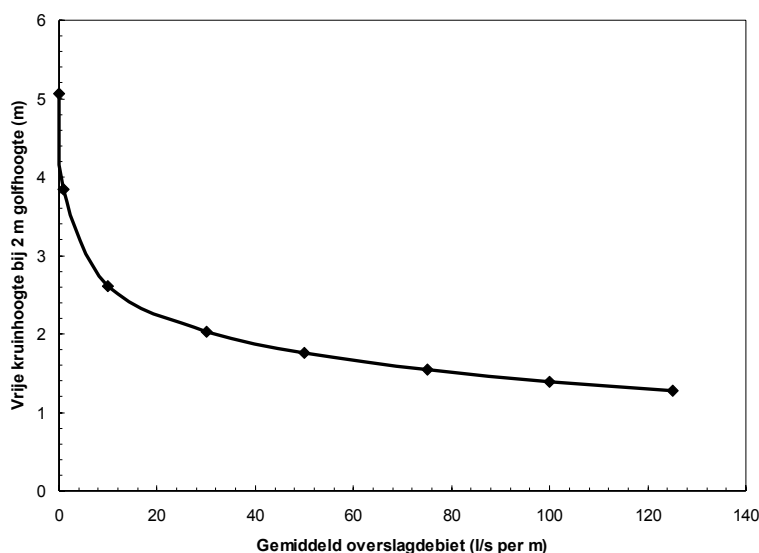
Tabel 3-1 geeft naast het aantal overslaande golven en de grootste overslaande golf ook hoe dicht de waterstand bij de kruin moet staan om een bepaald overslagdebiet te veroorzaken. De gegevens gaan uit van wat voor de proeven is aangehouden, namelijk een golfhoogte van 2 m en

een duur van 2 uur. Nederlandse dijken zijn ontworpen op een overslagdebiet van orde 1 l/s per m. Daar hoort een waterstand bij die 3,84 m lager ligt dan de kruin. Om een overslagdebiet van 75 l/s per m te krijgen, moet de waterstand meer dan 2,5 m hoger komen te liggen.

**Tabel 3-1** Enkele karakteristieke waarden bij verschillende overslagdebieten, uitgaande van  $H_s=2$  m;  $T_m$  4,7 s, een buitentalud 1:4 en een storm van 2 uur.

	Gemiddeld overslagdebiet (l/s per m)							
	0,1	1	10	30	50	75	100	125
Vrije kruinhoogte $h_k$ (m)	5,06	3,84	2,61	2,03	1,76	1,54	1,39	1,27
Percentage overslaande golven	0,2	2,7	18,9	36,6	47	56	62	68
Aantal overslaande golven	3	42	289	561	720	858	956	1034
Grootste overslaande volume (l/m)	400	835	2110	3790	5180	6750	8250	9680

Figuur 3-3 geeft eenzelfde beeld, waar de benodigde vrije kruinhoogte is uitgezet tegen het gemiddeld overslagdebiet (bij gegeven randvoorwaarden met een golfhoogte van 2 m). Om een vertienvoudiging van het overslagdebiet te krijgen (van 0,1 naar 1 l/s per m, van 1 naar 10 l/s per m en ook van 10 naar 100 l/s per m) is iedere keer een waterstand nodig die ongeveer 1,2 hoger ligt. Dit laat zien dat dijken die voor 1 l/s per m zijn ontworpen en gebouwd, niet direct een overslag van 10 of 100 l/s per m zullen krijgen, want een waterstand die meters hoger ligt dan de toetswaterstand is niet snel te verwachten.

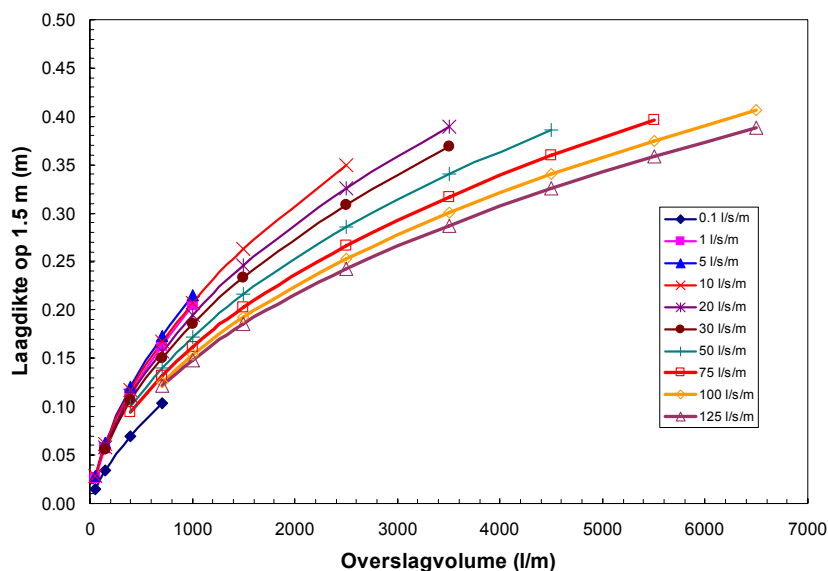


**Figuur 3-3** Benodigde vrije kruinhoogte afhankelijk van het gemiddeld overslagdebiet. Berekeningen voor een golfhoogte van 2 m en een 1:4 buitentalud.

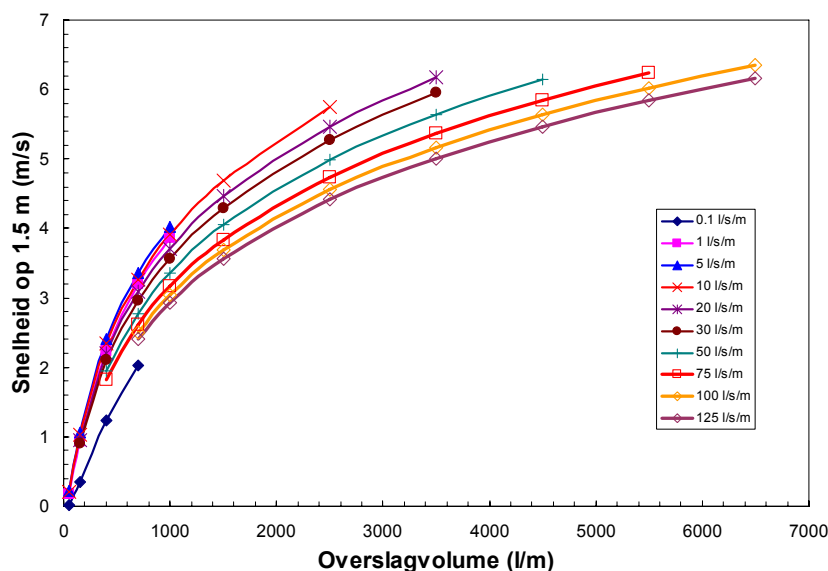
### 3.2.4 Laagdiktes, snelheden en overslagtijden bij golfoverslag

Door Bosman (2007) is in detail gekeken naar hoe overslaande golven over een dijk gaan. Er zijn betere formuleringen afgeleid voor laagdiktes en snelheden van overslaande golven op een talud en nieuwe formuleringen voor overslagtijden, dit is de tijdsduur dat er tijdens een overslag

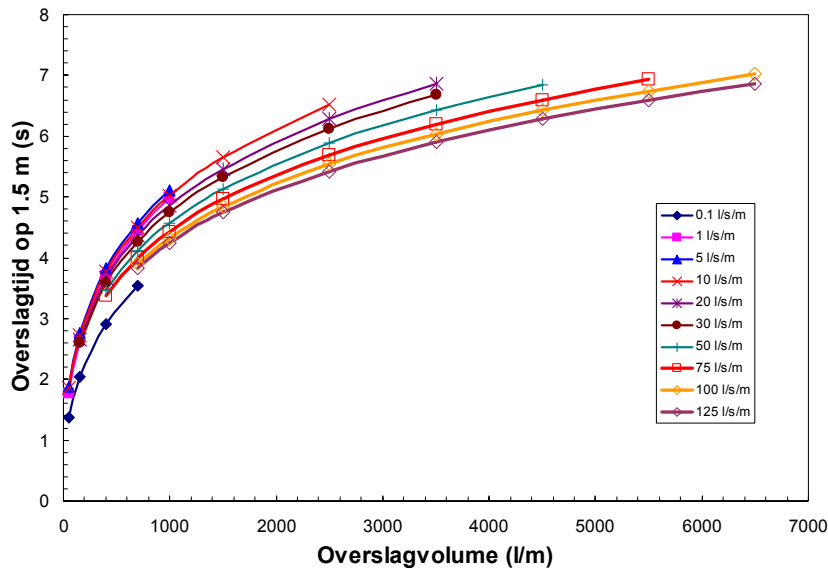
daadwerkelijk water langs het talud stroomt. De nieuwe formuleringen zijn ook opgenomen in het SBW-rapport, fase 1D Evaluatie Delfzijl. Ter illustratie geven Figuren 3-4 – 3-6 respectievelijk de laagdikte, de snelheid en de overslagtijd als functie van het overslagvolume per golf. Dit allemaal voor de eerder genoemde golfhoogte van 2 m, buitentalud van 1:4 en in dit geval op 1,5 m vanaf de buitenkruinlijn.



Figuur 3-4 Maximale laagdiktes op 1,5 m vanaf de kruinlijn als functie van het overslagvolume



Figuur 3-5 Maximale snelheden op 1,5 m vanaf de kruinlijn als functie van het overslagvolume



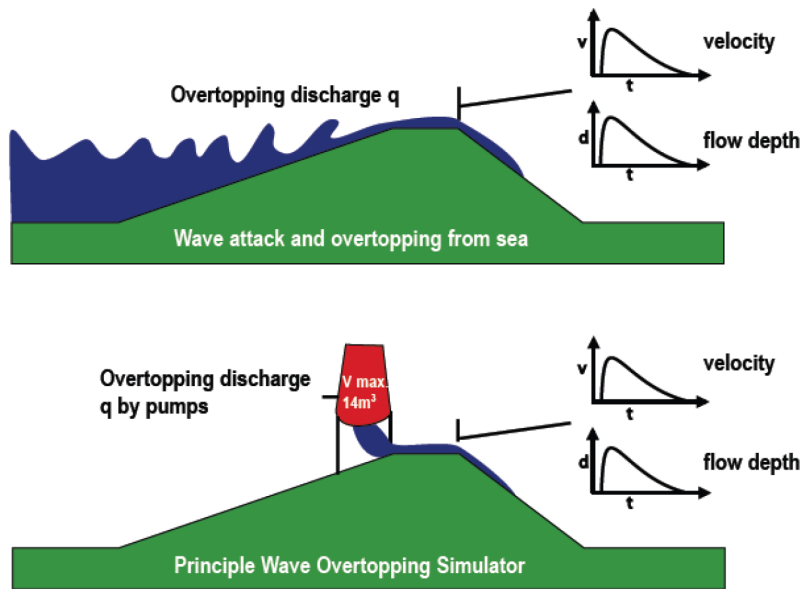
**Figuur 3-6** Overslagtijden op 1,5 m vanaf de kruinlijn als functie van het overslagvolume

### 3.3 Ontwerp van de simulator

#### 3.3.1 Principe

Het idee van de golfoverslagsimulator is in 2001 in de openbaarheid gebracht en het auteursrecht van Infram / J.W. van der Meer is vastgelegd door de notulen van de TAW-vergadering van 13 maart 2001. Het idee zelf is vrij eenvoudig, zie ook Figuur 3-7. We weten vrij veel van hoe golven de kruin van een dijk bereiken en hoe ze er overheen gaan met een bepaald laagdikte- en snelheidsverloop. Om golfoverslag te simuleren zijn in principe geen golven nodig, alleen dat gedeelte van de golven dat de kruin bereikt en er overheen gaat.

De golfoverslagsimulator is daarmee een bak die met een opgelegd en constant debiet door een pomp wordt gevuld en die op gezette tijden, door middel van een bedienbare klep, wordt geleegd. Het water moet er dan zo uitstromen dat het zo goed mogelijk overeenkomt met werkelijke golven die over een dijk slaan.



**Figuur 3-7** Principe van de golfoverslagsimulator

### 3.3.2 Ontwerp

Het idee van de overslagsimulator is alleen maar een begin. Het ontwerp betekent dat gekeken moet worden naar de grootte, de vorm en de wijze waarop de bak wordt gelegeerd en hoe het water met de juiste proporties op de kruin van de dijk komt.

De grootte van de bak is afgeleid van een inschatting van het maximale overslagdebiet dat nodig werd geacht om binnentaluds van gras te laten bezwijken en de daarbij behorende grootste overslagvolumes. Een strook van 4 m werd vrij arbitrair voldoende breed geacht om erosie door overslag op binnentaluds te laten ontwikkelen, zonder dat wand- of zij-effecten zouden optreden.

De vorm van de bak is gebaseerd op de gewenste maximale snelheden per golf op de kruin. Bij grotere overslagvolumes moest een grotere snelheid worden bereikt. De bak staat op een bepaalde hoogte boven de kruin. De hoogte van het massazwaartepunt boven de kruin van het volume dat wordt losgelaten, bepaalt ook de snelheid op het talud. Hoe hoger het massazwaartepunt, hoe groter de potentiële energie en hoe groter de uiteindelijk snelheid. Uit de relatie gewenste snelheid en benodigde potentiële energie volgde de vorm van de bak

De bak wordt gesloten en geopend door een vlinderklep aan de onderkant van de bak. Er is voor een vlinderklep gekozen, omdat de belasting op de klep neutraal is bij het openen (aan beide zijden van de as evenveel water, dus evenveel druk).

Tot slot is de overgangsconstructie ontworpen, die ervoor zorgt dat de verticaal naar beneden gerichte snelheid wordt omgezet in een horizontale snelheid op de kruin. Deze overgangsconstructie is volledig proefondervindelijk ontworpen en niet op basis van theorie.

Voor meer informatie over het ontwerp van de simulator wordt verwezen naar het ComCoast rapport Design, construction, calibration and use of the wave overtopping simulator (2007).

### 3.4 Aanpassing van de simulator

Met de ervaringen in Delfzijl is op weg naar de proeven op de Friese Waddenzeedijk gekeken wat er zoal aan de destijds na calibratie van het prototype gebouwde 4 meter brede overslagsimulator verbeterd zou kunnen worden. Deze verbeteringen zijn beschreven in het SBW-rapport, Fase 2A Modelaanpassing. De verbeteringen worden hier kort samengevat.

De kruin van de dijk en vooral ook het knikpunt in de geometrie tussen de kruin en het binnentalud zou moeten worden meegenomen in de overslagsimulatie. Dit is bij de proeven in Delfzijl niet gebeurd, daar stond de simulator wel op het buitentalud, maar de uitstroomopening stond halverwege de kruin en daarna werd nog eens 2 m beschermd door een tapijt.

De simulator moest dus op het buitentalud worden opgebouwd, waardoor een aangepast stalen onderstel nodig was. Normaal vervoer van de simulator over de weg blijft hierbij mogelijk. Omdat ook de simulator wel eens een beetje verzakte, soms ook scheef, is dit onderstel zo ontworpen dat middels hydraulische cilinders op de poten heel gemakkelijk de simulator weer precies verticaal kon worden gesteld, zie Figuur 3-8.



**Figuur 3-8** De simulator van achteren gezien, met het onderstel en de hydraulisch verstelbare poten.

Aandachtspunt is de verankering van de simulator en de vorm van de uitstroomopening welke bij voorkeur aanpasbaar moest blijven. Aandachtspunt was ook of er wel of niet een afdekking van de kruin moest zijn in verband met aanpassing stroming uit de simulator (grote voorkeur dat dit niet nodig zijn, zodat ook de kruinstabiliteit meegenomen kon worden). De lengte van de uitstroomopening is groter gemaakt, omdat de simulator verder op het buitentalud stond. Toch moest daarnaast nog een stuk (1-2 m) met doek of platen worden beschermd, omdat de waterstroom daarvoor nog een duidelijke component naar beneden had. Daarna was de waterstroom op de dijk vrijwel horizontaal.

Naast het meenemen van de kruin is de simulator groter gemaakt door middel van een opzetstuk. Met een extra capaciteit van  $2 \text{ m}^3/\text{m}$  (totale capaciteit  $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$  en  $22 \text{ m}^3$  voor 4 m breedte) kunnen simulaties worden uitgevoerd tot circa 75 l/s per m. Dit is het maximum dat met een opzetstuk kan worden bereikt met betrekking tot de grootste golven die nodig zijn. Met een apart opzetstuk is de simulator tijdens vervoer niet groter. Figuur 3-9 geeft de simulator met opzetbak, apart onderstel en de verlengde geleideconstructie, zoals deze op de Boonweg stond.



**Figuur 3-9** Zijaanzicht van de vergrootte simulator in Friesland. De simulator staat op een apart onderstel wat met hydrauliek eenvoudig is te verstellen.

### 3.5 Bediening van de simulator

De bediening van de simulator bestaat uit het hydraulisch openen en sluiten van de klep vanuit de meetcabine met een joystick (zie Figuur 3-10). Doormiddel van een led op de joystick kan gekeken worden of de klep open (groen licht) of dicht (rood licht) is. Middels een elektrische schakelaar (microswitch) wordt een elektrisch signaal gegeven of de klep dicht of open is.



**Figuur 3-10** Bediening van de simulator middels hydrauliek en een joystick (open – dicht)

Het openen en sluiten gebeurde aan de hand van de stuurfile: een lijst / schema met voor de desbetreffende proef van 6 uur (of 2 uur, met tweemaal een herhaling) de tijden voor het openen van de klep en de grootte in liters van de op dat moment te lossen overslaggolf. Bij Delfzijl werd de gewenste overslagverdeling (zie Figuren 3-1 en 3-2) gesimuleerd met een aantal vaste volumes, zoals 50; 150; 400; 700; 1000; 1500; 2500 en 3500 l per m. Deze verdeling was ook bij de peilschalen op de simulator aangebracht en op deze manier was vrij gemakkelijk te controleren of een gewenst volume ook inderdaad in de bak zat.

De ervaring in Delfzijl leerde dat de pomp nauwkeurig op een bepaald debiet kon worden ingesteld en dat dit debiet ook constant bleef gedurende de test. Daarom is de opzet voor de stuurfile voor de Boonweg aangepast. In feite zijn precies de overslagvolumes in Figuren 3-1 en 3-2 gesimuleerd. Er is eerst een overslagverdeling gemaakt zoals in genoemde figuren, waarbij er een minimum bij elk debiet is gesteld. De lijst met overslagvolumes is daarna in een random volgorde gezet. Daarna is per overslagvolume berekend welke tijd nodig zou zijn, met het ingestelde pompdebiet, om dit volume te bereiken. De cumulatieve lijst met deze tijden geeft dan de openingstijden voor de simulator.

De tijden op de stuurfile geven enkel en alleen de tijd voor het openen van de klep weer. De benodigde uitstroomtijd is afhankelijk van het in de simulator aanwezige volume water. Voor een volle bak ( $22 \text{ m}^3$ ) is bijvoorbeeld ongeveer 5 s nodig, voor 100 l per m maar een enkele seconde. Bij kleine volumes werd de klep dan ook (op gevoel) weer eerder dicht gedaan dan bij een groot volume. Omdat het sluiten van de klep visueel (de klok) en deels op gevoel gebeurde (moment van sluiten), is er per golf sprake van enige variatie ten opzichte van de volgens de stuurfile juiste hoeveelheid overslaand. Aangezien het overslagdebiet gedurende de hele proef van 6 uur constant is, klopt de totale hoeveelheid water gedurende de simulatie van de storm bij een bepaald overslagdebiet wel en zal ook de gewenste overslagverdeling nauwkeurig genoeg zijn gesimuleerd.

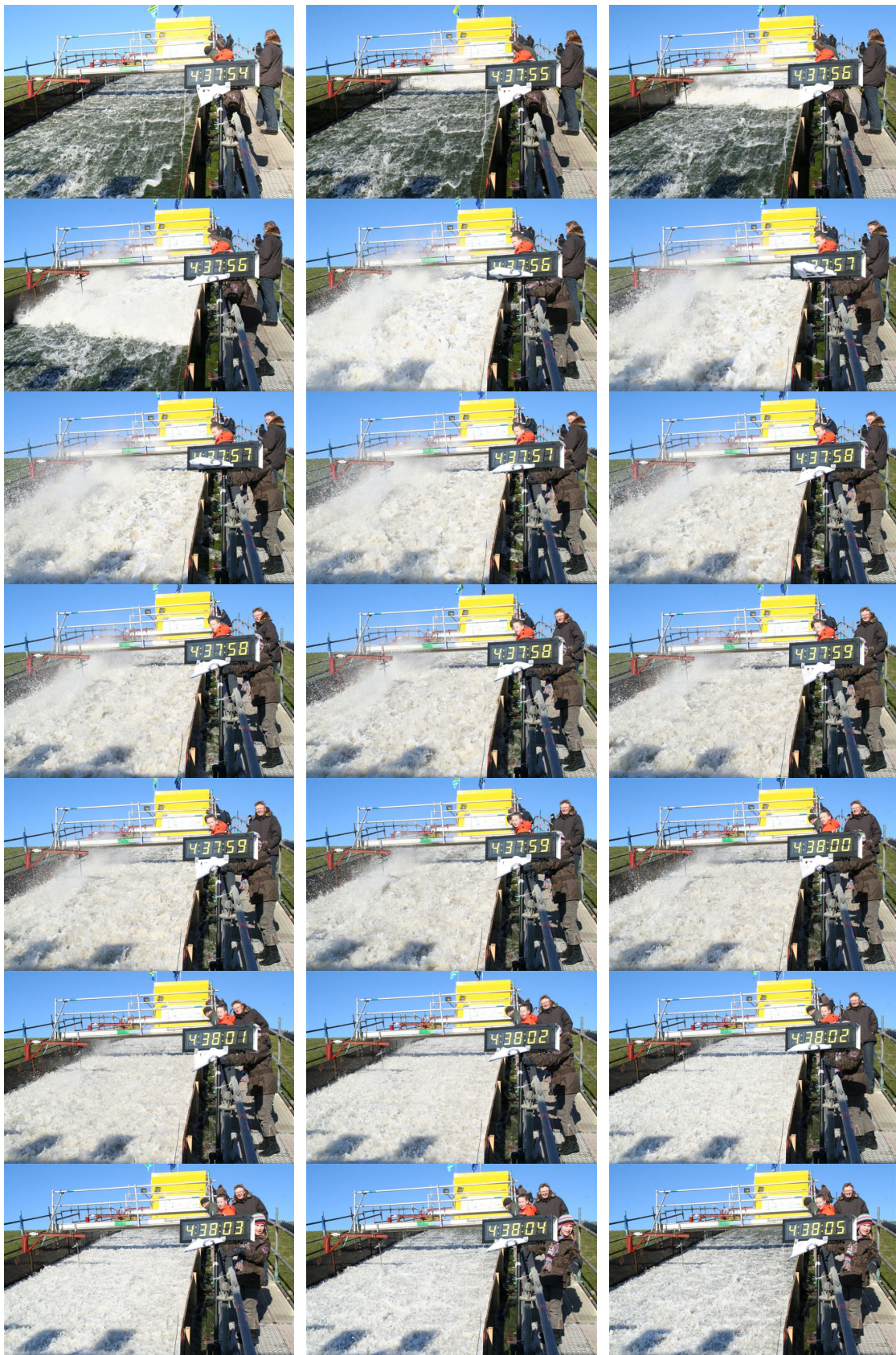
De hoeveelheid overslaand water per overslaande golf is afhankelijk van het ingestelde debiet van de pomp en de tijdsduur tussen 2 lossingen van de simulator. De totale hoeveelheid overslag gedurende een periode van 6 uur bij een overslagdebiet van 75 l/s per m bedraagt  $6480 \text{ m}^3$ . Vanwege de breedte van een proefstrook van 4 m moet de pomp een constant debiet van  $4 \times 75 = 300 \text{ l/s}$  leveren.

Figuur 3-11 geeft het moment waarop de golfoverslagsimulator tot boven de  $22 \text{ m}^3$  is gevuld. Figuur 3-12 geeft een idee van het gebeuren als deze  $22 \text{ m}^3$  in enkele seconden op het binnentalud van de Boonweg wordt losgelaten.



**Figuur 3.11** De golfoverslagsimulator gevuld met meer dan  $22 \text{ m}^3$  water.





**Figuur 3-12** Impressie van de golfoverslagsimulator op de Boonweg bij een overslagvolume van 22 m<sup>3</sup> (of 5,5 m<sup>3</sup> per m breedte)



## 4 Gras- en grondonderzoek

### 4.1 Grasonderzoek

De erosiebestendigheid van een grasmatbekleding hangt ondermeer af van de conditie van de grasmat en de doorworteling van de zode (het intensief doorwortelde bovenste gedeelte van de deklaag, bestaande uit substraat en wortels). Deze doorworteling is afhankelijk van het vegetatietype, welke weer grotendeels afhankelijk is van het gevoerde beheer. Om die reden is de graszode uitvoerig getest door Alterra.

In februari en maart 2008 is op basis van monsters met behulp van het VTV2006 door Alterra de doorworteling van de op het binnentalud aanwezige grasmatbekleding bepaald. Tevens is de vegetatie beschreven en zijn zodeparameters bepaald. Op basis van de doorworteling scoort de zodekwaliteit van de dijkvakken op St. Philipsland en Zuid-Beveland "goed". Van de twee wortelmetingen laten de metingen van maart 2008 de hoogste doorworteling zien. De doorworteling is in 4 weken tijd zichtbaar toegenomen.

Beide dijkvakken worden op basis van vegetatiesamenstelling volgens de VTV2006 ingedeeld bij dijkgraslandtype soortenrijk hooiland (H3).

Voor een uitgebreide uiteenzetting van het onderzoek wordt verwezen naar het rapport "Doorworteling en Zodeparameters in Wilhelminapolder en de Oude polder van Sint Philipsland, voorjaar 2008" (Alterra, 2008). Dit rapport is als bijlage G in dit document opgenomen.

### 4.2 Grondonderzoek

Naast het onderzoek door Alterra heeft Deltares een grondonderzoek uitgevoerd. Naast veldonderzoek (sonderingen en handboringen) zijn ten behoeve van de beoordeling van de kwaliteit van de bekleding van de dijk een aantal monsters genomen van de toplaag. Op basis van de uitkomsten van het laboratoriumonderzoek kan de erosiebestendigheid van de klei op beide locaties worden toebedeeld aan categorie c3 (weinig erosiebestendige klei).

De kleilaagdikte is onderzocht met sonderingen en handboringen. De onderzoekspunten zijn verspreid over het talud uitgevoerd. De kleilaagdikte ter plaatste van Sint Philipsland is gemiddeld 0,6 m en varieert enigszins van 0,5 m tot 0,6 m. De kleilaagdikte op de zanddijk in Kattendijke is gemiddeld 0,5 m en varieert sterk van 0,45 m tot 2,0 m. De grote variatie in de kleidikte is waarschijnlijk toe te schrijven aan een dijkversterking (nieuwe dijk op oude dijk).

De erosiebestendigheid de kleibekledingen op St. Philipsland en Zuid-Beveland is slecht (categorie c3) volgens de regels van het Technisch Rapport Klei voor Dijken (TAW, 1996): de plasticiteitsindex is laag (ongeveer 10%), het lutumgehalte is laag en ligt in de range van 13% tot 17% en het zandgehalte is hoog en varieert van 48% tot 58%. Er is variatie, maar alle monsters vallen in de categorie 'slecht'.

Het rapport "Golfoverslagproeven Zeeland, grondonderzoek en monitoring" (Deltares, juni 2008) bevat tevens informatie over waterspanningen in de kleibekleding en zandkern. Deze gegevens worden gebruikt voor het valideren van het grondwaterstromingsmodel "Plaxflow" en andere rekenmodellen die inzicht verschaffen in het infiltratie en afschuifgedrag van de kleibekleding op de zandkern.

Voor meer informatie over dit onderzoek wordt verwezen naar het rapport met kenmerk 432850-0008 (Deltares, juni 2008). Dit document is separaat van dit rapport opgeleverd. Op de bijgeleverde cd-rom is het rapport van Deltares digitaal bijgevoegd.

## 5 Metingen

Op een aantal proefstroken is door Deltares gedurende de proeven de infiltratie van het overslagwater in het dijkslichaam gemeten. Daarnaast is de laagdikte van de overslag op verschillende locaties op het talud geregistreerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van meetinstrumenten, die door Deltares zijn gekalibreerd en geplaatst. Voor de resultaten van deze metingen wordt verwezen naar de rapportages van Deltares, hier wordt een eerste uitkomst van de dataprocessing getoond. De feitelijke analyse van de metingen vallen onder een vervolgtraject en vallen niet onder deze rapportage.

De meetinstrumenten van Deltares bestonden uit laagdiktemeters, die eerder ook in Delfzijl en op de Boonweg zijn gebruikt. Het zijn in feite draadgolfhoogtemeters met zulke dunne draden dat het water niet bij de draden omhoog wordt gestuwd (wat wel het geval is als gewone golfhoogtemeters worden gebruikt met een dikte van ongeveer 4 mm). De draden meten het werkelijke volume water en niet de eventueel aanwezige lucht in het water. Daardoor kan er een verschil ontstaan tussen een visueel wateroppervlak en de gemeten laagdikte. De laatste zou dan lager moeten zijn.

Uit de registraties van de laagdiktemeters wordt rechtstreeks de maximale laagdikte bepaald en ook de verblijfsduur of overslagduur van een bepaalde golf. Uit vergelijking van twee laagdiktemeters kan de frontsnelheid worden bepaald. Dit is dus een berekende grootheid en is niet rechtstreeks gemeten.

Na de proeven is met de dataprocessing van de metingen begonnen. Bij de totstandkoming van dit rapport waren de proeven door Deltares nog onvoldoende uitgewerkt, zodat nog geen resultaten in dit rapport getoond konden worden. Voor inhoudelijke informatie over dataprocessing wordt verwezen naar het factual report "Golfoverslagproeven Friese Waddenzeedijk" met kenmerk 07i107B (Infram, augustus 2008).

Behalve metingen met de apparatuur is op de tweede proefstrook in Kattendijke een visuele meting van de laagdikte gedaan, zodat een vergelijk kon worden gemaakt met de gegevens van Deltares. Op St. Philipsland konden er geen visuele laagdiktemetingen meer worden uitgevoerd, omdat het talud reeds bezwaken was en extra overslag onacceptabel grote schade hebben veroorzaakt.

Ten behoeve van deze meting is een sessie uitgevoerd waarbij op basis van oplopend volume (500 – 1000 – 1500 – 3000 – 3500) de laagdikte visueel werd gemeten door aflezing van de op de meters aangebrachte peilschaal. De meting is per overslagvolume 3 keer herhaald. Tijdens deze sessie heeft de meetapparatuur van Deltares ook de laagdikte geregistreerd, zodat een vergelijk kan worden gemaakt. De resultaten van deze visuele metingen zijn opgenomen in onderstaande tabel.

Meetportaal	Afstand t.o.v. uitstroomopening simulator (m)	Opnemers	Volume (l per m)			
			700	1000	1500	2500
I	4,6	1 + 2	12	15	16	25
II	9,34	3 + 4	5	9	10	15
III	14,6	5 + 6	8	10	13	20
IV	19,76	7 + 8	6	10	11	17
V	23,52	9 + 10	5	6	8	9

**Tabel 5-1** Resultaten visuele meting laagdikte [cm]

Door de zeer snelstromende overslag, het zeer onregelmatige wateroppervlak en de vervorming van het wateroppervlak door de meetapparatuur (incl. opgeworpen buiswater/spray) bleek aflezen (vooral bij de grotere volumes) zeer onnauwkeurig. Omdat de laagdikte niet gedefinieerd afleesbaar is betreft het een schatting. Dit is tevens de reden dat de meeste waardes afgerond zijn op 5 cm. Daarom is besloten om bij de proeven op de harde bekledingen deze meting niet te herhalen.

Op ieder van de taluds met harde bekledingen is een sessie uitgevoerd waarbij met oplopend volume (500 - 1000 - ... - 5500 l/s) water over het talud is losgelaten. Elk volume is 3 maal herhaald om de reproduceerbaarheid te toetsen. Deze volumes zijn geregistreerd met de apparatuur van Deltares. Op deze wijze is er een eenduidige meting van de laagdikte en frontsnelheid bij bekend volume. Bij het volgen van de stuurlijst wil het namelijk nog wel eens voorkomen dat een golf gemist werd of de klep van de simulator te laat dan wel te vroeg werd geopend en daardoor niet het juiste volume werd gesimuleerd. Dit aangezien de metingen van Deltares worden gekoppeld aan de stuurlijsten en dus aan verkeerde volumes kunnen worden toebedeeld.

## 6 Erosieontwikkeling

### 6.1 Inleiding

Aangezien de proeven wat betreft schadeontwikkeling primair observatieproeven zijn, is de erosieontwikkeling van de grasbekleding (en eventueel kleilaag) als functie van de tijd vastgelegd met video-opnames en foto's. Een dergelijke vorm van waarneming geeft een kwalitatieve beschrijving van het schadebeeld. In dit hoofdstuk worden de verschillende methoden, om de erosieontwikkeling vast te leggen, beschreven.

### 6.2 Video

Gedurende de uitvoering van een proef is een beveiligingscamera gebruikt om de overslaggebeurtenissen en de erosieontwikkeling van de grasbekleding (en eventueel kleilaag) vast te leggen. Deze camera is bevestigd bovenop de meetcabine, zodat het gehele binnentalud (van kruin tot teen) tezamen met de digitale klok in één shot kon worden gevangen. Gezien de tijdschaal van de gebeurtenissen was een standaardopname van 25 beelden per seconde niet noodzakelijk en is om reden van datareductie gekozen voor 10 beelden per seconde. De videobeelden werden rechtstreeks opgeslagen op een harde schijf en tegelijkertijd werd een back-up van deze registratie gemaakt.

In een beperkt aantal gevallen is gelet op de kwaliteit van het beeldmateriaal en de behoefte aan meer detail, de schadeontwikkeling ook vastgelegd met een digitale videocamera.

### 6.3 Foto's

#### 6.3.1 Nulopname

Alvorens een start te maken met de proeven op een proefstrook is behalve op proefstrook 1 een 'nulopname' gemaakt. Hiertoe zijn naast een globale inventarisatie van de uiterlijke kenmerken van het talud (zie §6.4) met behulp van een digitale fotocamera (Panasonic Lumix DMC-LX2) referentiefoto's gemaakt. Ter reconstructie van de schadepositie is gebruikt gemaakt van een mobiel raster van  $(4 \times 2) \text{ m}^2$  dat het vier meter brede talud verdeelt in 8 vlakken van  $1 \times 1 \text{ m}$ . Voor de positionering ervan is op de schotten vanuit de simulator gezien naar beneden toe een lengteverdeling in meters aangebracht. De "nul" van deze verdeling lag op de benedenstrooms rand van de uitstroombak van de simulator. Door bij iedere foto de positie / referentie op het talud mee te fotograferen is achteraf de positie van de opname te achterhalen.

#### 6.3.2 Details

In de regel zijn na elke sessie van 2 uur (met uitzondering van de proeven met 0,1 en 1 l/s per m) met behulp van het raster detailfoto's van de schadebeelden (indien aanwezig) gemaakt (zie Figuur 6-1). Aangezien in de meeste gevallen kleinschalige erosie heeft plaatsgevonden zijn voor een aantal gevallen ook de karakteristieken (afmetingen, e.d.) van het schadebeeld genoteerd.



**Figuur 6-1** Voorbeeld referentie- + detailfoto (Kattendijke)

## 6.4 Beschrijving T0-situatie teststrook

Behalve bij de proefstroken met de harde dijkbekleding is voorafgaand aan de proeven de beginsituatie van de grasmat van de teststrook geïventariseerd en beschreven (zij Bijlage C). Hierbij is overeenkomstig het hierboven beschreven mobiele raster per vierkante meter de toestand van de grasmat beschreven. Zaken die hierbij aan de orde komen zijn: de aanwezigheid van rijsporen, muizen- of mollengaten, mogelijke zwakke plekken in en initiële schades aan grasmat, opmerkelijke zaken aan de grasmatvegetatie etc. De resultaten van deze T0-toestand zijn per proef beschreven. Naast deze specifieke beschrijving van de 4 m brede teststrook is door Alterra een vegetatie- en grasmatonderzoek gedaan op de dijksectie waar het overslagonderzoek heeft plaatsgevonden. Zie voor de resultaten de rapportage van Alterra: "Doorworteling en Zodeparameters in Wilhelminapolder en de Oude polder van sint Philipsland, voorjaar 2008"d.d. mei 2008.

## 6.5 Erosievormen

Tijdens de proeven is gebleken dat er meerdere vormen van erosie zijn te onderscheiden. Om in de hieronder staande rapportage de eenduidigheid in de omschrijvingen te vergroten volgt hierbij een beschrijving van de te onderscheiden vormen in een volgorde zoals die veelal bij de proeven zijn geconstateerd. Bij de meeste vormen van erosie breidt de erosie zich uitsluitend naar beneden uit. Alleen bij head cut erosie, in de klei of wanneer de zandkern is bereikt, breidt de erosie zich ook uit naar boven.

### 6.5.1 Erosie los materiaal

Direct na aanvang van de eerste overslagproeven wordt het losse materiaal weggespoeld. Onder los materiaal wordt onder andere verstaan: los gras, hooi, half en geheel verteerd organisch



materiaal, al of niet aangetrapte molshopen en diverse klein zwerfvuil en vogelveren. Bovendien zullen door het naar beneden stromende water alle grassprietten dakpansgewijs, en naar beneden gericht, op het talud worden platgedrukt. Deze effecten zorgen ervoor dat het aanzien van de grasmat snel en betrekkelijk veel verandert. In de fase daarna verandert er normaal gesproken slechts weinig en langzaam. Bovendien is in deze fase geen sprake van uitbreiding in horizontale of verticale zin. Het betreft in feite het "schoonsoelen" van de grasmat.

#### 6.5.2 Erosie grasmat

Onder erosie van de grasmat wordt verstaan het, onder invloed van welke processen dan ook, wegspoelen van aan de oppervlak liggende gronddeeltjes rondom de wortelhalzen van de grasplantjes, het min of meer loskomen van graspollen tot het verdwijnen van de grasbedekking door het oprol- of het opboleffect, waardoor kale plekken ontstaan en de onbeschermden klei aan de oppervlakte komt. Deze klei kent dan nog wel de samenhang als gevolg van de doorworteling van de kleilaag. Deze erosie verloopt over het algemeen langzaam. Het opboleffect daarentegen, en in mindere mate het oproleffect, ontstaat onverwacht en verloopt meestal snel. Deze laatste 2 vormen van erosie breiden zich alleen uit naar beneden en in de breedte.

#### 6.5.3 Erosie kleilaag

Onder erosie van de kleilaag valt het langzaam, oppervlakkig en min of meer gelijkmatig slijten van de bovenkant de klei, het langzaam ontstaan van diepe erosiekuilen met steile tot verticale wanden in de kleilaag, snellere erosie door verbrokkeling van de klei. Deze vormen van erosie breiden zich alleen uit naar beneden en in de breedte.

#### 6.5.4 Terug schrijdende erosie

Terug schrijdende of head cut erosie vindt plaats als de bovenstroomse helling vrijwel verticaal en grondmechanisch instabiel is geworden en er brokken klei in de erosiekuil storten. Deze vorm van erosie treedt versneld op als bij een diepe erosiekuil de zandkern van de waterkering wordt bereikt. Het zand wordt aan de bovenstroomse zijde van de erosiekuil snel weggespoeld, waardoor de afdeklaag van klei wordt ondermijnd. Deze vorm van erosie is tijdens de proeven alleen opgetreden vanaf overslagdebieten van 50 l/s per m.



## 7 St. Philipsland: erosiebestendigheid grasbekleding

### 7.1 Inleiding

Nadat op 12 maart de gehele proefopstelling was opgebouwd en voldoende water in de sloot was opgezet, kon op diezelfde dag nog worden gestart met de proeven. De proeven zijn primair gericht op observatie van de erosiebestendigheid van de op het binnentalud aanwezige grasbekleding en de daaronder gelegen kleilaag bij golfoverslag. De resultaten van de proeven op deze proefstrook worden in dit hoofdstuk gepresenteerd.

### 7.2 Nulopname

De proefstrook bevond zich op een dijk die bestaat uit een zandkern met een afdeklaag van klei. De dikte van de kleilaag op het binnentalud (1:2,4) zou volgens het ontwerp 0,60 m moeten zijn. De grasmat van de proefstrook zag er in verhouding tot de teststroken in Friesland slecht uit. Volgens de beheerder was de verpachte dijk al ca. 10 jaar niet meer bemest en hield de pachter zich niet aan de afspraken over het maaien. De bedoeling is dat het gras één keer per jaar vóór 15 juli wordt gemaaid en met een lengte van ca. 15 cm de winter ingaat. Door het veel te late maaien (in september 2007) en het achterblijven van teveel maaisel, waardoor de onderliggende grasmat verstikt, zag de grasmat er slecht uit. Verder was er sprake van meerdere molshopen en oppervlakkige mollenritten.

Het gras op het binnentalud was vrij lang met plaatselijk veel hoog en dor/dood gras en betrekkelijk veel graspollen. Het oppervlak van het talud is onregelmatig door veel rijsporen en andere verlagingen en verhogingen die als springschansen (cascade-effect) voor het overslaande water fungeren. De kruin is veel bereden en is bedekt met kort gras.

Naast het gras komt er veel bieslook en mos op het talud voor. Mollen zijn actief in de graszode en er komen veel oppervlakkige beschadigingen van de grasmat voor, waarvan sommige wellicht platgetreden molshopen zijn. Bijlage C-1 voor een visuele weergave van de hierboven beschreven opmerkelijke zaken in de grasbedekking.

### 7.3 Uitvoering

Tijdens het opbouwen van de proefopstelling was sprake van storm en kon de simulator niet op de kruin van de dijk geplaatst worden. Toen de storm de volgende dag was afgenomen, is alsnog de simulator door de kraan op de kruin geplaatst en kon met de proeven gestart worden. Gedurende de uitvoering van de proeven is de simulator vanwege de stormachtige wind gestabiliseerd met behulp van een kraan. Ondanks stormachtig weer konden de proeven zodoende doorgang vinden.

Omdat de elektroden van de laagdiktemeters door het zoute water gecorrodeerd bleken konden pas metingen uitgevoerd nadat de meters waren hersteld. Vanaf de proeven met 30 l/s per m is de laagdikte en frontsnelheid dan ook weer gemeten.

Met betrekking tot de uitvoering van de proeven kunnen geen verdere bijzonderheden worden vermeld.

## 7.4 Resultaten

### 7.4.1 Resultaten 0,1 en 1 l/s per m

In vergelijking tot de proeven met een groter overslagdebiet ( $> 1$  l/s per m) is het aantal overslaande golven bij de proeven met een overslagdebiet van 0,1 en 1 l/s per m zodanig gering, respectievelijk 9 en 126 golven per 6 uur, dat de tijden tussen 2 golven erg lang zijn. Daarnaast is bij de proeven op de Friese Waddenzeedijk gebleken dat bij dergelijke overslagdebieten geen erosie van de grasmat plaatsvindt. Dit is dan ook de reden dat deze 2 proeven versneld zijn uitgevoerd (respectievelijk 100x en 10x).

Na uitvoering van deze twee proeven werd visueel geen aantasting van de grasmat waargenomen. Het enige dat werd waargenomen was dat de kale plekken, welke voor het beproeven reeds aanwezig waren, beter zichtbaar werden. Dit omdat het gras dat deze kale plekken bedekte werd platgedrukt door de golven, en omdat al het min of meer losliggende organische materiaal op en tussen de grassprietten was weggespoeld (erosie los materiaal).

### 7.4.2 Resultaten 10 l/s per m

Ten opzichte van de eerste 2 proeven met een klein overslagdebiet is de wortelhals (de overgang tussen wortels en blad) beter zichtbaar geworden na de proeven met 10 l/s per m (erosie grasmat). Het talud werd steeds slechter en ter plaatse van de vele molshopen/mollengaten werden langzaam de eerste tekenen van zeer plaatselijke erosie van de kleilaag zichtbaar.

### 7.4.3 Resultaten 30 l/s per m

Bij de proeven met 30 l/s per m werd het talud langzaam kaler en ontstonden nieuwe aandachtsplekken op het talud (zie Figuur 7-1). Bestaande "geulen" (oppervlakkige mollenritten) werden door erosie langzaam dieper. Het water kreeg nog weinig vat op de grasbekleding en de onderliggende kleilaag, waardoor mogelijk substantiële erosie uitbleef.



**Figuur 7-1** Aandachtsplekken op het talud

Ter plaatse van de overgang talud – teen (knik) werd de grasmat steeds slechter. Ook traden randeffecten op (zie Figuur 7-2). Waarschijnlijk is dit het resultaat van het in het talud slaan van de geleideschotten. Om te voorkomen dat als gevolg van deze randeffecten het talud verder zou eroderen zijn deze "gaten" opgevuld met klei en daarna aangetrapt.



**Figuur 7-2** Randeffecten ter plaatse van geleideschotten

#### 7.4.4 Resultaten 50 l/s per m

Vrijwel aan het begin van de eerste sessie met 50 l/s per m vond op een tweetal plekken gelijktijdig substantiële erosie plaats (zie Figuur 7-3) door één enkele grote golf. De plaats waar dit gebeurde was respectievelijk op 6 m (1 m uit de linker kant) en 9 m (1 m uit de rechter kant) ten opzichte van de uitstroomopening van de simulator. De schade op 6 m heeft zich ontwikkeld op een plek direct benedenstrooms van de bij de T0 inventarisatie geconstateerde lichte beschadiging of mogelijk platgetrapte molshoop van de grasmat. De schade op 9 m is ontstaan ter plaatse van een bij aanvang aanwezige "onregelmatigheid" in het oppervlak van het talud. Op deze plek werd de overslag naar boven toe afgebogen. De oneffenheid op het talud fungeerde daar als een springschans voor de waterstroom. Het hierdoor optredende "cascade-effect" nam tijdens het verloop van de proef toe. Onder cascade-effect wordt verstaan het onder invloed van onregelmatigheden in het oppervlak van het talud, golvend (trapsgewijs) naar beneden stromen van het overslagwater.



**Figuur 7-3** Substantiële schade talud bij begin van de proef met 50 l/s per m. De details geven het schadebeeld aan het eind van eerste 2 uur weer.

Gedurende de tweede sessie zijn beide schadebeelden groter (breder en langer) geworden. Vooral de schade aan de rechterkant heeft zich langzaam naar beneden uitgebreid (zie Figuur 7-4). De schade is voornamelijk oppervlakkig (< 10 cm). Het water heeft in deze 2 uur nog weinig van de onderliggende kleilaag geërodeerd.



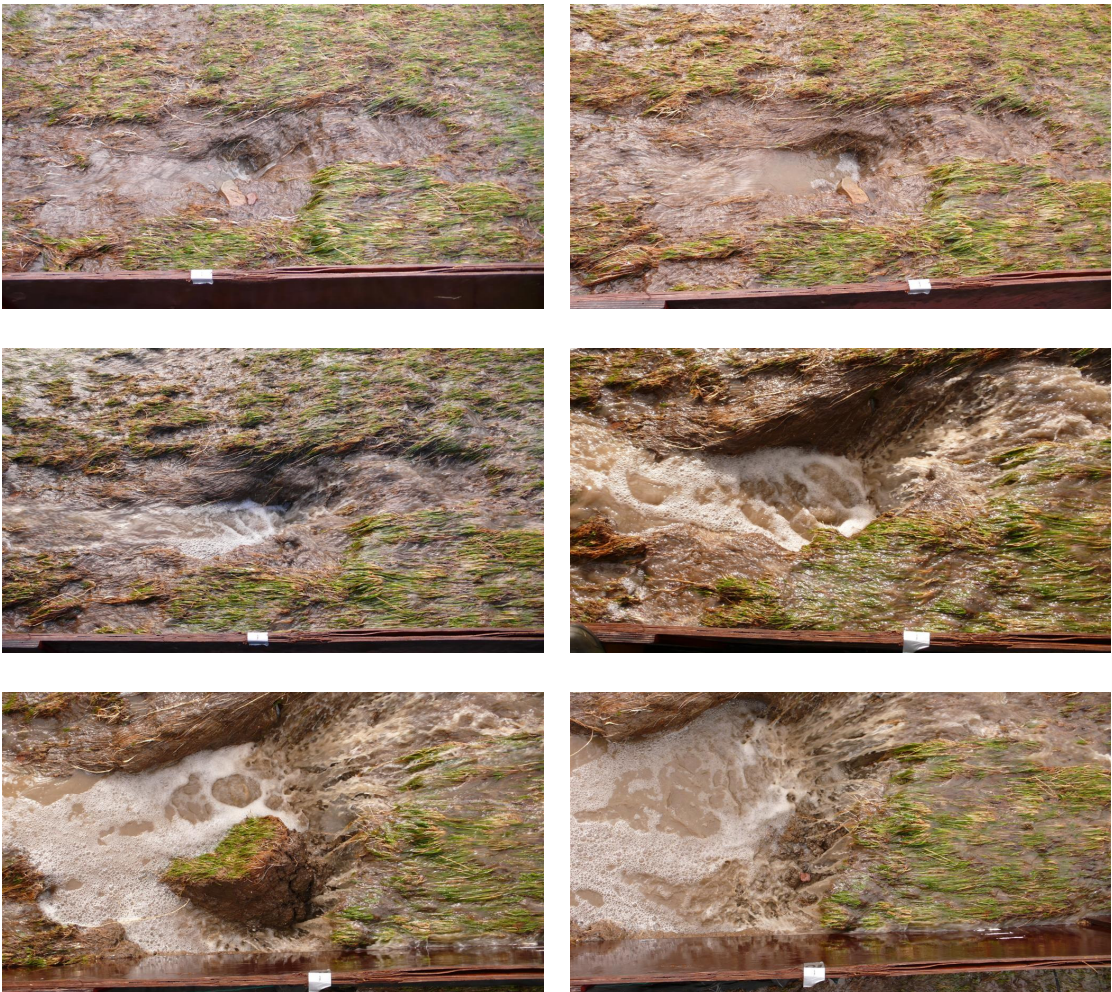
**Figuur 7-4** Schadebeeld einde tweede sessie 50 ltr,

Ter plaatse van de teen tussen talud en asfaltweg, heeft zich aan beide kanten van de proefstrook een groot en diep gat gevormd. Ter bescherming van de weg zijn deze gaten gedicht met breuksteen (zie Figuur 7-5). Uiteindelijk heeft het gat aan de rechterkant zich tijdens de derde sessie alsnog uitgebreid.



**Figuur 7-5** Het dichten van de gaten met breuksteen nabij de asfaltweg

Gedurende de laatste 2 uur van de proef met 50 l/s per m heeft de bovenste erosieplek, links tussen de snelheidsmeters, zich ten opzichte van de eerste en tweede sessie nauwelijks uitgebreid. Het gat rechtsonder daarentegen heeft uiteindelijk aanleiding gegeven tot falen. Doordat langzaam een steeds dieper wordend gat met steile wand aan de bovenstroomse kant ontstond in de kleilaag kwam de zandkern bloot te liggen. Toen dit gebeurde versnelde de gatontwikkeling door uitspoelen van zand (zie Figuur 7-6).





**Figuur 7-6** Schadeontwikkeling tijdens de laatste 2 uur van de proef met 50 l/s per m. In de bovenste 6 foto's stroomt het water van rechts naar links. In de andere foto's is dit van boven naar beneden.

Omdat inmiddels rechts in de teen van de dijk het gedichte gat zich toch richting de knik heeft kunnen uitbreiden werd het tussenliggende gedeelte tussen beide gaten, bij een van de laatste grote golven, naar beneden gedrukt (zie Figuur 7-7).



**Figuur 7-7** Eindresultaat na 50 l/s per m

In Figuur 7-8 is duidelijk de overgang tussen het zand en klei te zien. Uiteindelijk bleek de kleilaag slechts 40 cm dik te zijn in plaats van de voorgeschreven 60 cm. Het gat in Figuur 7-8 is ongeveer 1 meter diep. Vrijwel direct na de afschuiving is, om verdere schade aan het talud te



voorkomen, besloten de proef met 75 l/s per m niet meer uit te voeren. Na afronding van de proef met 50 l/s per m ging het erosieproces echter nog wel circa een half uur door.



**Figuur 7-8** Het ontstane gat tijdens de proef met 50 l/s per m. De overgang tussen de klei- en zandlaag is goed zichtbaar

De aanwezige mollengaten (zie de T0 opname) hebben gedurende de proeven op St. Philipsland niet tot schade geleid. Wel was er sprake van een lichte toename van de grootte van de mollengaten als gevolg van slijtage door het stromende water.



## 8 Kattendijke, sectie 1: erosiebestendigheid grasbekleding

### 8.1 Inleiding

Na uitvoering van de proeven op St. Philipsland is de gehele meetopstelling verhuisd naar de locatie op Zuid-Beveland: Kattendijke. Hier is de meetopstelling weer opgebouwd op het eerste proefvak, waar de erosiebestendigheid van de op het binnentalud aanwezige grasbekleding is getest. In dit hoofdstuk zijn de resultaten van alle daar uitgevoerde proeven weergegeven.

### 8.2 Nulopname

De proefstrook bevindt zich op een dijk die bestaat uit een zandkern met een afdeklaag van klei. De dikte van de kleilaag op het binnentalud (ongeveer 1:3) zou volgens het ontwerp 0,60 m moeten zijn. De grasmat van de proefstrook zag er in verhouding tot de teststroken in Friesland slecht uit. Dit was voornamelijk het gevolg van een zeer grote hoeveelheid (ca. 70 = ca. 1/m<sup>2</sup>) mollengaten en -gangen in het testvak.

De kruin en de eerste 5 meter van het talud zagen er egaal en goed uit. Er waren twee lichte rijsporen en geen opvallende beschadigingen en geen mollengaten en gangen. De kruin kent kort gras en was licht vertrapt. Naast gras kwamen er meerdere kruiden voor. Iets lager op het talud is de heermoes een opvallende plant. Vanaf 5,5 m kwamen veel (platgetreden) molshopen en -gangen voor met concentraties rond 7, 10, 14 en 17 m. Aan de linkerkant rond de 7 en 8 m kende het talud een lichte deuk. Net na de teen was sprake van een zwaar rijspoor waarin de grasmat was beschadigd. Bijlage C-2 geeft een visuele weergave van de hierboven beschreven aangetroffen opmerkelijke zaken in de grasbedekking

### 8.3 Uitvoering

Tijdens de uitvoering van de proeven zijn geen noemenswaardige afwijkingen ten opzichte van het uitvoeringsregime van de proeven geconstateerd.

### 8.4 Resultaten

#### 8.4.1 Resultaten 0,1 en 1 l/s per m

Gedurende de proeven met 0,1 en 1 l/s per m zijn veel van de vele aanwezige molshopen weggespoeld, waardoor de ingangen van de molsgaten zichtbaar werden.

#### 8.4.2 Resultaten 10 l/s per m

Hoewel steeds meer kleine uithollingen zichtbaar werden en steeds meer kale plekken ontstonden was gedurende de proeven met 10 l/s per m geen sprake van substantiële erosie.

Wél ontstond er ter plaatse van de overgang talud – teen lichte schade aan de rechterkant van de teen (vanaf beneden naar de simulator gezien).

#### 8.4.3 Resultaten 30 l/s per m

Gedurende de proeven met 30 l/s per m ontstonden er erosiegaten op het horizontale vlak ter plaatse van de overgang talud – teen. Ook achter de onderhoudsweg (mijnsteen op een met zand opgevuld cunet) is schade ontstaan (zie Figuur 8-1). Om de schade te beperken is het gat afgedicht met kunststofrijplaten.



**Figuur 8-1** Schade achter de onderhoudsweg

Het talud vertoonde verder (nog) geen sporen van substantiële erosie. Dit werd echter wel verwacht toen de vele op het talud aanwezige mollengangen duidelijk zichtbaar waren geworden en nog gestart moest worden met de sessies met 30 l/s per m.

#### 8.4.4 Resultaten 50 l/s per m

Aan het eind van de proef met 50 l/s per m is een groot stuk voor én achter de onderhoudsweg geërodeerd. Het talud echter vertoonde nog steeds geen sporen van substantiële erosie. Nog altijd kon het water geen vat krijgen op de bekleding en de daaronder gelegen kleilaag (zie Figuur 8-2), ongeacht de duidelijk zichtbare mollengaten.



**Figuur 8-2** De toestand van het talud na twee sessies 50 l/s per m

#### 8.4.5 Resultaten 75 l/s per m

Tijdens de eerste 2 uur van de proef met 75 l/s per m is de proef stilgelegd omdat het gevaar bestond dat de meetcabine ondermijnd zou worden (zie Figuur 8-3). De schade aan de onderhoudsweg werd ondanks de aangebrachte rijplaten namelijk steeds groter en als gevolg van terugschrijdende erosie ontstond het gat langzaam maar zeker ook onder de platte wagen.



**Figuur 8-3** Ondermijning van de platte wagen (links) en herstel van de schade (rechts)

Nadat het gat was opgevuld met mijnsteen en de meetcabine was verplaatst, zijn de proeven hervat. Na een aantal grote golven was de opvulling al weer verdwenen en kon het gat in de onderhoudsweg gedurende de sessies langzaam groter en dieper worden (zie Figuur 8-4). Uiteindelijk was het gat aan het eind van de sessie ruim 15 meter bij 4 m en tot 1 meter diep!



**Figuur 8-4** Schade aan de onderhoudsweg

Als gevolg van terugschrijdende erosie (head cut erosie) kon het gat uiteindelijk ook het talud (met kleidam en grindkoffer) bereiken en aantasten. Zodra de zandkern bloot kwam te liggen, ontstond er door het uitspoelen van het zand snelle doorgaande erosie het talud op. Het talud brokkelde daarna snel af, waardoor het ontstane gat naar boven toe snel groter kon worden (zie Figuur 8-5). Om verdere schade aan het talud te voorkomen is de proef nagenoeg direct na het bereiken van de zandlaag (en ongeveer 20 minuten voor het einde van de laatste 2 uur van de proef met 75 l/s per m) gestopt. Het erosieproces (afbrokkelen van het verticale talud) ging daarna als gevolg van uitstromend water nog geruime tijd door.



**Figuur 8-5** Eindresultaat met blootliggende drainage

Na leegpompen van het gat bleek de in grindkoffer aanwezige drainage bloot te liggen (zie ook Figuur 8-5). De ontstane schade is direct hersteld door medewerkers van het Waterschap Zeeuwse Eilanden (zie Figuur 8-6)



**Figuur 8-6** Herstelwerkzaamheden schadebeeld

## 9 Kattendijke, sectie 2: invloed initiële schade aan teen en kruin

### 9.1 Inleiding

Omdat bij een van de door het Waterschap Zeeuwse Eilanden beheerde zeedijken een boer mest in het dijklichaam had geïnjecteerd zijn, om de invloed van initiële schade als gevolg van sneden met de mestinjecteur op de binnenkruin en teen van het talud te testen, door een mestinjecteur sneden van circa 5 cm diep aangebracht op zowel teen als binnenkruin van de dijk. Tevens is op een tweetal plaatsen op het talud (waarvan één nagenoeg op de kruin) een houten paal de grond in geslagen. Deze oppervlakkig ingeheide (circa 30 cm diep) palen reikten niet tot aan de zandlaag.

De invloed van zowel de sneden op de binnenkruin en teen van de dijk als de palen op het talud zijn beproefd vanaf een overslagdebiet van 30 l/s per m. Dit omdat bij de proeven op het eerste proefvak geen schade was opgetreden bij kleine overslagdebieten en de grasmatten met molshopen grote gelijkenis met die van het eerste proefvak vertoonden. De resultaten van de proeven zijn in dit hoofdstuk beschreven.

### 9.2 Nulopname

Voor deze proef is een teststrook geselecteerd die zoveel mogelijk op de eerste teststrook leek, waarbij de eerste meters ook zonder molshopen waren. Vervolgens is de zode op de kruin over de eerste 2 meter met een mestinjector ingesneden zonder dat mest is geïnjecteerd (geacht wordt dat de injectie van mest an sich geen invloed heeft op de sterkte van de bekleding op het binnentalud). Hetzelfde is bij de teen over de laatste 4 meter gedaan. Deze voren en de aangetroffen molshopen en "springschansen" zijn aangegeven in Bijlage C-3

### 9.3 Uitvoering

Om schade aan de onderhoudsweg tegen te gaan en ondermijning van de platte wagen te voorkomen is onder de platte wagen een non woven geotextiel aangebracht en verankerd. Tijdens de uitvoering van de proeven zijn geen noemenswaardige afwijkingen ten opzichte van het uitvoeringsregime van de proeven geconstateerd.

### 9.4 Resultaten

#### 9.4.1 Resultaten 30 l/s per m

Gedurende de proeven met 30 l/s per m ontstond linksonder aan het talud, net boven de teen en ter plaatse van de eerste injectorsnede een gat dat langzaam in omvang toenam (zie Figuur 9-1).



**Figuur 9-1** Erosie linksonder op het talud

Ter plaatse van de sneden aan de teen van de dijk werd de bekleding steeds kaler en ontstond ondanks de aangebrachte bescherming ter plaatse van de onderhoudsweg een gat.

#### 9.4.2 Resultaten 50 l/s per m

Aan het begin van de tweede twee uur van de proef met 50 l/s per m sloeg de laagste paal, die verticaal in het midden van het talud was geslagen, eruit. Hierbij werd een moot klei met bekleding iets naar beneden en omhoog gedrukt (zie Figuur 9-2). Achteraf bleek dit niet alleen door de paal te zijn veroorzaakt, maar ook door de bijna rondom en eronder aanwezige mollengangen.



**Figuur 9-2** Initiële schade als gevolg van het eruit slaan van een verticaal in het talud geslagen paal

Hoewel de verwachting was dat de moot bij volgende grote golven eruit zou slaan, gebeurde er uiteindelijk helemaal niets. Ondanks het feit dat klei onder de moot erodeerde, zat de moot voldoende vast om er niet door de golven uitgeslagen te worden. De moot zakte uiteindelijk na erosie van de klei weer langzaam in (zie Figuur 9-3) en het water stroomde weer over het talud zonder verder schade te veroorzaken.





**Figuur 9-3** De moot klei met bekleding zakte gedurende de derde sessie weer in

Het gat dat zich reeds tijdens de proef met 30 l/s per m aan de teen van de dijk ontwikkelde werd steeds groter. Ook de onder de bekleding aanwezige grindkoffer was nu zichtbaar (zie Figuur 9-4). Aangezien verwacht werd dat de schade zich bij 75 l/s per m drastisch zou uitbreiden, is besloten de proeven te stoppen.



**Figuur 9-4** De grindkoffer (links) en de ontstane schade ter plaatse van de door de mestinjecteur aangebrachte schade aan de teen van de dijk

De sneden met de mestinjecteur in de teen van de dijk hebben lichte schade ten gevolg gehad. De ter plaatse van de teen ontstane schade is begonnen bij de eerste injectorsnede. De ontstane schade heeft echter niet geleid tot verder schade. De sneden op de binnenkruin van de dijk hebben géén zichtbare invloed gehad.

Los van de messneden is een groot gat ontstaan aan de teen van de dijk en had de initiële schade als gevolg van het eruit slaan van de paal in het talud tot meer schade kunnen leiden. Aangezien bij het eerste proefvak een soortgelijke schade was ontstaan aan de teen van de dijk, kan niet met zekerheid gesteld worden of deze schade het gevolg is geweest van de mestinjecteur.

Aan het eind van de proef is, ter plaatse van de initiële schade door de uitgeslagen paal, op het midden van het talud de moot uitgegraven (zie Figuur 9-5). Rondom en onder de moot grond bevonden zich mollengaten die tot ruim 50 cm diepte in de kleilaag reikten. Bij het verder uitgraven van het gat bleek de aanwezige kleilaagdikte 0,75 m te zijn, 0,15 m dikker dan ter plaatse voorgeschreven.



**Figuur 9-5** De onder de uitgraven moot aanwezige mollengaten

## 10 Kattendijk, sectie 3 en 4: overslagbestendigheid harde bekledingen

### 10.1 Inleiding

Op het derde en vierde proefvak is de overslagbestendigheid van zowel Elastocoast® als open steenasfalt getest (zie Figuur 10-1). Hiertoe zijn de graszoden van beide vakken verwijderd en is op de op de kleilaag aangebrachte geotextiel een circa 0,15 m dikke harde bekleding aangebracht. De overslagbestendigheid van beide materialen is getest bij 30, 75 en 125 l/s per m. De resultaten van beide proeven zijn in dit hoofdstuk weergegeven.



**Figuur 10-1** Proeven op Elastocoast® (links) en open steenasfalt (rechts)

### 10.2 Resultaten

#### 10.2.1 Elastocoast®

Gedurende de eerste golven is een onbekende hoeveelheid los materiaal weggespoeld. Verder is de dijkbekleding onaangetast gebleven. Bij grote golven is her en der op het talud een stukje breuksteen losgeraakt, maar dit was enkel oppervlakkige schade (als je dit al schade mag noemen). Gesteld kan worden dat Elastocoast® als dijkbekledingsmateriaal in deze proef een overslagdebiet van 125 l/s per m kon weerstaan.

#### 10.2.2 Open steenasfalt

Bij de proeven met open steenasfalt is, naast een onbekende hoeveelheid losse steentjes bij de eerste golven, enkel aan de randen schade opgetreden, wat een gevolg was van slechte randafwerking door de aannemer (zie Figuur 10-2). Getracht is deze schade te herstellen met koud asfalt, maar deze hechtte niet en na enkele golven was de opvulling dan ook al weer

verdwenen. Behalve de randeffecten heeft het open steenasfalt geen verdere schade ondervonden bij de grote overslagdebieten en kan ook hier worden geconcludeerd dat open steenasfalt, mits goed aangebracht, voldoende sterk was om in deze proef een overslagdebiet van 125 l/s per m te weerstaan



**Figuur 10-2** Randeffect open steenasfalt

Hoewel stevige maatregelen (aanbrengen en verankeren geotextiel en kunststofrijplaten) zijn getroffen om erosie van de onderhoudsweg te voorkomen is na afronding van de proeven uiteindelijk een groot gat ontstaan achter de onderhoudsweg. De onderhoudsweg zelf was licht beschadigd (zie Figuur 10-3).



**Figuur 10-3** Beschadiging onderhoudsweg (links) en gat achter onderhoudsweg (rechts) na uitvoering proeven op open steenasfalt

## 11 Observaties en voorlopige conclusies

### 11.1 Observaties en voorlopige conclusies gebaseerd op proeven Zeeuwse dijken

Na afloop van de proeven kan gesteld worden dat enkel op St. Philipsland schade op het binnentalud als gevolg van golfoverslag heeft plaatsgevonden. Deze schade trad, in tegenstelling tot de proeven op de Friese Waddenzeedijk, reeds op bij een kleiner overslagdebiet: 50 i.p.v. 75 l/s per m. Bij de kleinere overslagdebieten leidde de overslag niet tot schade.

Op Zuid-Beveland is voornamelijk (grote) schade ontstaan ter plaatse van de onderhoudsweg. Als gevolg van terugschrijdende erosie (head cut erosie) is op het eerste proefvak het talud uiteindelijk ook aangetast. Zodra de zandkern bloot kwam te liggen, ontstond er door het uitspoelen van het zand grote schade. Het talud brokkelde langzaam maar zeker af, waardoor het ontstane gat naar boven toe groter werd. Net als bij de proeven op Friese Waddenzeedijk vormen overgangen (van talud naar horizontaal) een bron voor initiële schade en doorgaande erosie.

De proeven bij Kattendijke laten zien dat de grasbekleding, ondanks de aanwezigheid van molshopen en -gaten, bestand was tegen proeven met een overslagdebiet met 75 l/s per m.

De sneden met de mestinjecteur hebben lichte schade ten gevolg gehad. De ter plaatse van de teen ontstane schade is begonnen bij de eerste injectorsnede. De ontstane schade heeft echter niet geleid tot verder schade. De sneden op de binnenkruin van de dijk hebben géén zichtbare invloed hebben.

Los van de messneden is een groot gat ontstaan aan de teen van de dijk en had de initiële schade als gevolg van het eruit slaan van de oppervlakkige in het binnentalud geslagen paal tot meer schade kunnen leiden. Aangezien bij de eerste proefstrook op Kattendijke een soortgelijke schade was ontstaan aan de teen van de dijk, kan niet met zekerheid gesteld worden of deze schade het gevolg is geweest van de mestinjecteur.

Zowel Elastocoast® als open steenasfalt blijken, mits goed aangebracht, zeer overslagbestendig: een overslagdebiet van 125 l/s per m heeft geen enkele vorm van schade opgeleverd bij beide harde dijkbekledingen.

## 11.2 Observaties en voorlopige conclusies, gebaseerd op alle overslagproeven

Deltares brengt in het kader van WV21 advies uit aan de Waterdienst omtrent het onderwerp doorbraakvrije dijken. Er is een werkgroep in het leven geroepen om de discussie en uitwerking van ideeën te stroomlijnen.

Begin 2008 is veel inzicht verkregen omtrent sterkte van binnentaluds van dijken bij golfoverslag door de proeven met de golfoverslagsimulator. Inmiddels zijn proeven uitgevoerd in Groningen, Friesland en Zeeland en bij een aantal proeven zijn de binnentaluds bij zware golfoverslag bezweken. Analyse zal later plaatsvinden en uiteindelijke conclusies komen pas in 2011 in de nieuwe VTV terecht.

Bovengenoemde werkgroep heeft gevraagd voorlopige conclusies omtrent alle uitgevoerde overslagproeven op te stellen en op basis hiervan naar het onderwerp doorbraakvrije dijken te kijken. Dit advies is door Deltares uitbesteed aan Van der Meer Consulting. Maar met het stellen van voorlopige conclusies moet voorzichtig worden omgegaan, omdat ze al te gemakkelijk voor definitieve conclusies worden aangezien. Daarom is bij het opstellen van voorlopige conclusie de projectgroep betrokken, die de proeven heeft opgezet, uitgevoerd en begeleid. Het is een gezamenlijk werk van de projectgroep, wat net zo goed van belang is voor genoemde werkgroep als voor het SBW-werk naar erosiebestendigheid van binnentaluds bij golfoverslag.

Omdat het een totaal overzicht geeft (en dus niet alleen het onderwerp in dit factuele rapport), is het geheel van observaties, voorlopige conclusies en schadebeelden, in dit rapport als een bijlage opgenomen. Dit is Bijlage E.

## BIJLAGEN



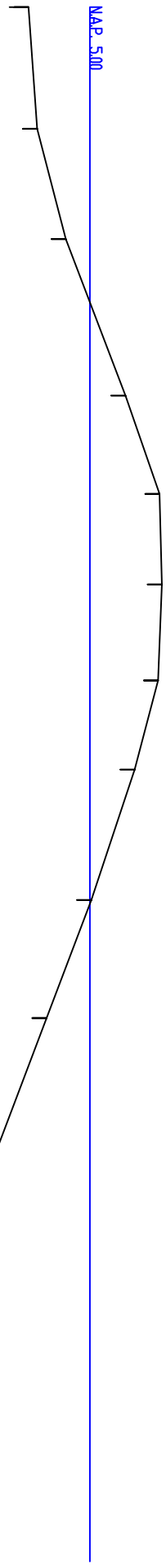


## A. Tekeningen



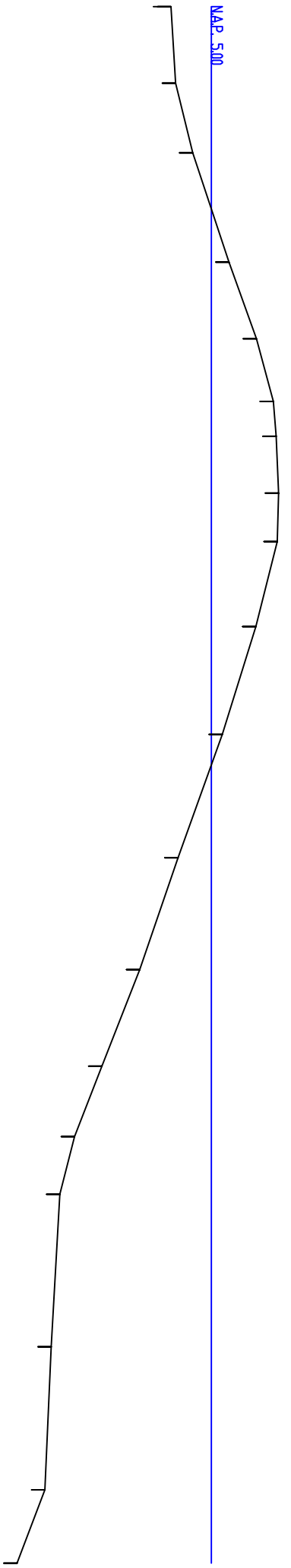
Afstand tov. nulpunt	Hoogte tov. N.A.P.
0.00	3.71
2.57	3.89
4.89	4.49
8.20	5.75
10.27	6.46
12.18	6.51
14.20	6.43
16.08	5.94
18.84	5.03
21.32	4.09
24.35	2.95
26.59	2.08
27.79	1.64
29.05	1.51
32.78	1.53

01 School th 100 Vt 100

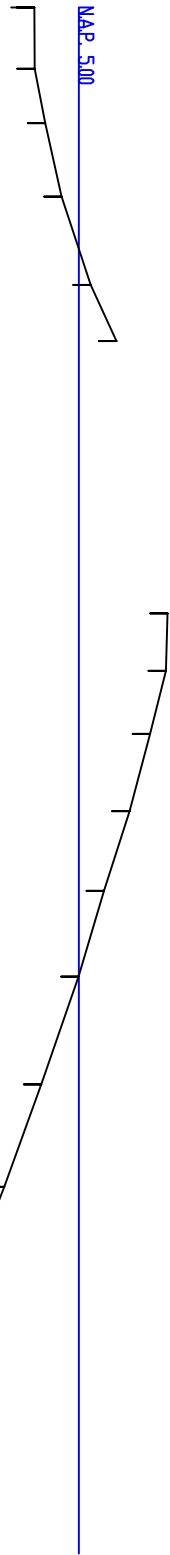


Afstand tov. nulpunt	Hoogte tov. N.A.P.
0.00	4.09
1.74	4.19
3.31	4.58
5.79	5.40
7.53	6.02
8.95	6.40
9.74	6.47
11.02	6.52
12.12	6.49
14.05	6.01
16.49	5.25
19.29	4.25
21.82	3.38
24.01	2.52
25.61	1.91
26.91	1.57
30.37	1.38
33.61	1.23
35.27	0.60

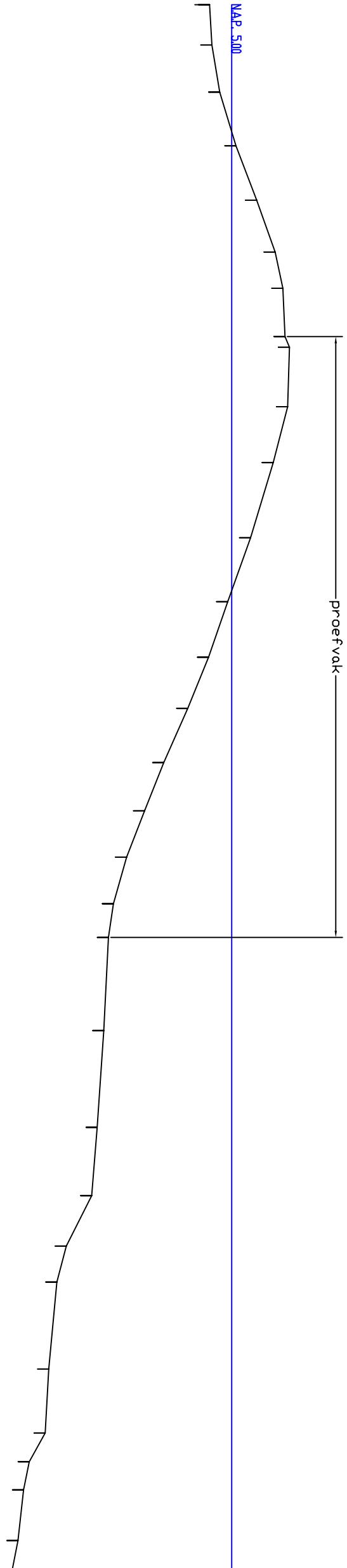
02 School th 100 Vt 100



03. School II 100 V. 100	
Afstand t.o.v. nulpunt	Hoogte t.o.v. NAP.
0.00	4.24
1.05	4.24
1.99	4.42
3.25	4.70
4.77	5.20
5.74	5.65
10.42	6.52
11.41	6.50
12.49	6.22
13.82	5.87
15.19	5.43
16.67	4.99
18.52	4.35
20.28	3.72
21.84	3.11
23.43	2.53
25.06	2.05
26.59	1.73



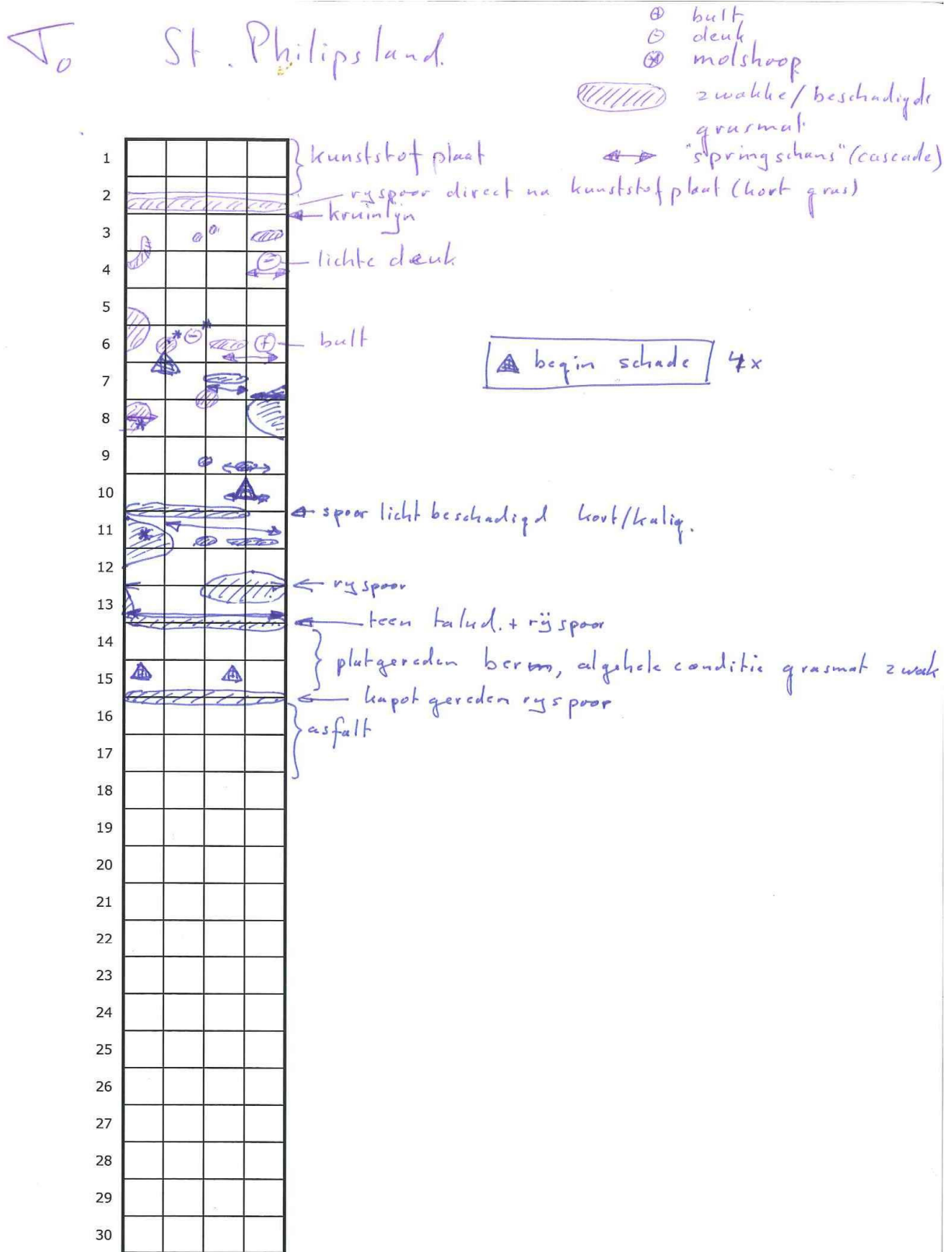
04. School II 100 V. 100	
Afstand t.o.v. nulpunt	Hoogte t.o.v. NAP.
0.00	4.40
1.09	4.46
2.37	4.67
3.83	5.11
5.30	5.68
6.71	6.18
7.70	6.38
9.01	6.44
9.30	6.56
10.91	6.51
12.43	6.13
14.47	5.51
16.20	4.89
17.71	4.37
19.10	3.81
20.57	3.16
21.88	2.64
23.14	2.15
24.41	1.79
25.32	1.66
27.85	1.53
30.47	1.35
32.33	1.20
33.70	0.52
34.68	0.26
37.04	0.04
38.77	-0.06
39.55	-0.49
40.32	-0.64
41.69	-0.79
42.46	-0.94



## B. Nulmetingen

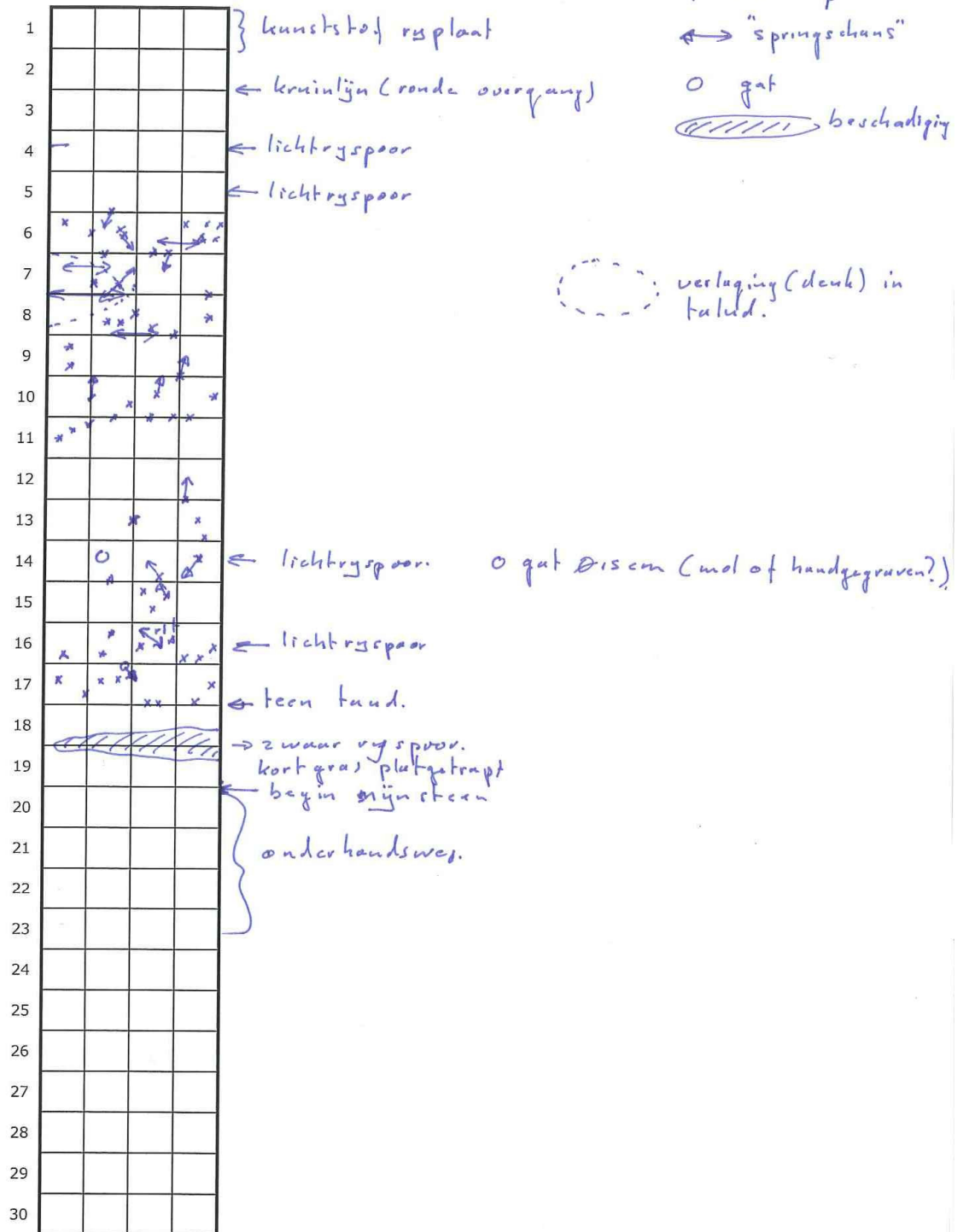


B.1 Proefstrook St. Philipsland



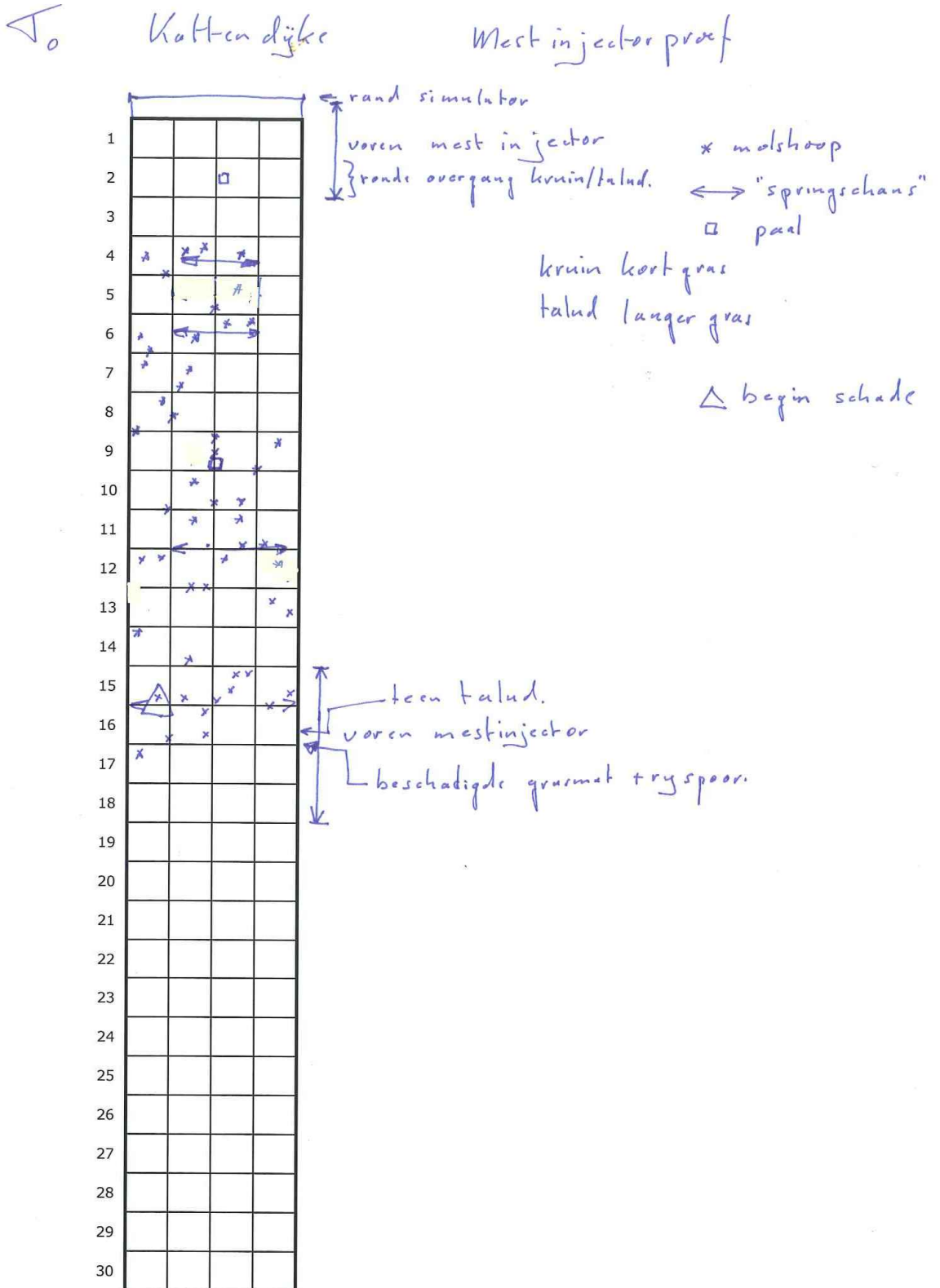
B.2 Proefstrook 1 Kattendijke

↖ Kattendijke Proefvak 1 (gras)





B.3 Proefstrook 2 Kattendijke





## C. Samenvatting proeven

	<b>Boonweg</b>			
	<i>sectie 1</i>	<i>sectie 2</i>	<i>sectie 3</i>	<i>sectie 4</i>
<b>Opbouw dijk</b>				
kern	zand	zand	zand	zand
dikte kleilaag (m)	0,6	0,6	0,6	0,6
lengte binnentalud (m)	27	27	27	27
taludhelling	1:2,9	1:2,9	1:2,9	1:2,9
<b>Beheer</b>				
type grasland beheer volgens VTV	B	B	A	B
categorie beheer volgens VTV	I	WW	HH	HW
bemesting	<70 kg	geen	geen	geen
maaaien	1x	geen	2x hooien	1x hooien
beweiding	4x	2x	geen	1x hooien
bestrijding	geen	geen	geen	geen
categorie graszode	matig	matig	goed	matig
muizen/mollen	enkele	enkele	enkele	enkele
<b>Kleikwaliteit</b>				
vloeigrens Wi (%)	29	29	29	29
plasticiteitsindex Ip (%)	6	6	6	6
zandgehalte Zk (%)	60	60	60	60
lutum (%)	13	13	13	13
Categorie klei volgens VTV	c3	c3	c3	c3
<b>Vegetatie</b>				
vegetatietype volgens VTV	W2	W2	H3	W2
categorie graszode volgens VTV	matig	matig	goed	matig
geschatte bedekking (%)	99	99	90	90
gemeten bedekking (%)	97	94	92	88
beschadiging	zode gesloten	zode gesloten	zode pollig	zode gesloten
score doorworteling op basis van VTV2006	goed	goed	goed	goed
<b>Maximum overslag</b>				
maximum debiet (l/s per m)	75	75	75	75
duur maximum	6 uur	6 uur	6 uur	5 uur 50 minuten
<b>Schadebeeld</b>				
	geen schade talud; gat in teen	geen schade talud; gat in teen	ballon- mechanisme; groot grasoppervlak geërodeerd; geen gat in kleilaag;	ballon- mechanisme; gat in kleilaag tot aan zandkern; talud bezweken; gat in teen

## D. Overzicht metingen



	Datum	Proef (l/s per m)	Proef- strook	Bekleding	Beheer	Sessie	Tijd		Visuele meting laagdikte	Controle pompdebiet	Data							
							Begin	Eind			Foto		Video	Laagdikte	Water- spanning	Tensio- meters	Theta- probes	
											Talud (einde sessie)	Details						
wo	12-mrt	0,1	1	Grasbekleding	Regulier	-	14:15		Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja		
		1,0				-	14:45		Nee	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja		
do	13-mrt	10,0				0 - 2	8:40	10:56	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
						2 - 4	11:23	13:23	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
		30,0				4 - 6	13:55	15:55	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
						0 - 2	16:25	18:25	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
ma	17-mrt	30,0				2 - 4	8:40	10:40	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	
						4 - 6	11:15	13:15	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	
		50,0				0 - 2	13:36	15:36	Nee	Ja	Ja	Nee	Nee*	Ja	Ja	Ja	Ja	
						2 - 4	16:10	18:10	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee*	Ja	Ja	Ja	Ja	
di	18-mrt	50,0							4 - 6	8:20		Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

\* bestand corrupt

Tabel D-1 Overzicht metingen St. Philipsland

	Datum	Proef (l/s per m)	Proefstrook	Bekleding	Beheer	Sessie	Tijd		Visuele meting laagdikte	Controle pompdebiet	Data							
							Begin	Eind			Foto		Video	Laagdikte	Water-spanning	Tensio-meters	Theta-probes	
											Talud (einde sessie)	Details						
do	20-mrt	0,1	1	Grasbekleding	Regulier	-	13:05		Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja		
		1,0				-	13:45	14:55	Nee	Nee	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	
		10,0				0 - 2	16:04	18:04	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	
vr	21-mrt	10,0				2 - 4	9:13	11:13	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja**	Nee	Ja	Ja	Ja	
		10,0				4 - 6	11:33	13:33	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja**	Nee	Ja	Ja	Ja	
		30,0				0 - 2	7:18	9:18	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
di	25-mrt	30,0				2 - 4	10:04	12:04	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
		30,0				4 - 6	12:28	14:28	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
		50,0				0 - 2	14:56	16:56	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
wo	26-mrt	50,0				2 - 4	8:31	10:31	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
		50,0				4 - 6	10:52	13:33	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
		75,0				0 - 2	13:33	15:16	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	
do	27-mrt	75,0	0 - 2	8:00	8:45	Nee	Nee	Nee	Ja	Ja**	Nee	Ja	Ja	Ja				
		75,0	2 - 4	8:45	10:45	Nee	Nee	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja				
		75,0	4 - 6			Nee	Nee	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Ja	Ja				
ma	31-mrt	10,0	2	Grasbekleding (simulatie mestinjectie overgangsstruc-tie)	Regulier	0 - 2	14:26	17:08	Nee	Ja	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	
di	1-apr	30,0				0 - 2	8:10	10:10	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee
		30,0				2 - 4	10:20		Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	
		30,0				4 - 6	13:15	15:15	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	
		50,0				0 - 2	15:49	17:49	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	
wo	2-apr	50,0				2 - 4	18:10	18:30	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee
		50,0				2 - 4	7:52	9:52	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja**	Ja	Nee	Nee	Nee	
		50,0				4 - 6	10:06	12:06	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee	
		30,0				0 - 2	9:48	11:48	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	
do	3-apr	30,0				2 - 4	12:13	14:13	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee
		30,0				4 - 6	14:50	16:50	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee
		75,0				0 - 2	17:38	19:55	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee
vr	4-apr	75,0	2 - 4	7:24	9:24	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee			
		75,0	4 - 6	9:43	11:43	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee				
		125,0	0 - 2	8:22	10:22	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee*	Nee	Nee	Nee	Nee				
ma	7-apr	125,0	2 - 4	10:22	12:22	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee*	Nee	Nee	Nee	Nee			
		125,0	4 - 6	12:22	14:22	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee*	Nee	Nee	Nee				
		125,0	0 - 2	12:02	14:02	Nee	Ja	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee				
di	8-apr	30,0	2 - 4	14:02	16:02	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee			
		30,0	4 - 6	16:02	18:02	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee				
		30,0	0 - 2	7:45		Nee	Nee	Nee	Nee	Nee*	Nee	Nee	Nee	Nee				
wo	9-apr	75,0	2 - 4			Nee	Nee	Nee	Nee	Nee*	Ja	Nee	Nee	Nee				
		75,0	4 - 6			Nee	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee				
		125,0	0 - 2	18:07	20:07	Nee	Nee	Nee	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Nee				
do	10-apr	125,0	2 - 4	8:05	10:05	Nee	Nee	Nee	Nee	Nee*	Nee	Nee	Nee	Nee				
		125,0	4 - 6	10:05	12:05	Nee	Nee	Ja	Ja	Nee*	Nee	Nee	Nee	Nee				

\* bestand corrupt

\*\* gedeeltelijk gefilmd



## **E. Voorlopige conclusies golfverslagproeven**



## Voorlopige conclusies golfoverslagproeven

In het kader van ComCoast is in 2006 de golfoverslagsimulator ontwikkeld en gebouwd en zijn in maart 2007 de eerste proeven uitgevoerd naar sterkte van binnentaluds (erosie) door golfoverslag. Voor een deel was hier ook het SBW-programma van de Rijkswaterstaat betrokken. In februari-april 2008 is verder een redelijk aantal dijken onderzocht op, deels in het kader van SBW en deels in opdracht van het Projectbureau Zeeweringen in Zeeland. Doel van het SBW-programma is uiteindelijk een Technisch Rapport op te stellen omtrent sterkte van binnentaluds bij golfoverslag en nieuwe toetsregels te maken voor de VTV 2011.

Met name begin dit jaar is veel extra informatie verkregen, omdat de simulator was vergroot en er daardoor ook inderdaad schademechanismen zijn opgetreden. Er is echter nog geen tijd geweest om alle informatie van dit jaar te analyseren, na te rekenen, en conclusies uit te trekken.

In het kader van deze studie naar doorbraakvrije dijken is het echter wel gewenst om de resultaten mee te nemen en voorlopige conclusies te trekken op basis van wat we momenteel weten. Het trekken van voorlopige conclusies moet echter wel voorzichtig gebeuren, want in de praktijk zullen ze maar al te gemakkelijk voor definitieve conclusies doorgaan. Om deze reden is de volledige projectgroep, die bij de proeven was betrokken, geraadpleegd en zijn de voorlopige conclusies gezamenlijk vastgesteld. De status van deze voorlopige conclusies is niet anders dan een breed gedragen tussenstap op weg naar een nieuwe VTV 2011.

De proeven met de golfoverslagsimulator zijn in een bepaald kader uitgevoerd met bepaalde randvoorwaarden. De voorlopige conclusies zijn dan ook alleen toepasbaar binnen dit onderzochte kader. Dit kader ziet er als volgt uit.

- Het gaat uitsluitend om *erosie van binnentaluds* van dijken door golfoverslag. Het mechanisme grootschalig (oppervlakkig) afschuiven door infiltratie van overslaand water is uitdrukkelijk niet onderzocht. Dit onderzoek zal de komende jaren nog wel worden uitgevoerd. Afschuiven door infiltratie is belangrijk bij steile binnentaluds. In het algemeen worden binnentaluds van zee- en meerdijken ontworpen met een 1:3 talud, waarbij wordt aangenomen dat afschuiving dan niet zal optreden. Bij de voorlopige conclusies wordt dit mechanisme dus niet beschouwd.
- De proeven zijn uitgevoerd met als aanname een golfhoogte voor de dijk van ongeveer 2 m. Dit is een gemiddelde waarde voor toetsomstandigheden van zee- en meerdijken. Dijken met een veel grotere golfaanval (bijvoorbeeld bij Petten) of met een golfaanval die kleiner is dan ongeveer 1 m (veel rivierdijken), vallen daarmee niet in het onderzochte kader. Bij een grotere golfhoogte dan 2 m gaan er bij hetzelfde debiet minder golven over de dijk, maar dan wel met een groter volume per golf (waardoor de maximale belasting groter is). Bij kleinere golven gaan er veel meer golven overheen, maar met een kleiner volume. Bij grote overslagdebieten zal het al vrij gauw op overlopen lijken. De voorlopige conclusies gelden dus vooral voor *zee- en meerdijken met een gemiddelde golfaanval*.
- De binnentaluds hadden hellingen tussen 1:2,5 en 1:3. Steilere taluds met eventueel een berm aan de binnenzijde, zoals bij sommige bovenrivierdijken, vallen dus niet in het onderzochte kader.
- Er zijn alleen secties van 4 m breed onderzocht. De resultaten geven niet direct aanleiding dat dit een te smalle sectie was, alhoewel geïnfilterd water wel via de bodem zijdelings kon wegstromen. Alle schade ontstond in de sectie en niet tegen de sectiewanden.
- Elk beproefd overslagdebiet had een duur van 6 uur. Er werd met kleinere overslagdebieten begonnen en vervolgens werd na een elke 6 uur het overslagdebiet verhoogd, op dezelfde sectie. Een sectie die bijvoorbeeld met 75 l/s per m werd

beproefd, had al 6 uur lang 10; 30 en 50 l/s per m te verduren gekregen. Als de piek van de storm langer dan 6 uur duurt en de golfverslag orde 30 l/s per m of meer bedraagt, dan zijn de voorlopige conclusies niet van toepassing.

In deze bijlage is een groot aantal foto's gegeven van resultaten van alle uitgevoerde proeven, zie figuren B1 – B32. Bij elke foto is extra informatie gegeven. Het doorneemen van deze fotocollage geeft een goed beeld van wat er allemaal is gebeurd op de diverse locaties. Een kort overzicht van uitgevoerde proeven, met de voornaamste kenmerken, is onderstaand gegeven.

**Delfzijl** (volledige kleidijk)

- ❖ Gewone grasbekleding
- ❖ Versterkte grasmatt (geotextiel; Smart Grass Reinforcement - SGR)
- ❖ Kale klei (20 cm zode weg gehaald)

**Boonweg** (60 cm klei aan binnenzijde dijk op een zandkern)

- ❖ Normaal beheer, beweiding
- ❖ 2x weiden, geen kunstmest
- ❖ 1x weiden, 1x hooien, geen kunstmest
- ❖ 2x hooien, geen kunstmest

**St Philipsland** (60 cm klei op zandkern – ter plaatse van schade was dit 40 cm)

- ❖ 1x hooien, steil talud (1:2,5), slechte bedekking

**Kattendijke** (60 cm klei op een zandkern – ter plaatse van schade was dit 75 cm)

- ❖ 1x hooien, slechte bedekking, zeer veel mollen
- ❖ idem, beschadiging gierinjecteur; 2 palen in talud
- ❖ elastocoast en open asfaltbeton
- ❖ 20 minuten demonstratie voor watermanagers uit Florida

Een meer uitgebreid overzicht met kenmerken is gegeven in Tabel B1, waarbij Deltares de kenmerken met betrekking tot klei heeft toegeleverd en Alterra de kenmerken met betrekking tot de graszode en deels het beheer.

Als eerste worden hier de **observaties** gegeven van de proeven. Dit zijn beschrijvingen van wat er is voorgevallen en interpretaties zijn daarbij zoveel mogelijk weg gelaten. Deze observaties zijn niet voorlopig, alhoewel in de definitieve rapportage van de proeven wel nuance verschillen met deze rapportage kunnen ontstaan.

Op basis van de observaties worden **voorlopige interpretaties** en **conclusies** getrokken, welke binnen het onderzoekskader vallen, zoals boven geschetst.

De volgende **observaties** zijn gemaakt.

1. Geen enkel binnentalud van een proefvak gaf significante schade bij 30 l/s per m, gedurende 6 uur simulatie.
2. 1 proefvak gaf grote schade bij 50 l/s per m (St Philipsland). Het binnentalud was 1:2,5 met 0,4 m zandige klei op een zandkern en een open zode.
3. Pas bij 75 l/s per m ontstond bij een aantal proefvakken grote schade, maar een groot deel van de proefvakken doorstond ook deze belasting goed.
4. Aan de overgang van de kruin naar het binnentalud is nooit schade ontstaan.

5. Elastocoast en open asfaltbeton gaven geen schade bij 125 l/s per m. Een kleine reparatie met koud asfalt spoelde vrijwel direct weer weg.
6. Overgangen talud-horizontaal geven schade (in 6 van de 9 vakken); soms al bij 30 l/s per m, maar vooral bij 50 l/s per m of meer. Een onderhoudsweg van gravel is in droge omstandigheden hard en stabiel om op te rijden, maar er ontstaat uitspoeling en grote schade bij 30 l/s per m of meer overslag.
7. Een gat in de klei met een verticaal talud geeft het ontstaan van het mechanisme "head cut erosie". Het verticale talud brokkelt af en het gat wordt naar boven toe groter. Dit mechanisme is in 4 proefvakken ontstaan.
8. Een beschadiging (gat) door de kleilaag heen tot op het zand (bij 50 l/s per m of meer) geeft direct grote schade, de zandkern spoelt zeer snel uit, ook volgens het head cut erosie mechanisme.
9. 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.
10. 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.
11. De versterkte grasmat bij Delfzijl (SGR – Smart Grass Reinforcement) is bij schade aangebracht aan de grasmat sterker dan de gewone dijk.
12. Bij een aantal proefvakken kwamen veelvuldig mollen en soms 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.
13. Op twee dijkvakken, (vrijwel) zonder beweiding en met een sterke zode, kwam het "ballonmechanisme" voor bij 75 l/s per m. Dit mechanisme was niet bekend.
14. Schade aangebracht door een gierinjecteur was geen aanleiding tot initialisatie van een schademechanisme bij golfoverslag.
15. Net geplaatste palen met een kleine diameter zijn in het algemeen geen obstakels die aanleiding geven tot schade. Eén paal (Kattendijke) werd uit het talud gerukt, met name omdat deze ondiep (30 cm) in of bij een stelsel van mollandingen was geplaatst. Er ontstond echter geen doorgaande schade. Palen of obstakels met grote diameter, zoals bijvoorbeeld dijpalen, zijn niet onderzocht.

Bovenstaande observaties leiden tot de volgende **voorlopige conclusies**, geldend binnen het omschreven kader.

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. Alleen verder onderzoek kan deze conclusie meer definitief maken.
2. Het lijkt dat erosiebestendigheid van het binnentalud vooral wordt bepaald door het gras en minder door de kwaliteit 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.
3. Overgangen talud-horizontaal zijn mogelijk 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. Dan ontstaat de schade wel helemaal beneden aan de dijk en moet er veel tijd zijn om een doorbraak te veroorzaken. Andere overgangen van talud naar horizontaal zijn niet onderzocht, maar geven mogelijk hetzelfde beeld. Te denken valt aan fietspaden, hoger gelegen onderhoudswegen, binnenbermen, tractorsporen, schapenpaadjes, dijkovergangen, trappen, op- en afritten, etc. Verder onderzoek zou hier uitsluitsel kunnen geven.
4. 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.
5. Kleine obstakels als palen hebben geen erosie laten zien. Grotere niet waterkerende elementen, zoals dijkpalen of dijkstenen, of een afrastering die al lange tijd staat (met mogelijk muizen- en mollengaten in het niet gemaaid gras er om heen en een afwijkende bodemstructuur) zijn niet onderzocht en kunnen mogelijk wel aanleiding zijn tot schade. Ook hier is verder onderzoek nodig voor meer definitieve conclusies.

Met betrekking tot bovenstaande observaties en voorlopige conclusies, kan de volgende aanbeveling worden gemaakt:

Het verdient aanbeveling verdere proeven onder meer te richten op:

- rivierdijken met andere golfomstandigheden en andere binnentaluds, zodat ook voor rivierdijken meer definitieve conclusies kunnen worden getrokken;
- overgangen in het talud, zoals fietspaden, hoger gelegen onderhoudswegen, binnenbermen, tractorsporen, schapenpaadjes, dijkovergangen, trappen, op- en afritten, etc;
- grotere niet-waterkerende obstakels in het talud, zoals dijkpalen of dijkstenen, of een afrastering die al lange tijd staat.



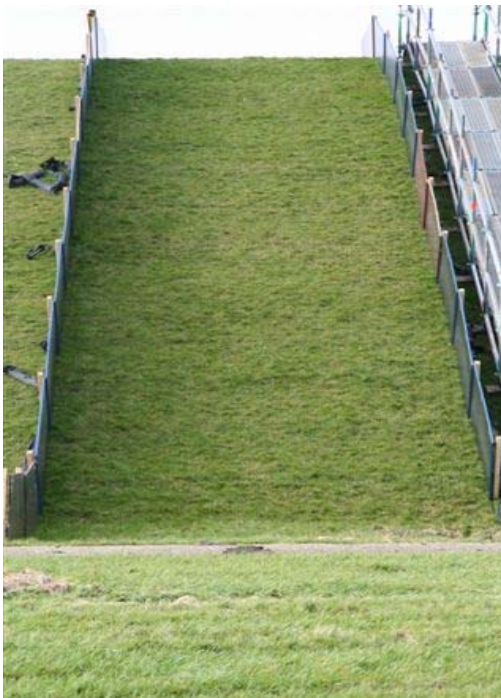
Figuur B1. Eindresultaat Delfzijl. Links de normale dijk na aanbrengen van beschadigingen (1x1x0,05 m; 0,4x0,4x0,15 m; bovenin 2 gaten 0,15x0,15x0,15 m; drie palen in talud) en na 6 uur met 50 l/s per m. Rechts de versterkte SGR-sectie, waarbij geen geulvorming optreedt (op het gewone dijkvak wel).



Figuur B2. Eindresultaat Delfzijl. Kale kleidijk (0,2 m grasbedekking weg gehaald). Debieten van 1; 5; en 10 l/s per m gedurende elk 6 uur. Erosie bij elke proef, bij het grootste gat uiteindelijk uitmondend in head cut erosie (horizontaal deel met verticaal talud; verticaal talud brokkelt af en het gat vergroot zich naar boven).



Figuur B3. Eindresultaat Boonweg, eerste sectie. Kleidek van 0,6 m op zandkern. Normaal beheer (hele zomerseizoen beweiden, bijmaaien en 70 kg/hectare stikstof). Geen schade aan talud na 75 l/s per m; Na 4 uur van 50 l/s per m beschadiging horizontale deel (teen), waar een oud klinkerpaadje aanwezig bleek. Deze schade zette zich door bij 75 l/s per m (foto rechts).



Figuur B4. Eindresultaat Boonweg; tweede sectie. Beheer: tweemaal beweiden, tweemaal hooien en geen stikstof gedurende 17 jaar. Geen schade talud na 75 l/s per m. In laatste uur van 75 l/s per m beschadiging aan de teen (klinkerpaadje, zie foto rechts).

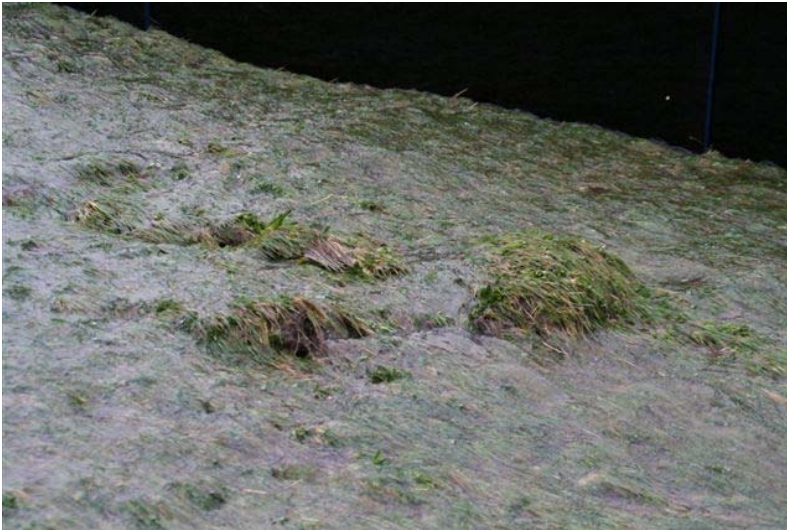




Figuur B5. Initiële schade Boonweg; sectie 3. Tweemaal hooien, geen kunstmest en in 17 jaar geen beweiding. Schade op de foto in het tweede uur van 75 l/s per m. Op dat moment voelde de grasmat “sponzig” aan. Mogelijk is door de losse bovenstructuur klei geërodeerd tussen de wortels. De kracht van het water op het gras met het bovenste deel van de wortels werd zo groot dat onder de zode de wortels zijn geknapt. Er ontstond een “ballon”, gevuld met water. Bij een van de volgende golven werd de ballon opengeslagen en verdween een deel van de grasmat.



Figuur B6. Eindresultaat Boonweg, sectie 3 (zie ook figuur 5). Het ballonmechanisme ontstond nogmaals in het laatste uur van 75 l/s per m en de twee beschadigingen kwamen uiteindelijk samen. Dit resulteerde in een groot stuk waar de grasmat was weggeslagen, inclusief de teen met klinkerpaadje. Er ontstond echter (nog) geen gat door de kleilaag heen. Resultaat na 75 l/s per m.



Figuur B7. Initiële schade Boonweg; sectie 4. Eenmaal beweiden, eenmaal hooien en geen stikstof gedurende 17 jaar. Ontstaan "ballonmechanisme" in laatste uur van de 75 l/s per m proef. In dit geval duurde het circa 5 minuten voordat de ballon door een grote golf openbrak.



Figuur B8. Boonweg; sectie 4. Direct na openbreken van ballon in figuur 7.



Figuur B9. Boonweg; sectie 4. Na het ontstaan van het gat in figuur 8, de onmiddellijke vorming van een tweede ballon, die aan de onderkant deels "lek" is.



Figuur B10. Boonweg; sectie 4. Het openslaan van de tweede ballon enkele minuten nadat deze was ontstaan. Er zit nog een kleilaagje aan de wortels, wat bevestigt dat de wortels zijn geknapt op de diepte waar het aantal wortels duidelijk minder is dan daarboven. Het aanwezig zijn van de kleilaag geeft de reden waarom de "ballon" zo waterdicht is, want de grasmat zelf is natuurlijk niet waterdicht.



Figuur B11. Boonweg; sectie 4. Ongeveer 5 minuten nadat de tweede ballon is losgeraakt. Links in het midden is een gat in de klei zichtbaar met een verticaal talud. Hier zal het gat zich uitbreiden en de zandkern worden bereikt.



Figuur B12. Eindresultaat Boonweg; sectie 4, na 5 uur en 51 minuten met 75 l/s per m. De zandkern is zeker 1 m diep weggespoeld en aan de rechter zijkant staat de zijwand van de goot op instorten. Eindresultaat na ongeveer 45 minuten na het ontstaan van de eerste "ballon".



Figuur B13. Initiële schade St Philipsland bij het begin van de 50 l/s per m proef. Een steil binnentalud 1;2,5 en een matige grasbedekking met enkele molshopen. De twee kleine gaten (linksboven tussen de frontnelheidsmeters en rechts beneden) ontstonden tegelijkertijd bij een grote golf aan het begin van de proef. Het gat linksboven heeft zich verder nauwelijks uitgebreid, het gat rechtsonder heeft aan het eind van de proef aanleiding gegeven tot falen.



Figuur B14. (Links). Eindresultaat St Philipsland, na 50 l/s per m. Het mollengat was vanaf het begin van de proeven zichtbaar, maar heeft nooit tot verdere schade geleid.

Figuur B15. (Rechts).Tussenresultaat St Philipsland, bij 50 l/s per m proef. Het gat heeft een verticaal talud gekregen en de zandkern is bereikt. Er bleek maar een laagdikte van 0,38 m klei aanwezig te zijn.



Figuur B16. Eindresultaat St Philipsland, na einde 50 l/s per m proef. Er was een gat in het horizontale gedeelte (de teen) van de dijk ontstaan, rechtsonder op de foto. Het gat op het talud was gegroeid en tenslotte heeft een grote golf het tussenliggende gedeelte naar beneden gedrukt. Duidelijk is de overgang klei/zand te zien en dat een diep gat in de zandkern is ontstaan.



Figuur B17. Kattendijke, sectie 1, begin proef met 10 l/s per m. Matige bedekking met gras. In de hele sectie zaten ongeveer 80 molshopen en in het begin van de proef zijn de molshopen zelf weggespoeld, zodat de gaten/ingangen zichtbaar werden en soms ook de gangen als deze aan de oppervlakte lagen. Bij het begin van de proef werd ingeschat dat dit talud de proef van 10 l/s per m niet zou doorstaan. Uiteindelijk heeft de 75 l/s per m kleine uithollingen laten zien, maar zeker geen initiatie van verdere schade.



Figuur B18. Kattendijke. Het zetten van een mollenklem, met het resultaat rechts.



Figuur B19. Kattendijke sectie 1. Schade aan de achterkant van de onderhoudsweg die begon bij 30 l/s per m (het talud ligt op de foto aan de andere kant van de meetwater). De meetwagen moest na 1 uur 75 l/s per worden weggehaald om niet in het gat te vallen (de foto is genomen net voordat de meetwagen is weggehaald).



Figuur B20. Kattendijke, sectie 1. Uitbreiding van het gat op de onderhoudsweg, halverwege 75 l/s per m. Het gat werd uiteindelijk 15 m breed en ongeveer 1 m diep.



Figuur B21. Eindresultaat Kattendijke, sectie 1. Proef 75 l/s per m gestopt na 5 uur en 40 minuten. Het gat in de onderhoudsweg had het talud bereikt en kroop omhoog langs het talud (head cut erosie). De zandkern was ook hier duidelijk bereikt en de schadeontwikkeling ging vlak voor het stoppen van de proef erg snel. Het talud zelf heeft echter geen wezenlijk schade ondervonden.



Figuur B22. Kattendijke, sectie 2, voor begin proef. Sneden van een gierinjecteur, aangebracht op kruin, teen en ondertalud, niet op het middelste deel van het talud.



Figuur B23. Eindresultaat Kattendijke; sectie 2, na 50 l/s per m. Beschadiging door gierinjecteur geeft geen aanleiding tot schade. Verder geen schade aan talud zelf.



Figuur B24. Eindresultaat Kattendijke; sectie 2, na 50 l/s per m. Er waren twee palen geplaatst, een op de kruin en een midden op het talud. Rondom de paal op de kruin ontstond hele lichte erosie, geen doorgaande schade.





Figuur B25. Kattendijke; sectie 2, na 2 uur van 50 l/s per m. De paal op het talud werd eruit geslagen. Deze paal stond verticaal (dus niet loodrecht op het talud), 30 cm diep, en door de overslaande golf werd een moot klei met gras omhoog gedrukt en iets naar beneden.



Figuur B26. Kattendijke; sectie 2, bij doorzetten proef 50 l/s per m na initiële schade door uitgeslagen paal. De verwachting was dat de plag eruit zou slaan.



Figuur B27. Eindresultaat Kattendijke; sectie 2, na 50 l/s per m. Uiteindelijk werd klei onder de plag geërodeerd, maar zat de plag voldoende vast om er niet uit te slaan. Uiteindelijk zakte de plag na erosie van klei naar beneden en kwam weer gelijk met het talud te liggen. Rechts na uitgraving (dus niet ontstaan door de proef!). De paal was precies in een stelsel van mollengangen gezet, die wel 50 cm diep gingen.



Figuur B28. Eindresultaat Kattendijke; sectie 2, na 50 l/s per m. Schade aan de teen van de dijk (de grindkoffer) begon al bij 30 l/s per m. De verwachting was dat deze schade zich bij 75 l/s per m drastisch zou uitbreiden, gelijk aan sectie 1. Besloten werd deze schade niet opnieuw te laten ontstaan. Verwachting was dat het talud niet verdere schade zou hebben gegeven en belangrijkste doelstelling (effect van gierinjecteur) was bereikt.



Figuur B29. Kattendijke, aanleg secties met elastocoast en open asfaltbeton. De grasmat werd ongeveer over 5 cm weg gehaald, een open geotextiel werd gelegd en daarop 10-15 cm bedekking met elastocoast of open asfaltbeton.



Figuur B30. Kattendijke, laatste proef op elastocoast. Met twee extra pompen werd een overslagdebiet gehaald van 125 l/s per m. Hierbij moet worden bedacht dat overslagvolumes groter dan 5,5 m<sup>3</sup> per m niet konden worden gesimuleerd (maximum inhoud van de simulator). Bij 125 l/s per m komen gedurende 2 uur 10 overslagen voor die groter zijn, 4 daarvan groter dan 7 m<sup>3</sup> per m. Zowel de elastocoast als de open asfaltbeton gaven geen schade te zien.



Figuur B31. Eindresultaat Kattendijke; sectie met open asfaltbeton, na 125 l/s per m. Er ontstond een groot erosiegat na de onderhoudsweg van orde 1,5 m diep. De onderhoudsweg zelf was beschermd door platen en kon niet eroderen.



Figuur B32. Kattendijke, demonstratie na afloop van de proeven. Op 16 april zijn 17 watermanagers uit Florida op bezoek geweest. Op een nieuwe sectie werd gedurende 20 minuten ter demonstratie met 75 l/s per m gegolfd. In deze tijd ontstond een gat in de onderhoudsweg met een diepte van orde 0,5 m.

Tabel B1. Overzicht van kenmerken van alle onderzochte proefvakken

	Delfzijl dijksectie	Delfzijl versterkt	Delfzijl kale klei	Boonweg sectie 1	Boonweg sectie 2	Boonweg sectie 3	Boonweg sectie 4	St Philipsland sectie	Kattendijke sectie 1	Kattendijke sectie 2	Kattendijke elastocoast	Kattendijke steenasfalt
<b>Opbouw dijk</b>												
kern	klei	klei	klei	zand	zand	zand	zand	zand	zand	zand	zand	zand
dikte kleilaag (m)	> 2m	> 2m	> 2m	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.75	0.75	0.75	0.75
lengte binnentalud (m)	16	16	16	27	27	27	27	13	15	15	15	15
taludhelling	1:3	1:3	1:3	1:2.9	1:2.9	1:2.9	1:2.9	1:2.4	1:3	1:3	1:3	1:3
<b>Beheer</b>												
type grasland beheer volgens VTV	B	B	-	B	B	A	B	A	D	D		
categorie beheer	gazon	gazon	nvt	I	WW	HH	HW	HH	HH	HH	nvt	nvt
bemesting	geen	geen	nvt	<70 kg	geen	geen	geen	geen	300 kg	300 kg	nvt	nvt
maaien	elke 14 d	elke 14 d	nvt	1x	-	2x hooien	1x hooien	1 x hooien	3x	3x	nvt	nvt
beweiding	geen	geen	nvt	4x	2x	geen	1x	geen	geen	geen	nvt	nvt
bestrijding	geen	geen	nvt	geen	geen	geen	geen	geen	geen	geen	nvt	nvt
categorie graszode	matig	matig	nvt	matig	matig	goed	matig	goed	slecht	slecht	nvt	nvt
muizen/mollen	geen	geen	nvt	enkele	enkele	enkele	enkele	veel	zeer veel	zeer veel	nvt	nvt
<b>Kleikwaliteit</b>												
Vloeigrens Wi (%)	57	57	57	29	29	29	29	27	30	30	30	30
Plasticiteitsindex Ip (%)	35	35	35	6	6	6	6	9	10	10	10	10
Zandgehalte Zk (%)	28	28	28	60	60	60	60	51	52	52	52	52
lutum (%)				13	13	13	13	14	15	15	15	15
Categorie	c1	c1	c1	c3	c3	c3	c3	c3	c3	c3	c3	c3
<b>Vegetatie</b>												
vegetatietype volgens VTV	W1	W1	nvt	W2	W2	H3	W2	H3	H3	H3	nvt	nvt
categorie graszode	slecht	slecht	nvt	matig	matig	goed	matig	goed	goed	goed	nvt	nvt
bedekking (%)	80	80	nvt	99	99	99	90	80	75	75	nvt	nvt
beschadiging	geen	open plekkjes	nvt	zode gesloten	zode gesloten	zode pollig	zode gesloten	zode vrij open	zode vrij open	zode vrij open	nvt	nvt
doorworteling	slecht	slecht	nvt	goed	goed	goed	goed	goed	goed	goed	nvt	nvt
categorie graszode	slecht	slecht	nvt	goed	goed	goed	goed	goed	goed	goed	nvt	nvt
<b>Opmerkingen</b>		SGR									zode eraf bekleding erop	zode eraf bekleding erop
<b>Maximum overslag</b>												
maximum debiet (l/s/m)	50	50	10	75	75	75	75	50	75	50	125	125
duur maximum (uur)	12	12	6	6	6	6	5:50	6	5:40	6	6	6
<b>Schade</b>	geen; geulvorming na aanbrengen schade	geen; geen verdere schade na aan- brengen schade	voortdurende erosie; 2 diepe gaten	geen schade aan talud; gat in teen	geen schade aan talud; gat in teen	ballonmechanisme; geen gat in kleilaag; groot grasoppervlak weg; gat in teen	ballonmechanisme; gat 1,5 m diep in zandkern; talud bezweken	2 gaten aan begin proef; 1 gat werd groot; talud bezweken; gat in teen	geen schade aan talud; onderhoudsweg en teen bezweken	initiele schade paal op talud; schade stopte; gat in teen en daarom gestopt	geen schade	geen schade; zeer groot gat achter onderhouds- weg

## F. Fotoreportage



## Schadebeelden proefstroken

### St. Philipsland

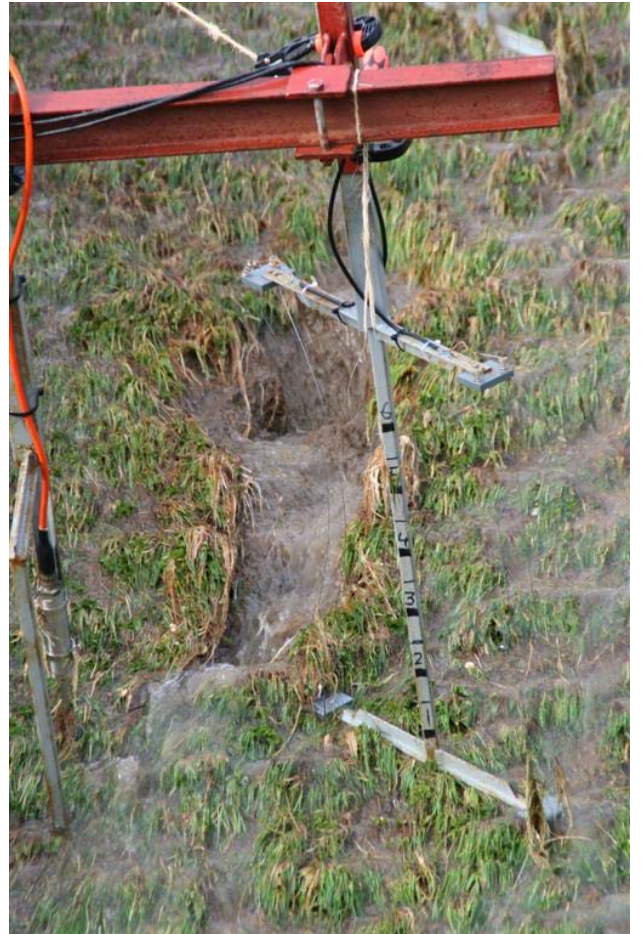


**Foto F-1** Randeffecten ter plaatse van de geleideschotten. Om te voorkomen dat als gevolg van deze randeffecten het talud verder zou eroderen zijn deze "gaten" opgevuld met klei en daarna aangetrapt.



**Foto F-2** Vrijwel aan het begin van de proef met 50 l/s per m vond op een tweetal plekken gelijktijdig substantiële erosie plaats door één enkele grote golf.





**Foto F-3** Het schadebeeld ter plaatse van de meetinstrumenten is tijdens de sessies met 50 l/s per m langzaam langer en breder geworden. De schade is voornamelijk oppervlakkig.



**Foto F-4** Het schadebeeld rechts op het talud is gedurende de eerste twee sessies van de proef met 59 l/s per m langzaam groter geworden. In tegenstelling tot het schadebeeld ter plaatse van de meetinstrumenten heeft de schade zich langzaam naar beneden uitgebreid. Ook hier was de schade voornamelijk oppervlakkig.



**Foto F-5** Het schadebeeld aan de rechterkant van het talud werd langzaam een steeds dieper wordend gat met steile wand aan de bovenstroomse kant (zie ook Figuur 7-6). Hierdoor ontstond langzaam een gat in de kleilaag, waardoor de zandkern bloot kwam te liggen. Toen dit gebeurde versnelde de gatontwikkeling door uitspoelen van zand



**Foto F-6** Omdat inmiddels rechts in de teen van de dijk een gat zich in de richting van de overgang (talud – teen) heeft kunnen uitbreiden, werd het tussenliggende gedeelte tussen beide gaten, bij een van de laatste grote golven, naar beneden gedrukt. Besloten is om de proef te stoppen en de proef met 75 l/s per m niet meer uit te voeren.



**Foto F-7** Uiteindelijk bleek de op de zandkern aangebrachte kleilaag slechts 40 cm dik te zijn in plaats van de voorgeschreven 60 cm

## Kattendijke: proefstrook 1



**Foto F-8** Gedurende de proeven met 30 l/s per m ontstonden er erosiegaten op het horizontale vlak ter plaatse van de overgang talud – teen. Ook achter de onderhoudsweg (mijnsteen op een met zand opgevuld cunet) ontstond schade.



**Foto F-9** Aan het eind van de proef met 50 l/s per m was een groot gedeelte van de grasbekleding op het horizontale vlak voor de onderhoudsweg geërodeerd.



**Foto F-10** Tijdens de eerste twee uur van de proef met 75 l/s per m is de proef onderbroken omdat het gevaar bestond dat de meetcabine ondermijnd zou worden.



**Foto F-11** Het gat achter de onderhoudsweg werd opgevuld met mijnsteen, welke na hervatting van de proef bij enkele grote golven al weer was verdwenen. Het gat in de onderhoudsweg kon zo gedurende de sessie groter en dieper worden.



**Foto F-12** Als gevolg van terugschrijdende erosie "kroop" het gat langzaam richting het talud (met kleidam en grindkoffer).



**Foto F-13** Zodra de zandkern bloot kwam te liggen ontstond door het uitspoelen van het zand snelle doorgaande erosie het talud op. Het talud brokkelde daarna snel af, waardoor het ontstane gat naar boven toe snel groter kon worden. Om verdere schade te voorkomen is de proef gestopt.



**Foto F-13** Het eindresultaat na bijna 6 uur "golven" met 75 l/s per m.



## Kattendijke: proefstrook 2



**Foto F-13** Het aanbrengen van initiële schade op de kruin en teen van het talud met behulp van een mestinjecteur.



**Foto F-14** Gedurende de proeven met 30 l/s per m ontstond links onder aan het talud, net boven de teen en ter plaatse van de eerste injectorsnede een gat dat langzaam in omvang toenam.



**Foto F-15** Aan het begin van de tweede twee uur van de proef met 50 l/s per m sloeg de laagste paal, die verticaal in het midden van het talud was geslagen, eruit. Hierbij werd een moot klei met bekleding iets naar beneden en omhoog gedrukt



**Foto F-16** Ondanks het feit dat klei onder de moot erodeerde, zat de moot voldoende vast om er niet door de golven uitgeslagen te worden. De moot zakte uiteindelijk na erosie van de klei weer langzaam in en stroomde het water weer over het talud zonder verder schade te veroorzaken.



**Foto F-17** Aan het einde van de proeven is de moot uitgegraven. Rondom en onder de moot grond bevonden zich mollengaten die tot diep in de kleilaag reikten



**Foto F-18** De in de teen aanwezig grindkoffer is aan het einde van de proef met 50 l/s per m zichtbaar. Een groot gedeelte van de grasbekleding op het horizontale vlak voor de onderhoudsweg was geërodeerd. Het gat links onder aan het talud was echter gedurende de sessie niet groter geworden. Om te voorkomen dat de schade zich bij de proef met 75 l/s per m drastisch zou uitbreiden is besloten de proef te stoppen.

## Kattendijke: Elastocoast® en open steenasfalt



**Foto F-19** Daar waar bij de proeven met 125 l/s per m op Elastocoast® geen schade was opgetreden is bij de proeven op het open steenasfalt op enkele plekken schade aan de randen geconstateerd. Deze schade was een gevolg van slechte randafwerking door de aannemer en heeft uiteindelijk niet geleid tot schade bij de grote overslaggebieten.



**Foto F-20** Ondanks stevige maatregelen ter voorkoming van erosie van de onderhoudsweg waren getroffen was de onderhoudsweg licht beschadigd.



**Foto F-21** In tegenstelling tot de schade aan de onderhoudsweg was als gevolg van de grote overslagdebieten een groot gat ontstaan achter de onderhoudsweg.

## **G. Rapportage Alterra (Grasonderzoek)**





# Bepaling van doorworteling en zodeparameters van dijkgrasland in Zeeland

Bepaling van doorworteling en zodeparameters ten behoeve van de golfoverslagproef in Wilhelminapolder en de Oude Polder van St Philipsland, 2008



M.H.C. van Adrichem  
J.Y. Frissel  
H.P.J. Huiskes  
Alterra, Wageningen UR, 2008



## 1 Inleiding

Dit onderzoek is uitgevoerd van februari tot en met maart 2008 in opdracht van Infram BV. Ten behoeve van de Golfverslagproef in de Wilhelminapolder (Zuid-Beveland) en de Oude Polder van St Philipsland in Zeeland zijn in beide polders de doorworteling en de zodeparameters van een dijkvak bepaald en is de vegetatie beschreven.



*Foto 1: Proefvak Wilhelminapolder, Zeeland, februari 2008*



Foto 2: Proefvak St Philipsland, Zeeland, februari 2008

#### Locatie en uitgevoerde werkzaamheden

De proefvakken liggen in Zeeland op de zeedijken nabij Kattendijke en St Philipsland. Het beheer van het proefvak nabij Kattendijke bestaat uit drie maal per jaar maaien en bemesting. Het beheer van het proefvak bij St Philipsland bestaat uit één maal per jaar maaien.

In februari 2008 is de doorworteling van de twee dijkvakken bepaald. De doorworteling is bepaald met behulp van de 'handmethode' volgens het voorschrift 'Toetsen op Veiligheid' (Min V&W, 2007; Sprangers & Arp, 1999).

In maart 2008 zijn naast de doorworteling het wortelgewicht en de zodedichtheid bepaald. De zodedichtheid is bepaald aan de hand van de parameters: bedekking, gemiddelde grootte van open plekken en plantdichtheid.

Verder is tijdens deze ronde de vegetatie beschreven volgens de methode van Braun-Blanquet met aangepaste schaal (Braun-Blanquet, 1932).

#### Algemeen

De proefvakken op de dijken van Wilhelminapolder en St Philipsland liggen op de binnenzijde van het talud. Het vak bij Wilhelminapolder is naar het zuidwesten geïmponeerd en heeft een helling van 1:3. Het vak bij St Philipsland is naar het noordoosten geïmponeerd en heeft een helling van 1:2,5. In beide vakken is muizenactiviteit en veel mollenactiviteit waargenomen.

### Bebeer

De dijken bij Wilhelminapolder en St Philipsland zijn eigendom van Waterschap Zeeuwse Eilanden, maar worden in de praktijk beheerd door pachters. De dijken worden gemaaid. Mollen worden niet of nauwelijks weggevangen.

Tabel 1: Coördinaten en bebeer van de proefvelden bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland

Proefvak	Bemest	Maaien	Beweiden	X-coördinaat	Y-coördinaat
Wilhelminapolder	> 100 kg/ha/jaar	2/3x per jaar	niet	54.309	394.304
St Philipsland	niet	1x per jaar	niet	67.635	403.571

### Doorworteling van de bodem

De doorworteling is op twee verschillende tijdstippen bepaald: in februari en in maart 2008. Per proefvak zijn vier wortelmonsters gestoken met een gutsboor van drie cm in diameter. De bovenste 20 cm van de monsters zijn opgedeeld in stukken van 2,5 cm (foto 3). In elk stukje is het aantal wortels geschat. Het aantal wortels geeft aan in welke categorie de worteldichtheid van het betreffende stuk valt.



Foto 3: 'Handmethode'; de bovenste 20 cm van de wortelmonsters worden opgedeeld in stukken van 2,5 cm

Tabel 2: Gebruikte categorieën voor worteldichtheid

Categorie	Worteldichtheid
0	geen wortels aanwezig
1	1-5 wortels
2	6-10 wortels
3	11-20 wortels
4	21-40 wortels
5	Wortelmatje; of meer dan 40 wortels

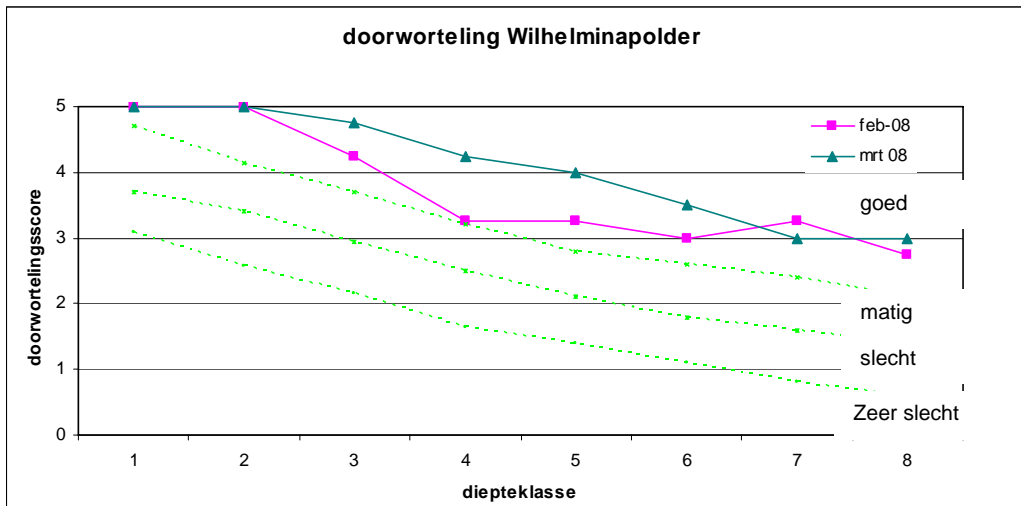
Tabel 3: Gebruikte categorieën voor diepteklassen

Categorie	Diepte (cm)
1	0 - 2,5
2	2,5 - 5
3	5 - 7,5
4	7,5 - 10
5	10 - 12,5
6	12,5 - 15
7	15 - 17,5
8	17,5 - 20

De klassen voor worteldichtheid en diepte zijn weergegeven in tabel 2 en tabel 3. Met het toenemen van de bodemdiepte neemt het aantal wortels snel af. De snelheid van afname van het wortelpakket is een maat voor de erosiebestendigheid van de zode. Hoe dichter en dieper de doorworteling, des te beter is de erosiebestendigheid van de grasmat (Sprangers, 1996). De resultaten van de vier worteldichtheidsschattingen worden gemiddeld en uitgezet in een grafiek, waarbij ze per diepteklasse een score goed, matig, slecht of zeer slecht toegekend krijgen. De uiteindelijke kwaliteitsscore voor de doorworteling per proefvak is afhankelijk van de individuele score per diepteklasse. Als de score op verschillende diepten niet eenduidig is, geldt bij minimaal twee afwijkende punten de laagste score als kwaliteitsscore voor de gehele wortelsteek.

Na bepaling van de doorworteling met de 'handmethode' zijn de monsters meegenomen om in het laboratorium het gewicht van de wortelmassa te bepalen. De monsters zijn daartoe gespoeld om zand en klei te verwijderen. Vervolgens zijn de wortels over een 0,25 mm zeef verzameld. De wortels zijn bij 40<sup>o</sup> C gedroogd en vervolgens gewogen. Via deze wortelgewichten en de specifieke wortellengte die bij het desbetreffende beheer hoort, zijn de wortellengten van de wortelmonsters bepaald.

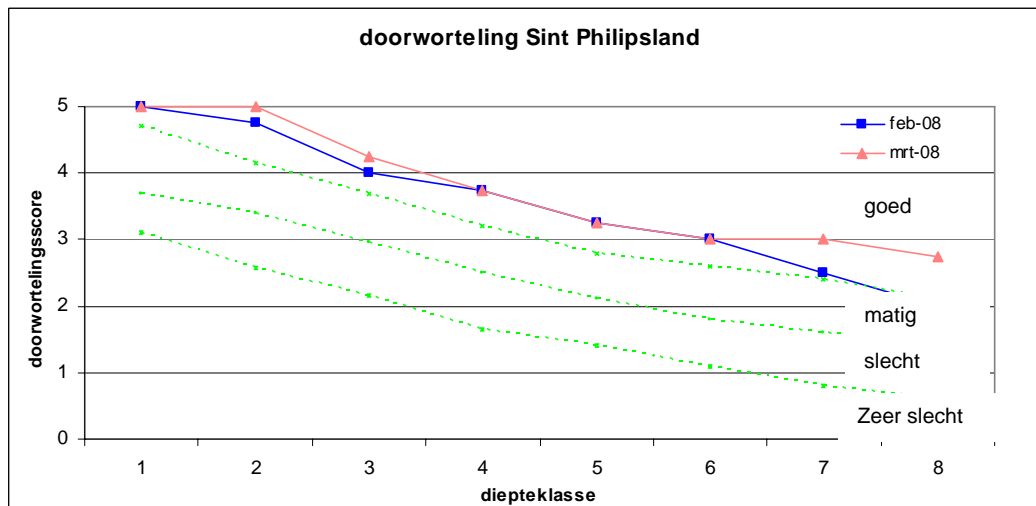
In figuur 1 is de doorworteling van Wilhelminapolder weergegeven op twee tijdstippen. Alle wortelscores krijgen de waarde 'goed' toegekend. Verder is te zien dat de doorworteling van 5 tot en met 15 centimeter in maart hoger scoort dan in februari. Dit is te verklaren doordat in maart de groei van de vegetatie en de doorworteling op gang is gekomen, vooral door de hoge temperatuur in februari en maart. Hoogstwaarschijnlijk is de doorworteling in de eerste twee diepteklassen ook toegenomen. Bij de toegepaste methode komt dit echter niet naar voren aangezien score 5 de hoogst haalbare score is.



Figuur 1. Worteldichtheidsscore Wilhelminapolder, Zeeland, op 2 verschillende tijdstippen

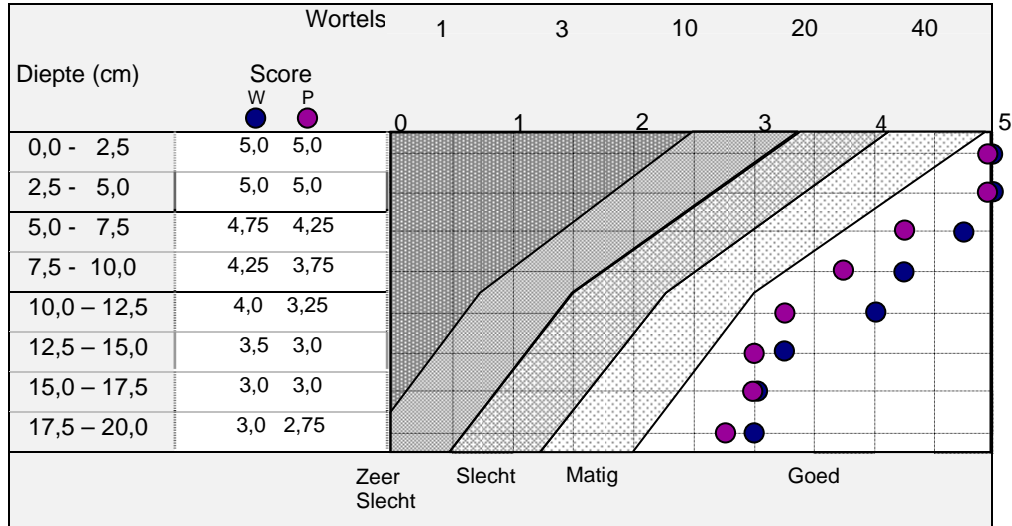
score: 0 = geen wortels aanwezig	Diepte: 1 = 0 - 2,5 cm diep
1 = zeer weinig wortels aanwezig, 1-5 wortels	2 = 2,5 - 5,0 cm diep
2 = weinig wortels aanwezig, 6 - 10 wortels	3 = 5,0 - 7,5 cm diep
3 = redelijk aantal wortels aanwezig, 11 - 20 wortels	4 = 7,5 - 10,0 cm diep
4 = veel wortels aanwezig, 21 - 40 wortels	5 = 10,0 - 12,5 cm diep
5 = zeer veel wortels, matje, >40 wortels	6 = 12,5 - 15,0 cm diep
	7 = 15,0 - 17,5 cm diep
	8 = 17,5 - 20 cm diep

In figuur 2 is de doorworteling van de Oude Polder van St Philipsland weergegeven op twee tijdstippen. Ook hier krijgen bijna alle wortelscores de waarde 'goed' toegekend. De doorworteling scoort in maart iets hoger (2,5-7,5 cm en 15-20 cm) of even hoog in vergelijking met de doorworteling in februari.



Figuur 2. Worteldichtheidsscore St Philipsland, Zeeland, op 2 verschillende tijdstippen

In het standaardbeoordelingsdiagram conform het voorschrift ‘Toetsen op Veiligheid’ (figuur 5 en 6), worden de kwaliteitsscores van de doorworteling per twee vakken weergegeven van maart 2008. Dit diagram geeft eveneens een goed beeld van de doorworteling in de gehele steek (20 cm diepte).



Figuur 3. Worteldichtheidsscore Zeeland maart 2008: Wilhelminapolder (W) en Oude Polder van St Philipsland (P) met  $n=4$  in een beoordelingsdiagram van de VTV

In de grafiek is te zien dat de doorworteling van beide proefvakken in maart 2008 de kwaliteitsscore ‘goed’ krijgt. Verder valt op dat de bewortelingsscore van Wilhelminapolder hoger is dan die van de Oude polder van St Philipsland.

#### Wortellengte

Om de wortellengte te kunnen bepalen zijn het wortelgewicht en de specifieke wortellengte nodig. Het wortelgewicht is per diepteklasse per wortelmonster bepaald. In tabel 4 zijn de gemiddelde wortelgewichten per diepteklasse per proefvak weergegeven. Het totale gemiddelde wortelgewicht van de gehele steek is voor Wilheminpolder 47,0 g/dm<sup>3</sup> en voor St Philipsland 41,9 g/dm<sup>3</sup>.

Tabel 4: Gemiddelde wortelgewichten in gram per dm<sup>3</sup> van de proefvakken bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008

Diepteklasse	Proefvakken	
	Wilhelminapolder	St Philipsland
1	16.0	22.0
2	11.4	5.3
3	6.7	3.8
4	3.5	2.8
5	2.9	2.8
6	2.2	1.9
7	1.6	2.2
8	2.6	1.2



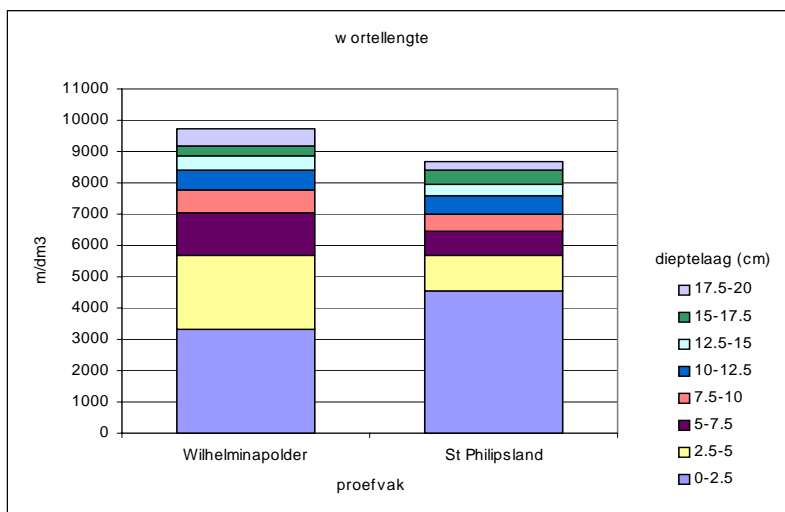
De specifieke wortellengte is de lengte van de wortels per wortelgewicht. Elk type beheer heeft zijn eigen specifieke wortellengte. De lengte, noch het gewicht alleen zijn goede aanduidingen voor de mate van doorworteling. Een hoog gewicht kan bij een hoge gemiddelde worteldiameter al snel bereikt zijn. In tabel 5 wordt de specifieke wortellengte (SWL) per beheersvorm weergegeven. Hoge waarden voor de SWL in combinatie met een laag wortelgewicht duiden op dunne wortels. Een hoge SWL waarde in combinatie met een laag wortelgewicht duidt op veel dunne wortels. Voor de omrekening van gewicht naar lengte is in dit rapport gebruik gemaakt van de HI variant (Wilhelminapolder) en de HE variant (St Philipsland). Beheersvorm HE houdt in dat de vegetatie 1 (eventueel 2) maal per jaar gemaaid wordt en dat er geen bemesting plaats vindt. Het maai-beheer wordt al langere tijd op deze wijze uitgevoerd. Bij beheersvorm HI vindt er bemesting plaats, en wordt er 2 á 3 maal per jaar gemaaid. Bij deze hooivarianten zijn dikke wortels aanwezig, waardoor de SWL-waarde laag is.

**Tabel 5** *Cumulatieve wortellengte (WLT), wortelgewicht (WGT) en hun procentuele verdeling; specifieke wortellengte (SWL) en spruit/wortelratio (SWR) per beheersvorm*

parameter n	I 13	WW 6	HW 5	HH 11	HI 5	HE 5	he 3
WLT (m/5dm <sup>3</sup> )	1600	1522	1754	1716	1615	1640	2172
% 0-10 cm	62	64	62	62	58	59	65
% 10-20 cm	16	18	17	15	18	19	16
% 20-50 cm	22	18	21	23	24	22	19
WGT (g/5dm <sup>3</sup> )	5,9	5,9	5,6	7,4	7,8	8,2	7,7
% 0-10 cm	64	68	62	58	60	65	68
% 10-20 cm	15	15	16	18	17	16	13
% 20-50 cm	21	17	22	24	23	19	19
SWL (m/g)	291 <sup>b</sup>	267 <sup>ab</sup>	309 <sup>b</sup>	282 <sup>b</sup>	210 <sup>a</sup>	207 <sup>a</sup>	283 <sup>ab</sup>
SWR	0,94	0,73	--	0,7	0,91	0,62	0,46

(Sprangers, 1996)

Via bovenstaande tabel en het gemiddelde gewicht per diepteklasse is de lengte van de wortels berekend.



Figuur 4: Wortellengte in  $m/dm^3$  per diepteklasse in de proefvelden bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008, berekend met behulp van gewicht en specifieke wortellengte

De wortellengte neemt in alle proefvelden af met de diepte. De eerste bodemlagen hebben een gemiddelde lengte van meer dan 3300 meter per  $dm^3$ . Sprangers & Raemakers (1998) vonden eveneens dit soort hoge waarden in de eerste bodemlaag. Deze hoge waarden, worden veroorzaakt door de grote hoeveelheid aan zeer kleine, vaak opgerolde wortels. Deze wortels zijn bij het bepalen van de SWL ook gemeten. De wortellengte neemt bij Wilhelminapolder geleidelijker af met de diepte dan bij St Philipsland. Dit betekent dat de wortels bij Wilhelminapolder iets gelijkmatiger over de gehele wortelsteek verdeeld zitten. Het proefvak bij St Philipsland heeft in de eerste diepteklasse duidelijk meer lengte aan wortels dan Wilhelminapolder. Het proefvak in Wilhelminapolder bevat in de volgende lagen echter een grotere wortellengte. De totale wortellengte is bij het proefvak in Wilhelminapolder iets hoger.

### Vegetatie

Het vegetatietype is bepaald volgens het cursusboek “kwaliteitsherkenning dijkgrasland” (2004). De coördinaten zijn in het midden van het proefvak bepaald, met behulp van GPS (tabel 1).

Tabel 6: Karakteristieke soorten van proefvelden Wilhelminapolder en St Philipsland in Zeeland, maart 2008

Soort	Proefvak		Nederlandse naam
	Wilhelminapolder	St Philipsland	
<i>Achillea millefolium</i>		X	Gewoon duizendblad
<i>Agrostis stolonifera</i>		X	Fioringras
<i>Allium vineale</i>	X	X	Kraailook
<i>Daucus carota</i>		X	Peen
<i>Festuca rubra</i>		X	Rood zwenkgras s.s.
<i>Lolium perenne</i>	X	X	Engels raaigras
<i>Plantago lanceolata</i>	X	X	Smalle weegbree
<i>Ranunculus acris</i>	X	X	Scherpe boterbloem
<i>Senecio erucifolius</i>		X	Viltig kruiskruid
<i>Trifolium dubium</i>	X		Kleine klaver
<i>Trifolium pratense</i>	X		Rode klaver

#### Wilhelminapolder

Dit proefvak valt binnen de VTV-graslandtypeindeling in de categorie soortenrijk hooiland. Een combinatie van Rietzwenkgras en Engels raaigras geeft de vegetatie een ruig aanzicht. Het aandeel kruiden is redelijk. De lage bedekking door kruiden laat zien dat deze vegetatie waarschijnlijk naar een minder soortenrijk vegetatietype overgaat. In het oog springende soorten op deze locatie zijn Kraailook en Scherpe boterbloem.

#### St Philipsland

Dit proefvak valt binnen de VTV-graslandtypeindeling eveneens in de categorie soortenrijk hooiland. Het is een soortenrijk type grasland dat onder een maai-beheer langjarig in stand kan blijven. In deze vegetatie wordt het aanzicht bepaald door een combinatie van grassen en kruiden. Het voorkomen van Viltig kruiskruid zou op termijn een probleem kunnen vormen wanneer het maaisel als hooi wordt gebruikt. Dit vanwege de giftigheid van deze soort voor evenhoevigen. Bij begrazing en voldoende aanbod van gras laten grazers de plant staan. De mosbedekking op deze locatie is aanzienlijk. Erg in het oog springende soorten op deze locatie zijn Kraailook, Viltig kruiskruid en Veldlathyrus.

#### Zodedichtheid

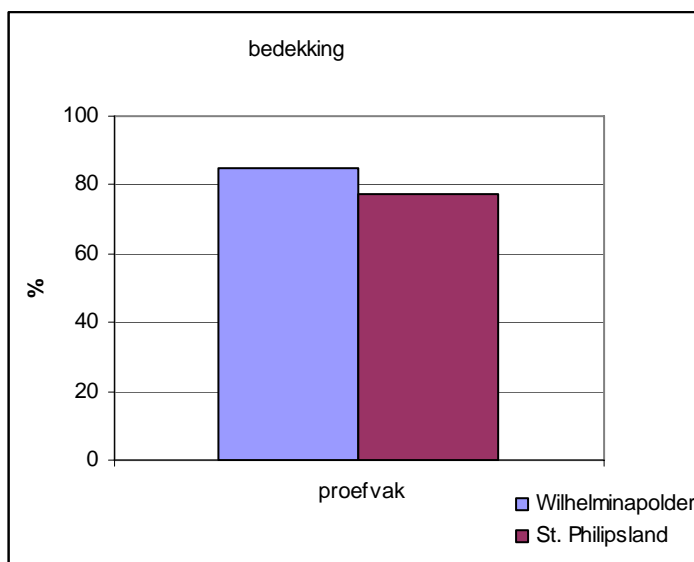
De bedekking kan nog opgesplitst worden in geschatte bedekking, en gemeten bedekking. De *geschatte bedekking* wordt geschat bij de vegetatieopname, waarbij het aandeel grassen, kruiden en mossen wordt genoteerd. Bij de *gemeten bedekking* wordt geen onderscheid gemaakt tussen gras of kruid, en worden mossen buiten beschouwing gelaten. Deze bedekking wordt bepaald met behulp van een raster met 81 meetpunten. Per meetpunt wordt bepaald of er sprake is van 'grascontact'. De meting wordt viermaal uitgevoerd in een proefvak. Het gemiddelde procentuele aantal meetpunten met 'grascontact', ten opzichte van het totaal aantal meetpunten is een maat voor de bedekking. De *gemiddelde grootte van open plekken* is bepaald met

behulp van ringetjes met oplopende diameter (Sprangers, 1996). Bij honderd meetpunten wordt bepaald in welke ring de afstand tot de eerstvolgende spruit in de bodem valt. Uit de verdeling van meetpunten over de verschillende ringetjes (diameterklassen) kan de gemiddelde open-plek-grootte worden berekend. Veel metingen in grote ringen betekent een hoger gemiddelde voor de open-plekken-grootte. De plantdichtheid wordt eveneens met deze ringmetingen bepaald. De *plantdichtheid* is een maat voor de verdeling van spruiten over het proefvak. De spruiten kunnen homogeen verdeeld zijn, of in polletjes over het vak verdeeld staan. Veel metingen in kleine ringen betekent een hoge plantdichtheid. De plantdichtheid wordt weergegeven door middel van de curve (figuur 7) met bijbehorende richtingscoëfficiënt (RICO) die de afname van het aantal spruiten weergeeft in ringen met oplopende diameter. Uitgezet wordt de logaritme van  $(100-F)$ , met  $F$  = de score per ring, tegen de diameter van de ring. Hoe steiler het verloop van de curve en dus hoe negatiever de waarde voor de richtingscoëfficiënt, hoe dichter spruiten op elkaar staan en dus homogener verdeeld zijn over het proefvak.

### Bedekking

De geschatte bedekking in beide proefvakken is redelijk. Voor het proefvak bij Wilhelminapolder is de bedekking geschat op 80%. Voor het proefvak bij St Philipsland is de bedekking geschat op 75%.

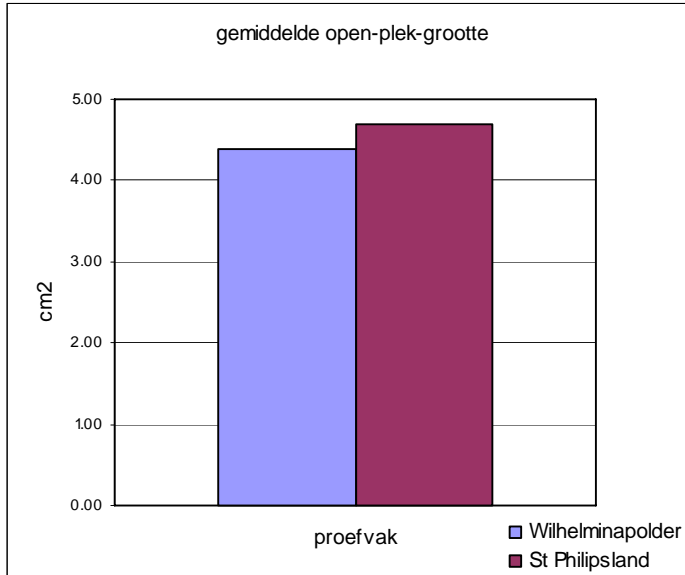
Ook de gemeten bedekking is redelijk. Het proefvak bij Wilhelminapolder heeft een bedekking van 85%. Het proefvak bij St Philipsland heeft een bedekking van 77% (figuur 5). Beide proefvakken voldoen hierdoor aan de bedekkingnorm van 70% volgens het voorschrift 'Toetsen op Veiligheid'.



Figuur 5: Gemeten gemiddelde bedekking op de proefvakken bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008

### Gemiddelde grootte van open plekken

De gemiddelde open-plek-grootte (OPG) in de proefvakken is af te lezen uit figuur 6. Voor beide proefvakken zijn de open plekken groot. Het proefvak in de Wilhelminapolder heeft gemiddeld iets kleinere open plekken ( $4,4 \text{ cm}^2$ ), dan het proefvak bij St Philipsland ( $4,7 \text{ cm}^2$ ). De open-plek-grootte van bemest grasland is meestal kleiner dan  $2 \text{ cm}^2$ .



Figuur 6: Gemeten gemiddelde open-plek-grootte op de proefvakken bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008

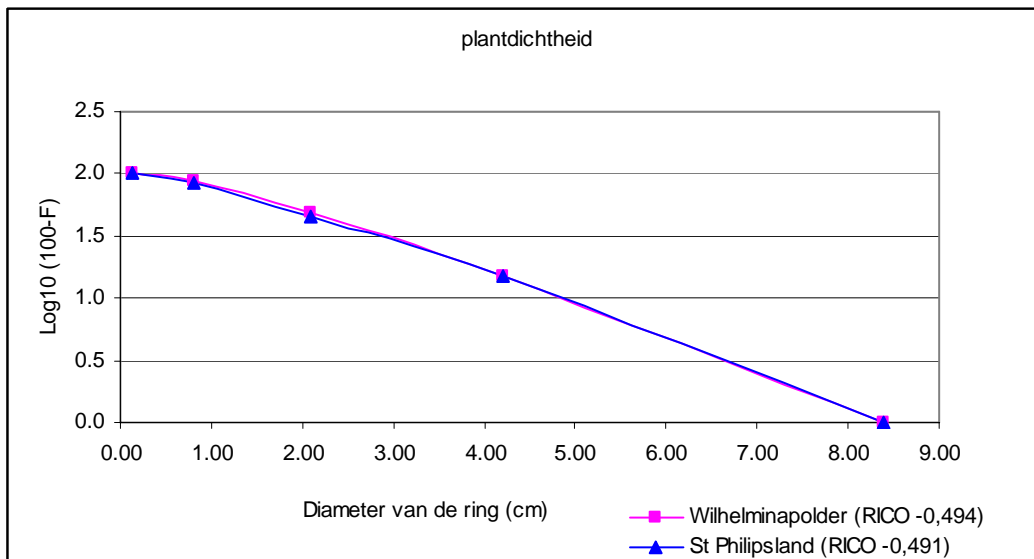


Foto 4: Open plekken in het proefvak bij Wilhelminapolder, Zeeland, februari 2008

### Spruitdichtheid

Figuur 7 laat de spruitdichtheid van de proefvakken in Zeeland in maart 2008 zien. De richtingscoëfficiënt is voor beide proefvakken vrijwel gelijk. (Wilhelminapolder: -0,494, St Philipsland: -0,491).

Deze lage negatieve richtingscoëfficiënten betekenen dat de spruiten niet homogeen over het vlak verdeeld staan.



Figuur 7: Richtingscoëfficiënten van de curven voor plantdichtheid op de proefvakken bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008.

In de tabel hieronder staat een overzicht van de gemeten zodedichtheidsparameters.

Tabel 7: Gemeten gemiddelde bedekking, gemiddelde open-plek-grootte (OPG) en richtingscoëfficiënt (RICO) op de proefvakken bij Wilhelminapolder en St Philipsland, Zeeland, maart 2008

	Bedekking (%)	OPG (cm <sup>2</sup> )	RICO
Wilhelminapolder	85	4.4	-0.494
St. Philipsland	77	4.7	-0.491

### Discussie

De worteldichtheid in het proefvak bij Wilhelminapolder neemt met de diepte veel geleidelijker af dan in het proefvak bij St Philipsland. Een reden daarvoor kan zijn dat er meer kruiden aanwezig zijn bij Wilhelminapolder. Daar staan vooral kruiden van voedselrijke gronden. Kruiden wortelen over het algemeen dieper dan grassen.

Wortellengten uit dit onderzoek kunnen niet zonder meer vergeleken worden met de wortellengten van Sprangers (1996). Destijds werd de zode (circa 1 cm ) verwijderd en werd van het onderliggende monster de doorworteling bepaald. In de bovenste centimeter zitten juist de meeste wortels, waardoor de wortellengten uit 2008 hoger zijn dan de wortellengten van Sprangers in 1996. Een andere reden waarom de wortellengten van Sprangers (1996) niet met dit onderzoek vergeleken kunnen worden, is dat de specifieke wortellengten die we gebruiken, voor een wortelkolom van 50 cm diep bepaald zijn, terwijl in dit experiment de doorworteling slechts tot 20 cm diep bepaald is. De reden dat voor dit onderzoek een andere methode is gebruikt, is dat deze methode sneller is en voor iedereen uitvoerbaar. De resultaten tussen de twee proefvakken zijn onderling wel goed te vergelijken.

Het optimale tijdstip om vegetatieopnamen van dijkgraslanden te maken voor het bepalen van het vegetatietype is half juni. Gezien het relatief vroege tijdstip van deze proef (eind maart) kan het voorkomen, dat vooral jonge grassoorten verkeerd zijn benoemd of over het hoofd zijn gezien. Bepaling van het vegetatietype volgens de VTV vond wel plaats, omdat de belangrijkste bedekkende grassen en kruiden op dat moment al wel te onderscheiden zijn. Indien er een volledige vegetatieopname van deze proefvakken gewenst is, zal in juni de soortensamenstelling nogmaals genoteerd moeten worden.

### Conclusie

De doorworteling scoort in februari 2008 volgens de VTV in beide proefvakken 'goed'. Van de twee wortelmetingen laten de metingen van maart 2008 de hoogste doorworteling zien. De doorworteling is in vier weken tijd zichtbaar toegenomen.

Beide locaties vallen bij de VTV-graslandtypeindeling in de categorie soortenrijk hooiland H3.

Beide proefvakken voldoen aan de bedekkingsnorm van 70% volgens het voorschrift 'Toetsen op Veiligheid'. Wel zijn voor beide proefvakken de open plekken groot en staan de spruiten niet homogeen over het vlak verdeeld.

Literatuur:

Alterra, 2006. Cursusboek 'kwaliteitsherkenning dijkgrasland'. Alterra, Wageningen.

Braun-Blanquet J., 1932. Plant Sociology. The study of plant communities. New York, London: McGraw Hill Book Company.

Hennekens, S.M. & J.H.J. Schaminée, 2001. TURBOVEG, a comprehensive database management system for vegetation data. Journal of Vegetation Science 12: 589-591.

Meijden, R. van der. 2005. Heukels' flora van Nederland. Drieëntwintigste druk..

Min V&W, 2007. De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de toetsronde 2001 - 2006 (VTV). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Delft.

Sprangers, J.T.C.M., 1996. Extensief graslandbeheer op zeedijken. Effecten op vegetatie, wortelgroei en erosiebestendigheid. Landbouw Universiteit, Wageningen, Rijkswaterstaat, Dienst Weg en waterbouwkunde, Delft.

Sprangers, J.T.C.M & W.J. Arp, 1999. Toetsingsparameters dijkgrasland. *Indicatorsoorten dijkgraslandtupen en worteldichtheidsbepalingen (handmethode)*. IBN-Rapport, Wageningen.

Sprangers, J.T.C.M & I.P. Raemakers, 1998. Extensief graslandbeheer op zeedijken. Effecten op sterkte en samenstelling van de graszode na een periode van 7 jaar. Landbouw Universiteit, Wageningen, Rijkswaterstaat, Dienst Weg en waterbouwkunde, Delft.



## H. **Rapportage Deltares (Grondonderzoek en monitoring)**

Zie separaat rapport Deltares, 432850-0008 v01, 23 juni 2008 (tevens digitaal opgenomen op de bij dit rapport behorende cd-rom).

