

SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding

Fase 3A Modelaanpassing Afsluitdijk

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

Titel
SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1001189-015	1001189-015-GEO-0001	55

Trefwoorden
Golfoverslag, grasbekleding, Afsluitdijk, stabiliteit, gras, erosie, waterspanningen

Samenvatting

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het project Sterkte en Belastingen Waterkeren (SBW). Het doel van dit project is het in kaart brengen van het bezwijkmechanisme van een grasbekleding bij golfoverslag en het afleiden van praktische toetsformules.

Het project wordt aangepakt via een cyclus, waarbij modellering (A), predicties (B), proefneming (C) en proefevaluatie (D) per proeflokatie worden afgewerkt. Onderhavig rapport betreft de Modelaanpassing (A) voor de proeflokatie Afsluitdijk.

In de periode februari – maart 2009 zijn grootschalige proeven gedaan naar de sterkte van het grastalud bij golfoverslag. Dit rapport geeft een beschrijving van aanpassing van de proefopstelling en de fysische modellen waarmee de faalmechnaismen worden beschreven. De golfoverslagsimulator is ge-automatiseerd en heeft een grote onderhoudsbeurt gehad. Op basis van eerdere ervaringen worden suggesties gedaan over de inrichting van de proefopstelling. De modellering van erosie is uitgebreid met een modellering voor erosie op de overgang van talud naar horizontaal en er is gekeken naar het bij de Boonweg waargenomen opbolmechnisme. Verder wordt een aanzet gegeven voor de modellering van erosie rondom objecten. Ten aanzien van de modelering van infiltratie is onder andere een recept opgesteld waarmee de tijd dat het talud nat is op basis van overslagvolumes kan worden voorspeld.

Referenties

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

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-05-11	Henk Verheij		Jan Blinde			
		Andre van Hoven		Bas Hofland			
		Jentsje van der Meer					
		Gosse Jan Steendam					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
1.2 Werkwijze	3
1.3 Proeflocatie Afsluitdijk	4
1.4 Leeswijzer	4
2 Golfoverslagsimulator en proefopstelling	5
2.1 Automatisering golfoverslagsimulator	5
2.2 Groot onderhoud simulator	15
2.3 Mogelijk nieuw ontwerp voor een simulator	17
2.4 Proefopstelling en uitvoering op locatie golfoverslag	24
2.5 Vastleggen schadeontwikkeling golfoverslag	27
2.6 Proefopstelling afschuiven	28
2.7 Metingen stroomsnelheid, waterlaagdikte en erosie	28
3 Predictiemodellen	31
3.1 Graserosie	31
3.1.1 Eroderen toplaag	32
3.1.2 Abrupt losscheuren zode	37
3.1.3 Erosie op overgang bij teen talud	39
3.1.4 Erosie rondom paaltjes	41
3.2 Infiltratie en afschuiven	43
3.2.1 Infiltratietijd	43
3.2.2 1D analytische infiltratieberekening	46
3.2.3 Schuifsterkte klei met bodemstructuur	48
4 Conclusies	49
5 Referenties	52

1 Inleiding

1.1 Kader

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

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

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

Het project Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding is een onderdeel van het Rijkswaterstaatproject Sterkte en Belastingen Waterkeren (SBW). Het doel van dit project is het in kaart brengen van het bezwijkmechanisme van een grasbekleding bij golfoverslag en het afleiden van praktische toets- en ontwerpformules. Het project is beschreven in het Projectplan - Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding d.d. 10 augustus 2007. De resultaten van het onderzoek moeten uiteindelijk worden verwerkt in drie eindproducten: een Technische Rapport, Toetsregels voor het VTV 2011 en een doorkijk naar 2012 – 2016. De planning van het project staat in Figuur 1.1.

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

Figuur 1.1 Planning

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

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

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

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

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

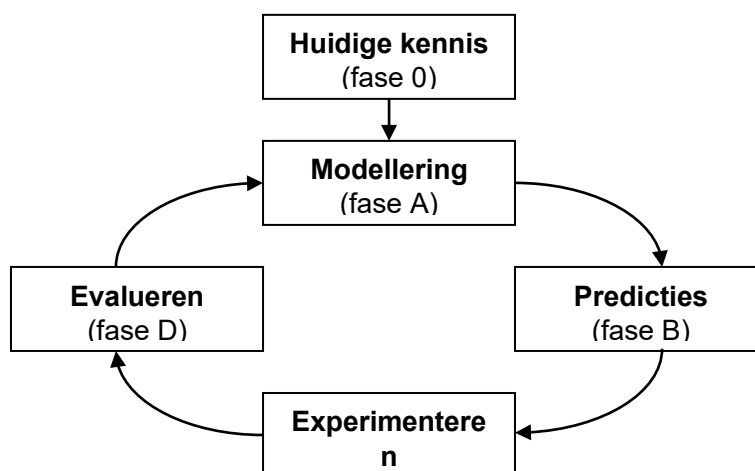
Fase 1	Delfzijl
Fase 2	Boonweg
Fase 3	Afsluitdijk
Fase 4	Rivierdijk
Fase 5	Zeeland
Fase 6	Petten
Fase 7	Golfoverslagbak Petten

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

Onderhavig rapport betreft Fase 3A Modelaanpassing Afsluitdijk.

1.2 Werkwijze

Het eindproduct, de bouwsteen ten behoeve van het VTV 2011, wordt vervaardigd middels een cyclisch proces. De grondgedachte hiervan is het KOLB-principe (zie Figuur 1.2 en <http://www.thesis.nl/kolb>).



Figuur 1.1 KOLB-principe

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

van de volgende proeflocatie ingebracht. Iedere fase wordt afgesloten met een rapportage (tussenproduct).

Door tijdgebrek is de Kolb cyclus voor de proeflocatie Afsluitdijk niet strikt gevolgd. De proeven zijn reeds uitgevoerd, voor gereedkomen van de rapportage van de modelaanpassingen. Hierbij wordt opgemerkt dat de modelaanpassingen wel al waren gemaakt en als input hebben gediend voor de inrichting van de proef en het meetprogramma.

1.3 Proeflocatie Afsluitdijk

De proeven op de Friese Waddenzeedijk bij de Boonweg (Fase 2) en de proeven in Zeeland (Fase 5) hebben veel informatie opgeleverd. Bij de Boonweg is onder andere het zogenaamde opbolmechanisme waargenomen. In Zeeland en bij de Boonweg is duidelijk geworden dat de overgang van talud naar horizontaal kritisch is. Deze waarnemingen hebben geleid tot modelaanpassingen waarmee deze processen kunnen worden beschreven. Onder deze modelaanpassingen vallen ook de aanpassingen aan de golfoverslagsimulator, de proefopstelling.

Bij de evaluatie van de metingen van de hydraulische parameters in Zeeland en bij de Boonweg is gebleken dat het moeilijk was om de volumes van overslaande golven te koppelen aan de registraties. Daarom zal een voorziening worden aangebracht waardoor kort na het loslaten van een golf een stuursignaal worden gegeneerd.

In Zeeland bleek dat het brakke water dat hier werd gebruikt veel meer lucht bevatte dan eerder was waargenomen bij proeven met zoet water. Verder is door het Review Team Dijken aangekaart om vooral ook het effect van niet waterkerende objecten op de dijk mee te nemen in het onderzoek. Deze informatie is gebruikt bij de definitieve keuze voor de Afsluitdijk als proeflocatie en het vaststellen van de proevenserie. De mogelijkheid is hier namelijk aanwezig om de proeven met zout en zoet water uit te voeren en tevens waren er op korte afstand van elkaar een klinkerbestrating, een hekje en een taludtrap aanwezig.

1.4 Leeswijzer

De modelaanpassing Afsluitdijk is verdeeld in drie hoofdstukken: Hoofdstuk 2 bevat de aanpassingen aan de proefopstelling en de overslagsimulator. In hoofdstuk 3 komen de modelaanpassingen voor de graserosie, infiltratie en afschuiven aan de orde. Hoofdstuk 4 bevat de conclusies.

2 Golfoverslagsimulator en proefopstelling

In de paragrafen 2.1 t/m 2.3 wordt ingegaan op aanpassingen aan de golfoverslagsimulator. Dan komen in paragrafen 2.4 t/m 2.7 diverse aspecten aan de orde die te maken hebben met de proefopstelling.

2.1 Automatisering golfoverslagsimulator

Stuurfiles

Tot nu toe is de golfoverslagsimulator altijd met de hand, middels een joystick, aangestuurd. Zie voor een gedetailleerd beschrijving het ComCoast rapport van de proeven te Delfzijl en het Factual Report van de proeven op de Boonweg. In feite werd een stuurlijst gevolgd, waarop het nummer van de overslaande golf stond, het volume van de overslaande golf en tot slot het tijdstip waarop de klep geopend moest worden. Naast de proefsectie stond een digitale klok, welke bij de start van de proeven op nul werd gezet en die de “opentijd” tot op seconden aangaf.

Op het gevoel, kijkend naar het water dat uit de simulator stroomde, werd de klep na een aantal seconden weer dicht gedaan. Bij kleine overslaande volumes werd de klep maar even geopend en daarna weer direct dicht gedaan. Bij grotere volumes werd de tijd dat de klep open stond langer. Op de machine was een verklikker aangebracht die, middels een lampje op de joystick, aangaf wanneer de klep inderdaad dicht was. Dan kon de aansturing van “klep dicht” worden losgelaten.

De klep wordt door een hydraulische aggregaat aangedreven. De capaciteit van de aggregaat bepaalt hoe snel de klep open en dicht gaat. Bij de gebruikte aggregaat was dit ongeveer 2 s om de klep te openen en 3 s om de klep weer te sluiten. Verder is gemeten dat het ongeveer 5,5 s duurt voor een volle bak van 5500 l/m helemaal leeg was (het tijdstip dat van bovenaf de simulator de klep kon worden waargenomen). Deze tijden zijn essentieel bij een automatische aansturing en moeten in het vervolg zo nauwkeurig mogelijk worden vastgesteld. Voor nu gaan we van deze tijden uit.

Bij het automatisch aansturen van de golfoverslagsimulator kan hetzelfde type golfoverslagverdeling worden gebruikt. Dat wil zeggen dat de overslaande volumes volgens een bepaalde verdeling worden bepaald en dat deze dan random aan de simulator worden aangeboden. Dus de volgorde van overslaande volumes kan hetzelfde zijn als bij handbediening. Alleen moet nu een signaal worden afgegeven wanneer de klep moet worden geopend en ook wanneer de klep moet worden gesloten. Hier moet een procedure voor worden afgeleid.

Als eerste wordt bepaald hoeveel tijd er tussen de overslaande golven zit en vervolgens worden de tijden cumulatief gegeven. De tijd die nodig is om een bepaald overslaand volume in de simulator te pompen is het gewenste volume V gedeeld door het overslagdebiet q (dit is het ingestelde pompdebiet). Een volume van 2356 l/m wordt bij een overslagdebiet van 30 l/s per m gehaald in 78,5 s. Dit is de tijd dat de simulator net gesloten is tot het tijdstip dat hij open geweest is en net weer is gesloten. Ook tijdens het open zijn van de klep wordt er immers water in de simulator gepompt.

De tijd om het openingssignaal te geven vindt dus plaats vóór het bovenstaand (cumulatief) tijdstip van weer gesloten zijn. Wanneer de klep moet worden geopend hangt af van de totale tijd dat de klep open moet zijn om het volume uit de simulator te laten lopen. Bij 5500 l/m was dit 5,5 s, maar dan bleef de klep ook zolang open. In feite moet de klep al eerder dicht gaan. Geschat wordt dat bij 5500 l/m de klep na 6,5 s weer dicht zou moeten zijn (in praktijk later te ijken). Dat betekent dat de totale openingstijd wordt bepaald door:

$$\text{Totale openingstijd (s)} = V/\text{factor} + 1 \quad (1)$$

Hierbij is V het overslagvolume in l/m en de factor is 5500 gedeeld door de tijd dat een volume van 5500 l/m uit de simulator kan stromen. Bij bovenstaande tijd van 5,5 s wordt de factor 1000. Dus een volume van 2000 l/m heeft een totale openingstijd van 3 s en een volume van 4000 l/m een tijd van 5 s. Het openingstijdstip is dan het (cumulatieve) tijdstip waarop de klep weer dicht moet zijn minus de totale openingstijd.

De klep heeft 2 s nodig om volledig te openen en 3 s om weer volledig te sluiten. Als de totale openingstijd groter dan 5 s is, dan blijft de klep even open staan, voordat deze weer wordt gesloten. Maar is de totale openingstijd korter dan 5 s, dan moet de klep alweer het "sluiten"-signaal krijgen, voordat de klep helemaal open is. Bij een totale openingstijd van meer dan 5 s is het tijdstip van sluiten precies 3 s, voordat de klep weer dicht moet zijn. Bij een tijd korter dan 5 s is het tijdstip van sluiten 3/5-de van de totale openingstijd, voordat de klep weer dicht moet zijn.

Op bovenstaande wijze kunnen het tijdstip van openen en opnieuw sluiten voor elk overslaand volume in de tijd worden bepaald. Maar dit is nog niet de stuurfile die nodig is. De stuurfile bestaat uit 4 kolommen, waarvan de eerste het nummer van de golf geeft, de tweede het volume van de overslaande golf (l/m), de derde het tijdstip van openen (in hele seconden vanaf de start) en tenslotte in de laatste kolom de tijd na het openen, waarop de klep weer moet worden gesloten (in tienden van seconden). Tot slot moet de file in hexadecimale getallen worden geschreven en opgeslagen als een csv-file (comma separated value).

Nadat het openingstijdstip is bepaald, wordt dit tijdstip naar hele seconden (naar boven) afgerond. Hierna wordt de tijd waarop de klep weer moet worden gesloten afgerond op tienden van seconden. Deze twee tijden komen in de derde en vierde kolom van de stuurfile terecht en worden omgezet naar hexadecimale waarden. In tabel 2.1 is een voorbeeld gegeven van een berekening.

nummer	volume l/m	pompdebiet 30 l/s/m						nummer	volume l/m	open s	dicht na 0,1 s	Hexadecimaal Stuurfile			
		gesloten s	totaaltijd s	openen s	openen geheel s	dicht 0,1 s	dicht geheel 0,1 s								
1	200	6.667	1.2	5.467	6	5.143	6	1	200	6	6	0001	00C8	0006	0006
2	200	13.333	1.2	12.133	13	5.143	6	2	200	13	6	0002	00C8	000D	0006
3	200	20.000	1.2	18.800	19	5.143	6	3	200	19	6	0003	00C8	0013	0006
4	1000	53.333	2.0	51.333	52	8.571	9	4	1000	52	9	0004	03E8	0034	0009
5	1000	86.667	2.0	84.667	85	8.571	9	5	1000	85	9	0005	03E8	0055	0009
6	1000	120.000	2.0	118.000	118	8.571	9	6	1000	118	9	0006	03E8	0076	0009
7	2000	186.667	3.0	183.667	184	12.857	13	7	2000	184	13	0007	07D0	00B8	000D
8	2000	253.333	3.0	250.333	251	12.857	13	8	2000	251	13	0008	07D0	00FB	000D
9	2000	320.000	3.0	317.000	317	12.857	13	9	2000	317	13	0009	07D0	013D	000D
10	3000	420.000	4.0	416.000	416	17.143	18	10	3000	416	18	000A	0BB8	01A0	0012
11	3000	520.000	4.0	516.000	516	17.143	18	11	3000	516	18	000B	0BB8	0204	0012
12	3000	620.000	4.0	616.000	616	17.143	18	12	3000	616	18	000C	0BB8	0268	0012
13	4000	753.333	5.0	748.333	749	22.000	22	13	4000	749	22	000D	0FA0	02ED	0016
14	4000	886.667	5.0	881.667	882	22.000	22	14	4000	882	22	000E	0FA0	0372	0016
15	4000	1020.000	5.0	1015.000	1015	22.000	22	15	4000	1015	22	000F	0FA0	03F7	0016
16	5000	1186.667	6.0	1180.667	1181	32.000	32	16	5000	1181	32	0010	1388	049D	0020
17	5000	1353.333	6.0	1347.333	1348	32.000	32	17	5000	1348	32	0011	1388	0544	0020
18	5000	1520.000	6.0	1514.000	1514	32.000	32	18	5000	1514	32	0012	1388	05EA	0020
19	5500	1703.333	6.5	1696.833	1697	37.000	37	19	5500	1697	37	0013	157C	06A1	0025
20	5500	1886.667	6.5	1880.167	1881	37.000	37	20	5500	1881	37	0014	157C	0759	0025
21	5500	2070.000	6.5	2063.500	2064	37.000	37	21	5500	2064	37	0015	157C	0810	0025

Tabel 2.1 Voorbeeld van een berekening van een stuurfile

In dit geval is het niet een random verdeling van volumes, maar een file die steeds oplopende overslagvolumes geeft, beginnend bij 200 l/m en eindigend bij 5500 l/m. Elk volume wordt driemaal herhaald. Het pompdebiet is 30 l/s per m. De eerste twee kolommen geven het nummer van de golf en het overslaand volume. In het volgende blok worden de verschillende tijden en tijdstippen berekend en afgerond op hele of tienden van seconden. Het derde blok geeft de vier kolommen in decimale waarden. Eerst het nummer van de golf, dan het overslagvolume (l/m), het tijdstip van openen (s na start) en tenslotte de tijd na openen waarop de klep weer moet worden gesloten (in tienden van seconden). Het laatste blok geeft dan de stuurfile in hexadecimale waarden. Deze laatste vier kolommen moeten als een csv-file worden aangeboden.

De stuurfile wordt in Excel gemaakt. Bij het omzetten naar hexadecimale waarden, moet de functie wel in Excel beschikbaar gemaakt zijn. Als dit niet het geval is, moet deze worden geactiveerd (Extra, invoegtoepassingen, Analysis Toolpak aanvinken). De functie in Excel is dan “=DEC.N.HEX(celnaam;4)” (in de Engelse versie wordt deze functie anders geschreven).

De file mag in een directory worden aangeboden. De naam van deze directory mag maximaal 4 karakters zijn, zonder getallen. De file zelf mag 8 karakters zijn, maar de 0 (nul) mag hierin niet voorkomen. De volgende filenamen worden gehanteerd (met tussen haakjes de beschrijving):

1x1	(1 l/s per m gevuld met pompdebiet 1 l/s per m)
5x1	(1 l/s per m gevuld met pompdebiet 5 l/s per m, dus 5x versneld)
tien	(10 l/s per m)
dertig	(30 l/s per m)
vijftig	(50 l/s per m)
75	(75 l/s per m)
honderd	(100 l/s per m)
125	(125 l/s per m)
ijk3tig	(ijkfile, zie tabel 1, oplopende volumes, pompdebiet 30 l/s per m)
ijk5tig	(ijkfile, zie tabel 1, oplopende volumes, pompdebiet 50 l/s per m)

De stuurfiles moeten op een memory card worden gezet. Dit moet een OMRON HMC-EF183 memory card zijn. Een card en cardreader zijn bij de automatisering geleverd.

Opbouw automatisering met PLC

Het geautomatiseerd aansturen van de golfoverslagsimulator gebeurt door een PLC met kleurenscherm en touch screen bediening, welke in een beschermende kast is gebouwd. De kast zelf zit in een verstelbaar frame. Foto 1 geeft de kast met PLC en een noodknop om de besturing direct stop te kunnen zetten. Foto's 2 en 3 geven de binnenzijde van de kast.



Foto 1. Kast in frame met PLC en noodknop Foto 2. Achterzijde PLC

Foto 4 geeft de plaats waar de memory card zit. Boven de memory card zit een groen lampje, met daaronder een bruin/rood lampje. Het groene lampje hoort continu te branden. Als het bruin/rode lampje brand of knippert, mag de memory card (nog) NIET uit de lezer worden gehaald, want op zo'n moment is de card in gebruik door de PLC.

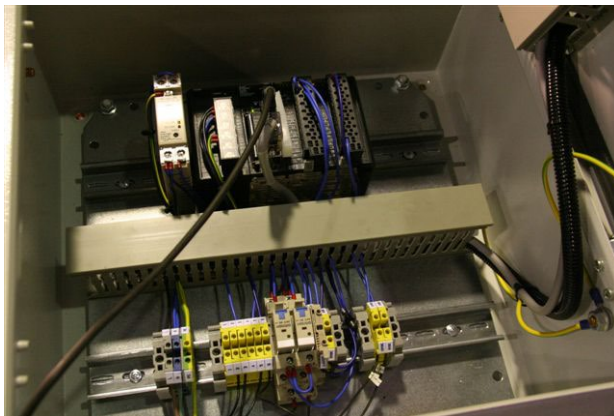


Foto 3. Binnenste van de kast met PLC

Foto 4. Plaats van de memory card

De PLC is in oktober 2008 geprogrammeerd en op 31 oktober getest bij Nijholt, waar de golfoverslagsimulator op dat moment aanwezig was voor onderhoud. Afrondende werkzaamheden hebben 19 november plaatsgevonden. Foto 5 geeft het testen van de PLC met de simulator. Het testen gebeurde droog, zonder water in de simulator. Wel werd natuurlijk de klep geopend en weer dicht gedaan. Hiervoor werd een kleine, bij Nijholt aanwezige, hydraulische aggregaat gebruikt, zie foto 6. Omdat de capaciteit van deze aggregaat kleiner was dan die bij de proeven wordt gebruikt, is één van de twee kleppen gebruikt en is deze losgekoppeld van de andere (de simulator heeft twee geschakelde

kleppen van 2 m lengte). Hierdoor kon de aggregaat deze ene klep ongeveer in dezelfde tijd openen en sluiten als het geval is op de proeflocatie.



Foto 5. Testen PLC op 30 oktober 2008-11-03



Foto 6. Gebruikte aggregaat

Het bleek dat de klep precies in 2,1 s kon worden geopend en in 2,8 s kon worden gesloten. Deze tijden moeten op elke proeflocatie worden vastgesteld, omdat ze van belang zijn bij het maken van de juiste stuurfiles en omdat ze moeten worden ingesteld op de PLC. De sturing houdt er rekening mee door nooit langer dan 0,5 s na het volledig openen of sluiten van de klep de hydrauliek aan te sturen.

De kabel waarop de oorspronkelijke joystick was aangesloten, is ook gebruikt voor de PLC-aansturing. Hiertoe zijn zowel de kabel, de PLC, als de joystick voorzien van stekkers, zie foto's 7 en 8. Op deze manier is het mogelijk direct over te schakelen op de manuele bediening met de joystick, als bijvoorbeeld de automatische bediening het zou laten afweten.

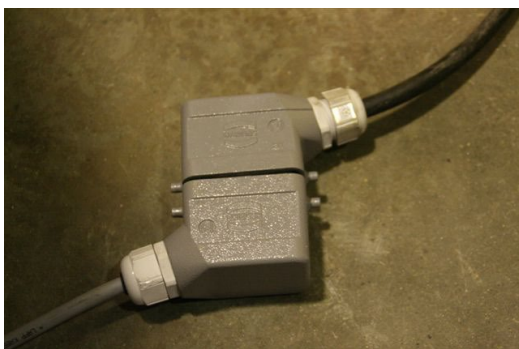


Foto 7. Stekkerverbinding



Foto 8. Stekker aan oorspronkelijke joystick

Op de simulator is momenteel een mechanische verklikker aangebracht, die aangeeft wanneer de klep volledig gesloten is. Deze zal worden vervangen door een elektronisch oog, waarbij er ook eenzelfde type oog zal worden geplaatst om te meten wanneer de klep helemaal open is. Dit zijn beveiligingen die er voor zorgen dat de hydrauliek niet wordt overbelast en omdat ze geen draaiende onderdelen bevatten, zijn ze niet schadegevoelig. Foto's 9 en 10 geven de elektronische ogen op de simulator (nog niet op de juiste plaats en nog niet definitief gemonteerd op de magneetvoet).



Foto 9. Wijzer met 2 elektronische ogen



Foto 10. Elektronisch oog op magneetvoet



Foto 11. Noodvoeding

Tot slot wordt er een UPS noodvoeding bij de PLC geleverd, zie foto 11, welke ongeveer een half uur kan werken. Mocht de stroom naar de PLC tijdelijk uitvallen, dan kan deze noodvoeding worden gebruikt. Ook bevat deze noodvoeding stekkerdozen (aan de onderzijde) die een piekspanning kunnen opvangen. Deze zijn geschikt om bijvoorbeeld laptops op aan te sluiten.

Aansturing simulator met PLC

De bediening van de simulator gebeurt door het touch screen van de PLC. Foto 12 geeft het hoofdscherm. Voordat de daadwerkelijke proeven beginnen, moet eerst de tijd worden ingesteld die nodig is om de klep volledig te sluiten (vanaf volledig open stand) en te openen. Dit gebeurt in het onderste deel van het scherm, links en rechts van de aanduiding "Valve activation seconds/10". De tijd die nodig is om de klep te sluiten moet links worden ingegeven in tienden van seconden. De openingstijd moet rechts worden ingegeven. Als deze tijden zijn vastgesteld, moeten ze gedurende de hele proeftijd zo blijven (tenzij er een andere hydraulische aggregaat wordt geplaatst).

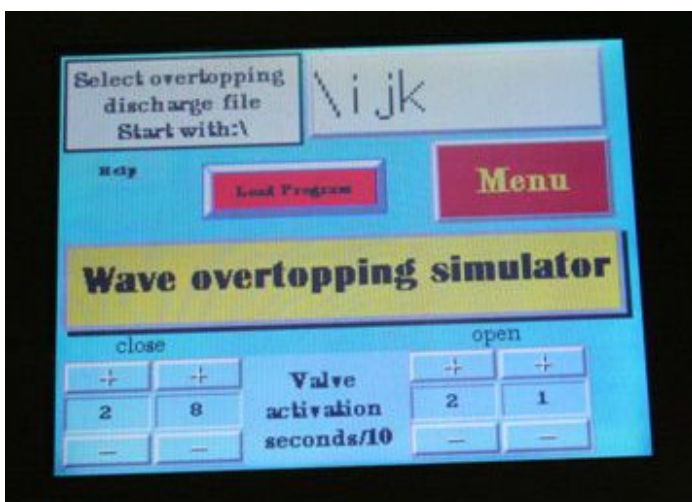


Foto 12. Hoofdscherm van de bediening

Het is mogelijk bovenstaande instelling te gebruiken om precies te bepalen wanneer de klep daadwerkelijk volledig dicht of open is. Als de klep volledig open of dicht is, dan is wordt het pompen van de aggregaat "hoorbaar". Zolang dit niet hoorbaar is, is de klep net niet volledig open of dicht en moet de ingestelde tijd worden verhoogd. De uiteindelijke tijden moeten worden gebruikt bij het maken van de stuurfiles, omdat deze afhankelijk zijn van deze openings- en sluitingstijden.

Als de stuurfiles gereed zijn en op de memory card zijn gezet, kan een stuurfile worden geladen. Dit gebeurt door de knop linksboven met "Select overtopping discharge file. Start with:\". Als deze knop wordt aangeraakt, dan wordt een toetsenbord zichtbaar, waarop de file kan worden ingegeven, zie foto 13.

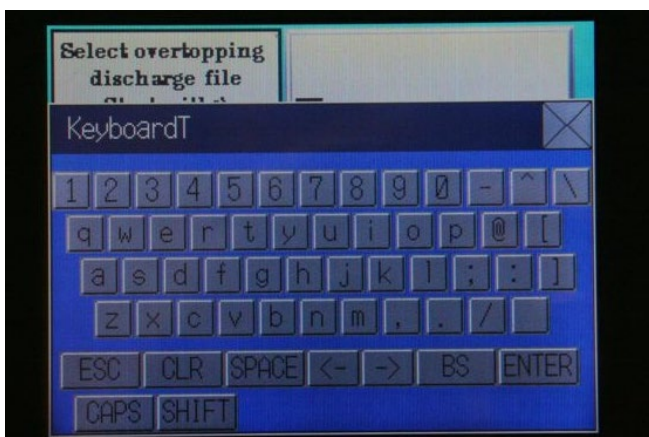


Foto 13. Keyboard om de stuurfile aan te geven

Als de stuurfiles op de memory card in een aparte directory staan (bijvoorbeeld "Boon" voor Boonweg), dan moet eerst de directory worden gegeven, voorafgegaan door een back slash "\". De file moet ook worden afgesloten met een "\". De stuurfile voor 10 l/s per m moet worden aangegeven als:

\Boon\tien als deze file in de directory Boon staat, en als:

\tien als deze file direct op de memory card staat en niet in een directory.

Daarna moet de knop “Load program” ongeveer een seconde worden aangeraakt, waardoor de file worden geladen.

Met de knop “Menu” komt dan het tweede scherm tevoorschijn, dat tijdens uitvoering van de proef van belang is. Dit scherm is in foto 14 gegeven. Op de linkerzijde worden twee kolommen getoond onder de titel “Volume l/m at used seconds”. De eerste kolom geeft het volume van de overslaande golven, die in de gegeven volgorde zullen worden gesimuleerd. De eerstvolgende staat bovenaan in het gele vakje. Op de foto is als stuurlijst de “ijkfile” zichtbaar en wel het laatste stuk zoals dat in tabel 1 is gegeven. De tweede kolom geeft de tijd aan waarop de klep zal worden geopend. Dit in seconden na de start van de proef. Op de foto is de volgende overslaande golf een volume van 3000 l/m en de klep wordt 616 s na de start van de proef geopend. Zodra een volgende golf is losgelaten, schuiven de twee linkse kolommen een vak naar boven.



Foto 14. Tweede besturings scherm

Bovenin het scherm worden twee tijden getoond. Links het aantal seconden dat de proef loopt en rechts de totale duur van de proef (op foto 13 is dit nog niet de juiste tijd). Door de verstreken tijd met de tijd voor de volgende golf te vergelijken (in het gele vakje), wordt duidelijk hoe lang het duurt voor de volgende overslaande golf wordt losgelaten. Op foto 10 is dit na 10 s (616 s – 606 s).

Bovenstaande beschrijving van gegevens betreffen geen aanstuurknoppen. Het zijn gegevens die worden getoond, zonder dat hier iets aan te veranderen is. Het blok rechtsonder op het scherm geeft wel bedieningsmogelijkheden en is in foto 15 gegeven.

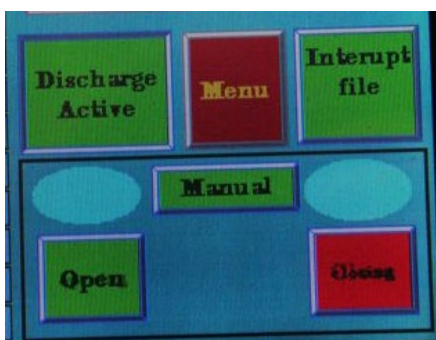


Foto 15. De bedieningknoppen tijdens het uitvoeren van een proef

Met de knop "Menu" wordt naar het hoofdscherm teruggedaan en kan bijvoorbeeld een andere stuurfile worden geladen. Als het vakje linksboven "Discharge Active" rood is gekleurd, dan wordt de simulator nog niet aangestuurd. Door op deze knop te drukken, start de aansturing van de simulator middels de stuurfile. Het vakje wordt dan groen. Als opnieuw op deze knop wordt gedrukt, dan wordt de proef volledig afgebroken! De stuurfile moet dan weer worden geladen en de proef opnieuw gestart.

Met de knop rechtsboven "Interrupt file" wordt de sturing van de machine onderbroken. Hierbij loopt de tijd in de stuurfile NIET door. De knop kan dus gebruikt worden om de proef tijdelijk stop te zetten en daarna weer door te gaan. Bijvoorbeeld om na 2 uur de schade op te nemen en dan de proef weer door te laten gaan.

In het onderste gedeelte kan worden overgegaan op handbediening, eigenlijk precies gelijk aan de bediening van de oorspronkelijke joystick. Als op de knop "Manual" wordt gedrukt, dan loopt de tijd WEL door. Als weer op automatische sturing wordt overgeschakeld, dan gebeurt dit op het juiste moment in de stuurfile. Op deze manier kan in een proef handmatig worden ingegrepen, zonder dat de proef stopt.



Foto 16. Manuele bediening, waarbij linksboven wordt aangegeven dat de klep helemaal open is.

Met de knoppen "Open" en "Close" kan handmatig de klep worden geopend of gesloten. Het openen en sluiten gebeurt net zolang als men op de knop drukt, precies zo als bij de joystick. De lichtblauwe ovalen geven aan of de klep helemaal open of helemaal gesloten is, zie foto 16. Dit wordt door de elektronische ogen bepaald.

Meten van de laagdikte van overstromend water

Tot nu toe is geprobeerd om de laagdikte van overstromend water te meten met een draadgolfhoogtemeter. Op de Boonweg en in Zeeland zijn naast deze metingen ook visuele metingen van de maximale laagdikte gedaan. Door de turbulente stroming en de

luchtinsluiting is het niet eenvoudig een maximale laagdikte op de zijwanden af te lezen. Om deze reden is een alternatief meetinstrument ontwikkeld en op de Boonweg getest, zie foto 17.



Foto 17. De “surfplank” voor het meten van de laagdikte (Boonweg)

Het is een dunne plank (“surfplank”) die door draad een beetje bol wordt gespannen. Aan de stroomopwaartse zijde is het instrument scharnierend bevestigd. Doordat het geheel vrij licht is, gaat de plank op de overstromende laag drijven. Op de Boonweg werd dan visueel op een schaal de hoogte van de plank gemeten.

De plank drijft vrijwel op het water, dus het meet de laagdikte inclusief de aanwezige lucht. Daarmee is het een zinnig alternatief naast de draadgolfhoogtemeter, omdat die de lucht niet meet (alleen de totale weerstandsverandering door water). Vergelijking van beide zou mogelijk iets over de luchtinsluiting kunnen vertellen.

Met het visueel meten wordt alleen een schatting van de maximale laagdikte verkregen. Door bijvoorbeeld de hoekverdraaiing van de plank te meten, is het mogelijk een volledig tijdssignaal te krijgen. Als het daarnaast mogelijk is de maximale snelheid of frontsnelheid te meten en men ervan uit gaat dat de snelheid eenzelfde verloop heeft als de laagdikte, dan is door integratie van de laagdikte en maximale snelheid over het tijdssignaal van de laagdikte, het volume van de overslaande golf te berekenen. Ook hieruit zou een idee van de luchtinsluiting kunnen worden verkregen, omdat bij de simulator precies bekend is welk volume wordt losgelaten.

Het kunnen meten van de hoekverdraaiing van de “surfplank” en daarmee het verkrijgen van een signaal voor de laagdikte, is geïmplementeerd. Een encoder is op de as van het meetinstrument geplaatst, welke de hoekverdraaiing in 0,1 graad meet. Het meten is gekoppeld aan de stuurfile en de gegevens worden ook opgeslagen op de geheugenkaart van de PLC.

Dit kan omdat het de bedoeling is het meten van snelheid en laagdikte niet tijdens de proeven te doen, maar in een aparte calibratiefase. In die fase worden achterelkaar een aantal vastgestelde volumes (met oplopende grootte) losgelaten. Hierdoor is de tijd dat er gemeten hoeft te worden maar kort. In het algemeen zullen het niet meer dan 20-30 overslaande golven zijn in een half uur tijd.

De meting start zodra in het stuursignaal het punt wordt bereikt waarop de klep opengaat en de meting stopt na 15 s. Er wordt met 25 Hz gemeten. Maximaal kunnen er 30.000

getallen/metingen worden opgeslagen. Een stuurfile met 40 overslaande volumes, 25 Hz bemonsterd gedurende 15 s en waarvan de gemeten waarden en de tijd worden opgeslagen, komt op $40 \times 25 \times 15 \times 2 = 30.000$ getallen. De meting wordt automatisch uitgevoerd als de "IJK"-file wordt geladen. Deze mag dus niet meer dan 40 overslaande golven bevatten. Na de meting kan de file met een eigen naam worden opgeslagen. Na afloop van de metingen kan de geheugenkaart worden overgebracht naar een pc, voor verdere analyse.

2.2 Groot onderhoud simulator

Doordat vorig jaar de simulator is vergroot tot 22 m^3 zijn er dit jaar grotere krachten op de overgangsconstructie terecht gekomen dan waarop in het oorspronkelijk ontwerp was gerekend. Sommige onderdelen zijn verbogen of staan op punt van breken en er is geconcludeerd dat met name dit onderste gedeelte weer in orde gemaakt moest worden.

De simulator is voor dit groot onderhoud naar Nijholt vervoerd, waar de werkzaamheden hebben plaats gevonden. Foto 18 toont de simulator (zonder onderstel en opzetbak) in de werkplaats bij Nijholt. De simulator is 21 november gebruiksklaar opgeleverd.



Foto 18. De simulator voor onderhoud bij Nijholt.

De werkzaamheden die zijn uitgevoerd, zijn:

- Een nieuw stuk over de hele lengte van de geleideplaat inlassen;
- Meerdere bouten vervangen;
- Haakogen aan de voorzijde, om met spanbanden gemakkelijker de geleideplaten te kunnen monteren; haakogen aan de geleideplaten; zie foto's 19 en 20;
- Ondersteuning om gemakkelijker de geleideplaten te kunnen bevestigen; zie foto 21;
- Een extra houten balk om het informatiebord op de voorkant beter te kunnen bevestigen; zie foto 22;
- Nieuw celrubber voor afdichting van de klep; het celrubber heeft nu een bescherming, waardoor het rubber zelf minder gemakkelijk kan scheuren;
- Laswerk voor scheuren en gaatjes;
- Peilbuizen herstellen;
- Versteving aan de achterzijde lassen en monteren;
- Kleplagers doorsmeren;
- De twee kleppen afzonderlijk draaibaar maken (voor testen van de automatisering); zie foto's 23 en 24;

- Herstellen van beschadigde plekken met geel RAL 1021;
- Kokers bovenin de simulator en de opzetbak voor bevestiging vlaggenmasten; zie foto's 25 en 26).



Foto 19. Haakooog voorzijde simulator



Foto 20. Haakooogen op geleideplaat



Foto 21. Ondersteuningen



Foto 22. Houten balk voor informatiebord



Foto 23. Hydrauliek voor gescheiden bediening kleppen



Foto 24. Kleppen afzonderlijk te bedienen



Foto 13. Koker voor vlaggenmast op oorspronkelijke simulator



Foto 25. Koker in de hoek van de opzetbak voor bevestiging vlaggenmast

2.3 Mogelijk nieuw ontwerp voor een simulator

In het projectplan is genoemd dat een tweede simulator nodig zou kunnen zijn en dat daar ruim van tevoren over nagedacht zou moeten worden. Inmiddels is duidelijk geworden dat ook november en december goede maanden zijn om proeven te doen (eigenlijk zodra de groei van gras is gestopt vanwege te lage temperaturen). De mogelijke tijd van proeven is dus langer geworden. Daarnaast is de huidige simulator al vergroot tot 22 m³, met een maximaal overslagdebiet van 75 l/s per m, met kunst en vliegwerk uit te breiden tot meer dan 100 l/s per m (bij een golfhoogte van 2 m aan de zeezijde). Beide aspecten geven aan dat er niet onmiddellijk behoefte is aan een tweede simulator.

Toch zijn er wel ontwikkelingen geweest. Op basis van het huidige ontwerp en de ervaring ermee in de afgelopen twee jaar, is het mogelijk een aantal duidelijke verbeteringen door te voeren, mocht een nieuwe simulator nodig zijn. In een samenwerkingsverband tussen de TU Delft en de universiteit in Hanoi is een vergelijkbaar onderzoek opgezet in Vietnam. Er wordt momenteel een simulator in Vietnam gebouwd en het ontwerp is gebaseerd op het huidige ontwerp met een aantal duidelijke verbeteringen. In dit hoofdstuk wordt het ontwerp voor Vietnam beschreven, met de voorgestelde aanpassingen, zodat dit binnen SBW vast ligt.

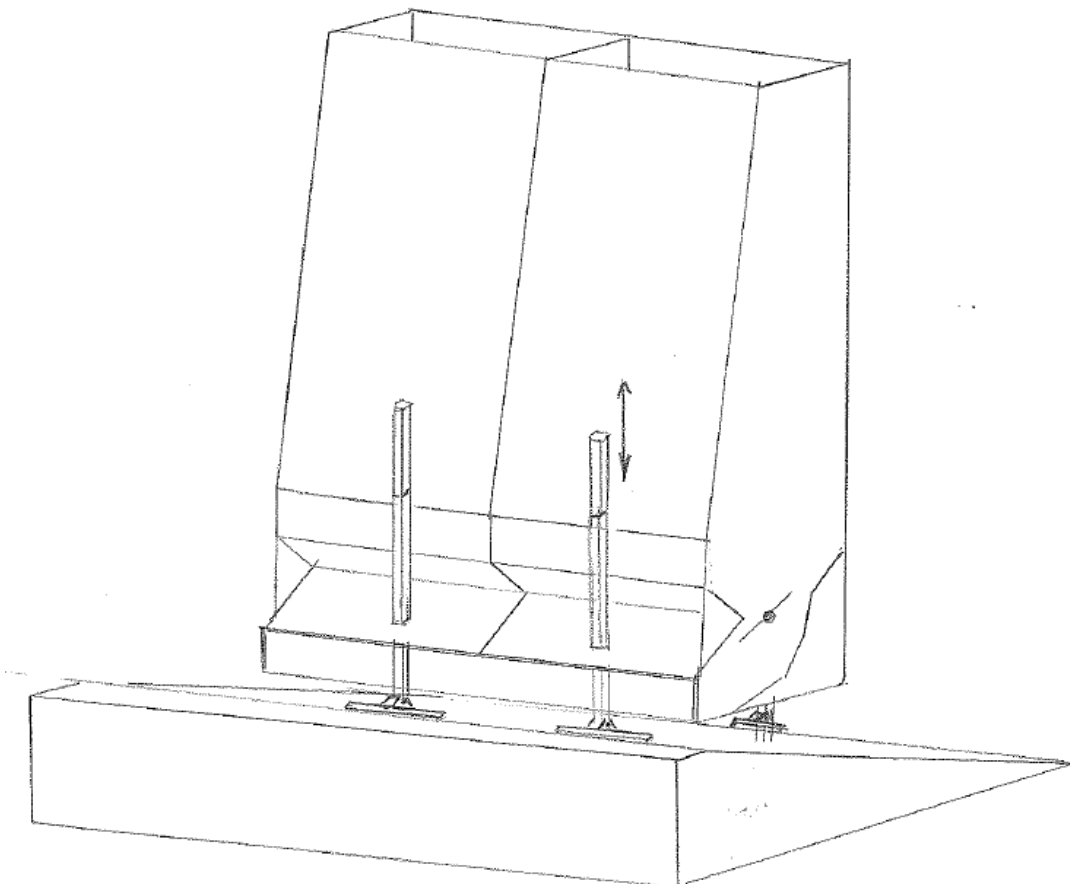
De inhoud van de simulator (22 m³) en de totale breedte (4 m) kan in principe hetzelfde blijven. Omdat de huidige simulator is vergroot van 14 m³ naar 22 m³, bestaat de bak van de huidige simulator uit twee onderdelen bovenop elkaar. Een nieuwe simulator kan weer uit één onderdeel bestaan.

Het grootste verschil met de huidige simulator is dat in het nieuwe ontwerp de simulator vertikaal in twee delen is gescheiden, zie Figuur 2.1. Er zijn dus twee bakken van elk 2 m breed, die in het midden waterdicht aan elkaar worden bevestigd. Ook wordt de maximale breedte in de uitstroomrichting beperkt tot maximaal ongeveer 2,3 m. Hiermee blijven de maximum breedte afmetingen binnen die van een zeecontainer. De binnenmaten van een zeecontainer zijn 2,34 m breed en 2,39 m hoog, met variabele lengten van 5,89 m voor een 20 ft container en 12,01 m voor een 40 ft container. De huidige simulator moet op een speciale dieplader rechtop worden vervoerd. Deze beperking zit niet op het nieuwe ontwerp. De twee onderdelen kunnen gemakkelijk liggend worden vervoerd, of over grote afstanden, in een of twee zeecontainers.

Figuur 2.2 geeft een doorsnede, waarop andere verschillen met de huidige simulator zijn weergegeven. De vorm is opnieuw langwerpiger en naar boven smaller (om zo veel mogelijk potentiële energie te hebben bij grote volumes), maar de achterkant is nu vertikaal. Daardoor is het gemakkelijker om op de voorkant via een ladder naar boven te klimmen. Ook kunnen de peilglazen over de volle lengte aan de voorkant gemonteerd worden en zijn daardoor beter zichtbaar dan aan de zijkant. Zie ook Figuur 2.3 voor een aanzicht van de voorkant.

De stroomgeleiding onder de uitstroomklep is geïntegreerd met de simulator en hoeft niet meer apart ter plekke gemonteerd te worden. Alleen het stukje vóór de simulator, dat wat op de kruin van de dijk komt te liggen, moet nog apart worden gemonteerd, omdat anders de simulator te breed voor vervoer zou worden.

Het onderstel is nu ook geïntegreerd met de simulator. Doordat de simulator vertikaal in tweeën is gedeeld, zijn het twee geïntegreerde onderstellen geworden, elk met twee poten aan de achterkant (zie Figuur 2.4) en één aan de voorkant (zie Figuur 2.3). De poten aan de achterkant zijn niet alleen vertikaal uitschuifbaar, maar ook horizontaal. Op deze manier blijft de breedte bij vervoer beperkt, maar kan het onderstel op de dijk breder worden gemaakt om een betere stabiliteit te geven.



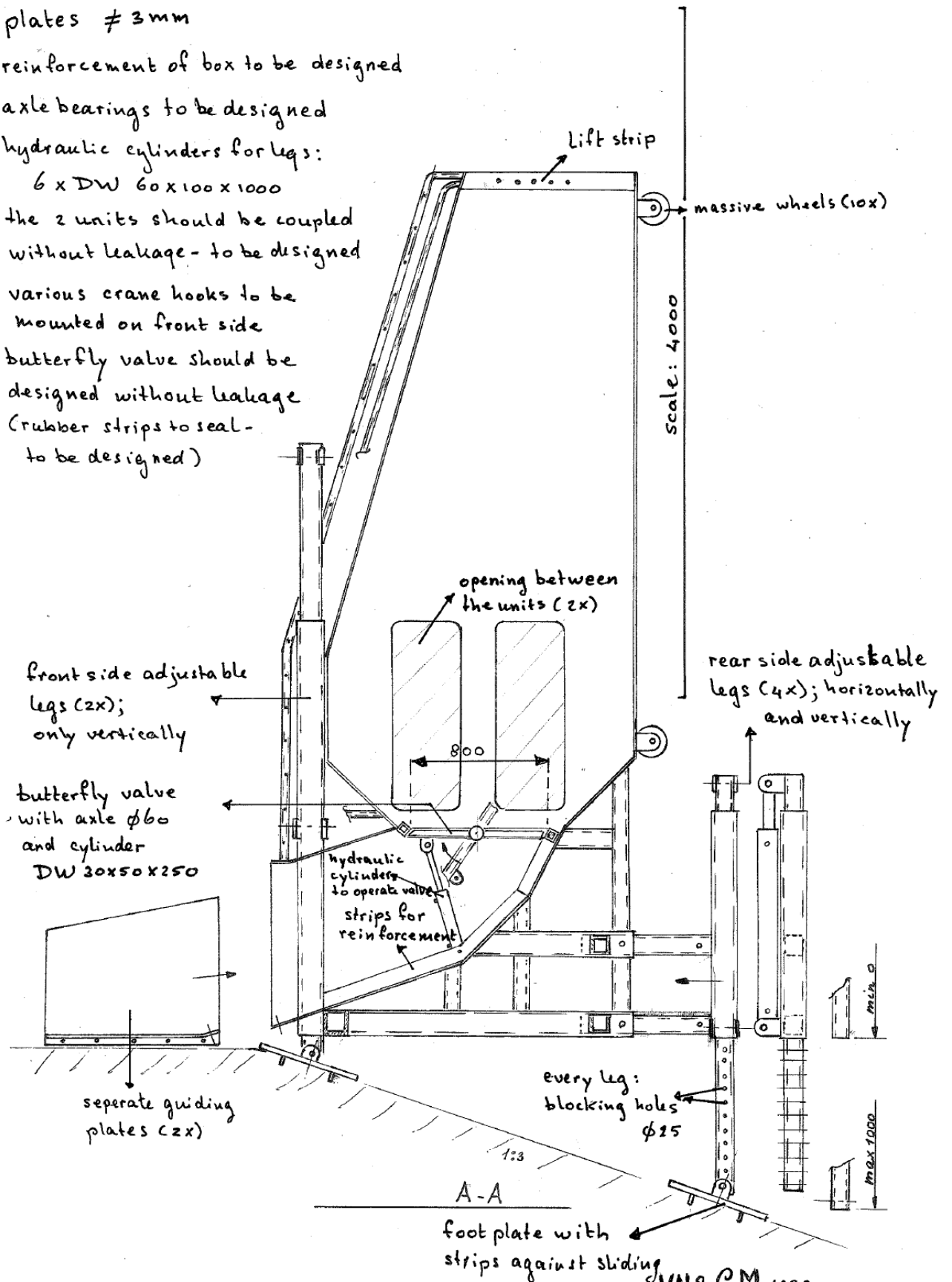
Figuur 2.1 3D-schets van het nieuwe ontwerp

De effectieve opening van de klep is met 0,1 m vergroot tot 0,7 m (0,8 m opening minus de dikte van 0,1 m van de klep). Door deze iets grotere opening kunnen de erg grote volumes van 22 m³ iets sneller uitstromen.

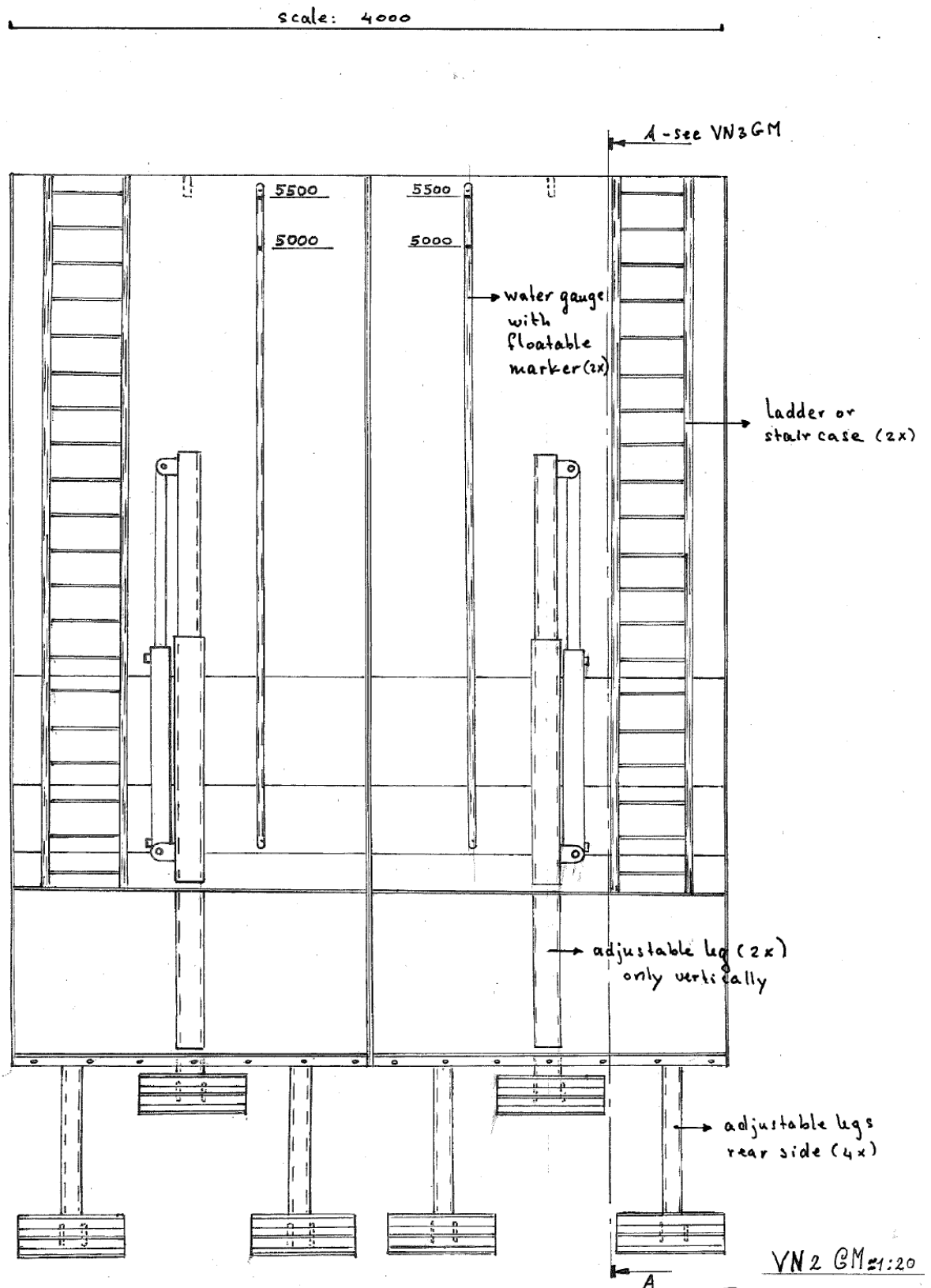
De hydraulische cilinders voor het aansturen van de vlinderklep zijn nu aan de onderkant van de klep geplaatst, in plaats van aan de bovenkant. Op deze manier wordt een extra druk gegeven om de klep helemaal goed en lekvrij te sluiten.

Tot slot is elke 2 m breed deel aan de achterkant voorzien van 5 kleine wielen, zie Figuur 2.2 en Figuur 2.4. Hierdoor is het gemakkelijk geworden om de simulatordelen in een zeecontainer te schuiven.

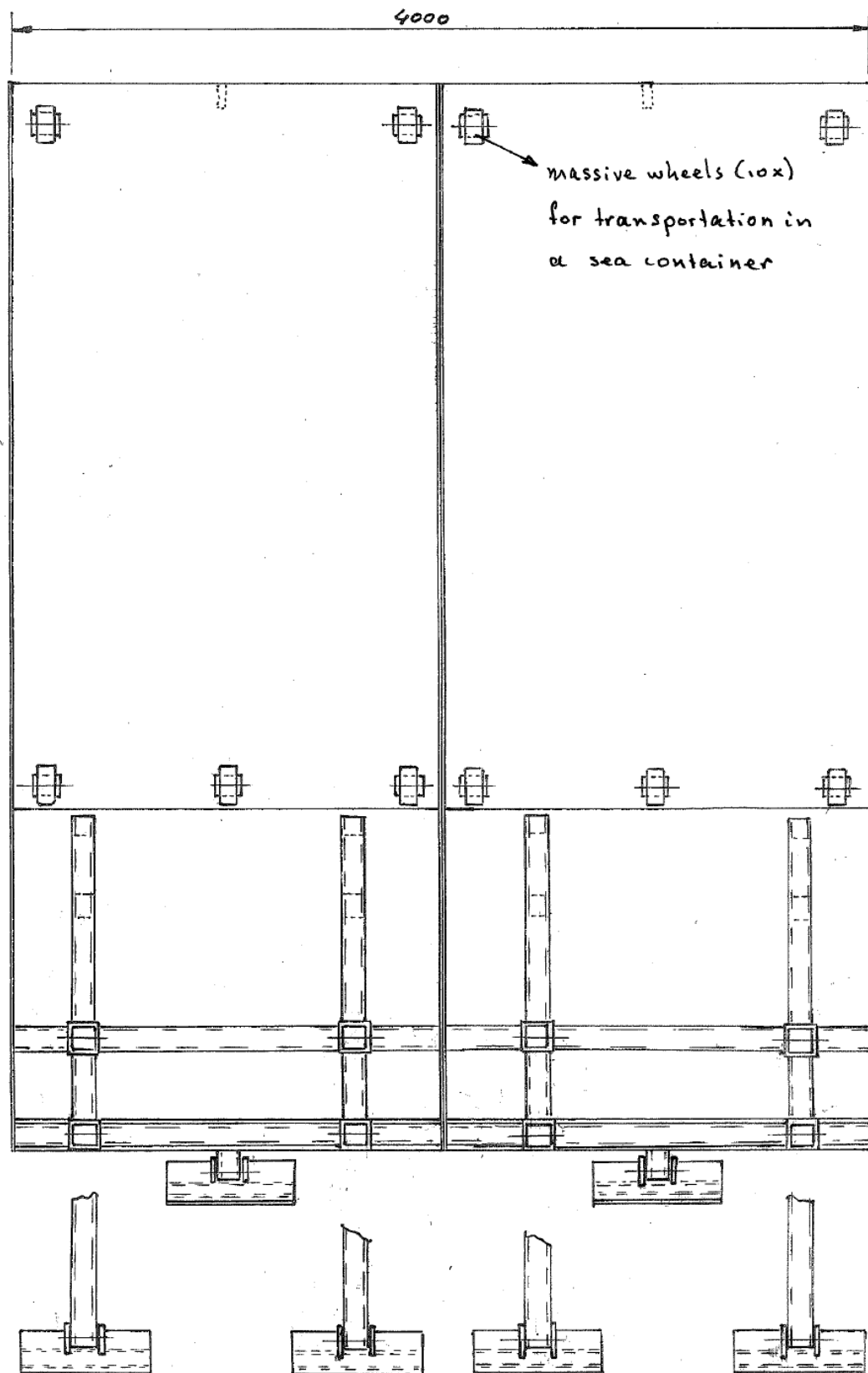
- * plates \neq 3mm
- * reinforcement of box to be designed
- * axle bearings to be designed
- * hydraulic cylinders for legs:
6 x DW 60x100x1000
- * the 2 units should be coupled without leakage - to be designed
- * various crane hooks to be mounted on front side
- * butterfly valve should be designed without leakage (rubber strips to seal - to be designed)



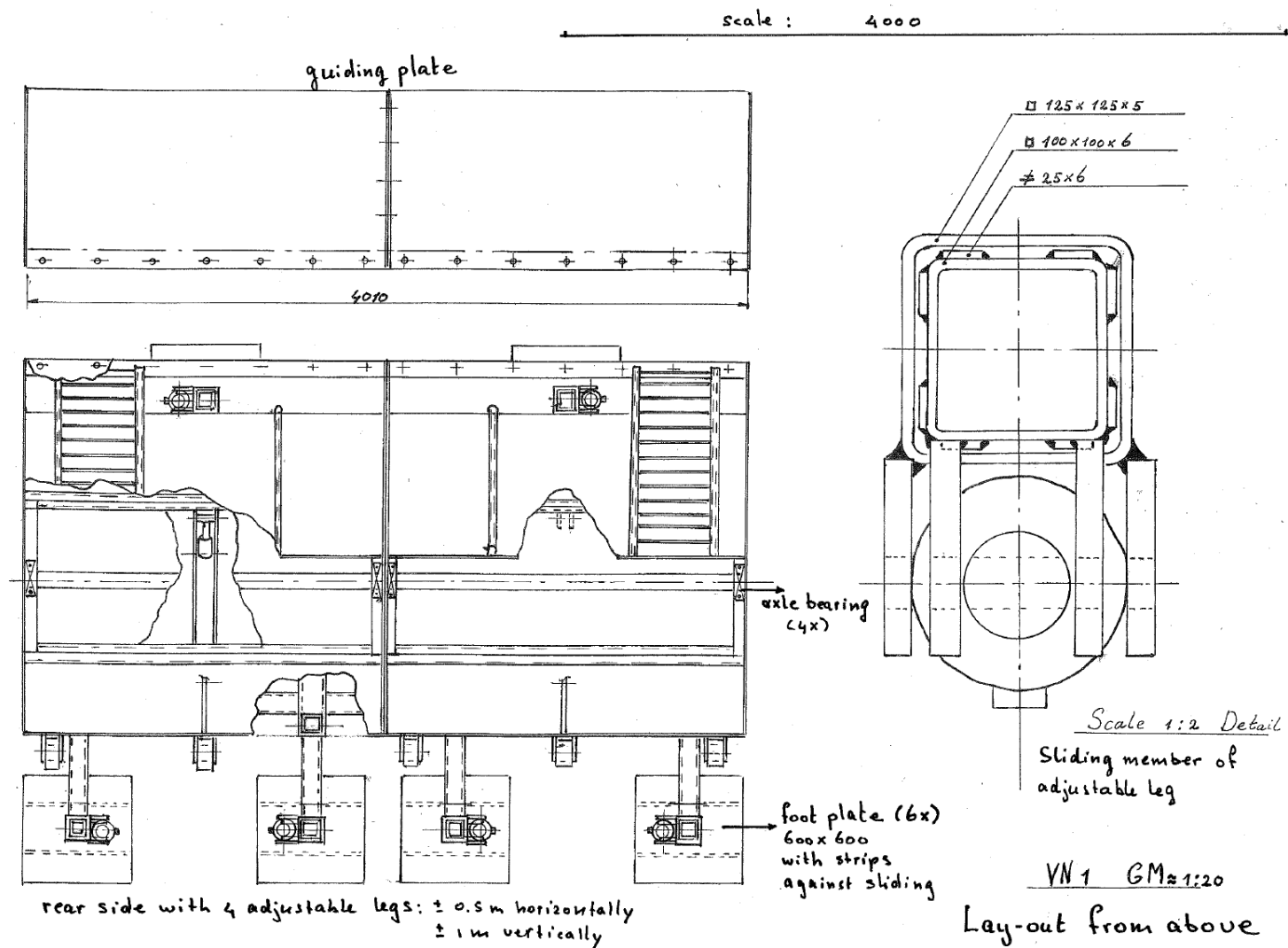
Figuur 2.2 Doorsnede A-A van het nieuwe ontwerp



Figuur 2.3 Voorzijde van het nieuwe ontwerp



Figuur 2.4 Achterzijde van het nieuwe ontwerp



Figuur 2.5 Bovenaanzicht van het nieuwe ontwerp

2.4 Proefopstelling en uitvoering op locatie golfoverslag

Naar aanleiding van de bevindingen bij de overslagproeven in Friesland en Zeeland wordt een aantal modelaanpassingen met betrekking tot de uitvoering voorgesteld voor de overslagproeven op de Afsluitdijk. Locatiespecifieke zaken, die de proefopstelling en uitvoering (kunnen) beïnvloeden, worden wel beschreven, maar in detail uitgewerkt in het draaiboek.

Meetcabine

Nagegaan moet worden of er voor de meetcabine een unit is te huren welke een meer optimale indeling heeft. De indeling is optimaal wanneer:

- aan beide lange zijden van de unit twee grote ramen zitten;
- zich zowel aan de korte zijde als in het midden van de lange zijde een deur bevindt;
- de unit opgedeeld is in twee min of meer gelijke ruimten;
- de bekabeling van de diverse meetinstrumenten via een luik in de vloer naar binnen kan worden gebracht; en
- de unit kan worden aangesloten op krachtstroom. Hiervoor dient de unit voorbereid te zijn op 3 fasen met een 5-polige aansluitstekker

Pers

Voorgesteld wordt om één “groot” persmoment te organiseren, waarbij de pers de mogelijkheid krijgt om het spektakel van grote debieten vast te leggen. Een dergelijk moment dient bij voorkeur plaats te vinden buiten de reguliere proeven, zodat deze niet verstoord hoeven te worden.

Beveiliging

Voorgesteld wordt de beveiligingsinstallatie zo mogelijk niet op locatie maar vóór aflevering van de unit te installeren. Dit voorkomt te veel activiteiten op de proeflocatie tijdens de opbouw van de opstelling. Verder dient de alarminstallatie zodanig ingesteld te worden dat in geval van storm de bewegingsmelders niet ingeschakeld hoeven te worden en dat de beveiliging alleen met de deur- en raamcontacten gebeurt. Op deze wijze wordt loos alarm als gevolg van een bewegende meetcabine beperkt.

Camerasysteem

Voor het filmen van de overslagproeven worden dezelfde camera's gebruikt als bij de afschuifproef bij de Boonweg. Hierbij zijn twee vanuit de meetcabine bestuurbare, en op kantelmasten geplaatste, IP-domecamera's gebruikt. Omdat beide camera's vanuit de cabine bestuurd kunnen worden kan snel en gemakkelijk worden ingezoomd op gebieden waar dat nodig wordt geacht. Wel dient de opstelling die destijds is gebruikt meer mobiel/flexibel worden gemaakt. Dit omdat de gehele proefopstelling vaak verplaatst wordt. Hiertoe dienen de kabel en toebehoren worden voorzien van connectoren, zodat de gehele opstelling makkelijk en snel is te (de)monteren.

Referentie grasmat voor schadeontwikkeling

Voor het vastleggen van de positie van de grasmat op foto's is bij de vorige proeven gebruik gemaakt van een houten raster waarop bordjes met de locatie op het talud werden geplaatst. Hoewel het raster goed heeft gewerkt, kan het vastleggen van de ontwikkeling van de grasmat in de tijd veel sneller plaatsvinden, wanneer het raster reeds vooraf met verf op de grasmat wordt aangebracht. Uitgezocht moet worden of voor gegeven omstandigheden geschikte grasmarkeringsverf kan worden geleverd, welke gedurende de proeven op de grasmat aanwezig blijft en de sterkte van de grasmat niet aantast. Uiteraard blijft het houten meetframe beschikbaar voor situaties waarbij de grasmarkering verdwijnt.

Foto's

Van iedere sessie dient zowel voor als na de sessie een overzichtsfoto van het gehele proefvak gemaakt te worden. Zo kan een overzicht van de ontwikkeling van de grasmat in de tijd, over het hele talud gezien, gegeven worden.

Toegankelijkheid talud

Hoewel effectief, kost het opbouwen van een bordes met leuning naast de meetsectie veel tijd. In Zeeland is een naast de meetsectie geplaatste noppenfolie met leuning ook zeer effectief gebleken voor taluds die niet steiler zijn dan 1:3. Het toegankelijk maken van het talud kost op deze manier aanzienlijk minder tijd (en geld) en is bovendien logistiek eenvoudiger omdat er geen onderaannemers voor hoeven worden ingeschakeld. Het talud op de Afsluitdijk is maar kort, zodat de noppenfolie met leuning hier een goede oplossing is.

Geleideschotten

Om lekkage onder de aan weerszijden van de meetsectie geplaatste geleideschotten te reduceren, moeten de schotten in de graszode geslagen worden. Hiertoe moeten met behulp van een spade sleufjes gestoken worden. Daar waar alsnog lekkage optreedt kunnen met grof zand gevulde zandzakken worden geplaatst.

Voor het met een sleg in de zode slaan van de schotten dienen de schotten tegen stukslaan beschermd te worden.

Op het moment dat op de ene proefstrook de proeven worden uitgevoerd, kunnen de geleideschotten voor de volgende proefstrook reeds worden geplaatst. Voorwaarde daarbij is dat er voldoende schotten aanwezig zijn. Dit is voor de Afsluitdijk geen probleem, omdat het maar een kort talud betreft.

Watervoorziening

Voor de golfoverslagproeven is de watertoevoer van cruciaal belang. Onder voorwaarden kan er water vanuit de Waddenzee worden gebruikt. De Wadbodem voor de dijk ter plaatse van de potentiële testlokaties ligt onder de laagwaterlijn. Echter de diepte is beperkt tijdens laagwater (-0,92 m NAP). De pomp die de watervoorziening regelt voor de proeven is een pomp. Dit betekent dat er voldoende waterdiepte

moet zijn om de pomp goed te laten functioneren. Omdat er tijdens laagwater waarschijnlijk te weinig water zal staan, zouden de proeven moeten worden gestaakt tijdens laagwater of zouden voorzieningen moeten worden getroffen om de het aanzuigen van Wadzand te voorkomen.

Naast het feit dat er water opgepompt moet worden voor de proeven, moet het overslaande water aan de binnenzijde van de dijk worden opgevangen. Dit om te voorkomen dat het water over de provinciale en rijksweg zal stromen. Het stromen over deze wegen is onacceptabel en moet te allen tijde worden voorkomen.

Het overslaande water wordt daarom opgevangen in een bassin. Dit bassin heeft een lengte van ca 60 tot 80 m en een breedte van 4 m. De 'sloot' wordt gegraven te plaatse van de zuidelijke klinkerstrook op de verzorgingsplaats. Hiertoe worden de aanwezige klinkers opgenomen die later worden herzet. De taluds worden 1:1 / 1:2 gemaakt. Dit betekent dat de inhoud van het bassin ca. 120 - 160 m³ bedraagt. Dit is 5 - 7 maal de hoeveelheid die de simulator maximaal kan bevatten. De grootte van het opvang bassin is zodanig gekozen om ook de watertoevoer vanuit het bassin te kunnen verzorgen. Hierdoor kan het benodigde water gecirculeerd worden waardoor de hoeveelheid zout water beperkt wordt tot de inhoud van het bassin plus de infiltratie en lekverliezen (wellicht iets wegzijgen als taluds en bodem niet volledig waterdicht blijken). Als er direct vanuit de Waddenzee zou worden aangevoerd, zou er ook een terugvoer vanuit het bassin naar de Waddenzee moeten plaatsvinden omdat het water niet aan de binnenzijde van de dijk kan worden afgevoerd. Als er geen terugvoer zou plaatsvinden zou al het water moeten wegzijgen in de zandkern van de dijk. Gezien de grote hoeveelheden (ca. 3600 m³ per proevenserie) is dit waarschijnlijk niet wenselijk.

Uitgegaan wordt daarom van het circuleren van water vanuit een opvangbassin. Dit bassin wordt initieel gevuld door aanvoer met een pomp vanuit de Waddenzee. De capaciteit van deze pomp zal ca. 200 m³ per uur bedragen en wordt zo dicht mogelijk bij de dijk geplaatst, zodanig dat er zo lang mogelijk water opgepompt kan worden. Bij laagwater zou dit kunnen betekenen dat er niet meer gevuld kan worden. Echter het vullen van het bassin hoeft slechts eenmalig te gebeuren. Het moment van vullen kan worden afgestemd met het getij. Naast het initieel vullen moet het waterniveau in het bassin op peil worden gehouden. Het peil zal lager worden door infiltratie in het talud en het horizontale deel van de proefsectie en wellicht wegzijging in het bassin (als deze niet volledig waterdicht is). Deze 'lekverliezen' worden aangevuld met de pomp in de Waddenzee.

De taluds en de bodem van het bassin worden afgedekt door een waterdicht zwaar vlies / doek. Dit ter beperking van verlies van water en om het talud en de bodem te beschermen tegen erosie en afkalving. Het vlies wordt door zandzakken op de juiste plaats gehouden. Rondom de geleide instroom in het bassin en de plaats waar de zuigmond van de pomp wordt geplaatst, wordt het vlies extra geborgd door rijplaten op het vlies op de taluds en bodem aan te brengen. De insteek van de 'sloot' wordt beschermd door het vlies vast te maken aan het asfalt door middel van schroeven en iets als een bitumenstrip. Bovendien wordt over een lengte van ca. 10 m een opvangschot aangebracht voor de instromende golven. Dit schot betreft bijvoorbeeld gestutte gekante azobé dragline schotten. Deze draglineschotconstructie heeft zich reeds bewezen tijdens proeven op St. Philipsland (Zeeland).

De sloot strekt zich van ca. 15 m ten westen van de verzorgingsplaats tot ca 55 m parallel aan de verzorgingsplaats. Dit betekent dat er een strook asfalt van 4 m verwijderd moet worden. Na afloop van de proeven zal de opgelichte asfaltstrook worden gerepareerd. Dit wordt gedaan door de strook te bestraten met klinkers. We gaan er vanuit dat dit toegestaan wordt en dat de benodigde klinkers nog beschikbaar zijn (zelfde soort als de klinkers op de verzorgingsplaats).

Ter plaatse van de aanzuigmond van de pomp wordt gezorgd dat het onderliggende zand goed wordt beschermd. Voorkomen moet worden dat de pomp zand uit de ondergrond gaat aanzuigen. Als de pomp zand gaat aanzuigen wordt de fundering van de provinciale weg en de asfaltstrook van de parkeerplaats mogelijk aangetast. De pomp wordt geplaatst in een afvalcontainer (ca. 4x2,5x0,7m). Na elke proef zal met een peilstok worden gecontroleerd of er ontgroning nabij container heeft plaatsgevonden. Bovendien wordt tijdens de proef zelf in de gaten gehouden of het overslaande water zand bevat. In het geval er twijfel is over het al dan niet aanzuigen van zand, wordt de proef stilgelegd. Als er zand wordt aangezogen, is dit terug, na stilleggen, te vinden op het talud en op de het horizontale deel van de proefopstelling.

Vooraf aan de proeven dient bij een systeemtest de ijking van de debietmeter gecontroleerd te worden.

2.5 Vastleggen schadeontwikkeling golfoverslag

Bemensing

Bij het uitvoeren van de proeven dienen minimaal 3 personen aanwezig te zijn. Omdat het uitvoeringsteam bij de overslagproeven in Friesland en Zeeland op elkaar is ingespeeld, is het aantrekkelijk dezelfde personen bij de proeven op de Afsluitdijk in te zetten.

Ondersteuning

Voor de levering van hand- en spandiensten zijn door de opdrachtgever bij de proeven in Zeeland medewerkers van het waterschap ter beschikking gesteld. Voor het welslagen van de proeven is een dergelijk persoon onmisbaar. Ook bij de proeven op de Afsluitdijk dient iemand aanwezig te zijn die, als het moet, een helpende hand kan bieden. Ditzelfde geldt voor de levering van noodzakelijk materiaal en materieel. Omdat de beheerder bij de proeven op de Afsluitdijk geen capaciteit ter beschikking stelt zal nu een loonbedrijf of een aannemer ingeschakeld moeten worden.

Afzetting

Het verkeer op de rijksweg en op de provinciale weg mag niet worden afgeleid door de uitvoering van de proeven. De simulator staat op de dijk en zal van verre zichtbaar zijn. Met behulp van lichtkranten aan zowel de oostelijke als westelijke zijde van de proefstroken zullen automobilisten worden geattendeerd op de proeven. Deze lichtkranten dienen door Rijkswaterstaat beschikbaar te worden gesteld en opgesteld. Het zicht op het uitstromende water wordt zoveel mogelijk afgeschermd door

geschoorde hekwerken voorzien van een doek. Hierdoor wordt voorkomen dat automobilisten het idee krijgen dat het water over hun rijstrook zal stromen. De afscherming is wel windgevoelig. De standzekerheid van de hekwerken moet goed worden geborgd.

De verzorgingsplaats moet gedurende de week voor de proefuitvoering tot een week na de proefuitvoering afgesloten zijn voor alle verkeer. Hiertoe zullen hekken worden geplaatst.

2.6 Proefopstelling afschuiven

Naar aanleiding van de bevindingen bij de afschuifproef in Friesland worden enkele modelaanpassingen voorgesteld voor de afschuifproef op de Afsluitdijk.

Tules

De positie van de tules moeten zodanig worden gepositioneerd dat de slangen aan de aanvoerbuis geen bocht naar boven maken. Dit om te voorkomen dat bij kleine debieten de slangen vol met lucht kunnen komen te staan en daarmee geen bijdrage meer leveren aan een gelijkmatige vulling van de uitstroombuis.

Deformatiemeting talud

Er moet een methode voor de op het talud aangebrachte reflectoren worden bedacht, die moet voorkomen dat de reflectoren beslaan (bijvoorbeeld verwarming).

De predictie van de afschuifproef moet voor aanvang van de proef gereed zijn en met de projectgroep zijn besproken. Daarbij is het van belang dat het uitvoeringsteam weet wat er gemeten moet worden en wat de verwachting van de metingen is. Op deze manier kan men direct het verloop van de proef beoordelen en naar gelang van de omstandigheden ingrijpen of veranderingen doorvoeren.

2.7 Metingen stroomsnelheid, waterlaagdikte en erosie

Metingen van snelheid, frontnelheid en laagdikte van overslaand water, zijn tot nu toe een probleem geweest. Deels omdat de instrumenten niet blijken te werken en deels omdat de dataprocessing erg veel tijd vergt. Daarom wordt voorgesteld om bij de overslagproeven met het zoute water uit de Waddenzee zowel de (front)snelheid als de laagdikte op een alternatieve wijze te meten. Ook wordt voorgesteld de metingen zelf op een andere manier uit te voeren.

Om de laagdikte te meten wordt gebruik gemaakt van een door het uitvoeringsteam ontwikkelde "surfplank" waarvan het concept inmiddels is doorontwikkeld, zodat deze elektronisch kan worden afgelezen (zie paragraaf 2.1). Naast de hoekverdraaiing van de surfplank, op basis waarvan de laagdikte kan worden afgeleid, zal de beweging van de surfplank ook worden vastgelegd met een filmcamera.

De frontsnelheid kan worden bepaald met de door de camera's opgenomen beelden en de op het talud en schotten aangebrachte markeringen. Voorwaarde is uiteraard wel dat de ingestelde frequentie van 25 beeldjes per seconde daadwerkelijk overeenkomt met de frequentie waarmee wordt opgenomen.

De meting van de laagdikte en snelheid zullen niet tijdens, maar apart van de eigenlijke proef worden uitgevoerd. Voordeel hierbij is dat gedurende een korte tijd gemeten hoeft te worden om een goed beeld van de laagdikte en snelheid te krijgen en dat de portalen en opnemers niet in de weg staan tijdens het optreden van schade. Het scala van overslaande volumes kan van klein naar groot worden gesimuleerd en driemaal worden herhaald voor reproduceerbaarheid. Bijvoorbeeld volumes van 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 en 5500 l/m kunnen driemaal worden herhaald, met bijvoorbeeld een debiet van 30 l/s per m. Zo'n meting duurt dan ongeveer een half uur. Omdat ook de allergrootste overslaande volumes worden losgelaten en deze de proef niet teveel mogen verstoren, zou de meting na de proef van 10 l/s per m of liever nog 30 l/s per m uitgevoerd kunnen worden.

Op deze manier kost zowel het meten als de dataprocessing minder tijd en is ook duidelijk welke overslaande volumes zijn losgelaten. De stuurfile voor deze meting moet de naam IJK hebben en mag maximaal 40 overslaande golven bevatten (zie paragraaf 2.1).

3 Predictiemodellen

In voorgaande jaren zijn golfverslagproeven uitgevoerd in Friesland en Zeeland. Daarbij zijn een aantal waarnemingen gedaan die aanleiding zijn de modellen die de processen beschrijven te verbeteren of nieuwe modellen op te stellen. Zo is op de Boonweg (Friesland) onder andere het niet 'nieuwe' zogenaamde opbolmechanisme waargenomen, en in Zeeland en op de Boonweg is duidelijk geworden dat de overgang van talud naar horizontaal kritisch is. Het Review Team Dijken heeft aangekaart om vooral ook het effect van niet waterkerende objecten op de dijk mee te nemen in het onderzoek.

De Afsluitdijk als proeflocatie is gekozen omdat daar op korte afstand van elkaar alle ingrediënten worden aangetroffen die bovenstaand worden genoemd: horizontale overgang bij teen talud naar gras, maar ook met een klinkerbestrating, en als waterkerende objecten in het talud een hekje en een taludtrap. Bovendien biedt de Afsluitdijk de mogelijkheid zoet en zout water te gebruiken; eerder is namelijk de indruk gekregen dat dit mogelijk een verschil in luchtgehalte geeft.

In paragraaf 3.1 komen de modelaanpassingen voor de graserosie aan de orde. Paragraaf 3.2 gaat in op infiltratie en afschuiving.

3.1 Graserosie

Voor het "falen van de grasbekleding" op het binnentalud en nabij de teen van de dijk worden vooraansnog vier mechanismen onderscheiden:

- A) eroderen van de toplaag en het ontstaan van een gat op een zwakke plek in de graszode; het gaat hier om uitspoelen van zand, organisch materiaal en losse klei-aggregaten aan het oppervlak; wortelstructuur blijft in tact; erosie beperkt zich tot enkele centimeters diepte; modellering is 3D;
- B) abrupt lokaal losscheuren van de grasmat (opbolmechanisme);
- C) ontstaan van lokale ontgrondingskuilen bij oneffenheden (schapenpaadjes, trekkersporen) of overgangen naar een horizontale deel zoals bij de teen van het binnentalud;
- D) erosie rondom paaltjes, hekken, mollengaten en andersoortige obstakels op de dijk; modellering is 3D.

Faalmechanisme A is vanaf het eerste begin van de proeven al gemodelleerd; de mechanismen B t/m D zijn nieuw.

Na het optreden van de mechanismen A t/m C kunnen vervolgmecanismen optreden:

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

De overtrekkende stroom op de grasbekleding van het binnentalud van een dijk transporteert losgepakte grond, organische materiaal en de relatief kleine klei-aggregaten als allereerste. Als gevolg van een relatief kleine golfbelasting ($0,1 < q < 10$ l/s per strekkende m) komen de graspollen al bloot te liggen (mechanisme A). Bij grotere golfverslagdebieten ($q > 30$ l/s per strekkende m) kan uiteindelijk de grasmat lokaal losscheuren (mechanisme B). Nadat klei over een voldoende groot stuk niet

meer door gras is bedekt zal “head-cut erosion” naar bovenstreams toe plaatsvinden en geulvorming in benedenstroomse richting.

Los hiervan kan nabij de teen van het binnentalud en rond obstakels een ontgrondingskuil ontstaan die in grootte toeneemt zowel benedenstreams als bovenstreams, waarbij in het laatste geval ook “head-cut erosion” plaatsvindt.

In het navolgende zullen de afzonderlijke mechanismen worden behandeld.

3.1.1 Eroderen toplaag

Voor het modelleren van het erosiegedrag van de grasbekleding op het binnentalud wordt de Breusers ontgrondingsrelatie toegepast. Het ontgrondingsproces kent 2 relevante fasen, te weten de ontwikkelingsfase en de evenwichtsfase. In de jaren zestig en zeventig is door Deltares uitvoerig onderzoek verricht naar het begin van bewegen en naar lokale ontgrondingen nabij waterbouwkundige constructies. Op basis van dit systematisch onderzoek is de maximale ontgrondingsdiepte in de ontwikkelingsfase voor losgepakt niet cohesieve grond (Breusers 1966)

$$\frac{y_m}{\lambda} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^\gamma \quad \text{met} \quad t_1 = \frac{V}{S}, \quad V = \alpha_\lambda \lambda^2 \quad \text{en} \quad S \equiv (\alpha U_0 - U_c)^\beta \quad (1)$$

waarin:

S	sedimenttransport (m ³ /s per strekkende m);
t	tijd (s);
t ₁	karakteristieke tijd (s) waarop y _m = λ;
U ₀	dieptegemiddelde snelheid bij golfoverloop (m/s);
U _c	kritische dieptegemiddelde snelheid (m/s);
V	volume van ontgrondingskuil (m ³ per strekkende m);
y _m	maximale ontgrondingsdiepte (m);
α	(= 1,5 + 5r ₀) turbulentie constante (-);
r ₀	relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit (-);
α _λ	constante (-);
β	(= varieert van 1 tot 5) constante (-);
γ	(= 0,4 voor 2D ontgroning en γ = 0,8 voor 3D ontgroning) constante (-);
λ	lengteschaal (m).

Vergelijking (1) is afgeleid voor niet cohesief materiaal, maar er wordt aangenomen dat de formule ook geldt voor cohesief materiaal of gras. Via U_c kan dit in rekening worden gebracht. Overigens wordt aanbevolen te onderzoeken of de vergelijking kan worden getransformeerd naar onderdrukken, zodat een link kan worden gelegd met de modellering van het opbolmechanisme in paragraaf 3.1.2.

U_c voor gras is sterk afhankelijk van de grassterkte en kan worden benaderd met het turf-element model (Hoffmans et. al. 2008) (zie ook Tabel 1)

$$U_c = \frac{0,29}{r_0} \sqrt{\frac{\sigma_g}{\rho}} \quad (2)$$

waarin:

ρ	(= 1000 kg/m ³) dichtheid van water (kg/m ³);
σ _g	grassterkte (N/m ²).

Volgens Breusers varieert β van 4 tot 5. Deze range is gebaseerd op relatief lage snelheden; $U_0 < 2$ m/s. Mastbergen vond voor relatief hoge snelheden $\beta = 1$. De erosie van gras wordt hier als een 3D proces met $\gamma = 1,0$ en $\beta = 2$ beschouwd (Van den Bos 2006)

$$\frac{y_m}{\lambda} = \frac{t}{t_1} \quad \text{met} \quad S = (\alpha U_0 - U_c)^2 / T_{WB} \quad (3)$$

of

$$y_m = \frac{(\alpha U_0 - U_c)^2 t}{E_{soil}} \quad \text{met} \quad E_{soil} = \alpha_\lambda \lambda / T_{WB} \quad (4)$$

waarin:

E_{soil} erosieparameter (m/s);

T_{WB} tijdsconstante (s).

Omdat E_{soil} een onbekende parameter is, wordt vgl. (3) herschreven als

$$E = \frac{y_m}{t} \quad (5)$$

of met Partheniades (1965)

$$E = \frac{M_e (\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} \quad (6)$$

waarin:

E erosiegraad (m/s);

M_e materiaalconstante (m/s);

τ_0 gemiddelde bodemschuifspanning (N/m²);

τ_c kritische gemiddelde bodemschuifspanning (N/m²).

Het combineren van vgl. (5) en (6) geeft

$$\frac{y_m}{t} = \frac{M_e (\tau_0 - \tau_c)}{\tau_c} \quad (7)$$

Aannemende dat

$$\rho (\alpha U_0 - U_c)^2 \equiv \tau_0 - \tau_c \quad (8)$$

dan is vgl. (7) te schrijven als (zie ook vgl.4)

$$y_m = \frac{(\alpha U_0 - U_c)^2 t}{E_{soil}} \quad \text{met} \quad E_{soil} \equiv \frac{\tau_c}{M_e} \quad (9)$$

Op basis van gootexperimenten (Verheij et al. 1995) is voor E_{soil} het volgende verband afgeleid

$$E_{soil} = 6,15 \cdot 10^4 \frac{U_c^2}{\sqrt{gd_a}}$$

waarin $d_a = 0,004$ m.

De cumulatieve erosie ten gevolge van golfoverslag op het binnentalud wordt gegeven door

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (0,7\alpha U_m - U_c)^2 t_m}{E_{soil}} \quad (10)$$

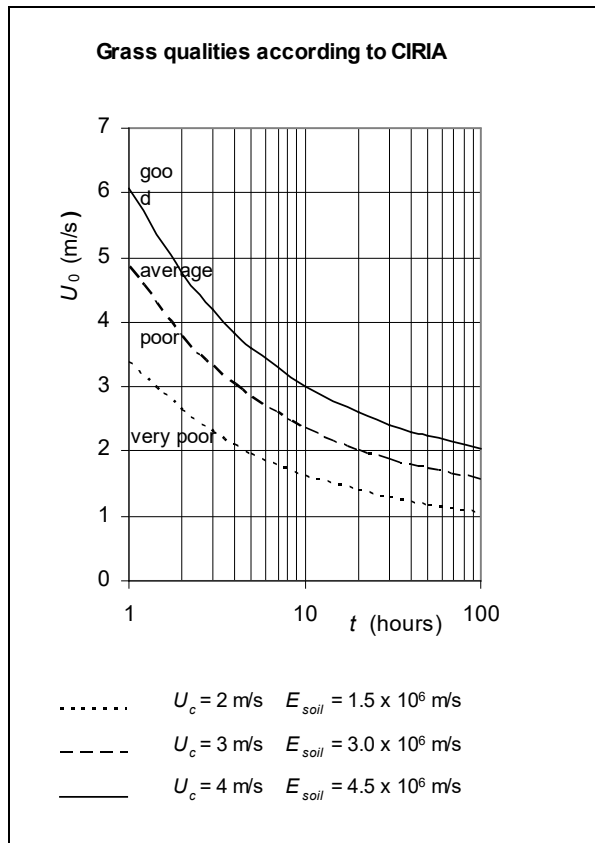
waarin:

- n aantal golven (-).
- U_m representatieve dieptegemiddelde snelheid bij golfoverslag (m/s);
- t_m representatieve duur van de golf (s).

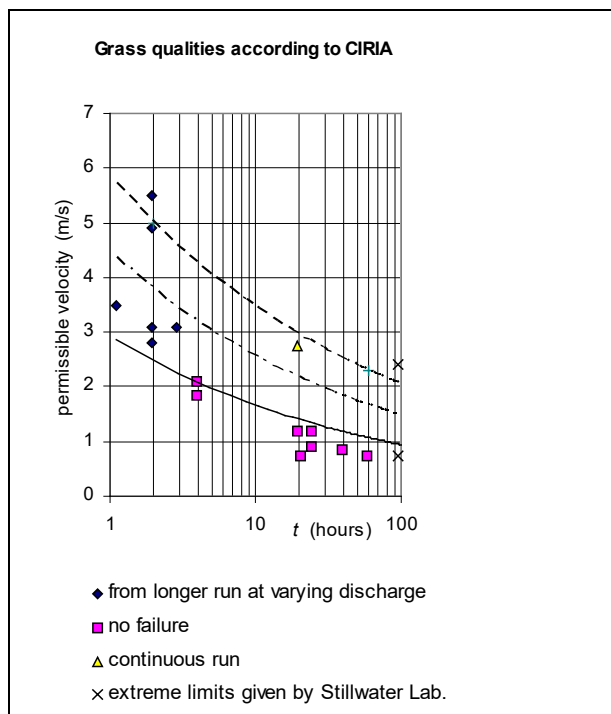
Figuur 3.1 toont drie faalcurven en onderscheidt vier graskwaliteiten *goed*, *redelijk*, *matig* en *slecht* (of *good*, *average*, *poor* en *very poor*) gras waarbij de optredende stroomsnelheid bij golfoverslag is uitgezet als functie van de tijd. Het uitgangspunt voor falen van de grasbekleding is een optredende erosie van $d_{ref} = 10$ cm; dus een erosie van minder dan 10 cm leidt tot niet falen. Het verschil tussen Figuur 3.1 en Figuur 3.2 is de definitie van falen, immers CIRIA (Hewlett et al. 1987) geeft geen gekwantificeerd criterium.

Het criterium van $d_{ref} = 10$ cm is gebaseerd op het grasonderzoek dat in de jaren negentig door Sprangers is uitgevoerd. Het aantal wortels of wortelintensiteit als functie van de diepte vertoont voor alle drie de grascurven (zie Figuur 3.4) een knik op 10 cm. Dit impliceert dat de wortelintensiteit voor de relatief korte wortels, i.e., $\ell_r < 10$ cm, reduceert van 100% op het maaiveld tot 0% op $z = 10$ cm. De wortelintensiteit voor de langere wortels ($\ell_r > 10$ cm) neemt geleidelijk af van ongeveer 25% op $z = 10$ cm naar 0% op $z = 50$ cm. Met andere woorden d_{ref} is karakteristiek voor de wortelintensiteit. Het is dus geen maat voor de grondsterkte, aangezien deze bepaald wordt door de wortelintensiteit, het oppervlak van een wortel (of worteldiameter) en het ondergedompelde gewicht van de grond.

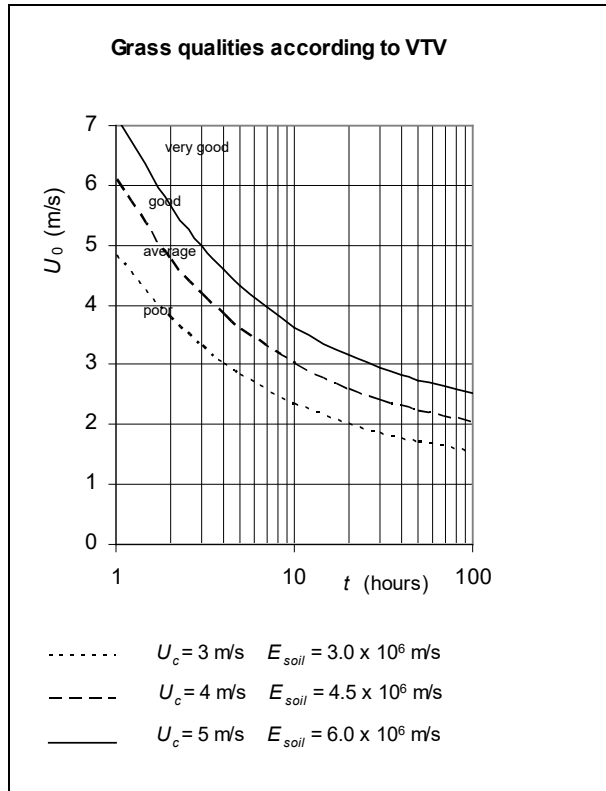
Tenslotte wordt opgemerkt dat Figuur 3.1 en Figuur 3.3 dezelfde definities hanteren omtrent de graskwaliteiten, echter Figuur 3.1 onderscheidt de graskwaliteiten: *slecht*, *matig*, *redelijk* en *goed* (of *very poor*, *poor*, *average* en *good*), terwijl Figuur 3.3 de graskwaliteiten *matig*, *redelijk*, *goed* en *uitstekend* (of *poor*, *average*, *good* en *very good*) beschrijft.



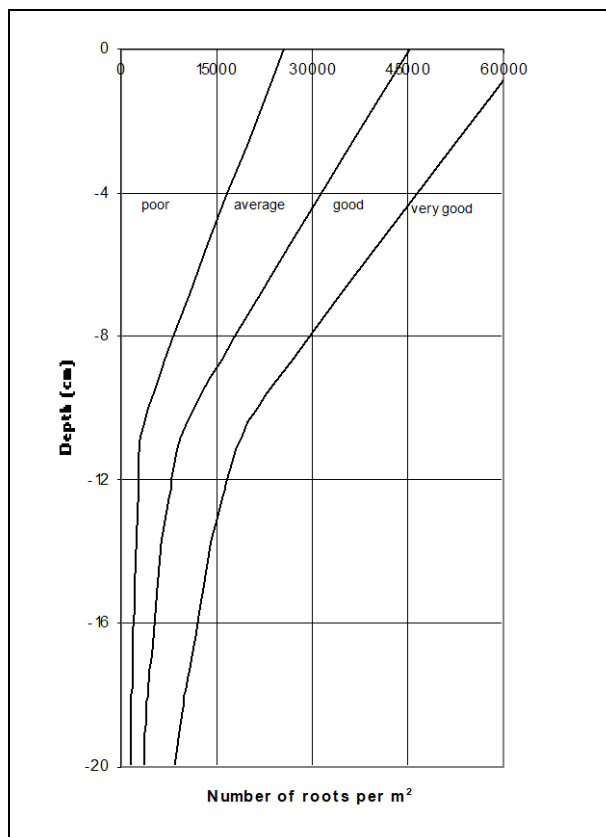
Figuur 3.1 Falen van de grasbekleding treedt op als $y_m > 0,1$ m; U_0 als functie van de tijd voor graskwaliteiten ($r_0 = 0,2$)



Figuur 3.2 Toelaatbare snelheden voor slecht, matige, redelijke en goede kwaliteit gras verschillende (bron: CIRIA Technical Note 71; Hewlett et al. 1987)



Figuur 3.3 Falen van de grasbekleding treedt op als $y_m > 0,1 m U_0$ als functie van de tijd voor verschillende graskwaliteiten ($r_0 = 0,2$)



Figuur 3.4 Aantal wortels als functie van de diepte voor 4 graskwaliteiten volgens VTV

3.1.2 Abrupt losscheuren zode

De grasmat op het binnentalud van de dijk kan ook door scheurvorming falen. Voor het bepalen van het zogenaamde ballonmechanisme, waargenomen op de Boonweg, worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- grasmat bezwijkt door bruske breuk; wortels worden op trek belast; wortels breken; wortels worden niet op schuifkracht belast;
- cohesie- en schuifkrachten langs het schuifvlak worden verwaarloosd; randeffecten worden dus niet in de modellering meegenomen wat een redelijke aanname is omdat deze krachten ten opzichte van de graskracht te verwaarlozen zijn.

Voor het krachterevenwicht loodrecht op het binnentalud worden de volgende krachten beschouwd:

- maximale liftkracht (of maximale drukfluctuatie of maximale onderdruk);
- ondergedompeld gewicht van de grasmat per eenheid van oppervlakte;
- graskracht aan onderkant van grasmat.

Indien een deel van de grasmat met klei en wortels als een geheel kan worden beschouwd en wordt aangenomen dat het gras door drukfluctuaties scheurt op locaties waar de grondsterkte minimaal is, geldt tijdens het scheuren in de richting loodrecht op het talud (2^e Wet van Newton)

$$\rho_{\max} - \sigma_s(z) = 0 \quad \text{met} \quad \sigma_s(z) = q_w(z) + \sigma_{g,c}(z) \quad (11)$$

en

$$\rho_{\max} = 18\tau_0, \quad \tau_0 = 0.7\rho(r_0 U_0)^2, \quad r_0 = 1.2\sqrt{g}/C, \quad C = U_0 / \sqrt{hS_b} \quad (12)$$

Voor het ondergedompeld gewicht en voor de grassterkte geldt respectievelijk (Figuur 3.5)

$$q_w(z) = (\rho_s - \rho)gz \quad (13)$$

en

$$\sigma_{g,c}(z) = \sigma_{0,g,c} \exp\left(-z/d_{ref}\right) \quad \text{met} \quad \sigma_{0,g,c} = \left(A_r/A\right)t_{r,c} \quad (14)$$

waarin

A_r (= $No \times 1/4\pi(d_r)^2$) oppervlakte van het aantal wortels per referentie oppervlak A (m^2);

A (= $1 m^2$) referentie oppervlak (m^2);

C Chézy coëfficiënt ($m^{0.5}/s$);

d_r (= $0,13 \cdot 10^{-3} m$) gemiddelde worteldiameter (m);

d_{ref} (= $0,1 m$) referentiediepte (m);

g (= $9,81 m/s^2$) zwaartekracht (m/s^2);

h gemiddelde waterdiepte (m);

No aantal wortels (-);

ρ_{\max} maximale onderdruk (N/m^2);

q_w ondergedompeld gewicht (N/m^2);

r_0 relatieve dieptegemiddelde turbulente intensiteit (-);

S_b verhang ofwel helling binnentalud (-);

U_0 dieptegemiddelde snelheid (m/s);

$t_{r,c}$ (= $20 \cdot 10^6 N/m^2$) kritieke grasspanning (N/m^2);

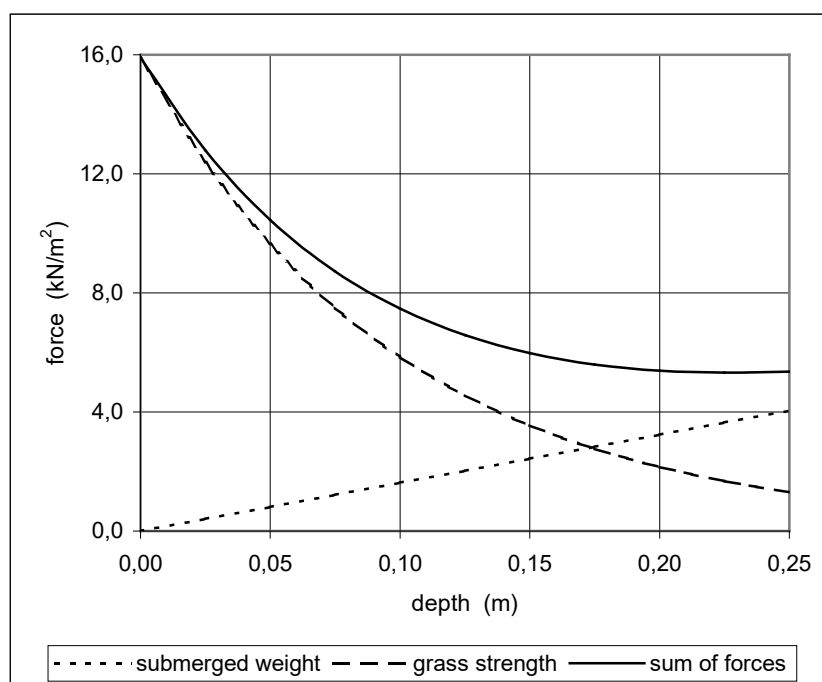
z	verticale coördinaat (m);
ρ	(= 1000 kg/m ³) dichtheid van water (kg/m ³);
ρ_s	(= 2650 kg/m ³) dichtheid van grond (kg/m ³);
$\sigma_{g,c}$	kritieke grassterkte (N/m ²);
σ_s	grondsterkte (N/m ²);
$\sigma_{0,g,c}$	kritieke grassterkte aan het oppervlak (N/m ²);
τ_0	gemiddelde bodemschuifspanning (N/m ²).

De locatie $z = z_{\min}$ waar de grondsterkte (σ_s) minimaal is, wordt bepaald door vgl. 11 naar z te differentiëren. Dit geeft

$$-(\rho_s - \rho)g - \sigma_{0,g,c} \frac{1}{d_{ref}} \exp\left(\frac{z_{\min}}{d_{ref}}\right) = 0 \quad \text{of} \quad z_{\min} = d_{ref} \ln\left(\frac{\sigma_{0,g,c}}{(\rho_s - \rho)gd_{ref}}\right) \quad (15)$$

In Tabel 3.1 zijn voor een worteldiameter van 0,13 mm waarden berekend voor z_{\min} en $\sigma_{s,min}$. Aannemende dat $d_{ref} = 0,1$ m, dan varieert z_{\min} van 90 tot 225 mm voor *slecht tot uitmuntend* gras, en voor de grondsterkte $\sigma_{s,min}$ van 11 tot 160 kN/m². In Tabel 3.2 staan vergelijkbare waarden voor een worteldiameter van 0,10 mm. Samenvattend geldt voor het scheuren van de grasmat de volgende stabiliteitseis $\sigma_{s,min}$:

$$\rho_{\max} < \sigma_{s,min} = (\rho_s - \rho)gz_{\min} + \sigma_{0,g} \exp\left(\frac{z_{\min}}{d_{ref}}\right) \quad (16)$$



Figuur 3.5 Ondergedompeld gewicht, grassterkte en grondsterkte als functie van de diepte voor "very good" gras; $\sigma_{s,min}$ treedt op voor $z_{\min} = 229$ mm, zie ook Tabel 3.1 en 3.2

Tabel 3.1 Sterktegegevens ($d_r = 0,13$ mm)

No./A	d_r	A_r/A	Kwaliteit gras	U_c	t_r	$\sigma_{0,g}$	z_{\min}	$\sigma_{s,\min}$
(m ²)	(mm)	(%)	(VTV)	(m/s)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(mm)	(kN/m ²)
15000	0,13	0,02	slecht	2,9	20000	4,0	90	11,2
30000	0,13	0,04	matig	4,1	20000	8,0	159	41,7
45000	0,13	0,06	goed	5,0	20000	11,9	200	91,3
60000	0,13	0,08	uitstekend	5,8	20000	15,9	229	160

No. = $A_r/A_{1\text{root}}$ waarin $A_{1\text{root}} = \frac{1}{4}\pi d_r^2$ en $d_r = 0,13$ mm; $\sigma_{0,g} = t_r(A_r/A)$ (waarin $t_r = 20 \cdot 10^3$ kN/m²)

Tabel 3.2 Sterktegegevens ($d_r = 0,10$ mm)

No./A	d_r	A_r/A	Kwaliteit gras	U_c	t_r	$\sigma_{0,g}$	z_{\min}	$\sigma_{s,\min}$
(m ²)	(mm)	(%)	(VTV)	(m/s)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(mm)	(kN/m ²)
15000	0,10	0,01	slecht	2,3	20000	2,4	37	4,0
30000	0,10	0,02	slecht	3,2	20000	4,7	107	15,4
45000	0,10	0,04	matig	3,9	20000	7,1	147	33,2
60000	0,10	0,05	matig	4,5	20000	9,4	176	57,7

Voorlopige conclusies en aanbevelingen

- grassterkte wordt bepaald door de wortelintensiteit en het worteloppervlak of worteldiameter;
- minimale grondsterkte is sterk afhankelijk van de gemiddelde worteldiameter die sterk kan variëren als gevolg van de verschillende aanwezige grassoorten en kruiden;
- robuustheid van scheurcriterium vgl. 16 dient nader te worden gevalideerd;
- consensus verkrijgen over de waarden in bovengenoemde tabellen;
- checken of wortelsterkte maatgevend is en niet de houvast van de wortels;
- U_c en E_{soil} zijn beide een maat voor de grassterkte; het verdient aanbeveling om deze te relateren aan wortelintensiteit en worteldiameter.
- Niet geïmplementeerd is het mogelijke aspect van vermoeiing; aanbevolen wordt nader te onderzoeken op welke wijze dit kan worden ingebracht.

Indien de grasmat over een aanzienlijk stuk los scheurt, zal aansluitend de gestructureerde klei en het eventuele zand zeer snel kunnen eroderen.

3.1.3 Erosie op overgang bij teen talud

Benedenstreams van het binnentalud van de dijk nabij de teen ontstaat een ontgrondingskuil. Op basis van 2^e Wet van Newton is de grootte van de maximale ontgrondingsdiepte in de evenwichtsfase voor loskorrelige materialen (Hoffmans 2009):

$$y_{m,e} + h_t = c_{2V} \sqrt{qU_0 \sin S / g} \quad \text{met} \quad c_{2V} = 20 / D_{90}^{0,33} \quad (17)$$

waarin:

c_{2v}	materiaal constante (-);
d	korreldiameter (m);
D_{90}^*	(= $d_{90}(\Delta g/v^2)^{0,33}$) dimensieloze korreldiameter (-);
g	zwaartekracht (m/s^2);
h_t	waterdiepte (m);
q	debiet (m^2/s);
S	helling van het binnentalud (-);
U_0	dieptegemiddelde snelheid (m/s)
$y_{m,e}$	maximale ontgrondingsdiepte in de evenwichtsfase (m);
Δ	(= 1,65) relatieve dichtheid (-);
ν	kinematische viscositeit (m^2/s).

Zoals opgemerkt is de formule afgeleid voor loskorrelige materialen. Via de materiaalconstante c_{2v} , die nu uitsluitend is gerelateerd aan de korreldiameter, kan de sterkte van cohesieve grond worden ingebracht.

Vermoedelijk zullen door drukfluctuaties in de ontgrondingskuil de klei-aggregaten van ongeveer 10 cm tot kleinere fracties uiteenvallen. Omdat de nagebootste stormduur ongeveer 6 uur is, wordt aangenomen dat de maximale ontgrondingsdiepte wordt bereikt. In een vervolgstudie is het aanbevelingswaardig om nader op het uiteenvallen van de klei-aggregaten en het tijdsaspect in te gaan.

Een MSc student van de TU Delft heeft zeer recent ook een model vervaardigd voor dit mechanisme (Valk, 2009). De ontgrondingsdiepte op tijdstip t volgt uit::

$$\Delta y_m = \frac{\omega^2 \tau_0(z) - \tau_c(z)}{E_{soil}(z)} \Delta t \quad \text{met } \omega = 1,5 + 5r_0 \quad (18)$$

waarin

$\sigma_{0,g,c}$	kritieke grassterkte aan het oppervlak (N/m^2);
$\tau_0(z)$	diepte afhankelijke gemiddelde bodemschuifspanning (N/m^2).
$\tau_c(z)$	diepte afhankelijke kritische gemiddelde bodemschuifspanning (N/m^2).
$E_{soil}(z)$	diepte afhankelijke erosieparameter (m/s);
r_0	relatieve dieptegemiddelde turbulentie intensiteit (-);
z	verticale coördinaat (m);

De diepte-afhankelijke belasting volgt met:

$$\tau_0(z) = \tau_0 \exp(-0,25z) \quad \text{met } \tau_0 = 0,016 \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot \left(\frac{1}{1+\varepsilon} U_0 \right)^2 \quad (19)$$

waarin

ε	luchtgehalte (-)
U_0	dieptegemiddelde snelheid (m/s);

Bij de afleiding is rekening gehouden met het verhogende effect van de 'jet impact' en het reducerende effect van het gegeven dat een erosiekuil volstaat met water.

De kritische sterkte van de grond volgt met:

$$\tau_{s,c} = 0,056 [(\rho_s - \rho)gz + \tau_{c,c}(z) + \tau_{g,c}(z)] \quad (20)$$

met

$$\tau_{c,c} = 0,021\tau_{c,0}(1 + \alpha_{cs}z) \text{ met } \alpha_{cs} = 20 \text{ kN/m}^2/\text{m} \quad (21)$$

$$\tau_{g,c} = \tau_{g,0} \exp(-\beta z) = 0,7RARt_r \text{ met } RAR = \frac{A_r}{A} = 7,46 \cdot 10^{-4} \exp(-22,32z) \quad (22)$$

waarin

g	(= 9,81 m/s ²) zwaartekracht (m/s ²);
$t_{r,c}$	(= 20 · 10 ⁶ N/m ²) kritieke grasspanning (N/m ²);
ρ	(= 1000 kg/m ³) dichtheid van water (kg/m ³);
ρ_s	(= 2650 kg/m ³) dichtheid van grond (kg/m ³);
$\tau_{c,c}$	diepte afhankelijke kritieke kleisterkte (N/m ²);
$\tau_{g,c}$	diepte afhankelijke kritieke grassterkte (N/m ²);
$\tau_{c,0}$	kritieke kleisterkte aan het oppervlak (N/m ²);
$\tau_{g,0}$	kritieke grassterkte aan het oppervlak (N/m ²);

De eerste term in vgl.(20) vertegenwoordigt de wrijvingskracht van het ondergedompeld gewicht; de tweede term is de kritische schuifsterkte van klei, die toeneemt met de diepte, en derde term is de kritische schuifsterkte van gras. Merk op dat vergelijking (22) verwantschap heeft met vgl.(14).

Het model is gecalibreerd aan de waargenomen ontgrondingskuilen bij de proeven op de Boonweg en in Zeeland. Dit heeft geresulteerd in de waarden van de vermelde coëfficiënten. Opgemerkt moet worden dat de ontwikkeling in de tijd van de diepte van de ontgrondingskuilen bij de proeven op de Boonweg en in Zeeland niet is vastgelegd. Visueel is een maximale diepte van ongeveer 1 m vastgesteld.

Tenslotte: met vgl.(18) wordt het verloop van de ontgrondingsdiepte in de tijd berekend en niet zoals bij vgl.(17) uitsluitend evenwichtsontgrondingsdiepte. Dit kan relevant zijn bij een beperkte tijdsduur in relatie tot cohesieve grond.

3.1.4 Erosie rondom paaltjes

Erosie rondom paaltjes vertoont sterke gelijkenis met erosie rondom brugpijlers. Breusers (1966) heeft voor niet cohesief materiaal formules afgeleid waarbij onderscheid wordt gemaakt in slanke versus stompe constructies, en in situaties met bovenstroomse aanvoer van sediment (zogenaamd Clear Water Scour CWS) en zonder bovenstroomse aanvoer van sediment (zogenaamd Live Water Scour LWS). Recent zijn deze formules gemodificeerd en deze zullen hierna worden genoemd.

Voor CWS ($U_0 > U_c$) en voor slanke constructies, indien $b/h \ll 1$, waarin b is de breedte van het obstakel en h is de waterdiepte geldt voor de maximale ontgrondingsdiepte in de evenwichtsfase (Hoffmans en Verheij, 2008)

$$\frac{y_{m,e}}{b} = \frac{1,6\chi U_0^2 - 1,3U_c^2}{U_c^2} \text{ met } \chi = 1,65(1 + 6,3r_0^2) \quad (23)$$

Voor LBS ($U_0 = U_c$) is $y_{m,e}$ met $r_0 = 0,2$

$$\frac{y_{m,e}}{b} = 2,0 \quad (24)$$

Voor CWS (Clear Water Scour) en voor stompe constructies, indien $O(b/h) = 1$, geldt voor de maximale ontgrondingsdiepte (Hoffmans en Verheij 2008)

$$\frac{y_{m,e}}{h_0} = \frac{1,4 \chi U_0^2 - U_c^2}{U_c^2} \quad (25)$$

Voor LBS ($U_0 = U_c$) is $y_{m,e}$ met $r_0 = 0,2$

$$\frac{y_{m,e}}{h_0} = 1,9 \quad (26)$$

De formules zijn naar wordt verondersteld ook toepasbaar voor cohesief materiaal door de juiste waarde voor U_c in te vullen. Aanbevolen wordt wel om het tijdsaspect nader te onderzoeken, want de formule veronderstelt dat de belasting voldoende lang aanhoudt om de maximale ontgroning te bereiken. Bij golfoverslag kan dit een beperkende factor zijn. Overigens is het zo dat, bij voldoende lange duur, de uiteindelijke maximale ontgrondingsdiepte bij cohesief en niet cohesief materiaal gelijk is.

3.2 Infiltratie en afschuiven

3.2.1 Infiltratietijd

Voor de waterspanningsopbouw in de dijk door golfoverslag is het belangrijk hoe lang er wateraanbod op het talud aanwezig is. Golfoverslag bestaat uit grote aantallen verschillende overslagvolumes die over de dijk heen slaan. Elk overslagvolume zorgt ervoor dat er gedurende een bepaalde tijd een wateraanbod op het talud aanwezig is. Als de tijd tussen de opvolgende overslagvolumes relatief klein is, dan is het wateraanbod continu, maar als de tussentijden groot zijn dan valt het talud af en toe droog.

Er zijn tot nu toe drie manieren gebruikt om de tijd dat er wateraanbod is op het talud te berekenen.

A Voor de predictie Delfzijl is gebruik gemaakt van Bosman (2007). De overstroomtijden zijn voortgekomen uit de analyse van golfoverslagproeven van Van Gent en Schüttrumpf.

B Formule uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid, Katern 8, Hoofdstuk 4.

C Addendum op Van Gent, 2002.

Ad A

Bij de proeven te Delfzijl (Bosman, 2007). is uitgegaan van de stroomtijden per volume zoals aangegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Stroomtijd (s) per overslagvolume (l/m) (Bosman, 2007).

Overslagvolume (l/m)	stroomtijd t_1 (s)
50	1.5 – 2.5
150	1.5 – 2.5
400	2.0 – 3.0
700	2.5 – 3.5
1000	3.0 – 4.0
1500	3.0 – 4.0
2500	3.5 – 5.0
3500	3.5 – 5.0

De totale tijd van wateraanbod op het talud wordt berekend door de hoogste waarde van de stroomtijd t_1 (s) uit Tabel 3.3 te vermenigvuldigen met de overslagvolumes die tijdens de proeven over het talud worden losgelaten (Tabel 3.4).

Tabel 3.4 Tijd dat het talud nat is (s) bij verschillende gemiddelde overslagdebieten

Overslagvolumen (l/m)	Stroomtijd (s)	Golfprogramma (totaal in 6 uur)			
		0,1 l/m/s	1 l/m/s	10 l/m/s	30 l/m/s
50	2.5	3	56	369	
150	2.5	3	40	200	687
400	3	2	10	240	325
700	3.5	1	6		
1000	4		3	44	206
1500	4			10	73
2500	5			5	25
3500	5				8
		25 sec	5 min	40 min	1h 6 min

De aanbodtijd van water als percentage van de proefduur is dan als volgt:

0.1 l/s per m	wateraanbod 0.1% van stormduur
1 l/s per m	wateraanbod 1,4% van stormduur
10 l/s per m	wateraanbod 11% van stormduur
30 l/s per m	wateraanbod 18% van stormduur

De aanbodtijd van water op het talud volgens deze benadering is veel lager dan tijdens de proef is waargenomen. De oorzaak hiervan is dat een heel kleine waterlaagdikte niet is meegenomen bij de bovengenoemde beschouwing van de overstroomtijd. Na een overslagvolumen is een heel dun waterlaagje nog lang op het talud aanwezig en dit is voldoende om te zorgen voor infiltratie. De tijd totdat het talud droog viel is niet gemeten. Observaties tijdens golfoverslagproeven geven echter de indruk dat er bij een overslagdebiet van gemiddeld 10 l/s per m bijna de hele proeftijd een dergelijk dun waterlaagje aanwezig is.

Ad B

Voor de predictie van de proeven voor de Boonweg (Deltares 2008) is gebruik gemaakt van de formule in het VTV (Voorschrift Toetsen op Veiligheid), Katern 8, Hoofdstuk 4:

$$t_{sr} = \left(1 - \frac{z}{z_q} \right) t_s$$

waarin t_{sr} (s) de tijd dat het talud nat is, t_s (s) de stormduur, in dit geval 6 uur, z (m) de kruinhoogte boven de waterstand en z_q (m) de fictieve kruinhoogte boven de waterstand, waarbij overslagdebiet van 0,1 l/s per m geldt. Bij een overslagdebiet van 0,1 l/s per m blijft het talud droog en bij een kruinhoogte gelijk aan de waterstand is het talud 100% van de tijd nat. De formule geeft de volgende tijdpercentages dat het talud nat is:

0.1 l/s per m	$z/z_q = 1,0$	wateraanbod 0% van stormduur
1 l/s per m	$z/z_q = 0,76$	wateraanbod 24% van stormduur
10 l/s per m	$z/z_q = 0,52$	wateraanbod 48% van stormduur
30 l/s per m	$z/z_q = 0,40$	wateraanbod 60% van stormduur
50 l/s per m	$z/z_q = 0,35$	wateraanbod 65% van stormduur
75 l/s per m	$z/z_q = 0,30$	wateraanbod 70% van stormduur

Hoewel deze percentages veel hoger zijn dan eerder aangehouden (Bosman, 2007), komen de percentages nog niet overeen met de observaties.

Ad C

In het kader van een Delft Cluster onderzoek zijn golfgootproeven gedaan op gladde dijken, waarbij ook de waterlaagdikte op de kruin en het binnentalud zijn gemeten (Van Gent 2002). Deze resultaten zijn gebruikt in de rapportage van de Evaluatie Delfzijl (Bosman 2007). Op het rapport van Van Gent 2002 is later een addendum geschreven: Van Gent 2002a, waarin een analyse is gemaakt van de verblijftijd van water op de kruin en het binnentalud van dijken. De golfgootproeven zijn uitgevoerd met een gladde dijk met een golfhoogte $H_{m0} = 0.15$ m en een piekperiode van 1.6 tot 2.5 s. De golfsteilheid gebaseerd op H_{m0} en T_p , ligt daarmee in de range van 0.014 tot 0.04 (-). Het buitentalud heeft een helling 1:4 en het binnentalud een helling 1:4 of 1:2.5. Voor een verdere beschrijving van de proefkarakteristieken wordt verwezen naar het hoofdrapport (Van Gent 2002).

Op drie punten op het binnentalud en 2 punten op de kruin van een dijk is de waterlaagdikte gemeten. Door de tijd dat water op deze plekken aanwezig is (T_{wet}) te delen door de totale proeftijd (T_{total}) resulteert het percentage van de tijd dat het talud nat is (P_{time}). P_{time} kan worden berekend met een reeks van formules, waarvoor wordt verwezen naar Van Gent 2002 en 2002a.

De waterlaagdiktemeters zijn nauwkeurig tot een minimale laagdikte h_{min} van 2 mm, wat een verhouding h_{min}/H_s geeft van 0.013. Dit is de ondergrens van de methode. Voor de golfoverslagproeven met de golfoverslagsimulator betekent dit een waterlaagdikte van 2,6 cm. Ook dunnere waterlaagjes geven echter nog voldoende wateraanbod en zijn veel langer op het talud aanwezig. De formules leiden dan ook tot wateraanbod-tijden die veel korter zijn dan die moeten worden gebruikt bij de infiltratieberekeningen.

Een goede formule voor het berekenen van de tijd van wateraanbod bij golfoverslag, waarin ook heel dunne waterlaagjes worden meegenomen, ontbreekt nog. Aanbevolen wordt echter om de volgende praktische werkwijze te hanteren.

Uit de analyse van eerdere golfoverslagproeven blijkt dat na het voorbij komen van het overslagfront het nog tientallen seconden (40 à 60 s) duurt voordat er geen water meer zichtbaar is op het talud. Dit is echter zeer moeilijk vast te stellen. Sommige plekken vallen eerder droog dan andere plekken. Bovendien is een waterlaagje dat zich tussen het gras bevindt moeilijk te zien, maar nog wel voldoende om te zorgen voor wateraanbod voor infiltratie.

Door uit te gaan van een gemiddelde droogvaltijd¹ van 60 s kan voor elk overslagvolume worden bepaald of het talud voorafgaand aan dit volume droog valt. Alleen bij een volume groter dan 60 s x het gemiddelde overslagdebiet zal dit het geval zijn. De tijd dat het talud droog valt is gelijk aan het overslagvolume gedeeld door het gemiddelde overslagdebiet min, 60 s. Voorbeeld voor een gemiddeld debiet van 10 l/s per m:

¹ Droogvaltijd (s): tijd tussen het passeren van het front van een golfoverslagvolume en het droogvallen van het talud.

Overslagvolume (l/m)	Vultijd = overslagvolume / 10 l/s per m (s)	Vultijd > droogvaltijd (ja/nee)	tijd droog (s)
161	16,1	Nee	-
139	13,9	Nee	-
744	74,4	Ja	14,4
55	5,5	Nee	-
50	5,0	Nee	-
879	87,9	Ja	27,9
2674	267,4	Ja	207,4
78	7,8	Nee	-
1068	106,8	Ja	46,8
245	24,5	Nee	-
Et cetera			

Op deze manier kan met behulp van de lijst met overslagvolumes worden bepaald welk percentage van de tijd er geen wateraanbod is voor infiltratie. Dit leidt tot de volgende resultaten:

1 l/s per m (5x versneld)	wateraanbod 76% van stormduur
10 l/s per m	wateraanbod 83% van stormduur
30 l/s per m	wateraanbod 96% van stormduur
50 l/s per m	wateraanbod 98% van stormduur
75 l/s per m	wateraanbod 99% van stormduur

Aanbevolen wordt om te kijken of tijdens de overslagproeven op de Afsluitdijk de droogvaltijd beter kan worden bepaald. Ook wordt aanbevolen om de bepaalde aanbodtijden naast de metingen te leggen. Op basis van de bovengenoemde benadering wordt verwacht dat tijdens de 1 l/s per m proef de waterspanningen duidelijk minder zullen toenemen dan bij de proeven met een groter overslagdebiet. Tussen de waterspanningsmetingen bij de proeven met 30, 50 en 75 l/s per m wordt weinig verschil verwacht.

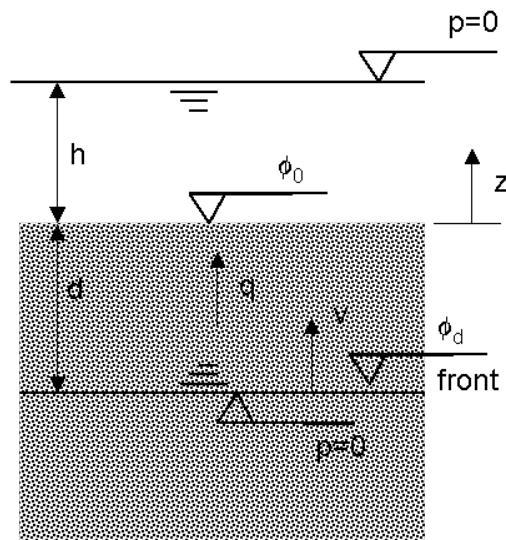
3.2.2 1D analytische infiltratieberekening

De predictieberekeningen worden uitgevoerd met het 2D grondwaterstromingsmodel PlaxFlow. Dit is een geavanceerd eindige elementen model, waarvoor moeilijk te bepalen parameters nodig zijn. De berekeningen vergen ook een behoorlijke inspanning. Het is de vraag hoeveel nauwkeurigheid hiermee wordt bereikt ten opzichte van een eenvoudig 1D analytisch model.

Infiltratie kan op een veel eenvoudiger manier worden gemodelleerd, door de processen bij het infiltratiefront, waar de onverzadigde grondwaterstroming optreedt, weg te laten. Voor zand is dit waarschijnlijk een goede benadering, maar ook voor de stroming door macrostructuren in klei kan dit mogelijk een redelijke aanname zijn. Voor een eenvoudige buis-infiltratieproef is dit onderstaand verder uitgewerkt. Aanbevolen wordt om bij de evaluatie van de proeven op de Afsluitdijk na te gaan of met deze analytische methode toch redelijke resultaten kan leiden.

Onderbouwing voor buis-infiltratieproef

Als op droge grond een laag water wordt aangebracht met een laagdikte h_0 (m), dan zal het onder de invloed van de zwaartekracht in de grond zakken. De snelheid waarmee dit gebeurt, is een maat voor de doorlatendheid k (m/s) en porositeit n (-) van de grond.



De druk boven het wateroppervlak en de druk onder het front is gelijk aan 0 (Pa). De lucht onder het front moet de mogelijkheid hebben om te ontsnappen. De stijghoogte bij het front ϕ_p (m) en op het grondoppervlak ϕ_0 (m) zijn gelijk aan:

$$\phi_0 = z + \frac{p}{\gamma_w} = 0 + h = h$$

$$\phi_d = z + \frac{p}{\gamma_w} = -d + 0 = -d$$

Er wordt uitgegaan van een verticale stroming. Het debiet door een horizontaal vlak is overal gelijk. In de grond is het specifieke debiet q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ ofwel m/s) constant achter het front:

$$q = -k \frac{\phi_0 - \phi_d}{d} = -k \frac{h + d}{d} = -k \left(\frac{h}{d} + 1 \right)$$

Indien een afgemeten volume op het talud wordt aangebracht en in de grond trekt, dan geldt:

$$\partial \text{Volume} = \partial(h + nd) = 0$$

$$\Rightarrow h = -nd + C$$

Met initieel $h = h_0$ geeft dit $h - h_0 = -nd$

De frontsnelheid $v = \partial d / \partial t$ (m/s) is gelijk aan de snelheid van het poriënwater, die gelijk is aan het specifiek debiet gedeeld door de porositeit.

$$\begin{aligned} \text{frontsnelheid} = v &= \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{q}{n} \\ \Rightarrow \partial t &= \frac{-n \partial d}{q} = \frac{n}{k} \frac{1}{1 + \frac{h}{d}} \partial d = \frac{n}{k} \frac{1}{1 + \frac{h}{\frac{h_0 - h}{n}}} \partial \left(\frac{h_0 - h}{n} \right) = -\frac{1}{k} \frac{h_0 - h}{h_0 - (1-n)h} \partial h \end{aligned}$$

Integreren van $t=0$ tot $t=t_0$ waarop al het water is geïnfiltreerd $h=h_0$ tot $h=0$.

$$\begin{aligned} -k \int_{t=0}^{t=t_0} \partial t &= \int_{h=h_0}^{h=0} \frac{h_0 - h}{h_0 + (n-1)h} \partial h = \frac{h_0}{(n-1)} \left(1 + \frac{n}{(n-1)} \ln \left| \frac{1}{n} \right| \right) \\ \Rightarrow -k \cdot t_0 &= \frac{h_0}{(n-1)} \left(1 + \frac{n}{(n-1)} \ln \left| \frac{1}{n} \right| \right) \\ \Rightarrow k &= \frac{h_0}{t_0} \frac{1}{(1-n)} \left(1 - \frac{n}{(1-n)} \ln \left| \frac{1}{n} \right| \right) \end{aligned}$$

De frontsnelheid is gelijk aan de snelheid van het poriënwater v (m/s) en niet gelijk aan het specifiek debiet q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$). De frontsnelheid $v=q/n$ (m/s).

3.2.3 Schuifsterkte klei met bodemstructuur

In het kader van het Delft Cluster project Veiligheid tegen overstromen is experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de sterkte van klei met bodemstructuur (Van Hoven, 2008). De invloed van de bodemstructuur is onderzocht door vergelijking van drie grote triaxiaalproeven met standaard, kleine, triaxiaalproeven op hetzelfde materiaal uit de bekleding van een kleidijk. Hieruit blijkt dat de bodemstructuur vooral bij kleine vervormingen invloed heeft op de sterkte van de klei (2% verticale rek). Bij een rek van circa 5% is er geen significant verschil gevonden tussen de grote triaxiaalproeven en de traditioneel uitgevoerde triaxiaalproeven op kleine diameter monsters. Hieruit blijkt slechts een beperkte invloed van de bodemstructuur. Helaas wordt echter ook geconcludeerd dat de gehanteerde proefmethode (grote triaxiaalproeven) geen goede methode is voor het bepalen van de absolute schuifsterkte. Er wordt dan ook aanbevolen om verder onderzoek uit te voeren met een grote diameter simple shear proefopstelling. Inmiddels is de ontwikkeling van een dergelijk apparaat gestart in het kader van het SBW project Werkelijke Sterkte. Het apparaat zal volgens de huidige planning eind 2009 gereed zijn.

Aanbevolen wordt om gebruik te maken van dit apparaat en vooralsnog de traditionele triaxiaalproeven op het bekledingsmateriaal uit te voeren en deze aan te vullen met enkele (kleine diameter) simple shear proeven. Deze proefresultaten zijn noodzakelijk voor het maken van een predictie en kunnen later bijdragen bij het vinden van een verband tussen de werkelijke schuifsterkte van klei met bodemstructuur en proefresultaten op traditioneel uitgevoerde proeven.

4 Conclusies

Dit rapport beschrijft op basis van eerdere ervaringen aanpassingen van de golfoverslagsimulator, de proefopstelling en de fysische modellen waarmee de faalmechanismen worden beschreven. De belangrijkste aanpassingen staan hieronder genoemd.

Golfoverslagsimulator

- De bediening van de golfoverslagsimulator is geautomatiseerd.
- Er heeft een grote onderhoudsbeurt plaats gevonden en er is een ontwerp gemaakt voor een nieuwe simulator.

Proefopstelling

- De inrichting van de proefopstelling zal flexibeler worden ingericht zodat sneller kan worden verplaatst naar een andere teststrook. Dit betreft onder andere de opstelling van de camera's.
- Voor de uitvoering zal een basin moeten worden aangelegd, omdat een constante aanvoer van water vanuit de Waddenzee niet is gegarandeerd. Voordeel hiervan is dat proeven kunnen worden gedaan met zowel zout als zoet water.
- Laagdikten inclusief luchtgehalte zullen ook met de 'surfplank' worden gemeten. In aanvulling daarop zal met een nieuw instrument afzonderlijk het luchtgehalte worden geregistreerd. Daarnaast zal de snelheid van het golffront met digitale camera's worden vastgelegd.

Predictiemodellen graserosie

- Het bestaande model voor erosie van de toplaag van gras op het doorgaande talud is verder uitgebreid.
- Een nieuw model is ontwikkeld voor het abrupt losscheuren van de grasmat (zogenaamde opbolmechanisme).
- Nieuw ontwikkeld is ook een model voor het ontstaan van een ontgrondingskuil op de overgang van talud naar een horizontaal deel. Dit model beschrijft de ontwikkeling van de kuildiepte in de tijd. Daarnaast is beschikbaar een model op basis van de straalimpact dat de einddiepte van een ontgrondingskuil voorspelt.
- Een bestaand model is aangepast voor het voorspellen van erosie rondom kleine obstakels, zoals paaltjes.
- Op de locatie Afsluitdijk zal ook een overgang met een klinkerbestrating worden beproefd. Bovendien is er een teststrook met een taludtrap en bevinden zich hekwerken in het talud of de teen. Voor deze situaties is geen model opgesteld.
- Bij de modellering blijken graseigenschappen als worteldikte en wortelsterkte zeer belangrijk. Aanbevolen wordt onderzoek hiernaar te intensiveren. Daarnaast is het tijdseffect bij ontgrondingen in relatie tot het cohesief zijn van de grond, een aspect om nader te bestuderen.

Predictiemodellen infiltratie en afschuiven

- Er is een recept opgesteld voor het voorspellen van de tijd dat het talud nat is. Basis daarvoor is het overslagvolume. Aanbevolen wordt om te kijken of tijdens de overslagproeven op de Afsluitdijk de droogvaltijd beter kan worden bepaald.
- Er is een veel eenvoudiger model opgesteld op basis van 1D analytisch model. Aanbevolen wordt om bij de evaluatie van de proeven op de Afsluitdijk na te gaan of met deze analytische methode toch redelijke resultaten kan leiden.

5 Referenties

- Bos, W. van den, 2006, Erosiebestendigheid van grasbekleding tijdens golfoverslag. Afstudeeronderzoek TU Delft.
- Bosman, G., 2007. Velocity and flow depth variations during wave overtopping. MSc-thesis Delft University of Technology.
- Breusers, H.N.C., 1966. Conformity and time-scale in two dimensional local scour. Proceedings Symposium on model and prototype conformity, Hydraulic Research Laboratory, Poona, pp. 1-8, also Delft Hydraulics, Publication No. 40.
- Van Gent, M.R.A. 2002a: Low-exceedance wave overtopping events, Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes, Addendum: Duration of wave overtopping, Delft Cluster DC030202/H3803, October 2002, Delft
- Van Gent, M.R.A. 2002: Low-exceedance wave overtopping events, Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes, Delft Cluster DC030202/H3803, June 2002, Delft
- Deltares 2008, SBW Golfoverslag en Sterkte Grasbekleding, Fase 2B Predictie Boonweg, CO-423891/57 versie 1 definitief, december 2008
- Hewlett, H.W.M, L.A. Boorman and M.E. Bramley, 1987. Design of reinforced grass waterways. CIRIA Report 116, London
- Hoffmans, G.J.C.M. and H.J.Verheij, 1997, Scour Manual. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Hoffmans, G.J.C.M., H.J.Verheij and J.Lindenberg, 2008, Erodibility of Clay and Grass ASCE, J.of Hydraulic Engineering (aangeboden voor publikatie)
- Hoffmans, G. J. C. M., 2008,. Closure problem in jet scour. Ministry of Transport, public Works and Water Management; Road and Hydraulic Engineering Institute, Delft.
- Van Hoven, A., 2008, Sterkte van Kleibekleding bij Golfoverslag, Invloed van gras en bodemstructuur op de sterkte van klei, CO-418020 versie 1 definitief, december 2008.
- Partheniades, E., 1965. *Erosion and deposition of cohesive soils*. J. of Hydr. Div., ASCE, 91(HY1).
- Valk, A. 2009, Wave overtopping – Impact of water jets on grassed inner slopes transitions, Afstudeeronderzoek TU Delft.
- Verheij, H.J. et al, 1995, Onderzoek naar de sterkte van graszoden van rivierdijken. WL verslag Q1878, Delft.