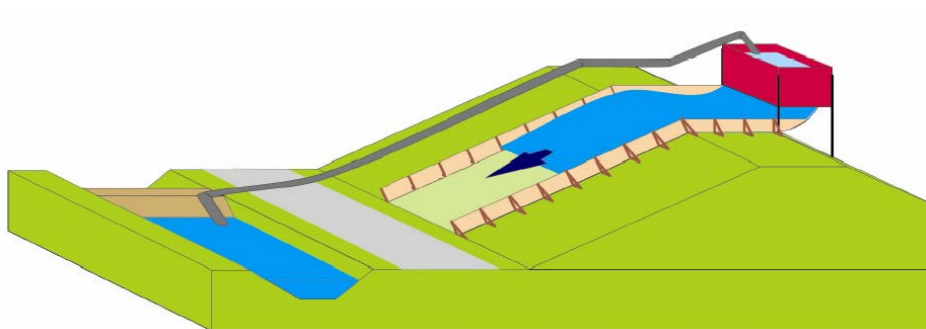


Golfoverslag en sterkte binnentalud bij dijken



A.A. Galema
R.H. de Jong
K.W. Pruis
A. Wisse

Golfoverslag en sterkte binnentalud van dijken

Definitief

Rapportageversie: D01

Datum: *27 juni 2006*

Auteurs: A.A. Galema
R.H. de Jong
K.W. Pruis
A. Wisse

Voorwoord

Dit verslag is een rapportage van ons afstudeerproject voor de opleiding algemene Civiele Techniek aan de Noordelijke Hogeschool Leeuwarden. Tijdens het afstuderen voert een groep van vier studenten een onderzoek uit. Dit afstudeerproject wordt in samenwerking met INFRAM, een civieltechnisch adviesbureau, uitgevoerd. Het onderzoek richt zich op de sterkte van grasbekleding op het binnentalud van zeedijken. Voor het beproeven van de grasmatten op locatie wordt door ons in samenwerking met INFRAM en Royal Haskoning een zogenaamde golfoverslagsimulator ontwikkeld, ook zal er gekeken worden naar technieken om het binnentalud overslag bestendig te maken.

Bij deze willen wij graag onze begeleiders dhr J.W. van der Meer (INFRAM) en dhr J.T. de Vries (NHL) bedanken voor hun begeleiding en INFRAM voor de afstudeeropdracht en de werkplek.

Marknesse, juni 2006

Ali Galema
Rindert de Jong
Kees Willem Pruis
Arjan Wisse

Inhoudsopgave

1.	Samenvatting	6
2.	Inleiding	8
2.1	Algemeen	8
2.2	Werkwijze.....	9
3.	Dijkopbouw	10
3.1.	Dijkelementen	10
3.2.	Opbouw van de grasmat	11
3.3.	Beheer van de dijk.....	12
3.3.1.	Beheerproblemen.....	12
4.	Golfoverslag	13
5.	Faalmechanismen	14
5.1.	Erosie binnentalud	15
5.2.	Afschuiving van het binnentalud	16
5.2.1.	Afschuiving van de toplaag door interne erosie	18
5.2.2.	Afschuiving van de toplaag	18
6.	Geokunststof.....	19
6.1.	Inleiding.....	19
6.2.	Algemeen	19
6.3.	Marktonderzoek	19
6.4.	Specificaties.....	20
6.5.	Verwerking	20
6.6.	Conclusie	20
6.7.	Aanleg Smart Grass Reinforcement.....	21
7.	Simulatie	24
7.1.	Berekening.....	24
7.1.1.	Ontwerp parameters.....	25
7.1.2.	2%-Golfoploop, overslagdebiet en kans op overslag.....	27
7.1.3.	Bepalen kruinhoogte en percentage overslag bij te simuleren debiet ...	29
7.1.4.	Overslagvolumes per golf	30
7.1.5.	Resultaten per te simuleren debiet.....	31
7.1.6.	Laagdikte en snelheid van de overslaande golven	37
7.2.	Prototype.....	43
7.2.1.	Inleiding.....	43
7.2.2.	Uitgangspunten voor het “technisch” ontwerp	43
7.2.3.	“Vloeistofmechanische” Eisen + Ontwerpvoorstel	44
7.2.3.1.	Opbouw van de golfoverslagsimulator	44
7.2.3.2.	Het reservoir met onderin de uitstroombak.....	45
7.3.	De theoretische vorm van de uitstroombak	45
7.4.	Een praktische vorm en afmetingen van de uitstroompak	48
7.5.	De theoretische grootte van de uitstroomopening	50
7.5.1.1.	De geleideconstructie.....	55
7.5.1.2.	De opstelpoten.....	56
8.	Calibratie prototype	57
8.1	Inleiding	57
8.2	Proefopstelling en testlocatie	58
8.3	Uitvoering van de proeven.....	60
8.4	Evaluatie van de uitgevoerde testseries	61
8.5	Conclusie (t.a.v. de K-serie).....	65

Toelichting tabel "Totaaloverzicht"	66
Kolom 4: Maximale laagdikte	66
Kolom 5: Uitstroomtijd	66
9. Lijst van tabellen en figuren	73
10. Lijst van gebruikte afkortingen en symbolen	75
11. Literatuurlijst	76
12. Bijlagen	77
Bijlage 1: Geokunststof (K.W. Pruis)	77
Bijlage 2: Draaiboek golfoverslagsimulator (A. Galema)	77
Bijlage 3: Waarborgen veiligheid (A. Wisse)	77

1. Samenvatting

Door de zeespiegelstijging, mogelijk krachtigere golven en een dalende bodem, moeten dijken in de toekomst steeds verder verhoogd worden. Omdat dit op den duur (technisch en financieel) moeilijk vol te houden is, wordt er gezocht naar duurzame alternatieven voor dijkverzwaring. Een mogelijkheid is om tijdens extreme omstandigheden overslaand water (golfoverslag) toe te staan.

Bij golfoverslag is de kruinhoogte lager dan de golfoploophoogtes van de hoogste golven. Alleen de hoogste golven bereiken de kruin van de dijk en veroorzaken dan een (flinke) hoeveelheid water dat over de kruin en het binnentalud stroomt. Hierbij komen grote krachten op de graszode van de dijk. Om de sterkte van binnentaluds van dijken te kunnen vaststellen, is door ons een zogenaamde golfoverslagsimulator ontwikkeld. Deze is in staat om golfslag over elke bestaande dijk na te bootsen.

In mei 2006 zijn op de zeedijk nabij Delfzijl twee proefvakken aangelegd, waar over een breedte van 4 meter grofmazige kunststofmatten (geogridmatten) onder de graszode en over kruin en binnentalud zijn aangebracht. De matten worden tot aan de buitenzijde van de dijk aangebracht en daar verankerd. Het gras groeit deze zomer door de matten heen. Het resultaat hiervan is een sterke graszode die mogelijk de sterkte van de binnenzijde van de dijk zal verbeteren. Voorafgaand aan het aanleggen van de proefvakken met het geotextiel, is aan de hand van een korte literatuurstudie onderzocht wat de faalmechanismen van een binnentalud zijn bij golfoverslag. Ook is een literatuurstudie uitgevoerd naar bestaande kunststofmatten.

Met behulp van de golfoverslagsimulator zal in maart 2007 worden onderzocht of de binnenzijde van een dijk zo versterkt kan worden dat er een grote hoeveelheid water over de dijk kan lopen zonder dat deze beschadigt. Het doel van deze proef is dus om te testen hoe lang gewoon gras op klei en hoe lang versterkte grasmatten overslaand zeewater aankunnen.

Voorafgaand aan het ontwerp van de golfoverslagsimulator is aan de hand van een literatuurstudie uitgezocht aan welke eisen de golfoverslag simulator moet voldoen. De golfoverslagsimulator moet een extreme storm (kans 1/4000 of kleiner) na kunnen bootsen. Bij een storm slaan er golven onregelmatig over de dijk. Van deze golven is het volume, de laagdikte en de snelheid bekend of uit te rekenen. De golfoverslagsimulator moet deze overslaande golven zo simuleren, dat bij gegeven volume de juiste snelheid en laagdikte wordt gegenereerd, zoals deze ook bij de storm zijn. Het ontwerp van de simulator is hier op gericht geweest.

De golfoverslagsimulator ziet eruit als een hoge, naar boven taps toelopende bak op poten met een klep aan de onderkant en een overgangsconstructie om de uitkomende golven naar de bovenkant van de dijk te geleiden. De vorm van de bak en de grootte van de klep zijn door ons theoretisch bepaald. De bak komt op de buitenzijde van de dijk te staan, op verstelbare poten van maximaal twee meter. De golven lopen via de overgangsconstructie en de kruin over de binnenzijde van de dijk. Bij de proef wordt gemeten wat het effect van de overslaande golven is op de erosiebestendigheid van de kruin en het binnentalud. En of de versterkte grasmatten ook inderdaad sterker is.

De werkelijke simulator wordt 4 m breed en er kan maximaal 14 m³ water in. Golfoverslag wordt vaak gegeven als een constante waterstroom per meter breedte.



Dit varieert van 0,1 tot ongeveer 10 liter per seconde per meter breedte. Bij de proef wordt zelfs rekening gehouden met 30 l/s per m. De grootste hoeveelheid die de hoogste golf over de kruin slaat is dan in de orde van 3 m^3 per golf per m breedte.

Er is eerst een 1 meter breed prototype van de overslagsimulator gebouwd om het eerste ontwerp van de simulator te vervolmaken. Het prototype is door ons gedurende twee weken getest. Hierbij is gekeken en gemeten op welke manier de golven uit de simulator komen. Het volume water dat in de simulator wordt gepompt, is uitgangspunt. Wanneer de klep van de simulator opengetrokken wordt, loopt het water met grote snelheid uit de simulator. De hoogte, de snelheid en de uitstroomtijd van het water zijn gemeten. Deze metingen zijn vergeleken met op kleine schaal in een golfgoot en met formules. Er is zolang getest dat de simulator aan gestelde eisen voldoet. In de studie is ook gekeken naar de veiligheid van de dijk tijdens proeven (in het stormseizoen) en naar de logistiek rondom een overslagproef in het veld.

2. Inleiding

2.1 Algemeen

Weinig mensen namen prins Willem-Alexander in 1997 serieus, toen hij in een interview met Paul Witteman voor het eerst de term 'watermanagement' liet vallen. "Het is een primaire levensbehoefte, het is gezondheid, het is milieu en transport en er zijn gevechten tegen water en gevechten voor te weinig water", zo sprak de prins.

Inmiddels zijn we negen jaar verder. Rivieren treden steeds vaker en verder buiten hun oevers door grote hoeveelheden neerslag. De zeespiegel stijgt, waardoor het onderwerp kustbescherming steeds actueler wordt. Water dringt zich op en staat steeds nadrukkelijker op de agenda van bestuurders, wetenschappers, ontwerpers en bouwers. De verwoestende tsunami in Zuidoost-Azie onderstreepte nog maar eens de kracht van het water.

Niet alleen voor andere continenten zorgt het water voor problemen. Ook in Europa zijn in het verleden problemen geweest en deze zullen in de toekomst zeker weer voorkomen, tenzij er wat aan de bescherming wordt gedaan. Het is dus van belang dat de dijken in Nederland meegroeien met de al maar groter wordende belastingen. Wanneer dit niet gebeurt zal een dijk bij een storm falen of in zijn geheel bezwijken. Enkele faalmechanismen zijn het gevolg van golfoverslag. In dit rapport zal het begrip golfoverslag nader worden belicht.

In Europees verband loopt er op dit moment een project genaamd; ComCoast. Dit project is er op gericht een innovatieve oplossing te ontwikkelen voor het overslag bestendig maken van een dijk, als alternatief voor het blijven ophogen van de kruin. Het ophogen van de kruin brengt hoge kosten met zich mee en de dijk komt steeds hoger in het landschap te liggen. Op enkele plaatsen is dit niet mogelijk in verband met ruimtegebrek. Hierbij wordt gedacht aan een versterking van de graszode op de kruin en het binnentalud met een geokunststof. Men verwacht dat door deze versterking de dijk het overslaande water kan verwerken zonder dat deze hieraan bezwijkt. Hierbij moet echter wel in acht worden genomen dat bij extreme waterstanden veel water achter de dijk terechtkomt. Om dit overslaande water te verwerken wordt een laaggelegen natte zone achter de bestaande dijk aangelegd. Deze natte zone wordt vervolgens begrensd door de primaire waterkerende dijk.

Wanneer een proeflocatie gekozen is voor het versterken van de graszode moet deze proeflocatie uiteindelijk getest worden op overslagbestendigheid. Een onderzoeksvraag van de projectgroep 'RAAK²' is dan ook: *Hoe kan de graszode op het binnentalud en de kruin van de dijk versterkt worden met geokunststof en wat is het effect hiervan?*

Nadat uitgezocht is hoe het binnentalud versterkt moet worden, wordt deze op de proeflocatie aangelegd. Deze dijk zal in een later stadium beproefd worden met de golfoverslagsimulator. Dit zal echter buiten onze afstudeerperiode vallen.

Het beproeven van de dijk in deze projecten kan geschieden met behulp van een golfoverslagsimulator. De golfoverslagsimulator is een simulator die op de dijk wordt geplaatst en moet simuleren hoe een golf die de kruin van de dijk bereikt, er overheen slaat en over de kruin en het binnentalud naar beneden vloeit. Ten behoeve van het ontwikkelen van deze golfoverslagsimulator dient er een programma van eisen opgesteld te worden. Daarnaast dient er ook een draaiboek gemaakt te worden voor het uitvoeren van de proeven met de golfoverslagsimulator. Met deze simulator moet het mogelijk zijn diverse dijken te testen.

2.2 Werkwijze

Ter verduidelijking zal nader toegelicht worden wat het begrip ‘golfoverslag’ inhoudt. Om goed naar de faalmechanismen te kunnen kijken zal eerst een omschrijving van de dijk worden gegeven. Hierbij zal naar de opbouw van de dijk gekeken worden en de invloed van de diverse beheerstypen van de graszode op de dijk. De kans op bepaalde faalmechanismen kan mogelijk worden verkleind door het toepassen van geokunststof in de dijkbekleding. In het hoofdstuk geokunststoffen zal meer over het geokunststof naar voren komen.

Vervolgens zal de functie van de golfoverslagsimulator uitgelegd worden. Waarna de berekening van de te simuleren golven volgt. Aan de hand van deze berekeningen is er een ontwerp van de simulator gemaakt en hiervan is een prototype gebouwd.

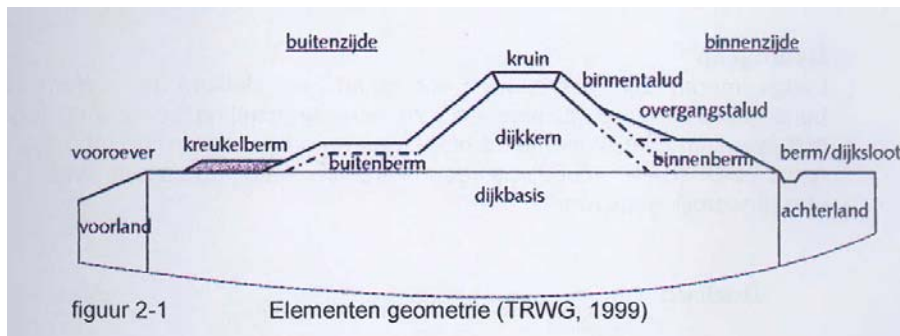
Voor het maken van deze rapportage zijn er o.a. rapportages gebruikt die in een eerder stadium van het afstuderen als deelsluitwerking zijn gemaakt. Van enkele deelsluitwerkingen zijn de belangrijkste delen in dit rapport gevoegd. De volledige deelsluitwerkingen zijn bijgevoegd als bijlage omdat deze rapporten wel deel uitmaken van het project maar toch ook min of meer los van staan.

3. Dijkopbouw

In dit hoofdstuk worden de verschillende dikelementen benoemd. Verder zal er een beschrijving van de grasmat worden gegeven. Ook zal er worden ingegaan op het beheer van de graszode van de dijk.

3.1. Dikelementen

Om het falen van de dijk goed te kunnen omschrijven zijn in figuur 4-1 de verschillende onderdelen van een dijkprofiel weergegeven. Niet alle dijken bevatten al de benoemde elementen. Zo ontbreken vaak de berm, teensloot en kreukel- of plasberm.

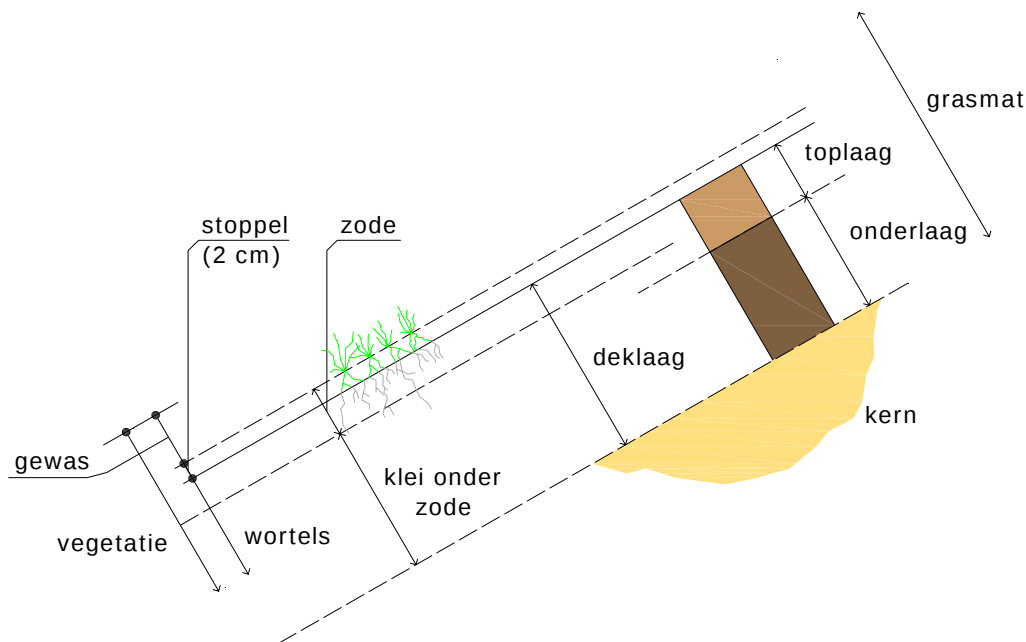


Figuur 3-1 Dikelementen

Het kernmateriaal kan bestaan uit zand of klei. De dijken met een zandkern zijn afgedekt met een kleilaag. De oude dijken bestaan meestal volledig uit klei. Versteving van deze dijken vindt vaak plaats door achter de oude dijk een zandlichaam aan te brengen. Deze wordt afgedekt met een laag klei.

3.2. Opbouw van de grasmat

In de grasmat kunnen verschillende lagen worden onderscheiden. De ligging van de lagen wordt niet alleen door de aanleg bepaald, maar ook door de vegetatie en het beheer. De verschillende onderdelen worden in figuur 4-2 weergegeven.



Figuur 3-2 Opbouw van de grasbekleding

De lagen kunnen als volgt worden beschreven:

- Onder de grasmat wordt de volledige afdeklaag van de dijk verstaan. Deze loopt tot het kernmateriaal.
- De graszode is het bovenste, meest doorwortelde gedeelte van de grasmat. De graszode kan worden opgedeeld in drie lagen. De bovenste laag van 1 tot 3 mm bestaat uit rulle grond en plantenresten. Deze losse delen worden snel weggespoeld. Direct onder deze laag ligt een laag van 5 tot 50 mm waarin de zode losgepakt is en dicht doorworteld is. Ongeveer 55% van de wortels bevindt zich in deze laag (Spangers; 1996). Deze laag wordt daardoor versterkt. Door structuurvorming is de laag zeer doorlatend. De derde en diepst gelegen laag ligt tussen de 5 en 15 cm waarin de zode vaak iets dichter is gepakt en de hoeveelheid wortels aanzienlijk minder is. De doorlatendheid is hierdoor minder.
- Onder de graszode bevindt zich klei. Deze is weinig doorworteld en minder gestructureerd dan de bovenste laag. Verder naar beneden neemt de doorworteling nog verder af en neemt de pakking van de grond toe.
- Onder de grasmat bevindt zich het kernmateriaal. Deze bestaat uit zand of klei. Als het kernmateriaal zand is, dan heeft dit een grotere doorlatendheid dan de toplaag.

De zode bestaat uit grote en kleinere brokken grond. De structuurvorming is onder andere ontstaan door wisseling van temperatuur, vochtigheid, dieren en wortelgroei. De brokken worden bij elkaar gehouden door de cementerende stoffen. Ook plantenwortels houden de brokken bij elkaar. De door de structuurvorming ontstane poriën maken de zode doorlatend.

3.3. Beheer van de dijk

De kwaliteit van de graszode heeft grote invloed op de sterkte van de graszode. De kwaliteit van de graszode is onder andere afhankelijk van het gevoerde beheer. De vegetatie samenstelling, zode dichtheid en worteldichtheid bepalen de kwaliteit van de grasmat.

Verandering van beheer zal leiden tot een andere vegetatie samenstelling. Zo is aangetoond dat een extensivering van het beheer leidt tot een gevarieerdere samenstelling, een meer gesloten zode en een betere doorworteling in alle bodemlagen. Een extensivering van het beheer houdt in: een combinatie van niet mesten met extensieve beweiden en hooien.

Het beheer van de primaire waterkering is vaak in handen van de Waterschappen. Deze zijn ook verantwoordelijk voor de keringen. Het dagelijkse beheer wordt in de praktijk op twee manieren uitgevoerd. Het waterschap kan een gedeelte van de dijk verpachten of er worden onderhoudscontracten afgesloten.

3.3.1. Beheerproblemen

Het beheer van gras is een gecompliceerde taak. Eén gemaakte fout in het beheer kan leiden tot een aanzienlijke sterkte reductie. Hieronder zullen enkele beheersproblemen, die de kwaliteit en de sterkte van de graszode beïnvloeden, worden behandeld.

Maaien/hooien

De kwaliteit van de graszode wordt positief beïnvloed als de grasmat op tijd wordt gemaaid. Ook mag het gras niet te lang zijn in de winter. Door te lang gras kan het gras gaan verstikken. Het maaien van de dijk gebeurt vaak door loonwerkers. Het werk wordt dan uitgevoerd op de afgesproken datum. Hierdoor kan het voorkomen dat de dijk gemaaid wordt als deze te nat is. De dijk kan dan bijvoorbeeld door spoorvorming worden beschadigd.

Beweiden

Beweiden van de grasmat heeft een positief effect op de doorworteling. Bij verkeerd beheer kan het ook een negatief effect hebben op de graszode. Bijvoorbeeld als de graszode te laat wordt beweid. Het gras is dan te lang en wordt platgetrapt. Hierdoor kan het gras verstikken. Ook kunnen er op de dijk oneffenheden ontstaan. Zo kunnen er zogenaamde schapenpaadjes ontstaan doordat de schapen vaak over hetzelfde spoor lopen of kan een natte dijk worden vertrapt.

4. Golfverslag

Bij golfverslag is de kruinhoogte lager dan de golfoploop niveaus van de hoogste golven. Alleen de hoogste golven bereiken de kruin van de dijk en veroorzaken dan een flinke hoeveelheid water dat over de kruin en het binnentalud stroomt. Dit pulserend karakter hoort bij golfverslag. Dit in tegenstelling tot een constant overlopend debiet dat golfverloop genoemd wordt. De hoeveelheden overslaand water in de hoogste golven zijn vaak 100 – 1000 maal groter dan het gemiddelde overslagdebet. Dus vaak is er lange tijd geen overslag en dan komt er een grote hoeveelheid in één keer.

In dit verslag wordt golfverslag berekend ten opzichte van de hoogte van de buitenkruinlijn en wordt er van uitgegaan dat deze overslag ook de achterkant van de kruin en het binnentalud bereikt. Bij golfverslag wordt gerekend met een gemiddeld debiet per strekkende meter breedte, q , meestal in m^3/m per s of in l/m per s. Deze berekening zal aan de hand van het TAW rapport 'Technisch Rapport Golfoploop en Golfverslag bij Dijken'.



Figuur 4-1 Golfverslag

5. Faalmechanismen

Een dijk kan op verschillende manieren falen. Zoals eerder aangegeven zal door de stijgende zeespiegel en de zwaardere golfbelasting, de belasting door overslaande golven steeds belangrijker worden. Voornamelijk de faalmechanismen “afschuiving van het binnentalud” en “erosie van het binnentalud” zijn van belang. Deze faalmechanismen worden in dit hoofdstuk behandeld.

Falen van een gedeelte van de dijk wil nog niet zeggen dat de totale dijk bezwaken is. Zo kan bijvoorbeeld een gedeelte van de dijkbekleding weg slaan. De bekleding (en dus de dijk) is dan gefaald. De dijk is dan wel gefaald maar niet bezwaken.

Bezwijken van het binnentalud is een gevolg van golfoverloop en golfoverslag. Verschil tussen golfoverloop en golfoverslag is dat bij golfoverloop de stilwaterlijn (SWL) hoger is dan de kruin hoogte, bij golfoverslag is dit niet het geval. Bij meer- en zeedijken zal door hogere golven sprake zijn van een minder frequente overslag dan bij rivierdijken. Het overslagdebiet per golf kan echter aanmerkelijk groter zijn dan het overloopdebiet bij een rivierdijk.

In de figuur 5-1 is het faalmechanisme gegeven die veroorzaakt wordt door golfoverloop, deze faalmechanismen gelden ook voor falen door golfoverslag.

5.1. Erosie binnentalud

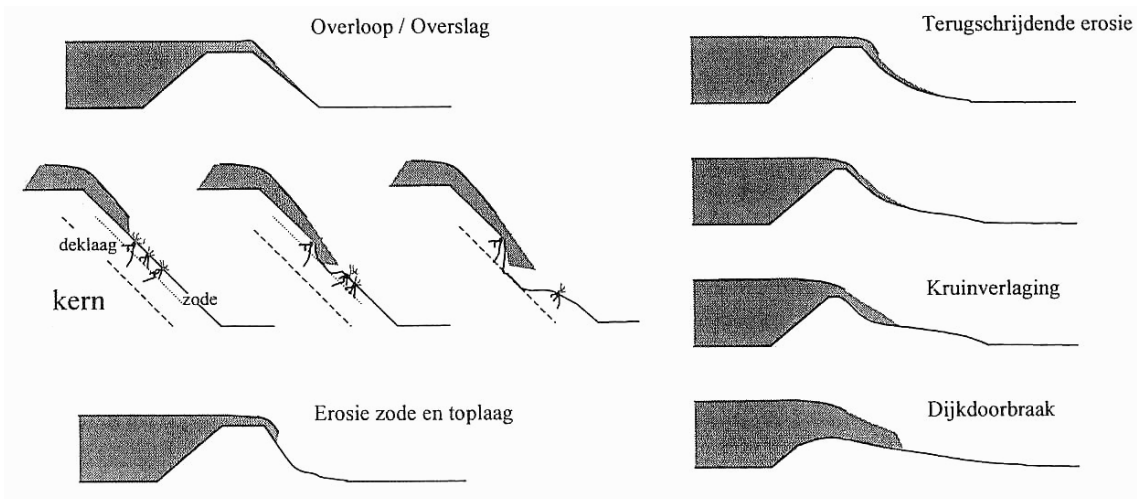
Bij overlopen of overslag kan het binnentalud eroderen. De belasting wordt veroorzaakt door de optredende stroomsnelheden op het binnentalud en de duur van de stroomsnelheden. De erosiesnelheid is vooral afhankelijk van de doorworteling en het lutumgehalte van de ondergrond. Bij oppervlakte erosie van een met gras bekleedt dijklichaam door overloop of overslag verwijderd het langsstromende water materiaal uit de zode en toplaag van de dijk. Oppervlakte erosie is sterk afhankelijk van de hydraulische belasting, het type grond, de kwaliteit van de grasmat en talud helling.

Waarschijnlijk vindt de erosie niet gelijkmatig over het binnentalud plaats maar ontstaat er na verloop van tijd een gat in de bekleding. Door het gat, dat door oppervlakte erosie is ontstaan, kan bij doorgaande overslag water in de dijk dringen. Daarnaast zal het gat verder eroderen, door turbulentie rond het gat in de bekleding zal erosie makkelijker optreden.

Als de zodelaag is verdwenen zal de mate en snelheid van ontgronding afhangen van de samenstelling van de grond en dichtheid van het netwerk van dikkere wortels onder de zode. Dit netwerk bepaalt de mate van aggregaatvorming dat de erosiegevoeligheid bepaalt.

Na verloop van tijd is de bekleding van de dijk verdwenen en zal terugschrijdende erosie van de kern tot de buitenkruinlijn optreden. Door het over de dijk slaande water wordt de grond verder naar het achterland getransporteerd. Ook nadat de buitenkruinlijn is verdwenen zal het erosie proces doorzetten totdat het profiel geheel is verdwenen. De duur van het erosieproces hangt sterk af van het overslaand debiet.

Verwijderd: terugschrijdend
e



Figuur 5-1 Faalmechanisme golfoploop/golfoverslag

5.2. Afschuiving van het binnentalud

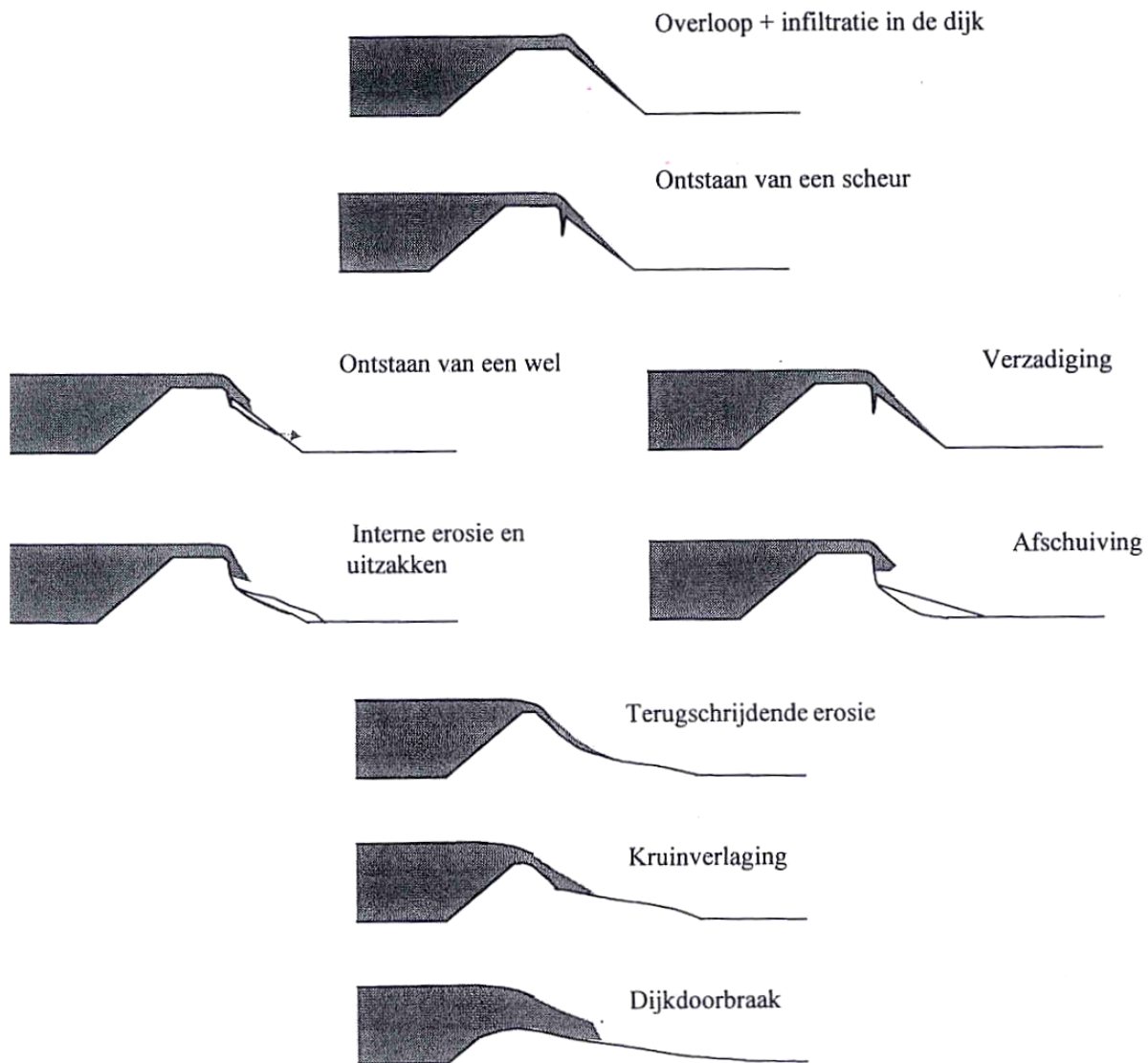
Bij overloop of overslag kan het water in de dijk infiltreren waardoor de korrelspanningen in de (kruin en onder het binnentalud van de) dijk afnemen.

De stabiliteit van het binnentalud is afhankelijk van de korrelspanning. Door stijgende waterspanningen nemen de korrelspanningen af. Hierdoor neemt ook de stabiliteit af. Door infiltratie neemt de waterspanning in het binnentalud toe. De hoeveelheid infiltratie is afhankelijk van de grondsoort (doorlatendheid) en de overslagduur. De infiltratie kan versneld plaatsvinden door scheuren en barsten. Deze kunnen zijn ontstaan door krimp van de grond, wortelgaten en dierenholen. Ook bij langdurig hoogwater kan de waterspanning bij het binnentalud toenemen.

Andere krachten leveren ook een bijdrage aan het afschuiven. Zo worden door de stroming over het binnentalud schuifspanningen gegenereerd. Daarnaast neemt het gewicht van de grond in het binnentalud toe door infiltratie van water.

Bij een klei dijk heeft de bekleding vaak een grotere doorlatendheid dan de kleikern. Het water infiltreert vaak niet verder dan de onderlaag. Alleen de bovenste circa 1 meter van de dijk raakt dan verzadigd. Na verloop van tijd ontstaat evenwijdig aan de kruin van de dijk een scheur. Deze scheur bevindt zich in de kruin of heel hoog in het talud, vlakbij de kruin. Dit duidt erop dat nabij de kruin de grond op trek wordt belast en de neiging vertoont om naar de teen te schuiven. Aan de binnenzijde van de scheur treedt verzakking van het maaiveld op. Aan de onderzijde van het talud bolt deze vaak tegelijkertijd licht op. Er kunnen nu, bij voortdurend hoogwater twee scenario's optreden.

- Afschuiving van de toplaag door interne erosie (oppervlakkige afschuiving)
- Afschuiving van de toplaag (oppervlakkige afschuiving)



Figuur 5-2 Mechanisme beschrijving interne erosie en afschuiving toplaag

5.2.1. Afschuiving van de toplaag door interne erosie

In het eerste scenario is de toplaag van de bekleding onvoldoende sterk of bevat gaten die door dieren zijn veroorzaakt. Doordat het water gemakkelijk de dijk instroomt, stijgt de waterdruk en scheurt de toplaag open waarna water uit deze laag stroomt. Er ontstaat een wel. Aanvankelijk is de wel nog vrij klein met als gevolg dat er nog maar weinig water de grond uitstroomt. Naarmate de wel door erosie groter wordt, komt er relatief meer grond mee. Door voortschrijdende erosie wordt de wel steeds groter, er ontstaan stroomkanaaltjes in de dijk en de toplaag verzakt iets. Na verloop van tijd storten de kanaaltjes in. Er ontstaan geulen in de bekleding. Het water dat de dijk instroomt, kan er niet meer uit. Zodra de waterspanningen opbouwen barst de toplaag op en schuift af.

5.2.2. Afschuiving van de toplaag

In het tweede scenario is de toplaag voldoende sterk om de waterdruk te kunnen weerstaan. Doordat er geen geulen of wellen in de ondergrond aanwezig zijn bouwt de waterspanning zich gelijkmatig op. Na verloop van tijd wordt de bekleding over een bepaalde lengte opgelicht en schuift af. Deze afschuiving is meestal schelpvormig geheel in het binnentalud van de dijk. De laag is vaak enkele meters breed en ongeveer 1,0 meter dik.

Wanneer de toplaag sterker is dan genoemd bij scenario 2 kan de waterspanning zich nog verder opbouwen. Het binnentalud raakt dan geheel verzadigt en zal afschuiven volgens een dieper gelegen glijvlak. Dit is alleen mogelijk wanneer het talud van de dijk een steilere helling heeft dan 1:3 en is dus meestal niet van toepassing, omdat vrijwel alle binnentaluds van dijken in Nederland een helling hebben van 1:3 of groter.

Van bovengenoemde vormen van afschuiving en erosie van het binnentalud is bekend dat deze optreden. Zo zijn er onder andere getuigenverklaringen over de dijkdoorbraken in 1953 te Zeeland en ook kwamen bovengenoemde faalmechanismen aan de orde bij een overslag proef te Wissekerke.

6. Geokunststof

6.1. Inleiding

Veel binnentaluds zijn van gras. Gras speelt een rol bij de veiligheid tegen overstromen. Voor de veiligheid is de erosiebestendigheid van de zode van belang. De graszode dient te voorkomen dat het binnentalud erodeert en afschuift. Door geokunststoffen in de kruin en het binnentalud te verwerken kan de erosiebestendigheid verbeterd worden.

6.2. Algemeen

Geokunststoffen is een verzamelnaam voor kunststofproducten die al vele jaren in de civiele- en milieutechniek worden toegepast. De vele soorten geokunststoffen hebben in de loop van de tijd een breed scala aan toepassingen gevonden.

Voor geokunststoffen in de civiele techniek worden vooral polyester, polypropreen, polyetheen en polyamide toegepast. In de milieutechniek wordt voornamelijk polyetheen toegepast vanwege de bestendigheid tegen de vaak voorkomende chemische belasting. Polyvinylchloride wordt gebruikt voor folies en drainage- of afvoerbuizen.

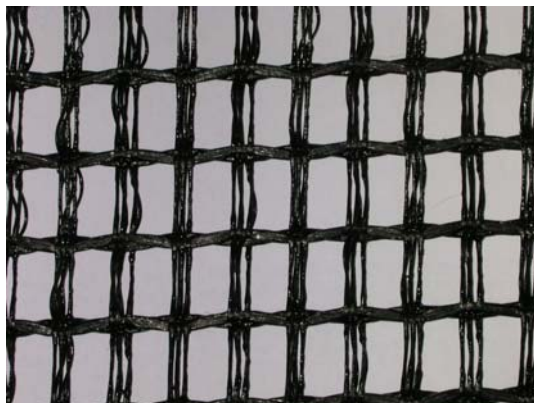
In hoofdlijnen zijn er vijf functies te onderscheiden voor geokunststof, namelijk:

- Scheiden;
- Versterken;
- Filteren;
- Draineren;
- Tegenhouden.

6.3. Marktonderzoek

We kennen negen soorten geokunststofproducten. Deze verschillende verschijningsvormen zijn:

- Geotextielen
 - Vliezen (non wovens)
 - Weefsels (wovens)
- Geogrids (roosters)
- Structuurmatten
- Drainagematten/-strips
- Geocomposieten
- Geocellen
- Geonetten
- Geomembranen



6.4. Specificaties

Afhankelijk van de toepassing worden verschillende eisen gesteld aan de eigenschappen van de geokunststoffen. Het geokunststof wat als doel heeft een dijk overslagbestendiger te maken moet aan de volgende eisen voldoen:

- Het geokunststof moet een treksterkte van minimaal 90 kN hebben
- Het geokunststof mag geen/nauwelijks rek eigenschappen vertonen
- Het geokunststof moet doorgroeibaar zijn
- Het geokunststof moet doorlatend zijn
- Het geokunststof moet aan de LNC-aspecten voldoen

6.5. Verwerking

De bekleding op een dijk heeft een functie. Als er een geokunststof wordt aangebracht moet deze bekleding zijn functie gelijk weer kunnen uitvoeren. Het is geen oplossing om het gras van het binnentalud af te halen en vervolgens het geokunststof aan te brengen en tenslotte het binnentalud in te zaaien. Hierdoor zou namelijk de functie van de bekleding tijdelijk niet kunnen worden uitgevoerd omdat de bekleding nog niet in staat is om de belastingen te verdragen. Er moet daarom een methode toegepast worden zodat de grasbekleding na aanbrengen van het geokunststof het eerst volgende stormseizoen zijn functie weer kan vervullen. Het toe te passen geokunststof moet verwerkbaar zijn volgens deze methode.

6.6. Conclusie

De voorgaande punten in beschouwing genomen wijzen uit dat de verschijningsvorm 'Structuurmat' de best toepasbare verschijningsvorm van geokunststoffen is. De structuurmat voldoet aan alle specificaties. Door zijn 3-D structuur kunnen de graswortels zich makkelijk aan de structuurmat hechten, waardoor de graszode een sterk geheel vormt. Ook is de structuurmat te verwerken zodat de bekleding tijdens het eerst volgende stormseizoen zijn functie weer kan uitoefenen.

De volledige tekst over eigenschappen, toepassingen en eisen van het geotextiel is vermeld in bijlage 1.

6.7. Aanleg Smart Grass Reinforcement

Nadat in de deelopdracht van K.W. Pruis is beschreven welk geokunststof toegepast zal worden voor de versterkte graszode kan deze versterking toegepast worden op de proeflocatie in Delfzijl. Het aanleggen van dit geokunststof valt buiten onze afstudeeropdracht maar is wel een belangrijke stap in het ComCoast project en ook voor de beproeving met de golfoverslagsimulator onmisbaar. Daarom wordt toch in het kort de aanleg van het geokunststof behandeld.

Voor het aanleggen van de versterkte graszode is door het consortium van Royal Haskoning en INFRAM een tweetal bedrijven ingeschakeld. Deze bedrijven zijn Flevo Greensupport en Queens grass. Flevo Greensupport is gespecialiseerd in het aanleggen van gras op golfbanen en voetbalvelden. Queens Grass is gespecialiseerd in het kweken van gras voor graszoden. Samen vormen zij dus de perfecte combinatie.

Op de proeflocatie in Delfzijl zijn 2 proefvakken aangelegd voor toepassing van het geokunststof. Deze proefvakken zijn voor aanleg van het geokunststof zorgvuldig behandeld zodat het gras en de bodem in optimale kwaliteit zijn voordat het geokunststof aangelegd wordt.

Een trekker met een speciale snijmachine snijdt een ongeveer vijf centimeter dikke zode los van de ondergrond van de dijk. Achter deze machine wordt de zode opgerold en ontstaat er een grasrol.



Figuur 6-1 Het oprollen van de graszode

Na het snijden van enkele teststroken is gebleken dat het oprollen van het gras het beste gaat wanneer dit in 2 fasen gebeurt. In de eerste fase rijdt de trekker met snijmachine vanaf de kruin over het binnentalud naar beneden. Wanneer de trekker met zijn voorwielen bij de teen van het binnentalud is aangekomen wordt de grasrol beëindigd. Bij de tweede fase rijdt de trekker met snijmachine vanaf de kruin ongeveer 5 meter over het buitentalud naar beneden. Op deze manier kan het geokunststof in het buitentalud verankerd worden zodat het geokunststof de maximale trek op kan nemen. Op deze manier worden twee vakken van 4 meter breed kaal gemaakt. Wanneer het gras opgerold is wordt de ondergrond vlak gemaakt en wordt het geokunststof uitgerold. Een ander is te zien op onderstaande foto's

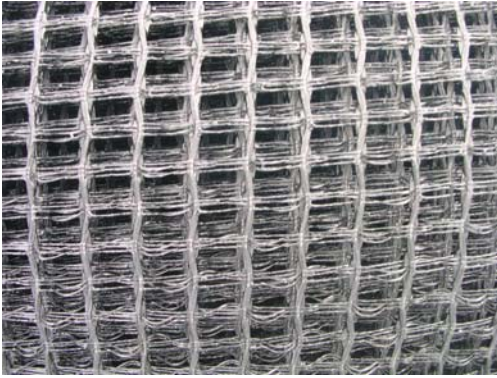


Figuur 6-2: Dijk na het oprollen van de graszode



Figuur 6-3: Plaatsen van het geokunststof

Het geokunststof dat uiteindelijk toegepast is, is afkomstig van de firma Huesker uit Duitsland. Het toegepaste geokunststof is een zogenaamd 3d systeem en bestaat in 1 richting uit verschillende draden zodat de wortels optimaal door het geokunststof heen kunnen groeien.



Figuur 6-4: Geokunststof

Nadat het geokunststof is aangebracht kan de graszode weer teruggelegd worden. Dit gebeurt met hulp van een telekraan. De grasrollen worden vanaf de kruin naar beneden gerold, tijdens het rollen worden de rollen ondersteund door de kraan zodat de rollen nog naar links en rechts gestuurd kunnen worden. Bij het terugplaatsen van het gras moet er wel opgelet worden dat er geen sleuven ontstaat tussen de verschillende stroken gras, wanneer er tussen ruimtes ontstaan herstelt de grasmat niet egaal.



Figuur 6-5: Terugplaatsen van het gras

Het terugplaatsen van het gras met de telekraan verliep niet helemaal vlekkeloos. Het gras scheurde op nog meer plaatsen dan dat het al gescheurd was bij het snijden. Daarom is er besloten om de volgende dag verder te gaan met een grasafrolmachine die normaal ook bij het aanleggen van voetbalvelden gebruikt wordt. Het werken met deze grasafrolmachine op het dijktafblad bleek echter zo gevaarlijk te zijn dat men deze machine slechts een aantal meters heeft gebruikt. Het geokunststof was zo glad dat de afrolmachine te weinig contact had met de bodem en zo uit zichzelf naar beneden gleed. Vervolgens is het karwei afgemaakt met behulp van de telekraan.

Nu al het gras weer op zijn plaats was gelegd moest er nog nazorg gepleegd worden. Het gras is goed aangerold voor een zo goed mogelijk contact met de ondergrond. Vervolgens is het gras goed nat gehouden.

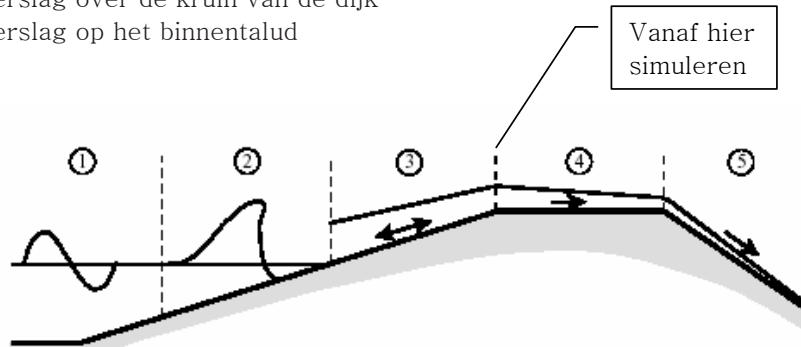
7. Simulatie

7.1. Berekening

Voordat het ontwerp van de golfoverslagsimulator kan worden gemaakt, zullen er eerst een aantal zaken bekend moeten zijn, namelijk; de manier van berekenen van golfoverslag en het gedrag van een golf bij het naderen van een dijk.

Golfoverslag komt in het kort op het volgende neer:

1. golfslag aan de teen van de dijk
2. verplaatsing van de golf naar het buitentalud tot het punt van breken
3. golf oploop (en golf neerloop)
4. golfoverslag over de kruin van de dijk
5. golfoverslag op het binnentalud



Figuur 7-1: De vijf verschillende stadia van een golf

Om golfoverslag te bepalen zijn per stap onderstaande gegevens van belang:

1. Ontwerp parameters van de teen van de dijk
 - Golf parameters
 - Waterdiepte
2. Golfaanval
 - Hoek van golfaanval
 - Brekerparameter
3. Gebiedsparameters van de stroom op het buitentalud
 - Hoogte golfoploop
 - Invloedsfactoren voor hoek van golfaanval, ruwheid en berm
 - Laagdikte
 - Snelheid van de golfoploop
4. Gebiedsparameters op de kruin van de dijk
 - Laagdikte
 - Snelheid van de golfoverslag
 - Debiet
5. Gebiedsparameters op het binnentalud
 - Laagdikte
 - Snelheid van de golfoverslag

7.1.1. Ontwerp parameters

De golfhoogten zijn bepaald uit (HR; 2001) de bijhorende golfperiode kan worden berekend door een golfsteilheid aan te nemen. Voor de piek golfsteilheid (s_{op}) wordt een waarde van $s_{op} = 0,04$ aangehouden. Globaal kan voor de gehele waddenzeekust worden gesteld dat een golfhoogte H_s (significante golfhoogte) in de buurt van 2,0 m vaak als toetsrandvoorwaarde wordt afgegeven. De significante golfhoogte is de dominerende golf waaronder de gemiddelde hoogte van de hoogste 33% van het gemeten golfbeeld wordt verstaan. Dit begrip is ingevoerd doordat in de praktijk het golfbeeld uit verschillende golven bestaat. Hoge golven worden afgewisseld door lagere, golven met lange perioden door golven met kortere, enz. Men wil volstaan met een geschematiseerd golfbeeld met één golfhoogte, één golfperiode en één golflengte enz. dus moeten deze waarden zodanig gekozen worden dat ze karakteristiek zijn voor de invloed van het werkelijke golfbeeld op de kust en op de overige constructie die aan dit golfbeeld onderhevig zijn.

Formule 1

$$s_{op} = \frac{H_s}{L} = 0,04$$

hierin is:

s_{op} = golfsteilheid

H_s = Significante golfhoogte = 2,00 m.

L = Golflengte

De golflengte kan berekend worden m.b.v. formule 2

Formule 2

$$L = \frac{gT_p^2}{2\pi} = \frac{9,81 \cdot T_p^2}{2\pi}$$

hierin is:

T_p = piekperiode

Door de formules 1 & 2 te combineren ontstaat formule 3 waaruit vervolgens formule 4 kan worden gevormd. Met formule 4 kan de piekperiode (T_p) worden berekend.

Formule 3

$$s_{op} = \frac{H_s}{\frac{9,81 \cdot T_p^2}{2\pi}}$$

Formule 4

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi \cdot H_s}{s_{op} \cdot 9,81}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 2,00}{0,04 \cdot 9,81}} = 5,66 \approx 5,7$$

Als wordt gesteld dat $T_p = 1,2 T_m$, waarbij T_m de gemiddelde periode is, dan geldt voor een golfhoogte van $H_s = 2$ m met een piekperiode van 5,7 s, een gemiddelde periode T_m van 4,7 s. Op dezelfde wijze kan de spectrale golfperiode berekend worden, $T_p = 1,1 T_{m-1,0}$ wat een spectrale golfperiode van 5,1 m oplevert.

Nu de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$) bekend is kan de bijbehorende golfsteilheid berekend worden.

Formule 5

$$s_o = \frac{H_s}{L} = \frac{H_s}{\frac{9,81 \cdot T_{m-1,0}^2}{2\pi}} = \frac{2\pi \cdot H_s}{9,81 \cdot T_{m-1,0}^2} = \frac{2\pi \cdot 2,00}{9,81 \cdot 5,1^2} = 0,048$$

Hierin is:

H_s = Significante golfhoogte = 2,00 m

L = golflengte

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode

S_0 = spectrale golfsteilheid

Nu is het van belang om in te schatten hoe lang de periode waarbij de golfoverslag plaats vindt is. Er kan gesteld worden dat een stormpiek ruwweg op 6 uur kan worden aangehouden (vaak korter).

Een ander gegeven wat invloed heeft op de berekening is het talud. In het vervolg van dit verslag wordt uitgegaan van een buitentalud van 1:4.

Doordat er aangenomen is dat een storm 6 uur duurt kan het aantal golfaanvallen tijdens deze storm uitgerekend worden. Dit wordt gedaan in formule 6.

Formule 6

$$\text{aantal golfaanvallen} = \frac{\text{stormduur}}{T_m} = \frac{60 \cdot 60 \cdot 6}{4,7} \approx 4600 \text{ golfaanvallen}$$

Hierin is:

T_m = gemiddelde golfperiode = 4,7 s.

7.1.2. 2%-Golfoploop, overslagdebiet en kans op overslag

Met de gegevens die nu berekend zijn kan het 2%-golfoplooppniveau worden berekend. Dit kan door formule 7 toe te passen.

Formule 7

$$z_{2\%} / H_{m0} = 1,75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0$$

$$z_{2\%} = 1,75 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,14 \cdot 2,0 = 3,98 \text{ m boven de stilwaterlijn.}$$

Hierin is:

$Z_{2\%}$ = 2%-golfoplooppniveau

H_{m0} = significante golfhoogte

γ_b = invloedsfactor voor een berm = 1,0

γ_f = invloedsfactor voor de ruwheid = 1,0

γ_β = invloedsfactor voor de hoek van golfaanval = 1,0

$$\xi_0 = \text{brekerparameter} = \xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} = \frac{0,25}{\sqrt{0,048}} = 1,14$$

α = hoek van het talud

Hetgeen berekend met behulp van formule 7 houdt in dat er tijdens een storm 2% van de golven een golfoplooppniveau haalt van 3,98 m. boven de stilwaterlijn (SWL). Nu kunnen we stellen dat de vrije kruinhoogte h_k (hoogte van de kruin ten opzichte van de SWL) gelijk is aan het 2%-golfoplooppniveau = 3,98 m.

Bij deze aanname kan een gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin (q) worden berekend. Hiervoor kunnen de formules 8 & 9 gebruikt worden.

Formule 8

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left(-4,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)$$

Hierin is:

q = gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin

g = zwaartekrachtversnelling = 9,81 m/s²

H_{m0} = significante golfhoogte = 2,00 m

γ_b = invloedsfactor voor een berm = 1,0

γ_f = invloedsfactor voor de ruwheid = 1,0

γ_β = invloedsfactor voor de hoek van golfaanval = 1,0

γ_v = invloedsfactor voor een (verticale) wand op de dijk = 1,0

ξ_0 = brekerparameter = 1,14

Uit formule 8 kan een formule voor het gemiddelde golfoverslag debiet per strekkende meter kruin worden herleidt. Deze formule is weergegeven als formule 9.

Formule 9

$$q = \sqrt{g \cdot H_{m0}^3} \cdot \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left(-4,3 \frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)$$

$$q = \sqrt{9,81 \cdot 2,00^3} \cdot \frac{0,067}{\sqrt{0,25}} \cdot 1 \cdot 1,14 \cdot \exp \left(-4,3 \frac{3,98}{2,00} \cdot \frac{1}{1,14 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0} \right)$$

Hieruit volgt dat:

$$q = 0,00073 \text{ m}^3/\text{s per m} = 0,73 \text{ l/s per m}$$

Deze waarde ligt tussen de ondergrens van 0,1 l/s per m en de grens van 1,0 l/s per m.

Bij een gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin van 0,73 l/s per meter bereikt dus 2% van de golven een hoogte van 3,98 m. boven de stilwaterlijn. Met gegeven stormduur van 6 uur betekend het dat er in die tijd 93 golven over de kruin slaan, wat gemiddeld neerkomt op 15 golven per uur (gemiddeld elke 4 minuten een overslaande golf).

Aan de hand van het 2%-golfoplooppniveau is het gemiddelde golfoverslag debiet per strekkende meter kruin berekend. Het geval wil nu dat wij bij golfoverslag debieten van 0,1; 1,0; 10,0 en evt. 25 en 50 l/s per strekkende meter kruin de kans van overslag willen berekenen. Hiervoor kan formule 10 worden gebruikt.

Formule 10

$$P_{ov} = \exp \left(- \left[\sqrt{-\ln 0,02} \frac{h_k}{z_{2\%}} \right]^2 \right)$$

Hierin is:

P_{ov} = Kans op overslag per golf

h_k = Vrije kruinhoogte, afhankelijk van het overslaand debiet

$z_{2\%}$ = 2% Golfoplooppniveau = 3,98 m

7.1.3. Bepalen kruinhoogte en percentage overslag bij te simuleren debiet

Aan de hand van een rekenvoorbeeld met een gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin van 0,1 l/s per m wordt de berekening getoond.

Eerst moet de vrije kruinhoogte bij $q = 0,1$ l/s per m worden uitgerekend dit kan gedaan worden m.b.v. formule 11. Deze formule is herleid uit formule 8.

Formule 11

$$h_k = \frac{\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} \cdot \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{0,067 \cdot \gamma_b \cdot \xi_0} \right) \cdot \xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v \cdot H_{m0}}{-4,3 \cdot 1}$$

$$h_k = \frac{\ln \left(\frac{1,0 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{9,81 \cdot 2^3}} \cdot \frac{\sqrt{0,25}}{0,067 \cdot 1 \cdot 1,14} \right) \cdot 1,14 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,00}{-4,3 \cdot 1} = 5,03 \text{ m}$$

De vrije kruinhoogte bij een gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin van 0,1 l/s per m. is dus 5,03 m.

Deze vrijekruinhoogte kan in formule 10 worden ingevuld

$$P_{ov} = \exp \left(- \left[\sqrt{-\ln 0,02} \frac{h_k}{z_{2\%}} \right]^2 \right)$$

$$P_{ov} = \exp \left(- \left[\sqrt{-\ln 0,02} \frac{5,03}{3,98} \right]^2 \right) = 0,00193$$

De kans op overslag per golf is dus 0,193%

Als de percentages en het totaal aantal golfaanvallen eenmaal bekend zijn, kan heel eenvoudig de hoeveelheid overslaande golven bepaald worden. Dit kan gedaan worden door het aantal golfaanvallen te vermenigvuldigen met het bijbehorende percentage.

7.1.4. Overslagvolumes per golf

Het gemiddelde golfoverslagdebiet zegt nog niet zoveel over de hoeveelheid water die momentaan over de kruin gaat bij een bepaalde overslaande golf. De momentane overslagvolumes tijdens een overslaande golf wijken aanzienlijk af van het gemiddelde golfoverslagdebiet. Met behulp van het gemiddelde golfoverslagdebiet kan de kansverdelingsfunctie van de overslagvolumes per golf worden berekend. Deze kansverdelingsfunctie is een Weibull-verdeling met als vormfactor 0,75 en als schaalfactor a , welke afhankelijk is van het gemiddelde golfoverslagdebiet per golf en de kans op overslag.

De kansverdelingsfunctie wordt gegeven als formule 12.

Formule 12

$$P_v = P(V \leq V) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{a}\right)^{0,75}\right)$$

Met $a = 0,84 \cdot T_m \cdot q / P_{ov}$

Hierin is:

- P_v = de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf $\underline{V}$ groter dan of gelijk aan V is
- V = overslagvolume per golf
- T_m = de gemiddelde golfperiode
- q = gemiddeld golfoverslagdebiet
- P_{ov} = N_{ov}/N = de kans op overslag per golf
- N_{ov} = het aantal overslaande golven
- N = het aantal inkomende golven tijdens de stormduur

Een eerste schatting van de verwachtingswaarde van het maximum volume van één golf dat in een bepaalde periode kan worden verwacht, kan worden verkregen door het aantal overslaande golven N_{ov} in te vullen in formule 13.

Formule 13

$$V_{\max} = a \cdot (\ln[N_{ov}])^{(4/3)}$$

Met $a = 0,84 \cdot T_m \cdot q / P_{ov} = 0,84 \cdot 4,7 \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} / 0,00193 = 0,205$

$N_{ov} = P_{ov} \cdot N = 0,00193 \cdot 4600 = 8,88$

Hieruit volgt een $V_{\max}$ van $0,585 \text{ m}^3$ per m.

Hieruit blijkt dat het grootste overslagvolume 585 liter water is bij een gemiddeld overslagdebiet van $0,1 \text{ l/s}$ per m.

7.1.5. Resultaten per te simuleren debiet

De berekende gegevens kunnen nu in een tabel gezet worden. Op éénzelfde wijze kunnen de gegevens voor andere golfoverslag debieten worden berekend.

Berekende gegevens					
Overslagdebiet (l/s per m)	Percentag e overslag	aantal golven in 6 uur	aantal overslaande golven	grootste overslagvolume	Vrije kruin hoogte h_k
0,1	0,193	4600	9	585	3,98
1,0	2,764	4600	128	1177	3,81
10,0	18,980	4600	874	2675	2,59
25,0	33,325	4600	1533	4235	2,11
50,0	47,232	4600	2173	6358	1,74

Tabel 7-1-1: Totaal overzicht gegevens per debiet

Wat hierbij vooral opvalt is het grote verschil in aantal overslaande golven. Bij kleine overslagdebieten zal het aantal overslaande golven vele malen lager liggen dan het aantal overslaande golven bij een groot overslagdebiet. Vaak zijn er redelijk veel golven die maar net de kruin bereiken en nauwelijks overslag geven. Een klein deel, veroorzaakt door de grootste golven, geeft echter hele grote overslagvolumes.

Nu duidelijk is op welke wijze het volume van de grootste golf berekend kan worden is de volgende stap om voor iedere overslaande golf te berekenen welk volume daarbij hoort.

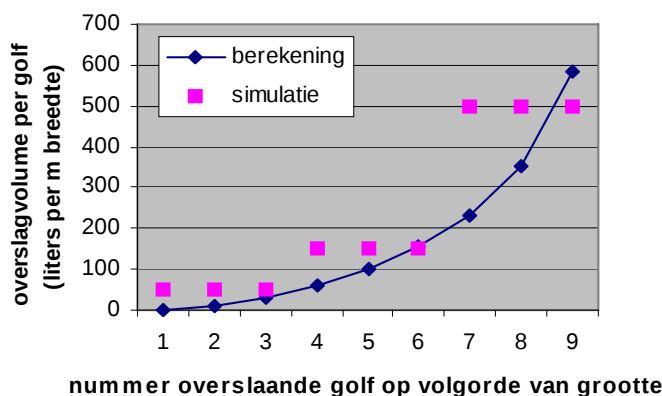
Het volume voor een bepaalde overschrijdingskans P_v volgt uit:

$$V = a \cdot (\ln(1 - P_v))^{0,75}$$

In het geval voor het overslagdebiet van 0,1 l/s per meter geldt voor de schaalfactor $a = 0,205$ en kan voor iedere golf 1 t/m 9, door voor de overschrijdingskans per golf respectievelijk 1/9, 2/9, ..., 9/9 in te vullen, het volume bepaald worden.

Figuren 7-2 t/m 7-6 geven de golfoverslagverdelingen voor de vijf gekozen situaties.

Op de verticale as is het volume gegeven, per m breedte, dat door een individuele golf over de kruin wordt geslagen. Op de horizontale as is elke overslaande golf genummerd en op volgorde van grootte gezet. Nummer 9 is dus de golf die de grootste overslag geeft. In werkelijkheid is de volgorde van optreden vrij willekeurig, zowel grote als kleine overslagen zullen gedurende de hele piek van de storm voorkomen. In de figuur zijn ze wel op volgorde gezet om een volledige verdeling te geven.



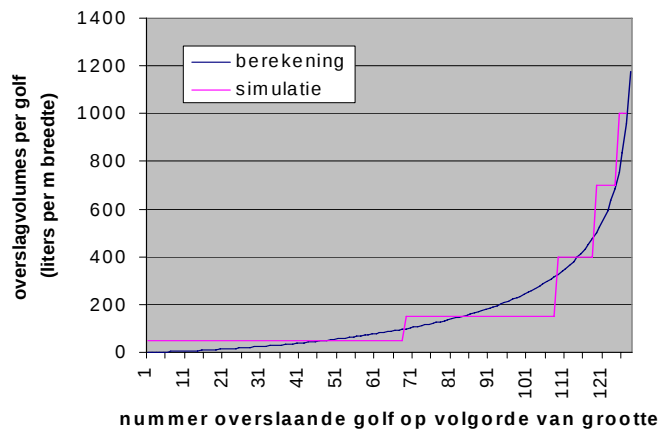
Figuur 7-1-7-2 Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q = 0,1$ l/s per m

Bij $0,1$ l/s per m zijn vooral de drie hoogste golven verantwoordelijk voor de totale hoeveelheid water die over de kruin gaat. Bij dit gemiddeld debiet gaat er maar $2,1$ m³ water per m breedte in 6 uur over het talud ($6 \text{ uur} \times 3600 \text{ s} \times 0,1 \text{ l/s per m}$). De drie hoogste golven geven al een overslag van orde $1,3$ m³

Deze situatie is vrij eenvoudig te simuleren door drie golfoverslagen te geven met 500 l per, drie met 150 l per m en drie met 50 l per m. De tijd tussen de overslagen moet voldoende groot zijn, zodanig dat de ene overslag geen invloed ondervindt van de vorige. In werkelijkheid is de gemiddelde tussenduur 40 minuten, maar bij de simulatie kan mogelijk worden uitgegaan van 5 minuten.

Mogelijke verdeling voor simulatie	
aantal golven	Volume per strekkende meter kruin (l)
3	50
3	150
3	500
totaal: 9	

Tabel 7-1-2: Mogelijke verdeling voor simulatie van $0,1$ l/s per m

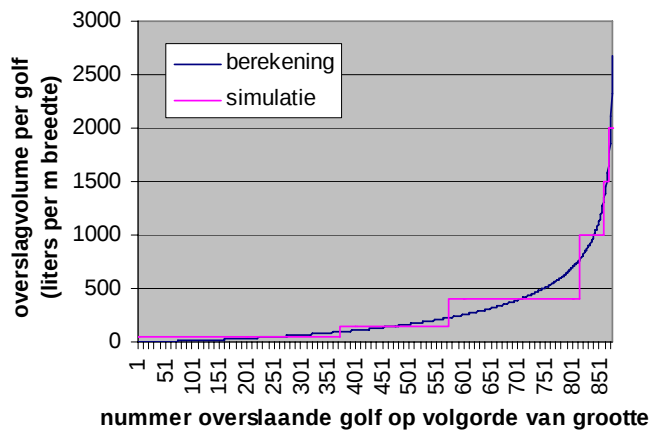


Figuur 7-3 Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q = 1,0$ l/s per m

Bij 1 l/s per m gaan er in 6 uur tijd al meer golven over de kruin, in totaal 126. De verdeling is in figuur 7-3 gegeven. Ongeveer de helft heeft een overslagvolume dat kleiner is dan 100 l per m. Een tiental golven heeft een overslagvolume dat groter is dan 500 l per m. Simulatie kan het eenvoudigst plaats vinden door een aantal golven met gelijk volume te simuleren. Als eerste voorstel kan de volgende verdeling worden aangehouden:

Mogelijke verdeling voor simulatie	
aantal golven	Volume per strekkende meter kruin (l)
56	50
40	150
10	400
6	700
3	10000
totaal: 115	

Tabel 7-1-3: Mogelijke verdeling voor simulatie van 1,0 l/s per m

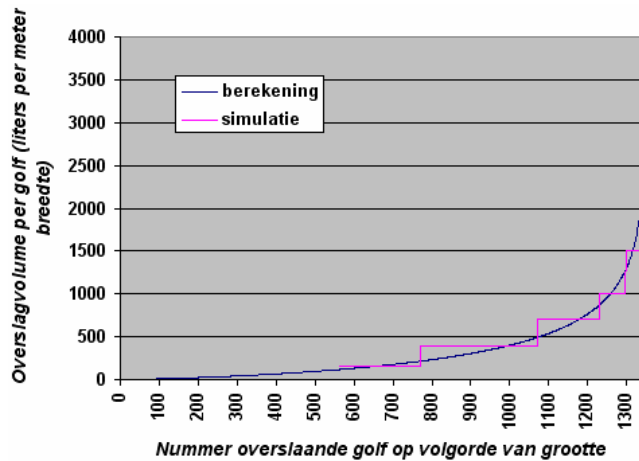


Figuur 7-1-7-4 Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q = 10,0$ l/s per m

Figuur 7-4 geeft de situatie voor 10 l/s per m. Vrijwel de helft van de overslaande golven geeft een volume dat kleiner is dan 100 l per m. Er zijn 32 golven die een overslaand volume geven dat groter is dan 1000 l per m, oftewel 1 m^3 per m breedte. In totaal zijn er maar 3 golven die een volume geven dat groter is dan 2 m^3 per m.

Mogelijke verdeling voor simulatie	
aantal golven	Volume per strekkende meter kruin (l)
369	50
200	150
240	400
44	1000
10	1500
6	2000
totaal: 869	

Tabel 7-1-4: Mogelijke verdeling voor simulatie van 10,0 l/s per m

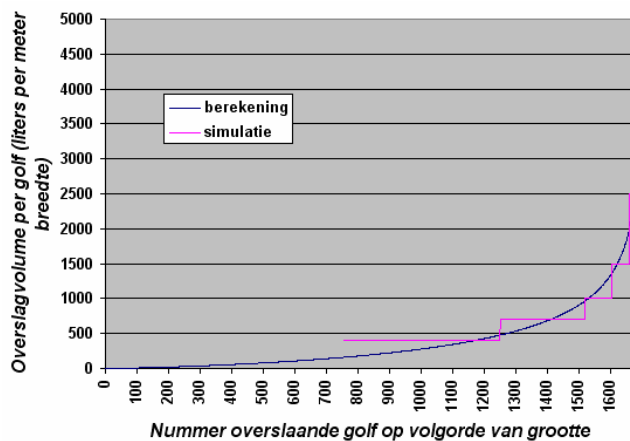


Figuur 7-1-7-5 Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q = 20,0$ l/s per m

Bij 20 l/s per m gaan er in 6 uur tijd al meer golven over de kruin, in totaal 790. De verdeling is in tabel 7-5 gegeven. Meer dan de helft heeft een overslagvolume dat kleiner is dan 400 l per m. Een tiental golven heeft een overslagvolume dat groter is dan 2000 l per m.

Mogelijke verdeling voor simulatie	
aantal golven	Volume per strekkende meter kruin (l)
209	150
300	400
161	700
66	1000
36	1500
15	2500
3	3500
totaal: 790	

Tabel 7-1-5: Mogelijke verdeling voor simulatie van 20,0 l/s per m



Figuur 7-1-7-6 Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q = 30,0$ l/s per m

Figuur 7-6 geeft het overslagdebiet van $30,0$ l/s per m aan. Hierbij slaan er bijna 1000 golven over de dijk. Het grootste overslagvolume bedraagt $6,4 \text{ m}^3$ per m breedte, wat vrij moeilijk te simuleren zal zijn. Met een constant debiet van 10 l/s per m moet de bak al na 5 s worden geleegd. Mogelijk is het beter voor de vele golven met kleine overslagvolumes een constant debiet gedurende een zekere tijd aan te houden en deze periodes te verdelen over de 6 uur.

Mogelijke verdeling voor simulatie	
aantal golven	Volume per strekkende meter kruin (l)
496	400
267	700
85	1000
57	1500
23	2500
10	3500
totaal: 938	

Tabel 7-1-6: Mogelijke verdeling voor simulatie van $30,0$ l/s per m

7.1.6. Laagdikte en snelheid van de overslaande golven

Nadat de (praktische) volumeverdeling van de overslaande golven bepaald is, is vervolgens gekeken naar de laagdiktes en snelheden van deze overslaande volumes water op de kruin van de dijk. Dit is verricht a.d.h.v. de berekeningsmethode van “Schüttrumpf & Van Gent”. Schüttrumpf heeft, in samenwerking met Van Gent, onderzoek verricht naar de snelheid en laagdiktes van golfoverslag op het dijklichaam. Vervolgens is er een publicatie verschenen waarin hij een theoretisch model heeft beschreven om het verloop van deze snelheden en laagdiktes voor ieder willekeurig overslaand volume te kunnen berekenen.

Hieronder zal een voorbeeld berekening volgen:

Het voorbeeld gaat uit van de berekening volgens Van Gent bij een debiet van 10 l/s/m.

$$P_{ov} = N_{ov} / N$$

hierin is:

P_{ov} = de kans op overslagper golf

N_{ov} = het aantal overslaande golven

N = het aantal inkomende golven tijdens de stormduur

$$P_{ov} = 867,997 / 4595,75 = 0,1887$$

$$a = 0,84 \cdot T_m \cdot q / P_{ov}$$

hierin is:

a = schaalfactor

T_m = de gemiddelde golfperiode

q = gemiddelde golfoverslagdebiet

P_{ov} = de kans op overslagper golf

$$a = 0,84 \cdot 4,72 \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 0,1887 = 0,2097$$

$$P_v = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{a}\right)^{0,75}\right)$$

hierin is:

P_v = de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf $\underline{V}$ groter dan of gelijks aan V is

V = overslagvolume per golf

a = schaalfactor

$$P_v = 1 - \exp\left(-\left(\frac{50}{0,2097}\right)^{0,75}\right) = 0,2891$$

$$P_{ov} = \frac{(1 - P_v) \cdot N_{ov}}{N}$$

hierin is:

P_{ov} = de kans op overslag van de golf met het betreffende volume

P_v = de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf $\underline{V}$ groter dan of
gelijks aan V is

N_{ov} = het aantal overslaande golven

N = het aantal inkomende golven tijdens de stormduur

$$P_{ov} = \frac{(1 - 0,2891) \cdot 867,997}{4595,7447} = 0,13427$$

$$R_C = R_{U,2\%} \cdot \frac{\sqrt{-\ln P_{ov}}}{\sqrt{-\ln 0,02}}$$

hierin is:

R_c = kruinhoogte

$R_{u,2\%}$ = golfoploophoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden

P_{ov} = de kans op overslag van de golf met het betreffende volume

$$R_C = 4,006 \cdot \frac{\sqrt{-\ln 0,13427}}{\sqrt{-\ln 0,02}} = 2,86997$$

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp \left(-4,3 \cdot \frac{h_k}{H_{m0}} \cdot \frac{1}{\xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)$$

hierin is:

- q = gemiddelde golfoverslagdebiet
- g = versnelling van de zwaartekracht
- H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk
- ξ₀ = brekerparameter
- s₀ = golfsteilheid
- T_{m-1,0} = spectrale golfperiode bij de teen van de dijk
- tan α = taludhelling
- h_k = vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn
- γ = invloedsfactoren voor invloed van een berm, ruwheid, hoek van golfaanval, en een verticale wand op het talud

Om h_k te berekenen is de voorgaande formule herleid tot onderstaande formule

$$h_k = \frac{\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s}} \cdot \frac{\sqrt{\tan \alpha}}{0,067 \cdot \gamma_b \cdot \xi_0} \right)}{-4,3} \cdot H_s = 2,615$$

$$u_{A,2\%} = \sqrt{g H_s} \cdot c_{A,u}^* \cdot \frac{R_{u,2\%} - Z_A}{H_s}$$

hierin is:

- u_{A,2%} = golfploop snelheid bereikt door 2% van de inkomende golven
- g = versnelling van de zwaartekracht
- H_s = significante golfhoogte
- c_{A,u}^{*} = empirische coëfficiënt
- R_{u,2%} = golfploop hoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden
- z_A = positie op het buitentalud

$$u_{A,2\%} = \sqrt{9,81 \cdot 2,00} \cdot 1,3 \cdot \frac{4,006 - 2,615}{2,00} = 0,7345$$

$$\frac{h_{A,2\%}}{H_s} = c_{A,h}^* \cdot \sqrt{\frac{R_{u,2\%} - z_A}{H_s}}$$

hierin is:

- h_{A,2%} = laagdikte op het buitentalud bereikt door 2% van de inkomende golven
- H_s = significante golfhoogte
- c_{A,h}^{*} = empirische coëfficiënt
- R_{u,2%} = golfploop hoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden
- z_A = positie op het buitentalud

$$\frac{h_{A,2\%}}{2,00} = 0,15 \cdot \sqrt{\frac{2,86997 - 2,64185}{2,00}} = 0,107$$

$$\frac{h_{c,2\%}}{h_{A,2\%(R_c)}} = \exp\left(-c_{c,h}^* \cdot \frac{x_c}{B}\right)$$

hierin is:

$h_{c,2\%}$ = laagdikte op de kruin bereikt door 2% van de inkomende golven

$h_{A,2\%}$ = laagdikte op het buitentalud bereikt door 2% van de inkomende golven

$c_{c,h}^*$ = empirische coëfficiënt

x_c = positie op de kruin

B = breedte van de kruin

$$\frac{h_{c,2\%}}{0,107} = \exp\left(-0,4 \cdot \frac{1}{2}\right) = 0,0877$$

$$\frac{u_{c,2\%}}{u_{A,2\%(R_c)}} = \exp\left(-c_{c,u}^* \cdot \frac{x_c \cdot f}{h_{c,2\%}}\right)$$

hierin is:

$u_{c,2\%}$ = golfloop snelheid op de kruin bereikt door 2% van de inkomende golven

$u_{A,2\%(R_c)}$ = golfloop snelheid op het buitentalud bereikt door 2% van de inkomende golven

$c_{c,u}^*$ = empirische coëfficiënt

x_c = positie op de kruin

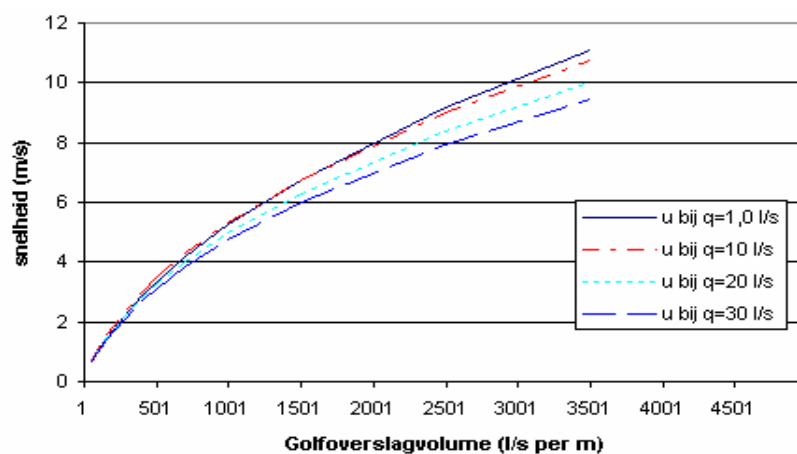
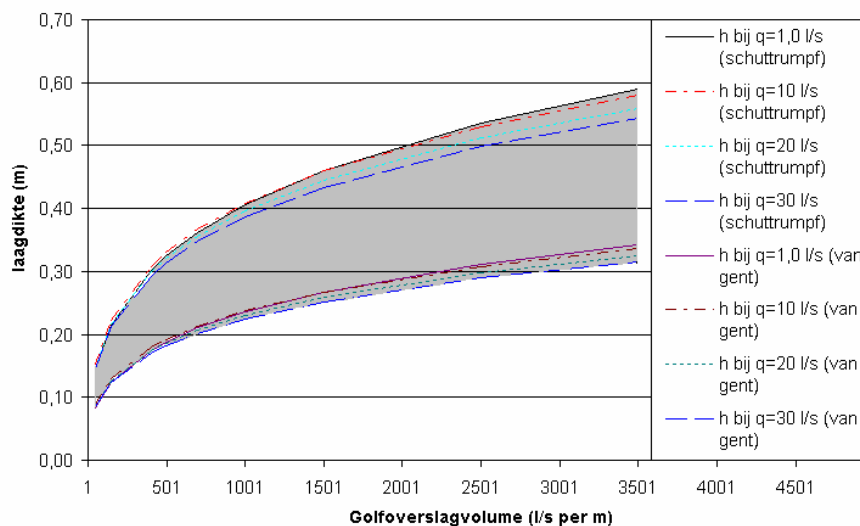
f = wrijvingscoëfficiënt

$h_{c,2\%}$ = laagdikte op de kruin bereikt door 2% van de inkomende golven

$$\frac{u_{c,2\%}}{0,7345} = \exp\left(-0,5 \cdot \frac{1 \cdot 0,01}{0,0877}\right) = 0,69383$$

Alle resultaten zijn in de onderstaande grafieken weergegeven.

De laagdiktes en snelheden van het overschietende water zijn vanaf een meter uit de buitenkruinlijn bepaald, omdat de overslaande golf t.p.v. de buitenkruinlijn nogal onregelmatigheden vertoont dat veroorzaakt wordt door overgang van golfloop naar golfoverslag.



Laagdikte (Schuttrumpf)					Laagdikte (van Gent)				
Volume (ltr)	1 l/s/m	10 l/s/m	20 l/s/m	30 l/s/m	Volume (ltr)	1 l/s/m	10 l/s/m	20 l/s/m	30 l/s/m
50	0,14	0,15	0,15	0,14	50	0,08	0,09	0,09	0,08
150	0,21	0,22	0,22	0,21	150	0,12	0,13	0,13	0,12
400	0,30	0,31	0,30	0,29	400	0,17	0,18	0,17	0,17
500	0,32	0,33	0,32	0,31	500	0,19	0,19	0,19	0,18
700	0,36	0,37	0,36	0,35	700	0,21	0,21	0,21	0,20
1000	0,41	0,41	0,40	0,39	1000	0,24	0,24	0,23	0,22
1500	0,46	0,46	0,44	0,43	1500	0,27	0,27	0,26	0,25
2500	0,54	0,53	0,51	0,50	2500	0,31	0,31	0,30	0,29
3500	0,59	0,58	0,56	0,54	3500	0,34	0,34	0,32	0,32

Snelheden (Schüttrumpf & van Gent)				
Volume (ltr)	1 l/s/m	10 l/s/m	20 l/s/m	30 l/s/m
50	0,66	0,73	0,68	0,66
150	1,46	1,57	1,48	1,42
400	2,88	3,02	2,84	2,72
500	3,34	3,48	3,27	3,13
700	4,17	4,29	4,03	3,84
1000	5,25	5,33	4,99	4,75
1500	6,75	6,76	6,31	5,99
2500	9,15	8,99	8,36	7,93
3500	11,09	10,78	10,00	9,47

Opmerkelijk is dat met name in de benadering van de laagdikten, tussen beide onderzoekers behoorlijk verschil zit, dit is aangegeven met het grijze vlak. De laagdiktes die in het grijze gebied worden gesimuleerd worden beschouwd als juiste metingen.

Op de tweede plaats mag gesteld worden dat de laagdikten en snelheden niet afhankelijk horen te zijn van het gemiddeld overslagdebiët maar enkel van de volumes overslag, theoretisch zou men dit ook moeten verwachten. De berekende waarden in de grafieken scheppen echter een ander beeld, dit wordt herkenbaar gemaakt a.d.h.v. de vier verschillend lopende lijnen voor de laagdikte en snelheid uitgezet tegen het volume van vier verschillende overslagdebieten.

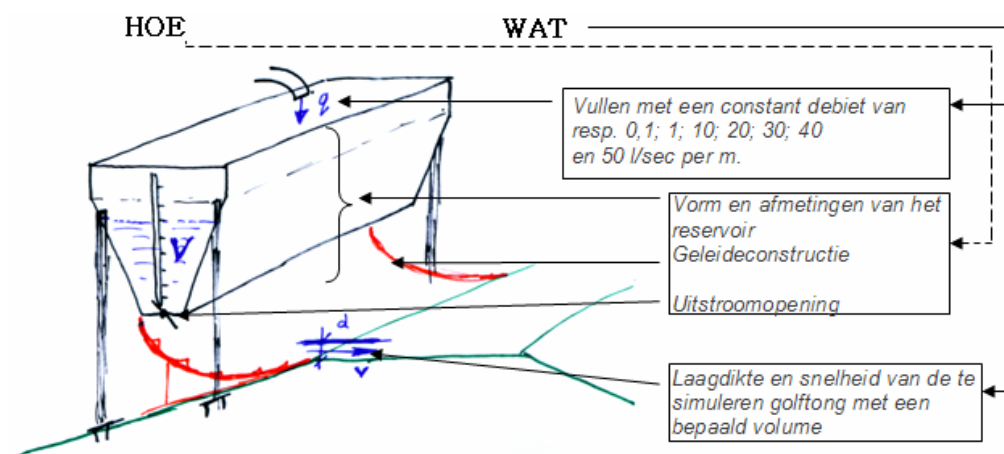
7.2. Prototype

7.2.1. Inleiding

Voor de uiteindelijke proef worden golftoppen van 4 meter breed gesimuleerd, maar omdat er een heel scala aan golftoppen moet worden gesimuleerd komt er nogal wat bij kijken. Het gaat immers niet alleen om volume en snelheid, maar ook om de manier waarop het water de kruin van een dijk treft. Daarom wordt eerst een klein model gebouwd dat golftoppen van één meter breedte kan simuleren. Met behulp van het prototype kan bestudeerd worden of de snelheid en laagdiktes van de verschillende overslagvolumes juist geproduceerd kunnen worden.

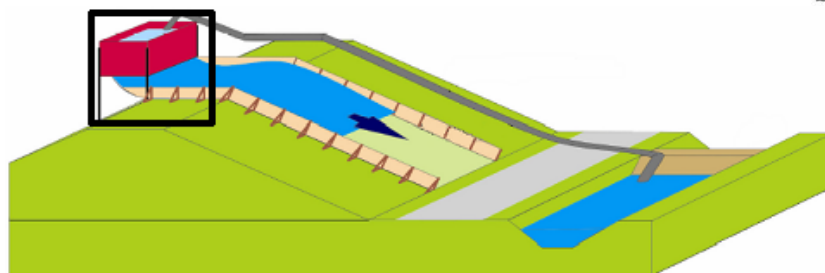
7.2.2. Uitgangspunten voor het “technisch” ontwerp

De golfoverslagsimulator wordt op het buitentalud van de te onderzoeken dijk gezet. Het principe zoals deze door *Infram* is aangedragen en waar ons projectgroep na goed overleg mee ingestemd heeft, is in figuur 2.3.1 gegeven. Er is tevens een korte toelichting bijgeschreven om een duidelijk beeld te geven **wat** deze golfoverslagsimulator moet kunnen produceren en **hoe** dit gerealiseerd kan worden.



Figuur 7-2-1: Principeschets waarin de uitgangspunten van het ontwerp zijn aangegeven

In de onderstaande afbeelding wordt een overzicht van de gehele proefopstelling t.p.v. de dijk gegeven. In het zwarte kader bevindt zich de daadwerkelijke overslagsimulator, wat daarbuiten valt, zoals de geleideschotten en de pomp(slang), wordt hier buitenbeschouwing gelaten. Het te ontwerpen prototype moet enkel overslaande golven kunnen produceren van verschillende volumes met de juiste snelheid en laagdikte t.p.v. de kruin, over een breedte van 1 meter. Het testen van dit prototype om te kijken of deze de juiste overslaande golven kan produceren hoeft dan ook niet op een zeedijk te gebeuren, maar kan bijvoorbeeld ook op een overdekte testlocatie plaatsvinden.



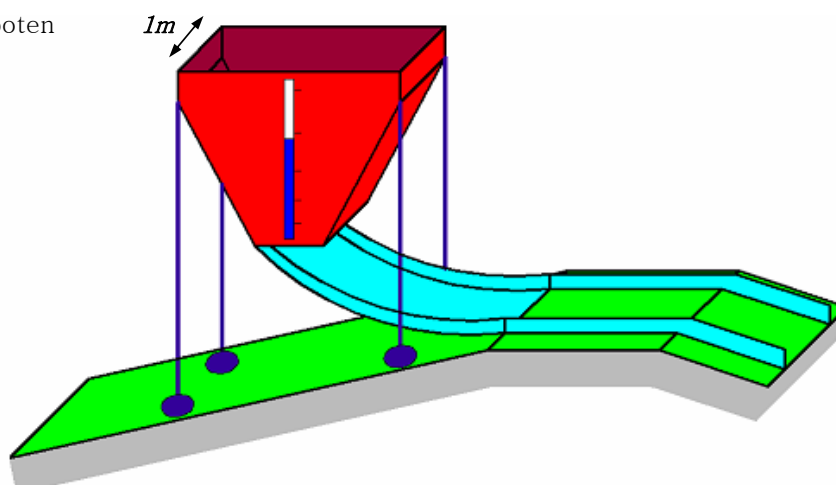
Figuur 7-2-2: Principeschets waarin een compleet overzicht van de proefopstelling t.p.v. de dijk wordt weergegeven

7.2.3. “Vloeistofmechanische” Eisen + Ontwerpvoorstel

7.2.3.1. Opbouw van de golfoverslagsimulator

De hele constructie van het te vervaardigen prototype bestaat grofweg uit de volgende onderdelen, dit zijn:

- Het reservoir met onderin de uitstroomklep;
- De geleideconstructie;
- De opstelpoten



Figuur 7-2-3: Schematische voorstelling (waarin alle vormen zijn aangenomen) van de golfoverslagsimulator op het buitentalud (zeezijde) van de dijk

De eisen m.b.t. tot de hierboven genoemde onderdelen van de golfoverslagsimulator zullen in dit hoofdstuk worden verwoord, waarbij tevens getracht wordt een voorstel aan te reiken voor de uitstroombak dat voldoet aan de gestelde eisen.

7.2.3.2. Het reservoir met onderin de uitstroomklep

Functieomschrijving van het reservoir en de uitstroomklep

De overslagsimulator bestaat hoofdzakelijk uit een bak die wordt gevuld met water en die nu en dan, overeenkomstig met het gedrag bij overslaande golven, op zo'n manier wordt geleegd dat een bepaalde hoeveelheid water met een bepaalde laagdikte en snelheid over de kruin en het binnentalud van de dijk schiet.

Vloeistofmechanische eisen voor de uitstroombak

Om de juiste snelheid en laagdikte te krijgen is het nodig om de volgende zaken nader uit te werken:

- De theoretische vorm van de uitstroombak, die bepalend is voor de beginsnelheid t.p.v. de uitstroomopening.
- Een praktische vorm en afmetingen van de uitstroombak.
- De “theoretische” grootte van de uitstroomopening onderaan de bak, die bepalend is voor de uitstroomtijd.

7.3. De theoretische vorm van de uitstroombak

De vorm van de uitstroombak zal bepalend zijn voor de beginsnelheid van het uitstromende water t.p.v. de uitstroomopening. Door de drukhoogte, in de met water gevulde bak, t.p.v. de uitstroomopening te variëren, kan de beginsnelheid van het water t.p.v. de uitstroomopening worden beïnvloed.



Figuur 7-3-1: Effect van het verloop van de wanden op de drukhoogte t.p.v. de uitstroomopening

In de bovenstaande figuurtjes wordt kort en duidelijk weergegeven wat de invloed is van de vorm van de bak op de drukhoogte bij gelijke volumes. Het verloop van de vorm van de uitstroombak bepaald dus de snelheid van een te simuleren golfvolume. Er kan nog een extra snelheid aan het water worden toegevoegd door de watermassa gedeeltelijk vrij te laten vallen, maar bij de bepaling van de theoretische vorm gaan we er eerst proberen om de bak op een dergelijke manier vorm te geven dat de snelheden die door de waterdruk voortgebracht worden onderaan de bak gelijk zijn aan de te simuleren snelheden op de kruin.

Voor de uitstroomsnelheid in de uitstroomopening, afgeleid uit de wet van Bernoullie, geldt:

$$v = \sqrt{2g \cdot x}$$

hierin is,

x = hoogte van de waterspiegel t.o.v. de uitstroomopening

g = versnelling van de zwaartekracht

Uit deze formule blijkt ook dat, naarmate de drukhoogte x toeneemt, dit ook voor de snelheid geldt. Het verband tussen de snelheid en drukhoogte is echte niet lineair, maar een wortelfunctie.

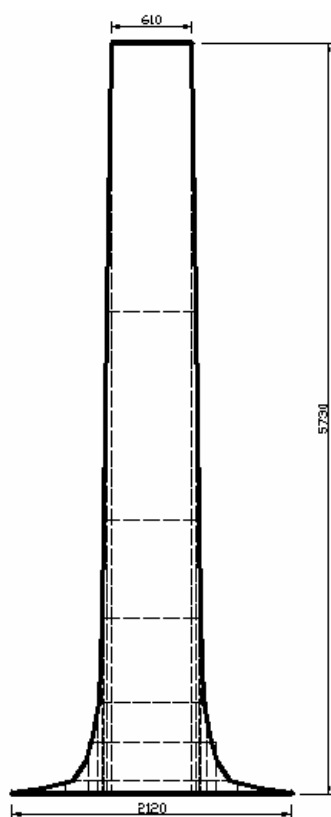
Te simuleren overslagvolumes V (m^3)	v_{max} (m/s), afgelezen uit grafiek	drukhoogte x (m), a.d.h.v. $x = v^2 / 2g$	Gemiddelde breedte = V/x
0,05	0,68	0,02	2,12
0,15	1,5	0,11	1,31
0,4	2,85	0,41	0,97
0,7	4,08	0,85	0,83
1	5,15	1,35	0,74
1,5	6,4	2,09	0,72
2,5	8,5	3,68	0,68
3,5	10,6	5,73	0,61

Tabel 7-3-1: Uitwerking van de theoretische afmetingen van de uitstroombak

Hiernaast is de vorm te zien, die m.b.v. de twee laatste kolommen in de bovenstaande tabel is getekend. Voor praktisch gebruik kleeft er aan deze vorm één groot nadeel; de ontzettend grote hoogte. Indien de bak volledig gevuld zou worden zou er een zeer onstabiele situatie ontstaan doordat het zwaartepunt erg hoog komt te liggen.

Bovendien bedraagt de maximale transporthoogte slechts drie meter. Het is dus noodzakelijk om de hoogte terug te brengen naar maximaal drie meter, de bak moet dus in hoogte verstelbaar zijn om toch de juiste snelheid te geven aan de grootste golfvolumes.

Het tweede aspect dat opvalt aan deze vorm is het verloop van de wanden onderin de bak. Deze lopen namelijk, naarmate het water de uitstroomopening nadert, met een toenemende afstand uit elkaar. Het zou bevorderlijk zijn voor de uitstroming om het water dat de uitstroomopening nadert, juist geleidelijk naar de opening toe te geleiden.

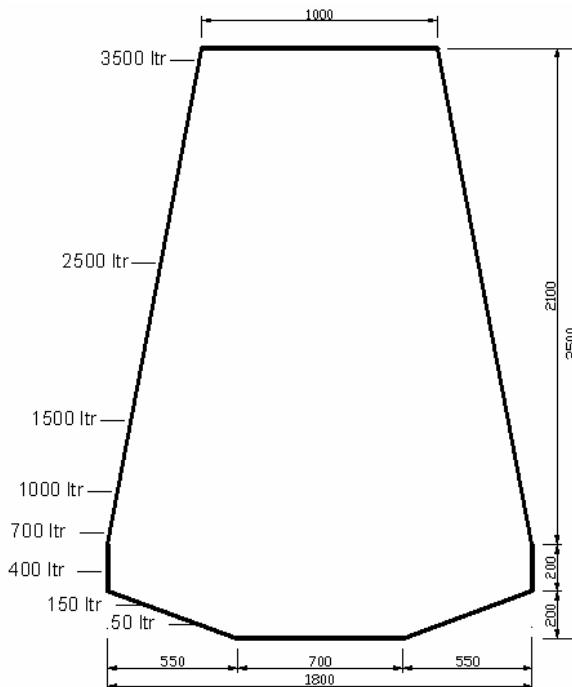


Figuur 7-3-2: Schets met theoretische vorm en afmetingen van de uitstroombak

7.4. Een praktische vorm en afmetingen van de uitstroompak

Uit het theoretisch concept is na overleg tussen de opdrachtgever (*Infram*) en de opdrachtnemer (*Nijholt staal en machinebouw*) een definitief ontwerp tot stand gekomen. Dit ontwerp voldoet aan de vloeistofmechanische eisen en is tevens technisch goed te vervaardigen.

In dit hoofdstuk en het volgende, zal het uiteindelijk ontwerp (zoals deze hieronder is getekend) volledig worden toegelicht.



Figuur 7-4-1: Schets van de uitstroombak met definitieve vorm en afmetingen

Het meest contrasterend met de theoretische vorm is de totale hoogte van het reservoir, deze is ongeveer gehalveerd. Het gevolg is dat door deze beperkte hoogte, onvoldoende waterdruk wordt gecreëerd t.p.v. van de uitstroomopening. Het water dat de uitstroomopening verlaat moet dus nog extra versneld worden tot aan de kruin van de dijk. Dit kan tot stand gebracht worden door de gehele bak omhoog te brengen, het water kan dan vrij naar beneden vallen tot deze de juiste snelheid heeft bereikt.

Voor een voorwerp dat een vrije val maakt geldt het volgende:

- *Afgelegde afstand binnen een bepaalde tijd:* $h(t) = \frac{1}{2} g t^2 + v_{\text{begin}} \cdot t$

- *Valsnelheid na een bepaalde tijd:* $v(t) = g t + v_{\text{begin}}$

Verder geldt voor ieder deeltje water tijdens de val:

$$E_z = E_k \Rightarrow m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Tijdens de vrije val moet het water, met een beginsnelheid t.p.v. de uitstroomopening over een nog onbekende afstand versnellen tot deze de $v_{\max}$ op de kruin heeft bereikt, dit kan als volgt genoteerd worden:

$$v_{\text{toename}} = v_{\text{max, benodigd t.p.v. de kruin}} - v_{\text{begin t.p.v. de uitstroomopening}}$$

Wanneer deze toename van snelheid bekend is, kan eenvoudig m.b.v. de formule $v(t) = g t$ de valtijd bepaald worden door bij ieder volume de benodigde toename in snelheid in te vullen.

Nu de valtijd bekend is om het water vanaf de uitstroomopening tot de benodigde snelheid op de kruin toe te laten nemen, kan tenslotte met de formule

$$h(t) = \frac{1}{2} g t^2 + v_{\text{begin}} \cdot t \text{ de vereiste valhoogte berekent worden.}$$

Deze valhoogte is overeenkomstig met de waarde voor h indien deze wordt bepaald a.d.h.v. de energieformules.

Volume (ltr)	Hoogte waterspiegel t.o.v. uitstroomopening (m)	Snelheid v (incl. contractie) t.p.v. de uitstroomopening (m/s)	Snelheid $v_{\max}$ t.p.v. de kruin	Laagdikte $d_{\max}$ t.p.v. de kruin	Benodigde extra (vrije)valhoogte (m) om de voorgeschreven maximale snelheid van de overstromende laag op de kruin te bereiken
50	0,06	0,65	0,68	0,15	0,002
150	0,14	0,99	1,5	0,22	0,06
400	0,28	1,41	2,85	0,3	0,31
700	0,45	1,78	4,08	0,36	0,69
1000	0,63	2,11	5,15	0,4	1,12
1500	0,92	2,55	6,4	0,45	1,76
2500	1,59	3,35	8,5	0,52	3,11
3500	2,45	4,16	10,6	0,57	4,84

Tabel 7-4-2: Uitwerking van de benodigde extra valhoogte bij de uitstroombak

Uit de berekening voor de extra valhoogte kan geconstateerd worden dat de uitstroombak trapsgewijs tot maximaal 4,84 m omhoog gebracht moet kunnen worden. Met een instelbare hoogte tot ongeveer 2 meter zou slechts aan de twee grootste volumes onvoldoende snelheid worden gegeven. Dit is acceptabel, immers de grote volumes komen maar enkele malen voor en het is erg onpraktisch om de golfsimulator hoger dan 2 meter te zetten.

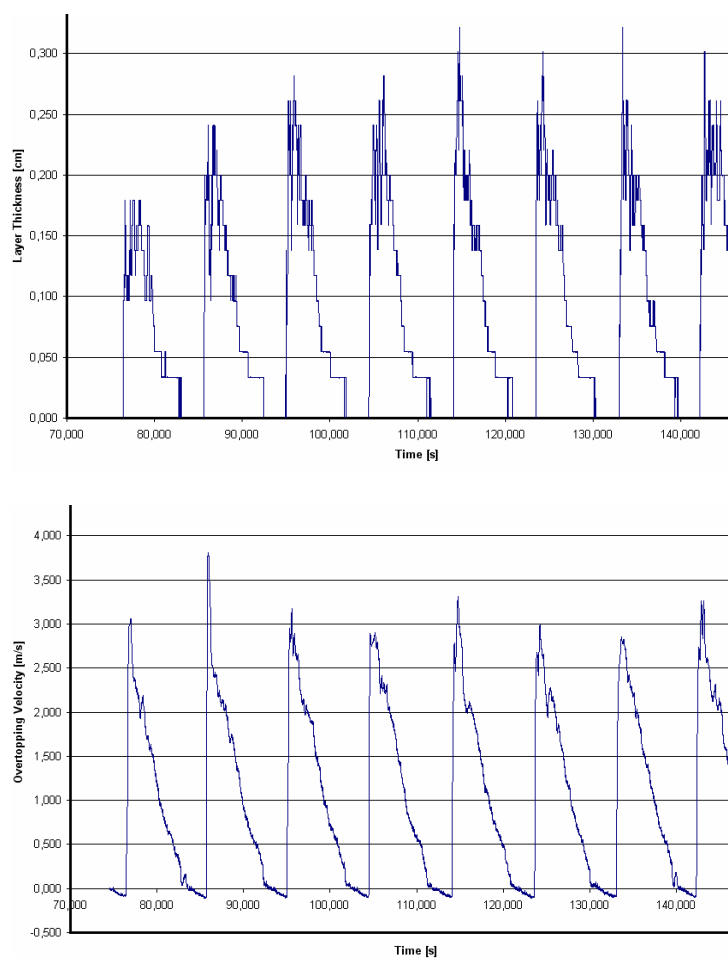
7.5. De theoretische grootte van de uitstroomopening

De grootte van de uitstroomopening onderaan de bak moet a.d.h.v. de uitstroomtijd worden berekend. Deze uitstroomtijd zal bepalend zijn voor de lengte en de vorm van de overslaande golf. Om de verhouding tussen het overslaande volume water en de stroomtijd langs een vast punt op de kruin van de dijk in formulevorm te geven, zal eerst nader onderzocht moeten worden hoe een overslaand volume water in de tijd over de kruin loopt.

Hieronder zijn metingen weergegeven, van een overslaande golf met:

- $V = 1,5 \text{ m}^3$
- $H_m = 1 \text{ m}$
- $T = 9,5 \text{ s}$

Dit zijn metingen verricht met regelmatige golven, verkregen met verzoek aan Schüttrumpf.



Figuur 7-5-1: Metingen van het modelonderzoek naar golfoverslag dat door Schüttrumpf is uitgevoerd met regelmatige golven en $V=1,5 \text{ m}^3$



Uit deze metingen blijkt dat de snelheid en de laagdikte beide een driehoekig verloop hebben, met dezelfde tijdsduur t_1 en een maximum van respectievelijk $v_{\max}$ en $d_{\max}$.

Voor het volume geldt:

$$dV = v \cdot d \cdot dt$$

Het verloop van de snelheid en laagdikte is:

$$v(t) = v_{\max} - \frac{t \cdot v_{\max}}{t_1}$$

$$d(t) = d_{\max} - \frac{t \cdot d_{\max}}{t_1}$$

Integreren van 0 tot t_1 levert:

$$V = \frac{1}{3} \cdot d_{\max} \cdot v_{\max} \cdot t_1$$

Indien de tijd t_1 berekent wordt m.b.v. de formule zoals deze zojuist is opgesteld met golven die een volume hebben van $1,5 \text{ m}^3$, dan zou deze t_1 overeen moeten komen met de gemeten waarden voor t_1 met golven van $1,5 \text{ m}^3$.

$$V_{1500 \text{ l}} = \frac{1}{3} \cdot d_{\max} \cdot v_{\max} \cdot t_1$$

$$1,5 \text{ m}^3 = \frac{1}{3} \cdot 0,28 \text{ m} \cdot 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t_1$$

$$\Rightarrow t_1 = 5,4 \text{ s}$$

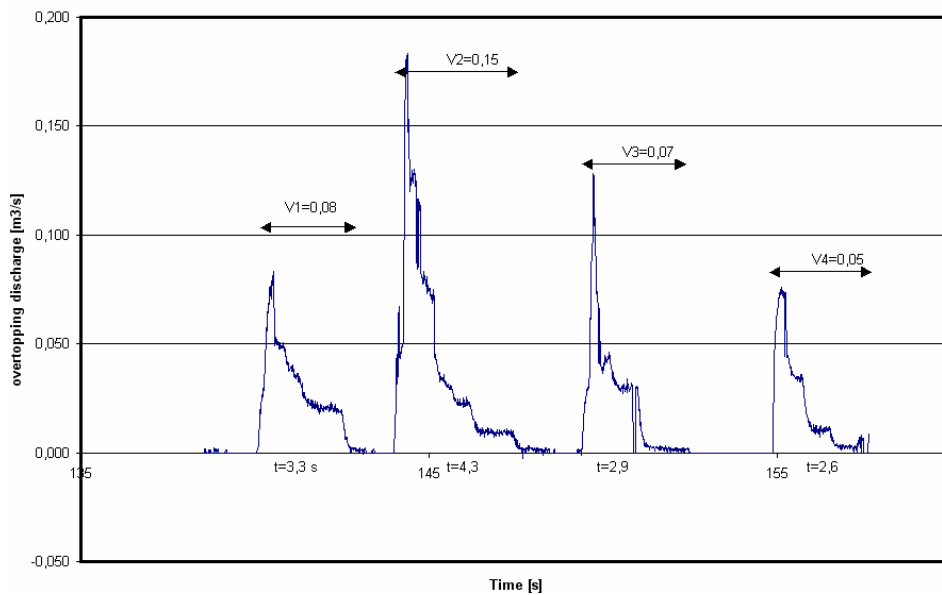
Uit de meting blijkt dat de waarde van t_1 gemiddeld 6 sec. bedraagt. De afwijking tussen de berekende waarden en de afgelezen waarde van t_1 is te wijten aan de aangenomen driehoekige verlopen van beide waarden, in de werkelijkheid is dit niet zo rechtlijnig. De rekenmethode geeft echter weer een redelijke indicatie, wat voor dit onderzoek voldoende is.

Met behulp van deze formule wordt, volgens zowel de waarden van “Schüttrumpf” als die van “van Gent” (zie blz. 12 & 13) voor de laagdikte en snelheid, de benodigde uitstroomtijd t_1 bepaald. Deze uitstroomtijden zijn hieronder in de tabel verwerkt.

Volume (ltr)	Uitstroomtijd (t_1) (volgens de berekeningsmethode van “Schüttrumpf”)	Uitstroomtijd (t_1) (volgens de berekeningsmethode van, “van Gent”)
50	1,47	2,45
150	1,36	2,31
400	1,40	2,48
700	1,43	2,71
1000	1,46	2,77
1500	1,56	3,06
2500	1,70	3,39
3500	1,74	3,30

Tabel 7-5-2: Uitstroomtijden a.d.h.v. Schüttrumpf en van Gent

Uit de tabel blijkt dat er nogal uiteenlopende waarden voor de uitstroomtijd worden gevonden. Om een controle uit te voeren kunnen we beide waarden vergelijken met metingen uit de praktijk. Deze metingen zijn door Schüttrumpf uitgevoerd, met golven die ongeveer dezelfde periode en golfhoogte hebben als de golven t.p.v. de situatie in Delfzijl.



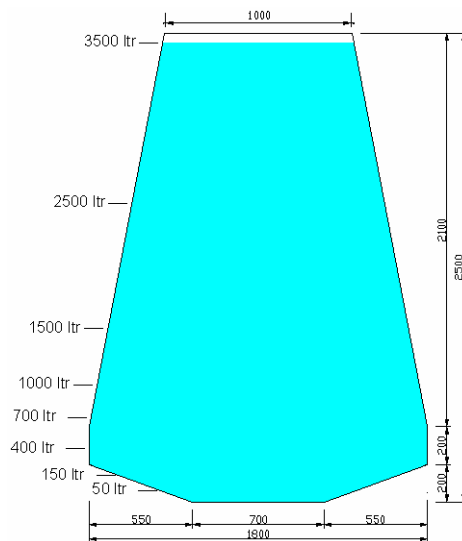
Figuur 7-5-3: Geïntegreerde meting van het modelonderzoek naar golfoverslag dat door Schüttrumpf is uitgevoerd

In de bovenstaande meting is het overslaand volume water uitgezeten tegen de tijd. De proef is uitgevoerd met golven:

- $H_m = 1,5 \text{ m}$
- $T_p = 5 \text{ s}$

Uit deze metingen wordt duidelijk dat de uitstrooimtijden zoals deze bepaald zijn volgens “van Gent” beter overeenkomen met de werkelijke situatie.

Nu de te hanteren uitstroomtijden, per volume, bekend zijn is het noodzakelijk bij de bepaling van de grootte van de uitstroomopening het verloop van het water binnen de uitstroombak nader in beschouwing te nemen.



Een te simuleren golf van bijvoorbeeld 3500 liter heeft voordat deze de uitstroombopening verlaten heeft, reeds een hele weg binnen de uitstroombak afgelegd. Deze weg moet in 3,30 seconden afgelegd zijn.

De vorm van het reservoir is reeds bekend.
De vraag is nu: wat is de oppervlakte van de
uitstroomopening, per volume, met ieder een
gegeven uitstroomtijd.

Hiervoor moet eerst een formule voor de afvoer van dit reservoir worden opgesteld.

Voor de afvoer $q \left(\frac{m^3}{s} \right)$ van het reservoir geldt op een gegeven tijdstip t de volgende formule: $q = v \cdot A_j \cdot \mu$

Hierin is,

v = snelheid van het uitstromende water in m/s, uit Bernoulli blijkt $v = \sqrt{2g \cdot x}$

x = hoogte van de waterspiegel t.o.v. de uitstroomopening

$$A_2 = \text{oppervlakte van de uitstroomopening in m}^2$$

μ = contractiecoëfficiënt, voor rechthoekige openingen geldt : $\mu = 0,6$

In een zeer klein tijdsinterval dt_1 stroomt ten tijde t een volume dV uit de uitstroombak. Hiervoor geldt:

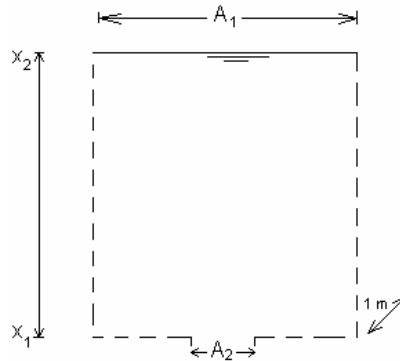
$$dV = q \cdot dt_1 = v \cdot A_2 \cdot \mu \cdot dt_1$$

Dit volume is ook gelijk aan:

$$dV = -A_1 \cdot dx$$

waarin,

A_1 = gemiddelde oppervlakte
van de waterspiegel in m^2



Als de twee formules voor dV aan elkaar gelijkgesteld worden dan volgt voor dt :

$$\begin{aligned} dV &= dV \\ v \cdot A_2 \cdot \mu \cdot dt_1 &= -A_1 \cdot dx \\ \Rightarrow dt_1 &= \frac{-A_1}{v \cdot A_2 \cdot \mu} \cdot dx \\ dt_1 &= \frac{-A_1}{\sqrt{2g \cdot x} \cdot A_2 \cdot \mu} \cdot dx \\ dt_1 &= \frac{-A_1}{\sqrt{2g} \cdot A_2 \cdot \mu} \cdot x^{-\frac{1}{2}} \cdot dx \end{aligned}$$

Integreren levert op:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-A_1}{\sqrt{2g} \cdot A_2 \cdot \mu} \cdot 2x^{\frac{1}{2}} \Rightarrow t_1 = \frac{-A_1}{\sqrt{2g} \cdot A_2 \cdot 0,6} \cdot 2 \cdot \left\{ x_1^{\frac{1}{2}} - x_2^{\frac{1}{2}} \right\} \\ &= \frac{-A_1}{\sqrt{2g} \cdot 0,6 \cdot A_2} \cdot -2 \cdot x_2^{\frac{1}{2}} \\ \Rightarrow A_2 &= \frac{A_1}{\sqrt{2g} \cdot 0,6 \cdot t_1} \cdot 2 \cdot x_2^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

In de bovenstaande formule is A_1 de gemiddelde waarde van de oppervlakte van de waterspiegel over de afstand die het water aflegt, binnen de gegeven uitstroomtijd t . Voor t kan de uitstroomtijd, zoals deze berekend is a.d.h.v. “van Gent”, worden ingevuld.

De benodigde waarden om A_2 te bepalen zijn in de onderstaande tabel verwerkt, de laatste kolom is m.b.v. de formule, zoals deze zojuist is bepaald, ingevuld.

Volume (ltr)	Hoogte waterspiegel t.o.v. uitstroomopening (m)	Uitstroom tijd t_1 (s)	Gemiddelde breedte van het verloop van de waterspiegel $A_1/1$ (m)	Breedte van de uitstroomopening $A_2/1$ (m)
50	0,06	2,45	0,83	0,06
150	0,14	2,31	1,07	0,13
400	0,28	2,48	1,43	0,23
700	0,45	2,71	1,56	0,29
1000	0,63	2,77	1,59	0,34
1500	0,92	3,06	1,63	0,38
2500	1,59	3,39	1,57	0,44
3500	2,45	3,30	1,43	0,51

Tabel 7-5-4: grootte van de uitstroomopening, a.d.h.v. de uitstroomtijden van " van Gent"

Uit de tabel blijkt dat de uitstroomopening van het prototype tot een maximale breedte van 0,5 m. volledig instelbaar moet zijn. Deze breedte kan worden verkregen door een schuif aan te brengen en deze, afhankelijk van het te simuleren volume, vervolgens gedeeltelijk open te trekken.

7.5.1.1. De geleideconstructie

De geleideconstructie is simpel doch een onmisbaar onderdeel van de golfoverslag simulator. Indien de uitstroomklep wordt geopend beweegt de waterstroom zich via de uitstroomopening aan de onderzijde van de bak naar buiten totdat de bak geleegd is. Om deze waterstroom naar de kruin te geleiden is een geleideconstructie noodzakelijk. Het is belangrijk dat de geleideconstructie (net als de uitstroombak) in hoogte verstelbaar is, want ten allen tijde moet de waterstroom zo goed mogelijk geleid worden om energieverliezen te minimaliseren.

De tweede functie van de geleideconstructie is om ervoor te zorgen dat de stroomwater binnen een meter breedte blijft en ook op de kruin en het binnentalud moet de stroom binnen deze baan van een meter worden gevoerd. Indien dit niet gebeurt, zal de golftong naar de buitenzijde uitwaaien en kan de vereiste laagdikte niet worden gegarandeerd.

Tenslotte moet de ruwheidfactor van de geleide plaat verhoogd of verlaagd kunnen worden zodat tijdens de "vrije val" nog invloed uit kan worden geoefend op de snelheid van het water. Door extra ruwheid op de geleideplaat aan te brengen kan tevens luchtinsluiting in het water plaatsvinden, in werkelijkheid is deze lucht ook in iedere golf aanwezig.

7.5.1.2. De opstelpoten

De opstelpoten dragen de krachten die veroorzaakt worden door de optredende belastingen af naar fundering van de uitstroombak op het buitentalud. Deze opstelpoten moeten de volgende belastingen op kunnen nemen:

- Het gewicht van de uitstroombak:

Deze is het grootst wanneer de bak volledig gevuld is met water.

- Belasting door evt. aanwezige wind:

Dit is afhankelijk van de testlocatie,

- Het prototype zal op een testlocatie worden beproeft, de eventuele aanwezigheid van windbelasting wordt verwaarloosbaar geacht.
- Het definitieve ontwerp voor de golfoverslagsimulator moet een windbelasting op kunnen nemen van circa 1 Kn/m^2 in alle richtingen.

Met betrekking tot het prototype is het niet noodzakelijk om voor te schrijven welke eisen betrekking hebben op de opstelpoten, dit kan het beste terplekke beoordeeld worden. Het is eenvoudigweg van belang dat de gehele constructie stevig en stabiel staat opgesteld, een gevolg van instabiliteit mag nooit invloed hebben op de metingen.

8. Calibratie prototype

8.1 Inleiding

Om er achter te komen of het ontwerp van de golfoverslagsimulator in de praktijk zal voldoen aan de vooraf gestelde eisen, is er een prototype gemaakt. Het prototype van de golfoverslagsimulator is door machinebouwer Nijholt te Heerenveen gebouwd en vervolgens door onze projectgroep getest. De essentie van deze beproeving is om te bestuderen of het water met een bepaald volume, dat door de uitstroomopening uit de bak loopt, t.p.v. de kruin de juiste snelheid en laagdikte heeft.

In dit hoofdstuk zal een omschrijving worden gegeven van de beproeving. Het beproeven van dit prototype is door onze projectgroep uitgevoerd. Tijdens de proef kunnen eventueel aanpassingen worden verricht aan het ontwerp. De testresultaten zullen na afloop geëvalueerd worden.

8.2 Proefopstelling en testlocatie

Het prototype is, a.d.h.v. de eerder genoemde ontwerpeisen gebouwd door het staal en machinebedrijf Nijholt. Dit bedrijf heeft tevens een leeg gedeelte van haar parkeerplaats beschikbaar gesteld als testlocatie. Het mooie van deze locatie was dat aangrenzend een sloot was gesitueerd waar ten alletijde water uitgepompt kon worden t.b.v. het vullen van de simulator.

De kruin van de dijk is nagebouwd d.m.v. een houten 'stroom'bak met een lengte van 2 m en 1 m breed en aan de kanten zijschotten van 0.6 m hoog. Na de 2 m kan het water vrij naar de zijkanalen uitstromen. Twee pompen waren beschikbaar gesteld, een van 3 l/s en een van 8 l/s. Bijde werden gebruikt om de golfoverslagsimulator te vullen met water tot het benodigd volume was bereikt. Zie figuur 6.1 en 6.2 voor een compleet beeld van de simulator.



Teneinde vast te stellen wat de snelheid, laagdikte en zuitstroomtijd is van het uitstromende water werd een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS) gehuurd van WL | Delft Hydraulics, samen met een akoestische laagdiktemeter (LDM). De EMS werd 2 cm boven de bodem van de houten uitstroombak (of de kruin) geplaatst en maar liefst 3 m vanaf de uitstroomopening van de simulator vanwege de enorme turbulentie en luchtinsluiting die optreed tijdens de uitstroom. De laagdiktemeter werd 1.2 m boven de bodem van de stroombak geplaatst.



Laagdiktemeter



Snelheidsmeter

Omheining van het terrein d.m.v. hekwerk

Schakelket t.b.v. installatie laptop en meetapparatuur

10.93

16

5.15

3

0.3

5.97

2

3

Aanzuigslang

Aanvoerslang

Houten geleidebak

Golfverslag-simulator

1

2

3

1 = Klopomp t.b.v. het vullen van de aanzuigslangen van de "diesel"- en de "benzinepomp"

2 = "Benzinepomp" t.b.v. het vullen van de golfverslagsimulator

3 = "Dieselpomp" t.b.v. het vullen van de golfverslagsimulator

Elektrotechnische voorziening t.b.v. de klopomp en de meetapparatuur in de schakelket

Aanvoerput met buis om het testwater van het terrein af te voeren

Omheining van het terrein d.m.v. hekwerk

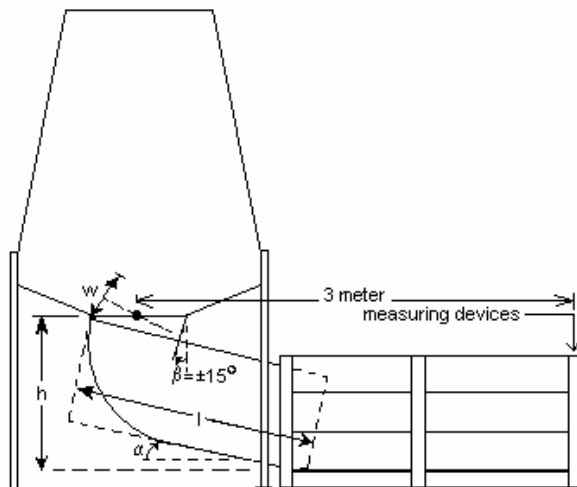
Figuur 8-1: Overzichtstekening van de proeflocatie

8.3 Uitvoering van de proeven

Nadat de simulator een aantal keer werd uitgetest, schepten de eerste metingen twijfels over de juistheid van de gemeten laagdikte. Vandaar dat de proeven onderbroken werden om eerst de meetinstrumenten te kalibreren. Voor de kalibratie van de snelheidsmeter werd een gootje gemaakt van 0,07 m breed en hier werd met de grootste pomp (circa 8 l/s) water doorheen gepompt. Vervolgens is de laagdikte van deze stroom met de hand gemeten en deze bedroeg 0,05 m. De EMS gaf een snelheid aan van 2,0 m/s $\pm$ 0.1 m/s. Dit betekent een debiet van $0.07 \times 0.05 \times 2.0 \times 1000 = 7$ l/s. Dit ligt dicht in de buurt van het pompdebiet, de snelheidsmeter bleek dus goed te functioneren.

De laagdiktemeter meet m.b.v. een akoestisch signaal dat heen en terug gezonden wordt, vervolgens wordt de afstand tussen het object en het instrument vastgesteld. Door de laagdiktemeter boven een constante stroom water (met weinig tot geen luchtinsluiting) te plaatsen kan een juiste afstandmeting uitgevoerd worden. Echter tijdens het simuleren van de overslaande golven werd dermate veel lucht ingesloten dat het wateroppervlak te grillig werd voor de laagdiktemeter om een goed signaal op te kunnen vangen.

Vervolgens werden simulaties uitgevoerd met vastgestelde volumes waarvan zowel de laagdikte als de snelheid van de uitgaande stroom water werden gemeten en geregistreerd. In totaal zijn een achttal proefseries uitgevoerd met verschillende standen van klep, geleidebak en hoogte van de uitstroomopening t.o.v. de kruin. Om een overzicht te geven van de verschillende calibraties (aangegeven door Testserie C, D ...etc) wordt een schematische tekening van de opstelling gegeven in figuur 1, in tabel 1 worden de waarden vermeld die voor iedere testserie zijn aangehouden.



Figuur 8-2: opstelling, schematisch weergegeven

Ieder testserie (een aantal uitgevoerde proeven met diverse volumes, maar met een ongewijzigde opstelling) wordt aangeduid met een letter. Indien de opstelling wordt gewijzigd en opnieuw beproefd, dan wordt dit aangeduid met een andere letter.

Testserie (opstelling)	Hoogte uitstroomopening h t.o.v. de kruin (m)	Opstelling van de uitstroombak		Vrije uitstroomopening w (m), met een maximum van 0,50 m
		Hoek α t.o.v. de kruin (°)	Lengte l uitstroombak (m)	
C	1,25	10	2,00	0,34
D	1,25	23	2,00	0,42
E	0,84	13	2,00	0,42
G	0,60	7	2,00	0,42
H	0,60	27	2,00	0,42
I	1,83	30	2,50	0,50
J	1,83	30	2,50	0,50
K	1,25	19	2,50	0,50

Tabel 8-1: Overzicht van de verschillende opstellingen

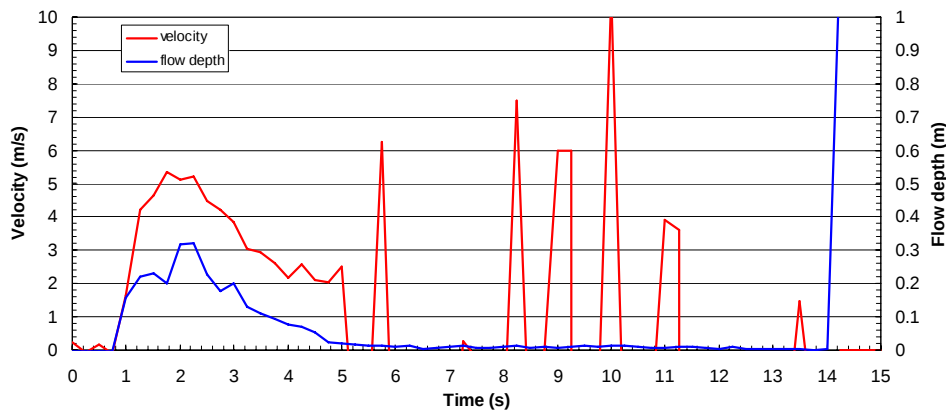
8.4 Evaluatie van de uitgevoerde testseries

Proefserie A+ B (+ F)

De testseries A+ B worden beschouwd als "warming up" en waren niet relevant om verder uitgewerkt te worden. Ook testserie F ontbreekt, dit is een serie proeven waarbij de uitstroombak met een constant debiet werd gevuld met water en in een tijdsbestek van 18 minuten onregelmatige golven genereerde. Deze proef valt buiten de testseries die in de tabel zijn verwerkt.

Proefserie C

Proef C1000 is begonnen met het simuleren van volumes van 1000 l, deze simulaties werden 6 maal herhaald. Figuur 6.1 toont de registraties van de snelheidsmeter en laagdiktemeter. De werkelijke simulatie vindt plaats tussen $t = 1$ s tot $5 / 6$ s. Daarna geeft de laagdiktemeter bijna geen laagdikte meer aan en de EMS geeft hoge pieken doordat er geen water meer langsstroomt. De maximaal gemeten snelheid bedraagt 5.3 m/s. De maximale laagdikte bedraagt 0.2 en af en toe 0.3 m. De maximale laagdikte is tevens visueel geregistreerd op de zijkant van de uitstroombak ter hoogte van de laagdiktemeter. In ieder test met met 1000 l werd een maximale laagdikte gemeten van 0.12 – 0.13 m. In geen geval kunnen de laagdiktes 0.2 or 0.3 m plaatsgevonden hebben. De waterstroom is erg turbulent met veel luchtinsluiting. Verder van de uitstroomopening neemt de hoeveelheid turbulentie in het water af, maar onvoldoende voor een goede registratie van de laagdiktemeter. Er kan geconcludeerd worden dat de laagdiktemeter niet juist werkt vanwege de grote mate aan turbulentie in het wateroppervlak. Waarschijnlijk is het gedeelte van de registratie na 4.5 s pas correct gemeten.



Figuur 8-3: Registratie meting C1000-1

Na 5 s valt de snelheid van 2 m/s naar nul. Dit valt samen met het vrijkomen van de EMS uit het water doordat de stroom teneinde is gelopen en de laagdikte kleiner dan circa 2-3 cm. De frontsnelheid is net als de laagdikte bij deze meting tevens handmatig gemeten. De tijd die de kop van de stroom nodig had om de afstand tussen de uitstroomopening en de uitgang van de uitstroombak (3.5 m verder) af te leggen werd gemeten. De tijd die gemeten werd bedroeg 0.6-0.7 s, hier volgen snelheden uit van circa 5 – 5.8 m/s. De maximale snelheid in de figuur bedraagt 6.1 is 5.3 m/s en dit komt aardig overeen met de handmatige meting. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de snelheidsmeter correct werkt.

Een laatste controle kan nog uitgevoerd worden voor ieder van de zes C1000 proeven. Door de metingen van de max snelheid en laagdikte in de tijd ($t = 0.75 - 5.0$ s) te integreren. Deze integratie geeft het totaal volume weer. Voor ieder van de metingen wordt het volgende voor het volume berekent: 2.67, 2.17, 2.44, 2.52, 2.2 and 2.18 m³, de werkelijke volume dat de simulator verlaat is 1 m³. Deze controle laat zien dat de laagdikte twee maal groter is gemeten dan in werkelijkheid is opgetreden.

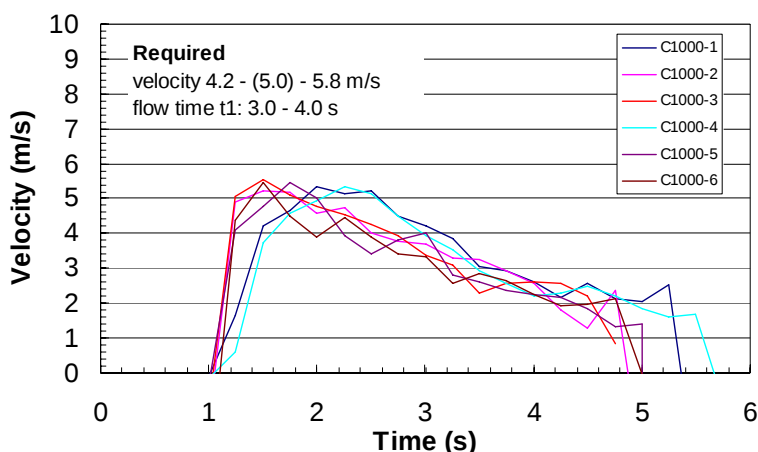
De laagdikte kan dus niet correct worden gemeten met de laagdiktemeter, maar het signaal is wel goed bruikbaar om de stroomtijd t_1 te bepalen.

Omdat de vorm van de metingen verricht door de snelheidsmeter en laagdiktemeter driehoekig verloopt, geldt de volgende formule:

$$V = 1/3 v_{\max} d_{\max} t_1$$

Met $V = 1$ m³, $v_{\max} = 5.3$ m/s en $t_1 = 4.5$ s wordt de maximale laagdikte $d_{\max} = 0.125$ m. Dit komt overeen met een laagdikte tussen 0.12 – 0.13 m, die visueel is gemeten.

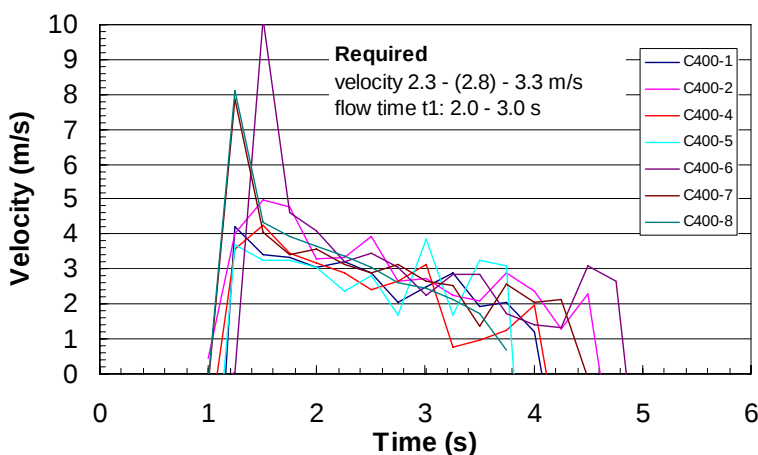
Het relevante gedeelte van de snelheidsmeting van de C1000 proeven zijn in een grafiek geplaatst, met een gezamenlijk startpunt: $t = 1$ s. Deze grafiek is gegeven in Figure 6.2.



Figuur 8-4: Registratie meting C1000

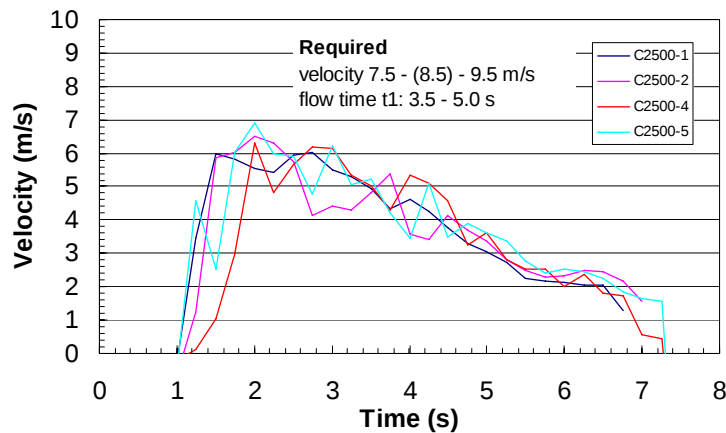
De metingen komen redelijk overeen, dit betekent de simulaties goed worden herhaald. De benodigde snelheid en stroomtijd zijn tevens genoemd. De gemeten snelheid van circa 5.3 m/s is valt mooi binnen de benodigde 4.2 – 5.8 m/s. De stroomtijd ligt tussen 3.75 and 4.75 s, dit duur langer dan de benodigde 3.0 – 4.0 s. Er kan geconcludeerd worden dat de simulator met een hoogte van 1.25 m boven de kruin goede waarden geeft voor de snelheid, de stroomtijd kan verbeterd worden door de klep sneller te openen.

Volgens theoretische bepalingen mag verwacht worden dat door de huidige hoogte van de simulator te hoge snelheden worden gegenereerd voor volumes kleiner dan 1 m^3 en niet toereikend voor volumes groter dan 1 m^3 . Figuur 6.3 geeft de snelheidsregistraties weer van de C400-serie ($V = 400 \text{ l}$), Figuur 6.4 en Figuur 6.5 geeft test series C2500 ($V = 2.5 \text{ m}^3$).



Figuur 8-5: Registratie meting C400

Voor C400 zijn de maximale snelheden rond 3.5 – 5.0 m/s, de twee hoge pieken zijn hierbij buiten beschouwing genomen (meetfouten). Dit is inderdaad hoger dan de benodigde 3 m/s. De stroomtijd was 3 – 4 s, dit is 1 s te lang.



Figuur 8-6: Registratie meting C2500

De grote volumes van 2.5 m³ geven overeenkomstige waarden. Maximale stroomsnelheden bedragen 6 – 7 m/s, waar 7.5 – 9.5 m/s is benodigd. Indeed, De snelheden zijn hier aan de lage kant. De stroomtijd ligt tussen de 5.5 – 6.5 s, wat ongeveer 2 s te lang is.

Proefserie D t/m K

Deze proefseries zijn uitgevoerd met verschillende hoogtes van de uitstroom, om te kijken wat voor effect dit heeft op de snelheid en uitstroomtijd. Gebleken is dat een opstelhoogte van de uitstroomopening van 1,25 meter boven de kruin van de dijk het beste resultaat opleverde voor de snelheden. Door de uitstroomklep zo snel mogelijk volledig (0,50 m) te openen kunnen de uitstroomtijden tevens binnen de theoretische grens gerealiseerd worden. In Tabel... is een totaal overzicht gegeven van alle uitgevoerde metingen, de K-serie is uitgevoerd met de definitieve opstelling, de meetresultaten van deze serie zijn dus representatief voor de praktische werking van de golfoverslagsimulator.

8.5 Conclusie (t.a.v. de K-serie)

Het totaal overzicht van alle meetresultaten is in de onderstaande tabel gegeven.

Iedere wijziging in de opstelling is aangegeven met een andere letter ('Test serie' in de tabel).

Test serie	Hoogte uitstroombak h (m)	Hoek α van de uitstroombak t.o.v. de kruin (°)	Lengte l van de uitstroombak (m)	Vrije uitstroombak w (m)	Volume V [liter]	Volume V (m³) volgens: $1/3 \cdot v \cdot d \cdot t$	Max. snelheid v [m/sec]	Max. snelheid $t_{theoretisch}$ [m/s]	Max. laagdikte d [m]	Max. laagdikte $t_{theoretisch}$ [m]	Stroomtijd t_i [s]	Stroomtijd $t_{i,theoretisch}$ [s]
C	1.25	10	2.00	0.34	150	0.16	4.48	1,0 – 2,0	0.04	0.13	2.70	1,5 – 2,6
					400	0.35	5.75	2,3 – 3,3	0.06	0.17	3.16	2,0 – 3,0
					1000	0.91	5.40	4,2 – 5,8	0.12	0.23	4.13	3,0 – 4,0
					2500	3.36	6.40	7,5 – 9,5	0.26	0.3	5.96	3,5 – 5,0
					3500	5.08	7.53	8,8 – 11,7	0.30	0.33	6.80	3,5 – 5,0
D	1.25	23	2.00	0.42	150	0.11	4.26	1,0 – 2,0	0.04	0.13	1.76	1,5 – 2,6
					400	0.43	4.65	2,3 – 3,3	0.10	0.17	2.88	2,0 – 3,0
					700	0.69	5.68	3,4 – 4,6	0.13	0.21	2.86	2,5 – 3,5
					1000	0.99	5.18	4,2 – 5,8	0.16	0.23	3.58	3,0 – 4,0
					1500	1.56	6.20	5,8 – 6,8	0.19	0.26	4.04	2,5 – 3,5
					2500	3.51	7.17	7,5 – 9,5	0.26	0.3	5.57	3,5 – 5,0
E	0.84	13	2.00	0.42	400	0.63	3.28	2,3 – 3,3	0.15	0.17	3.96	2,0 – 3,0
					700	1.31	4.08	3,4 – 4,6	0.15	0.21	6.30	2,5 – 3,5
					1000	1.51	4.08	4,2 – 5,8	0.21	0.23	5.34	3,0 – 4,0
G	0.60	7	2.00	0.42	50	0.05	5.40	0,5 – 1,1	0.03	0.09	0.89	1,5 – 2,5
					150	0.17	4.93	1,0 – 2,0	0.05	0.13	1.92	1,5 – 2,6
					400	0.73	4.20	2,3 – 3,3	0.13	0.17	4.20	2,0 – 3,0
					700	0.84	4.20	3,4 – 4,6	0.16	0.21	3.72	2,5 – 3,5
H	0.60	27	2.00	0.42	700	1.33	5.04	3,4 – 4,6	0.23	0.21	3.52	2,5 – 3,5
					1000	1.65	5.48	4,2 – 5,8	0.28	0.23	3.24	3,0 – 4,0
					2500	3.92	6.97	7,5 – 9,5	0.36	0.3	4.70	3,5 – 5,0
					3500	5.76	8.24	8,8 – 11,7	0.40	0.33	5.22	3,5 – 5,0
I	1.83	30	2.50	0.50	400	0.40	5.54	2,3 – 3,3	0.07	0.17	3.16	2,0 – 3,0
					1000	0.82	5.34	4,2 – 5,8	0.16	0.23	2.82	3,0 – 4,0
					2500	4.05	8.28	7,5 – 9,5	0.33	0.3	4.62	3,5 – 5,0
					3500	3.69	7.28	8,8 – 11,7	0.27	0.33	5.70	3,5 – 5,0
J	1.83	30	2.50	0.50	3500	5.96	7.43	8,8 – 11,7	0.43	0.33	5.60	3,5 – 5,0
K	1.25	19	2.50	0.50	50	0.035	2.73	0,5 – 1,1	0.04	0.09	0.94	1,5 – 2,5
					150	0.14	2.95	1,0 – 2,0	0.10	0.13	1.48	1,5 – 2,6
					400	0.29	3.43	2,3 – 3,3	0.13	0.17	2.05	2,0 – 3,0
					700	0.49	4.10	3,4 – 4,6	0.15	0.21	2.38	2,5 – 3,5
					1000	0.79	4.62	4,2 – 5,8	0.18	0.23	2.78	3,0 – 4,0
					1500	1.10	4.84	5,8 – 6,8	0.20	0.26	3.40	2,5 – 3,5
					2500	2.37	6.47	7,5 – 9,5	0.26	0.3	4.24	3,5 – 5,0
					3500	3.76	7.07	8,8 – 11,7	0.30	0.33	5.48	3,5 – 5,0

Toelichting tabel "Totaaloverzicht"

Kolom 1: Testserie

Ieder testserie (een aantal uitgevoerde proeven met diverse volumes, maar met een ongewijzigde opstelling) wordt aangeduid met een letter. Indien de opstelling wordt gewijzigd en opnieuw beproefd, dan wordt dit aangeduid met een andere letter. De testseries A+B worden beschouwd als "warming up" en waren niet relevant om verder uitgewerkt te worden. Ook testserie F ontbreekt, dit is een serie proeven waarbij de uitstroombak met een constant debiet werd gevuld met water en in een tijdsbestek van 18 minuten onregelmatige golven genereerde. Deze proef valt buiten de testseries die in de tabel zijn verwerkt.

Kolom 2: Volume

Voor ieder volume zijn over het algemeen 5 proeven uitgevoerd, de waarden voor snelheid laagdikte en tijd zijn dus een gemiddelde van circa 5 metingen. Het volume was zeer nauwkeurig waar te nemen op een peilbuis die bevestigd is op de uitstroombak.

Kolom 3: Maximale snelheid

Het verloop van de snelheid in de tijd is vastgelegd met een elektromagnetische snelheidsmeter, dit instrument gaf 4 maal per seconde een meting van de stroomsnelheid. Uit iedere registratie is de maximale snelheid afgeleid.

Kolom 4: Maximale laagdikte

Het verloop van de laagdikte zou geregistreerd worden d.m.v. een akoestische laagdiktemeter, dit instrument bleek echter (vanaf proeven met V=400 liter) veel te hoge waarden te registreren dan visueel (aflezing van de maximale laagdikte m.b.v. een meetlint dat aan de wand van de geleideconstructie was bevestigd) werd waargenomen. De oorzaak van de veel te hoge waarden die door de laagdiktemeter werden waargenomen kan toegeschreven worden aan de toenemende turbulentie aan het wateroppervlak naarmate het volume toeneemt. Dit deed ons besluiten om alle metingen tevens visueel waar te nemen en de maximale waarde voor de laagdikte te registreren.

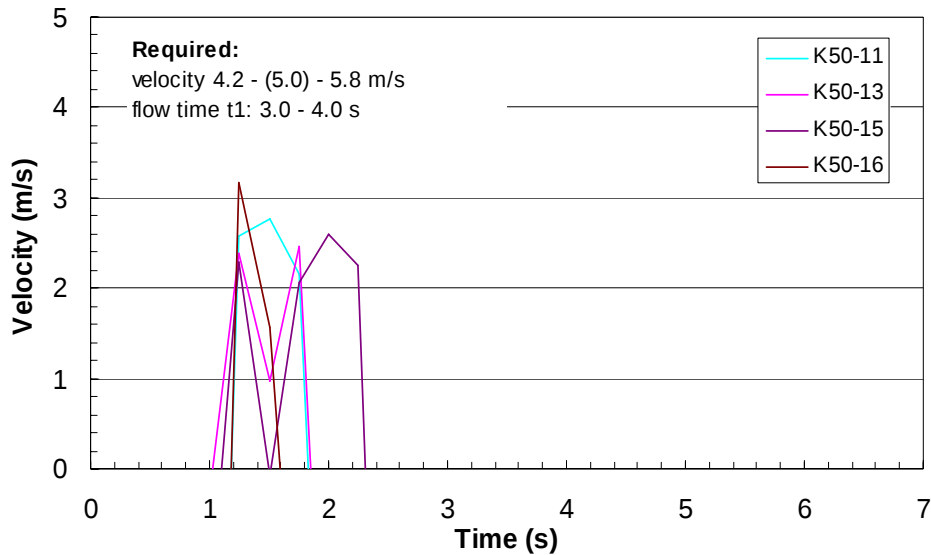
Kolom 5: Uitstroomtijd

De uitstroomtijd is afgeleid uit de registraties van de snelheid en laagdikte. Met name bij de kleinere volumes (V=50 l en V=150 l) was uit de grafieken voor de snelheid moeilijk de uitstroomtijd af te lezen. Hierbij kwamen de registraties van de laagdikte goed van pas om de uitstroomtijd af te lezen.

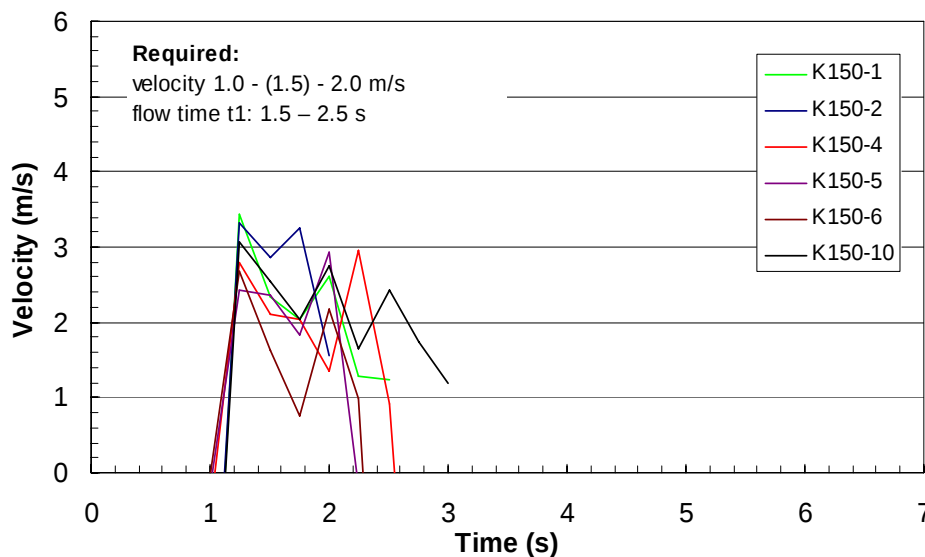
Kolom 6: Volume a.d.h.v. $V = \frac{1}{3} d_{\max} \cdot v_{\max} \cdot t_1$

In deze kolom staan geen gemeten waarden, maar dit is de uitkomst van de bovenstaande formule. In deze formule wordt het volume berekend door de maximale snelheid, max. laagdikte en uitstroomtijd te vermenigvuldigen met een vormfactor $\frac{1}{3}$. Voorwaarde is dat het verloop van de snelheid en laagdikte een driehoekvorm heeft. Dit geeft een indicatie van de nauwkeurigheid van de registraties. Hieruit kan worden opgemerkt dat met name bij de grotere volumes (V=2,5 en V=3,5 m³) de waarden voor

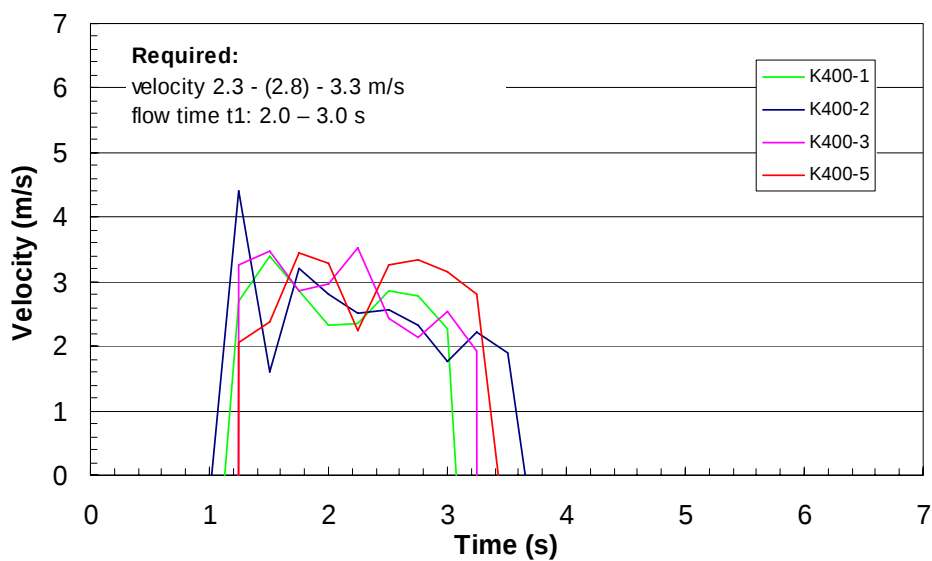
het berekend volume te hoog zijn, de oorzaak ligt in dit geval bij aflezing van de laagdikte. De hoeveelheid turbulentie en luchtinsluiting in het wateroppervlak van de stroom is bij deze volumes dermate groot dat er consequent te hoge aflezingen van de betreffende laagdikten hebben plaatsgevonden. Met name bij de hogere opstelling van de uitstroombak, werd niet zozeer de snelheid verhoogd maar de turbulentie in het uitstromende water nam wel toe. Een andere oorzaak kan zijn dat het verloop minder driehoekig verloopt, in de formule wordt namelijk aangenomen dat de laagdikte en snelheid langs een perfecte driehoek verlopen.



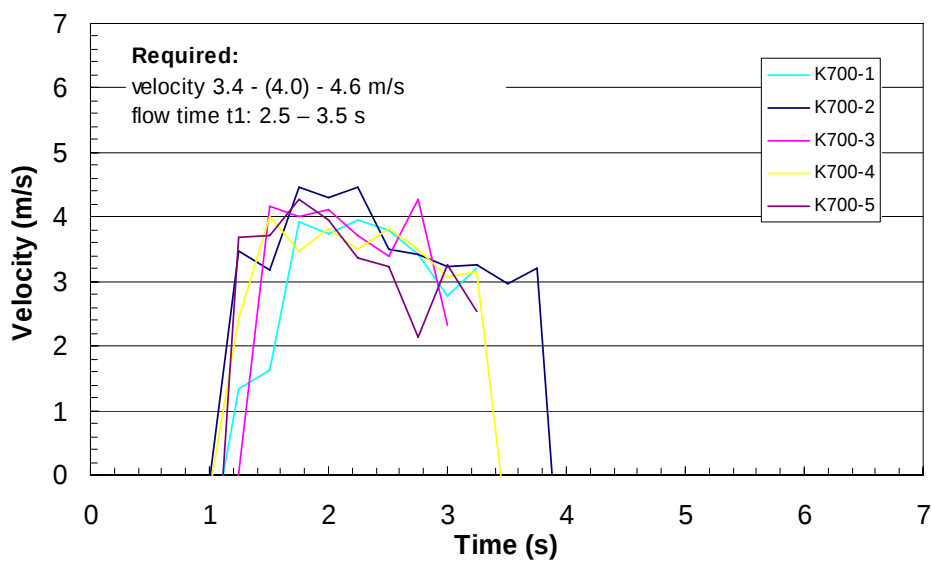
Figuur 8-7: Registratie meting K50



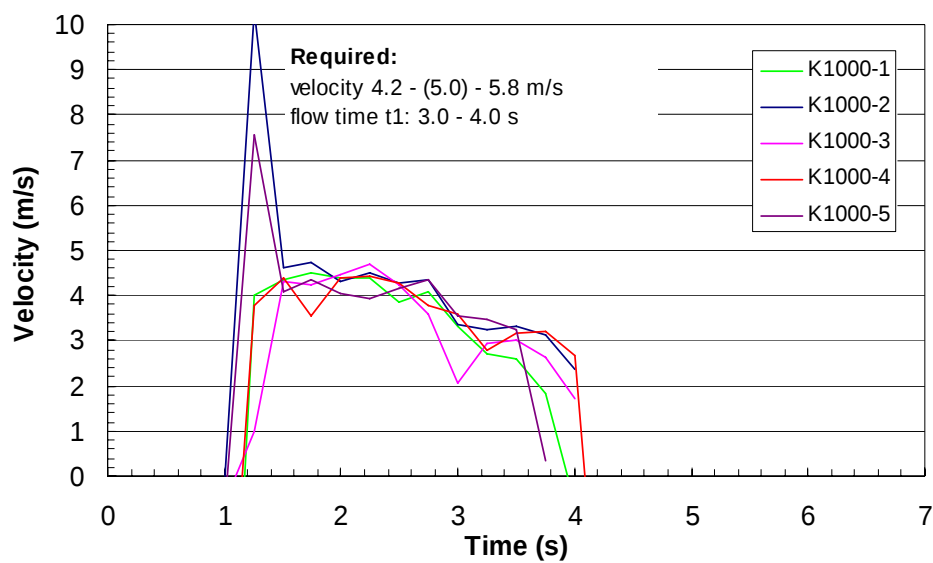
Figuur 8-8: Registratie meting K150



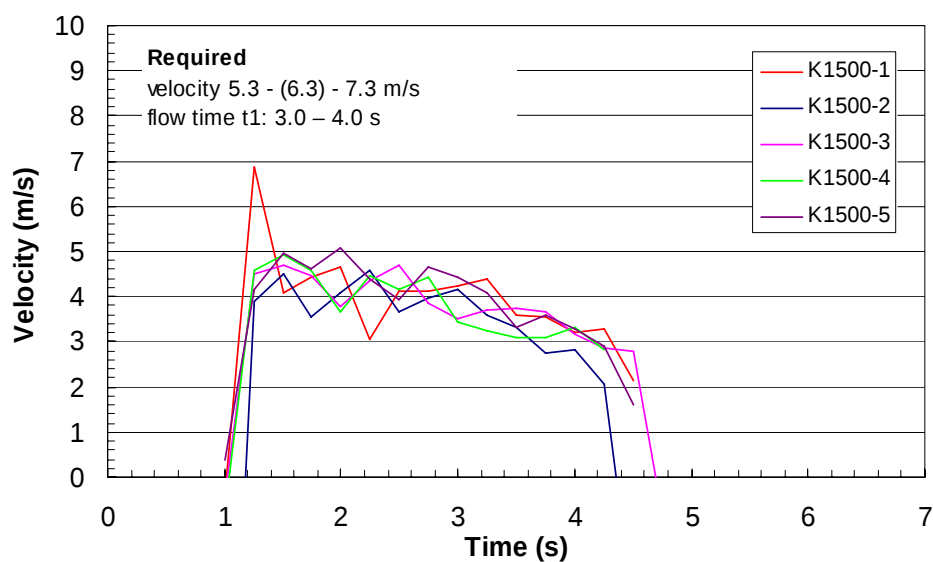
Figuur 8-9: Registratie meting K400



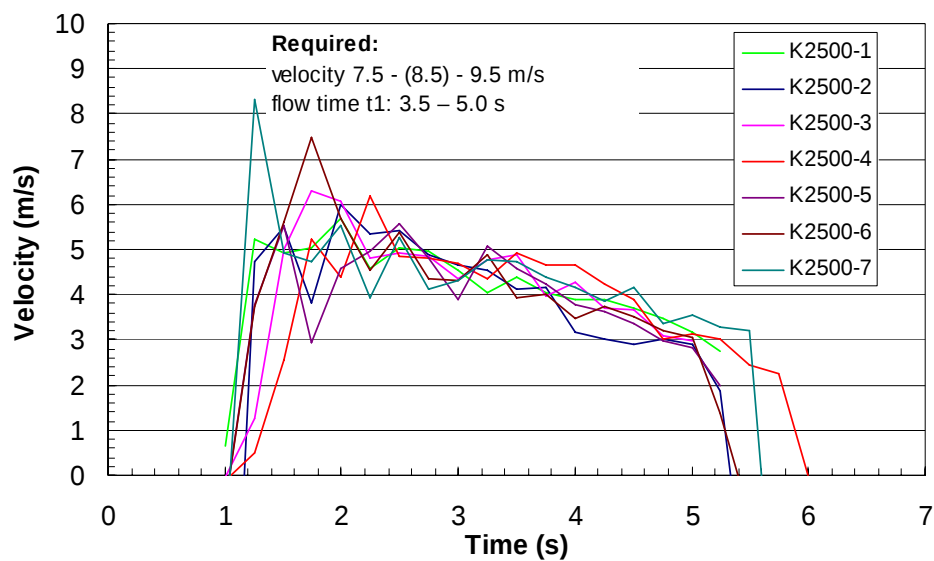
Figuur 8-10: Registratie meting K700



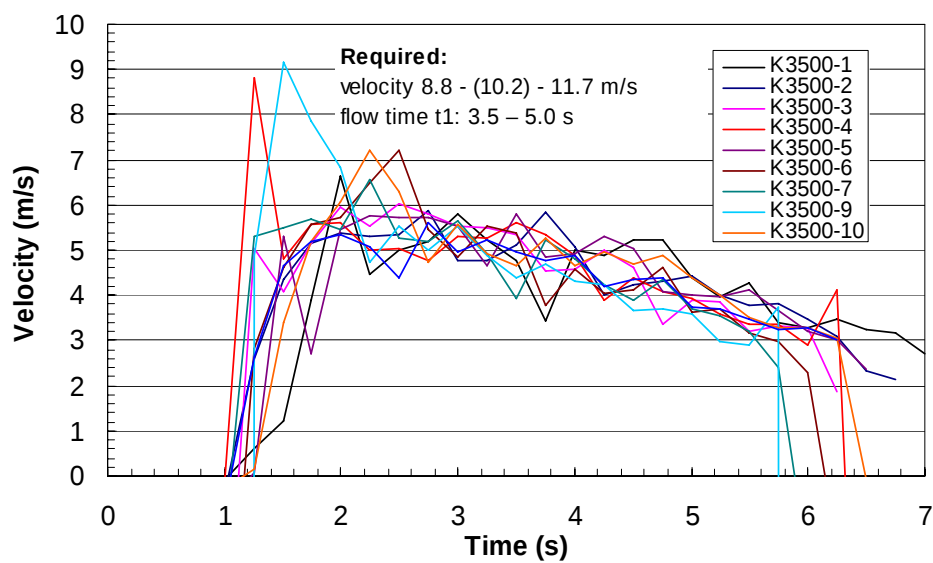
Figuur 8-11: Registratie meting K1000



Figuur 8-12: Registratie meting K1500



Figuur 8-13: Registratie meting K2500



Figuur 8-14: Registratie meting K3500

Uit het overzicht, dat gepresenteerd is in de overzichtstabel, kan voor de gesimuleerde volumes uit de K-serie geconcludeerd worden dat de snelheden, op de grootste twee volumes ($V=2500\text{ l}$ en $V=3500\text{ l}$) na, binnen de daarvoor vastgestelde theoretische waarden vallen. De uitstroomtijden zijn ook goed en de laagdikten zijn redelijk toereikend.

De registraties van de snelheidsmeter geven een mooi driehoekig verloop aan, wat overeenkomt met de registraties van eerdere onderzoeken in een stroomgoot.

9. Lijst van tabellen en figuren

Figuren:

Figuur 3-1	Dijkelementen	8
Figuur 3-2	Opbouw van de grasbekleding	9
Figuur 4-1	Golfoverslag	11
Figuur 5-1	Faalmechanisme golfoploop/golfoverslag	13
Figuur 5-2	Mechanisme beschrijving interne erosie en afschuiving toplaag	15
Figuur 6-0-1	Het oprollen van de graszode	19
Figuur 6-2	Dijk na het oprollen van de graszode	20
Figuur 6-3	Plaatsen van het geokunststof	20
Figuur 6-4	Geokunststof	21
Figuur 6-5	Terugplaatsen van het gras	21
Figuur 7-1-1	De vijf verschillende stadia van een golf	23
Figuur 7-1-2	Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q=0,1$ l/s per m	31
Figuur 7-1-3	Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q=1,0$ l/s per m	32
Figuur 7-1-4	Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q=10,0$ l/s per m	33
Figuur 7-1-5	Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q=20,0$ l/s per m	34
Figuur 7-1-6	Golfoverslagverdeling en mogelijke simulatie bij $q=30,0$ l/s per m	35
Figuur 7-2-1	Principeschets waarin de uitgangspunten van het ontwerp zijn aangegeven	42
Figuur 7-2-2	Principe schets waarin een compleet overzicht van de principe-opstelling tpv de dijk wordt weergegeven	43
Figuur 7-2-3	Schematische voorstelling (waarin alle vormen zijn aangenomen) van de golfoverslagsimulator op het buitentalud (zeezijde) van de dijk	43
Figuur 7-3-1	Effect van het verloop van de wanden op de drukhoogte tpv de uitstroomopening	44
Figuur 7-3-2	Schets van de theoretische vorm van de uitstroomopening en afmeting van de uitstroombak	46
Figuur 7-4-1	Schets van de uitstroombak met definitieve vorm en afmetingen	47
Figuur 7-5-1	Metingen van het modelonderzoek naar golfoverslag dat door Schüttrumpf is uitgevoerd met regelmatige golven en $V=1,5$ m ³	48
Figuur 8-1	Overzichtstekening van de proeflocatie	59
Figuur 8-2	opstelling, schematisch weergegeven	60
Figuur 8-3	Registratie meting C1000-1	62
Figuur 8-4	Registratie meting C1000	63
Figuur 8-5	Registratie meting C400	63
Figuur 8-6	Registratie meting C2500	64
Figuur 8-7	Registratie meting K50	64
Figuur 8-8	Registratie meting K150	65
Figuur 8-9	Registratie meting K400	65
Figuur 8-10	Registratie meting K700	66
Figuur 8-11	Registratie meting K1000	66
Figuur 8-12	Registratie meting K1500	67
Figuur 8-13	Registratie meting K2500	67
Figuur 8-14	Registratie meting K3500	68



Tabellen:

Tabel 7-1-1	Totaal overzicht gegevens per debiet	30
Tabel 7-1-2	Mogelijke verdeling voor simulatie van 0,1 l/s per m	31
Tabel 7-1-3	Mogelijke verdeling voor simulatie van 1,0 l/s per m	32
Tabel 7-1-4	Mogelijke verdeling voor simulatie van 10,0 l/s per m	33
Tabel 7-1-5	Mogelijke verdeling voor simulatie van 20,0 l/s per m	34
Tabel 7-1-6	Mogelijke verdeling voor simulatie van 30,0 l/s per m	35
Tabel 7-4-2	Uitwerking van de benodigde extra valhoogte bij de uitstroombak	48
Tabel 7-5-2	Uitstroomtijden a.d.h.v. Schuttrumpf en van Gent	51
Tabel 7-5-4	Grootte van de uitstroomopening, a.d.h.v. de uitstroomtijden van " van Gent"	54
Tabel 8-1	Overzicht van de verschillende opstellingen	61

10. Lijst van gebruikte afkortingen en symbolen

Afkortingen:

EPM	= Erosiegevoelige Plekken Model
HR	= Hydraulische Randvoorwaarden
TAW	= Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
VTV	= Voorschrift Toetsen op Veiligheid

Symbolen:

g	= zwaartekrachtversnelling = 9,81	(m/s ²)
h_k	= vrije kruinhoogte, afhankelijk van het overslaand debiet	(m)
H_s	= significante golfhoogte	(m)
H_{m0}	= significante golfhoogte, gebaseerd op het spectrum	(m)
L	= golflengte = $\frac{g \cdot T^2}{2\pi}$	(m)
N	= het aantal inkomende golven tijdens de stormduur	(m ² s)
N_{ov}	= het aantal overslaande golven	(-)
P_v	= de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf $\underline{V}$ groter dan of gelijk aan V is	(-)
P_{ov}	= kans op overslag per golf = N_{ov}/N	(-)
q	= gemiddeld golfoverslagdebiet per strekkende meter kruin	(m ³ /s/m)
s_o	= spectrale golfsteilheid	(-)
s_{op}	= golfsteilheid	(-)
T_m	= de gemiddelde golfperiode	(s)
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode	(s)
T_p	= piekperiode	(s)
V	= overslagvolume per golf	(m ³ /m)
$z_{2\%}$	= 2% golfoploopniveau	(m)
α	= hoek van het talud	(°)
β	= hoek van golfaanval	(°)
Y_b	= invloedsfactor voor een berm	(-)
Y_f	= invloedsfactor voor de ruwheid	(-)
Y_β	= invloedsfactor voor de hoek van golfaanval	(-)
Y_v	= invloedsfactor voor een (verticale) wand op de dijk	(-)
ξ_0	= brekerparameter = $\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}}$	(-)
v	= snelheid	(m/s)
x	= hoogte van de waterspiegel t.o.v. de uitstroomopening	(m)
t	= tijd	(s)
v_{max}	= maximale snelheid op de kruin van de dijk	(m/s)
d_{max}	= maximale laagdikte op de kruin van de dijk	(m)
t_1	= uitstroamtijd van het water uit het reservoir	(s)
μ	= contractiecoëfficiënt, voor rechthoekige openingen geldt: $\mu = 0,6$	(-)
A_1	= (gemiddelde) oppervlakte van de waterspiegel	(m ²)
A_2	= oppervlakte van de uitstroomopening	(m ²)
E_z	= zwaarte energie [Nm] uitgedrukt in	(J)
E_k	= kinetische energie [Nm] uitgedrukt in	(J)

11. Literatuurlijst

TAW; 2002

Meer, J.W. van der; Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken;
TAW; 2002, Delft

Delftcluster; 2001

Calle, E.O.F.; Heier, F. den; Waarts, P; Bizzarri, A.L.T.C.M.; Knoeff, J.G.;
Dijkdoorbraakprocessen: *Beschrijving Initiërende Faalmechanismen*,
Doorbraakprocessen en Reststerkte; Delftcluster; 2001; Delft

Young; 2005

Young, M.J.; Wave Overtopping and Grass Cover Layer Failure on the Inner Slope
of Dikes; 2005; Delft

Bos, van den; 2006

Bos, W. van den; Erosiebestendigheid van grasbekleding tijdens golfoverslag; 2006;
Delft

Nortier, et al; 1991

Nortier, I.W.; Koning, P. de; Toegepaste Vloeistofmechanica: *Hydraulica voor*
waterbouwkundigen; 1991; Halsteren; 7^e druk;

VTV; 2004

De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland; Ministerie van verkeer
en waterstaat; 2004

HR; 2001

Ministerie van verkeer en waterstaat Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat;
Hydraulische Randvoorwaarden 2001, voor het toetsen van primaire
waterkeringen; 2001; Dordrecht

Schüttrumpf, Oumeraci; 2005

Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.; Layer thicknesses and velocities of wave
overtopping flow at seadikes; Coastal engineering; 2005

Schüttrumpf; Gent, van; 2003

Schüttrumpf, H.; Gent, M. van; Wave overtopping at Seadikes; 2003

12. Bijlagen

Bijlage 1: Geokunststof (K.W. Puijs)

Bijlage 2: Draaiboek golfoverslagsimulator (A. Galema)

Bijlage 3: Waarborgen veiligheid (A. Wisse)

