

Opdrachtgever: **Waterloopkundig Laboratorium**



Data analyse golfoverslag en overloop

Proeven proeflocatie Wijmeers



LIJN IN WATER

Opdrachtgever: **Waterloopkundig Laboratorium**



Data analyse golfoverslag en overloop

Proeven proeflocatie Wijmeers



LIJN IN WATER

Auteurs:
Gerbert Pleijter
Paul van Steeg
Wouter ter Horst
Mattijn van Hoek
Joost Pol

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	1
1.3	Aanpak op hoofdlijnen	1
1.4	Leeswijzer	2
2	Proefbeschrijving	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Proefopstelling	3
2.3	Uitgevoerde metingen	6
2.4	Proevenprogramma	12
2.5	Resultaten	13
3	Beschrijving van de grasmat	19
3.1	Grondmechanische beschrijving	19
3.2	Classificatie proefsecties in vegetatiefamilies	24
3.3	Beschrijving grasmat conform het Voorschrift Toetsen op Veiligheid	26
3.4	Beschrijving grasmat conform het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium	30
3.5	Conclusies sterkte grasmat	31
4	Hydraulische tijdsreeksen	33
4.1	Hydraulische belasting bij golfverslagproeven	33
4.2	Theoretische hydraulische belasting tijdens de overloopprouven	52
4.3	Piëzometrische druk	53
4.4	Data structuur	54
5	Erosie van de grasmat (Deltares)	57
5.1	Inleiding	57
5.2	Hewlett et al. (1987)	57
5.3	Temple (1992)	61
5.4	Young (2005)	64
5.5	Dean <i>et al.</i> , (2010) / Hughes (2011)	65
5.6	Basisinstrumentarium Nederland	70
5.7	Hoffmans <i>et al.</i> , 2010;	75
6	Conclusies en aanbevelingen golfverslagproeven	79
6.1	Conclusies	79
6.2	Onderzoeksagenda	80
7	Referenties	82
	Bijlage A: Foto's grasbekleding	87
	Bijlage B: Gebruikte boringen G-tec	92
	Bijlage C: Grondparameters IRSTE A	94
	Bijlage D: Verloop waterdruk golfverslag en overloop prouven	95

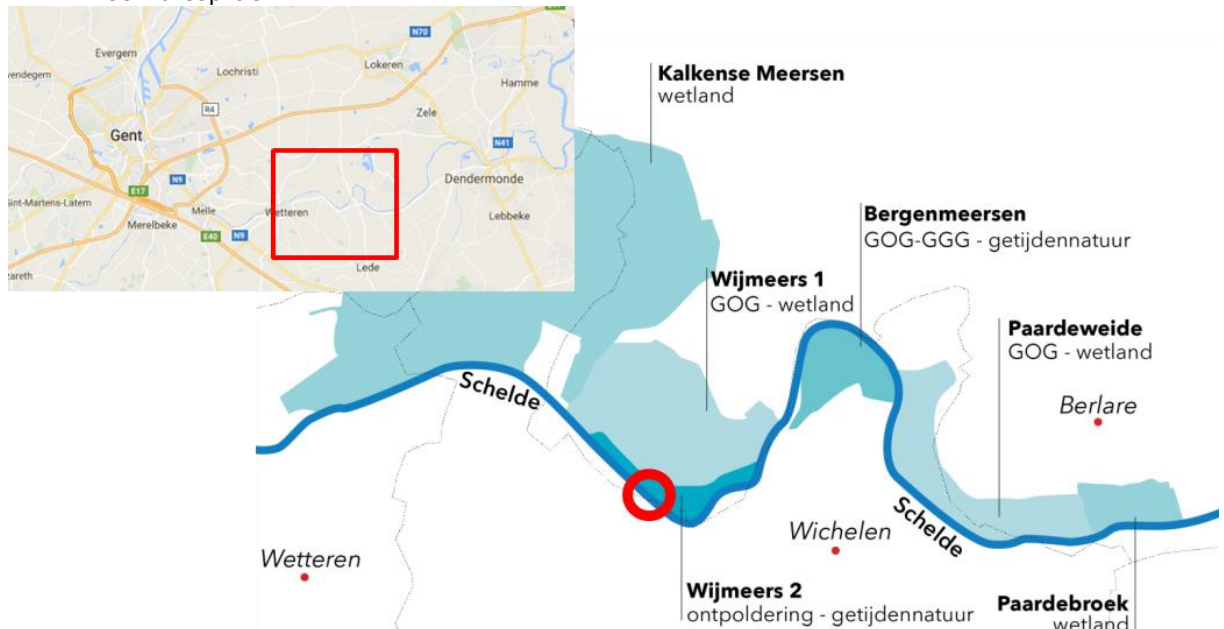
Bijlage E: Gemeten en theoretisch verloop van de hydraulische metingen ... 99

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden meerdere gebieden langs de Zeeschelde ontpolderd voor de ontwikkeling van getijdenatuur. Eén van deze gebieden is Wijmeers 2 (zie Figuur 1). Hier zijn in november 2015 enkele proeven uitgevoerd op de oude dijk:

- twee overslagproeven
- twee overloopprouven
- een bresproef.



Figuur 1 Overzichtskaart locatie proeven Wijmeers 2 (<http://sigmaplan.be>)

Voorliggend rapport presenteert de resultaten van opdrachten zoals gevraagd in bestek WL/16/35. Deze opdracht wordt uitgevoerd door HKV en Deltares.

1.2 Doel

Het doel is om via data-analyse meer inzicht te krijgen in het proces van het falen of doorbreken van een dijk door golfverslag en overloop.

1.3 Aanpak op hoofdlijnen

Om meer inzicht te krijgen in het proces van het falen of doorbreken van een dijk door golfverslag en overloop is het onderzoek opgedeeld in drie onderdelen:

- Analyse van de staat van de grasmatt (deelopdracht A);
- Analyse van de hydraulische belasting op het binnentalud van de dijk (deelopdracht B);
- Analyse van de erosie op het binnentalud van de dijk (deelopdracht C);
- Vergelijking en verklaring overeenkomsten en verschillen tussen verwachte en waargenomen erosie bij overloop en overslag (deelopdracht D);

Op basis hiervan wordt het begrip van het falen of doorbreken van een dijk vergroot.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een beschrijving van de golfverslag- en overloopprouven die zijn uitgevoerd op proeflocatie Wijmeers. In Hoofdstuk 3 is de sterkte van de grasmatt geanalyseerd. Hoofdstuk 4 beschrijft de afleiding van het theoretische en geobserveerde tijdsverloop van de hydraulische belasting. De classificatie van de grasmatt en de afleiding van de hydraulische belasting staan aan de basis van de (ontwikkeling van de) erosie op het binnentalud, wat is weergegeven in Hoofdstuk 5. De conclusies en de aanbevelingen voor een onderzoeksagenda zijn weergegeven in Hoofdstuk 6.

2 Proefbeschrijving

2.1 Algemeen

In de periode van 2 tot 15 november 2015 hebben verschillende proeven plaatsgevonden op de Scheldedijk te Wijmeers. In deze periode zijn golfverslag- en overlooppoeven uitgevoerd. Tijdens deze proeven zijn stroomsnelheden en waterdieptes opgemeten. Ook de verzadiging van de toplaag werd gemonitord. Tussen de proeven door zijn ook opnames van het talud gemaakt met behulp van LIDAR scans en foto's.

Aan de proeven hebben verschillende instituten meegewerkt. Daarom volgt hieronder een korte beschrijving van het verloop van de proeven. In dit hoofdstuk wordt de proefopstelling, de uitgevoerde metingen, het proevenprogramma en proefbevinden beschreven. De rapportage in dit hoofdstuk is een bondige beschrijving van de uitgevoerde proeven (synthese), voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar verschillende onderliggende rapporten (INFRAM, 2015; TUDelft, 2016). De beschrijving van de (initiële staat van de) grasmat, het bijbehorend grondonderzoek en de vegetatietellingen zijn vermeld in Hoofdstuk 3.

De uitgevoerde bresproeven vallen buiten de scope van dit onderzoek en zijn niet nader beschreven.

2.2 Proefopstelling

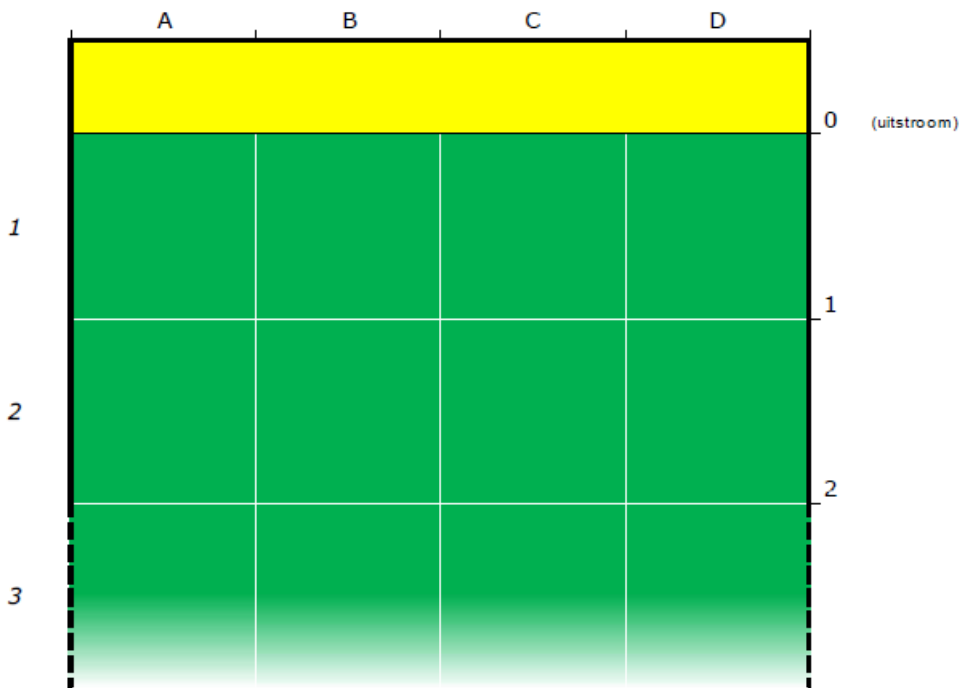
Voor de proeven op de Scheldedijk te Wijmeers zijn vier verschillende proefstroken opgebouwd. Op twee proefstroken zijn golfverslagproeven uitgevoerd. Op twee proefstroken zijn overlooppoeven uitgevoerd.

De proefopstelling voor overslag bestaat uit (INFRAM, 2015, zie ook Figuur 2):

- een 4 m brede sectie op de kruin en het talud aan de polderzijde, aan de zijkanten afgeschermd door geleidingswanden die met behulp van houten palen van ca. 1 m lengte op het talud worden aangebracht;
- een golfverslagsimulator op de kruin aan de Schelde-zijde (water stroomt over een deel van de kruin en het talud aan polderzijde);
NB: de op de kruin aanwezige onderhoudsweg is afgedekt met geotextiel.
- een hydrauliek aggregaat (powerpack) voor aansturing van de kleppen van de golfverslagsimulator;
- een frequentieel regelbare pomp met zuigleiding, welke het water vanuit de Schelde in de overslagsimulator pompt;
- een dieselgenerator om onder andere de pomp van elektriciteit te voorzien;



Figuur 2 Opstelling overslagproef incl. meetraster (bron: INFRAM, 2015)



Figuur 3 Definitie meetraster (bron: INFRAM, 2015)

De proefopstelling voor overloop bestaat uit (Figuur 4 - TUDelft, 2016):

- een 2 m brede sectie op de kruin en het talud aan de polderzijde, aan de zijkanten afgeschermd door geleidingswanden die met behulp van houten palen van ca. 1 m lengte op het talud worden aangebracht;
- Een uitstroom bak met frame waar het overloop debiet in wordt gepompt. Als de bak vol is stroomt dit debiet uiteindelijk over een uitlaat klep richting de dijk;
- een dieselgenerator om onder andere de pomp van elektriciteit te voorzien;



Figuur 4 Opstelling overloopproef (bron: TUDelft, 2016)

Een uitvoerige beschrijving van de proefopstelling is te vinden in INFRAM (2015).

Het wordt opgemerkt dat de testsecties in de verschillende documenten anders worden benoemd. De koppeling tussen deze aanduidingen is weergegeven in Tabel 1. In dit rapport wordt gewerkt met de benamingen voor golfverslag en overloopproeven zoals vermeld in de rapportage INFRAM (2015) en Flanders Hydraulics en Geotechniek (De Vos en Vincke, 2017). Figuur 5 toont een overzichtsfoto van de verschillende testsecties (bron: TUDelft, 2016).

Rapportage	Benaming				
Flanders Hydraulics Research	Proefstrook I	Proefstrook II	Proefstrook III	Proefstrook IV	Proefstrook V
INFRAM	Teststrook I	-	Teststrook III	-	-
TUD, Thesis L. Pensioen	Overtopping 1	Overflow 1	Overtopping 2	-	Overflow 2
GEO	Proefstrook I	Proefstrook II	-	-	-
ATO	Overslagproef 1	Overloopproef	Overslagproef 2	-	-

Tabel 1 Locatiebenaming in verschillende rapportages



Figuur 5 Testsecties voor golfoverslag- en overloop-proeven zoals getoond in rapportage TUD (TUDelft, 2016). Van rechts naar links Proefstrook I, Proefstrook II, Proefstrook III en , Proefstrook V (werkelijke locatie meer naar links).

2.3 Uitgevoerde metingen

Het doel van de proeven is om inzicht te krijgen in de initiatie en ontwikkeling van schade aan de dijk als gevolg van golfoverslag en overloop. Hiervoor zijn proeven gedaan op vier verschillende testsecties. De volgende metingen zijn uitgevoerd:

- LIDAR opnames door de Technische Universiteit Delft (TUD). Deze zijn beschreven in TUDelft (2017);
- Topografische plaatsbepaling is uitgevoerd door afdeling Algemene Technische Ondersteuning (ATO), departement Mobiliteit en Openbare werken, Vlaamse overheid;
- Voor de golfoverslagproeven zijn zes waterdruksensoren (Profound, BAT-sensors) in het talud geplaatst in de afdeklaag en genummerd zijn als BAT I-1 tot en met BAT I-6. Deze zijn geplaatst door de afdeling Geotechniek, departement Mobiliteit en Openbare werken, Vlaamse overheid ;
- Hydraulische metingen waarbij de stroomsnelheid en waterdiepte gemeten werd met behulp van paddle wheels en surfboards etc. uitgevoerd door INFRAM (overslagproeven) ism. TUDelft (overloopproeven);

2.3.1 Golfverslagproeven

Stroomsnelheid en de waterdiepte op het talud werden achtereenvolgens voor enkele overslaande golven van een bepaald volume gemeten. Deze metingen zijn uitgevoerd op proefstrook III. Deze locatie heeft een talud helling van 1:1.9 en een breedte van 4 m.

Voor aanvang van uitvoering van de hydraulische metingen zijn stroomsnelheidsmeters en waterdieptemeters geplaatst op de kruin, halverwege talud en bij de teen van de dijk. Niet alle meetinstrumenten bevatten realistische waarden en daarom zijn alleen de resultaten gebruikt van de meetinstrumenten welke volgens het Factual Report van Infram correct gekalibreerd waren (INFRAM, 2015 – Bijlage D). In Tabel 2 zijn de karakteristieken beschreven van de solitaire golven waarvoor hydraulische metingen zijn uitgevoerd.

Meting	Golf volume (l/m)	Sessie
1, 2, 3	500	1
4, 5, 6	1000	1
7, 8, 9	1500	1
10, 11, 12	2000	1
13, 16, 17	2500	2
14	3000	2
15	3500	2

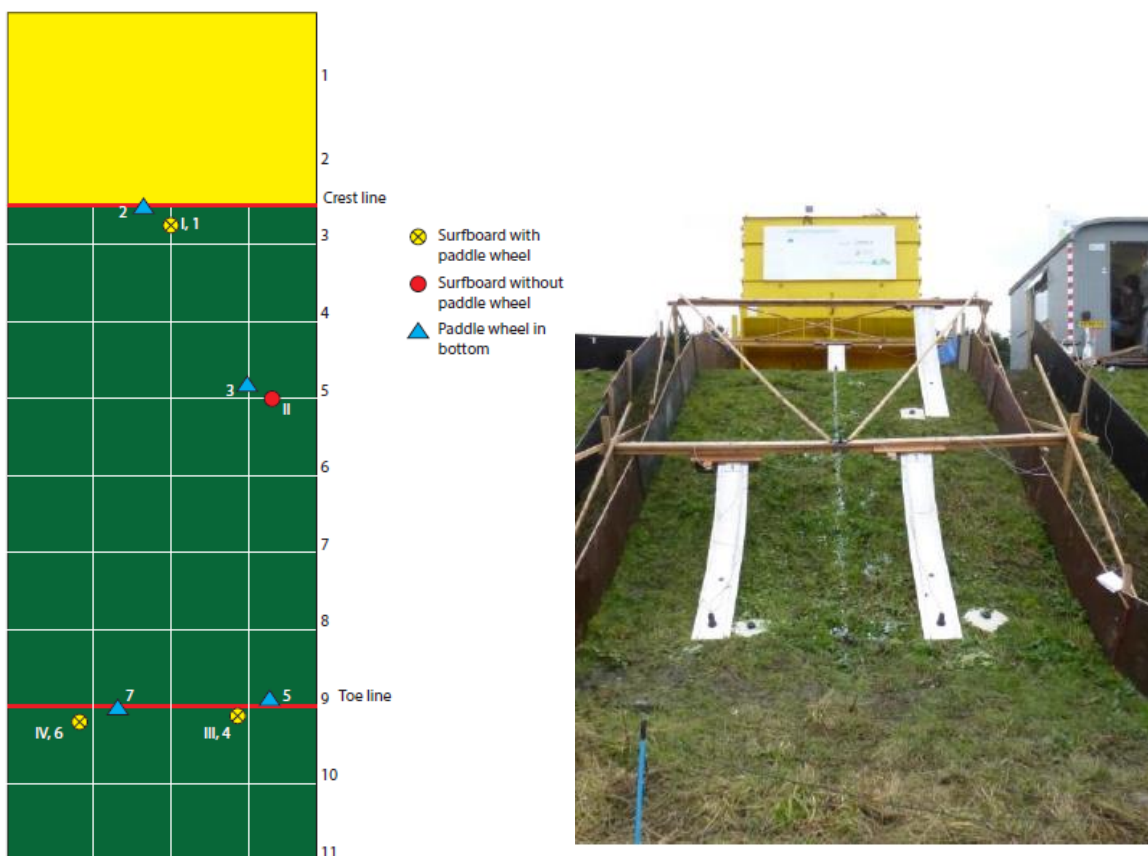
Tabel 2 Karakteristieken golven voor hydraulische metingen op proefstrook III

Tijdens de hydraulische metingen zijn in totaal zeventien metingen uitgevoerd waarbij elke meting overeenkomt met een enkele golf. Elke meting bestaat daarmee uit een golf met een bepaald volume, variërend tussen 500 l/m en 3500 l/m.

Op de dijk zijn verschillende meetinstrumenten geplaatst welke de waterdiepte en stroomsnelheid kunnen meten. De waterdiepte wordt gemeten door middel van zogenoemde surfboards en de stroomsnelheid wordt gemeten met behulp van paddle wheels. De stroomsnelheid wordt op twee dieptes gemeten; dicht tegen het talud en bij de oppervlakte. De meting dicht tegen het talud is uitgevoerd met een paddle wheel welke op het talud is geplaatst. De meting aan de oppervlakte van de golftong is uitgevoerd met een paddle wheel welke aan de onderkant van het surfboard is geplaatst. In Tabel 3 staat een overzicht van de locaties, functies en bruikbaarheid van de toegeleverde meetgegevens van de verschillende meetinstrumenten.

Type	Nummer	Locatie	Functie	Bruikbaarheid
Surfboard	I	Kruin	Bepaling waterdiepte	Bruikbaar
Surfboard	II	Talud	Bepaling waterdiepte	Bruikbaar
Surfboard	III	Teen	Bepaling waterdiepte	Niet bruikbaar
Surfboard	IV	Teen	Bepaling waterdiepte	Niet bruikbaar
Paddle wheel	1	Kruin	Stroomsnelheid bovenkant golf	Bruikbaar
Paddle wheel	2	Kruin	Stroomsnelheid onderkant golf	Bruikbaar
Paddle wheel	3	Talud	Stroomsnelheid onderkant golf	Bruikbaar
Paddle wheel	4	Teen	Stroomsnelheid bovenkant golf	Niet bruikbaar
Paddle wheel	5	Teen	Stroomsnelheid onderkant golf	Niet bruikbaar
Paddle wheel	6	Teen	Stroomsnelheid bovenkant golf	Niet bruikbaar
Paddle wheel	7	Teen	Stroomsnelheid onderkant golf	Niet bruikbaar

Tabel 3 Locaties en bruikbaarheid gebruikte meetinstrumenten



Figuur 6 Locaties van meetinstrumenten. Links een illustratie van de locaties, rechts een foto van de locaties (Pensioen, 2016)

Voor een detailoverzicht van uitgevoerde proeven (en wanneer deze zijn uitgevoerd) en de plaatsing van de meetinstrumenten (tijdens de hydraulische metingen) wordt verwezen naar de bijlages A en C van het Factual Report van INFRAM (2015).

De golfverslagproeven zijn uitgevoerd met de golfverslagsimulator ontworpen door Van der Meer Consulting en Van der Meer Innovation door INFRAM BV. Een uitgebreide beschrijving van deze proeven is opgenomen in INFRAM (2015), Ponsioen (2016) en TUDelft (2016).

In totaal zijn zes golfverslagproeven uitgevoerd. Vijf van deze proeven zijn uitgevoerd op proefstrook I. De helling van het talud van deze proefstrook is 1:1.8, de breedte van de teststrook is gelijk aan 4 meter. Voor het overzicht van uitgevoerde proeven (en wanneer deze zijn uitgevoerd) en de verdeling van het overslagdebiet wordt verwezen naar de bijlages A en B van het Factual Report van INFRAM (2015). De significante golfhoogte en golfperiode tijdens de verschillende proeven zijn weergegeven in Tabel 4.

q (l/s per m)	H _s (m)	T _p (s)	T _m (s)	T _{m-1,0} (s)	cot α [-]	ξ _m [-]	R _c [m]	P [%]	N _w [-]	V _{max} [l/m]
1	0,4	2,53	2,11	2,30	2,78	1,5	0,76	18,1	617	113
5	0,6	3,10	2,58	2,82	2,78	1,5	0,91	33,6	936	349
10	0,8	3,58	2,98	3,25	2,78	1,5	1,13	38,6	931	672
25	1,2	4,38	3,65	3,98	2,78	1,5	1,55	44,9	885	1662
50	1,3	4,56	3,80	4,15	2,78	1,5	1,40	57,5	1089	2230

Tabel 4 Significante golfhoogte voor de verschillende overslagdebieten (Infram, 2015, Factual report)

In Tabel 5 zijn de verschillende overslagdebieten tijdens de eerste vijf proeven op proefstrook I weergegeven. Per proef is ook aangegeven of er een LIDAR scan is uitgevoerd vooraanvang en na afloop van de proef en onder welke naam deze scan bekend is.

Overslagdebiet (l/s/m)	Duur proef	Uitvoering LIDAR scan	
		Voor aanvang	Na afloop
1	24 minuten	-	-
5	2 uur	Overtopping_before5.txt	Overtopping_after5.txt
10	2 uur	-	Overtopping_after10.txt
25	2 uur	Overtopping_before25.txt	Overtopping_after25.txt
50	12 minuten	-	-

Tabel 5 Overzicht van debiet en duur golfverslag proeven op locatie Proefstrook I

Na afloop van de hydraulische meting (zie paragraaf 2.3) op locatie Proefstrook III volgde hier nog een golfverslag proef (de zesde proef) welke alleen beschreven is in de INFRAM rapportage. De proef had een overslagdebiet van 25 l/s/m en duurde 1 uur en 27 minuten, zie Tabel 6.

Overslagdebiet (l/s/m)	Duur proef	Uitvoering LIDAR scan	
		Voor aanvang	Na afloop
25	1 uur 27 minuten	-	-

Tabel 6 Overzicht van debiet en duur golfverslag proef op locatie Proefstrook III.

2.3.2 Overloopproeven

Op proefstrook II zijn overloopproeven uitgevoerd met een overloop debiet van 10, 25, 50 en 85 l/s/m. De breedte van de teststrook tijdens deze proeven was 2,0 meter. De breedte van de teststrook is vervolgens verkleind naar 1,0 meter waardoor er de mogelijkheid werd gecreëerd om proeven uit te voeren met een overloopdebiet van circa 125 l/s/m en 170 l/s/m.

Voor de overloopproeven zijn zes waterdruksensoren (Profound, BAT-sensors) in het talud geplaatst in de afdeklaag en genummerd als BAT II-1 tot en met BAT II-6. Deze zijn geplaatst door de afdeling Geotechniek.

In Tabel 7 is het gemeten debiet, de proefduur en het proefvak weergegeven en is aangegeven of er LIDAR scans zijn gemaakt voor aanvang en na afloop van de proef. Vak A staat voor de linkerhelft van de 2 meter brede teststrook, vak B voor de rechterhelft van de 2 meter brede proefstrook II (zie Figuur 7).

Overloopdebiet (l/s/m)	Duur proef	Breedte	Uitvoering LIDAR scan	
			Voor aanvang	Na afloop
10	2 uur	2 m (vak A,B)	Overflow_before10.txt	Overflow_after10.txt
25	2 uur	2 m (vak A,B)	Overflow_before25.txt	Overflow_after25.txt
50	2 uur	2 m (vak A,B)	-	Overflow_after50.txt
85	2 uur	2 m (vak A,B)	-	Overflow_after85.txt
125	2 uur	1 m (vak A)	-	-
170	2 uur	1 m (vak A)	-	-

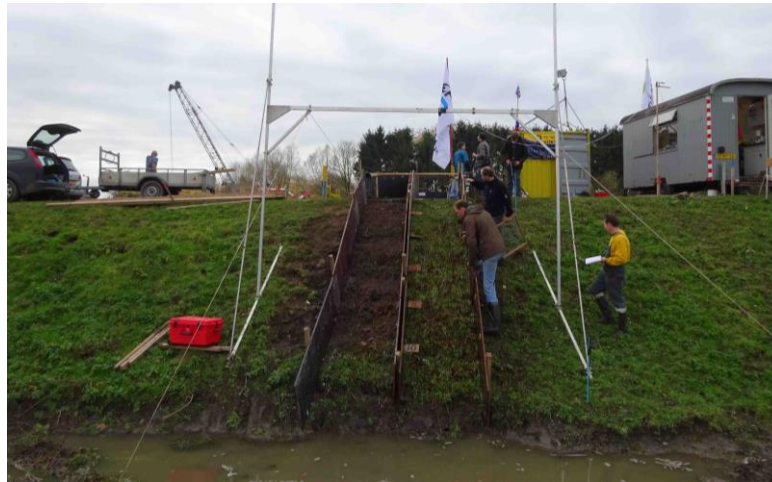
Tabel 7 Overzicht van debiet en duur overloop proeven op locatie Proefstrook II (bron: TUD, 2016).

In de rapportage van GEO (De Vos en Vincke, 2017) wordt vermeld dat na afloop van de golfoverloop proeven bleek dat drie van de zes BAT-sensor naalden geplooid waren. Mogelijk plooiden de naalden bij het inbrengen van de sensoren op locatie Proefstrook I of locatie Proefstrook II en zijn de meetwaarden niet correct. Het gaat om de sensoren 103829, 103836 en 103830 respectievelijk geplaatst in BAT II-3, II-4 en II-5.

Proefstrook V is gebruikt voor een tweede overloopproef waarbij de proefstrook is opgesplitst in twee delen (elk 1 meter breed, zie Figuur 7). Voor de eerste helft van de proefstrook is er een overloop proef uitgevoerd met 170 l/s/m. Voor de andere helft van de proefstrook is de toplaag met de graszoden verwijderd en is er een overloopproef uitgevoerd met 30 l/s/m.

Overslagdebiet (l/s/m)	Duur proef	Breedte	Bijzonderheden
170	2 uur	1 m (Vak B)	Geen
30	45 min	1 m (Vak A)	Grasmat verwijderd voorafgaand aan de proef

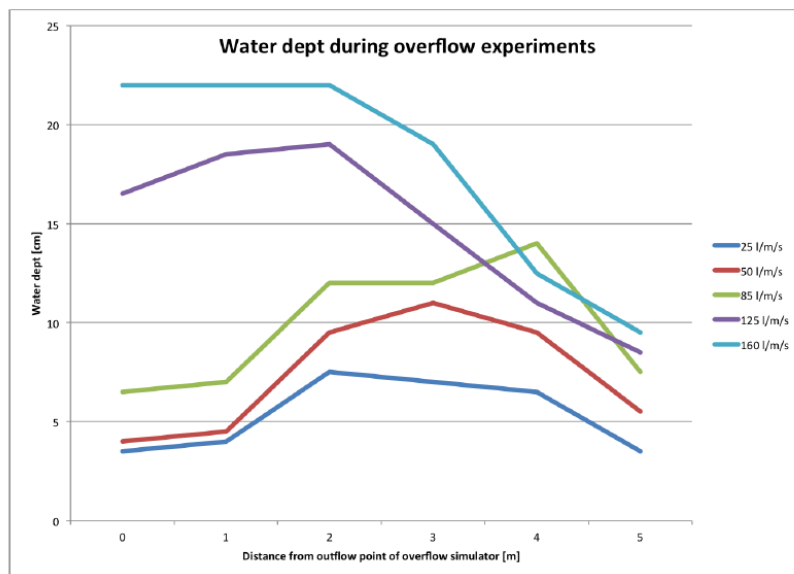
Tabel 8 Overzicht van debiet en duur overloop proeven op locatie Proefstrook V (bron: TUD, 2016).



Figuur 7 Overloopproof op proefstrook V waarbij de strook is opgesplitst in twee delen, waarbij voor vak A (links in de figuur) de grasmat is verwijderd voorafgaande aan de proef

Van de overloop proeven zijn waterdiepte en stroomsnelheid metingen beschikbaar (TUDelft, 2016 en Ponsioen, 2016).

De waterdiepte metingen zijn alleen op de kruin beschikbaar en zijn weergegeven in Figuur 8. Gezien in TUDelft (2016), Ponsioen (2016) of INFRAM (2015) geen schade op de kruin is beschreven (of waargenomen) worden deze metingen niet gebruikt in voorliggende analyse.



Figuur 8 Waterdiepte metingen op kruin (bron: TUDelft, 2016)

De stroomsnelheidsmetingen zijn op drie manieren uitgevoerd (Ponsioen, 2016).

Stopwatch

Met een stopwatch is gemeten hoe lang een bal over een lengte van 6 m door de stroming wordt meegevoerd (uitgevoerd bij $q = 125$ l/s/m en 160 l/s/m).

Paddle wheel

De stroomsnelheid is gemeten met een paddle wheel. In Ponsioen (2016) wordt opgemerkt dat er onduidelijke uitkomsten zijn en dat dit nog verder bestudeerd dient te worden. Om deze reden worden deze metingen niet in voorliggende analyse meegenomen.

Infrarood camera's

Er zijn metingen met infrarood camera's uitgevoerd. Dit is beschreven in Ponsioen (2016). Echter, uit de analyse van Ponsioen (2016) volgt geen eenduidige snelheid per test.

In de analyse wordt uitgegaan van de metingen met een stopwatch. Deze metingen zijn als volgt:

$$q = 125 \text{ l/s/m} \rightarrow v = 2,9 \text{ m/s (minimum: } v_{\min} = 2,6 \text{ m/s, maximum: } v_{\max} = 3,3 \text{ m/s)}$$

$$q = 170 \text{ l/s/m} \rightarrow v = 3,2 \text{ m/s (minimum: } v_{\min} = 3,1 \text{ m/s, maximum: } v_{\max} = 3,4 \text{ m/s)}$$

De minimum en maximum waarden geven de range weer van de verschillende waarnemingen (met behulp van de stopwatch) welke zijn gerapporteerd in Ponsioen (2016) en TUDelft (2016).

De verschillende proeven zijn samengevat in Tabel 9.

Proefstrook	q (l/s/m)	t (uur)	v (m/s)
II	10	2	onbekend
	25	2	onbekend
	50	2	onbekend
	85	2	onbekend
	125	2	2,9 (2,6 – 3,3)
	170	2	3,2 (3,1 – 3,4)
V-vak B	170	2	onbekend
V-vak A	30*	2	onbekend

* grasmat verwijderd voorafgaande aan de proef

Tabel 9 Samenvatting overloopproef.

2.4 Proevenprogramma

Deze paragraaf beschrijft een kort overzicht van de activiteiten in de periode van 2 tot en met 11 november 2015-. Voor een gedetailleerd overzicht van de golfverslagproeven wordt verwezen naar het INFRAM-rapport en voor de overloopproeven naar het TUD-rapport.

- Op 2 en 3 november heeft de opbouw van de overslagsimulator plaatsgevonden plus installatie van de pompen;
- Op 4 november zijn de proefstroken I, II, III, IV en V ingericht, alsmede is de overslagproef met 1,5,10 l/s/m uitgevoerd op proefstrook I;
- Op 5 november zijn de golfverslagproeven uitgevoerd met een volume van 25 en 50 l/s/m uitgevoerd op proefstrook I;
- Op 6 november is de hydraulische meetsectie ingericht op proefstrook III, waarna de hydraulische metingen voor de in volume oplopende golven zijn uitgevoerd. Na afloop hiervan is een golfverslagproef met een volume van 25 l/s/m uitgevoerd op proefstrook III;
- Op 9 november is de overloopsimulator geïnstalleerd op proefstrook II;
- Op 10 november zijn overloopproeven uitgevoerd op proefstrook II met volumes van 10, 25, 50 en 85 l/s/m;
- Op 11 november zijn de overloopproeven van 170 en 30 l/s/m uitgevoerd op proefstrook V;

2.5 Resultaten

Het algemeen beeld voorafgaand aan de proeven was dat er sprake was van een verruigde grasvegetatie en op sommige locaties een zeer onregelmatig oppervlak met aanwezigheid van veel kuilen, bulten en stenen (de initiële staat van de grasmat is uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 3). Daarnaast bleek proefstrook I een konijnenhol te bevatten.

2.5.1 Schade ontwikkeling proefstrook I

Na afloop van de 1 l/s per meter-proef lijkt de grasvegetatie enigszins op te stuiken. Een mogelijk begin van schade lijkt te ontstaan op de plaatst waar een molshoop zat (Figuur 12 – Vak 7A/B, zie ook INFRAM, 2015). Na uitvoering van de 5 l/s per meter-proef is de schade niet substantieel veranderd ten opzichte van de eerste proef. Vegetatie ligt dakpansgewijs op het talud. Wel worden de onregelmatigheden in het oppervlak van het talud nadrukkelijker zichtbaar (Figuur 12).

De 10 l/s/m-proef werd stilgelegd na 50 minuten. Er was bovenaan het talud een gat ontstaan met een diameter van circa 0,2 meter en een diepte van 0.5 meter (Vak 4/5A, zie Figuur 9). Tijdens de proef verdween hierin op grote schaal overgeslagen water. Uiteindelijk bleek het een konijnenhol te betreffen. Daarnaast is na hervatting van de proef een ander gat ontstaan buiten de proefstrook op een horizontale afstand van 3 meter ten opzichte het konijnenhol in de proefsectie. Beiden staan met elkaar in verbinding (zie Figuur 10 voor een impressie van het buiten de proefstrook ontstane gat).

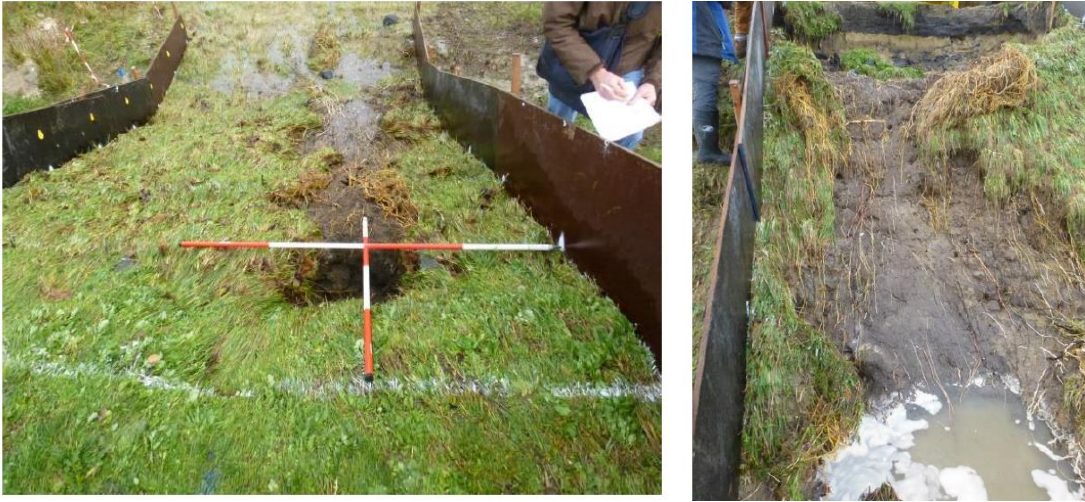


Figuur 9 Gat rechts onderin subvak 4A en bovenin 5A (bron: INFRAM, 2015).



Figuur 10 Het naast de proefstrook ontstane gat na afloop van de proef met 10 l/s/m

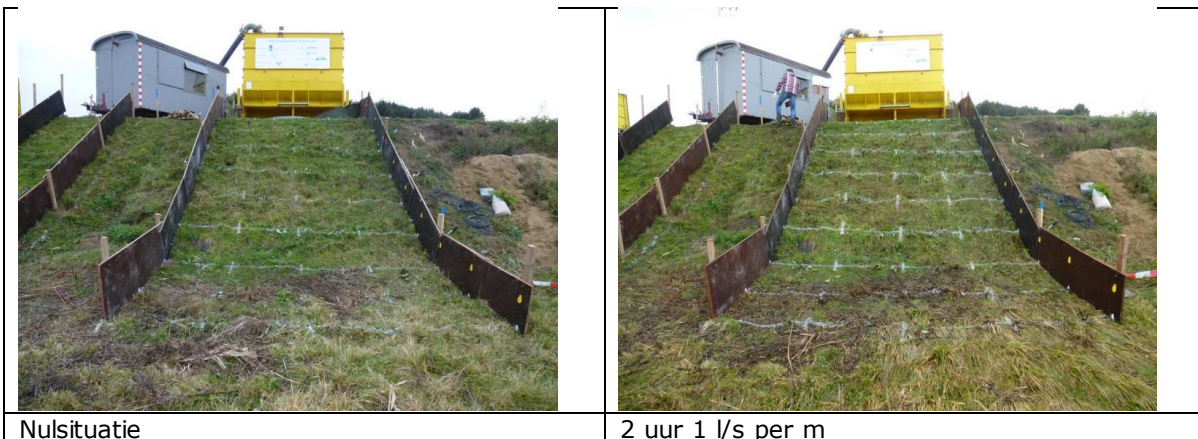
Door uitspoeling van zand uit dit ontstane gat was er sprake van een toenemende verzakking welke doorzette tijdens de 25 l/s per meter proef. Al na 3 minuten was naast een gat ook sprake van losscheuring van de graszode. Na 6 minuten in de proef kwam er ook een graspol los bij de teen en na 12 minuten ontstond er een erosiegeul in de richting van de teen met een lengte van 3 meter, breedte van circa 0.4 meter en een diepte van 0.3 tot 0.4 meter. Na 1 uur 25 l/s/m-proef was het gat wel groter geworden, maar nagenoeg niet dieper (Figuur 12). In het tweede uur zette de erosie door. Na afloop van de proef was de grasmat op grote delen van het talud afwezig (Figuur 11).



Figuur 11 Schade na 1 uur 25 l/s/m (links) en na 2 uur 25 l/s/m (rechts). Bron: INFRAM (2015)

De golfoverslagproef met 50 l/s per meter is wel gestart, maar na slechts 12 minuten stopgezet in verband met de schadeontwikkeling welke een gevaar zou vorm voor de stabiliteit van de simulator (Figuur 12).

Op basis van de beschrijvingen en de foto's moet er rekening mee worden gehouden dat de aanwezigheid van het konijnenhol een significante invloed kan hebben gehad op de schadeontwikkeling en daarmee op de uitkomsten van voorliggende analyse.





Figuur 12 Overzicht van de schadeontwikkeling tijdens de verschillende uitgevoerde golfverslagproeven

2.5.2 Schade ontwikkeling proefstrook II

Na uitvoering van de 10 en 25 l/s/moverlooppoef gedurende telkens 2 uur was nauwelijks schade zichtbaar. Vervolgens is besloten om het volume te verhogen naar 50, 75 en 85 l/s per meter (opnieuw gedurende telkens 2 uur).

Na 2 uur opleggen van een afvoer van 85 l/s per meter, tevens de maximale pomp capaciteit, was er nog steeds geen significant verschil opgetreden in de schadeontwikkeling.

Omdat de doelstelling van de proef was om de schadeontwikkeling te onderzoeken, werd besloten om de breedte van de proefstrook te reduceren van 2 naar 1 meter. Dit maakt het

mogelijk om met de gebruikte pomp een afvoer te generen tot 170 l/s per meter. Deze toename in afvoer maakte het mogelijk om uiteindelijk een beginnende schadeontwikkeling te creëren op de grasmatten. Echter, de verwachting was dat het nog vele uren zou duren voordat de grasmatten zou wegslaan en initiatie van een bres zou ontstaan. De proef met een debiet van 170 l/m heeft in totaal 2 uur geduurd.

2.5.3 Schade ontwikkeling proefstrook III

Na afloop van de hydraulische metingen op proefstrook III, is er nog een mogelijkheid geweest voor uitvoering van een golfverslagproef van 25 l/s per meter. Voorafgaand aan de proef was sprake van een verruigde grasvegetatie en een zeer onregelmatig oppervlak. Door uitvoering van de hydraulische metingen zijn er lokaal kale plekken ontstaan.

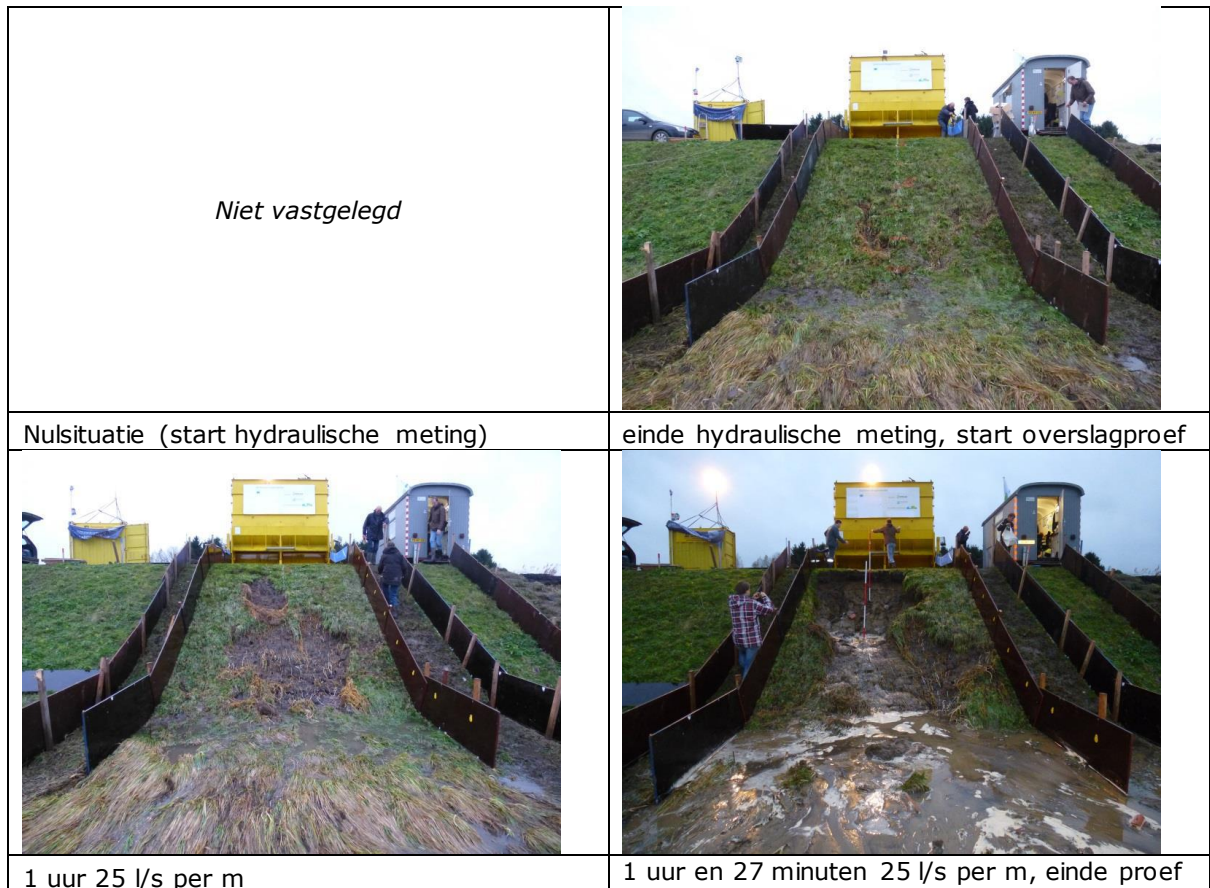
De golfverslagproef van 25 l/s per meter is na een uur onderbroken zodat het talud kon worden geïnspecteerd. Er bleek een erosiekuil te zijn ontstaan op een afstand van 5 tot 6 meter vanaf de kruin. De grasmatten was hier weggeslagen, zodat de deklaag van de klei goed zichtbaar was. Aansluitend op de kuil, was er ook een erosiegeul ontstaan, vanaf de 6-meter lijn tot voorbij aan de teen. De grasmatten is hier weggeslagen en de deklaag van klei is goed zichtbaar (zie Figuur 13).



Figuur 13 Overzicht schade talud na 1 uur 25 l/s per meter

Het vervolg van de proef heeft nog 27 minuten geduurd. Na 20 minuten verdiepte de erosiegeul zich dusdanig dat er sprake was van grote hoeveelheden uitspoelend zand. Terugschrijdende erosie leidde ertoe dat in een razendsnel tempo de kruin werd bereikt en de standzekerheid van de simulator opnieuw in gevaar kwam.

De eindsituatie toonde dat vanaf de kruinlijn tot de teen de proefstrook volledig was weggespoeld. Ter hoogte van de 6 meter-lijn werd een maximale diepte gemeten van 1.2 meter, waarbij veel puin zichtbaar was. Vanaf dezelfde 6 meter-lijn was de grasmatten wel grotendeels weggeslagen, maar was de onderliggende deklaag nog niet doorbroken.



Figuur 14 Schadeontwikkeling tijdens golfverslagproef op proefstrook III

2.5.4 Schade ontwikkeling proefstrook V

Met de ervaring van de overloopproof op proefstrook II, is besloten om de proefstrook gelijk op te splitsen in twee delen, elk 1 meter breed, vak A en B. Waarbij de grasmat in vak B ongemoeid gelaten is. De grasmat van vak A - is verwijderd voor de start van de overloopproof. Dit voorzorg in de mogelijkheid om een overloopproof uit te voeren op zowel de grasmat alsmede de onderliggende kleilaag.

De sectie met de grasmat (Vak B) werd gedurende 2 uur onderworpen aan 170 l/s per meter. Er ontstond, net als op proefstrook II, een minimale schadeontwikkeling.

Vervolgens werd een test uitgevoerd op de proefstrook waar de grasmat van verwijderd was (Vak A). Deze overloopproof begon met een volume afvoer van 30 l/s per meter en zorgde na 15 minuten al tot schadeontwikkeling. Na 45 minuten was er significante schade en werd er besloten de proef op Vak A te stoppen om Vak B verder te belasten¹. Na 9 minuten overloop op Vak B stortte de afscheiding tussen de twee secties in, waarbij een stroom onder de afscheiding de kleilaag dusdanig had geërodeerd dat de grasmat meegetrokken werd.

Vervolgens is besloten om de houten afscheiding tussen de twee secties geheel te verwijderen en liep de overloopproof over Vakken A en B nog door voor 19 minuten. Na deze periode had er

¹ In de rapportages van TUDelft (2016) of Pensioen (2016) is niet vastgelegd met welk overslaggebied deze dit is uitgevoerd.

een dussdanige wegspoeling van de proefstrook plaatsgevonden (zie Figuur 15) dat de bodem vlak onder de kruinlijn geotechnisch instabiel werd en de proef is stopgezet.



Figuur 15 *Overzicht schade talud na afloop overloop proef 30 l/s per meter (Vak A links, Vak B rechts)*

3 Beschrijving van de grasmat

Dit hoofdstuk beschrijft de sterkteparameters van de grasbekleding op het binnentalud van de vier proefsecties waarop de overslag- en overloopproeven plaatsvonden. Hierbij wordt ingegaan op de geotechnische aspecten en de vegetatie. Tevens wordt er gekeken vanuit de toetsregels die gelden bij de veiligheidsbeoordeling zoals deze in Nederland periodiek wordt uitgevoerd.

3.1 Grondmechanische beschrijving

De grondmechanische eigenschappen van de dijk zijn van belang om de sterkte van de grasmat en het verloop van het faalproces te duiden. Gegevens hierover zijn verzameld tijdens een aantal onderzoeken waarbij op verschillende locaties in de dijk monsters zijn genomen. De volgende onderzoeken zijn gebruikt:

- G-tec (2014). Geofysische detailopnames landtalud. Meetzone Wijmeers.
- GEO Vlaanderen De Vos en Vincke, (2017). Verslag geotechnische proeven Wijmeers. Afdeling Geotechniek, Zwijnaarde.
- IRSTEA (2016). Dignes de l'Escaut – BELGIQUE. Etude des propriétés des sols constitutifs des digues.

3.1.1 Uitgevoerde onderzoeken

De gebruikte methoden in het onderzoek van **G-tec** omvatten:

- geo-elektrische metingen (ERT): meting van de elektrische weerstand, wat wordt geïnterpreteerd naar het type materiaal
- hoge-resolutie elektromagnetisch onderzoek (EM): meting van de schijnbare geleidbaarheid van de grondlagen of objecten
- 2D grondradar (GPR): gebruikt voor het bepalen van het type materiaal en het onderscheiden van verschillende grondlagen
- enkele grondboringen (locatie zie Figuur 16): voor bepaling van het type materiaal.

De metingen in het onderzoek van **GEO** omvatten:

- waterspanningen
- infiltratieproeven
- ongeroerde monsters (4 boringen)
- geroerde monsters van kern en kleilaag

De metingen in het onderzoek van **IRSTEA** omvatten:

- ongeroerde monsters (4 boringen)
- geroerde monsters van kern en kleilaag
- JET testen

De locaties van de GEO en G-tec boringen zijn weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16 Locaties G-tec boringen met indicatie van ligging proefsecties. Paarse bolletjes zijn GEO-boringen

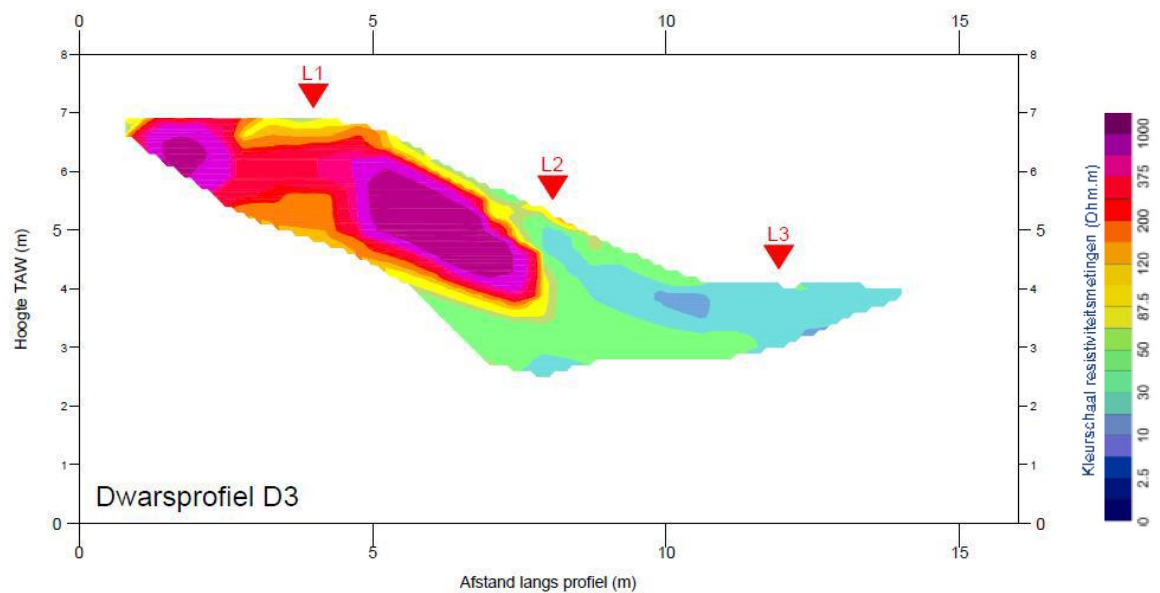
3.1.2 Globale karakterisering dijklichaam

De opbouw van de dijk is zeer heterogeen, wat kan worden opgemaakt uit zowel de boringen als de ERT metingen (G-tec, 2014). Zo ontbreekt op meerdere plaatsen de afdekkende kleilaag. Dit gegeven van heterogeniteit, gecombineerd met het feit dat de monsters niet altijd ter plaatse van de proefsecties zijn genomen, zorgt voor een grote onzekerheid in de schatting van de (geotechnische) sterkteparameters.

Globaal kan de dijk worden gekarakteriseerd als een zanddijk met een afdekkende kleilaag (G-tec, 2014; Van Damme et al., 2016). Deze opbouw is ook zichtbaar in Figuur 17. De kleilaag is echter niet overal aanwezig (G-tec, 2014), mogelijk ook niet bij de kruin ter plaatse van proefsectie III (boring C*). Als laatste wordt opgemerkt dat een konijnenhol aanwezig was in proefsectie I.



Figuur 17 Proefsectie I na de proef (Infram, 2015, Factual report)



Figuur 18 ERT dwarsprofiel D3 bij proefstrook II (G-tec, 2014) op basis van resistiviteitsmeting. Groen-blauw duidt op klei, rood-paars op zand.

3.1.3 Grondparameters gebaseerd op GEO

Boringen G7L en G7R zijn uit proefsectie I gehaald na de overslagproeven (geroerd):

- weinig humush. zandh. Klei
- Vloeigrens 59-67 %
- Plasticiteits Index PI 37-39 %
- Zandgehalte: 35 %

Boring B5-1 is naast proefsectie V genomen (ongeroid):

- weinig kalkh. zandh.klei (bovenste 15 cm)
- weinig kleih à weinig leemh fijnzand (15-30 cm)
- Vloeigrens 21-39 %
- Plasticiteits Index PI 4-19 %
- Zandgehalte: 42-80%
- Volumieke massa: 1717-1775 kg/m³
- Droge massa: 1398-1518 kg/m³
- Schuifproef CD: $\phi' = 34$ $c'=0$

Boringen B5-2, B6-1 en B6-2 zijn naast proefsectie V genomen (ongeroid):

- weinig kalkh. zandh.klei
- Zandgehalte: 90-95%
- Volumieke massa: 1554-1610 kg/m³
- Droge massa: 1460-1486 kg/m³
- Schuifproef CD: $\phi' = 37,5 - 41$, $c'=0$

3.1.4 Grondparameters gebaseerd op G-tec

In het rapport van G-tec is alleen informatie gegeven over de grondsoort in de boringen, en niet over de grondparameters. De boringen en bijbehorende grondopbouw ter plaatse van de proefsecties zijn opgenomen in Tabel 10. Bijlage B bevat de betreffende lithologs (profielen).

Boring	Locatie	Opbouw volgens Tabel 3 in G-tec (2014)
C	op kruin tussen strook I en II	0-10 cm klei/zand 10-35 cm silt/zand 45-100 cm zand
C*	op kruin tussen strook II en III	0-15 cm zand 15-100 cm klei/zand
D	op kruin bij strook V	0-10 cm silt/zand 30-100 cm zand
O2	op kruin bij strook III	0-100 cm zand
O7	op talud bij strook III	0-15 cm klei 15-100 cm zand
O9	binnenteen bij strook III en V	0-40 cm klei

Tabel 10 Grondopbouw van boringen G-tec

De boringen C, C* en D liggen op de kruin en geven een beeld van de variatie in de lengterichting van de dijk. De dijk is daar grotendeels opgebouwd uit zand, met een zandige klei en kleihoudend zand in de bovenste laag. De boringen O2, O7 en O9 vormen een dwarsprofiel ter plaatse van proefsectie III en liggen dus relatief dicht bij de ERT meting van Figuur 18. Hieruit blijkt de kleilaag bij de binnenteen snel dunner te worden op het talud, en deze is op de kruin zelfs vaak helemaal afwezig.

3.1.5 Grondparameters gebaseerd op IRSTEА

De grondparameters zijn ontleend aan Tabel 1 van het IRSTEА rapport. Kolom Site 1 - T1 betreft de toplaag, Site 1 – T2 betreft het dijklichaam. De exacte locatie van de beproefde monsters is niet beschreven in het rapport. Hieronder zijn de parameters van de toplaag gegeven.

Toplaag Site 1 - T1:

Type: Kleiige silt

Vloeigrens 48 %

Plasticiteits Index PI 13 %

Zandgehalte: 36%

Volumieke massa: 1903 kg/m³

Droge massa: 1503 kg/m³

3.1.6 Conclusies Grondparameters

De bodemopbouw kan worden beoordeeld aan de hand van de G-tec gegevens. De eigenschappen van de kleilaag zoals de vloeigrens, plasticiteitsindex en het zandgehalte kunnen uit de boringen van GEO en IRSTEА worden bepaald. De schuifsterkte is voor een aantal boringen bepaald door GEO, dit betreft echter alleen zand of zandige klei. Door G-tec en IRSTEА zijn geen schuifproeven uitgevoerd.

Op basis van alle gegevens is een typisch geschematiseerd dwarsprofiel bepaald (Tabel 11). Door het beperkte aantal metingen en de variatie over het langprofiel, is het niet mogelijk om sterkteparameters per proefsectie af te leiden. We nemen hiervoor een gelijke waarde voor alle vier de proefsecties.

Parameter	Waarde
Kruinhoogte	7,10-7,17 mTAW
Hoogte binnenteen (polderzijde)	4,20-4,23 mTAW
Taludhelling	1:1,7 tot 1:1,9
Vegetatie	onregelmatige verruigde grasvegetatie (vooral onderin)
Discontinuïteiten	Stenen in proefsecties. Konijnenhol in proefsectie I.
Grondsoort kern	Zandig
Grondsoort bekleding	Zandige tot vette klei
Plasticiteitsindex	4-39 %
Nat gewicht kleilaag	1700-1900 kg/m ³
Vloeigrens	20-67 %
Zandgehalte	35-80 %
dikte kleilaag ²	0-75 cm

Tabel 11 Geometrie en grondmechanische parameters dijkprofiel

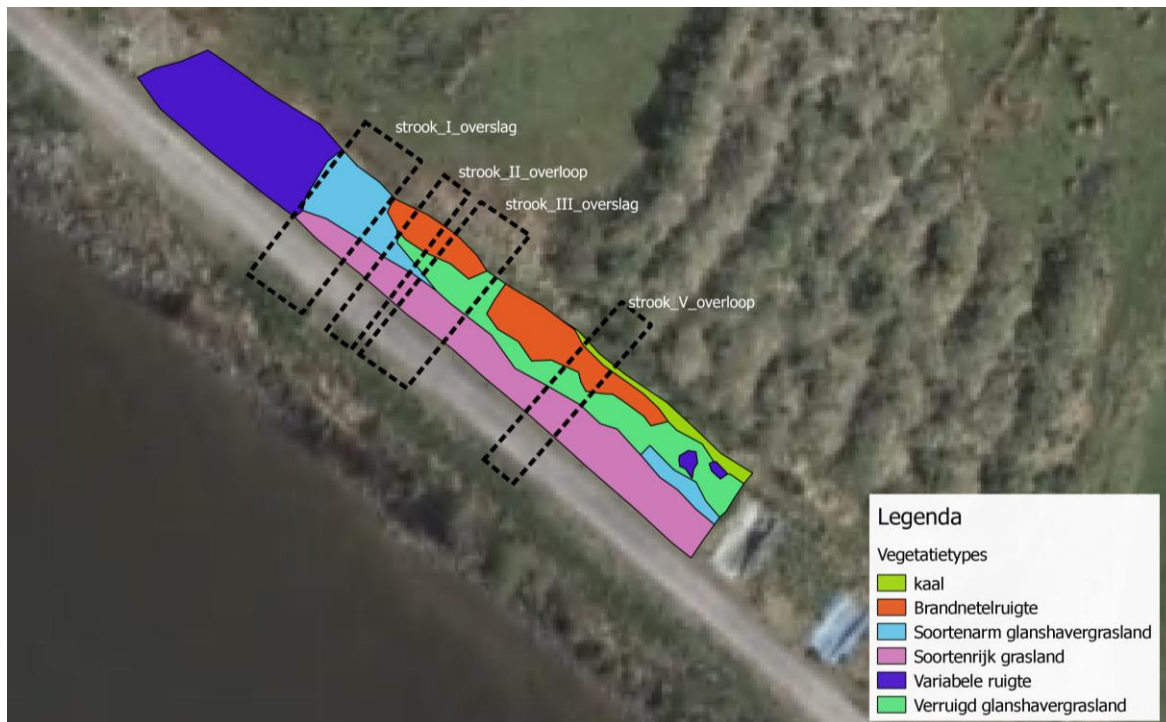
² Kleilaag wordt dunner richting de kruin (G-tec, 2014)

3.2 Classificatie proefsecties in vegetatiefamilies

3.2.1 Vegetatietypen Wijmeers

De vegetatietypen zijn gebaseerd op de INBO inventarisatie van VegkaartBresproef2015_v2.shp (Figuur 19). De classificatie per proefsectie is vermeld in paragraaf 3.2.3.

In Bijlage A zijn enkele foto's opgenomen voorafgaand aan de proeven.



Figuur 19 Vegetatiekaart 2015 Wijmeers (o.b.v. INBO shape)

3.2.2 Graskwaliteit

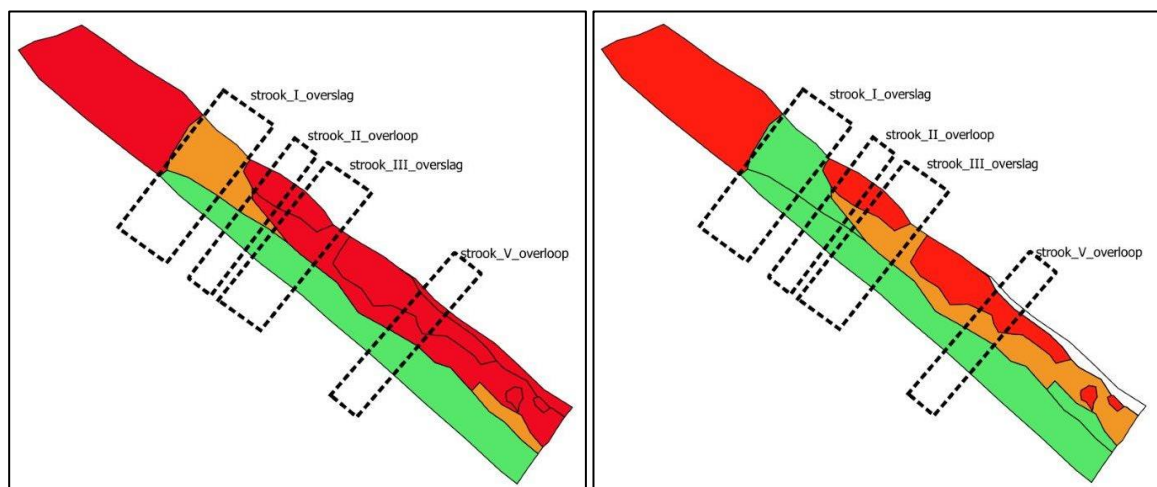
In de studie van INBO is aan elke vegetatietypen een graskwaliteit toegekend. Deze is beschreven in Tabel 12. Dit leidt tot de indeling in graskwaliteit per proefsectie zoals is weergegeven in Figuur 21 (links).

Vannoppen et al. (2016) geeft voor een vijftal vegetatietypen ook een inschatting van de erosiebestendigheid. Tot deze relatie is gekomen op basis van de vegetatie onderzoek op locaties Appels, Dendermonde en Tielrode (veldwerk uitgevoerd in 2012). De classificatie van de grasmat in het testbed Wijmeers is gerealiseerd door vegetatietypen die zijn waargenomen zijn op de proefstroken van Wijmeers (door INBO), via de relatie uit het onderzoek van Vannoppen 2016 (veldwerk uit 2012) te koppelen aan een graskwaliteit (Figuur 20). De koppeling tussen de graskwaliteit en de vegetatiegroep is opgenomen in de twee rechterkolommen van Tabel 12.



Figuur 20 Werkwijze classificatie graskwaliteit op basis van Vannoppen, 2016

Het valt op dat de inschatting van de erosiebestendigheid door INBO voor 'soortenarm glanshavergrasland' en 'verruigd glanshavergrasland' conservatiever is dan de inschatting van Vannoppen et al. (2016). Deze typen zijn ook aanwezig op de proefsecties. De inschatting van Vannoppen leidt tot de indeling in graskwaliteit zoals weergegeven in Figuur 21 (rechts). De basisgegevens (vegetatietypes) zijn in beide studies gelijk, maar de toekenning van de kwaliteit is verschillend.



Figuur 21 Kwaliteit grasmat 2015 Wijmeers volgens INBO (links) en Vannoppen (rechts). Groen: goed, oranje: matig, rood: slecht.

Nr	Vegetatietype INBO	Kwaliteit INBO	Vegetatietype Vannoppen et al. (2016)	Kwaliteit Vannoppen
1	Soortenrijk grasland	Goed	SR, species-rich grassland	good
2	Soortenrijk glanshavergrasland	Goed	RAe, species-rich grassland dominated by <i>Arrhenatherum elatius</i>	good
3	Soortenarm glanshavergrasland	Matig	Ae, grassland dominated by <i>Arrhenatherum elatius</i>	good
4	Verruigd glanshavergrasland	Slecht	AeN, grassland dominated by <i>Arrhenatherum elatius</i> with few nettles	Moderate-good
5	Brandnetelruigte	Slecht	NDV, nettle-dominated vegetation	poor-very poor
6	Rietvegetatie	<i>Slecht</i>		
7	Ruigte van Japanse duizendknoop	<i>Slecht</i>		
8	Variabele ruigte	<i>Slecht</i>		
9	Bomen/struiken			

Tabel 12 Kwaliteit grasmat op basis van vegetatietype

3.2.3 Classificatie per proefsectie

In het algemeen is de kwaliteit van de grasmat met name onderaan het talud vaak slecht vanwege brandnetelruigte. De proefsecties II, III en V hebben een vergelijkbare kwaliteit (slecht), en proefsectie I heeft een betere graskwaliteit (goed of matig, afhankelijk van indeling volgens INBO of Vannoppen).

Proefsectie I

De bovenste 3 m van het talud bestaat uit soortenrijk grasland (kwaliteit INBO: goed, kwaliteit Vannoppen: good).

De onderste 7 m bestaat uit soortenarm glanshavergrasland (kwaliteit INBO: matig, kwaliteit Vannoppen: good).

Proefsectie II

De bovenste 3 m van het talud bestaat uit soortenrijk grasland (kwaliteit INBO: goed, kwaliteit Vannoppen: good).

Het middenstuk bestaat uit soortenarm glanshavergrasland (kwaliteit INBO: matig, kwaliteit Vannoppen: good) en verruigd glanshavergrasland (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: moderate-good).

De onderste 3 m bestaat uit brandnetelruigte (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: poor-very poor).

Proefsectie III

De bovenste 4 m van het talud bestaat uit soortenrijk grasland (kwaliteit INBO: goed, kwaliteit Vannoppen: good).

De onderste 6 m bestaat uit verruigd glanshavergrasland (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: moderate-good), met aanzienlijke delen van het talud een stuk brandnetelruigte (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: poor-very poor).

Proefsectie V

De bovenste 3 m van het talud bestaat uit soortenrijk grasland (kwaliteit INBO: goed, kwaliteit Vannoppen: good).

Het middenstuk bestaat uit 2 m verruigd glanshavergrasland (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: moderate-good).

De onderste 3 m bestaat uit brandnetelruigte (kwaliteit INBO: slecht, kwaliteit Vannoppen: poor-very poor).

3.3 Beschrijving grasmatt conform het Voorschrift Toetsen op Veiligheid

3.3.1 Methode toetsing VTV

Verschillen tussen toetsing en interpretatie proeven

Om te beginnen wordt opgemerkt dat er een belangrijk verschil is tussen de benadering van toetsing, zowel in het VTV (VTV, 2017) als de schematiseringshandleiding voor grasbekleding van het WBI2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016), en het verklaren van de geobserveerde doorbraakprocessen. Voor het verklaren van waargenomen schade is het nodig om de aanwezige sterkte zo realistisch mogelijk in te schatten, terwijl de sterkte bij het toetsen conservatiever wordt ingeschat. Bij toetsing is de vraag of een dijk voldoet of niet, terwijl bij een proef de vraag is bij welke belasting de dijk naar verwachting faalt. De erosiebestendigheid (uitgedrukt in een kritisch overslagdebiet, kritische stroomsnelheid, schuifspanning, etc.) wordt daarom waarschijnlijk voorzichtig ingeschat bij toepassing van beoordelingsmethoden.

Daarnaast wordt de graskwaliteit bij toetsingen ingeschat voor een grotere ruimtelijk eenheden dan een proefsectie (bijv. een dijkvak van 100 m breed), terwijl de grasmatt bij de bresproeven

zeer gedetailleerd in kaart is gebracht. Bij het interpreteren van de proeven dient men zich bewust te zijn van deze verschillen in benadering. Als laatste wordt opgemerkt dat de VTV niet de vigerende leidraad is om de (sterkte van de) graszode mee te classificeren. De meest recente inzichten zijn vastgelegd in het WBI2017.

Erosiebestendigheid zode

De zodekwaliteit kan met het VTV 2007 (specifiek Bijlage 8-1) worden beoordeeld op basis van beheertype, vegetatiesamenstelling of doorworteling. Dit leidt tot de kwalificaties 'zeer slecht', 'slecht', 'matig' of 'goed'.

Beoordeling op Beheertype

Wanneer wordt beoordeeld op beheertype, zijn de beheersclassificaties A, B, C en D mogelijk met bijbehorende graskwaliteit:

- (A) hoort bij waterstaatkundig of natuurtechnisch beheer. (graskwaliteit: goed)
- (B) hoort bij aangepast (extensief) agrarisch beheer. (graskwaliteit: matig)
- (C) hoort bij intensief agrarisch beheer of bij regelmatig en intensief belopen. (graskwaliteit: slecht)
- (D) hoort bij maaien zonder afvoer of slecht onderhoud. (graskwaliteit: slecht)

Beoordeling op Vegetatiesamenstelling

Eerst wordt via de soortensamenstelling van de grasmat het vegetatietype bepaald. Het VTV geeft per type een eerste inschatting van de graskwaliteit (Tabel 8-B1.2 in het VTV). Deze eerste inschatting kan eventueel worden aangescherpt op basis van de bedekkingsgraad.

Beoordeling op Doorworteling

Het VTV geeft een procedure voor het meten van de doorworteling in de bovenste 20 cm van de zode. Aan de hand van de worteldichtheid op verschillende dieptes, kan uit een grafiek de zodekwaliteit worden afgelezen.

Erosiebestendigheid onderlagen

De kleilaag kan worden ingedeeld in drie categorieën van erosiebestendigheid: c1, c2 en c3. Dit gebeurt op basis van materiaalparameters³ volgens Figuur 22.

³ Te bepalen met 5 monsters per hectare te toetsen grasmat, volgens het TR Klei op Dijken (TAW, 1996)

Categorie	Criteria
c1 Erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $W_l > 45\%$ én • $I_p > 0,73 \cdot (W_l - 20)\%$ én • $Z_k < 40\%$
c2 Matig erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $W_l < 45\%$ én • $I_p > 18\%$ én • $Z_k < 40\%$
c3 Weinig erosiebestendig	<ul style="list-style-type: none"> • $I_p < 0,73 \cdot (W_l - 20)\%$ en/of • $I_p < 18\%$ en/of • $Z_k > 40\%$

waarin:

W_l	=	vloeigrens	[%]
I_p	=	plasticiteitindex	[%]
Z_k	=	zandgehalte = massapercentage korrels met een diameter van 63 μ m tot 2 mm	[%]

Figuur 22 Indeling in categorieën van erosiebestendigheid volgens VTV 2007.

3.3.2 Toepassing VTV op proefsecties

Erosiebestendigheid zode

Voor dijken op het noorden (noordoost is bij Wijmeers het geval) wordt aanbevolen om de kwaliteit te bepalen op basis van de doorworteling vanwege mosgroei. Mosgroei is inderdaad zichtbaar op de foto's van de proeven (Figuur 73, Bijlage A). Voor zover bekend is de doorworteling niet gemeten. Omdat ook het beheertype niet duidelijk is, is de grasmatt beoordeeld op basis van de vegetatiesamenstelling, met behulp van de inventarisatie van INBO (paragraaf 3.2.1). Volgens het VTV leidt dit meestal tot een vergelijkbare beoordeling van de sterkte als beoordeling op basis van doorworteling.

Per proefstrook zijn de aanwezige vegetatietypes genoemd en is het zwakste vegetatietype van deze types aangenomen als kwaliteitsbepalende vegetatie (Tabel 13). Het vegetatietype volgens INBO is vervolgens gekoppeld aan de vegetatietypen in de VTV. De zodekwaliteit is daarmee direct af te lezen uit Tabel 8-B1.2 in het VTV. Het wordt opgemerkt dat op alle secties ook sterkere vegetatietypes aanwezig zijn, met name aan de bovenzijde van het talud.

Proefsectie	Vegetatietypes INBO	Zwakste vegetatietype INBO	Vegetatietype VTV	Zodekwaliteit VTV
I	Soortenarm glanshavergrasland, Soortenrijk grasland	Soortenarm glanshavergrasland	H2: Minder soortenarm hooiland (bedekking >70%)	matig
II	Soortenrijk grasland, Soortenarm glanshavergrasland,	Brandnetelruigte	R: Ruig hooiland	slecht

	Verruigd glanshavergrasland, Brandnetelruigte			
III	Soortenrijk grasland, Verruigd glanshavergrasland, Brandnetelruigte	Brandnetelruigte	R: Ruig hooiland	slecht
V	Soortenrijk grasland, Verruigd glanshavergrasland, Brandnetelruigte	Brandnetelruigte	R: Ruig hooiland	slecht

Tabel 13 Zodekwaliteit volgens VTV per proefsectie

Erosiebestendigheid onderlagen

De materiaalparameters zijn bepaald in hoofdstuk 3.1 op basis van de verschillende grondonderzoeken. De spreiding is groot in de parameters die van belang zijn voor de erosiebestendigheid van de onderlagen. In Tabel 14 is voor de ondergrens uit de proeven (zandige klei, GEO boring B5-1) en de bovengrens uit de proeven (vette klei, GEO boringen G7L en G7R) bepaald wat de erosiebestendigheid is volgens VTV. Hieruit blijkt dat de erosiebestendigheid varieert van klasse c1 tot c3, afhankelijk van de boring. Dit bestrijkt het hele spectrum van mogelijke kleiklassen binnen het VTV, waardoor met het VTV geen uitspraak gedaan kan worden over de erosiebestendigheid van de onderlagen zonder aanvullend grondonderzoek. Gezien de classificatie normaal gesproken plaatsvindt in het kader van een toetsing, is het waarschijnlijk dat gekozen wordt voor een conservatieve benadering. Dit betekent dat waarschijnlijk gekozen zou worden voor Categorie C3.

Proefsectie	Vloiegrens [%]	Plasticiteitsindex [%]	Zandgehalte [%]	Categorie
Zandige klei	20	4	80	c3
Vette klei	67	39	35	c1

Tabel 14 Eigenschappen en classificering kleilaag

3.3.3 Conclusies VTV

Volgens de methode in VTV gebaseerd op vegetatietypes wordt de sterkte van de grasmat voor drie van de vier secties geclassificeerd als 'slecht'. Alleen proefsectie I heeft de kwaliteit 'matig'. In alle gevallen is het onderste deel van het talud slechter dan het bovenste deel. Aan de onderzijde is de vegetatie ruwer en zijn stenen of een konijnenhol (proefsectie I) in het talud aanwezig.

De erosiebestendigheid van de onderlagen is sterk afhankelijk van de locatie en grondboring, en is daardoor slecht te beoordelen op basis van de beschikbare gegevens. Voor een beoordeling van de onderlagen is aanvullend grondonderzoek nodig. Gezien de classificatie normaal gesproken plaatsvindt in het kader van een toetsing, is het waarschijnlijk dat gekozen wordt voor een conservatieve benadering. Dit betekent dat waarschijnlijk gekozen wordt voor Categorie C3.

3.4 Beschrijving grasmat conform het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium

3.4.1 Methode toetsing WBI

Voor de beschrijving van de sterkte van de grasmat conform het WBI is gebruik gemaakt van de Schematiseringshandleiding grasbekleding (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

De zodekwaliteit kan worden geclassificeerd als 'gesloten', 'open' of 'fragmentarisch'. De definities zijn weergegeven in Figuur 23. De zodekwaliteit kan bepaald worden aan de hand van visuele inspectie of door het steken van een plag. Op basis van deze classificatie kan ook een kritiek overslagdebiet worden bepaald.

Het wordt in het kader van de WBI2017 classificatie opnieuw opgemerkt dat er een belangrijk verschil is tussen de benadering van toetsing, zowel in het VTV als het WBI, en het verklaren van de geobserveerde doorbraakprocessen. Dit geldt voor zowel de aanpak o.b.v. de VTV als het WBI2017. Het verschil is toegelicht in paragraaf 3.3.1.

- gesloten graszode: Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar globale visuele inspectie, een representatieve grootte van open plekken tussen de planten minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 10 % van het oppervlak tot 0,2 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan 0,15 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² niet meer dan 5 van zulke beschadigingen.
- open graszode: Op het oog continue grasmat gedomineerd door grasblad en met, naar visuele inspectie, een representatieve grootte van open plekken tussen de planten minder dan ongeveer 0,1 m, welke in niet meer dan 25 % van het oppervlak tot 0,25 m mag bedragen. Er mogen niet meer dan 2 ondiepe (minder dan 0,1 m) beschadigingen per vierkante meter van de grasmat groter dan 0,15 x 0,15 m² zijn en gemiddeld over 25 m² niet meer dan 5 van zulke gaten.
- fragmentarische zode: Taludbegroeiing met meer dan 25 % van het oppervlak plantafstanden groter dan 0,25 m. Dit betreft veelal slechts individuele, losstaande planten, of pollen waartussen eventueel bodembedekkende kleinere planten die geen gesloten grasmat vormen.

Figuur 23 Definities van classificatie grasmat conform de schematiseringshandleiding grasbekleding (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2016).

3.4.2 Toepassing WBI op proefsecties

De zodekwaliteit kan worden bepaald aan de hand van visuele inspectie of door het steken van een plag. Voor zover bekend zijn geen plagen gestoken. De grasmat is daarom beoordeeld met visuele inspectie van de foto's en situatieschetsen van Infram (2015) en TUDelft (2016), zie bijlage A. Indien er open plekken of stenen zichtbaar zijn is sprake van een open zode. Indien de grasmat grotendeels ontbreekt is sprake van een fragmentarische zode (niet toegekend).

Op basis van de opnames uit Infram (2015) en TUDelft (2016) is de zodekwaliteit van alle proefsecties geclassificeerd. Over het algemeen is op het boventalud sprake van een gesloten zode. Dit omdat de grasmat hier over het algemeen goed dekt (uitzonderingen nagelaten). Op het benedentalud is over het algemeen sprake van open. Dit omdat op de onderste helft van het talud beschadigingen van de grasmat dusdanig frequent zijn waargenomen dat een classificatie als open zode hier beter past (zie ook Figuur 24). Voor het gehele binnentalud is de zwakste zode als representatief genomen, wat leidt tot het oordeel 'open zode' voor alle

proefsecties. Het is echter denkbaar dat er een andere conclusie wordt getrokken indien er een spadeproef zou zijn uitgevoerd.



Figuur 24 Nulsituatie grasbekleding Teststrook I (Infram, 2015, Factual report)

3.4.3 Conclusies WBI2017

Volgens de methode in WBI2017 wordt de grasmat geclassificeerd als 'fragmentarische', 'open' of 'gesloten' zode. De proefsecties als geheel zijn geclassificeerd als open zode. Het wordt opgemerkt dat de graskwaliteit aan de bovenzijde van het boventalud van betere kwaliteit is dan aan de onderzijde. Aan de onderzijde is de vegetatie ruwer. Daarnaast zijn stenen of een konijnen hol (proefsectie I) in het talud aanwezig.

3.5 Conclusies sterkte grasmat

Door analyse van de beschikbare gegevens is een beeld gevormd van de opbouw van de dijk en de geotechnische parameters. Door het beperkte aantal metingen en de heterogeniteit van de dijk is het lastig om resultaten van de laboproeven direct te koppelen aan de vier proefsecties. Voor de sterkteparameters is een range aangegeven waarbinnen de waarden variëren. Die range is voor de sterkte van de kleilaag bijvoorbeeld zo groot, dat daarbinnen zowel goed erosiebestendige als slecht erosiebestendige klei valt. Ook de dikte van de kleilaag is zeer variabel. Hierdoor is geen algemene classificatie van de proefsectie af te geven. We raden aan bij de interpretatie van de schade zo veel mogelijk gebruik te maken van de lokale karakteristieken van de bekleding (grasmat en kleilaag).

De kwaliteit van de graszode is relatief goed in beeld gebracht door vegetatieopnames en gedetailleerde foto's. De vertaling van vegetatietype (INBO) naar zodekwaliteit (INBO of Vannoppen 2016) verschilt per methode. De maatgevende kwaliteit van de graszode op de proeflocaties (de slechtste zode binnen een proeflocatie) is over het algemeen als slecht (weinig erosiebestendig) geclassificeerd.

De grasmat is daarnaast beschreven conform het Nederlandse Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) en het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Binnen een proefsectie zijn zowel

secties van goede als van minder goede kwaliteit/sterkte te vinden. In dat geval is de slechtste kwalificatie opnieuw representatief gesteld voor de hele proefsectie. Conform de VTV is de graskwaliteit als slecht ingeschat. Op basis van de richtlijnen in het WBI (schematiseringshandleiding grasbekleding) is de graskwaliteit als open zode ingeschat. Het wordt opgemerkt dat de graskwaliteit aan de bovenzijde van het boventalud enigszins beter is dan aan de onderzijde. Aan de onderzijde is de vegetatie ruwer. Daarnaast zijn stenen of een konijnen hol (proefsectie I) in het talud aanwezig.

4 Hydraulische tijdsreeksen

In dit hoofdstuk worden de hydraulische belastingen beschreven. De berekende of gemeten hydraulische belastingen zijn vervolgens de invoer voor de schadeberekeningen (zie Hoofdstuk 5). De hydraulische belastingen van de proeven zijn opgesteld op basis van de uitgevoerde metingen en op basis van de bestaande literatuurformules.

In dit hoofdstuk is de werkwijze beschreven om de volgende hydraulische belastingen op te stellen. Dit voor zowel de gemeten als de theoretische belasting voor de golfverloop en golfverslag proeven.

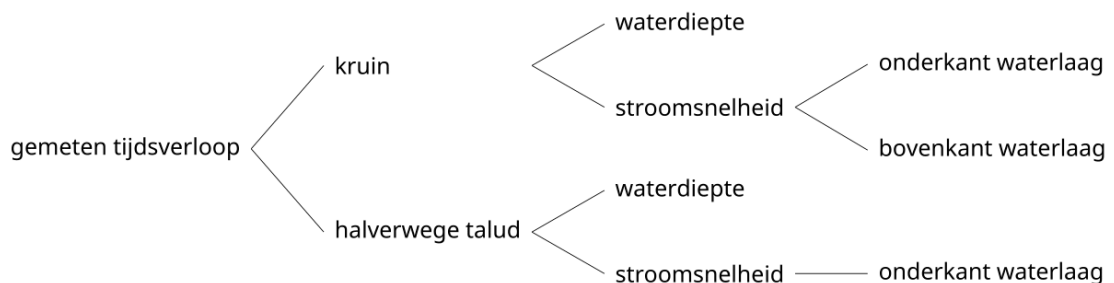
4.1 Hydraulische belasting bij golfverslagproeven

De hydraulische belasting bij golfverslag is opgedeeld in de volgende vier delen

1. Gemeten belasting tijdens de hydraulische metingen bij proefgolven;
2. Theoretische belasting tijdens de hydraulische metingen bij proefgolven;
3. Gemeten en theoretische hydraulische belasting tijdens de golfverslag proeven;
4. Korte vergelijking van de gemeten en theoretische hydraulische belasting tijdens de golfverslag proeven.

4.1.1 Gemeten belasting tijdens hydraulische metingen bij proefgolven

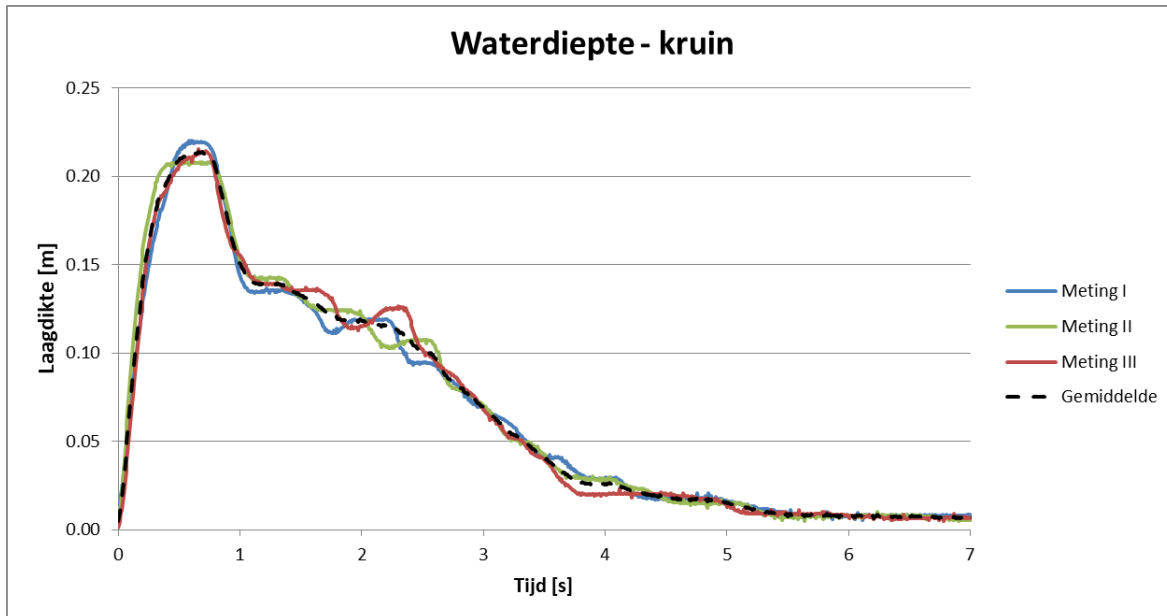
Tijdens de hydraulische metingen (zie paragraaf 2.3.1) is het tijdsverloop van de laagdikte en stroomsnelheid op het talud gemeten (Figuur 25). In totaal zijn 15 hydraulische metingen gedaan voor golven met een overslaand volume van 0,5 – 3,5 m³/m. Tijdens de meting is de waterdiepte en de stroomsnelheid in functie van de tijd gemeten. Voor de waterdiepte zijn twee metingen beschikbaar (1) op de kruin en (2) halverwege het talud bepaald. De stroomsnelheid is gemeten (1) op de kruin aan de onderkant van de waterlaag, (2) op de kruin aan de bovenkant van de waterlaag en (3) halverwege het talud aan de onderkant van de waterlaag. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 25.



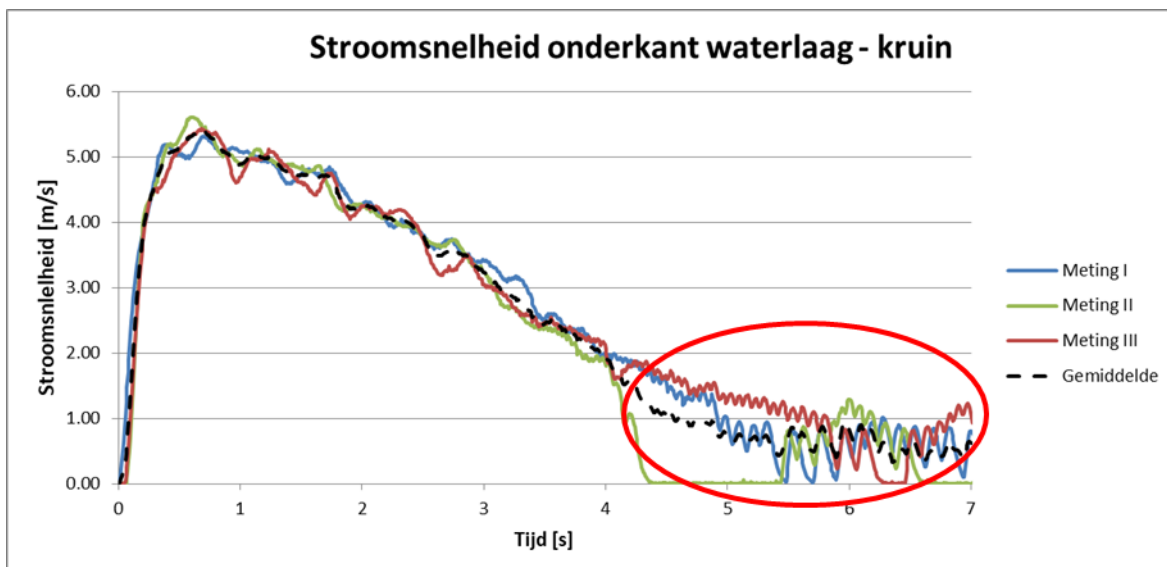
Figuur 25 Beschikbaar gemeten tijdseries voor overslaande golven (voor $V = 500$ t/m 2500 gemiddeld o.b.v. drie metingen)

Voor de golfvolumes van 500 – 2500 l/m (0,5 – 2,5 m³/m) zijn drie proeven uitgevoerd en voor de golven met een volume van 3000 en 3500 l/m (3,0 en 3,5 m³/m) is één proef uitgevoerd. Voor de golven waar drie metingen voor zijn uitgevoerd, is het gemiddeld tijdsverloop bepaald.

Een voorbeeld van het gemiddeld tijdsverloop en de drie individuele metingen is weergegeven in Figuur 26 (waterdiepte) en Figuur 27 (stroomsnelheid). Over het algemeen laten de individuele metingen hetzelfde verloop van de waterdiepte of stroomsnelheid zien als het gemiddelde. Uitzondering hierop vormen de 'staarten' van de meting van de stroomsnelheid. Wanneer de piek van de golf (waterdiepte piek of stroomsnelheidspiek) gepasseerd is, fluctueert de in de meting beschreven stroomsnelheid tussen de 0 en 1 m/s (zie rode cirkel in Figuur 27 voor een voorbeeld bij een golf van 2000 l/m). Omdat deze fluctuatie plaatsvindt bij kleine waterdieptes en stroomsnelheden worden deze als niet relevant beschouwd voor het erosie proces. Daarnaast worden deze fluctuaties mogelijk veroorzaakt door meetfouten.



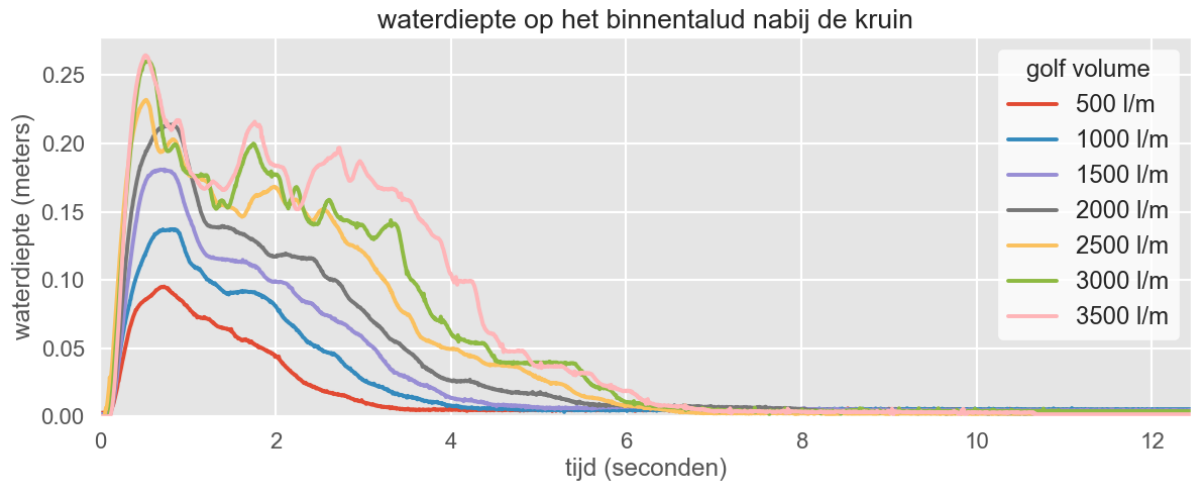
Figuur 26 Gemeten en gemiddeld verloop van de waterdiepte op de kruin bij een overslaand volume van 2000 l/m



Figuur 27 Gemeten en gemiddeld verloop van de stroomsnelheid aan de onderkant van de waterlaag op de kruin bij een overslaand volume van 2000 l/m. Rode cirkel beschrijft het moment wanneer de individuele metingen af kunnen wijken van het gemiddelde.

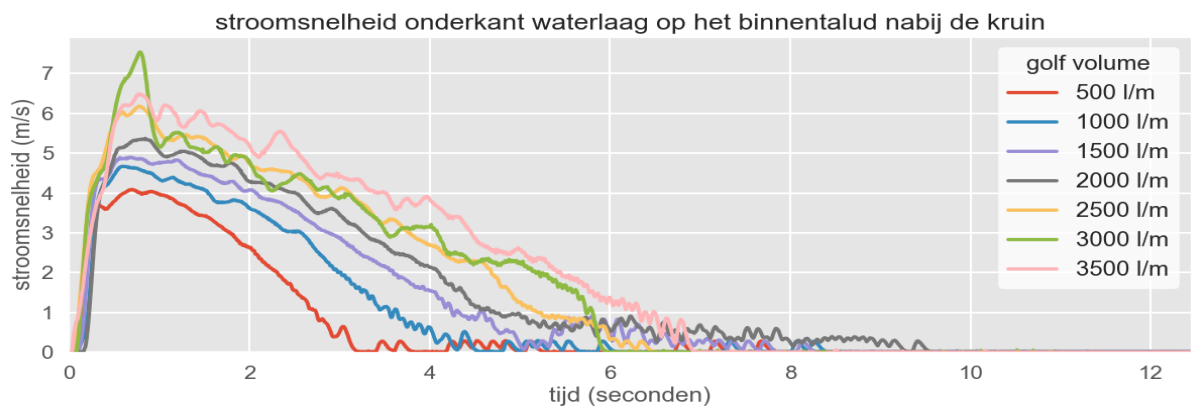
De waterdiepte op de kruin is als functie van de tijd voor de verschillende golf volumes gepresenteerd in Figuur 28. Voor de golven met een volume van 500 tot 2500 l/m is dit een gemiddelde op basis van drie metingen. Het valt op dat het verloop van de waterdiepte grilliger verloopt voor golven met volumes van 2500 l/m en hoger. Het feit dat de volumes van 3000 en 3500 l/m niet uitgemiddeld zijn draagt waarschijnlijk bij aan deze observatie. De grotere hoeveelheid water lijkt echter wel de belangrijkste reden voor het grillige verloop. Dit omdat:

- Het verloop van 2500 l/m is ook een gemiddelde op basis van 3 metingen en verloopt veel grilliger dan het verloop bij 2000 l/m.
- De niet gemiddelde verlopen van de waterdiepte van de golven van 2000 l/m (zie Figuur 26) verlopen een stuk geleidelijker dan deze van de golf van 3000 en 3500 l/m.



Figuur 28 Verloop van de waterdiepte op het binnentalud nabij de kruin voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen. De golven met een volume van 500 tot 2500 l/m is een gemiddelde op basis van drie metingen. De golven met een volume van 3000 en 3500 l/m zijn enkele metingen.

Naast de waterdiepte is de stroomsnelheid op het binnentalud gemeten. Figuur 29 geeft een voorbeeld van een tijdsverloop van de stroomsnelheid nabij de kruin weer. De stroomsnelheid bij een overslaand volume van 500 tot 2500 l/m is opnieuw een gemiddelde op basis van drie metingen. Naarmate het golf volume toeneemt, neemt de maximale stroomsnelheid op het talud toe. Een uitzondering hierop is het overslagvolume van 3000 l/m waarbij een uitschieter is te zien in de gemeten stroomsnelheid.



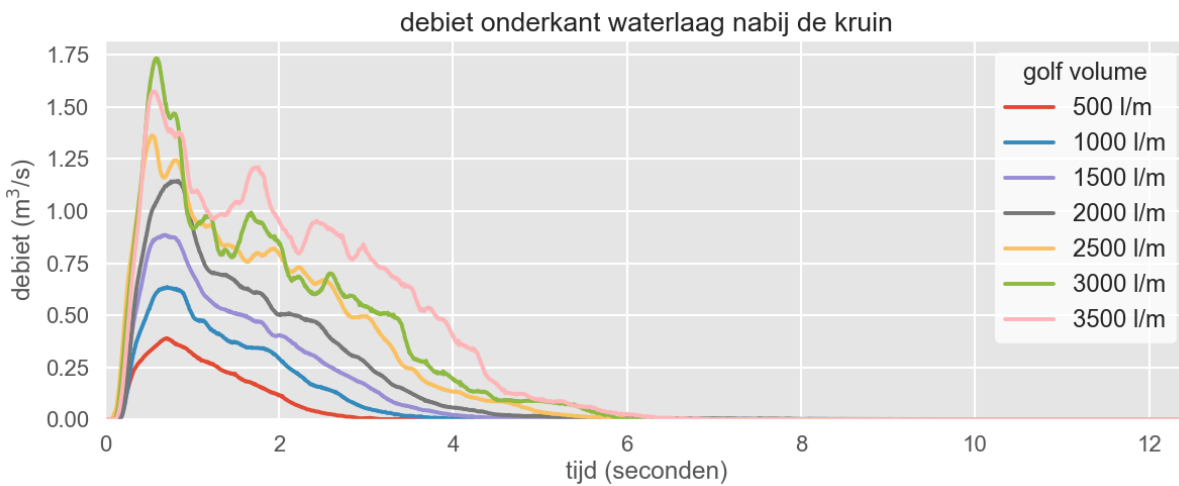
Figuur 29 Verloop van de stroomsnelheid onderkant golf op het binnentalud nabij de kruin voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen. De golven met een volume van 500 en 2500 l/m is een gemiddelde op basis van drie metingen. De golven met een volume van 3000 en 3500 l/m zijn enkele metingen.

Op basis van de stroomsnelheid en de waterdiepte kan het debiet worden bepaald op basis van:

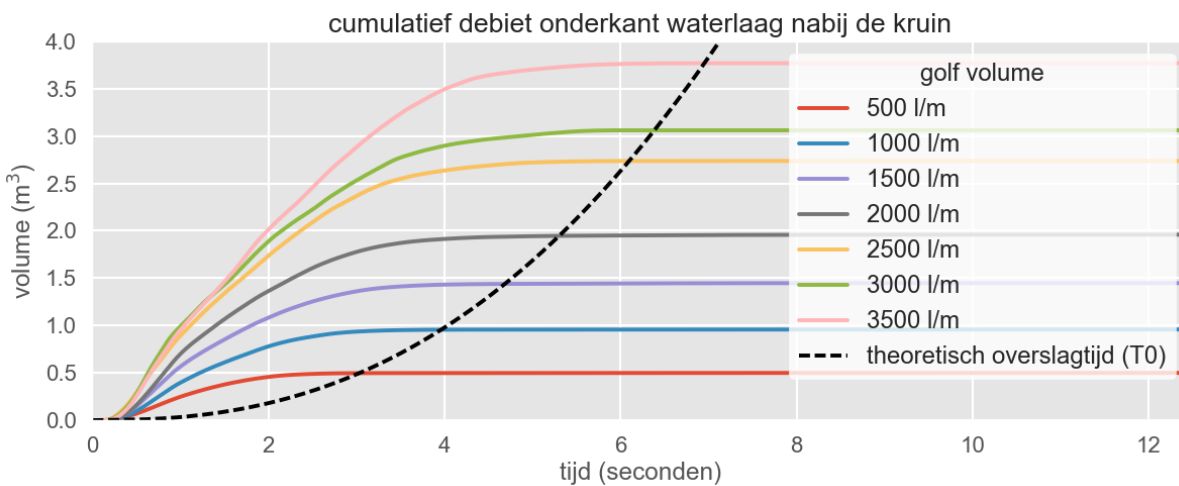
$$q(t) = h(t) * v(t) \quad \text{Formule 1}$$

- Waar:
- $q(t)$ = debiet uitgezet tegen de tijd (m^3/s)
 - $h(t)$ = waterdiepte uitgezet tegen de tijd (m)
 - $v(t)$ = stroomsnelheid uitgezet tegen de tijd (m/s)

Een voorbeeld van het debiet als functie van de tijd is weergegeven in Figuur 30. Omdat de stroomsnelheid nabij de kruin zowel is gemeten aan de onderkant (paddle 1) als de bovenkant van de waterlaag (paddle 2), zijn ook twee tijdseries van het (cumulatief) overslagdebiet en de schuifspanning opgesteld. In onderstaande figuren zijn alleen de tijdseries o.b.v. van de snelheid aan de onderkant van de golf weergegeven (paddle 1). Alle tijdseries zijn terug te vinden in de opgeleverde data.



Figuur 30 Verloop debiet op het binnentalud nabij de kruin op basis van de stroomsnelheid aan de onderkant van de waterlaag voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen.



Figuur 31 Verloop van het cumulatief volume op het binnentalud nabij de kruin op basis van de stroomsnelheid aan de onderkant van de waterlaag voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen. Tevens is de theoretisch berekende overslagtijd (T_0) weergegeven.

Het cumulatief debiet is weergegeven in Figuur 31. Hierin is te zien dat het gemeten cumulatief volume (o.b.v. formule 1) ongeveer gelijk is aan het theoretisch volume. De gekleurde lijnen in Figuur 31 naderen na verloop van tijd hun theoretische waarde. Uitzondering hierop zijn de golven met een theoretisch volume van 2500 l/m en 3500 l/m. Het gemeten cumulatief debiet is respectievelijk 2700 l/m en 3700 l/m. Bij 3000 l/m is daarentegen geen sprake van een overschatting.

In Figuur 31 is ook de theoretische overslagtijd (T_0) uitgezet. Deze is bepaald met Formule 2 en Formule 3 afkomstig uit Hughes et al. (2011) en wordt ook toegepast in Van Damme et al. (2016) en Pensioen (2016).

$$q_p = 0.184 * \sqrt{g} * V^{3/4} \quad \text{Formule 2}$$

Waar: q_p = het piek debiet (m³/s)
 V = golf volume (m³)
 g = zwaartekracht (hier 9.81m/s²)

$$T_0 = V^{1.16} / 0.43 * q_p \quad \text{Formule 3}$$

Waar: T_0 = Overslagtijd (s)

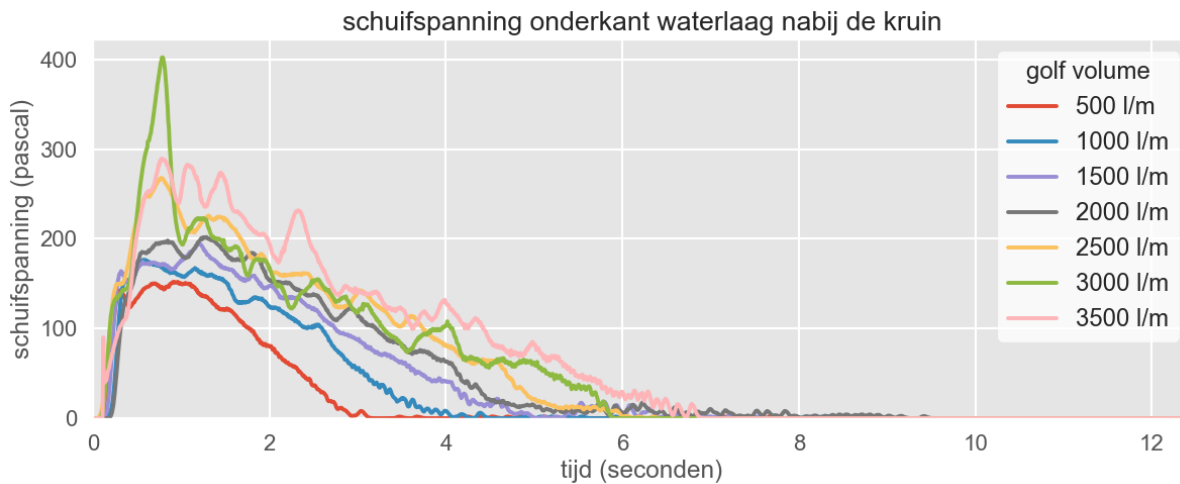
Figuur 31 laat zien dat het theoretische einde van de golf goed overeen komt met het gemeten einde van de golf. Het moment wanneer het cumulatief verloop niet meer toeneemt komt namelijk praktisch overeen met het theoretisch einde van de golf (T_0).

De schuifspanning in Figuur 32 is bepaald op basis van (conform o.a. Pensioen, 2016):

$$\tau(t) = (\rho_w * v(t)^2 * n^2) / (d^{1/3}) \quad \text{Formule 4}$$

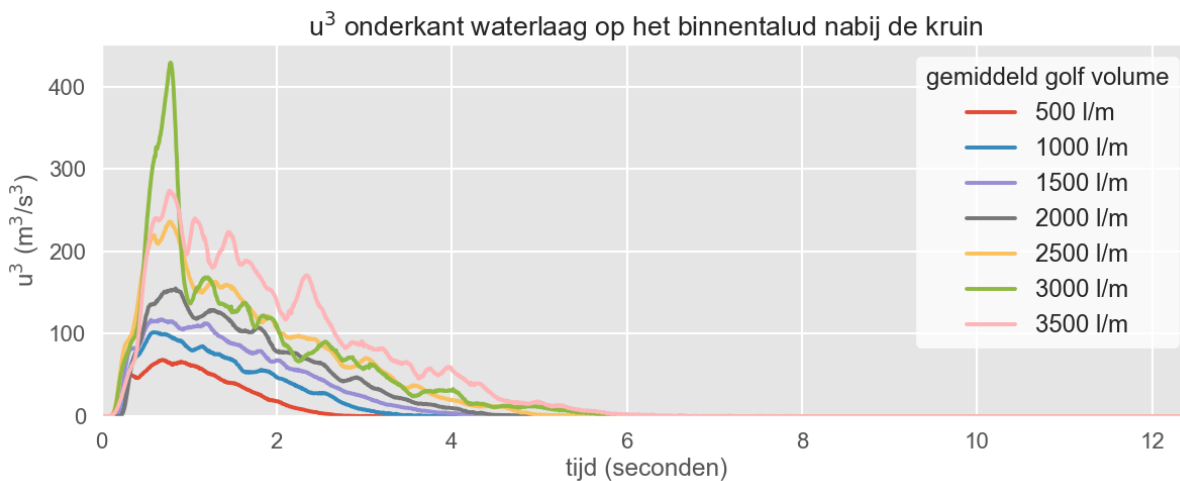
Waar: $\tau(t)$ = schuifspanning uitgezet tegen de tijd (pascal)
 ρ_w = dichtheid van water (hier 1000 kg/m³)
 $v(t)$ = stroomsnelheid uitgezet tegen de tijd (m/s)
 n = Manning coëfficiënt (0.025 s/m^{1/3} – gelijk aan Vandamme et al., 2016)
 d = hydraulische radius (hier ingewisseld met waterdiepte $h(t)$ in meter)

Hierbij is aangenomen dat het een stationaire stroming betreft. De hydraulische metingen overeenkomend met een golf volume van 500 l/m heeft een schuifspanning maximum van rond de 150 Pascal. De golf met van 3500 l/m heeft een schuifspanning maximum van bijna 300 Pascal. Het maximum van de 3000 l/m golf welke net de 400 Pascal bereikt komt door de gevoeligheid voor de stroomsnelheid sinds deze component kwadratisch is meegenomen in de bepaling van de schuifspanning (vergelijk met Figuur 29, hier is ook een uitschieter te zien in de stroomsnelheid).



Figuur 32 Verloop schuifspanning in de tijd op het binnentalud nabij de kruin op basis van de stroomsnelheid onderkant waterlaag voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen

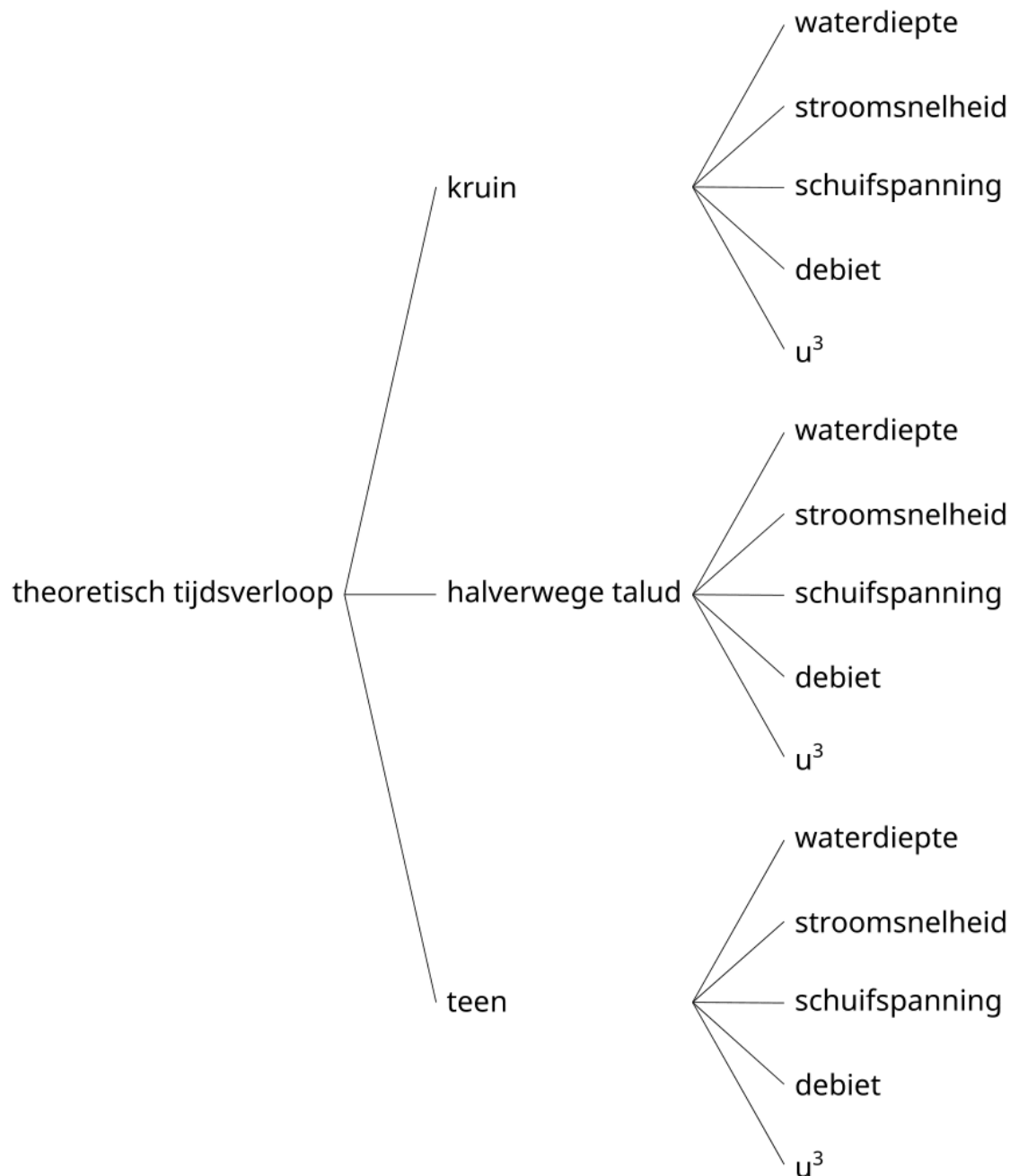
De basis voor het bepalen van de stream power in de 'Excess Volume Approximation' is de stroomsnelheid tot de derde macht. In het kader van het tijdsverloop is alleen de stroomsnelheid tot de derde macht weergegeven (zie Figuur 33).



Figuur 33 Verloop stroomsnelheid tot de derde macht (u^3) in de tijd op het binnentalud nabij de kruin op basis van de stroomsnelheid onderkant waterlaag voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen

4.1.2 Theoretisch belasting tijdens hydraulische metingen bij proefgolven

De hydraulische grootheden die berekend zijn op basis van de literatuurformules staan weergegeven in Figuur 34.



Figuur 34 Schematisatie van de bepaalde tijdsverlopen voor type, locatie en hoogte op basis van literatuurformules

Het theoretisch tijdsverloop van de stroomsnelheid en de waterdiepte op het binnentalud is als volgt bepaald (o.b.v. de aanpak in Hughes et al., 2011):

$$u(t) = u_p * \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^a \quad \text{Formule 5}$$

Waar:	$u(t)$	=	Stroomsnelheid op het binnentalud (m/s)
	u_p	=	piek stroomsnelheid (m/s)
	T_0	=	overslagtijd (s)
	a	=	coëfficiënt (o.b.v. Formule 7)

$$h(t) = h_p * \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^b \quad \text{Formule 6}$$

Waar:	$h(t)$	=	Waterdiepte op het binnentalud (m)
	h_p	=	piek waterdiepte (m)
	T_0	=	overslagtijd (s)
	b	=	coëfficiënt (hier 1.0)

In Formule 5 en Formule 6 zijn de coëfficiënten a en b kalibratie coëfficiënten. In lijn met Ponsioen (2016) is aangenomen dat de coëfficiënt b altijd gelijk is aan $b = 1$ (dus een lineaire afname van de laagdikte in de tijd). De waarde van coëfficiënt a wordt vervolgens voor ieder golfvolume afzonderlijk bepaald op basis van Hughes et. al. (2011). Deze is door Van Damme (2016) en Van Damme et. al. (2016) verder uitgewerkt zoals weergegeven in Formule 7 (waarin a kan variëren tussen de 0 en 1). Het wordt opgemerkt dat toepassing van Formule 7 voor golven met een volume kleiner dan ongeveer 400 l/m, het tijdsverloop van de stroomsnelheid de vorm aanneemt van een blokfunctie.

$$m = a + b = \min(\max(2.33 * V^{0.16} - 1; 1); 2) \quad \text{Formule 7}$$

Waar:	m	=	Coëfficiënt verloop debiet
	a	=	Coëfficiënt verloop stroomsnelheid
	b	=	Coëfficiënt verloop waterdiepte
	V	=	golfverslag volume (m ³ /m)

Figuur 35 en Figuur 36 laat de resulterende theoretische stroomsnelheid en waterdiepte diepte zien voor verschillende golfvolumes op de kruin die volgt uit bovenstaande beschreven aanpak.

De piek stroomsnelheid of waterdiepte (als functie van het overslaand volume) is afhankelijk van de locatie op het binnentalud en de initiële stroomsnelheid of waterdiepte op de kruin. Voor de bepaling van de initiële stroomsnelheid of waterdiepte (als functie van het overslaand volume) zijn geen formules beschikbaar. Deze initiële waarde ter plaatse van de kruin (als functie van het overslaand volume) is daarom bepaald uit de metingen ($h_0 = h_{max,kruin}$, $v_0 = v_{max,kruin}$). Dit is dezelfde formule zoals gebruikt en beschreven in Peeters et al (2012) en Van der Meer et al. (2010). Voor waterdiepte is dit:

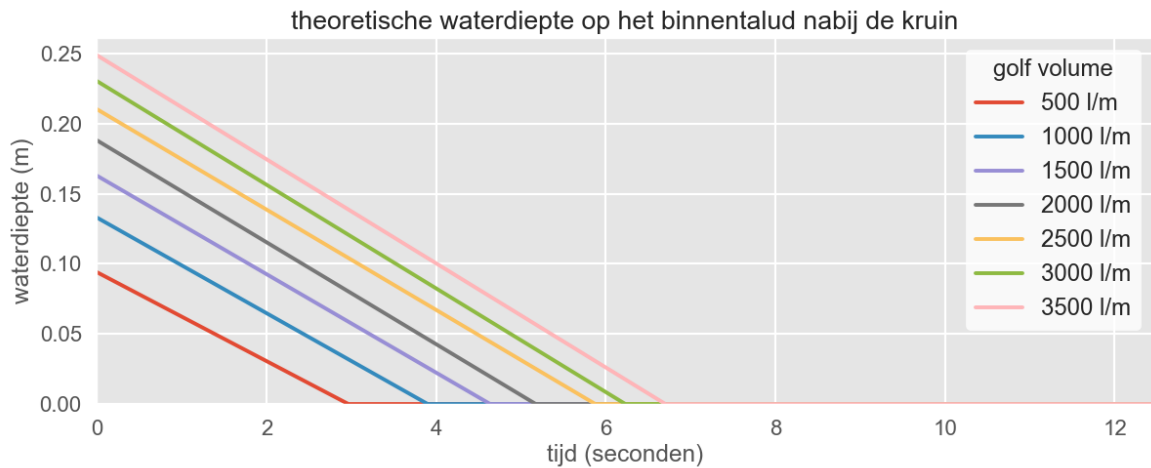
$$h_0 = 0.133 * V^{0.5} \quad \text{Formule 8}$$

Waar: h_0 = Piek waterdiepte op de kruin (m)
 V = golfverslag volume (m³/m)

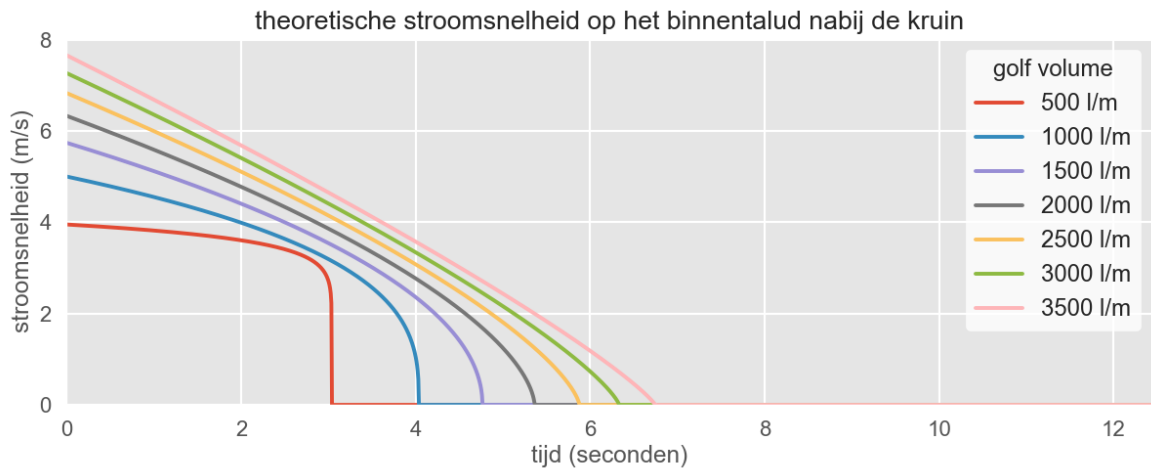
En voor stroomsnelheid is dit:

$$v_0 = 5.0 * V^{0.34} \quad \text{Formule 9}$$

Waar: v_0 = Piek stroomsnelheid op de kruin (m/s)
 V = golfverslag volume (m³/m)



Figuur 35 Verloop van de theoretische waterdiepte op het binnentalud nabij de kruin voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen (bij keuze van de coëfficiënt $b = 1$)



Figuur 36 Verloop van de theoretische stroomsnelheid op het binnentalud nabij de kruin voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen

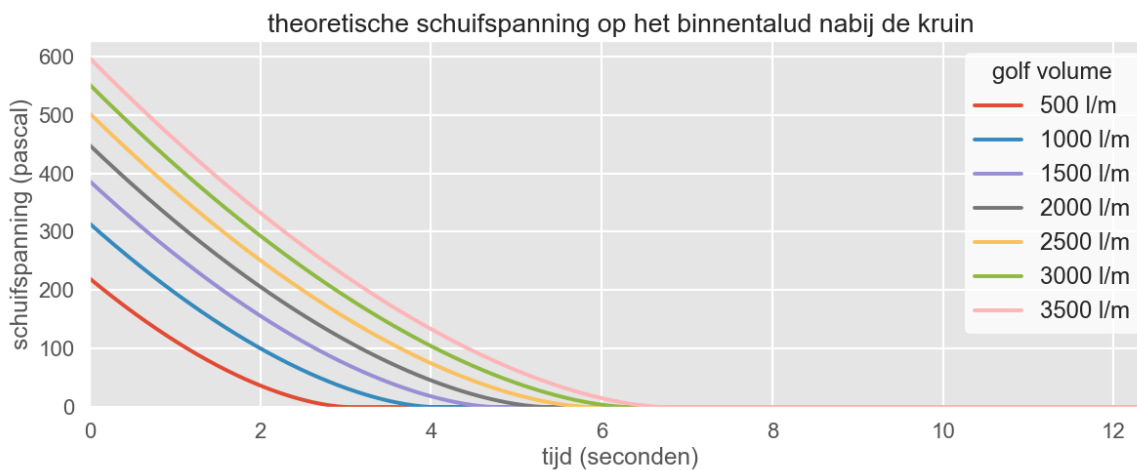
Het theoretische verloop van de schuifspanning is afgeleid op basis van Formule 10 (o.b.v. Van Damme, 2016 en Van Damme et al., 2016). De peikschuifspanning (τ_p) wordt bepaald op basis van Formule 4. Invoer hiervoor zijn de piek stroomsnelheid en waterdiepte o.b.v. Formule 8 en Formule 9. Het resultaat is weergegeven in Figuur 37.

$$\tau(t) = \tau_p * \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^5 \quad \text{Formule 10}$$

Waar: $\tau(t)$ = Waterdiepte op het binnentalud (m)
 τ_p = piek waterdiepte (m)
 T_0 = overslagtijd (s)
 s = coëfficiënt (Formule 11)

$$s = \min\left(\max\left(4.66 * V^{0.16} - 4.33; \frac{5}{3}\right); \frac{10}{3}\right) \quad \text{Formule 11}$$

Waar: s = Coëfficiënt verloop schuifspanning
 V = golfoverslag volume (m³/m)



Figuur 37 Verloop van de theoretische schuifspanning op het binnentalud nabij de kruin voor de verschillende golf volumes van de hydraulische metingen

Voor het bepalen van het theoretisch verloop van de waterdiepte en stroomsnelheid op een locatie lager op het talud (zoals halverwege de taludhelling en aan de teen van de dijk) zijn de formules van Schuttrümpf en Oumeraci (2005) toegepast.

$$v(s) = \frac{v_0 + \frac{k_1 h}{f} \tanh \frac{k_1 t}{2}}{1 + \frac{f v_0}{h k_1} \tanh \frac{k_1 t}{2}} \quad \text{Formule 12}$$

Waar: $v(s)$ = stroomsnelheid als functie van afstand vanaf kruin (m/s)
 v_0 = stroomsnelheid begin landzijde (m/s)
 k_1 = Factor – zie Formule 14
 h = waterdiepte (m)
 f = bodemwrijvingscoëfficiënt [-] (hier 0.02)
 t = tijd (s)

$$t \approx -\frac{v_0}{g \sin \beta} + \sqrt{\frac{v^2}{g^2 (\sin \beta)^2} + \frac{2s}{g \sin \beta}} \quad \text{Formule 13}$$

Waar:	t	=	Tijd van golf om zicht voort te planten langs het talud (s)
	v_0	=	stroomsnelheid begin landzijde (m ² /s)
	g	=	zwaartekracht (9.81 m/s ²)
	β	=	landzijde hellinghoek (radialen)
	s	=	afstand vanaf kruin op landzijde dijk (m)

$$k_1 = \sqrt{\frac{2fg \sin \beta}{h}}$$

Formule 14

Waar:	k_1	=	Factor
	f	=	bodemwrijvingscoëfficiënt (hier 0.02)
	g	=	zwaartekracht (9.81 m/s ²)
	β	=	landzijde hellinghoek (radialen)
	h	=	waterdiepte (m)

$$h(s) = \frac{v_0 h_0}{v}$$

Formule 15

Waar:	$h(s)$	=	waterdiepte als functie van afstand vanaf kruin (m)
	v_0	=	stroomsnelheid begin landzijde (m ² /s)
	h_0	=	waterdiepte begin landzijde (m)

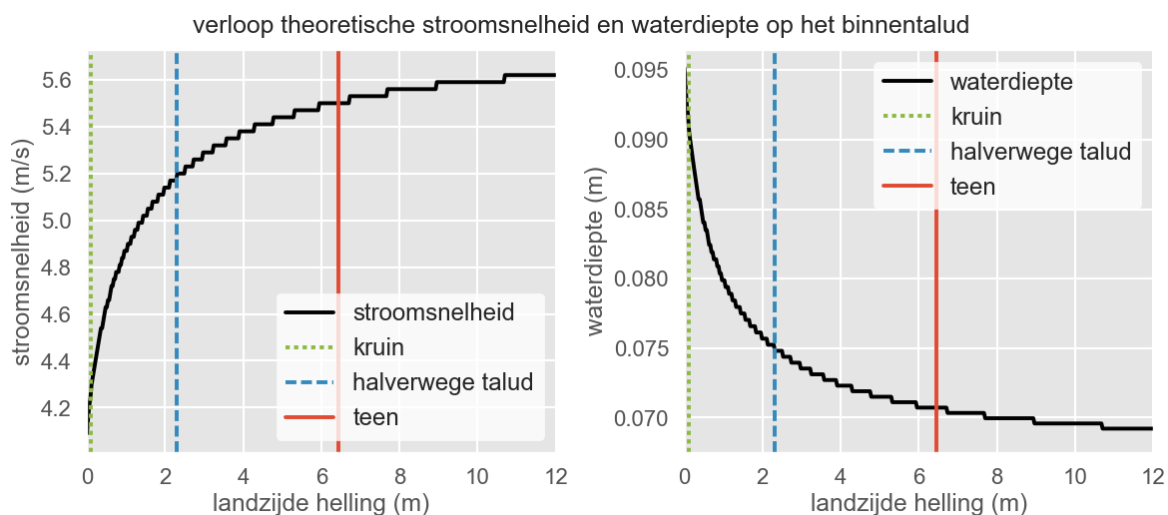
$$\beta = \tan^{-1} \frac{1}{r}$$

Formule 16

Waar:	β	=	landzijde hellinghoek (radialen)
	r	=	hellingratio (hier 1.8, voor helling 1:1.8)

Sinds zowel de waterdiepte als de stroomsnelheden onbekend zijn moet er voor elke afstand tot de kruin s iteratief bepaald worden welke $v(s)$ het meest in de buurt komt van t waarnaar vervolgens de corresponderende $h(s)$ afgeleid kan worden met Formule 15. Om deze iteratie slag te beginnen wordt elk golfvolume geïnterpoleerd met behulp van Formule 5 om zodoende een tijdsverloop van waterdiepte en stroomsnelheid op de kruin te krijgen, waarnaar aangenomen wordt dat $v_0 = v_{max}$ en $h_0 = h_{max}$ voor berekening van $v(s)$ en $h(s)$.

Een voorbeeld van het verloop van de waterdiepte en de stroomsnelheid als functie van de afstand ten opzichte van de kruin (s) is weergegeven in Figuur 38.



Figuur 38 Verloop stroomsnelheid en waterdiepte op landzijde helling met daarin aangegeven de locaties waar meetinstrumenten geplaatst zijn - $V = 2000 \text{ l/m}$.

4.1.3 Gemeten en theoretische hydraulische belasting tijdens de golfverslag proeven

In de overslagproeven Wijmeers zijn zes proeven met verschillende overslagdebieten uitgevoerd. De karakteristieken van elk van deze proeven zijn beschreven in Tabel 15. In deze proeven slaan golven met een wisselend volume gedurende over de dijk. In Tabel 16 is weergegeven hoe dit tijdsverloop eruit ziet. In de tabel zijn de eerste vijf golven uit de totale tijdseries van twee uur weergegeven (golfverslag proef met een gemiddeld golfverslagdebiet van 50 l/s/m).

Proef	Overslagdebiet (l/s/m)	Significante golfhoogte (m)	Duur proef (min)	Locatie
1	1	0.4	24	Proefsectie I
2	5	0.6	120	Proefsectie I
3	10	0.8	120	Proefsectie I
4, 5	25	1.2	120	Proefsectie I en III
6	50	1.4	12	Proefsectie I

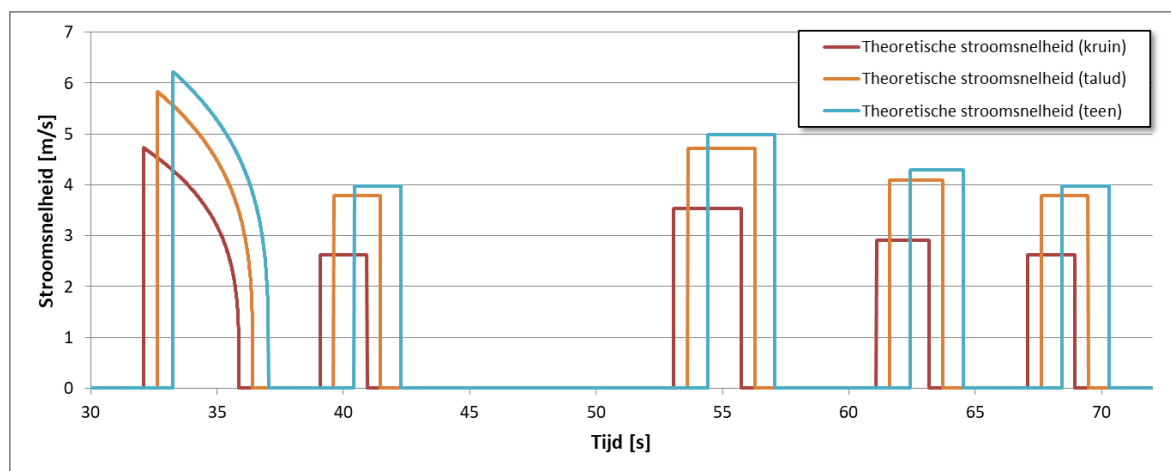
Tabel 15 Karakteristieken golfverslag proeven

Golf	Volume (l/m)	Tijd sinds start (sec)	Tijd sinds start (hh:mm:ss)
1	847	32	0:00:32
2	150	39	0:00:39
3	361	53	0:00:53
4	203	61	0:01:01
5	150	67	0:01:07

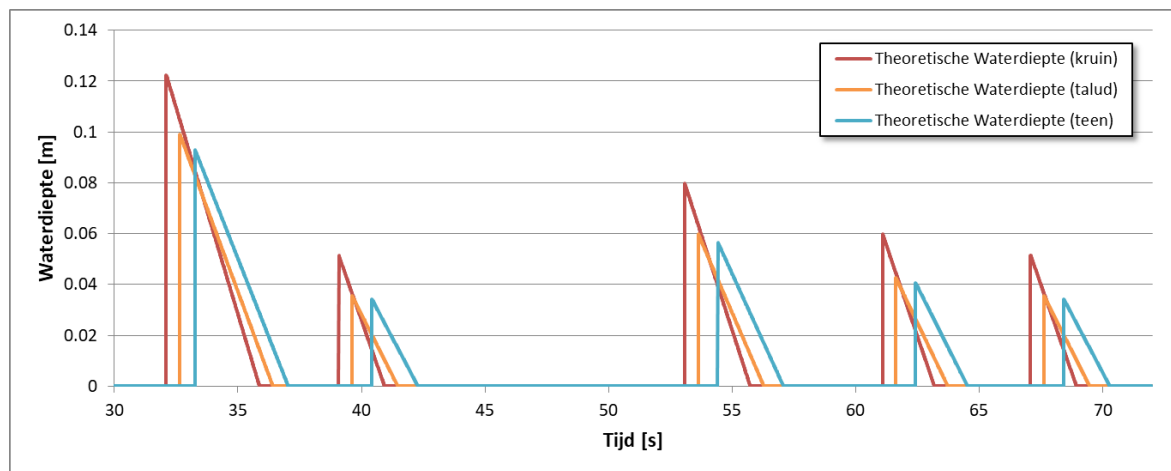
Tabel 16 Beschrijving registratie proefverloop (voorbeeld o.b.v. overslagproef $q = 50 \text{ l/s/m}$). Bron: stuurfiles INFRAM (2015). Totale tijdsduur van de proef is 12 minuten

Op basis van de beschreven hydraulische metingen (zie paragraaf 1 en 2) wordt een tijdsverloop van de laagdikte en de stroomsnelheid opgesteld voor de hele overslagproef (zoals Tabel 16). Dit is zowel gedaan voor het theoretisch tijdsverloop als het gemeten tijdsverloop.

Het theoretische verloop van de hydraulische belasting op het binnentalud tijdens de overslagproef wordt bepaald op basis van de in paragraaf 4.1.2 beschreven aanpak (Formule 5 t/m Formule 16). Op basis van het theoretische stroomsnelheid en waterdiepte is vervolgens de schuifspanning (Formule 10), het overslagdebiet (Formule 1) en de stroomsnelheid tot de tweede macht (u^2) en de derde macht (u^3) bepaald. De beschreven tijdseries zijn afgeleid voor alle vijf de overslagproeven. De tijdseries van de waterdiepte en de stroomsnelheid voor de eerste vijf golven uit de overslagproef van 50 l/s/m weergegeven in Figuur 39 en Figuur 40.



Figuur 39 Tijdsreeks van de theoretische stroomsnelheid op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16



Figuur 40 Tijdsreeks van de theoretische waterdiepte op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16

De gemeten hydraulische belasting op het binnentalud wordt geïnterpoleerd op basis van de in paragraaf **Error! Reference source not found.** en 4.1.1 beschreven hydraulische metingen. In geval van een golf van 847 l/m wordt dus geïnterpoleerd tussen een golfvolume van 500 l/m en 1000 l/m.

De interpolatie van de stroomsnelheid en de waterdiepte is uitgevoerd op basis van Formule 17. In deze interpolatieformule wordt de theoretische tijdsduur (zie Formule 3) van de golf gebruikt

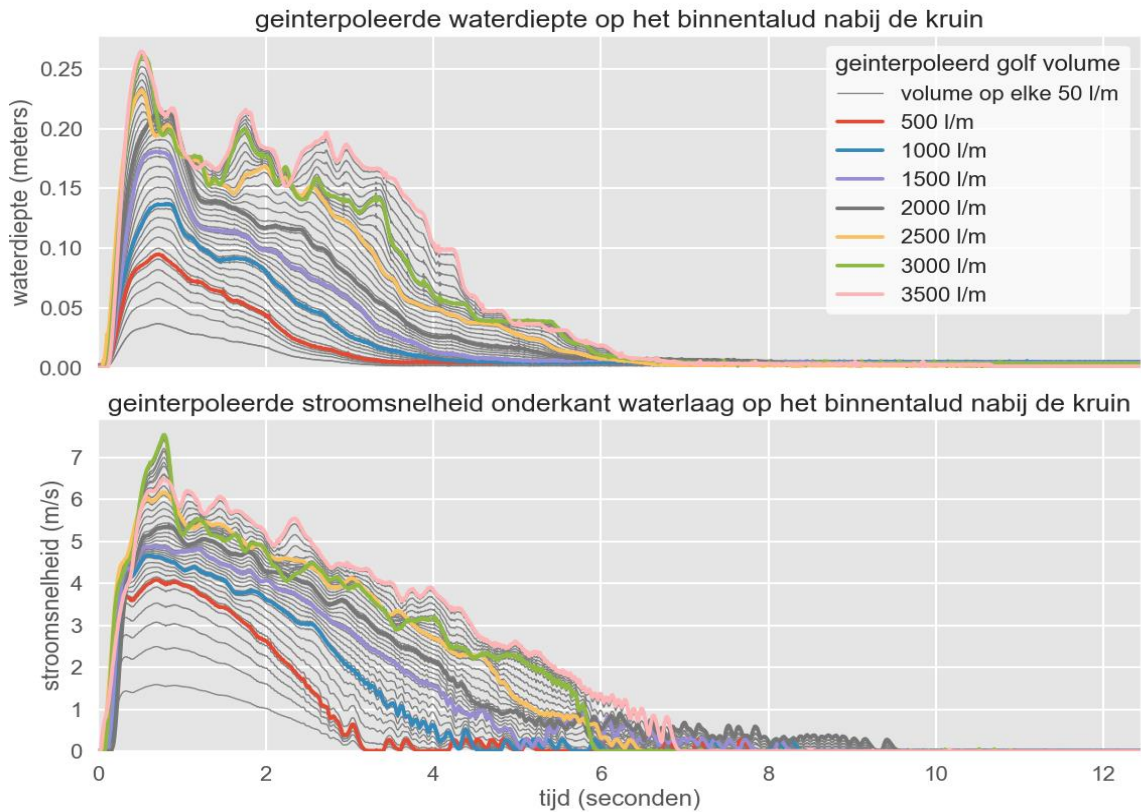
om de verhouding van interpoleren te bepalen. Hierdoor wordt beter aangesloten bij de fysica van de proeven.

$$\begin{aligned}
 & \left(V < 0.5 \rightarrow x = \frac{T_0(V)}{T_0(0.5)} * x_{V=0.5} \right) \\
 \wedge & \left(0.5 \leq V \leq 1.0 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(0.5)}{T_0(1.0) - T_0(0.5)} * (x_{V=1.0} - x_{V=0.5}) + x_{V=0.5} \right) \\
 \wedge & \left(1.0 \leq V \leq 1.5 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(1.0)}{T_0(1.5) - T_0(1.0)} * (x_{V=1.5} - x_{V=1.0}) + x_{V=1.0} \right) \\
 \wedge & \left(1.5 \leq V \leq 2.0 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(1.5)}{T_0(2.0) - T_0(1.5)} * (x_{V=2.0} - x_{V=1.5}) + x_{V=1.5} \right) \\
 \wedge & \left(2.0 \leq V \leq 2.5 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(2.0)}{T_0(2.5) - T_0(2.0)} * (x_{V=2.5} - x_{V=2.0}) + x_{V=2.0} \right) \\
 \wedge & \left(2.5 \leq V \leq 3.0 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(2.5)}{T_0(3.0) - T_0(2.5)} * (x_{V=3.0} - x_{V=2.5}) + x_{V=2.5} \right) \\
 \wedge & \left(V > 3.0 \rightarrow x = \frac{T_0(V) - T_0(3.0)}{T_0(3.5) - T_0(3.0)} * (x_{V=3.5} - x_{V=3.0}) + x_{V=3.0} \right)
 \end{aligned}$$

Formule 17

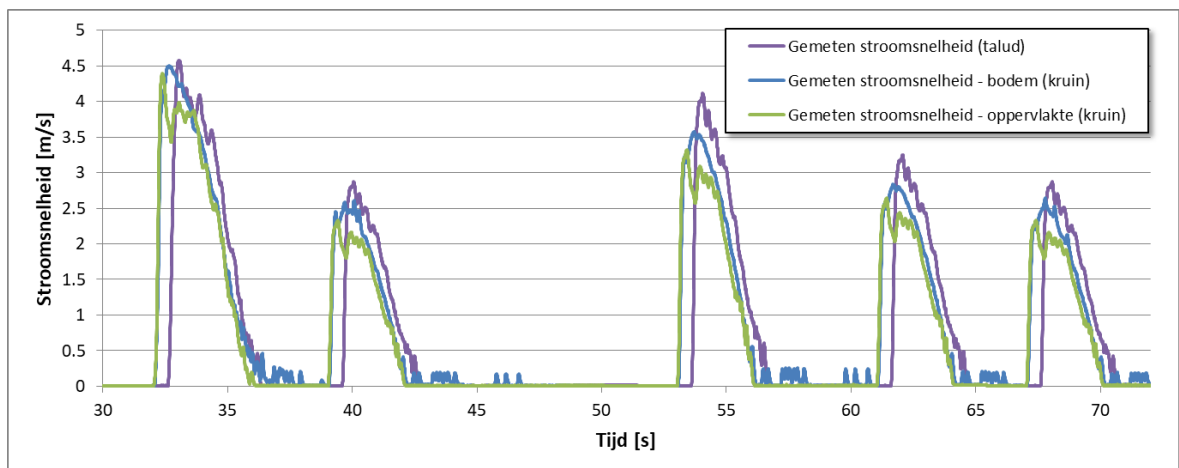
Waar: x = $v(t)$ voor interpolatie van stroomsnelheid of
 $h(t)$ voor interpolatie van waterdiepte
 V = golf volume (m^3)
 T_0 = overslagtijd (s)

Het wordt opgemerkt dat het interpoleren voor golven met een volume tussen de 0 en 500 l/m niet volledig aansluit bij de fysica. In Figuur 41 is de geïnterpoleerde waterdiepte en stroomsnelheid op het binnentalud op basis van de gemeten tijdsverlopen weergegeven. Het is te zien dat bij de lage overslaande volumes de tijdsduur van waarbij sprake is van een snelheid of waterdiepte groter dan nul niet afneemt. Het is de verwachting dat dit de resultaten niet significant beïnvloedt omdat deze volumes nauwelijks resulteren in schade.

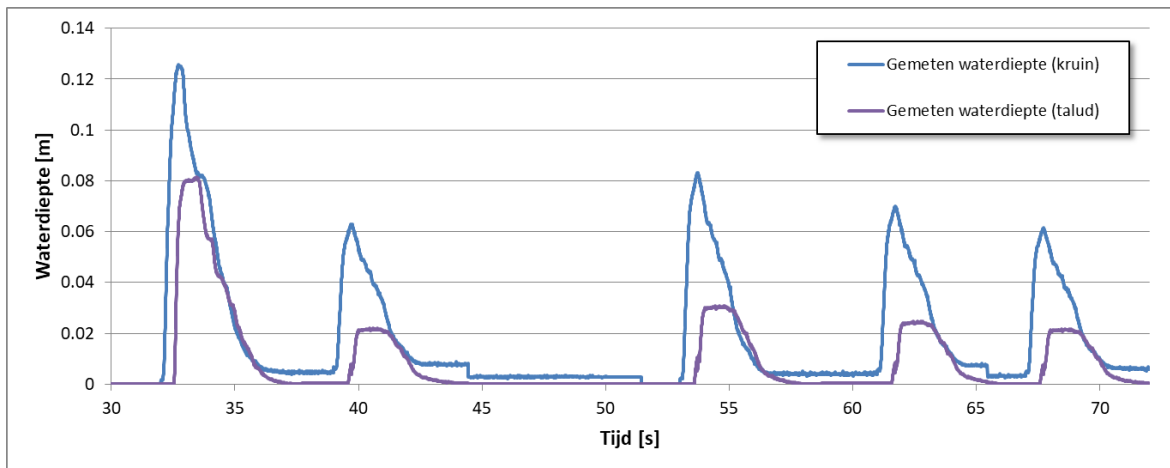


Figuur 41 Geïnterpoleerd tijdsverloop van de waterdiepte op de kruin (boven) en de stroomsnelheid onderkant waterlaag (onder).

Op basis van de geïnterpoleerde verlopen (Formule 17) van een enkele golf en het tijdsverloop van de overslaande golven binnen de proef (voorbeeld in Tabel 16) is een tijdsverloop opgesteld van de waterdiepte, de stroomsnelheid, het debiet, de schuifspanning en de stroomsnelheid tot de tweede macht (u^2) en de derde macht (u^3) op het binnentalud. Dit voor alle vijf de uitgevoerde overslagproeven. De tijdseries van de waterdiepte en de stroomsnelheid voor de eerste vijf golven uit de overslagproef van 50 l/s/m weergegeven in Figuur 42.



Figuur 42 Tijdseries van de gemeten stroomsnelheid op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16

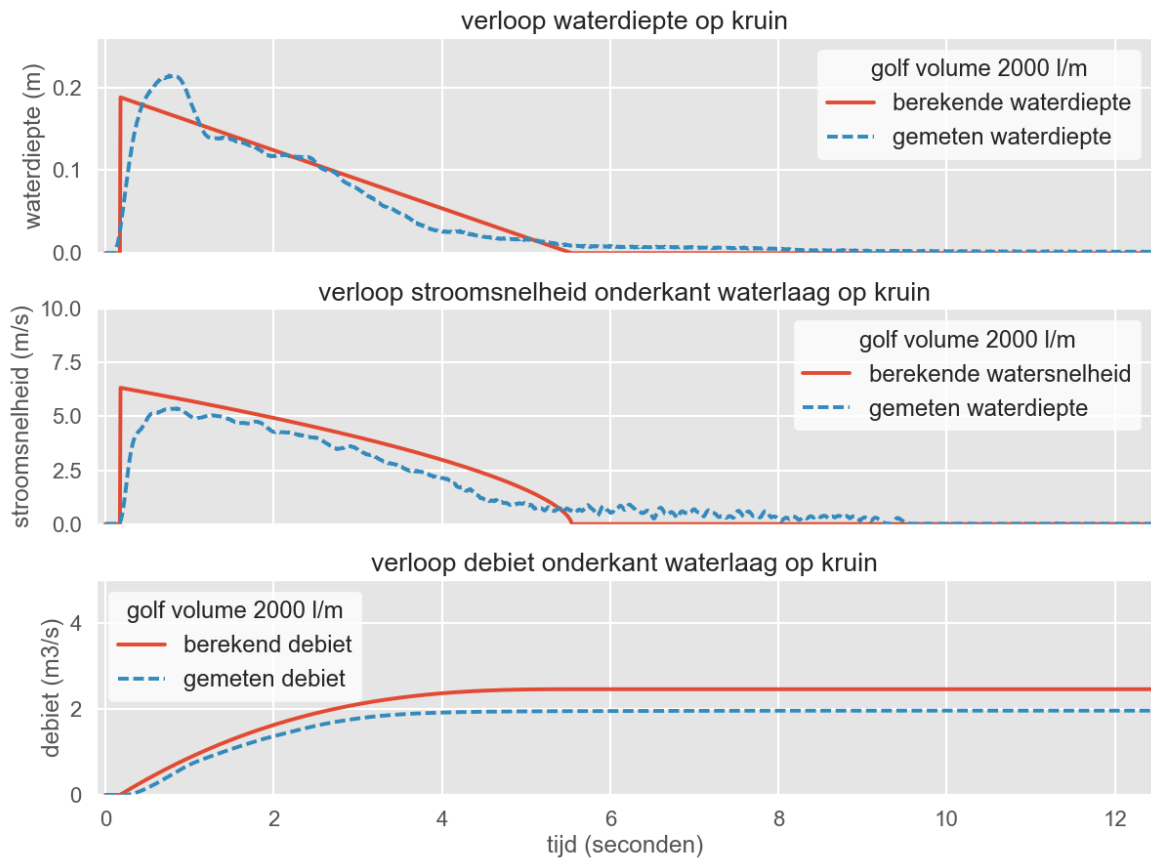


Figuur 43 Tijdsreeks van de gemeten waterdiepte op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16

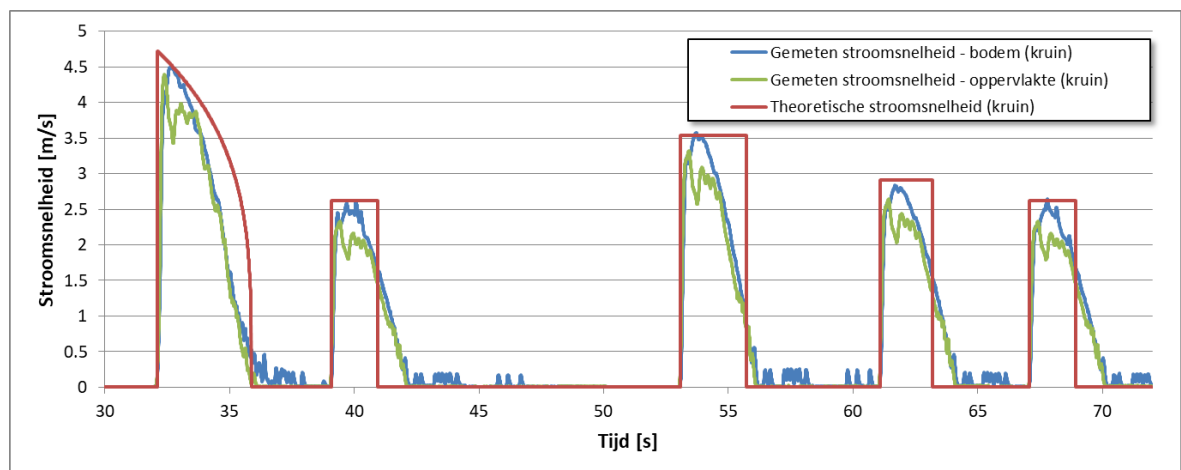
4.1.4 Vergelijking gemeten en theoretisch verloop bij golfoverslag

In deze paragraaf worden het opgestelde gemeten en theoretische tijdsverloop kort vergeleken. Het volgende wordt opgemerkt:

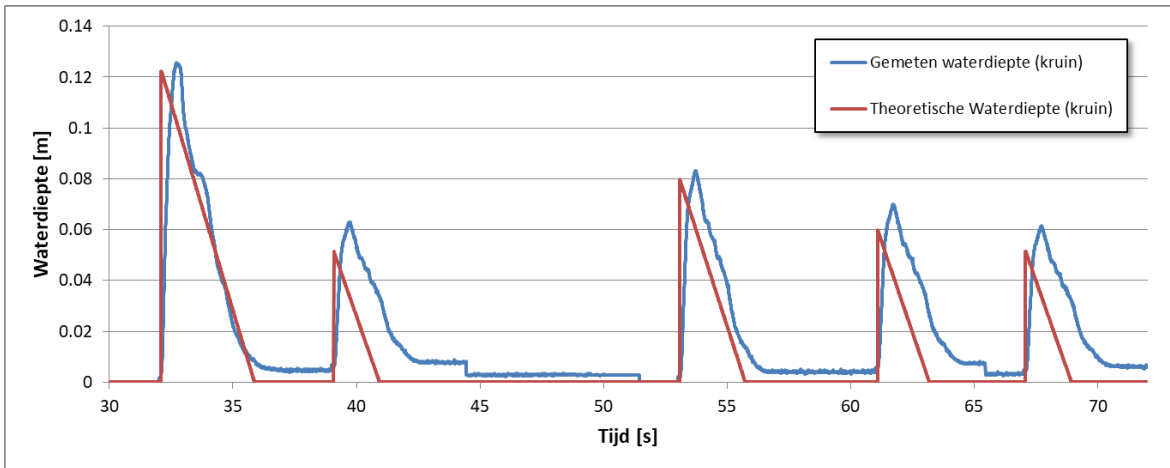
- De theoretische stroomsnelheid op de kruin ligt enigszins hoger dan de gemeten snelheid (zie Figuur 44 en Figuur 45 voor een voorbeeld);
- De theoretische waterdiepte ligt in de regel iets lager dan de gemeten waterdiepte (zie Figuur 44 en Figuur 46 voor een voorbeeld);
- Bovenstaande punten impliceert dat de effectieve wrijving hoger is dan verwacht wordt. De verruwing van de talud door stenen en andere oneffenheden kan dit verklaren;
- Het theoretisch cumulatief debiet ligt hoger dan het gemeten cumulatief debiet (zie Figuur 44 en Figuur 47 voor een voorbeeld). Het gemeten cumulatief debiet komt het beste overeen met de het opgegeven overslagvolume;
- Het theoretische waterstands- en stroomsnelheidsverloop bij golf volumes kleiner dan ongeveer 400 l/m wordt beschreven door een blokfunctie (die ook paragraaf 4.1.2). Het lijkt er daarom op dat de toegepaste formules zijn afgeleid voor hogere golfvolumes;
- Het gemeten verloop van de waterdiepte en stroomsnelheid op het talud ligt lager dan de theoretisch verloop (zie Figuur 48 en Figuur 49). De gemeten piek stroomsnelheid op het talud lijkt verminderd afhankelijk van het overslaand volume (Figuur 50). Bij volumes lager dan 500 l/m wordt de piek stroomsnelheid wel lager, dit wordt veroorzaakt door interpolatie tussen een volume van 0 en 500 l/m (Figuur 48);
- Bij volumes van kleiner dan 500 l/m wordt de 'gemeten' tijdsduur van de passerende golf overschat. Dit is ook beschreven in paragraaf 4.1.3, zie Figuur 45, Figuur 46, Figuur 48 en Figuur 49.



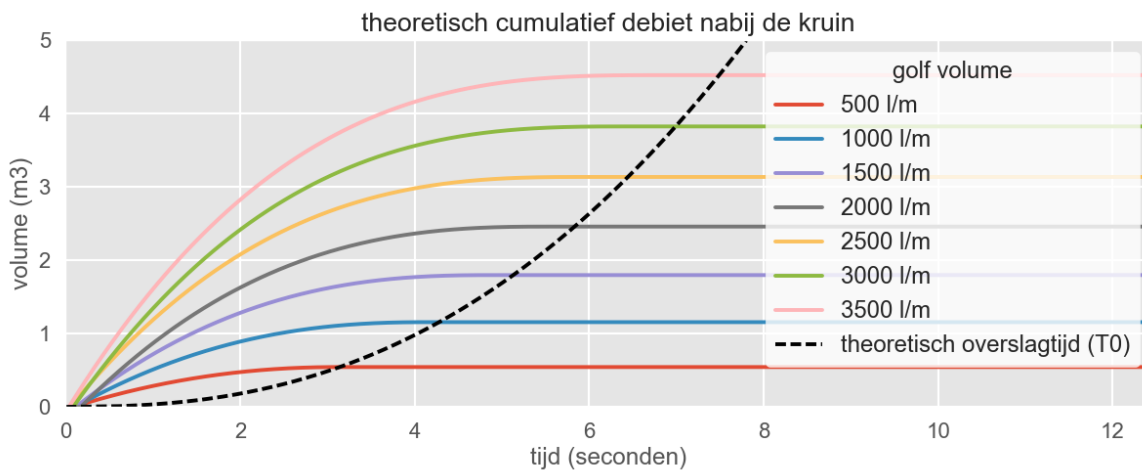
Figuur 44 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 2000 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



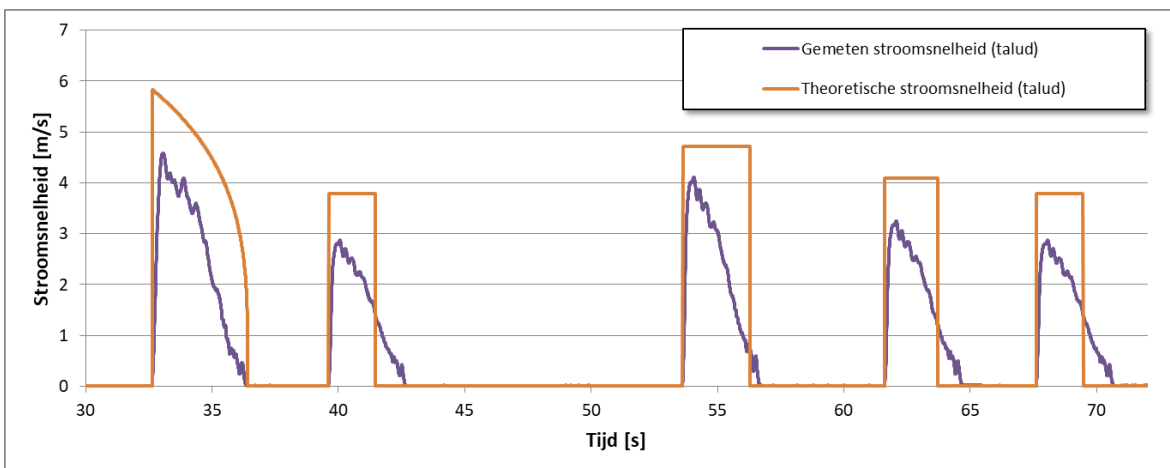
Figuur 45 Theoretisch en gemeten stroomsnelheid op de kruin op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16



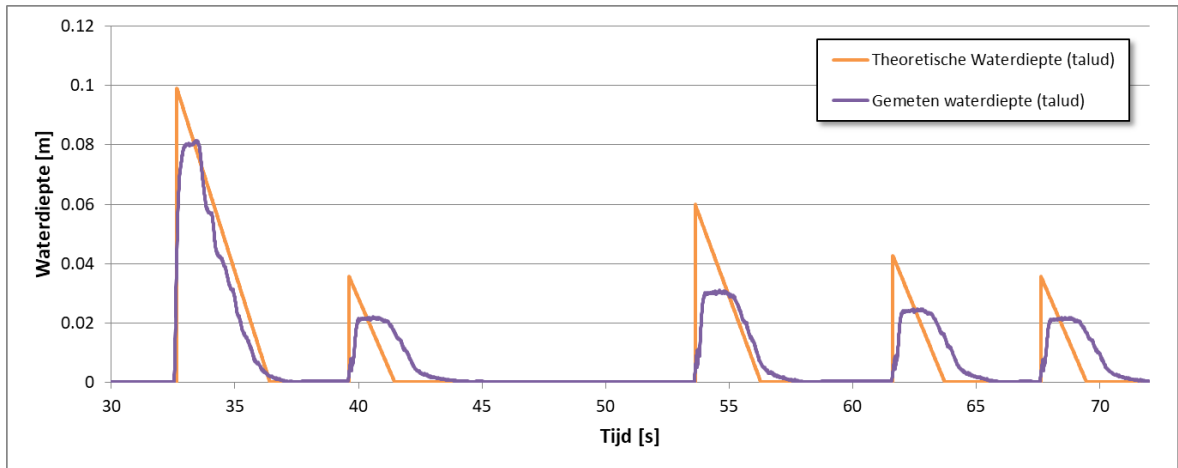
Figuur 46 Theoretisch en gemeten waterdiepte op de kruin op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16



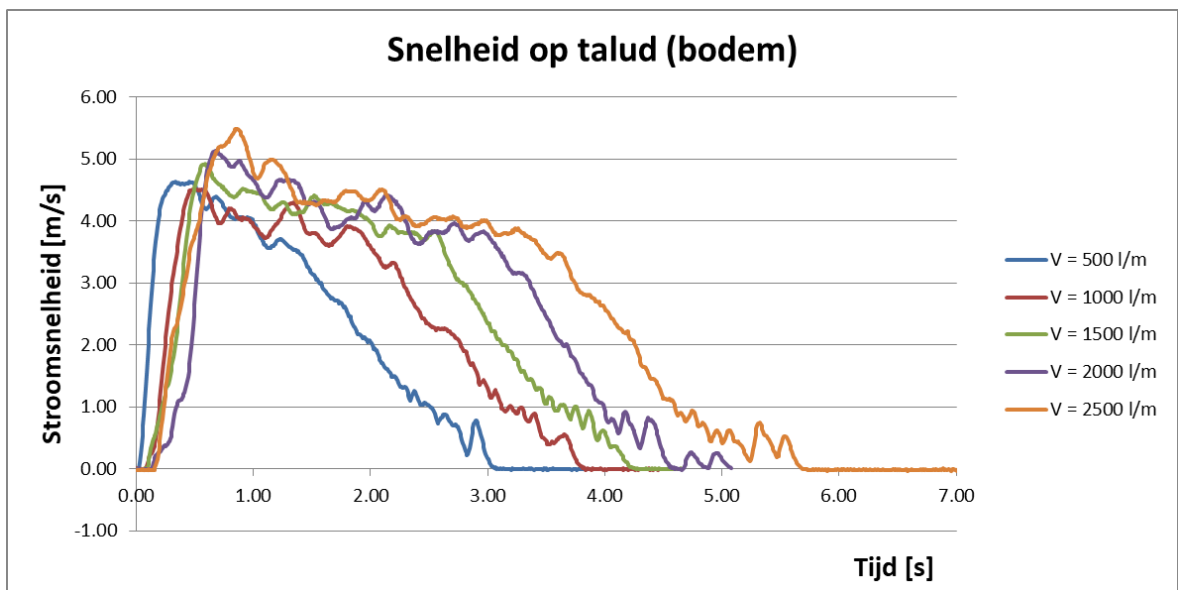
Figuur 47 Theoretisch cumulatief debiet van hydraulische metingen (locatie nabij de kruin)



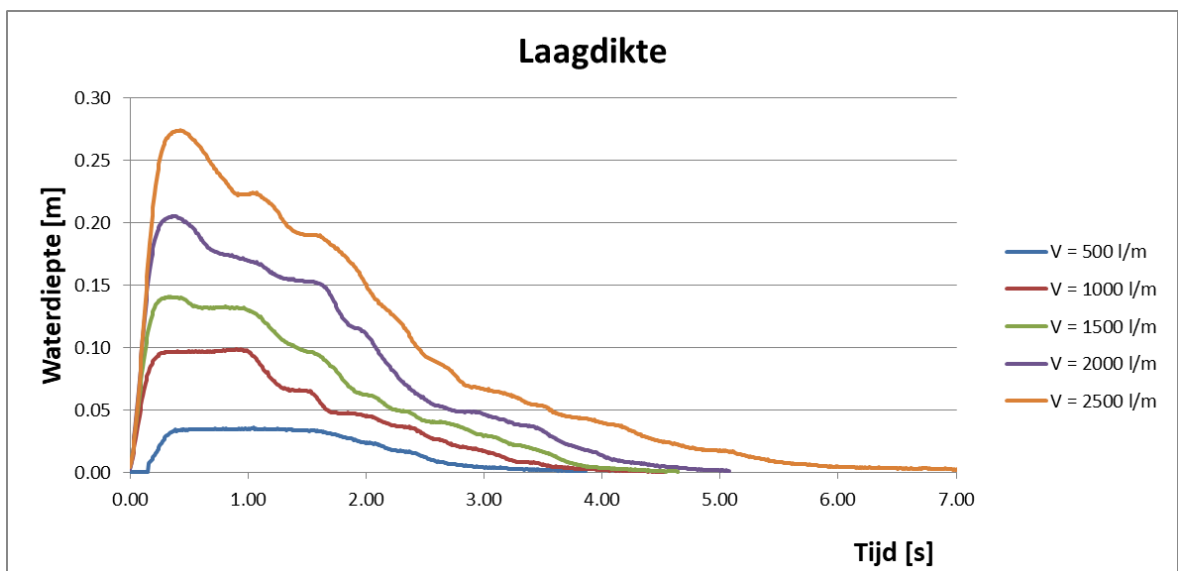
Figuur 48 Theoretisch en gemeten stroomsnelheid op het talud op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16



Figuur 49 Theoretisch en gemeten waterdiepte op het talud op basis van de eerste vijf golven uit Tabel 16



Figuur 50 Gemeten stroomsnelheid op het talud tijdens de hydraulische metingen.



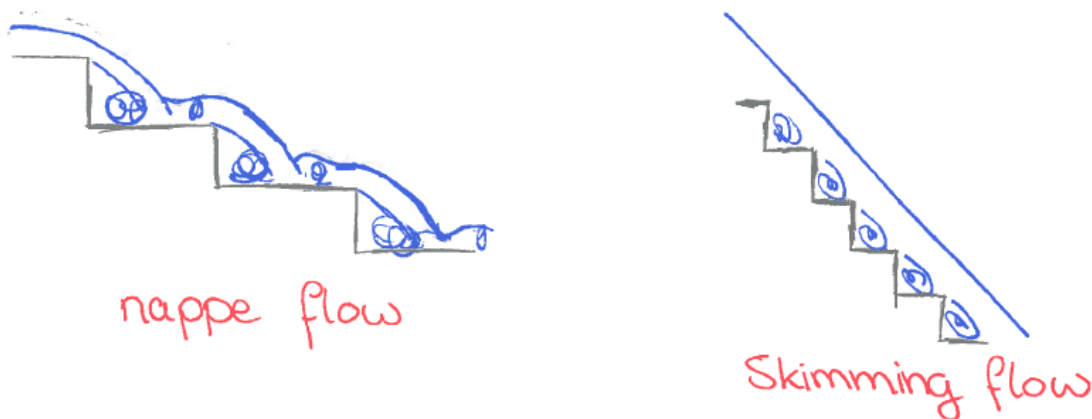
Figuur 51 Gemeten waterdiepte op het talud tijdens de hydraulische metingen.

4.2 Hydraulische belasting tijdens de overlooppoeven

Van de overlooppoeven zijn geen uitgebreide gemeten tijdsreeksen beschikbaar. Hier ligt de focus daarom op de theoretische waterdiepte en stroomsnelheid. Gezien het debiet tijdens een proef constant is, is het theoretische tijdsverloop van de waterdiepte en stroomsnelheid ook constant. Het theoretische tijdsverloop van de overloop proeven wordt beschreven door een blokfunctie van de waterdiepte en de stroomsnelheid. Daarmee is de theoretische schuifspanning ook constant tijdens het verloop van de proef.

De waterdiepte op het binnentalud wordt bepaald met de formules van Chezy (Formule 18). Hierbij wordt dus aangenomen dat het water op het binnentalud niet versneld en dat de potentiële energie gelijk is aan de wrijving (energie) die de waterlaag op het talud ondervindt. De formule van Chézy geeft de waterdiepte en snelheid voor uniforme stromingscondities. Dit is op het talud nadat het water is opgehouden te versnellen (naar verwachting superkritische stroming). Op de overgang van de kruin naar het talud kan kritische stroming worden verondersteld. Om beide waterdieptes te verbinden kan de verhanglijntheorie te worden toegepast. Gezien de taludhelling van 1V:2H is deze overgang waarschijnlijk heel kort. Dit is daarom niet meegenomen.

Tijdens de proeven is duidelijk te zien dat de stroming belucht wordt en trapsgewijs naar beneden stroomt. Dit proces wordt beschreven door het Chanson-model. De waterdiepte en de stroomsnelheid die volgen uit het Chanson model zijn echter zeer lokaal op de 'traptreden' gedefinieerd. De waterdiepte en stroomsnelheid zijn daarom sterk afhankelijk van de locatie op 'het trapje'. Dit past niet bij de aard van de erosie formules, die meer van talud gemiddelde snelheden uitgaan. Daarnaast wordt opgemerkt dat de situatie op het talud sterk afwijkt van de situaties waarover het in de literatuur gaat (dwz. in werkelijkheid is het talud erg onregelmatig in alle richtingen terwijl de literatuur gelijkmatige trappen beschrijft). Dit maakt dat de benadering met de "chanson methode" sterk afhankelijk is van de gekozen schematisatie. Zelfs zodanig dat de uitwerking met het Chanson model mogelijk geen waarde toevoegt t.o.v. uitwerking o.b.v. de verhanglijnmethode. Bovenstaande in acht nemend is daarom de formule van Chezy toegepast om de waterdiepte en stroomsnelheid op het binnentalud te bepalen.



Figuur 52 Skimming en nappe flow volgens het Chanson model.

Wanneer de formule van Chezy wordt gecombineerd met de formule voor het afvoerdebiet (Formule 1 – $q(t) = v(t) * h(t)$) leidt dit tot een relatie tussen het overloopdebiet (invoer van de proef) en de waterdiepte in Formule 19.

$$v(t) = C * \sqrt{R * i} = C \sqrt{h(t) * i} \quad \text{Formule 18}$$

Waar:	$v(t)$	=	Stroomsnelheid (m/s)
	C	=	Chezy ruwheidscoëfficiënt ($m^{1/2}/s$)
	R	=	Hydraulische radius (m)
	$h(t)$	=	Waterdiepte (m)
	i	=	Verhang (-)

$$h(t) = \left(\frac{q(t)}{C * \sqrt{i}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Formule 19}$$

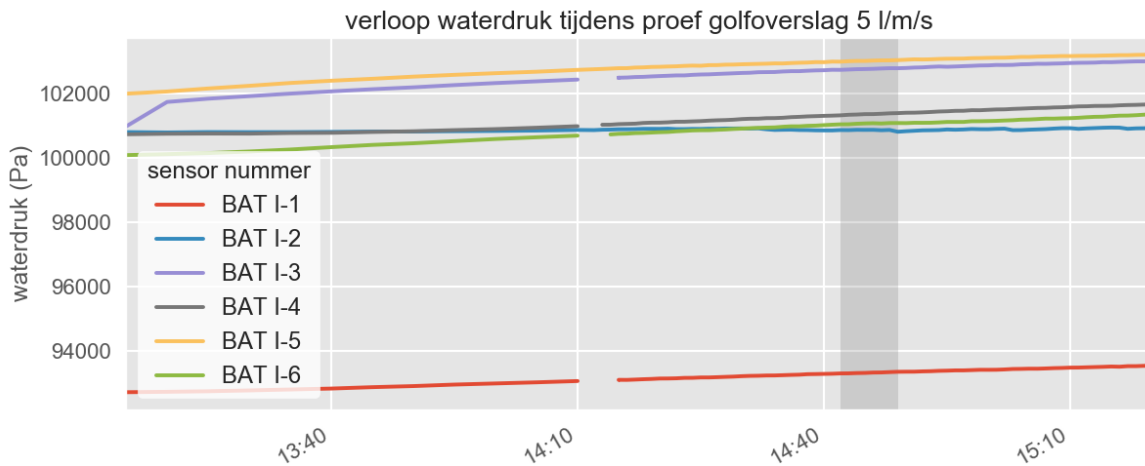
Waar:	$h(t)$	=	Waterdiepte binnentalud (m)
	C	=	Chezy ruwheidscoëfficiënt ($m^{1/2}/s$)
	$q(t)$	=	Overloopdebiet ($m^3/s/m$)
	i	=	Verhang (-)

De Chezy ruwheidscoëfficiënt is strikt genomen afhankelijk van de waterdiepte op het binnentalud en daarmee van het overloopdebiet. Voor de afleiding van de waterdiepte en stroomsnelheid wordt vanuit pragmatisch oogpunt één waarde voor de Chezy coëfficiënt aangenomen, namelijk een ruwheidscoëfficiënt van 30. Deze waarde ligt in dezelfde orde van grootte als de ruwheid van Manning (zie paragraaf 4.1 en 5.3) en het wrijvingscoëfficiënt uit Dean et. al (2010) (paragraaf 5.5). De gemeten en berekende stroomsnelheid bij overloop (o.b.v. van Chezy) lijkt in dezelfde orde van grootte te liggen als de gemeten snelheden. Door de grote beluchting van de stroming op het binnentalud lijkt de stroming niet uniform (o.b.v. videobeelden). Dit maakt het lastig de theoretische en gemeten stroomsnelheden te vergelijken

4.3 Piëzometrische druk

Tijdens het verloop van de golf overslag proeven zijn er op het binnentalud ook waterdruk metingen uitgevoerd met behulp van piezometers. De waterdruk is gedurende meerdere dagen gemeten. In Bijlage A uit INFRAM (2015) is beschreven wanneer de proeven hebben plaatsgevonden. Deze periodes zijn geselecteerd uit de brondata. De waterdruk tijdens de proeven is weergegeven in Bijlage D: Verloop waterdruk golfverslag en overloop proeven (zie Figuur 53 voor een voorbeeld). Daarnaast is de waterdruk zoals gemeten door de sensoren weergegeven in .csv bestanden.

Bijlage uit het Factual report van Infram (2015) beschrijft dat de golfverslagproeven soms even zijn gepauzeerd. Dit is in de figuren weergegeven met een donkergrijze arcering. In de .csv bestanden is dit weergegeven in een extra kolom.



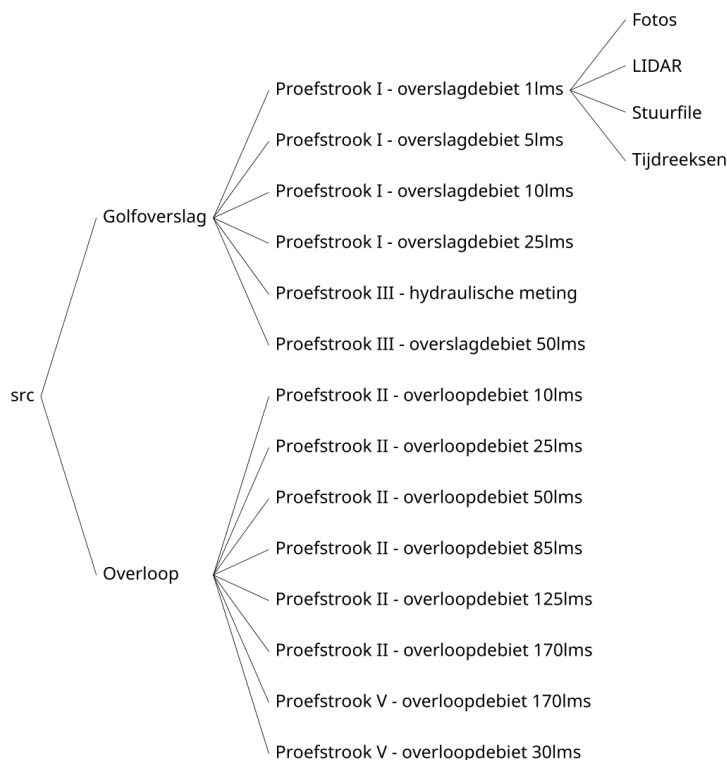
Figuur 53 Verloop van de waterdruk tijdens golfoverslagproef 5 l/s/m op proefstrook I, in de periode die donkergrijs is gearceerd was de proef gepauzeerd (zie Bijlage A uit INFRAM, 2015).

4.4 Data structuur

Per proef is informatie gebundeld over:

1. Schadebeelden tijdens de proef (Foto's en/of LIDAR scans)
2. De stuurfile die de aansturing van de golfoverslagsimulator beschrijft
3. Tijdreeksen van waterdiepte, stroomsnelheid, waterdruk, schuifspanning, etc. tijdens de proef

Als deze informatie beschikbaar is, is deze opgenomen in bijgevoegde oplevering. De structuur waarin de data is opgeleverd is weergegeven in Figuur 54. Per proef is een map Fotos, LIDAR, Stuurfile en Tijdreeksen opgenomen. Indien deze informatie voor een proef niet relevant of beschikbaar is, is de map leeggelaten.



Figuur 54 Aangehouden folderstructuur voor de verschillende proeven op de verschillende proefstroken.

5 Erosie van de grasmat (Deltares)

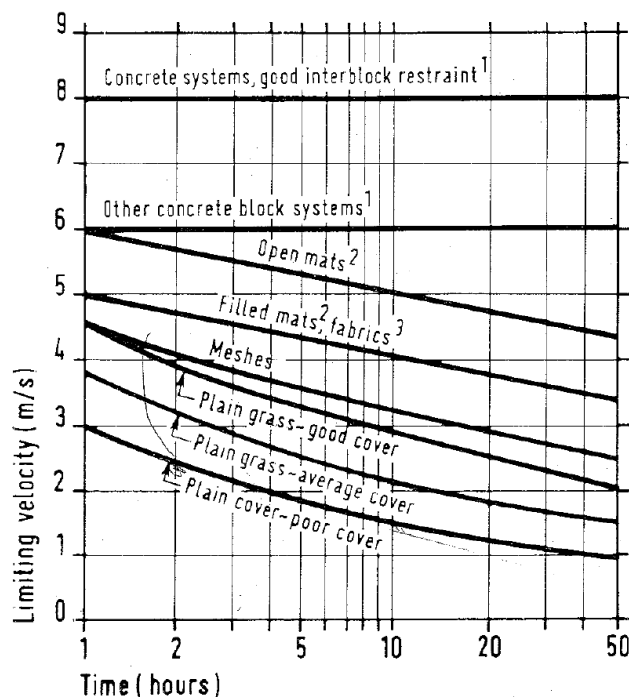
5.1 Inleiding

In het voorliggende hoofdstuk wordt een vergelijking gemaakt tussen de proefresultaten en verschillende schademodelen. De volgende bronnen / modellen zijn geïnventariseerd:

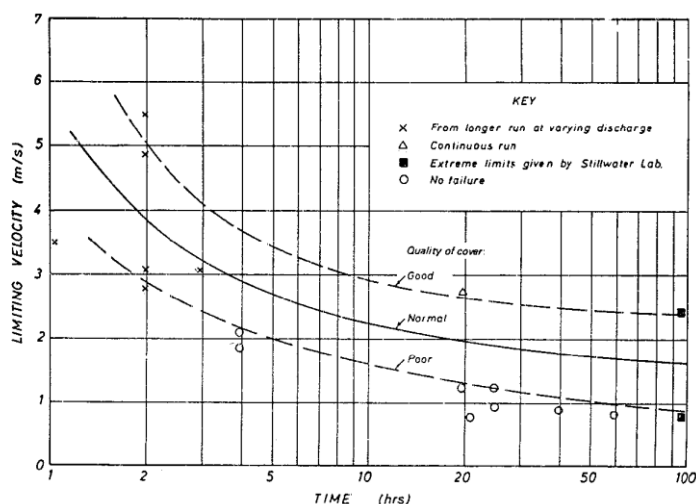
- Overloop
 - o Hewlett et al., 1987
 - o Temple, 1992
- Overslag
 - o Dean et al., 2010 in combinatie met Hughes (2011)
 - o Basisinstrumentarium Nederland
 - o Hoffmans et al., 2010
- Young, 2005;

5.2 Hewlett et al. (1987)

In Hewlett et al (1987) is een figuur gepresenteerd waarin de sterkte van grasbekledingen onder stromingsbelasting is beschreven als functie van de kwaliteit van de graszode, de optredende watersnelheid en de tijdsduur van de belasting. De betreffende figuur is weergegeven in Figuur 55. De curves met betrekking tot grasbekledingen (zonder versterkingsmaatregelen) zijn oorspronkelijk gepresenteerd in Whitehead and Nickersons (1976), zie Figuur 56.



Figuur 55 Curve zoals gepresenteerd in Hewlett et al (1987).



Figuur 56 Curve zoals gepresenteerd in Whitehead and Nickersons (1976). Te zien valt dat de figuur afwijkt ten opzichte van de figuur in Hewlett et al (1987).

De brondata voor Figuur 56 bestaat uit testen welke zijn uitgevoerd in de VS (jaren 40 van de 20e eeuw) en Australië (jaren 60 van de 20e eeuw). Er zijn geen aanvullende testen uitgevoerd op gras (zonder kunstmatige versterkingen) ten behoeve van het opstellen van Figuur 56. De brondata van de figuur in Whitehead and Nickersons (1976) is beschouwd in Young (2005). In Young (2005) wordt geconcludeerd dat de figuur in Whitehead and Nickersons (1976) is gebaseerd op zeer beperkte data en is gebaseerd op testen welke zijn uitgevoerd tijdens de zomer (waarbij het gras groeit en wellicht sterker is).

Het valt op dat de figuur in Hewlett et al (1987) gewijzigd is ten opzichte van de figuur in Whitehead and Nickerson (1976). Hoewel dit niet expliciet is beschreven in Hewlett et al (1987) wordt aangenomen dat de figuren wat conservatiever zijn opgesteld aangezien deze bedoeld zijn om grasbekledingen mee te ontwerpen.

5.2.1 Vergelijking Hewlett et al (1987) met resultaten Wijmeers II proeven

Aangezien de methode van Hewlett et al (1987) alleen van toepassing is op een continue stromingsbelasting en niet op golfoverslagbelasting, wordt de methode vergeleken met de overloopproeven. Voor deze methode is de volgende data benodigd:

- Categorie van het gras
- Belastingduur
- Stroomsnelheid

Categorie van het gras ('good cover', 'average cover' of 'poor cover')

Op basis van de analyse in hoofdstuk 3 wordt gesteld dat het hier een 'poor cover' betreft.

Belastingduur (in uren)

De belastingduur per proef was 2 uur (zie hoofdstuk 2) met uitzondering van de proef waarbij het gras voorafgaande aan de proef was verwijderd. Daar was de belastingduur 45 minuten.

Stroomsnelheid (m/s)

De stroomsnelheid is beschreven in Ponsioen (2016). Dit is op drie manieren uitgevoerd:

1. Stopwatch. Met een stopwatch is gemeten hoe lang een bal over een lengte van 6 m door de stroming wordt meegevoerd (uitgevoerd bij $q = 125 \text{ l/s/m}$ en 160 l/s/m)

2. Paddle wheel. Er zijn metingen met een paddle wheel uitgevoerd. In Ponsioen (2016) wordt opgemerkt dat er onduidelijke uitkomsten zijn en dat dit nog verder bestudeerd dient te worden. Om deze reden worden deze metingen niet in onderhavige analyse meegenomen.
3. Infrarood camera's. Er zijn metingen met infrarood camera's uitgevoerd. Dit is beschreven in Ponsioen (2016). Echter, uit de analyse van Ponsioen (2016) volgt geen eenduidige snelheid per test.

In de analyse wordt uitgegaan van de metingen met een stopwatch. Deze metingen zijn als volgt:

$$q = 125 \text{ l/s/m} \rightarrow v = 2,9 \text{ m/s (minimum: } v_{\min} = 2,6 \text{ m/s, maximum: } v_{\max} = 3,3 \text{ m/s)}$$

$$q = 160 \text{ l/s/m} \rightarrow v = 3,2 \text{ m/s (minimum: } v_{\min} = 3,1 \text{ m/s, maximum: } v_{\max} = 3,4 \text{ m/s)}$$

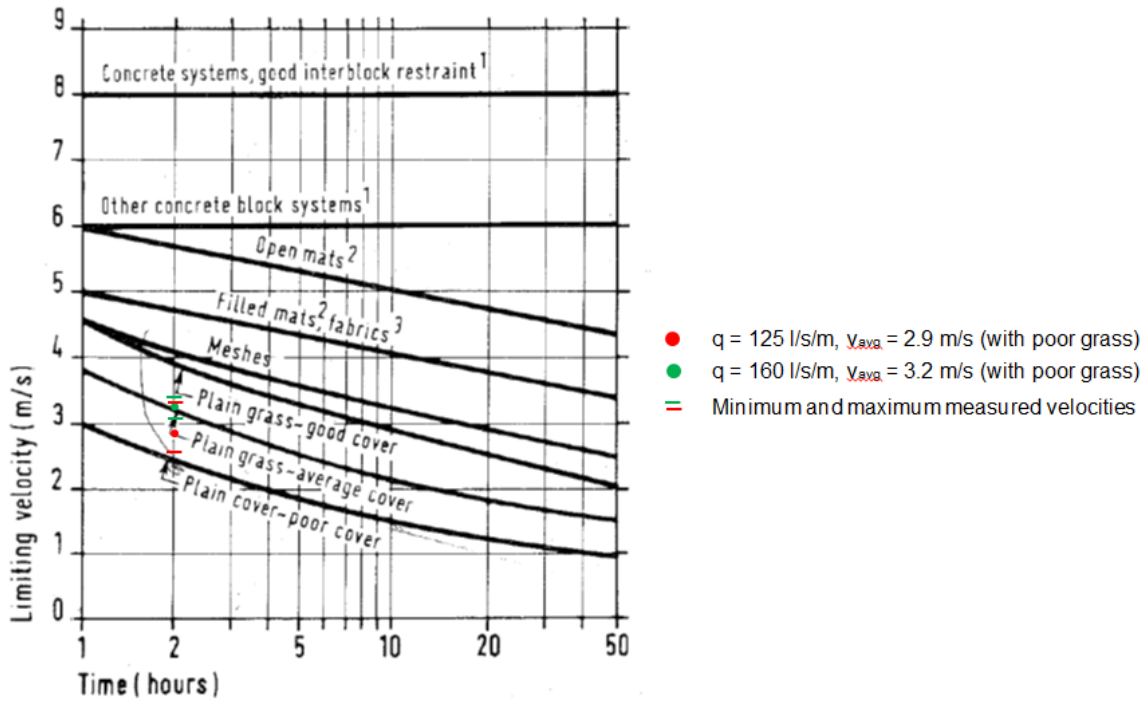
De minimum en maximum waarden geven de range weer van de verschillende waarnemingen (met behulp van de stopwatch) welke zijn gerapporteerd in Ponsioen (2016). De verschillende proeven zijn samengevat in Tabel 17.

Proefstrook	q (l/s/m)	t (uur)	v (m/s)	Schade
II	10	2	onbekend	geen
	25	2	onbekend	geen
	50	2	onbekend	geen
	85	2	onbekend	geen
	125	2	2,9 (2,6 – 3,3)	geen
	170	2	3,2 (3,1 – 3,4)	minimale schade
V-vak B	170	2	3,2 (3,1 – 3,4)	minimale schade
V-vak A	30*	2	onbekend	significante schade

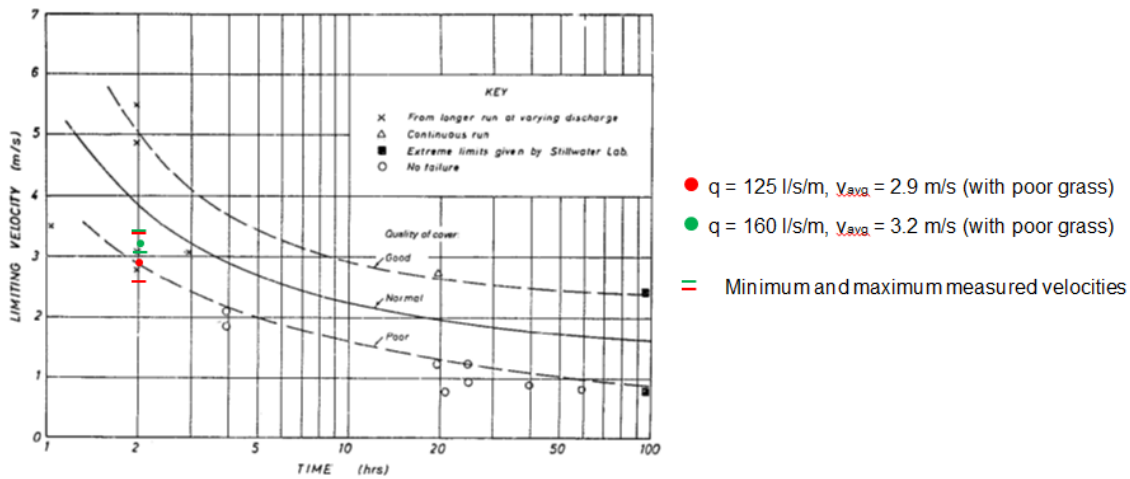
* grasmat verwijderd voorafgaande aan de proef

Tabel 17 Samenvatting overloopproof.

De proefresultaten en de gemeten snelheden zijn ingetekend in de figuur van Hewlet et al (1987) en Whitehead and Nickerson (1976). Hierbij is alleen de zwaarste proefconditie ingetekend en is niet gecorrigeerd voor de effecten van de eerdere proeven met lagere stroomsnelheden. Dit is weergegeven in Figuur 57 en Figuur 58.



Figuur 57 Vergelijking resultaten met grafiek zoals weergegeven in Hewlett et al (1987)



Figuur 58 Vergelijking resultaten met grafiek zoals weergegeven in Whitehead and Nickerson (1976)

5.2.2 Discussie

Zoals in de bovenstaande figuren te zien valt liggen de resultaten min of meer op de lijn welke in Whitehead and Nickerson (1976) zijn gepresenteerd. De resultaten liggen enigszins boven de lijn welke is gepresenteerd in Hewlett et al (1986). Opgemerkt dient wel te worden dat er een onzekerheid is rondom:

- De parameters behorende bij de uitgevoerde testen (graskwaliteit en daadwerkelijk optredende stroomsnelheid);
- De lijn zoals gepresenteerd in Whitehead and Nickerson (1976) en Hewlett et al (1987). Deze lijnen zijn gebaseerd op data welke niet noodzakelijkerwijs vergelijkbaar zijn met de hier gepresenteerde data. De kwaliteit van de zode in de basisdata die ten grondslag

ligt aan de lijnen is niet zodanig bekend en beschreven dat deze betrouwbaar aan de beproefde graskwaliteit is te koppelen.

5.3 Temple (1992)

5.3.1 Achtergrond

In Temple (1992) wordt een vereenvoudigd model beschreven waarin de erosie van overlaten bestaande uit grondconstructies en voorzien van een grasbekleding kan worden bepaald. Het is in de genoemde paper enigszins onduidelijk of de modellering uitgaat van een sterktecomponent van het gras of dat deze uitgaat van een situatie waarbij aan het gras geen sterkte wordt toegekend. Dit model gaat uit van zogenoemde 'headcut formation' en 'headcut advance'. Het is enigszins onduidelijk wat hiermee bedoeld wordt maar in dit rapport wordt aangenomen dat dit het begin van schade (tot aan de maximum diepte van de kuil) en de progressie van de schade is. In de gegeven voorbeelden in de genoemde paper is 'headcut advance' gelijk aan een lengte van 28 tot 96 m. Voor een toepassing van een dijk ligt het interessegebied dus niet zozeer in de 'headcut advance' maar meer in de 'headcut formation'.

De headcut formation in Temple (1992) wordt beschreven door:

$$\frac{\varepsilon_f}{k} = \int_0^{t_f} \tau_e dt$$

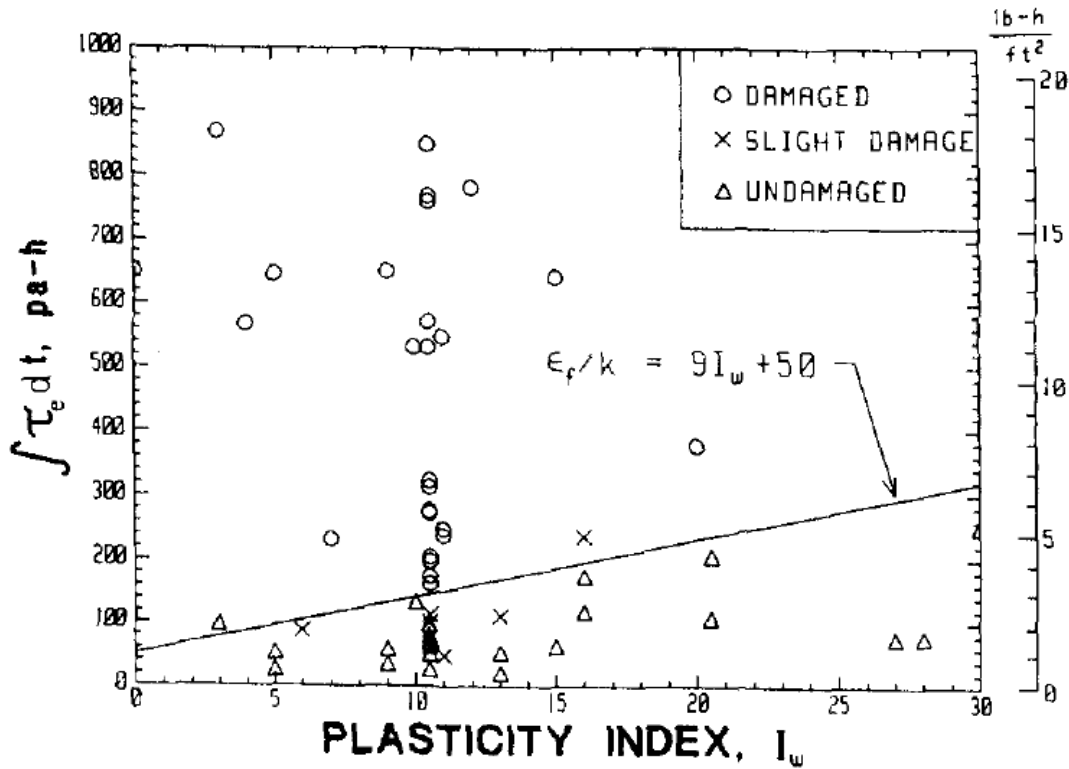
Formule 20

Waarbij

- ε_f = erosiediepte op het moment van oppervlakte falen ('surface failure')
- t_f = tijdstip van falen van de bekleding
- k = erosie coëfficiënt welke afhankelijk is van de grondsoort
- τ_e = effectieve spanning

Voor de bovenstaande aanpak gelden een tiental aannames welke in Temple (1992) zijn beschreven. De meeste aannames lijken hier van toepassing te zijn. Echter, de aanname dat de effectieve spanning veel groter is dan de kritieke spanning is hier discutabel. Als gevolg van deze aanname wordt de kritieke spanning verwaarloosd en de toename van de erosiediepte overschat.

In Temple (1992) is een figuur gesuggereerd waarin een fit is gemaakt door de beschikbare (veld) data. Hierin is onderscheid gemaakt tussen 'damage', 'slight damage' en 'undamaged'. Hierbij is *slight damage* gedefinieerd als een geërodeerd oppervlakte kleiner dan 2,5 m lengte en 0,3 m diepte en beperkt tot het oppervlakte materiaal. Opgemerkt wordt dat bij deze schade met een diepte van 0,3 m de grasbekleding al is verdwenen. De erosieparameter ε_f/k waarbij schade zou optreden zou onder meer afhankelijk zijn van de plasticiteitsindex. Deze afhankelijkheid is grafisch weergegeven in Figuur 59. Echter, in Temple (1992) wordt aangegeven dat dit een significante versimpeling is.



Figuur 59 Data met betrekking tot oppervlakte schade Temple (1992)

Aangezien de methode van Temple (1992) alleen van toepassing is op een continue stromingsbelasting en niet op golfverslagbelasting, wordt de methode vergeleken met de overloopprouven.

5.3.2 Vergelijking Temple (1992) met resultaten Wijmeers II proeven

Om een vergelijking te kunnen maken met de methodiek van Temple (1992) is de plasticiteitsindex PI benodigd en dient de waarde van $\int \tau dt$ te worden bepaald. De plasticiteitsindex varieerde bij proefserie V tussen de 4 en 19 % (zie hoofdstuk 3).

De waarde van $\int \tau dt$ is conform vergelijking 4 (zie paragraaf 5.3.1) bepaald en hieronder opnieuw herhaald:

$$\tau = \rho_w v^2 \frac{n^2}{d^{1/3}} \tag{Formule 21}$$

Met

- τ = schuifspanning (Pascal)
- ρ_w = dichtheid van het water (kg/m^3)
- v = stroomsnelheid (m/s)
- n = Manning coëfficiënt ($\text{s/m}^{1/3}$)
- d = hydraulische radius, in dit geval de waterdiepte (m)

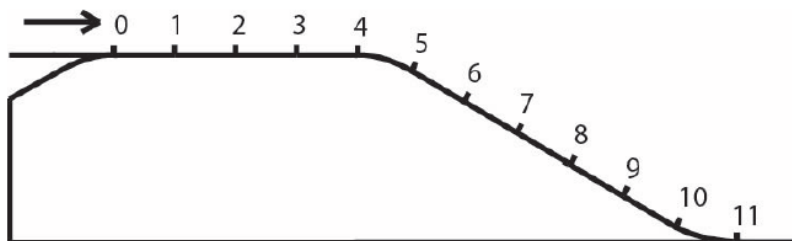
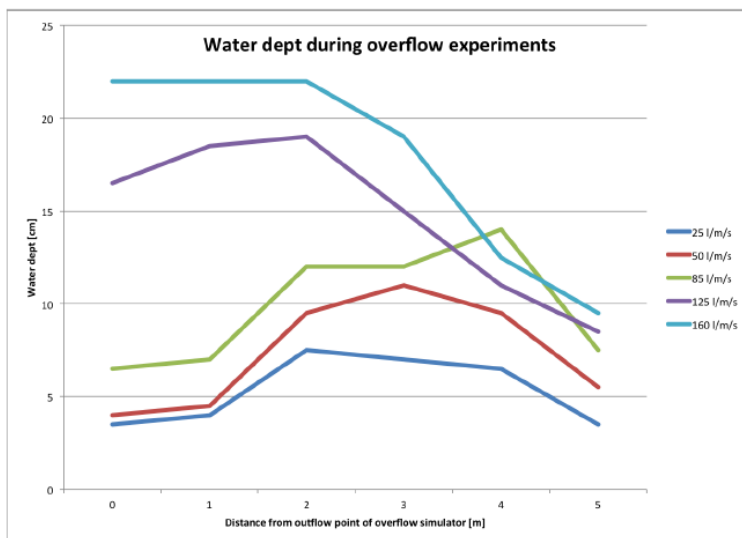
Hiervoor zijn de volgende waarden toegepast:

- De dichtheid van het water is gelijk genomen aan 1000 kg/m^3 .
- De Manning coëfficiënt is conform Vandamme et. al. (2016) gelijk genomen aan $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$

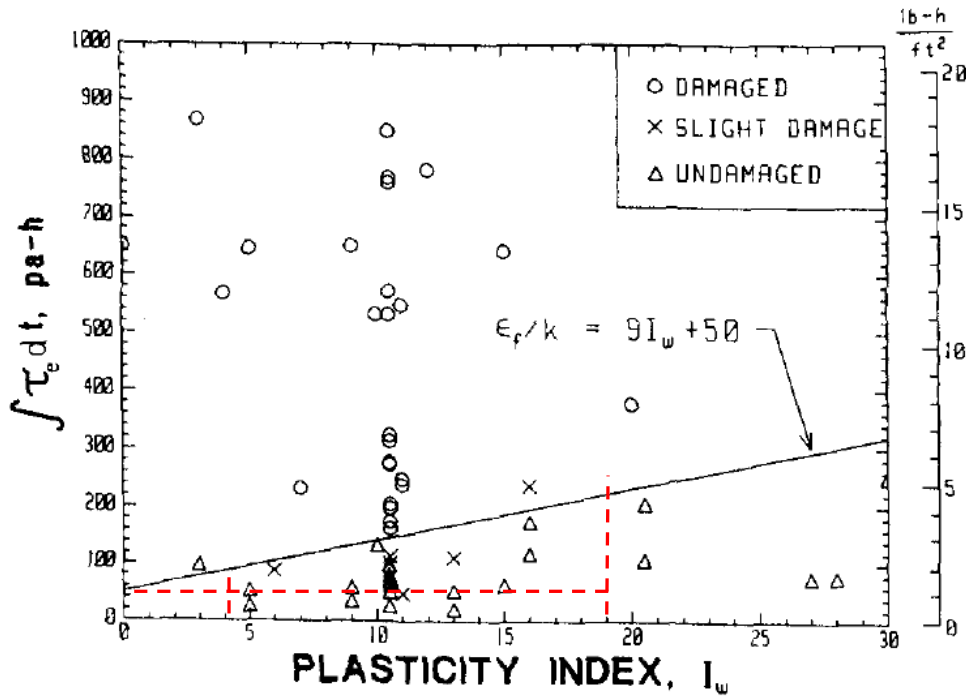
- De stroomsnelheid is niet goed bekend. Conform de analyse in Paragraaf 5.2 wordt hier een waarde van $v = 3,4$ m/s aangenomen (bij $q = 170$ l/s/m).
- De waterdiepte is niet goed bekend. In Ponsioen (2016) is de onderstaande figuur gepresenteerd op basis van handmetingen met een lineaal. Dit is slechts gedaan op de kruin. Het is onbekend wat de waterdiepte was op het talud zelf. Op de grootste afstand van de overslagsimulator en bij 160 l/s/m was de waterdiepte 0,1 m. Er wordt hier aangenomen dat dit op het talud zelf ook het geval was.
- De belastingduur was 2 uur.

De schuifspanning bedraagt conform bovenstaande aanpak 16 Pascal. Geïntegreerd over de tijd van 2 uur geeft dit een waarde van $\int t dt = 32$ Pa · h. Dit is ingetekend in de grafiek welke door Temple is gesuggereerd.

Er is tijdens de proeven met een grasbekleding geen sprake van een noemenswaardige erosiediepte. Dit valt onder de categorie *no damage*.



Figuur 60 Resultaten waterdieptemeting (Ponsioen, 2016)



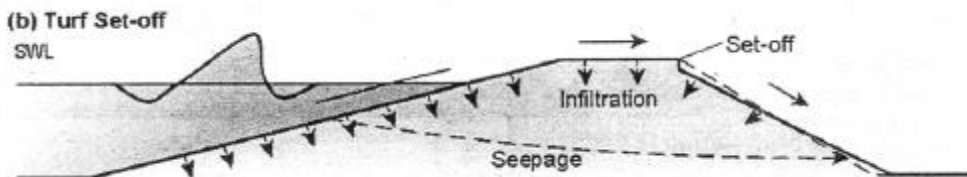
Figuur 61 Rode onderbroken lijnen representeren de plasticiteitsindex van de uitgevoerde proeven bij Proefsectie V en de berekende waarde van de erosieparameter.

5.3.3 Discussie

Er valt in Figuur 61 te zien dat de waarde van $\int \tau dt$ onder de door Temple gesuggereerde stabiliteitslijn ligt. Volgens het model van Temple zou er dus geen schade optreden. Dit blijkt tijdens de testen ook niet te zijn opgetreden. In die zin strookt het proefresultaat met het model van Temple (1992).

5.4 Young (2005)

In het afstudeerverslag van Young (2005) worden verschillende faalmechanismen benoemd en wordt specifiek ingegaan op het faalmechanisme 'superficial sliding'. Door het afschuiven van de toplaag ontstaat een scheur langs de kruin van de dijk. Dit komt door infiltratie over het gehele dijkprofiel. Hier is in dit geval geen sprake van (als het ware een modeffect aangezien de dijk tijdens de proef niet geheel is geïnfilteerd) en dit mechanisme wordt derhalve ook niet verder behandeld.



Figuur 62 Impressie van het mechanisme 'superficial sliding'

5.5 Dean *et al.*, (2010) / Hughes (2011)

5.5.1 Achtergrond

In Dean *et al.* (2010) worden drie principiële schademodelen geanalyseerd. Dit betreft een drietal methoden gebaseerd op:

- Optredende snelheden ('velocity') (snelheid u)
- Optredende schuifspanningen ('shear stress') (equivalent aan u^2)
- Optredende arbeid ('work') (equivalent aan u^3)

De drie methoden worden vergeleken met de data van Hewlett *et al.* (1987), zie paragraaf 5.2. Er wordt door Dean *et al.* (2010) geconcludeerd dat de methode gebaseerd op de optredende arbeid (proportioneel aan u^3) het beste hierop aansluit.

De optredende arbeid wordt bij deze methode als volgt bepaald: Er wordt per overslaande golf beschouwd of de hoeveelheid arbeid (W) groter is dan een kritische arbeid (W_c). Indien dit het geval is dan treedt er erosie (E) op. De erosie is gegeven door:

$$E_i = K(W_i - W_c)\Delta t_i = K\beta(u_i^3 - u_c^3)\Delta t_i \quad \text{Formule 22}$$

Met

- E = erosie
- K = coëfficiënt m.b.t. arbeid
- W_i = optredende arbeid
- W_c = overschrijdingswaarde ('threshold') voor arbeid ('work')
- t_i = duur van de belasting
- β = een verzameling van termen waaronder de dichtheid van het water en een schuifspanning coëfficiënt
- u_i = optredende snelheid
- u_c = kritieke snelheid

Vergelijking 22 kan worden omgeschreven in:

$$\frac{E_i}{K\beta} = (u_i^3 - u_c^3)\Delta t_i \quad \text{Formule 23}$$

Of voor meerdere events:

$$\frac{E}{K\beta} = \sum_{i=1}^N (u_i^3 - u_c^3)\Delta t_i \quad \text{Formule 24}$$

Waarbij de parameter u_c en $E/(K\beta)$ door Dean *et al.* zijn gebaseerd op de curves welke zijn gepresenteerd door Hewitt *et al.* (1987). De waarden zijn weergegeven in Tabel 18. Deze waarden zijn op basis van de beschrijving in Dean *et al.* (2010) nagerekend. Hier bleken in sommige gevallen echter andere waarden uit te komen. Ook de herberekende waarden zijn weergegeven.

	Threshold velocity u_c (m/s)		Erosion limit $E/(K\beta)$ (m^3/s^2)	
	Dean et al (2010)	Herberekening	Dean et al (2010)	Herberekening
Plain grass-good cover	1,80	1,80 (+0,0%)	$0,492 \cdot 10^6$	$0,492 \cdot 10^6$ (+0,0%)
Plain grass-average cover	1,30	1,28 (-1,6%)	$0,229 \cdot 10^6$	$0,243 \cdot 10^6$ (+6,1%)
Plain grass-poor cover	0,76	0,66 (-15%)	$0,103 \cdot 10^6$	$0,104 \cdot 10^6$ (+1,0%)

Tabel 18 Waarden van u_c en $E/(K\beta)$ volgens Dean et al (2010) en volgens een herberekening

In het tweede deel van de paper van Dean (2010) wordt dit verder uitgewerkt. Echter in het vervolg van voorliggende analyse wordt de redeneerlijn gevolgd conform Hughes (2011). De bovenstaande vergelijking kan ook worden uitgedrukt in het overslagdebiet q . Hierbij wordt echter aangenomen dat de snelheid van de overslaande golf zijn evenwichtssnelheid heeft bereikt:

$$u^3 = \left(\frac{8g}{f_D} \sin \theta \right) q = \left(\frac{2g}{f_F} \sin \theta \right) q \quad \text{Formule 25}$$

Met f_D de Weisbach-Darcy friction factor en f_F de Fanning friction factor ($f_D = 4f_F$). Wanneer de bovenstaande vergelijkingen in elkaar worden omgeschreven en worden bewerkt wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$V_{ET}(t) = \sum_{i=1}^N [q_i - q_c] \Delta t_i \leq \frac{E}{K\beta} \left(\frac{f_F}{2g \sin \theta} \right) \quad \text{voor} \quad q_i \geq q_c \quad \text{Formule 26}$$

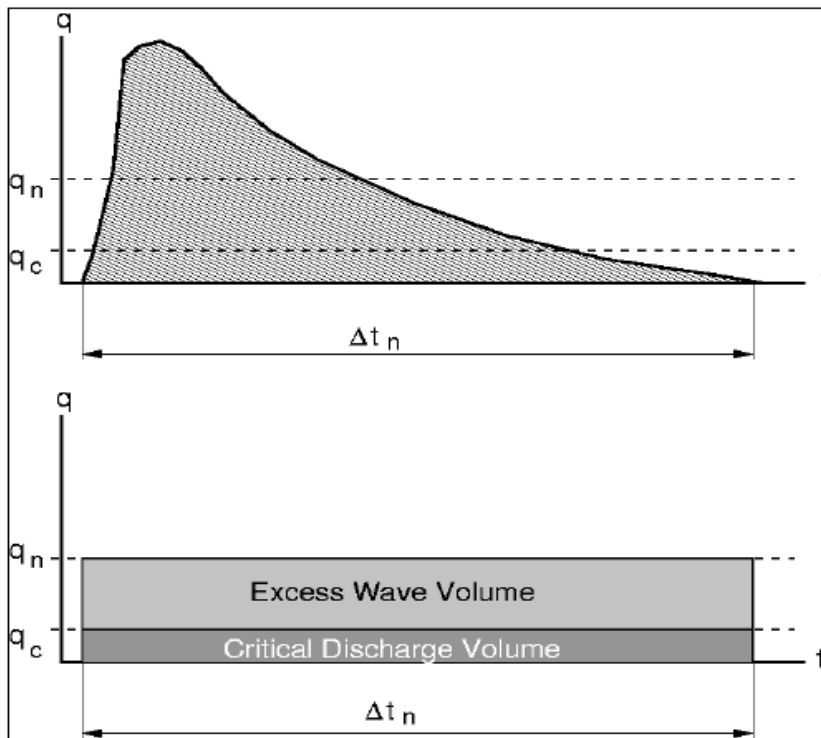
Waarbij de parameter V_{ET} het cumulatieve overbelastingsvolume is. Waarbij

$$q_c = \frac{f_F u_c^3}{2g \sin \theta} \quad \text{Formule 27}$$

Opvallend is dat Dean et al. (2010) een gemiddeld overslagdebiet per overslaande golf hanteren:

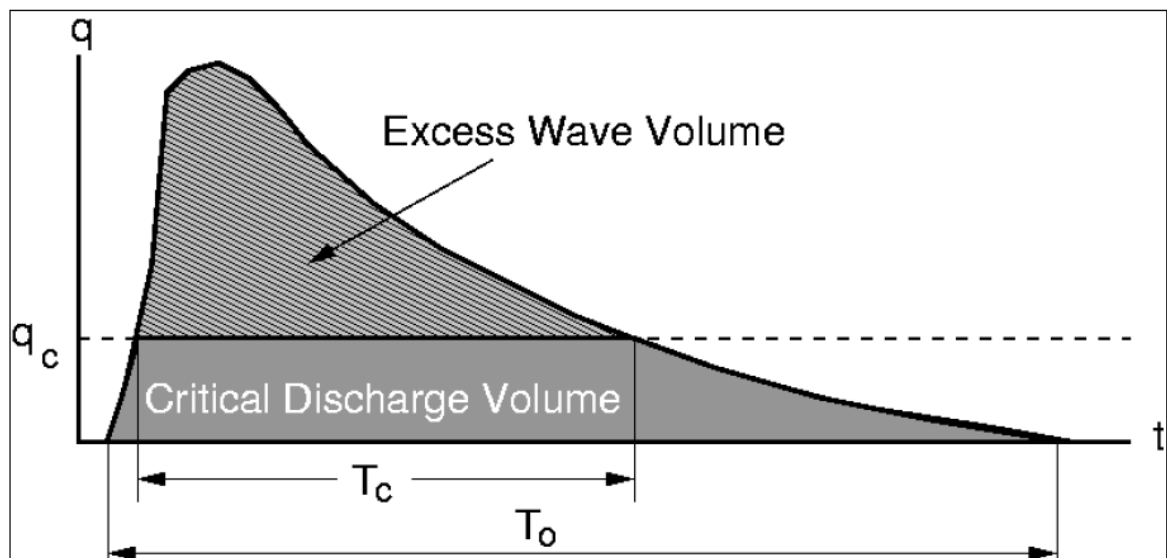
$$q_i = \frac{1}{\Delta t_i} \int_0^{\Delta t_i} q(t) dt = \frac{1}{\Delta t} \cdot V_i \quad \text{Formule 28}$$

De gehanteerde maatgevende duur van de overslag is de gehele overslagduur. Dit is door Hughes (2011) schematisch weergegeven zoals in Figuur 63.



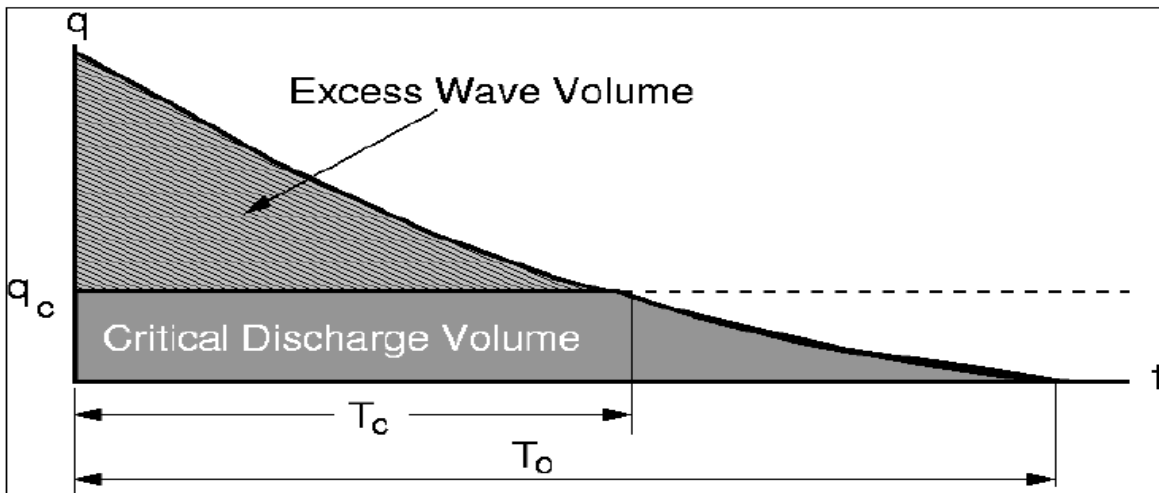
Figuur 63 Schematische weergave van de aanpak van Dean et al (2010) zoals in Hughes (2011)

Het zou echter correcter zijn wanneer alleen de arbeid wordt meegerekend welke groter is dan de kritieke arbeid (of, zoals uitgedrukt in de bovenstaande figuur, wanneer het overslagdebiet groter is dan een kritisch overslagdebiet). Dit is door Hughes (2011) grafisch geïllustreerd en opnieuw weergegeven in Figuur 64.



Figuur 64 Schematische weergave van de aanpak volgens Hughes (2011):

Hughes (2011) idealiseert dit hetgeen weergegeven in Figuur 65.



Figuur 65 Definitie van overbelastingsvolume van een geïdealiseerde enkele golf conform Hughes (2011)

De laagdikte, stroomsnelheid en debiet zijn als volgt gedefinieerd (zie ook paragraaf 4.1):

$$h(t) = h_p \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^a \quad \text{voor } 0 \leq t \leq T_0$$

$$u(t) = u_p \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^b \quad \text{voor } 0 \leq t \leq T_0$$

$$q(t) = q_p \left(1 - \frac{t}{T_0}\right)^m \quad \text{voor } 0 \leq t \leq T_0 \quad \text{met } m = a + b$$

Hughes toont aan dat de waarde van m varieert tussen 2 en 4 maar dat dit uiteindelijk numeriek geen grote verschillen geeft. Van Damme (2016) brengt ook lokale vertraging in rekening en concludeert dat de waarde van m tussen 1 en 22 dient te liggen. Conform de aanpak van Hughes, maar binnen de marges van Van Damme (2016), wordt er voor een waarde van $m = 2$ gekozen (en dus impliciet voor $a = b = 1$). Vervolgens is dit door Hughes verder uitgewerkt wat leidt tot de volgende vergelijking:

Volgens Dean et al (2010) ^{toevoeging Hughes (2011)}

$$V_{ET}(t) = \sum_{n=1}^N V_{Wn} \left[1 - \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right) + \frac{2}{3^{3/2}} \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right)^{3/2} \right] \leq \left(\frac{E_w}{K_W \beta_W} \right) \left(\frac{f_F}{2g \sin \theta} \right)$$

Optredende belasting
Grenswaarde van toegestane belasting

Met

$$q_c = \left(\frac{f_F u_c^3}{2g \sin \theta} \right)$$

Formule 29

Waarbij

V_{Wn} = totale volume van de n-de overslaande golf

T_{on} = overtoppingsduur van de n-de overslaande golf

f_F	= representatieve weerstandsfactor (Fannings weerstands factor)
θ	= taludhelling van het binnentalud
u_c	= kritieke snelheid (zie Tabel 18)
$E_w/(K_w\beta_w)$	= constante (zie Tabel 18)

5.5.2 Vergelijking Dean et al (2010) met resultaten Wijmeers II proeven (overslagproeven)

Bij de aanpak wordt gebruik gemaakt van de basis welke door Dean et al (2010) is beschreven. De uitwerking is echter op basis van de verdere uitwerking van Hughes (2011) welke in paragraaf 5.5.1 is samengevat. Hierbij zijn de stuurfiles als uitgangspunt genomen. De stuurfiles zijn de bestanden die bij de golfverslagsimulator zijn gebruikt. Deze stuurfiles geven per overslag het volume (V_{Wn}) dat uit de overslagsimulator stroomt. Naast het volume zijn de volgende parameters benodigd (zie ook hoofdstuk 4):

$$T_0 = \frac{V^{1.16}}{0.43q_p} \quad (V \text{ volgt uit de stuurfiles, } q_p \text{ volgt uit onderstaande formule)} \quad \text{Formule 30}$$

$$q_p = 0.184\sqrt{g}V^{3/4} \quad (V \text{ volgt uit de stuurfiles}) \quad (\text{zie ook paragraaf 4.1}) \quad \text{Formule 31}$$

f_F	= 0,01 a 0,02	(Hughes, 2011, page 21)
$E_w/(K_w\beta_w)$	= $0,103 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}^2$	(Hughes et al, 2011, page 9)
$\sin\theta$	= 0,47	(o.b.v. 1:1.9 talud)
t	= variabeel	(conform stuurfiles en beschrijving proeven)
u_c	= 0,76	(o.b.v. Hughes et al, 2011, page 9)

De hierboven gegeven aanpak is toegepast op de golfverslagproeven (Proefvak I en Proefvak III). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 19 en Tabel 20.

		Optredende belasting	Grenswaarde belasting	Waargenomen schade
Overslagdebiet (l/s/m)	Duur	$\sum_{n=1}^N V_{Wn} \left[1 - \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right) + \frac{2}{3^{3/2}} \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right)^{3/2} \right]$ [m ²]	$\left(\frac{E_w}{K_w\beta_w} \right) \left(\frac{f_F}{2g \sin\theta} \right)$ Met $f_F = 0.01$ a 0.02 [m ²]	Zie ook beschrijving in hoofdstuk 2
1	24 min.	7	113 a 225	Nihil
5	2h	36 (43)	113 a 225	Nihil
10	2h	72 (115)	113 a 225	Gat t.p.v.. konijnenhol
25	2h	180 (295)	113 a 225	Groter gat
50	12 min.	18 (313)	113 a 225	Zeer veel schade

Tabel 19 Resultaten berekeningen vs. waargenomen schade Proefvak I. De zwartgedrukte getallen is de optredende belasting gedurende de specifieke subtest (bijvoorbeeld 1 l/s/m) De getallen tussen haakjes geven de cumulatieve belasting van de subtest en voorgaande subtesten weer. De kleur geeft aan of de optredende belasting onder de grenswaarde (groen), rond de grenswaarde (oranje) of boven de grenswaarde (rood) zit.

		Optredende belasting	Grenswaarde belasting	Waargenomen schade
debiet (l/s/m)	Duur	$\sum_{n=1}^N V_{Wn} \left[1 - \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right) + \frac{2}{3^{3/2}} \left(\frac{q_c T_{on}}{V_{Wn}} \right)^{3/2} \right]$	$\left(\frac{E_w}{K_w \beta_w} \right) \left(\frac{f_F}{2g \sin \theta} \right)$ Met $f_F = 0.01$ a 0.02	Zie ook beschrijving in hoofdstuk 2
voorbelasting	17 golven	29	113 a 225	Lokaal kale plekken
25	1 uur	90 (119)	113 a 225	Weggeslagen grasmat
25	27 min.	41 (160)	113 a 225	Zeer veel schade

Tabel 20 Resultaten berekeningen vs. waargenomen schade Proefvak III.

5.5.3 Discussie

De resultaten van proefvak 1 lijken op basis van de beschrijvingen significant beïnvloed te zijn door de aanwezigheid van een konijnenhol. Het zal voor zich spreken dat de methode zoals aangereikt door Dean et al en Hughes hier niet in voorziet. In die zin is de vergelijking tussen deze methode en de resultaten discutabel. Toch blijkt het resultaat bij proefvak 1 goed overeen te komen. Indien het konijnenhol niet voor zou komen, zou de grasmat naar verwachting sterker zijn en is het aannemelijk dat deze langer stand zou houden. Er wordt overigens opgemerkt dat er bij het naastgelegen deel na 1 uur (25 l/s/m) nog geen significante schade is opgetreden. Tijdens het tweede uur van het testen met 25 l/s/m ontstond er wel een tweede gat.

Bij proefvak 3 zou volgens het rekenmodel er (net) schade zijn opgetreden (indien wordt uitgegaan van een waarde van $f_F = 0,01$). Het bleek echter dat de grasmat grotendeels was weggeslagen.

Het wordt geconcludeerd dat er een discrepantie valt te verwachten tussen het rekenmodel en de proefresultaten. Dit gezien:

- de grote onzekerheid over de representativiteit van de brondata van het model (Australische en Amerikaans gras getest in de jaren 40 en 60 van de vorige eeuw in zomercondities),
- de grofstoffelijke schematisatie van de belastingen,
- de onzekerheid rondom de parametrisering van de graskwaliteit als gevolg van heterogeniteit,
- versturende elementen zoals de aanwezigheid van konijnenholen.

5.6 Basisinstrumentarium Nederland

5.6.1 Achtergrond

In de Nederlandse waterbouwkunde is het zogenoemde basisinstrumentarium vigerend. Hierin wordt het ontwerpinstrumentarium (OI2014) als uitgangspunt genomen voor het ontwerpen van waterkeringen en het Beoordelingsinstrumentarium (WBI, 2017) als uitgangspunt genomen voor de wettelijk verankerde periodieke beoordeling van waterkeringen. In het ontwerpinstrumentarium is een tabel opgenomen waarin rekenwaarden voor het kritieke golfverslagdebiet zijn opgenomen. Zo zijn voor de overslagdebieten 0,1 l/s/m, 1 l/s/m, 5 l/s/m, 10 l/s/m toepassingsvoorwaarden gegeven ten aanzien van de graskwaliteit. Ter illustratie is de genoemde tabel opnieuw weergegeven in Tabel 21.

q_c (l/s/m)	Waarde in TR [van der Meer et al., 2012] ^e	Toepassingsvoorwaarden voor grasbekleding op kruin en binnentalud (aan alle voorwaarden moet voldaan worden)
0,1	0,1 l/s/m	<ul style="list-style-type: none"> • geen eisen
1	-	<ul style="list-style-type: none"> • gesloten of open zode^a op klei^b • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 1 l/s/m zijn er geen eisen aan objecten en overgangen op kruin en binnentalud.</p>
5	1 l/s/m	<ul style="list-style-type: none"> • Toepasbaar in twee mogelijke gevallen: <ul style="list-style-type: none"> - gesloten zode^a op klei^b en $H_{m0} < 4 \text{ m}^d$ of - open zode^a op klei^b en $H_{m0} < 2 \text{ m}$ • taludhelling flauwer dan 1:2,3 • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 5 l/s/m zijn er geen eisen aan objecten en overgangen op de kruin. Indien op het talud objecten groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ en/of overgangen aanwezig zijn, dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden.</p>
10	5 l/s/m	<ul style="list-style-type: none"> • gesloten zode^a op klei^b • taludhelling flauwer dan 1:2,3 • $H_{m0} < 4 \text{ m}^d$ • voldoende stabiliteit^c <p>Bij 10 l/s/m zijn er geen eisen aan objecten en overgangen op de kruin, behalve in het bovenrivierengebied. Indien op het talud objecten groter dan $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ en/of overgangen aanwezig zijn, dan dient hier in het ontwerp rekening mee te worden gehouden. Voor het bovenrivierengebied geldt dit voor talud én kruin.</p>
<p>^a Een gesloten zode is een op het oog gesloten grasmat, zonder grote ($0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$) open plekken⁴.</p>		

Tabel 21 Tabel met toepassingsvoorwaarden ten aanzien van het golfverslagdebiet in het Nederlandse ontwerpinstrumentarium

Indien van het Nederlandse Ontwerpinstrumentarium uit zou worden gegaan dan zou 5 l/s/m niet worden toegestaan in verband met de toepassingsvoorwaarden welke is gerelateerd aan de taludhelling. 1 l/s/m zou worden toegestaan mits wordt voldaan aan de eisen t.a.v. (geotechnische) stabiliteit en indien de zode een gesloten of open zode op klei is.

Indien van de wettelijke beoordelings methode (WBI) uit zou worden gegaan dan zou een analyse uitgevoerd moeten worden op basis van de in WBI gehanteerde methode. Die methode is indirect afgeleid van de cumulatieve overbelastingsmethode. Om de vergelijking zo zuiver mogelijk te houden wordt in het vervolg van deze analyse niet de strikte WBI-methodiek gevolgd maar wordt de achterliggende cumulatieve overbelastingsmethode gevolgd. Bij deze methode wordt de frontsnelheid van iedere golf beschouwd (zie ook Deel B). Dit onderscheid zich van de methode van Dean et al (2010) en Hughes (2011) omdat er niet het gehele stromingspatroon wordt beschouwd maar alleen het front van de overslaande golf. De cumulatieve overbelastingsmethode (Deltares, 2015) is gebaseerd op een krachtenbalans (evenredig met u^2):

$$\sum_{i=1}^N (U_i^2 - U_c^2) = D \quad \text{voor} \quad U_i > U_c \quad \text{Formule 32}$$

waarin

- D = schadegetal (m²/s²)
 U_i = stroomsnelheid van de overslaande golf (m/s)
 U_c = kritieke stroomsnelheid (m/s)
 N = aantal golven waarin U_i > U_c (-)

De methode is uitgebreid door de belasting te corrigeren met een versnellingsfactor α . Deze versnellingsfactor corrigeert voor de versnelling van de watertong op het binnentalud. De versnellingsfactor is als volgt toegevoegd:

$$\sum_{i=1}^N (\alpha U_i)^2 - U_c^2 = D \quad \text{voor } \alpha U_i > U_c \quad \text{Formule 33}$$

De parameters van Formule 33 worden hieronder beschreven:

Piek stroomsnelheid U

De piek stroomsnelheid op de kruin kan, conform Peeters et al (2012), worden berekend met (zie ook paragraaf 4.1):

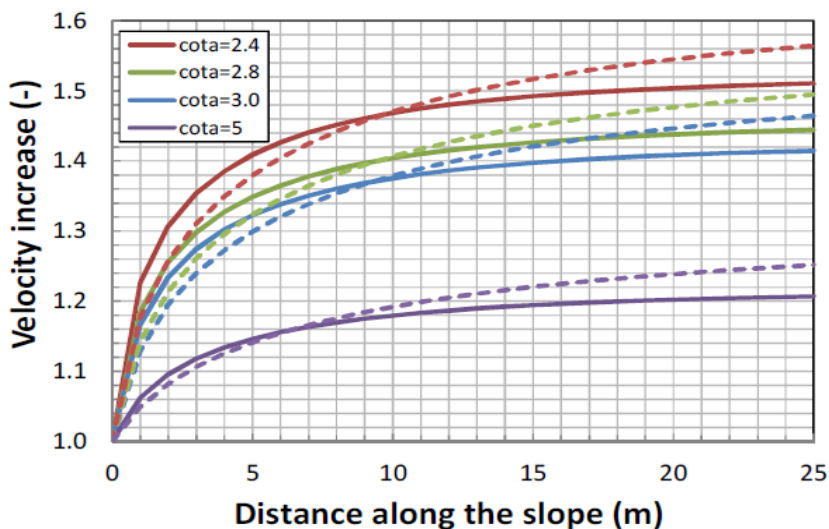
$$v_0 = 5.0 \cdot V^{0.34} \quad \text{Formule 34}$$

Met

- v_0 = piek stroomsnelheid op de kruin
 V = volume van de golf

Versnellingsfactor

In Schüttrumpf en Oumeraci (2005) is een iteratieve methode voorgesteld om de versnelling te berekenen. Deze is tevens weergegeven in paragraaf 4.1. In Deltares (2015) is deze bewerkelijke methode vervangen door een vereenvoudigde methode welke ook in voorliggende studie wordt toegepast. Overigens is die methode gebaseerd op de methode van Schüttrumpf en Oumeraci (2005). Dit betreft een grafische methode welke is weergegeven in Figuur 66.



Figuur 66 Vereenvoudigde methode waarbij de versnellingsfactor kan worden bepaald (Deltares, 2015)
 Doorgetrokken lijn: $U_0 = 4\text{ m/s}$, onderbroken lijn: $U_0 = 6\text{ m/s}$.

Kritieke stroomsnelheid U_c

Op basis van Deltares (2015) zijn drie kritieke stroomsnelheden gehanteerd:

- Gesloten zode op klei: $U_c = 8,0 \text{ m/s}$ ($\sigma = 1,0 \text{ m/s}$)
- Open zode op klei: $U_c = 6,0 \text{ m/s}$ ($\sigma = 0,75 \text{ m/s}$)
- Gesloten zode op zand: $U_c = 3,5 \text{ m/s}$ ($\sigma = 1,0 \text{ m/s}$)

De hierboven gegeven waarden zijn verwachtingswaarden (met bijbehorende standaardafwijkingen). In het Nederlandse WBI2017 wordt echter ten behoeve van het beoordelen van grasbekledingen (op het buitentalud) niet met de verwachtingswaarden gerekend maar met een conservatievere rekenwaarde (4,3 m/s voor een open zode en 6,6 m/s voor een gesloten zode). Deze conservatieve rekenwaarden kunnen echter niet gebruikt worden ten behoeve van een vergelijking tussen de literatuur en de Wijmeers proeven aangezien dit een conservatieve waarde is en geen verwachtingswaarde.

Schadeparameter D

Op basis van Deltares (2015) zijn drie schadeparameters gehanteerd:

- Begin van schade: $D = 1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- Meerdere open plekken: $D = 4000 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- Falen van de bekleding: $D = 7000 \text{ m}^2/\text{s}^2$

5.6.2 Vergelijking WBI methode met resultaten Wijmeers II proeven

Er zijn verschillende berekeningen uitgevoerd waarbij de versnellingsfactor a_a en de kritieke stroomsnelheid U_c is gevarieerd.

Er wordt hierbij opgemerkt dat er conform de WBI methode een aantal toepassingsvoorwaarden zijn. Zo dient de graskwaliteit een open of een gesloten zode te zijn, dient de golfhoogte (H_m0) kleiner of gelijk te zijn aan 3 m en dient de taludhelling flauwer te zijn dan 1V:4H of de kleilaagdikte groter of gelijk aan 0,4 m. Aangezien de taludhelling steiler is dan 1V:4H en de kleilaag niet overal aanwezig leek te zijn is het discutabel of aan deze toepassingsvoorwaarden is voldaan. Desondanks wordt er toch een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de Wijmeers proeven en de WBI methode.

Voor de versnellingsfactor is een waarde van 1,0 (kruin), een waarde van 1,4 en een waarde van 1,6 gehanteerd. Op basis van Figuur 66 is ingeschat dat voor de proeven de versnellingsfactor een waarde heeft tussen 1,4 en 1,6.

Voor de kritieke stroomsnelheid zijn waarden gehanteerd van $U_c = 3,5 \text{ m/s}$ (gesloten zode op zand), $U_c = 6 \text{ m/s}$ (open zode op klei) en $U_c = 8 \text{ m/s}$. Volgens de WBI methode is het gras een open zode. De kleilaagdikte is variabel. Hierbij wordt opgemerkt dat het model niet is bedoeld voor het geval waarin er geen zode van betekenis aanwezig is (fragmentarische zode), en hiervoor waarschijnlijk ook niet geschikt is. Het oppakken en afvoeren van grondkorrels dan wel aggregaten door de stroming is een ander mechanisme dan het loswerken en breken van wortels in en onder de zode.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 22 tot en met Tabel 24. Hierin zijn de cumulatieve waarden weergegeven (dus de berekende waarde van D bij bijvoorbeeld $q = 10 \text{ l/s/m}$ is een sommatie van de berekende waarden van $q = 1 \text{ l/s/m}$, $q = 5 \text{ l/s/m}$ en $q = 10 \text{ l/s/m}$).

	kruin	$\alpha_a = 1.4$	$\alpha_a = 1.6$		model komt overeen met observatie
q	D	D	D	resultaat proef	
(l/s/m)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	schade	
1	0	0	3	nihil	ja
5	0	139	458	nihil	ja
10	39	1056	2498	gat a.g.v. konijnenhol	redelijk
25	832	5905	10822	groter gat	ja
50	942	6474	11742	zeer veel schade	ja

Tabel 22 Resultaten analyse o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode conform WBI voor een gesloten zode op zand ($U_c = 3,5$ m/s) (Proefvak I). De arceringen geven aan of er rekenkundig 'geen schade' (licht groen), 'begin van schade' (donkergroen), 'meerdere open plekken' (oranje) of 'falen van de bekleding' (rood) is opgetreden.

	kruin	$\alpha_a = 1.4$	$\alpha_a = 1.6$		model komt overeen met observatie
q	D	D	D	resultaat proef	
(l/s/m)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	schade	
1	0	0	0	nihil	ja
5	0	0	0	nihil	ja
10	0	1	41	gat a.g.v. konijnenhol	nee
25	0	418	1438	groter gat	nee
50	0	485	1636	zeer veel schade	nee

Tabel 23 Resultaten analyse o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode conform WBI voor een open zode op klei ($U_c = 6$ m/s) (Proefvak I) De arceringen geven aan of er rekenkundig 'geen schade' (licht groen), 'begin van schade' (donkergroen), 'meerdere open plekken' (oranje) of 'falen van de bekleding' (rood) is opgetreden.

	kruin	$\alpha_a = 1.4$	$\alpha_a = 1.6$		model komt overeen met observatie
q	D	D	D	resultaat proef	
(l/s/m)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	schade	
1	0	0	0	nihil	ja
5	0	0	0	nihil	ja
10	0	0	0	gat a.g.v. konijnenhol	nee
25	0	5	105	groter gat	nee
50	0	5	123	zeer veel schade	nee

Tabel 24 Resultaten analyse o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode conform WBI voor een gesloten zode op klei ($U_c = 8$ m/s) (Proefvak I) De arceringen geven aan of er rekenkundig 'geen schade' (licht groen), 'begin van schade' (donkergroen), 'meerdere open plekken' (oranje) of 'falen van de bekleding' (rood) is opgetreden.

Er is tevens een vergelijking gemaakt voor proefvak III waarbij een kritiek golfverslagdebiet is gehanteerd van $U_c = 3,5$ m/s en van $U_c = 0,0$ m/s. De laatste waarde representeert een situatie waarbij er geen sterkte wordt aangenomen, dit is uiteraard puur een academische exercitie. Deze resultaten zijn weergegeven in Tabel 25 en Tabel 26.

	kruin	$\alpha_a = 1.4$	$\alpha_a = 1.6$		model komt overeen met observatie
q	D	D	D	resultaat proef	
(l/s/m)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	schade	
voorbelaasting	378	941	1292	lokaal kale plekken	enigszins
25 (1 uur)	744	3337	5435	weggeslagen grasmat	nee
25 (27 min.)	937	4428	7304	zeer veel schade	ja

Tabel 25 Resultaten analyse o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode conform WBI voor een gesloten zode op gras ($U_c = 3,5$ m/s) (Proefvak III). De arceringen geven aan of er rekenkundig 'geen schade' (licht groen), 'begin van schade' (donkergroen), 'meerdere open plekken' (oranje) of 'falen van de bekleding' (rood) is opgetreden.

	kruin	$\alpha_a = 1.4$	$\alpha_a = 1.6$		model komt overeen met observatie
q	D	D	D	resultaat proef	
(l/s/m)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	(m ² /s ²)	schade	
voorbelaasting	586	1149	1501	lokaal kale plekken	nee
25 (1 uur)	3874	7594	9919	weggeslagen grasmat	ja
25 (27 min.)	5322	10432	13626	zeer veel schade	ja

Tabel 26 Resultaten analyse o.b.v. cumulatieve overbelastingmethode conform WBI voor een gesloten zode op gras ($U_c = 0,0$ m/s) (Proefvak III). De arceringen geven aan of er rekenkundig 'geen schade' (licht groen), 'begin van schade' (donkergroen), 'meerdere open plekken' (oranje) of 'falen van de bekleding' (rood) is opgetreden.

5.6.3 Discussie

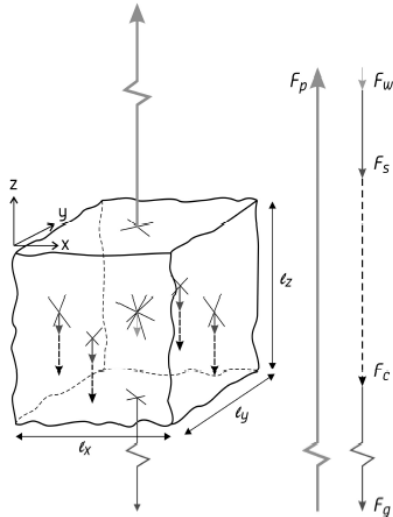
Bij proefvak I lijkt er redelijke overeenstemming te zijn tussen de gehanteerde methode en de proefresultaten indien een kritieke stroomsnelheid van 3,5 m/s wordt gehanteerd. Conform WBI zou de waarde van $U_c = 3,5$ m/s gehanteerd moeten worden bij een gesloten zode op zand. Dit is hier strikt genomen niet het geval omdat de zode een slechtere kwaliteit heeft dan 'gesloten' zode en de ondergrond heeft waarschijnlijk meer cohesie dan 'zand'. De proef is helaas sterk beïnvloed door de aanwezigheid van een konijnenhol in de sterk zandige ondergrond.

De resultaten van proefvak III lijken redelijk overeen te komen met de observaties indien wordt gekozen voor een kritieke stroomsnelheid kleiner dan 3,5 m/s. Voor een analyse van erosie van een zode zonder sterkte is het model echter niet bedoeld en waarschijnlijk ook niet geschikt.

5.7 Hoffmans et al., 2010;

5.7.1 Achtergrond

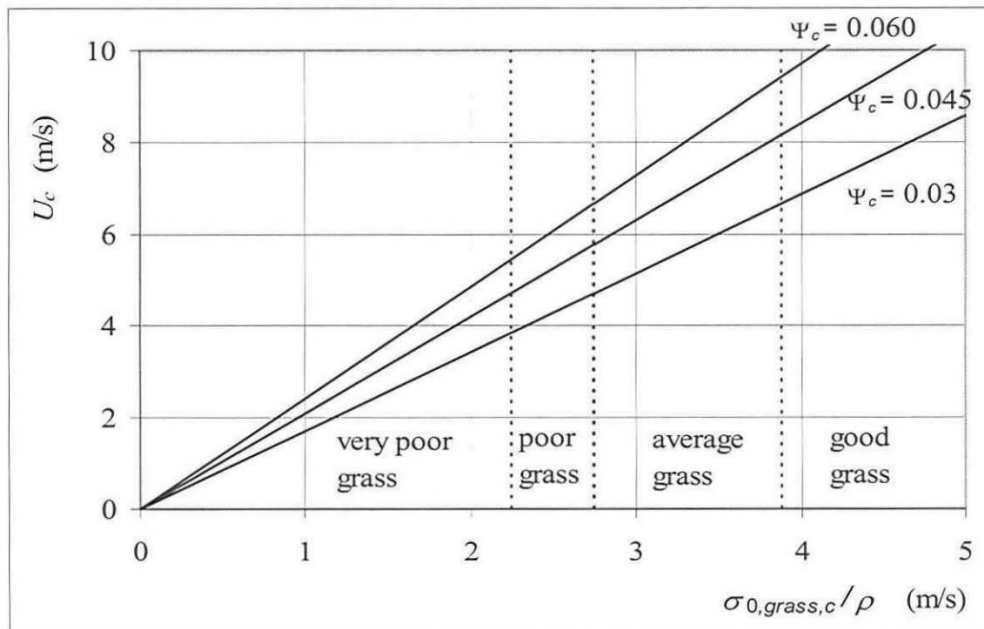
In Hoffmans et al (2010) wordt het turf element model vergeleken met experimentele data. Bij het turf element model wordt het krachtenevenwicht van een 'blokje gras' beschouwd. Het krachtenevenwicht bestaat uit de belasting als gevolg van de liftkracht (als gevolg van drukfluctuaties) en de sterkte welke bestaat uit het eigengewicht, schuifspanningen, cohesie en graswortels.



Figuur 67 Krachten op een 'blokje' gras. (Hoffmans et. Al. 2010)

Op basis van de in Hoffmans et al (2010) uitgeschreven krachtenbalans blijkt dat er een bepaalde kritieke stroomsnelheid (U_c) is waarbij het blokje instabiel wordt.

De analyse vertaalt zich uiteindelijk in een figuur welke opnieuw is weergegeven in Figuur 67. In die figuur is de kritieke stroomsnelheid weergegeven als functie van de kritieke Shields parameter (ψ_c) en de graskwaliteit ('very poor', 'poor', 'average grass' en 'good grass'). Daarbij is uitgegaan van een 'blokje gras' van 10 cm x 10 cm en een kritieke Shields parameter van $\psi_c = 0,03$ a $0,06$.



Figuur 68 kritieke stroomsnelheid als functie van de grassterkte (Hoffmans et al, 2010)

5.7.2 Vergelijking Hoffmans et al met resultaten Wijmeers II proeven

De maximum opgetreden stroomsnelheden op de kruin zijn per proef van proefvak I berekend conform Peeters et al (2012), zie ook paragraaf 4.1:

$$v_0 = 5.0 \cdot V^{0.34}$$

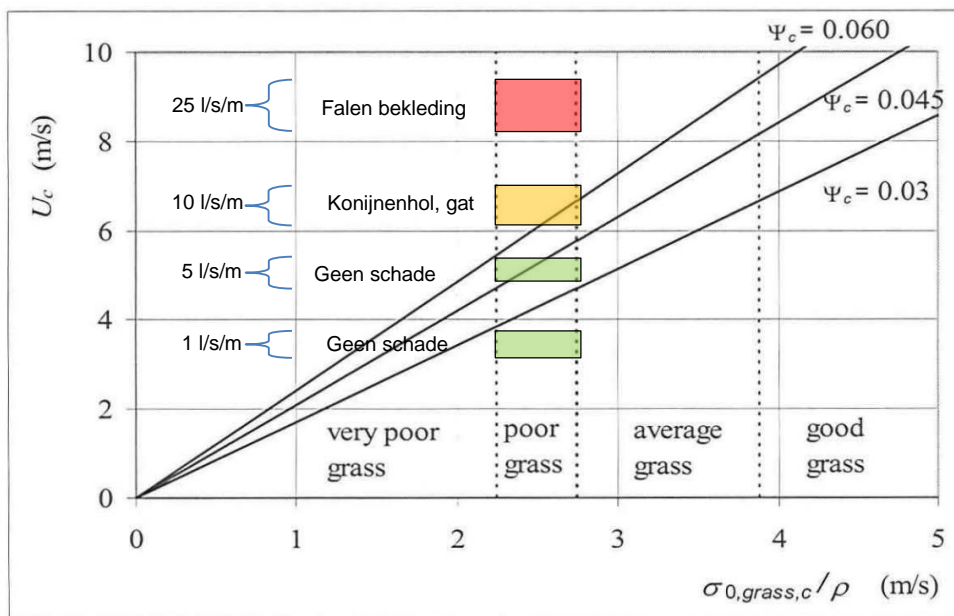
Formule 35

Hierbij is het volume V bepaald op basis van de stuurfiles.

De versnelling op het talud is naar verwachting een factor 1,4 a 1,6 hoger (zie Paragraaf 5.6). Hieruit kunnen vervolgens de maximum optredende waarden van de snelheid worden uitgerekend. Deze waarde bepaalt als het ware de waarde op de horizontale as van Figuur 68.

Er wordt ingeschat dat het gras een kwaliteit heeft met als classificatie 'poor grass'. Dit bepaalt de positie op de verticale as van Figuur 68. Nu de horizontale as en de verticale as met betrekking tot de proeven bekend zijn kunnen deze ingetekend worden in de figuur. Dit is gedaan in Figuur 69.

De berekende waarden zijn grafisch weergegeven in onderstaande figuur. (op de horizontale as is de berekende maximum snelheid weergegeven uitgaande van een versnellingsfactor tussen 1,4 en 1,6. Op de verticale as is de ingeschatte kwaliteit van het gras bepaald. Tezamen vormt dit het weergegeven vlak).



Figuur 69 Vergelijking model Hoffmans et al (2010) (zwarte lijnen) met resultaten Wijmeers proeven (Testvak I) (gekleurde vlakken). Indien een punt boven de zwarte lijn ligt dan zou een 'blokje' gras van 10 x 10 x 10 cm instabiel zijn. Indien een punt onder de zwarte lijn ligt dan zou deze stabiel moeten zijn.

5.7.3 Discussie

In Figuur 69 valt te zien dat de berekening op basis van de data Wijmeers proeven redelijk goed overeen komen met de methode zoals deze is beschreven in Hoffmans et al (2010).

Hierbij is de voornaamste input parameter de hoogste opgetreden snelheid welke rekenkundig is gekoppeld aan de grootste golf. Wat bij deze methode opvalt is dat de belastingduur geen input parameter is. Het is daarom discutabel of de hoogste opgetreden stroomsnelheid een maatgevende stroomsnelheid is. Zo zou er bijvoorbeeld ook voor kunnen worden gekozen om bijvoorbeeld de 2% of 10% overschrijdingswaarde als representatieve stroomsnelheid te gebruiken. In dat geval zouden de gekleurde vakken in Figuur 69 wat lager komen te liggen.

6 Conclusies en aanbevelingen belastingsproeven grasmatt

6.1 Conclusies

In het kader van het geactualiseerde Sigmaplan worden meerdere gebieden langs de Zeeschelde ontpolderd voor de ontwikkeling van getijdenatuur. Eén van deze gebieden is Wijmeers 2. Hier zijn in november 2015 twee overslagproeven en twee overloopproeven uitgevoerd op de oude dijk.

In het voorliggende rapport is op basis van de beschikbaar gestelde meetrapporten een overzicht gegeven van de conditie van de beproefde testsecties. Uit deze analyse komt naar voren dat sprake was van een relatief lage graskwaliteit en een relatief lage grondkwaliteit welke beiden ruimtelijk sterk varieerden. Daarnaast waren op de proefstroken een konijnenhol, stenen en andere oneffenheden aanwezig. Deze hebben de geobserveerde erosiepatronen beïnvloed omdat initiatie van schade startte bij deze oneffenheden. Hoewel het gelukt is om de graskwaliteit en de grondkwaliteit conform verschillende richtlijnen te classificeren, wordt, op basis van expert judgement, gesteld dat de sterktebepaling van proefsecties discutabel is om een goede vergelijking te kunnen maken met de verschillende theoretische modellen om erosie te voorspellen.

In de analyse zijn (1) de theoretische hydraulische condities vergeleken met de gemeten hydraulische condities en (2) is de geobserveerde schade door erosie vergeleken met verschillende schademodelen.

Met betrekking tot de vergelijking tussen de theoretische hydraulische condities en de gemeten hydraulische condities worden voor golfverslag de volgende conclusies getrokken:

- De theoretische stroomsnelheid bovenaan het binnentalud ligt in de meeste gevallen iets hoger is dan de gemeten snelheid. De theoretische waterdiepte is meestal iets lager dan de gemeten waterdiepte. Dit impliceert dat de effectieve wrijving hoger is dan verwacht wordt op basis van de literatuur. De verruwing van het talud door stenen en andere oneffenheden kan dit ook verklaren;
- Het cumulatief debiet op basis van het theoretische waterdiepte en stroomsnelheidsverloop ligt hoger dan het cumulatief debiet op basis van het gemeten waterdiepte en stroomsnelheidsverloop. Het cumulatief debiet op basis van het gemeten waterdiepte en stroomsnelheidsverloop komt het beste overeen met het overslagvolume dat is ingesteld in de overslagsimulator.
- De stroomsnelheid van het overslaande water is gemeten aan de bovenkant en de onderkant van de laag water die over het binnentalud stroomt. De metingen laten zien dat het cumulatief debiet het beste benaderd wordt wanneer is gemeten aan de onderzijde van de waterlaag. Bij de metingen aan de bovenzijde van de waterlaag is het opgegeven overslagvolume minder goed benaderd. Dit wordt waarschijnlijk verklaard door beluchting van de stroming aan de bovenzijde van de waterlaag.

Met betrekking tot overloop worden de volgende conclusies getrokken

- Het stromingspatroon op het binnentalud bij de overloopproeven sluit het beste aan bij 'nappe flow' uit de Chanson benadering. Dit wordt versterkt door de aanwezigheid van grove elementen, zoals stenen, op het binnentalud.

- De gemeten en berekende stroomsnelheid bij overloop (o.b.v. van Chezy) lijkt in dezelfde orde van grootte te liggen. Door de grote beluchting van de stroming op het binnentalud lijkt de stroming niet uniform. Dit maakt het lastig de theoretische en gemeten stroomsnelheden te vergelijken.

Op basis van de erosieproeven bij golfoverslag en overloop wordt geconcludeerd dat:

- De proeven bevestigen dat initiatie van schade ontstaat bij oneffenheden op het talud het talud zoals stenen, konijnenholen en molshopen. Daarnaast hebben deze oneffenheden een dominante invloed op het schadebeeld en laten de proeven zich lastig vergelijken met de erosiemodellen op basis van de literatuur.
- De proefresultaten geven geen aanleiding om de bestaande literatuurformules ter discussie te stellen:
 - o De benodigde input van de modellen is lastig te bepalen (bijv. de kwaliteit van de graszode, kritieke stroomsnelheid U_c , etc.). Om de vergelijking uit te voeren is een zo goed mogelijke inschatting gemaakt maar het is onduidelijk in hoeverre dit goed is ingeschat en in hoeverre de heterogeniteit (aanwezigheid zand, kale plekken, stenen, konijnenhol, etc.) daarop van invloed is.
 - o De gebruikte erosiemodellen zijn doorgaans van empirische aard. In sommige gevallen is het onzeker in hoeverre de gebruikte brondata representatief is voor grasbekledingen in België of Nederland (grassoorten, taludhellingen et cetera).

6.2 Onderzoeksagenda

De resultaten van de erosieproeven benadrukken dat oneffenheden dominant kunnen zijn voor initiatie van schade en het schadepatroon kunnen domineren. Bestaande literatuur formules zijn grotendeels afgeleid op basis van een grasmat zonder deze oneffenheden en graverij. In de huidige waterkeringen kunnen echter wel oneffenheden of graverij aanwezig zijn (al worden deze door de waterkering beheerder zoveel mogelijk gereduceerd met onderhoud). Er wordt aanbevolen om de inzichten over het falen van een grasmat met oneffenheden of graverij te vergroten. Hierbij is het van belang om inzicht te verkrijgen in veel voorkomende oneffenheden. In de Nederlandse situatie komen oneffenheden veelal voor rondom overgangen (bijvoorbeeld de overgang tussen een weg op de kruin of berm en de graszode). Om die reden richt het Nederlandse onderzoek (maar recentelijk ook Brits onderzoek) zich op dit moment voornamelijk op erosie van gras nabij overgangen. Op reguliere stukken gras komen oneffenheden doorgaans wat minder voor aangezien deze goed onderhoudbaar zijn en er doorgaans weinig secundaire effecten zijn (bijvoorbeeld bandensporen, schapenpaden, etc.).

Tot slot wordt aanbevolen om bij eventuele toekomstige proeven aandacht te besteden aan de selectie van de testsectie. Dit door de volgende overwegingen in acht te nemen:

- Mate van heterogeniteit: vanuit academisch perspectief is een zo homogeen mogelijke testsectie gewenst. Met een zo homogeen mogelijke grasmat en ondergrond lenen de proefresultaten zich beter om een vergelijking te maken met theoretische modellen. In geval (toekomstig) onderzoek als doel heeft deze vergelijking te maken raden wordt geadviseerd een homogeenere grasmat toe te passen dan nu in de Wijmeers proeven is aangetroffen.
- Mate van representativiteit: vanuit de toepassing in veiligheidsbeoordelingen en het ontwerp van waterkeringen dient de kwaliteit van de graszode en ondergrond van een testsectie overeen te komen met de kwaliteit van de graszode en ondergrond van een representatieve dijk. In die zin mag een testsectie dus ook weer niet al te homogeen

(en perfect) zijn. Om falen van een 'gemiddelde' dijk te onderzoeken mag de zode daarom ruwer zijn dan voor een academische vergelijking. Een grote verruiging van de zode is ook ongewenst omdat deze niet representatief is voor waterkeringen in België of Nederland.

We raden aan bij de uitvoering van vervolgonderzoek samen te werken met lopende onderzoeken naar de sterkte van waterkeringen. Dit om de beschikbare middelen optimaal te benutten en de impact van het onderzoek te vergroten. Voorbeelden van onderzoeksprogramma's waar onderzoek wordt gedaan naar de sterkte van waterkeringen zijn AllRisk, de (geplande) bezwijkproeven in de Hedwige Prosper Polder en kennisontwikkeling in het kader van het WBI2023. Het onderzoeksprogramma AllRisk (TU Delft i.s.m. Deltares en HKV) richt zich onder andere op waterkeringen, het modelleren van extreme waterstanden en golven, het schatten van faalkansen, de ondergrond en kettingreacties bij dijkdoorbraken. Deze inzichten worden vervolgens toegepast binnen het hoogwaterbeschermingsprogramma van het RWS - WVL en de waterschappen. Daarnaast wordt door RWS - WVL de nieuwe wettelijke beoordeling van 2023 - 2035 voorbereid (het WBI2023). Hier wordt ook onderzoek gedaan naar de sterkte van waterkeringen om de faalkans beter te voorspellen. Als laatste kunnen vervolgonderzoeken gekoppeld worden aan H2020 innovatie project BRIGAD. Hier worden in testfaciliteiten innovaties ontwikkeld om de bescherming tegen o.a. overstromingen te vergroten. Dit betreft niet alleen nieuwe producten, maar ook kennisinnovaties.

7 Referenties

- Deltares, 2015, WTI Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium Product 5.12 Analyses grass erosion in wave run-up and waveovertopping conditions. Deltares rapport met kenmerk 1209437-005-HYE-003, Januari 2014
- De Vos, L.en Vincke, L. (2017). Verslag over de metingen, de infiltratieproeven en het laboratoriumonderzoek uitgevoerd in het kader van de overloop- en overslagproeven en bresproef te Wichelen (Schellebelle). GEO-15/144. Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Afdeling Geotechniek: Zwijnaarde
- G-tec (2014). Geofysische detailopnames landtalud. Meetzone Wijmeers. Iov. Waterbouwkundig Laboratorium.
- Hewlett, Boorman and Bramley, 1987, Design of reinforced grass waterways, CIRIA Report 116, London.
- Hewlett, Boorman, Bramley, and Whitehead, 1985, Reinforcement of Steep Grassed Waterways, CIRIA Technical Note 120, London.
- Hughes, 2011. Adaptation of the levee erosional equivalence method for the hurricane storm damagerisk reduction system (hsdrrs). Technical report, U.S. Army Corps of Engineers, 2011.
- Hughes et. al (2011). Steven Hughes, Christopher Thornton, Jentsje van der Meer, and Bryon Scholl. Improvements in describing wave overtopping processes. COASTAL ENGINEERING 2012.
- Huthoff et al. (2011). F. Huthoff, D.C.M. Augustijn, S.J.M.H. Hulscher. Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation. Water Resources Research 43, W06413, DOI:10.1029/2006 WR005625.
- INBO. (in prep). Ecologisch onderzoek naar dijkvegetaties en hun erosiebestendigheid langs de Zeeschelde en Durme. Richtlijnen naar beheer. Rapport Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Infram (2015). Factual report overslagproef Wijmeers 2, versie 2.0.
- IRSTEA (2016). Dignes de l'Escaut – BELGIQUE. Etude des propriétés des sols constitutifs des digues. Iov. Waterbouwkundig Laboratorium.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI2017.
- Ponsioen (2016). Overflow and wave overtopping induced failure processes on the land-side slope of a dike. Master's thesis, Delft University of Technology, May 2016.
- Peeters et al. (2012). P. Peeters, L. De Vos, B. Vandevoorde en J.W. van der Meer. Application of different failure models for the grass cover following in situ wave overtopping experiments at the land-side slope of a river dike in Belgium. ICSE6 Paris - August 27-31, 2012.
- Schüttrumpf en Oumeraci (2005) Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, Coastal Engineering, Vol. 52, No. 6, 473-495 (PIANC award for PhD thesis 2004).

- TU Delft (2016). Breach experiment Wijmeers II, Breach initiation due to overflow and overtopping. Technical report. By L.A. Ponsioen, M. van Damme.
- TU Delft (2017). Dike landside slope sampled by 4D High Resolution Terrestrial Laser Scanning. R. C. Lindenbergh en M. Herrero Huerta, TU Delft, October 2017.
- Van Damme (2016). M. Van Damme. Distributions for wave overtopping parameters for stress strength analyses on flood embankments. *Coastal Engineering* 116 (2016) 195–206, 2016.
- Van Damme et al. (2016). M. Van Damme, L. Ponsioen, M. Herrero, and P. Peeters. Comparing overflow and wave overtopping induced breach initiation mechanisms in an embankment breach experiment. In *Proceedings of the Third European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016)*, 2016.
- Van der Meer et al. (2010). Van der Meer, J.W.; B. Hardeman; G.J. Steendam; H. Schtrumpf & H. Verheij. (2010). Flow depths and velocities at crest and inner slope of a dike, in theory and with the Wave Overtopping Simulator. *ASCE, Proc. ICCE 2010, Shanghai*
- Vannoppen et al. (2016). Wouter Vannoppen, Jean Poesen, Patrik Peeters, Sarah De Baets en Bart Vandevorde. Root properties of vegetation communities and their impact on the erosion resistance of river dikes. *Earth Surf. Process. Landforms* 41, 2038–2046 (2016)
- VTV (2007). Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen.
- Whitehead and Nickersons, 1976, A guide to the use of grass in hydraulic engineering practice, CIRIA Technical Note 71, London
- Young, MJ, 2005, Wave overtopping and grass cover layer failure on the inner slope of dikes, MSc Thesis WSE-CEPD-05.03, UNESCO-IHE, June 2005

Bijlagen

Bijlage A: Foto's grasbekleding



Figuur 70 Nulsituatie grasbekleding Teststrook I (Infram, 2015, Factual report)



Figuur 71 Nulsituatie grasbekleding Teststrook I vak 6B (Infram, 2015, Factual report)



Figuur 72 Nulsituatie grasbekleding Teststrook III, na hydraulische metingen (Infram, 2015, Factual report)



Figuur 73 Nulsituatie grasbekleding Teststrook III vak 8C, na hydraulische metingen (Infram, 2015, Factual report)

SCHELLEBELLE

Test section

Date

Time

By







Start

2

10-11-15

09:00

Myron van Damme

	A	B	
1			Covered up
2			
3			
4			
5			
6			Minor damage to the grass cover Minor damage to the grass cover
7			
8			Rock
9	 		Minor damage to the grass Rock
10			Rock
11			Toe landside slope
12			

Figuur 74 Nulsituatie grasbekleding Teststrook II (TU Delft, 2015)

SCHELLEBELLE
 Test section 5
 Date 12-11-2015
 Time 10:00
 By Myron van Damme

	A	B	
1			
2			
3			Covered with plastic to prevent erosion of the crest
4			
5			Edge cover Start slope
6			Minor damage approx 7 cm deep. Grass roots are visible .
7			Edge/ jump in the grass(3cm high) with minor grass damage 2cm deep grass damage with on the left side slight settling Hole 10 cm deep
8			minor damage grass layer Stone visible (red)
9			Minor damage
10			Hole with a diameter of 3cm. 10 cm deep Minor damage to the grass at these locations. Roots are exposed Clay layer and nettle roots become visible
11			Minor damage to the grass. Roots are exposed

Figuur 75 Nulsituatie grasbekleding Teststrook V (TU Delft, 2015)

	A	B	C	D
--	---	---	---	---

3	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
4	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
5	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
6	open	gesloten	gesloten	gesloten
7	gesloten	gesloten	open	gesloten
8	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
9	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
10	gesloten	open	open	gesloten
11	open	open	open	gesloten

Tabel 27 Nulsituatie grasbekleding Teststrook I: kwaliteit grasmat per rastervak

	A	B
5	gesloten	gesloten
6	open	open
7	gesloten	gesloten
8	gesloten	open
9	open	gesloten
10	gesloten	open
11	gesloten	gesloten

Tabel 28 Nulsituatie grasbekleding Teststrook II: kwaliteit grasmat per rastervak

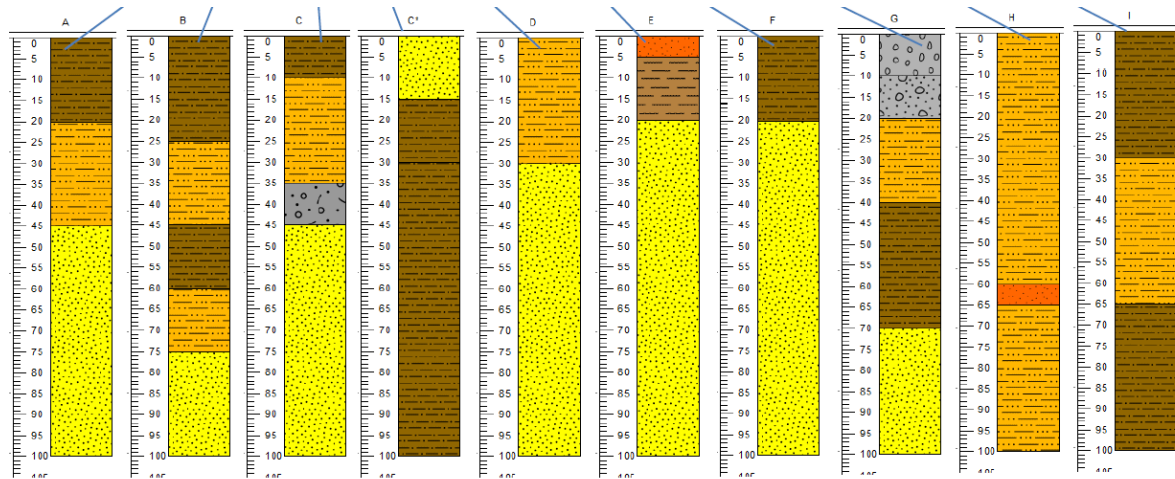
	A	B	C	D
3	gesloten	gesloten	gesloten	gesloten
4	gesloten	open	gesloten	gesloten
5	open	open	open	gesloten
6	gesloten	open	gesloten	gesloten
7	gesloten	open	open	gesloten
8	open	open	gesloten	open
9	gesloten	open	open	gesloten
10	open	open	gesloten	gesloten

Tabel 29 Nulsituatie grasbekleding Teststrook III: kwaliteit grasmat per rastervak

	B
5	gesloten
6	open
7	open
8	open
9	open
10	open
11	open

Tabel 30 Nulsituatie grasbekleding Teststrook V: kwaliteit grasmat per rastervak

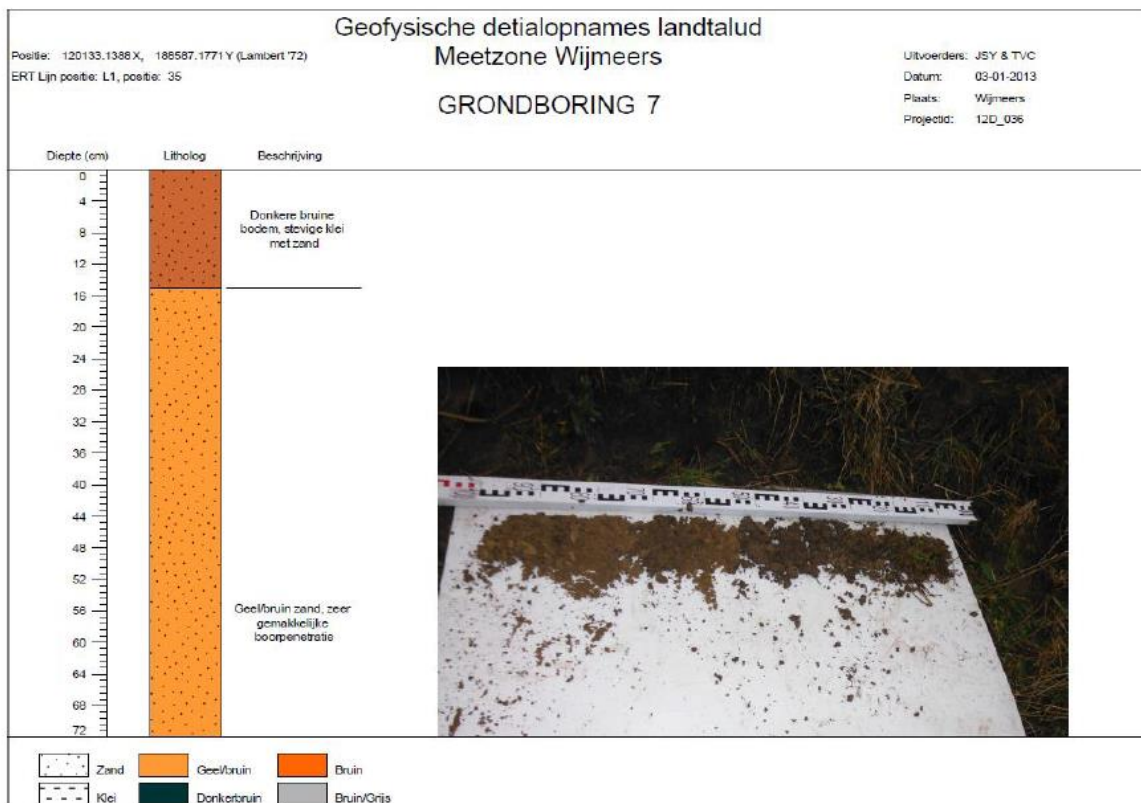
Bijlage B: Gebruikte boringen G-tec



Figuur 76 Boringen A-I (G-tec, 2014)



Figuur 77 Boring O2 (G-tec, 2014)



Figuur 78 Boring 07 (G-tec, 2014)



Figuur 79 Boring 09 (G-tec, 2014)

Bijlage C: Grondparameters IRSTEA

PRT Géomécanique - IRSTEA Aix en Provence

Prélèvements sur les digues de protection d'Anvers (Belgique) - synthèse des résultats d'essais de laboratoire									
DOSSIER 1201214 ; DATE PRELEVEMENTS : 26-27/02/2013 (prélèvements par Irstea et FHR)									
PRELEVEMENT	Site 1 - T1		Site 1 - T2		Site 2 - T1		Site 2 - T2		Site 2 - matériaux sableux
	remanié	intact		remanié	remanié	intact	remanié	intact	remanié
Type de prélèvement									
Localisation du prélèvement	carapace		corps de digue		carapace 0 à 0,50 m		corps de digue		corps de digue, local
COULEUR	noirâtre		marron clair		brun foncé		beige - marron		
TYPE DE MATERIAUX	limon argileux		sable		limon		limon		limon sableux
TENEUR en EAU NATURELLE w en % (2013)	33,0%	27,0%		11,0%	30,0%		25,5%		
TENEUR en EAU NATURELLE w en % - mesures de 2015	35,0%		12,5%			33,7%	27,6%		
	29,0%					32,4%			
GRANULOMETRIE / SEDIMENTOMETRIE									
CAILLOUX >20 mm en %	0		0	0			0		0
2 mm < GRAVIERS < 20 mm en %	4		0	0			1		2
50µm < SABLES < 2 mm en %	36		91	42			52		73
2 µm < SILTS < 50 µm en %	33		5	48			38		20
ARGILES < 2 µm en %	27		4	10			9		5
LIMITES D'ATTERBERG									
LIMITE DE LIQUIDITE W _L	48		NM	43			34		NM
LIMITE DE PLASTICITE W _p	35		NM	35			29		NM
INDICE DE PLASTICITE I _p	13		NM	8			5		NM
ESSAI AU BLEU - V ₈₀ en g/100 g de sol - d <= 2 mm				0,4					
COMPORTEMENT AU COMPACTAGE									
Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal en %	20%		14%	19,5%			19%		
Masses volumiques sèche à l'Optimum Proctor Normal en t/m ³	1,64		1,68	1,60			1,62		
MASSE VOLUMIQUE EN PLACE (sur carottes ou sur moelles)									
Masses volumiques sèche en t/m ³	1,503	1,38				1,04 / 1,01		1,34	
Masses volumiques humide en t/m ³	1,903	1,74				1,40 / 1,34		1,44	
MASSSE VOLUMIQUE DES GRAINS en t/m ³	2,72		2,81	2,69					
ESSAI D'EROSION en laboratoire sur échantillon remanié : HET									
reproduisant les conditions (masse volumique, teneur en eau) du site									
Caractéristiques des éprouvettes remaniées testées:									
Masses volumiques humides éprouvette en t/m ³	1,89		1,68		1,65		1,73		
Masses volumiques sèches éprouvette en t/m ³	1,44		1,51		1,26		1,38		
Teneur en eau éprouvette en %	31		10,8		31,1		25,4		
Degré de saturation S _r	95,0		35		73,7		71,7		
Indice de vides e	0,89		0,86		1,13		0,96		
Résultats des essais HET (1):									
Contrainte critique Tauc (Pa)	114		NM		13		25		
Indice d'érosion I _e	3,35		NM		2,27		2		
ESSAI D'EROSION en laboratoire sur échantillon remanié : JET									
reproduisant les conditions (masse volumique, teneur en eau) du site									
Caractéristiques des éprouvettes remaniées testées:									
Masses volumiques humides éprouvette en t/m ³	1,82		1,8		1,62		1,67		
Masses volumiques sèches éprouvette en t/m ³	1,38		1,61		1,21		1,32		
Teneur en eau éprouvette en %	32		11,6		33,4		26,7		
Degré de saturation S _r	89,6		43,7		73,5		69		
Indice de vides e	0,97		0,75		1,22		1,05		
Résultats des essais JET (2):									
Contrainte critique Tauc (Pa)	20,2 / 22,4		16,8 / 19,7		0 / 11		58 / 71,1		
Coefficient d'érosion de Hanson K _d (cm ³ /(s.N))	27,9 / 28,5		2,6 / 3,4		0 / 0,1		0,6 / 0,9		
ESSAI D'EROSION en laboratoire sur échantillon remanié :									
objectifs wOPN, 95%pdOPN									
Caractéristiques des éprouvettes remaniées testées:									
Masses volumiques humides éprouvette en t/m ³	1,87		1,82		1,82		1,83		
Masses volumiques sèches éprouvette en t/m ³	1,56		1,6		1,52		1,54		
Teneur en eau éprouvette en %	20		14		19,5		19		
Degré de saturation S _r	73,2		52		68,0		68,0		
Indice de vides e	0,74		0,76		0,77		0,75		
Résultats des essais HET (1):									
Contrainte critique Tauc (Pa)	217		NM		55		75		
Indice d'érosion I _e	4,11		NM		3,31		2,75		
Résultats des essais JET (2):									
Contrainte critique Tauc (Pa)	28,9 / 29,9		23,1 / 26,9		13,8 / 28,2		27,9 / 28,5		
Coefficient d'érosion de Hanson K _d (cm ³ /(s.N))	180,2 / 200		126,9 / 154,5		5,9 / 10,2		194,3 / 194,3		
ESSAI D'EROSION in-situ :									
Résultats des essais JET in-situ (2):									
Position de l'essai dans la tranchée									
Contrainte critique Tauc (Pa)			haute	haute	basse	haute	basse	haute	
Coefficient d'érosion de Hanson K _d (cm ³ /(s.N))			55,1 / 74,1	8,2 / 13,1	8,6 / 10,8	13,1 / 15,2	18 / 26,7	26 / 27,8	
									5 / 30,4
									20 / 149,7

en bleu : résultats de 2013

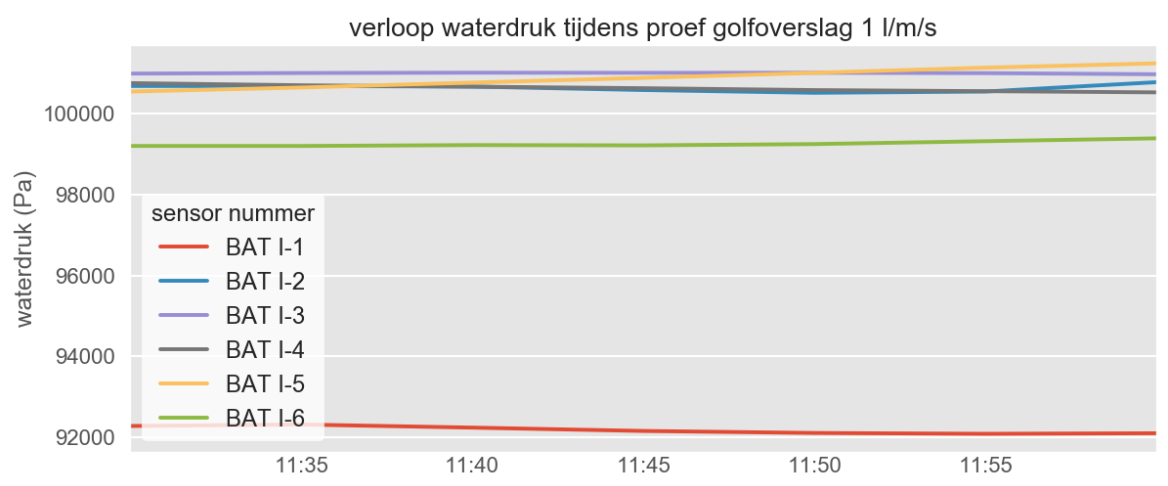
NM : non mesurable

(1) Les résultats présentés dans le tableau sont les moyennes des valeurs obtenues. Se reporter aux annexes pour les valeurs min et max.

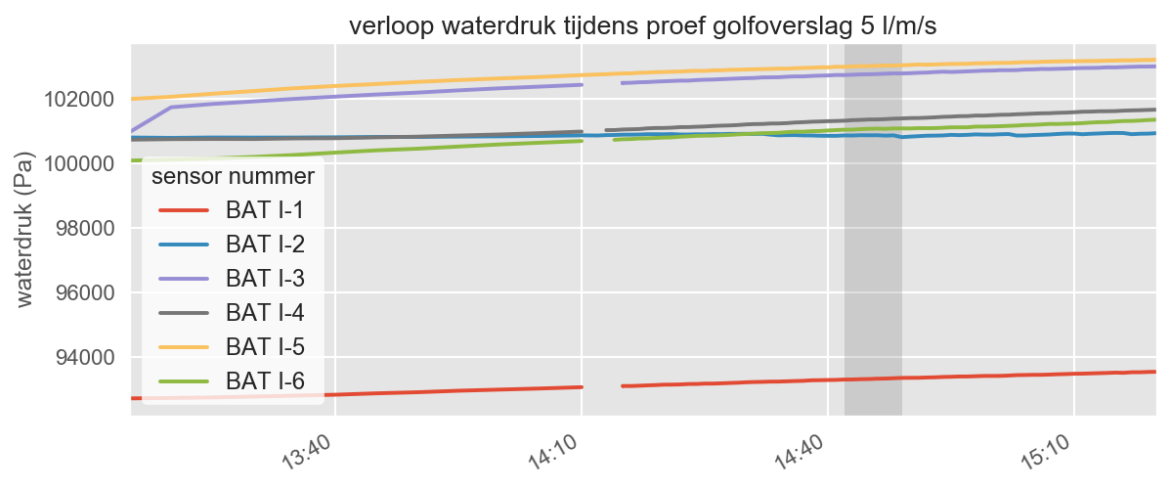
(2) Les deux valeurs correspondent à celles obtenues selon deux modèles d'interprétation différents

Tableau 1 : synthèse des résultats expérimentaux

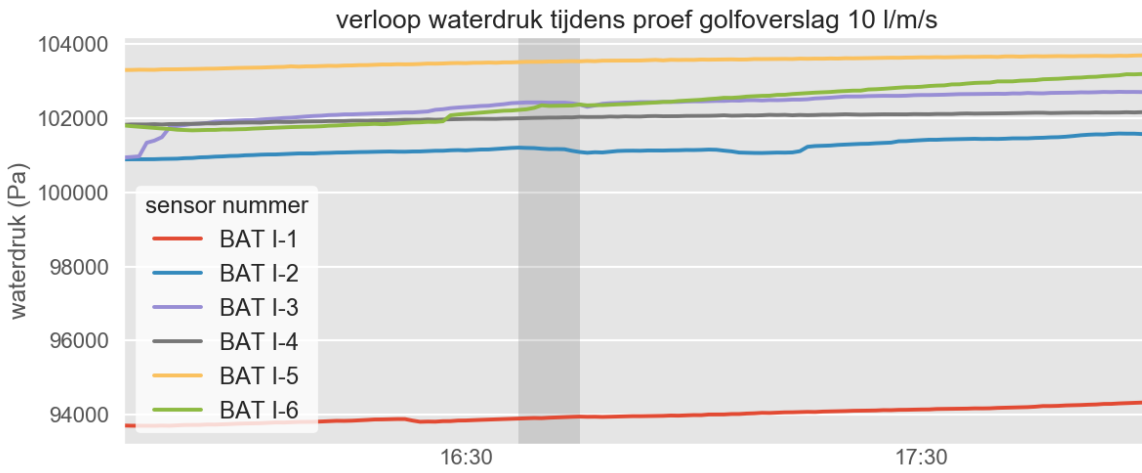
Bijlage D: Verloop waterdruk golfverslag en overloop proeven



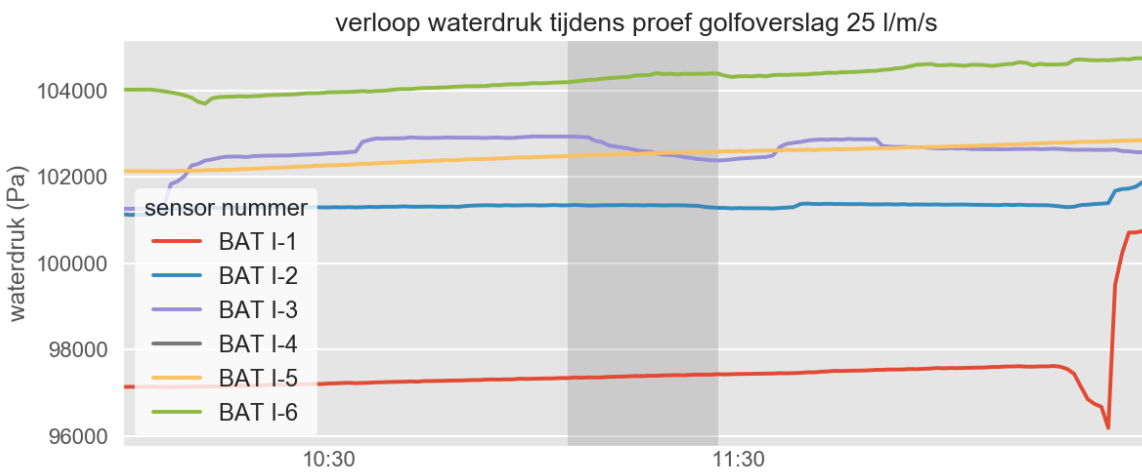
Figuur 80 Verloop van de waterdruk tijdens golfverslagproef 1 l/s/m op proefstrook I.



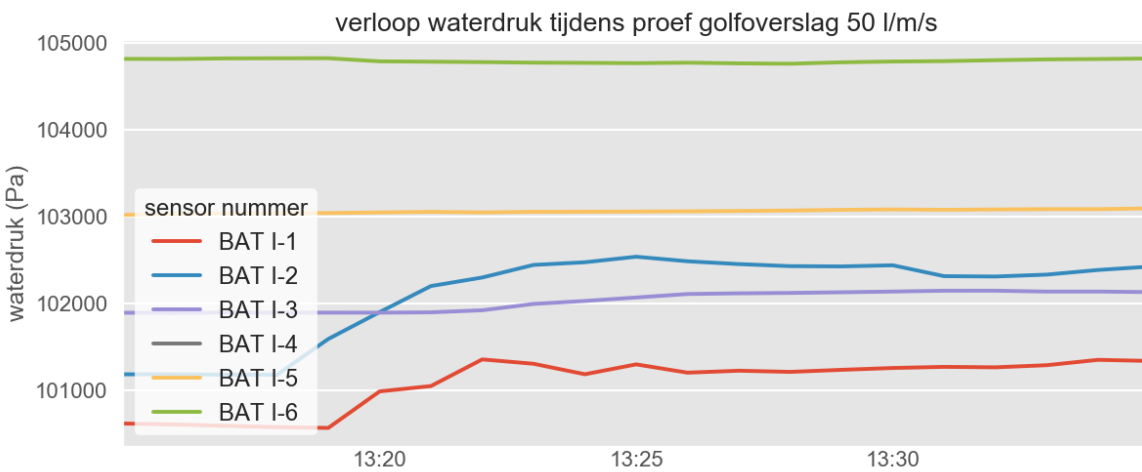
Figuur 81 Verloop van de waterdruk tijdens golfverslagproef 5 l/s/m op proefstrook I, in de periode die donkergrijs is gearceerd was de proef gepauzeerd (zie Bijlage A uit INFRAM, 2015).



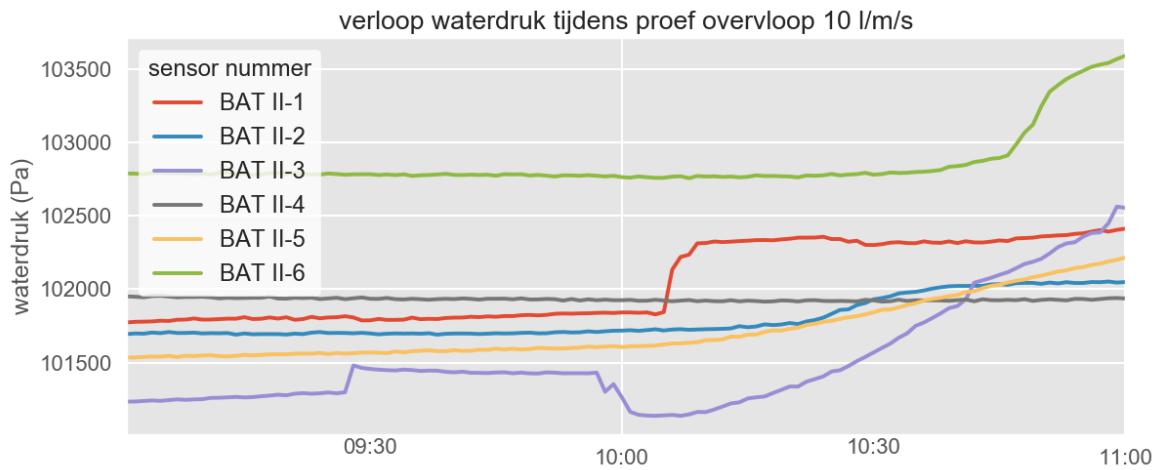
Figuur 82 Verloop van de waterdruk tijdens golfverslagproef 10 l/s/m op proefstrook I, in de periode die donkergrijs is gearceerd was de proef gepauzeerd (zie Bijlage A uit INFRAM, 2015).



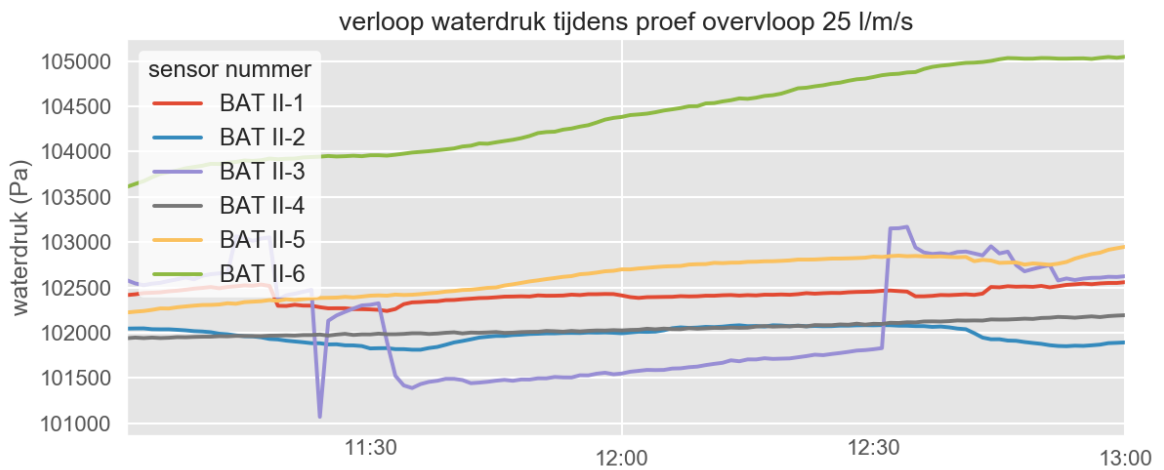
Figuur 83 Verloop van de waterdruk tijdens golfverslagproef 25 l/s/m op proefstrook I, in de periode die donkergrijs is gearceerd was de proef gepauzeerd (zie Bijlage A uit INFRAM, 2015).



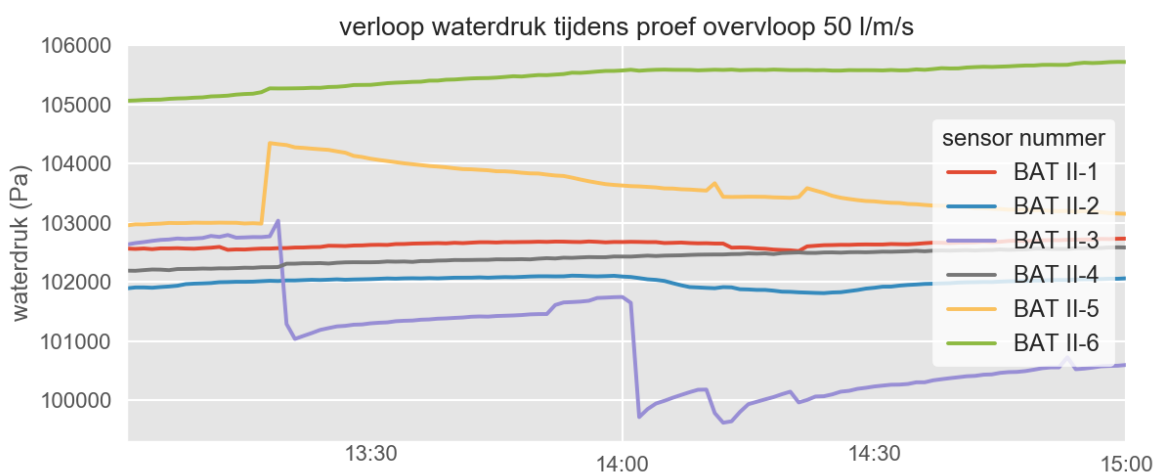
Figuur 84 Verloop van de waterdruk tijdens golfverslagproef 50 l/s/m op proefstrook I.



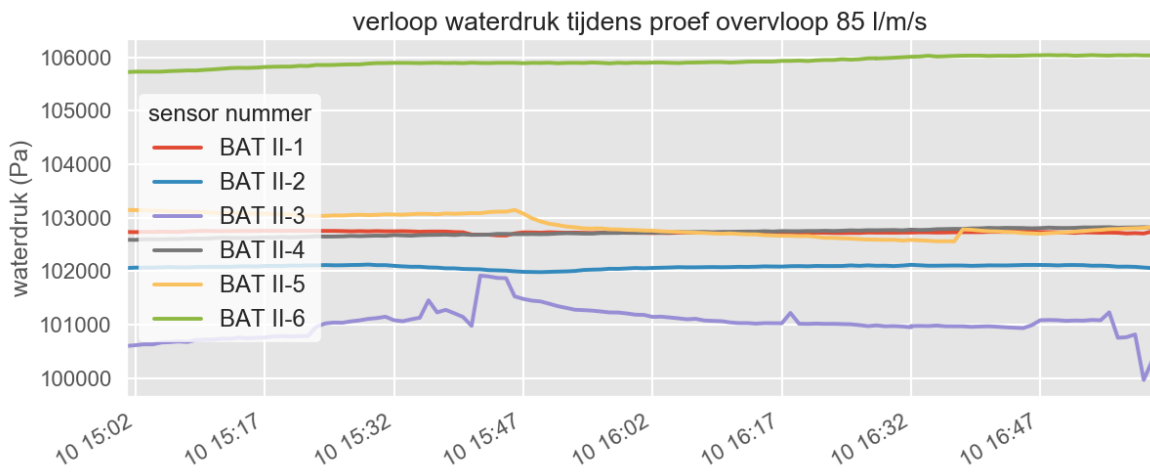
Figuur 85 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 10 l/s/m op proefstrook II.



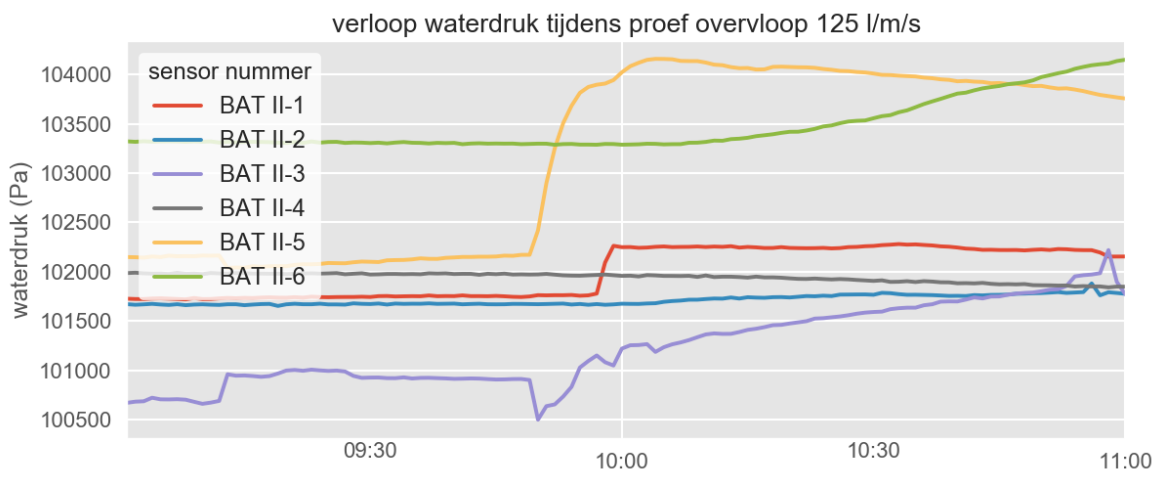
Figuur 86 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 25 l/s/m op proefstrook II.



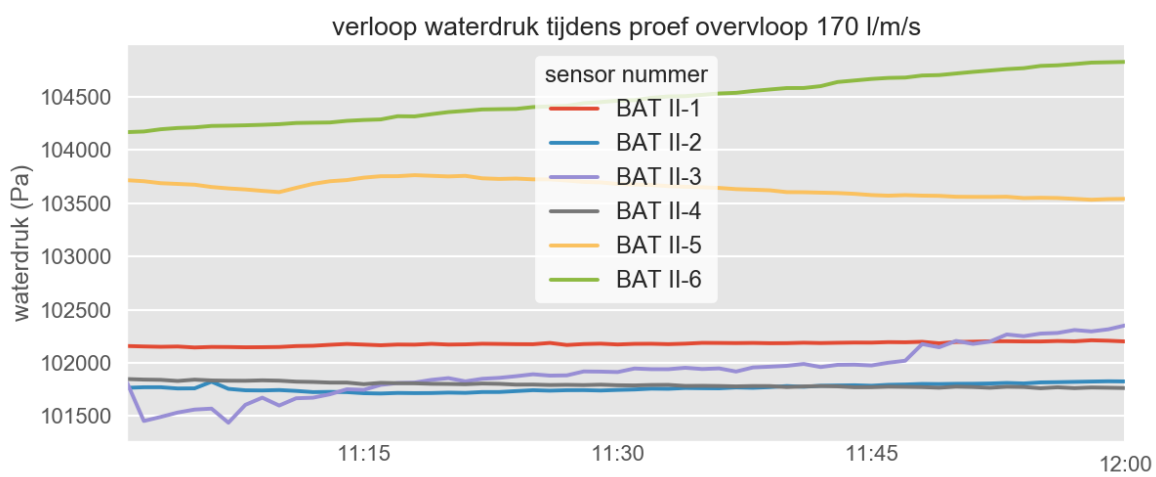
Figuur 87 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 50 l/s/m op proefstrook II.



Figuur 88 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 85 l/s/m op proefstrook II.

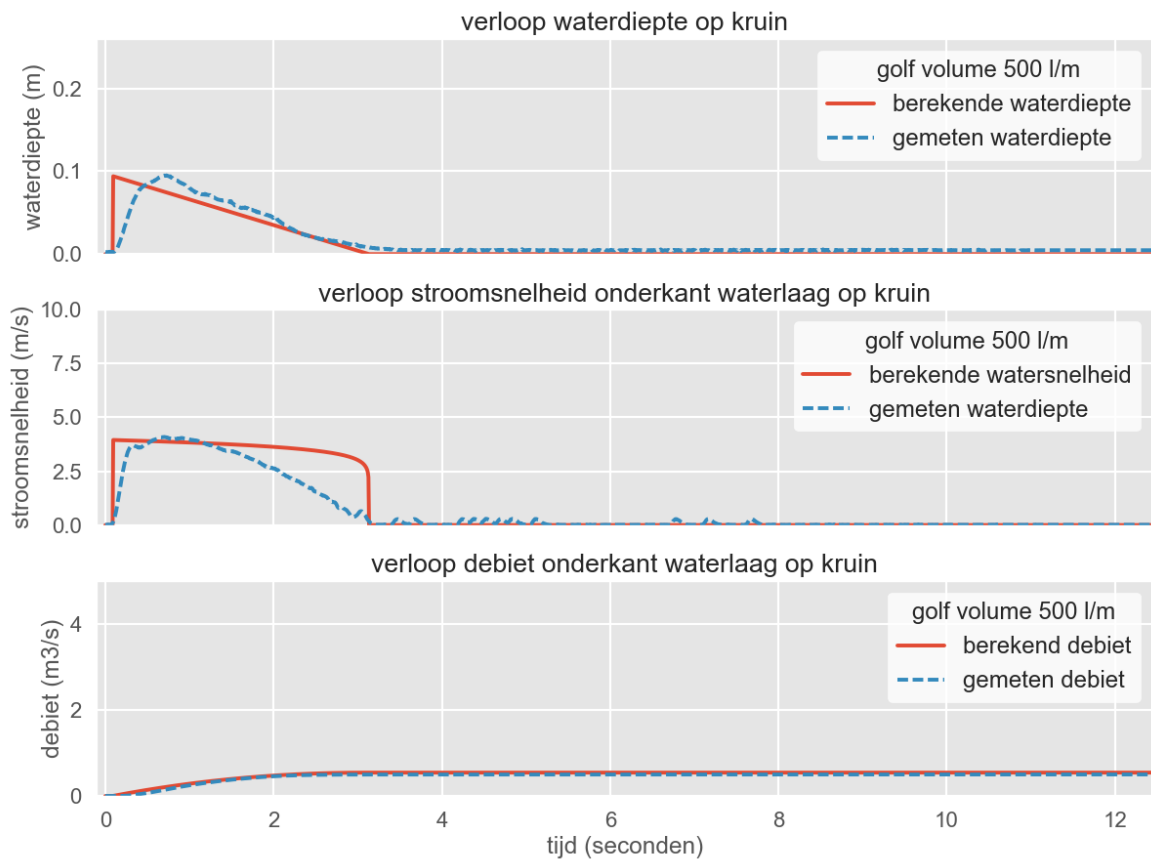


Figuur 89 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 125 l/s/m op proefstrook II.

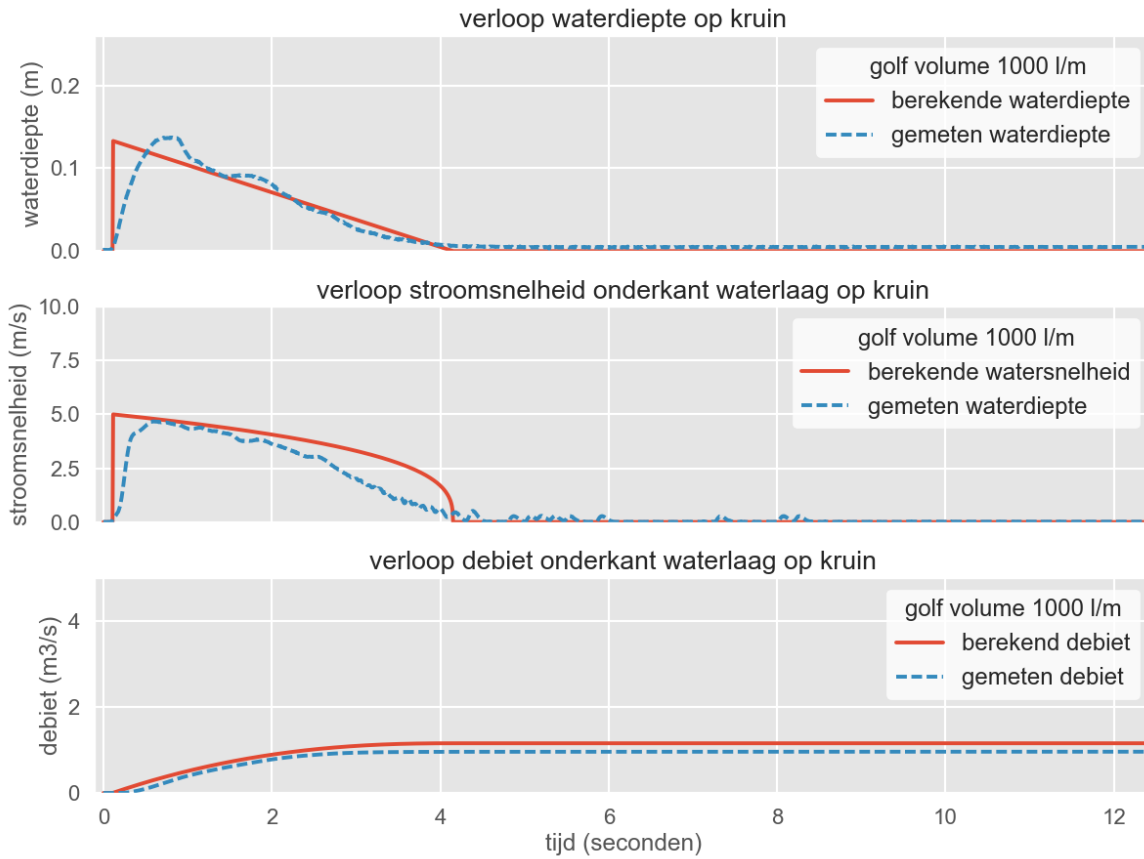


Figuur 90 Verloop van de waterdruk tijdens overloop 170 l/s/m op proefstrook II.

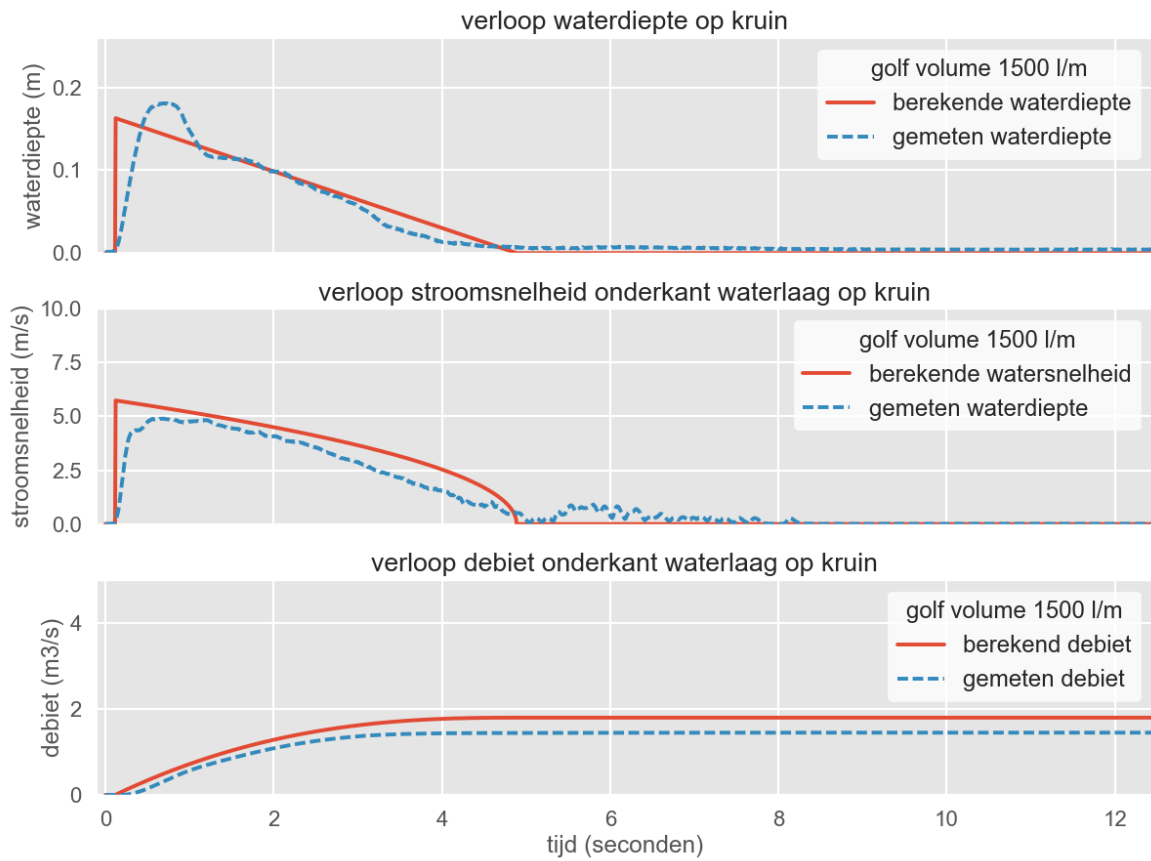
Bijlage E: Gemeten en theoretisch verloop van de hydraulische metingen



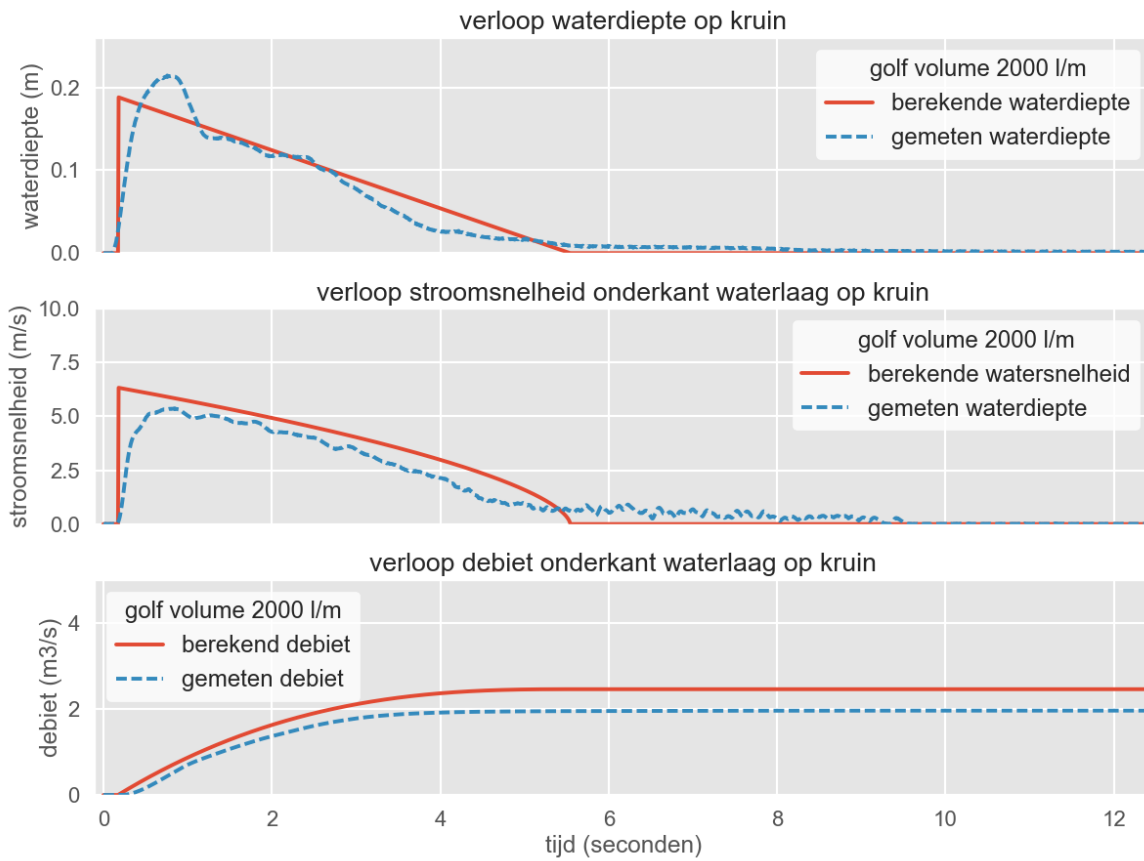
Figuur 91 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 500 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



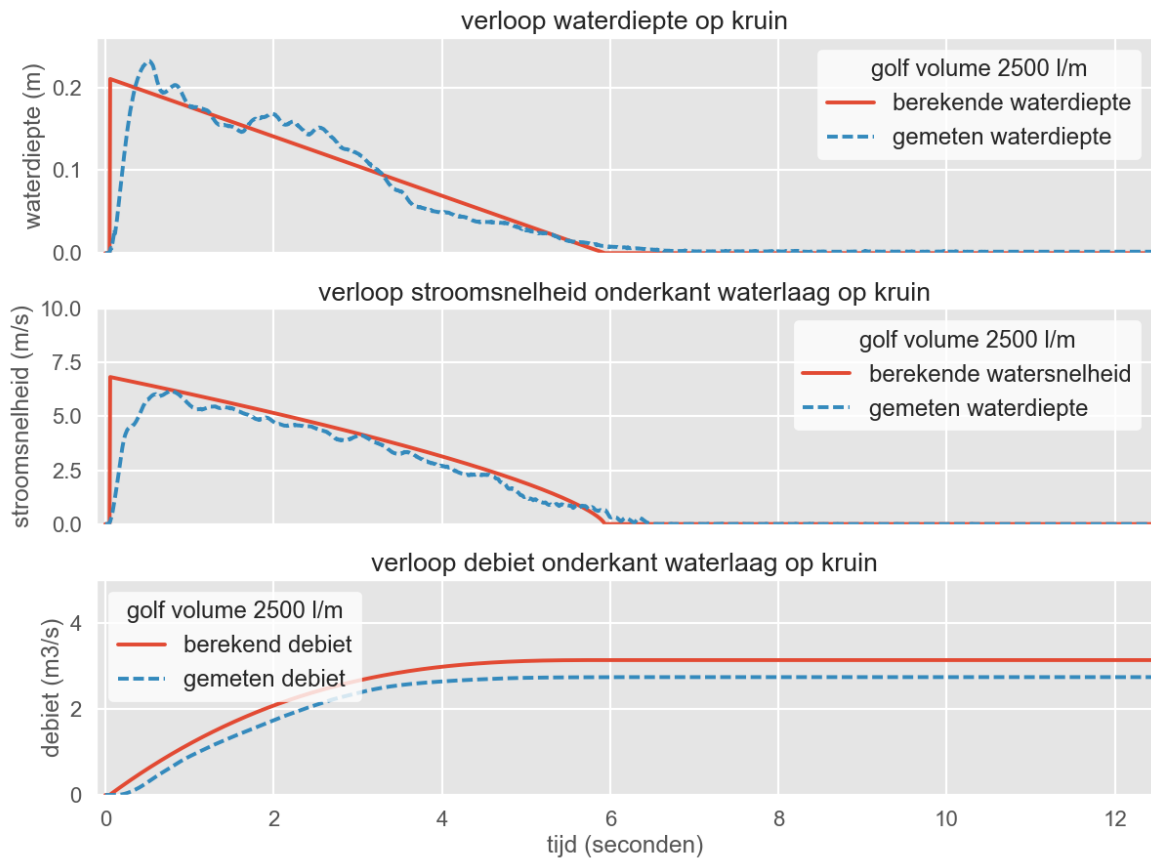
Figuur 92 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 1000 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



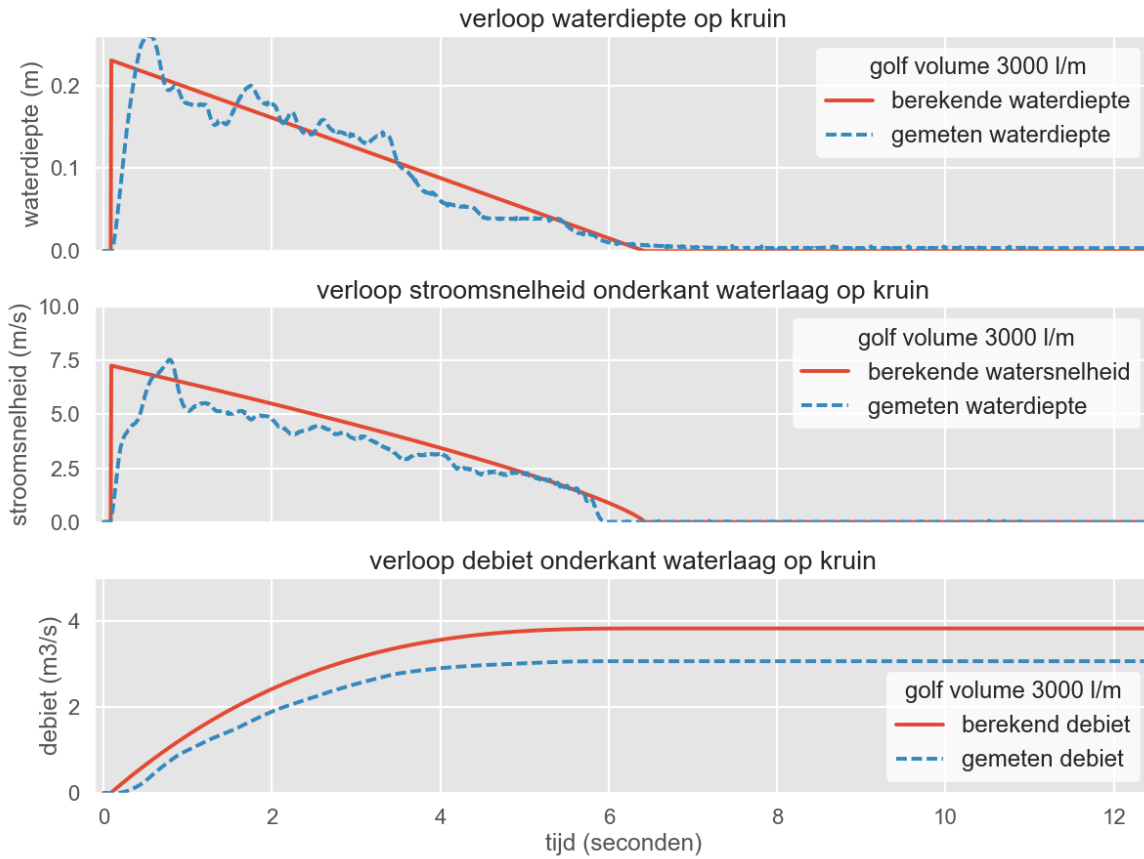
Figuur 93 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 1500 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



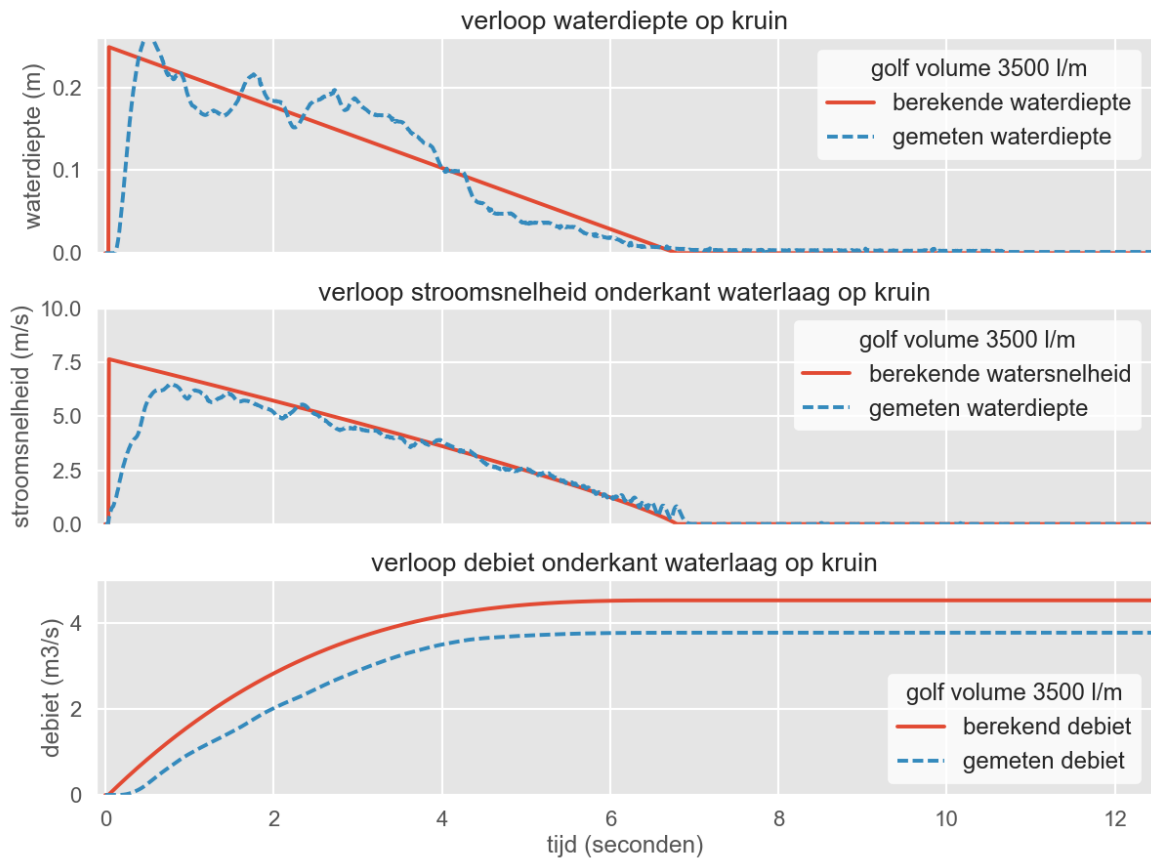
Figuur 94 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 2000 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



Figuur 95 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 2500 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



Figuur 96 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 3000 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



Figuur 97 Gemeten en theoretisch verloop van een golf van 3500 l/m (waterdiepte, stroomsnelheid en debiet) – overige golf volumes in Bijlage E.



HKV Lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl