

## Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam



# **Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken**

Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam

## **Auteur(s)**

Mark Klein Breteler

## Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam

<b>Opdrachtgever</b>	Waterschap Noorderzijlvest
<b>Contactpersoon</b>	Bert de Wolff en Ate Wijnstra
<b>Referenties</b>	Opdracht van 7-7-2020 met kenmerk Z/20/036703 en verplichtingnummer 202001518
<b>Trefwoorden</b>	Reststerkte, faalkans, erosie, gras, dijkbekleding, klei

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	5
<b>Datum</b>	04-03-2025
<b>Projectnummer</b>	11204841-006
<b>Document ID</b>	11204841-006-HYE-0014
<b>Pagina's</b>	139
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

Dit is een verbeterde versie van het rapport van 24-8-2022, omdat de waterstanden in enkele tabellen niet bleken te kloppen.

# Samenvatting

De voorliggende rapportage is opgesteld in het kader van het onderzoeksprogramma naar de sterkte van een kleibekleding met gras op het boventalud van Waddenzeedijken. Dit onderzoeksprogramma is specifiek gericht op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat en de dijk Koehool-Lauwersmeer, met de intentie om de resultaten ook voor andere Waddenzeedijken te gebruiken.

Dit onderzoeksprogramma is een samenwerking van het Waterschap Noorderzijlvest en het Wetterskip Fryslân met Deltares. Bij de opzet van de plannen zijn ook het Waterschap Zuiderzeeland en het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier betrokken geweest, omdat ook zij de resultaten graag gaan gebruiken bij de renovatie van hun dijken. De penvoerder van het onderzoek is het Waterschap Noorderzijlvest, met financiering van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Deze rapportage betreft de analyse van de resultaten uit de Deltagootproeven en numerieke berekeningen met OpenFoam, die geleid heeft tot een set formules waarmee de erosie van de kleibekleding met gras op het boventalud kan worden berekend.

In de eerste fase van het onderzoek is gebruik gemaakt van de Deltagoot om de erosiesnelheid van de kleibekleding met gras op het boventalud te meten bij zware golfaanval (zie hoofdstuk 3). Deze metingen zijn uitgevoerd op ware grootte met blokken klei met gras die gestoken zijn van de Lauwersmeerdijk, de dijk bij Holwerd en die bij Blija.

De afmetingen van deze kleiblokken met gras waren  $2 \times 2 \text{ m}^2$  en ca. 80 cm dik, waarvan er negen zijn gebruikt om het boventalud op te bouwen. Op deze wijze is oude gestructureerde klei in ongeroerde staat met volgroeid gras in de Deltagoot gebruikt voor zo realistisch mogelijke proefresultaten.

Hiermee zijn in totaal zes proevenseries uitgevoerd met verschillende dijkgeometrieën.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met een significante golfhoogte van ongeveer  $H_{m0} = 2,0 \text{ m}$  en golfperiode  $T_p = 5,5 \text{ s}$  bij een waterstand net boven de overgang tussen de harde bekleding en het gras. Deze condities zijn zo gekozen om optimaal aan te sluiten op het ontwerppunt van de probabilistische berekeningen voor het ontwerp van het boventalud van dijken (zie hoofdstuk 7).

In de tweede fase van het onderzoek zijn numerieke berekeningen met OpenFOAM gebruikt om de proefresultaten te vertalen naar een breder scala aan hydraulische belastingen en dijkgeometrieën (zie hoofdstuk 5). Daarbij is gebruik gemaakt van de hypothese van Kruse die stelt dat de piekdruk in de golfklappen op de klei bepalend is voor de snelheid van de erosie. Door de huidige proeven na te rekenen met OpenFOAM is de relatie tussen de berekende piekdruk en de gemeten erosiesnelheid bepaald. Met deze relatie zijn vervolgens de berekende piekdrukken bij andere waterstanden en golfhoogtes omgerekend naar erosiesnelheden. Hiermee zijn formules afgeleid voor de erosiesnelheid van de klei met gras op het boventalud.

In de derde fase van het onderzoek zijn de afgeleide formules opgenomen in de probabilistische rekentool van Deltares (Matlab-code) (zie hoofdstuk 7). Met dit rekenmodel en de door Hydra-Ring gegenereerde waterstanden en golfcondities zijn in voorbeeldberekeningen vervolgens ruim een miljoen jaren gesimuleerd met een Monte Carlo simulatie. Dit levert de kans dat de dijk bij een specifieke kleilaagdikte en een specifiek niveau van de overgang

(tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras) bezwijkt als gevolg van het falen van de kleibekleding met gras op het boventalud. Er zijn enkele voorbeeldberekeningen gemaakt voor de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat. Bij een niveau van de overgang (tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras) op NAP+5,95 m hebben de berekeningen geleid tot de volgende minimaal benodigde kleilaagdiktes:

- Locatie 1 (km 87,7): kleilaagdikte = 1,3 m
- Locatie 2 (km 85,7): kleilaagdikte = 0,5 m
- Locatie 3 (km 84,9): kleilaagdikte = 0,7 m
- Locatie 4 (km 82,5): kleilaagdikte = 0,3 m

In verband met andere faalmechanismen wordt aanbevolen de kleilaagdikte op het boventalud van dijken tenminste 80 cm te maken.

# Symbolenlijst

$B_{\text{berm}}$	= breedte van de berm (m)
$C_d$	= coëfficiënt voor de eerste fase van het erosieproces (0,55 als zandgehalte < 45%)
$d_e$	= grootste diepte in de erosiekuil (m)
$d_{e,1 \rightarrow 2}$	= erosiediepte aan het begin van de tweede fase van het erosieproces (m)
$d_o$	= erosiediepte tegen de overgang (haaks op het talud) (m)
$d_m$	= maatgevende waterdiepte voor de dijk, namelijk op een halve diepwatergolflengte vanaf de teen van de dijk (m)
$d_t$	= niveau van aansluiting van erosieterras op het buitentalud ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
$f_{\text{overgang}}$	= invloedsfactor voor de invloed van de diepte van de overgang op de erosiesnelheid in de eerste fase van het erosieproces (-)
$g$	= versnelling van de zwaartekracht (9,8 m/s <sup>2</sup> )
$H_{m0}$	= significante golfhoogte bij de teen van de dijk, eventueel scheef invallend (m)
$H_{m0\perp}$	= equivalente significante golfhoogte bij de teen van de dijk van loodrecht invallende golven die evenveel erosie geven als de scheef invallende golven (m)
$h$	= waterstand ten opzichte van NAP (m)
$h_{\text{overgang}}$	= waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar het gras, zie Figuur 8.2 (positief als overgang onder water) (m)
$h_{\text{berm}}$	= diepte van de berm (zie Figuur 5.20 voor de definitie) (m)
$L_{op}$	= $gT_p^2/(2\pi)$ = equivalente golflengte opdiepwater (m)
$m_1$	= modelonzekerheid in de eerste fase van het erosieproces (-)
$m_2$	= modelonzekerheid in de tweede fase van het erosieproces (-)
$p$	= druk als gevolg van golven (exclusief hydrostatische druk) (Pa)
$P_{\text{max}}$	= norm op trajectniveau (ondergrens) van dijktraject
$P_B$	= maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen
$P_G$	= maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject
$P_{GE}$	= maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject
$P_T$	= maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede).
$S_{op}$	= $H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ = golfsteilheid (-)
$t$	= tijd (uur)
$t_{\text{belast}}$	= duur van de hydraulische belasting (met constante waterstand en golfhoogte) (uur)
$T_p$	= golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$V$	= $\sigma/\mu$ = variatiecoëfficiënt
$V_e$	= erosievolume per meter dijk lengte (m <sup>3</sup> /m)
$y$	= afstand haaks op de gootas tot de zijkant van het grastalud aan de meetcabinezijde (m)
$z$	= verticale coördinaat (m)
$\alpha$	= taludhelling boventalud boven de overgang (°)
$\alpha_{\text{gem}}$	= gemiddelde taludhelling tussen $H_{m0}$ onder SWL en $H_{m0}$ boven SWL (zonder de breedte van de berm mee te tellen) (°)
$\alpha_{\text{klif}}$	= taludhelling van de erosieklif (°)
$\alpha_{\text{terras}}$	= taludhelling van het erosieterras (°)
$\beta$	= hoek van golfaanval ten opzichte van loodrechte golfaanval (°)
$\partial d_e / \partial t$	= snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt (m/uur)

- $\partial V_e / \partial t$  = erosiesnelheid (erosievolumeverandering per meter dijk per uur) ( $m^3/m/u$ )
- $\phi$  = stijghoogte als gevolg van de golven (exclusief hydrostatische druk) (m)
- $\phi_{s,klap}$  = significante waarde van de piekdruk in de golfklappen: gemiddelde van hoogste één derde deel van de golfklappen tegen de klif van het erosiegat (als het aantal berekende golfklappen minder is dan het aantal golven, dan is de lijst met waarden aangevuld met nullen en is daarna de significante waarde berekend) (m)
- $\rho$  = soortelijke massa van het water ( $kg/m^3$ )
- $\mu$  = verwachtingswaarde
- $\sigma$  = standaardafwijking in een normale verdeling

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Symbolenlijst</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Aanpak</b>	<b>14</b>
2.1	Aanpak van gehele onderzoek	14
2.2	Opzet van dit rapport	17
<b>3</b>	<b>Deltagootproeven</b>	<b>18</b>
3.1	Klei met gras voor de Deltagootproeven	18
3.2	Overzicht modelopstellingen	19
3.3	Proevenserie K1	20
3.3.1	Modelopstelling K1	20
3.3.2	Proefresultaten K1	22
3.4	Proevenserie K2 en K3	23
3.4.1	Modelopstelling K2 en K3	23
3.4.2	Proefresultaten K2 en K3	25
3.5	Proevenserie K4	27
3.5.1	Modelopstelling K4	27
3.5.2	Proefresultaten K4	28
3.6	Proevenserie K5 en K6	30
3.6.1	Modelopstelling K5 en K6	30
3.6.2	Proefresultaten K5 en K6	32
<b>4</b>	<b>Erosieproces</b>	<b>34</b>
4.1	Belasting door golfloop en golfklappen	34
4.2	Erosieproces met twee fases	35
4.3	Erosieprofiel	37
<b>5</b>	<b>Erosieformules</b>	<b>39</b>
5.1	Eerste fase van het erosieproces	39
5.1.1	Kwantificering van het erosieproces	39
5.1.2	Erosiediepte aan het eind van de eerste fase van het erosieproces	43
5.1.3	Relatie erosiediepte en erosievolume	43
5.1.4	Erosiediepte bij de overgang	45
5.1.5	Invloed van extreem hete en droge zomer	48
5.2	Tweede fase van erosieproces (OpenFOAM)	49
5.2.1	Aanpak	49
5.2.2	Beschrijving van de gebruikte numerieke modellen	51



5.2.3	Stap 1: Deltagootproeven narekenen	54
5.2.4	Stap 2a: OpenFOAM berekeningen met diverse golfcondities en waterstanden	57
5.2.5	Stap 2b: OpenFOAM berekeningen met diverse dijkgeometrieën	58
5.2.6	Stap 3: Formules afleiden voor de erosiesnelheid	60
5.3	Resulterende erosieformules	68
5.4	Vergelijking formules met metingen en OpenFoam-berekeningen	71
<b>6</b>	<b>Onzekerheden en afbakening toepassingsgebied</b>	<b>76</b>
6.1	Onzekerheden in de eerste fase van het erosieproces	76
6.1.1	Initiële schade aan het gras	76
6.1.2	Onzekerheid in de erosiesnelheid	77
6.1.3	Onzekerheid door de schematisering van de vorm van het erosieprofiel	77
6.2	Onzekerheden in de overgang van de eerste fase naar de tweede fase	78
6.3	Onzekerheden in de tweede fase van het erosieproces	78
6.3.1	Onzekerheden in de OpenFoam berekeningen	78
6.3.2	Erosiesnelheid bij waterstand en golfcondities zoals in de Deltagoot	78
6.3.3	Invloed van de golfhoogte, golfsteilheid en waterstand op het erosievolume	79
6.3.4	Invloed van de dijkgeometrie	79
6.3.5	Onzekerheid in de berekende erosiediepte	79
6.4	Resulterende onzekerheden	79
6.5	Toepassingsgebied van het rekenmodel	81
<b>7</b>	<b>Voorbeeld van toepassing in probabilistische berekeningen van de faalkans van het boventalud</b>	<b>84</b>
7.1	Gekozen locaties	84
7.2	Aanpak berekeningen	85
7.3	Resultaten van de berekeningen	89
7.4	Aanbeveling voor het gebruik van de rekenmethode in de praktijk	93
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>94</b>
8.1	Conclusies	94
8.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	99
8.2.1	Aanwezigheid initiële schade	99
8.2.2	Vereenvoudigingen aan de veilige kant	99
8.2.3	Verbeterde categorisering van klei	99
8.2.4	Onzekerheid omtrent het beschreven erosieproces	100
8.2.5	Berekeningen met OpenFoam	100
	<b>Referenties</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>Erosieprofielen in OpenFOAM berekeningen</b>	<b>105</b>
<b>B</b>	<b>Resultaten berekeningen met OpenFoam</b>	<b>108</b>
B.1	Nagerekende Deltagootproeven	108

B.2	Invloed variatie in hydraulische belasting	110
B.3	Invloed variatie in dijkgeometrie	112
B.4	Overzicht van alle OpenFoam berekeningen	115
<b>C</b>	<b>Resultaten van probabilistische berekening</b>	<b>119</b>
<b>D</b>	<b>Alternatieve berekening van modelcoëfficiënt</b>	<b>122</b>
<b>E</b>	<b>Overzicht gemeten erosie alle Deltagootproeven</b>	<b>124</b>
<b>F</b>	<b>Categorisering van klei</b>	<b>125</b>
F.1	Huidige categorisering van klei	125
F.2	Ervaring in het huidige project	126
F.3	Testmethode voor categorisering van de samenhang in de klei	126
F.3.1	Beoordelen van klei voor een nog aan te leggen dijkverbetering	127
F.3.2	Beoordelen van klei van een bestaande dijk	127
<b>G</b>	<b>Gevoeligheidsberekeningen</b>	<b>129</b>
G.1	Invloed van het aantal seeds	129
G.2	Invloed van het aantal doorgerekende jaren	130
G.3	Invloed van de verwachtingswaarde en spreiding van parameter $m_2$	131
G.4	Invloed van de duur van de storm	131
G.5	Invloed van het faseverschil tussen de opzet en het hoogwater	132
G.6	Invloed van de verwachtingswaarde van parameter $m_1$	135
<b>H</b>	<b>Schade Emmapolderdijk</b>	<b>136</b>

# 1 Inleiding

Op de meeste zee- en meerdijken in Nederland ligt er een harde bekleding op het buitentalud met op het bovenste deel van het buitentalud (de golfploopzone) gras op een kleibekleding. Voor veel van deze dijken geldt dat volgens het WBI-2017 het gras op dit deel van het buitentalud niet voldoet als er sprake is van een 'open zode' en in sommige gevallen zelfs met een 'gesloten zode'. Dat wil zeggen dat de berekende faalkans van het dijktraject te groot wordt als gevolg van de grote waarde van de berekende faalkans van mechanisme 'gras-erosie buitentalud' (GEBU). De werkelijke faalkans is waarschijnlijk veel kleiner, omdat bij het mechanisme GEBU ervan uit wordt gegaan dat de dijk faalt als de grasbekleding faalt.

De hydraulische belasting op het bovenste deel van het buitentalud op deze dijken is zodanig dat het gras beschadigd kan raken, maar het is echter de vraag of daardoor een dijkdoorbraak zou kunnen ontstaan. Na het beschadigd raken van het gras moet daarvoor eerst de kleilaag eroderen en vervolgens de kruin van de dijk lager worden door erosie. Pas dan is er een dijkdoorbraak. Doordat de kracht van de golven in de golfploopzone maar beperkt is, is het denkbaar dat dit op vele dijken niet gebeurt tijdens zware stormen.

Het al dan niet doorbreken van de dijk als gevolg van een bepaald mechanisme staat centraal in de nieuwe beoordelings- en ontwerpmethodiek op basis van overstromingskansen (WBI-2017).



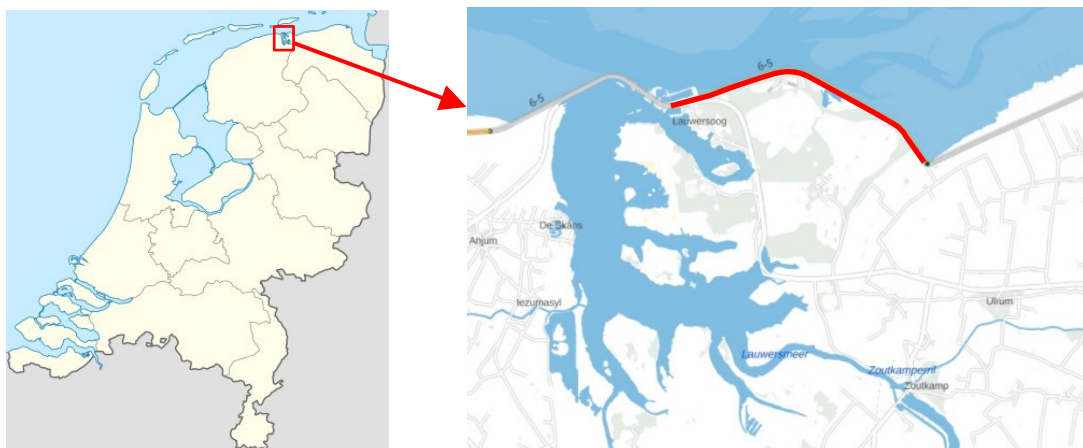
*Figuur 1.1 Dijkbekleding van gras op een kleilaag op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat*

Omdat de kennis over de erosie van een kleibekleding met gras op het boventalud van zeedijken nog tekortschiet om te kunnen inschatten of een dijk ten aanzien van het genoemde bezwijkmechanisme voldoende veilig is, is er een onderzoeksprogramma opgestart om deze kennisleemte in te vullen. Het onderzoeksprogramma is in eerste instantie gericht op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat van het waterschap Noorderzijlvest (zie Figuur 1.2) en de dijk Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân (zie Figuur 1.3).

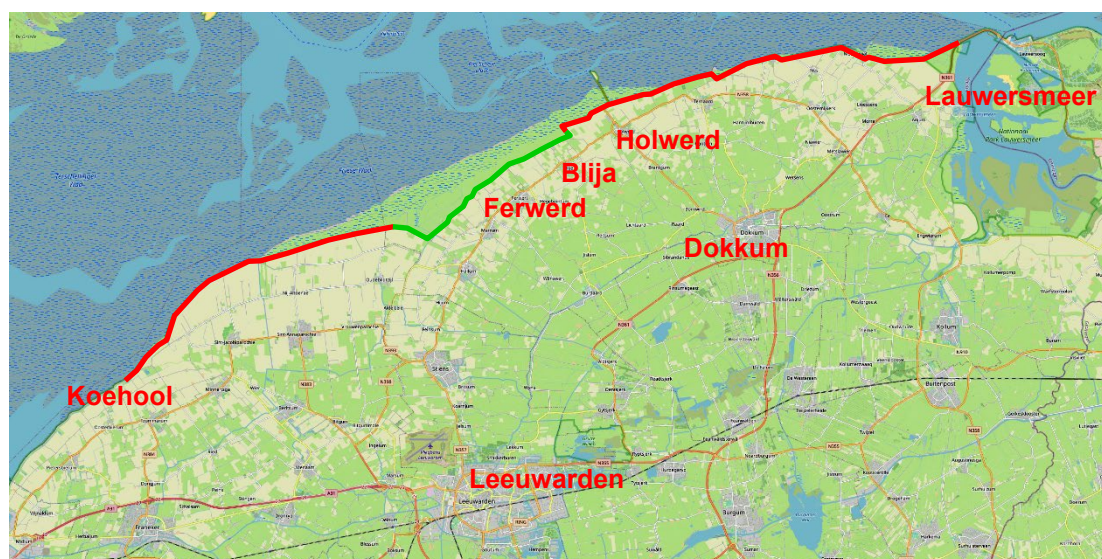
Deze dijken gaan gerenoveerd worden en de vraag is tot welk niveau de harde bekleding moet worden aangelegd op het buitentalud. Boven dit niveau zal gras op een dikke kleilaag worden toegepast. De wens is om op een groot deel van het buitentalud een kleibekleding met gras

toe te passen. Dit reduceert de kosten van de renovatie en geeft bovendien een aantrekkelijker uiterlijk van de dijk.

Dit onderzoeksprogramma is aan Deltares opgedragen door het Waterschap Noorderzijlvest, mede namens het Wetterskip Fryslân. Bij het opzetten van de plannen voor dit onderzoek zijn het Waterschap Zuiderzeeland en het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier ook betrokken geweest, omdat ook zij de resultaten graag gaan gebruiken bij de renovatie van hun dijken. De financiering van het onderzoek is door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) verzorgd.



*Figuur 1.2 De dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizenegat van het Waterschap Noorderzijlvest (rood aangegeven deel van traject 6-5 in rechter figuur)*



*Figuur 1.3 De dijk Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân (rood: met harde bekleding op het oventalud; groen: volledig met kleibekleding en gras)*

In het onderzoek is gebruik gemaakt van de Deltagoot om de sterkte van het gras op het buitentalud van de dijk vast te stellen. De huidige rapportage betreft de analyse van de meetresultaten en uitgevoerde numerieke berekeningen. Het resulteert in formules waarmee de erosie van de kleilaag met gras op het boventalud kan worden berekend.

In Hoofdstuk 2 wordt enerzijds een beschrijving gegeven van het gehele onderzoek met betrekking tot de kennisleemten ten aanzien van het gras op het boventalud van zeedijken en

anderzijds de aanpak gegeven van het Deltagootonderzoek en numerieke berekeningen met OpenFoam dat hierin een belangrijke rol speelt. Hoofdstuk 3 geeft een korte samenvatting van de beschrijving van de modelopstelling in de Deltagoot en meetresultaten. Voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar Klein Breteler (2021). In hoofdstuk 4 is een beschrijving gegeven van het erosieproces. In Hoofdstuk 5 zijn de formules afgeleid op basis van de meetresultaten uit de Deltagoot en de numerieke berekeningen met OpenFoam, waarna in hoofdstuk 6 de onzekerheden omtrent deze formules zijn gekwantificeerd. In hoofdstuk 7 zijn voorbeelden van probabilistische berekeningen met de formules uitgewerkt. De rapportage is afgerond met conclusies in Hoofdstuk 7.



*Figuur 1.4 Deltagoot van Deltares met naast de goot kleiblokken met gras in stalen mallen en een tent met twee kleiblokken met gras die een kunstmatige hete en droge zomer doormaken (zie hoofdstuk 3)*

## 2 Aanpak

### 2.1 Aanpak van gehele onderzoek

In het huidige WBI-2017 wordt door gebrek aan kennis omtrent de erosie van een kleibekleding met gras op het boventalud noodgedwongen aan de veilige kant gerekend, omdat in feite gesteld wordt dat “schade aan de grasbekleding = falen van de dijk”. Dat sluit niet aan op de huidige overstromingskansbenadering. Het doel is om met het voorgestelde onderzoek over te stappen op “falen van de kleibekleding met gras = falen van de dijk”, waarmee we veel dichterbij “falen van de dijk = doorbraak van de dijk als gevolg van erosie van het boventalud” komen, zoals het eigenlijk zou moeten volgens de overstromingskansbenadering.

Er is momenteel een rekenmodel waarmee de erosie van een kleibekleding kan worden berekend, waarin ook de sterkte van de grasbekleding is opgenomen (Kaste en Klein Breteler 2015). Hiermee kunnen probabilistische berekeningen worden uitgevoerd, die resulteren in de faalkans van de kleibekleding met gras. Het rekenmodel is echter alleen toepasbaar voor dijken met een kleibekleding met gras op het gehele boventalud. Het doel van het huidige onderzoeksprogramma is om dit rekenmodel verder uit te breiden voor de situatie met alleen een kleibekleding met gras op het boventalud.

Afhankelijk van de waterstand wordt het gras op het boventalud belast door golfploop en -neerloop of door golfklappen. De belasting door golfklappen geeft veruit de grootste erosie van het boventalud en zal daardoor bepalend zijn voor de hoogte van de overgang. Daarom wordt met name de aandacht gericht op dat type belasting. In het verleden (overbelastingsbenadering van de waterveiligheid) werd er gerekend met een specifieke maatgevende waterstand en golfbelasting en kon de overgang net boven dit niveau gelegd worden, zodat golfklappen niet optreden. Met de introductie van de overstromingskansbenadering in het WBI-2017 moeten alle waterstanden en daarbij optredende golfcondities worden beschouwd in het licht van hun kans van voorkomen. Daardoor is er geen zone meer op het talud waar geen golfklappen komen.



Figuur 2.1 Deltagoot van Deltares (proef K1\_04)

Dit onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Deltagootproeven voor 5 specifiek gekozen situaties (combinatie van geometrie en waterstand) met blokken klei met gras die van een dijk langs de Waddenzee zijn gehaald. Voor één van deze situaties is de proef herhaald met een andere kleikwaliteit, waardoor we op 6 proevenseries in de Deltagoot komen.
2. Numerieke berekeningen met OpenFOAM waarmee het toepassingsgebied van de proefresultaten is verbreed naar andere waterstanden, golfhoogtes, golfsteilheden en dijkgeometrieën.
3. Resultaten opnemen in gebruiksvriendelijke software voor het uitvoeren van probabilistische berekeningen waarmee de benodigde kleilaagdikte en faalkans van de dijkbekleding kan worden berekend.

Voor het onderzoek is de Deltagoot gebruikt om de sterkte van de kleibekleding met gras op het boventalud te kwantificeren (Figuur 2.1). Er zijn proeven uitgevoerd met vijf dwarsprofielen. Hoewel dit een omvangrijk onderzoek was, konden niet alle situaties in de Deltagoot proef-ondervindelijk onderzocht worden. De focus van de Deltagootproeven was de situatie waarbij er een aanzienlijke hydraulische belasting is op de kleibekleding met gras, terwijl de harde bekleding op het ondertalud en de berm een flink deel van de hydraulische belasting opvangen. De verwachting is dat dit de maatgevende situatie is. Beter gezegd: dat dijken zo ontworpen zullen worden dat deze situatie de grootste kansbijdrage geeft ten aanzien van het falen van de dijk (gegeven erosie van het boventalud).

Andere situaties, zoals hogere of lagere waterstanden, andere berm breedte, andere golfhoogtes etc., zijn beschouwd met het numerieke model OpenFoam. In dit numerieke model kan de hydraulische belasting op de dijk berekend worden. Hoewel er verschillen zijn tussen de met OpenFoam berekende golfdruk op een dijk en de werkelijke golfdruk (uit metingen), is het toch de verwachting dat hiermee de invloed van veranderingen in de hydraulische belasting of geometrie van de dijk kunnen worden gekwantificeerd. De golfdruk zal afhankelijk zijn van onder andere de golfhoogte, golfperiode, taludhelling et cetera. De grootte van de golfdruk is afhankelijk van de grootte van deze parameters. Er is in dit onderzoek van uitgegaan dat OpenFoam in een bepaalde range van deze parameters een consequente afwijking heeft ten opzichte van de werkelijkheid. In dat geval zal een bepaalde trend, bijvoorbeeld een toename van de golfdruk met toenemende golfhoogte, door OpenFoam vrij goed berekend worden. Deze aanname is gebaseerd op de ervaringen die gerapporteerd zijn in de internationale literatuur (zie paragraaf 5.2.2).

De druk die golven uitoefenen tijdens een golfklap op de klei wordt gezien als de primaire belasting die erosie van de klei veroorzaakt. De stroming langs het kleioppervlak, bijvoorbeeld tijdens golfoploop en golfneerloop, geeft naar verwachting minder erosie dan de piekdrukken tijdens golfklappen. Dit is duidelijk te zien tijdens de golfexperimenten met een kleibekleding: juist daar waar de golfklappen neerkomen, is de meeste erosie te zien. In de golfoploopzone is er vrijwel geen erosie. Mede op grond van deze constatering heeft Kruse zijn hypothese geformuleerd dat de erosie voornamelijk gerelateerd is aan de piekdrukken tijdens golfklappen op het kleitalud. Deze hypothese is door Kruse verder uitgewerkt in het rapport van Klein Breteler, Capel, Kruse, Mourik en Kaste (2012).

Deze methode bleek ook goed te werken voor taluds zonder harde bekleding op het ondertalud (kleibekleding van teen tot kruin) (Mourik 2020). Mourik heeft destijds het numerieke model ComFlow gebruikt, dat toen state-of-the-art was.

Deze piekdrukken tegen de klei konden niet gemeten worden in de Deltagoot, omdat het erosie-oppervlak continu wijzigt en meetinstrumenten de erosie beïnvloeden.

De werkwijze met het numerieke model is als volgt:

- Stap 1 (paragraaf 5.2.3): met 'OpenFOAM' worden de proeven uit de Deltagoot nagerekend, zodat de piekdruk op het kleioppervlak in elke golf beschikbaar komt. Een karakteristieke waarde van de zo berekende piekdrukken, bijvoorbeeld de significante waarde, wordt gerelateerd aan de in de Deltagoot gemeten erosiesnelheid. Dit levert voor elk gemeten erosieprofiel tijdens de proeven de relatie tussen de berekende piekdruk en de gemeten erosiesnelheid. Deze relatie wordt in het vervolg gebruikt.
- Stap 2 (paragraaf 5.2.4 en 5.2.5): met 'OpenFOAM' worden de piekdrukken uitgerekend voor uiteenlopende situaties: drie verschillende niveaus van de berm, drie verschillende niveaus van de overgang, 5 verschillende golfhoogtes en drie verschillende golfsteilheden.
- Stap 3: met de relatie tussen de berekende piekdruk en de gemeten erosiesnelheid van stap 1 worden de resultaten van stap 2 omgerekend naar erosiesnelheden. Vervolgens worden de resultaten gebruikt voor het opstellen van formules waarmee de erosiesnelheid voor een breed scala aan situaties kan worden berekend.

De aanpak bestaat derhalve uit de inzet van de Deltagoot voor het meten van de klei-erosie bij enkele specifieke situaties en het numerieke model OpenFOAM voor het verbreden van de toepasbaarheid van de Deltagootresultaten. De resulterende formules gaan vervolgens gebruikt worden in een rekenmodel waarmee probabilistische berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor het bepalen van de hoogte van de overgang van de harde bekleding naar het gras op het boventalud en de benodigde kleilaagdikte op het boventalud.



*Figuur 2.2 Kleiblokken met gras steken op de dijk bij Holwerd*

Het eerste deel van het onderzoeksprogramma bestaat uit 6 proevenseries met proeven in de Deltagoot:

- 1 Serie K1: Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met klei en gras van de Lauwersmeerdijk (schrle klei) op het boventalud,
- 2 Serie K2: Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met klei en gras van Holwerd (schrle klei) op het boventalud,



- 3 Serie K3: Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met verlaagde berm en met klei en gras van Holwerd (schrane klei) op het boventalud
- 4 Serie K4: Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met klei en gras van Blija (stevige klei) op het boventalud
- 5 Serie K5: Dijk met berm met taludhelling van boventalud van 1:5 met klei van Holwerd op het boventalud, waarvan de eerste 4 m kunstmatig een zeer warme en droge zomer heeft doorgemaakt.
- 6 Serie K6: Dijk zonder berm met taludhelling van boventalud en ondertalud van 1:5 met klei van Holwerd op het boventalud, waarvan de eerste 4 m kunstmatig een zeer warme en droge zomer heeft doorgemaakt.

De huidige rapportage betreft de analyse van de experimentele resultaten (Deltagoot) en numerieke resultaten (OpenFoam). Voor een uitvoerige rapportage van de meetresultaten van het onderzoek in de Deltagoot wordt verwezen naar Klein Breteler (2021).

## 2.2 Opzet van dit rapport

In dit rapport is stap voor stap de opgedane kennis over de fysische processen beschreven en vervolgens zijn op basis van de proefresultaten en resultaten van numerieke berekeningen formules afgeleid. Uiteindelijk kunnen deze formules toegepast worden in probabilistische berekeningen waarmee de benodigde kleilaagdikte als functie van het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding kunnen worden berekend.

Bij het ontwikkelen van de rekenmethodiek zijn een aantal stappen te onderscheiden:

1. Fenomenologische beschrijving (relevante fysische processen)
2. Modelbeschrijving (schematisering in formules)
3. Gegevensbasis (resultaten Deltagootproeven, numerieke berekeningen met OpenFOAM en de gegevens uit de literatuur)
4. Modelfit (formules kalibreren op de gegevens)
5. Toepassingsgebied van het rekenmodel afbakenen

De fenomenologische beschrijving van de fysische processen is gegeven in hoofdstuk 4, volgend op een beschrijving van de Deltagootproeven die met name bijgedragen hebben aan het inzicht in deze fysische processen.

De modelbeschrijving en modelfit zijn nauw verweven met de gegevensbasis. De gegevensbasis bestaat uit de Deltagootproeven, beschreven in hoofdstuk 3, en de numerieke berekeningen met OpenFOAM (Paragraaf 5.2). De gegevensbasis is verder aangevuld met gegevens uit de literatuur, namelijk de formule voor de erosie van het gras (eerste fase van het erosieproces).

De modelbeschrijving en modelfit van de eerste fase van het erosieproces (erosie van het gras) zijn gegeven in paragraaf 5.1. De modelbeschrijving van de tweede fase van het erosieproces (klei-erosie) is gegeven in paragraaf 5.2.3 en 5.2.4, terwijl de modelfit gegeven is in paragraaf 5.2.6.

De nadere afbakening van het toepassingsgebied samen met de inventarisatie van de onzekerheden is gegeven in hoofdstuk 6. Een voorbeeld van probabilistische berekeningen met de formules en hun onzekerheden is gegeven in hoofdstuk 7.

In hoofdstuk 8 zijn de conclusies en aanbevelingen gegeven.

## 3 Deltagootproeven

### 3.1 Klei met gras voor de Deltagootproeven

De kleilaag van een dijk raakt in de loop van enkele jaren na de aanleg gestructureerd. Dat betekent dat er krimpscheuren ontstaan door weersinvloeden (zomer-winter), die in het natte seizoen (winter) weliswaar weer dichtgaan, maar toch zwakke plekken blijven door chemische en biologische activiteit in de scheuren. De erosiesnelheid van de klei is afhankelijk van deze gestructureerdheid en moet in de erosieproef dus goed zijn weergegeven, want het zorgt voor een grotere erosiesnelheid (kleinere erosiebestendigheid). Daarom zijn blokken klei in ongeroerde toestand van dijken langs de Waddenzee gehaald om de dijk in de Deltagoot mee op te bouwen. Zo is tevens de volgroeide graslaag in ongeschonden toestand in de Deltagoot ingebouwd.

De blokken klei met gras zijn van de volgende dijken langs de Waddenzee gehaald (zie Figuur 1.2 en Figuur 1.3):

- Lauwersmeerdijk (voor proevenserie K1)
- Holwerd (voor proevenserie K2, K3, K5 en K6)
- Blija (voor proevenserie K4)



Figuur 3.1 Stalen mal in taludoppervlak drukken en vervolgens rondom vrijgaven



Figuur 3.2 Staalplaat eronder drukken en vervolgens in de vrachtwagen laden

De klei van Blija had de meeste structuurvorming. Deze klei kwam vrij brokkelig over tijdens het inbouwen van de kleiblokken.

Voor het steken van de klei zijn stalen malen van Deltares gebruikt waarmee blokken klei van 2x2x0,85 m<sup>3</sup> kunnen worden gestoken. Eerst zijn de zijwanden van de stalen mal als een doos zonder bodem in het taludoppervlak gedrukt, zie Figuur 3.1. Ondanks dat de week voor het

werk de dijken tweemaal daags besproeid waren met water, was de klei nog vrij droog en hard, behalve bij Blija. Daardoor was het nodig om met twee hydraulische kranen en een trilblok de mal in de klei te drukken. Er is visueel gecontroleerd of dit invloed had op de structuur van de klei, maar er is vastgesteld dat hier geen sprake van was. Alleen bij Blija was de klei zacht genoeg om met één kraan te werken.

Vervolgens is de klei rondom weggegraven en is de bodemplaat eronder geschoven, zie Figuur 3.2. Dit leverde het gewenste blok klei met gras dat naar de Deltagoot is vervoerd.

Enkele klei-eigenschappen zijn gegeven in Tabel 3-1.

	% lutum (< 2 $\mu\text{m}$ )	% zand (> 63 $\mu\text{m}$ )	Vloei-grens (%)	Uitrol-grens (%)	Plasticiteits-index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Lauwers-meerdijk	24,4	39,6	39,7	22,4	17,4	1,0	4,8
Holwerd	24,8	30,5	35,4	19,4	16,1	0,9	8,2
Blija	44,3	13,8	54,8	23,6	31,2	2,9	7,8

Tabel 3-1 klei-eigenschappen

Meer informatie over de klei en het gras is te vinden in de meetrapportage (Klein Breteler, 2021).

## 3.2 Overzicht modelopstellingen

Er zijn uiteindelijk zes modelopstellingen beproefd die lijken op het ontwerp van de renovatie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat en de huidige dijk Koehool-Lauwersmeer. Een overzicht van enkele belangrijke karakteristieken die verschillen van opstelling tot opstelling is gegeven in Tabel 3-2.

opstelling	profiel	Klei en gras	Helling boventalud	Bermhoogte (voorrand) t.o.v. overgang (m)	Bermbreedte (m)
K1	LV	Lauwersmeerdijk	1:4	-0,53	3,00
K2	KLM	Holwerd	1:5	-0,30	3,62
K3	KLM	Holwerd	1:5	-0,43	3,00
K4	LV	Blija	1:4	-0,53	3,00
K5	KLM	Holwerd*	1:5	-0,43	3,00
K6	KLM	Holwerd	1:5	Geen (talud 1:5)	Geen

Tabel 3-2 Overzicht van enkele belangrijke karakteristieken van de modelopstellingen in de Deltagoot (LV = Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat; KLM = Koehool-Lauwersmeer; \* = met gras dat een zeer hete en droge zomer heeft doorgemaakt)

In onderstaande paragrafen zijn in meer detail de modelopstellingen beschreven. Voor alle details wordt verwezen naar het meetrapport van Klein Breteler (2021).

Alle proeven zijn uitgevoerd met zoet water, terwijl het toepassingsgebied de Waddenzee is met zout water. De verwachting is dat dit weinig effect heeft op het erosieproces. De storm waar dit onderzoek op gericht is, duurt betrekkelijk kort (de top van de storm duurt orde 5 à 20 uur), waardoor het zoute water vrijwel niet in de klei dringt. Het erosieproces is met name een fysisch proces waarin golfkrachten brokken klei uit de kleibekleding rukken. Dit proces wordt

nauwelijks beïnvloed door het soort water, behalve dat de golfklappen bij zoetwater in de Deltagoot een iets hogere piekdruk hebben en iets korter duren dan bij zoutwater. Dat is een gevolg van het feit dat in het zoute water meer kleine luchtbelletjes worden opgenomen in het proces van brekende golven op het talud. Verder zou er een marginaal effect kunnen zijn van de dichtheid van het water, dat van zout water ca 2% hoger is.

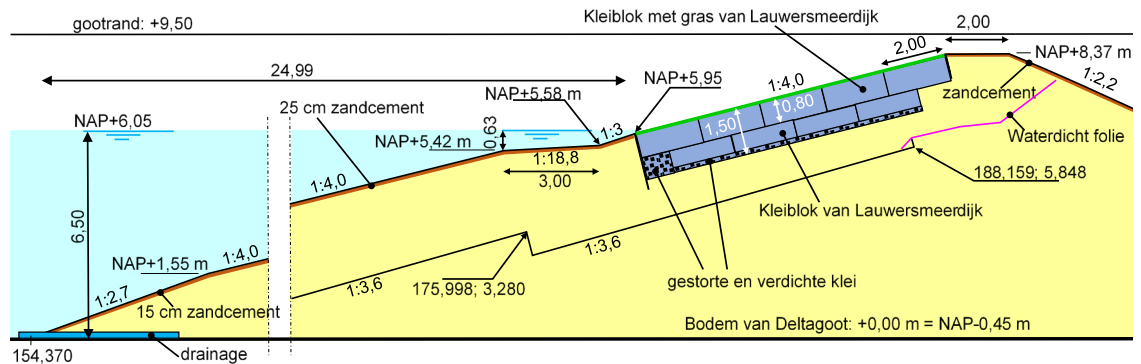
Ingeschat wordt dat de invloed hiervan op het erosieproces verwaarloosbaar is.

### 3.3 Proevenserie K1

#### 3.3.1 Modelopstelling K1

De eerste modelopstelling is een representatief profiel van het ontwerp van de renovatie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat.

Het dwarsprofiel dat in de Deltagoot voor de eerste modelopstelling is ingebouwd, is weergegeven in Figuur 3.3. De harde bekleding op het ondertalud, de berm en het onderste stukje van het boventalud zijn niet van asfalt, maar van zandcement gemaakt omdat dit eenvoudiger is aan te brengen in de Deltagoot. Deze aanpassing heeft geen invloed op de erosie van het gras en de klei.

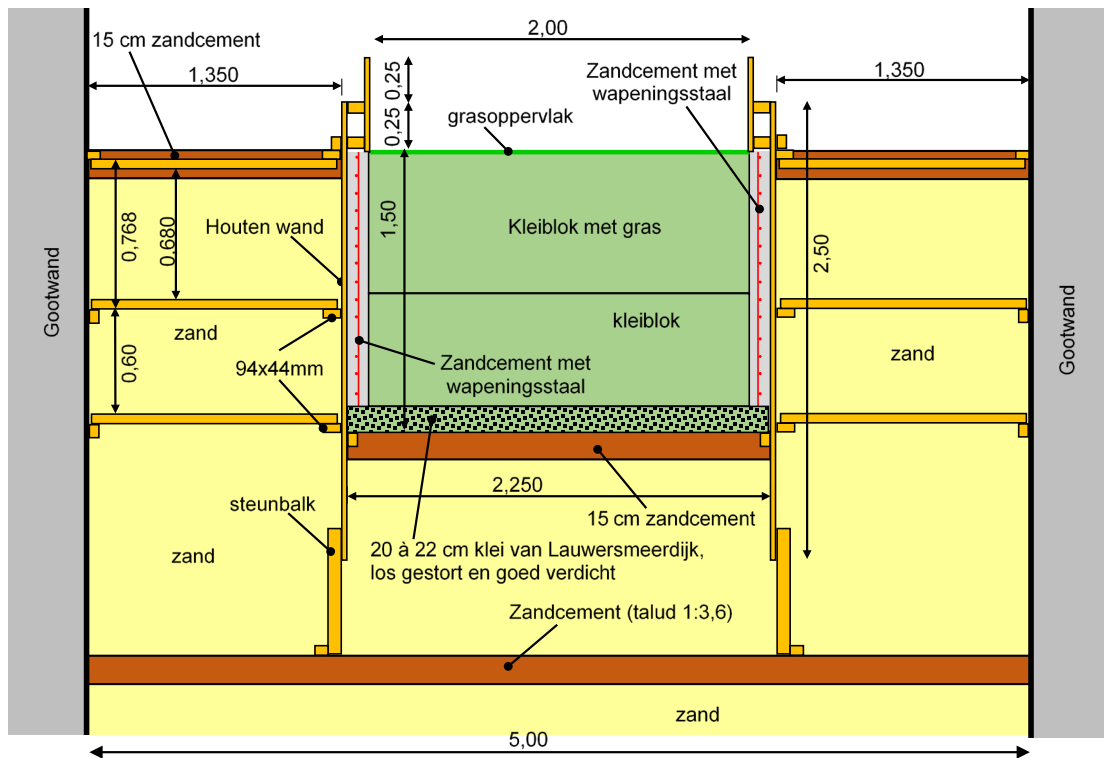


Figuur 3.3 Verticale langsdoorsnede van de eerste modelopstelling (K1) in de Deltagoot (zie ook Figuur 3.5)

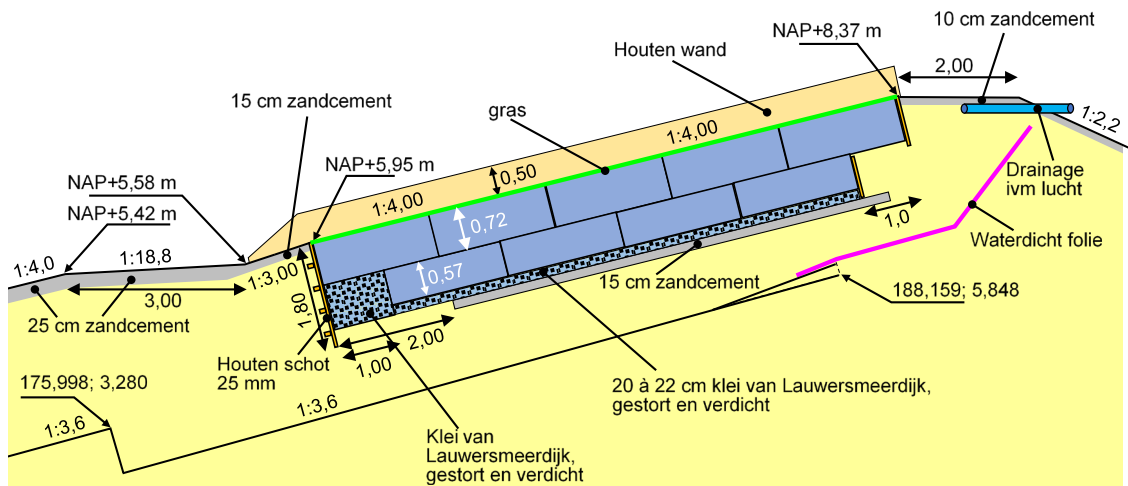
De bodem van de Deltagoot ligt bij modelopstelling K1 op NAP-0,45 m. Deze is zo gekozen opdat de proeven kunnen worden uitgevoerd met de optimale waterstand voor het opwekken van zo groot mogelijke golven.

Een detail van de doorsnede is gegeven in Figuur 3.5. De verticale dwarsdoorsnede is gegeven in Figuur 3.4.

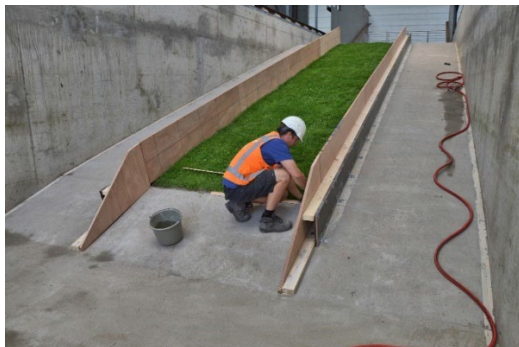
De blokken klei met gras (zie paragraaf 3.1) hebben een oppervlak van 2x2 m<sup>2</sup> en daarom is voor de breedte van het model 2 m gekozen. Links en rechts van dit grastalud zijn betonnen dummytaluds aangebracht, zoals te zien is in Figuur 3.6. Tussen het grastalud en de betonnen taluds is een verticaal schot aangebracht om te zorgen dat de waterbeweging op het beton de waterbeweging boven het gras zo min mogelijk beïnvloedt en vice versa. Dit is ook te zien in de tekening van de dwarsdoorsnede, zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Dwarsdoorsnede van de modelopstelling



Figuur 3.5 Verticale langsdoorsnede van de modelopstelling in de Deltagoot ter plaatse van de berm en het boventalud



Figuur 3.6 Boventalud van de (toekomstige) Lauwersmeerdijk in de Deltagoot

Onder een groot deel van de kleilaag is een vloer van 15 cm zandcement aangebracht. Dit maakte het makkelijker om na afloop van de proevenserie de klei te vervangen voor de volgende proevenserie. Deze laag zandcement is niet aangebracht onder de eerste 2 m van het boventalud, zodat hier de klei kon afwateren richting het zand.

### 3.3.2 Proefresultaten K1

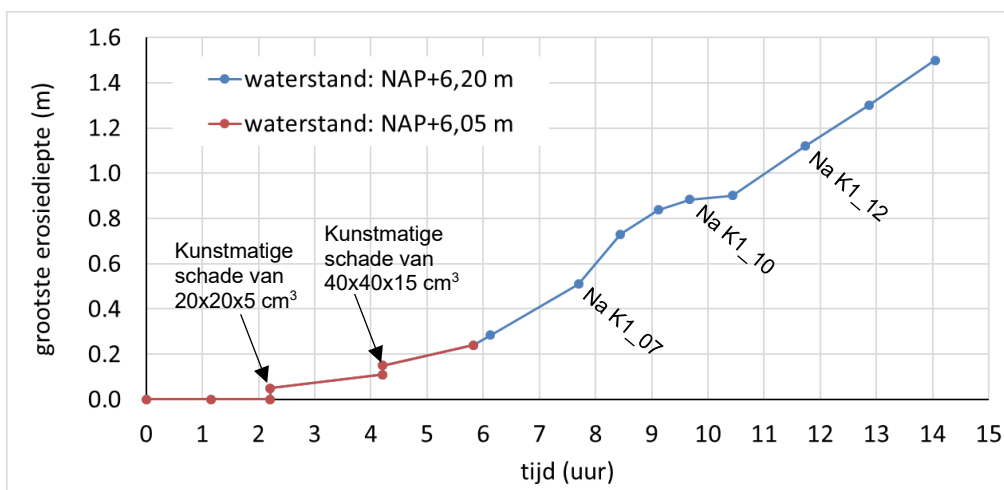
De totale belastingduur van het gras is opgeknipt in delen (proeven met gelijke golfcondities), zodat na elk deel de waterstand kon worden verlaagd en het erosieprofiel kon worden ingemeten met de Faro laserscanner. Hierdoor is een gedetailleerd beeld verkregen van de ontwikkeling van de erosie in de tijd.

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosievolume (m <sup>3</sup> /m)
K1_01	6,05	1,964	5,493	0,042	0,25	0,25	0,00	0,00
K1_02	6,05	2,037	5,553	0,042	0,91	1,16	0,00	0,00
K1_03	6,05	2,025	5,547	0,042	1,05	2,21	0,00	0,00
Kunstmatig gat van ca 20x20x5 cm gemaakt								
K1_04	6,05	1,996	5,501	0,042	2,00	4,21	0,11	0,03
Kunstmatig gat vergroot naar ca 40x40x15 cm								
K1_05	6,05	2,012	5,505	0,043	1,62	5,83	0,24	0,13
K1_06&07	6,20	1,947	5,522	0,041	1,87	7,70	0,51	0,58
K1_08	6,20	2,003	5,557	0,042	0,75	8,44	0,73	1,23
K1_09	6,20	2,030	5,571	0,042	0,67	9,11	0,84	2,39
K1_10	6,20	2,016	5,549	0,042	0,56	9,68	0,88	3,26
K1_11	6,20	1,996	5,553	0,041	0,76	10,44	0,90	3,99
K1_12	6,20	1,941	5,528	0,041	1,29	11,73	1,12	5,21
K1_13	6,20	1,967	5,529	0,041	1,15	12,87	1,30	6,99
K1_14	6,20	1,947	5,534	0,041	1,17	14,04	1,50	8,23

Tabel 3-3 Proefresultaten serie K1 (inkomende golfcondities)

De gemeten erosie van elk van de proeven uit de proevenserie K1 is gegeven in Tabel 3-3. De erosie is gegeven als de maximale erosiediepte (haaks op het talud gemeten) en het erosievolume in de gekozen raai, die ook in de verdere analyse gebruikt is als het meest representatieve erosieprofiel ( $0,2 \leq y \leq 0,6$  m, met  $y$  = afstand tot linker zijkant van het grastalud: meetcabinezijde). Het erosievolume is het oppervlak van het erosieprofiel, dat uitgedrukt wordt in een erosievolume per meter dijk. Er is geprobeerd een zo representatief mogelijke raai voor het hele erosie-oppervlak te kiezen. Dat is niet altijd het punt waar de diepste erosie optrad, omdat dit soms door modeffecten werd gedomineerd. Geconstateerde modeffecten zijn:

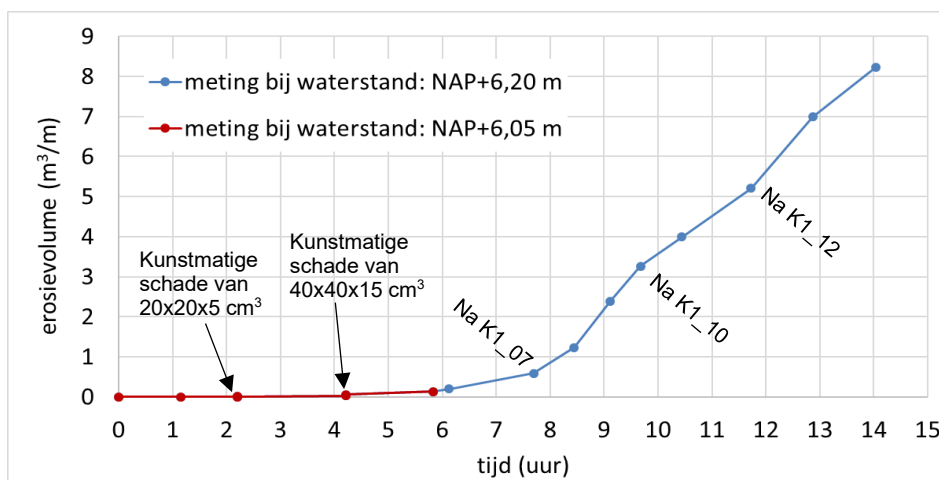
- erosie langs de zijkant van de kleibekleding, waar het aansluit op het houten schot langs de modelsectie
- erosie bij de aansluiting tussen twee opeenvolgende kleiblokken, vooral als deze niet over het hele oppervlak perfect tegen elkaar aan blijken te zijn gedrukt.



Figuur 3.7 Grootste diepte in de erosiekuil tijdens proevenserie K1 (haaks op het talud) als functie van de belastingduur

Vóór proef K1\_04 is er een kunstmatige schade aangebracht van 20x20 cm<sup>2</sup> en 5 cm diep. Deze kunstmatige schade is vóór proef K1\_05 vergroot naar 40x40 cm<sup>2</sup> en 15 cm diep. Omdat op een dijk altijd wel ergens het gras wat beschadigd is, maar deze beschadiging zelden zo groot is als aangebracht voor K1\_05, wordt het begin van proef K1\_04 aangehouden als het begin van het erosieproces. In de verdere analyse van de resultaten wordt dat gezien als het startmoment  $t = 0$ .

De gemeten erosiediepte en erosievolume zijn als functie van de belastingduur gegeven in respectievelijk Figuur 3.7 en Figuur 3.8.



Figuur 3.8 Erosievolume per meter dijk tijdens proevenserie K1, bepaald in het maatgevende dwarsprofiel, als functie van de belastingduur

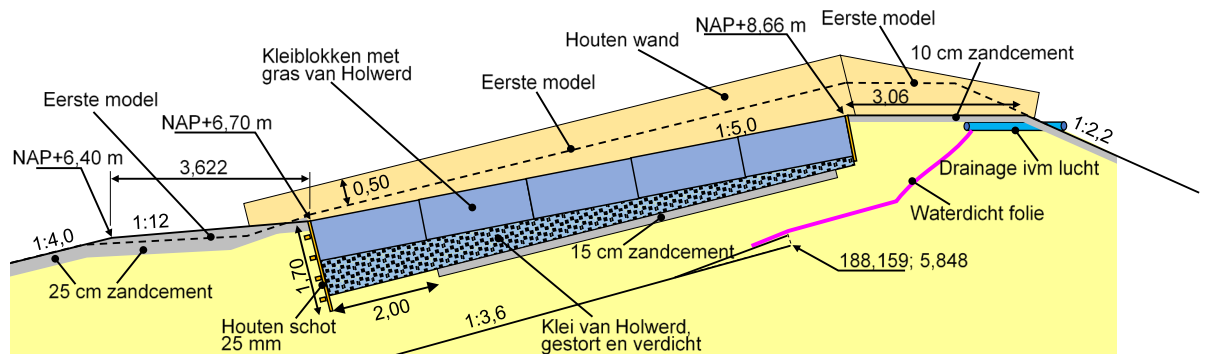
De gemeten erosie van alle Deltagootproeven is bij elkaar in één figuur gezet in bijlage E.

## 3.4 Proevenserie K2 en K3

### 3.4.1 Modelopstelling K2 en K3

De tweede modelopstelling (K2) is opgebouwd met een iets hogere en bredere berm ten opzichte van de eerste modelopstelling en bovendien is het talud van de kleibekleding met gras flauwer, namelijk 1:5 (boventalud boven de overgang).

Daardoor was de verwachting dat de erosiesnelheid een stuk kleiner zou zijn en is daarom besloten om een dunnere kleilaag aan te brengen, namelijk van slechts één laag kleiblokken met gras (circa 80 cm), in plaats van de twee lagen. Onder de laag kleiblokken met gras is geroerde klei van Holwerd aangebracht, zoals te zien is in Figuur 3.9.

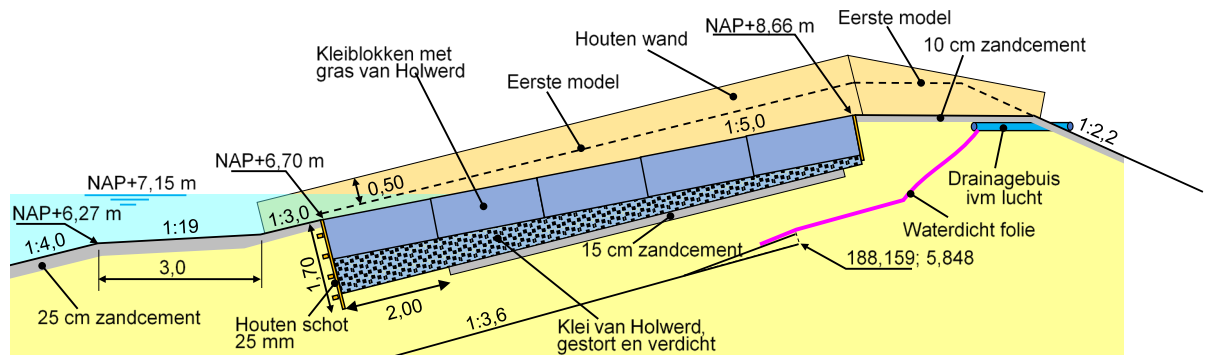


Figuur 3.9 Modelopstelling voor de tweede serie proeven (K2)

Ondanks dat er kunstmatige schade is aangebracht aan de grasbekleding, verliep de erosie tijdens de proeven bijzonder traag. Daarom is na ruim 13 uur golven besloten om de modelopstelling wat aan te passen. De berm is weer verlaagd naar het niveau van modelopstelling K1, zoals te zien is in Figuur 3.10.

Modelopstelling K3 heeft dus dezelfde kleiblokken met gras op het boventalud als modelopstelling K2. Proevenserie K3 is uitgevoerd zonder eerst de tijdens proevenserie K2 ontstane schade aan de kleibekleding met gras te herstellen.

De aanvangssituatie van de kleibekleding met gras vóór proef K3\_01 is te zien in Figuur 3.11.



Figuur 3.10 Modelopstelling voor derde serie proeven (K3)



Figuur 3.11 Erosie van de kleibekleding met gras voor aanvang van proef K3-01



### 3.4.2 Proefresultaten K2 en K3

De gemeten erosie van elk van de proeven uit de proevenserie K2 is te zien in Tabel 3-4 en die voor proevenserie K3 in Tabel 3-5. In deze tabellen zijn waarden van de erosiediepte en erosievolume gegeven ten opzichte van het begin van proevenserie K2 (ten opzichte van proef K2\_01).

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m <sup>3</sup> /m)
K2_01	6,80	1,96	5,49	0,042	0,17	0,17	0,00	0,00
Kunstmatig gat van ca 20x20x5 cm gemaakt								
K2_02	6,80	2,00	5,49	0,042	2,00	2,17	0,09	0,02
Kunstmatig gat vergroot naar ca 40x40x15 cm								
K2_03	6,80	2,00	5,51	0,042	2,00	4,17	0,22	0,06
K2_04	6,95	1,92	5,49	0,041	2,00	6,17	0,22	0,07
K2_05	6,95	1,96	5,49	0,042	2,00	8,17	0,22	0,11
K2_06	6,95	2,02	5,53	0,042	1,08	9,26	0,24	0,15
K2_07	7,05	1,92	5,57	0,039	0,31	11,57	0,23	0,19
Kunstmatige klif gemaakt								
K2_08	7,05	1,93	5,50	0,041	2,00	13,57	0,29	0,30

Tabel 3-4 Proefresultaten serie K2 (inkomende golfcondities)

In Tabel 3-4 valt op dat de erosiediepte tijdens proevenserie K2 steeds wel toeneemt na het aanbrengen van kunstmatige schade, namelijk na 0,17 uur (na proef K2\_01), 2,17 uur (na proef K2\_02), en 11,57 uur (na proef K2\_07), maar nauwelijks toeneemt als er vooraf geen kunstmatige schade is aangebracht. Tijdens proef K2\_07 is de maximale erosie zelfs iets afgenomen, omdat er wat losse klei in de diepste gat is gespoeld.

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte* (m)	Erosie-volume* (m <sup>3</sup> /m)
K3_01	7,05	1,93	5,47	0,041	2,05	2,05	0,29	0,30
K3_02	7,15	1,90	5,55	0,040	1,60	3,65	0,30	0,43
Erosiegat vergroot: terras doorgetrokken zodat het gat tot ~1.05m van overgang doorloopt en steile klif gemaakt met maximale diepte van ca 34cm								
K3_03	7,15	1,95	5,52	0,041	3,11	6,76	0,39	0,52
K3_04	7,15	1,94	5,51	0,041	3,83	10,59	0,43	0,62
K3_05	7,15	1,94	5,50	0,041	2,00	12,59	0,44	0,77
K3_06	7,15	1,94	5,50	0,041	2,00	14,59	0,50	0,99
K3_07	7,15	1,95	5,51	0,041	2,00	16,59	0,65	1,40
K3_08	7,15	1,94	5,50	0,041	2,00	18,59	0,82	2,08
K3_09	7,15	1,95	5,52	0,041	1,46	20,05	0,86	2,60
K3_10	7,15	1,94	5,50	0,041	2,00	22,05	0,91	3,63

Tabel 3-5 Proefresultaten serie K3 (inkomende golfcondities) (\* = ten opzichte van proef K2\_01)

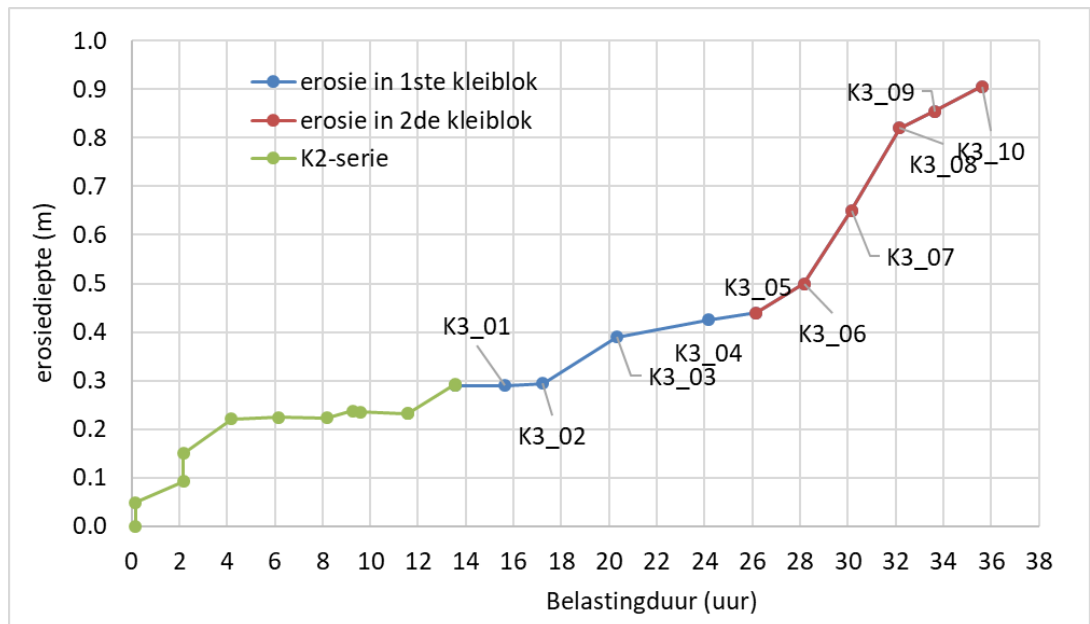
In Figuur 3.13 en in Figuur 3.14 zijn respectievelijk het verloop van de erosiediepte en erosievolume gegeven van zowel de K2-serie als de K3-serie.

In Figuur 3.14 is te zien dat er een aanzienlijke versnelling van het erosievolume optreedt vanaf proef K3\_06. Dit is een gevolg van de ontstane klif in het erosieprofiel. Zodra er een klif aanwezig is, ontstaat er erosie aan de voet van de klif die de graslaag kan ondermijnen, zie Figuur 3.12. Hoe hoger de klif hoe zwaarder de golfklappen er tegen klappen.

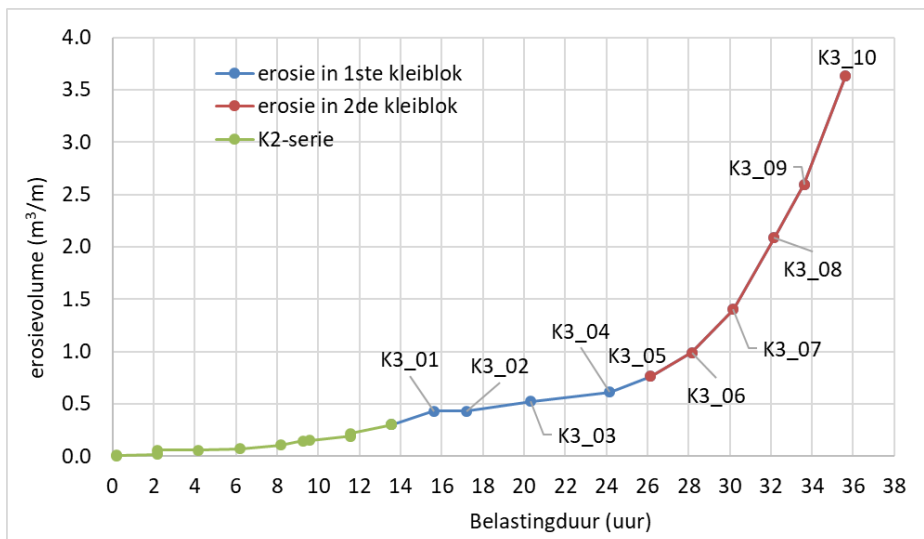
Tot proef K3\_06 speelt met name de eerste fase van het erosieproces, waarbij de golven door de graslaag proberen heen te komen (zie Figuur 4.3). Na proef K3\_06 is er een klif en is de erosie in de tweede fase aangekomen. Dit is dus na totaal 28 uur golven in serie K2 en K3 tezamen.



Figuur 3.12 Vanaf proef K3\_06 is er een duidelijke klif in het tweede kleiblok.



Figuur 3.13 Ontwikkeling van de erosiediepte als functie van de belastingduur van proevenserie K2 en K3.



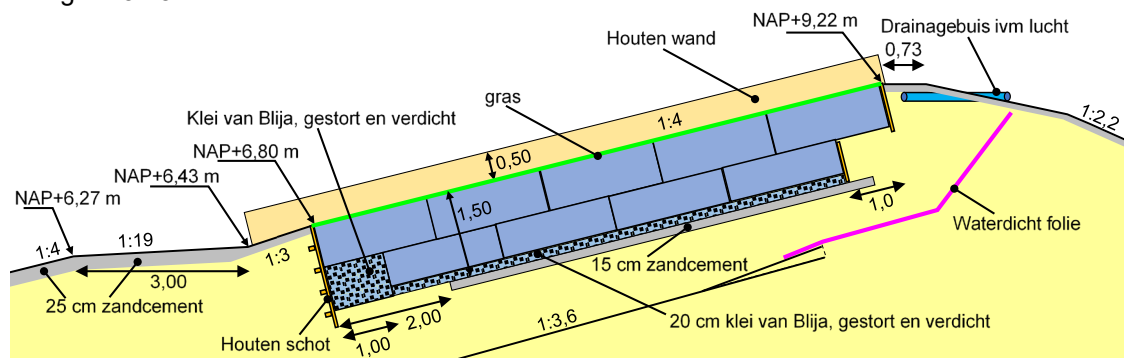
Figuur 3.14 Ontwikkeling van het erosievolume als functie van de belastingduur van proevenserie K2 en K3.

De gemeten erosie van alle Deltagootproeven is bij elkaar in één figuur gezet in bijlage E.

## 3.5 Proevenserie K4

### 3.5.1 Modelopstelling K4

De vierde proevenserie is uitgevoerd met klei en gras van Blija op een talud van 1:4. De geometrie van de dijk was hetzelfde als van proevenserie K1. De modelopstelling is getekend in Figuur 3.15.



Figuur 3.15 Modelopstelling voor proevenserie K4

Tijdens het inbouwen van deze klei was opgevallen dat het veel brokkeliger is dan de klei van de Lauwersmeerdijk en Holwerd. Deze klei heeft een sterke structurering.

Door de wijze van inbouwen van de klei is het denkbaar dat de klei langs de wanden in de modelopstelling wat zwakker is geworden dan in het midden van het model. Dit speelde met name bij de klei van Blija, omdat deze heel brokkelig was van structuur. De zijkant van de kleiblokken hebben even zonder steun gestaan, waarna de klei gesteund werd door een houten plaat die orde driekwart van het oppervlak steunt. Daarna is de ruimte naast elk kleiblok gevuld met zandcement en is de houten plaat verwijderd toen het zandcement nog nat was. Tenslotte is met een trilnaald gezorgd dat het zandcement de ruimte volledig opvult.

Door het ontbreken van steun aan de zijkant, is het denkbaar dat de kleibrokken in de kleilaag onderling wat losser zijn komen te staan in een zone langs de zijkant van het model.

### 3.5.2 Proefresultaten K4

De gemeten erosie tijdens proevenserie K4 is te vinden in Tabel 3-6.

Direct na proef K4\_01 was er al enige erosie ontstaan bij de overgang (zie Figuur 3.16) en daarom is er deze keer geen kunstmatige schade aangebracht. Ook was het gras al vrij sterk aangetast geraakt in vergelijking tot proevenseries K1 en K2 met gras van de Lauwersmeerdijk en Holwerd.



Figuur 3.16 Erosie bij de overgang na proef K4\_01

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	s <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m <sup>3</sup> /m)
K4_01	7,05	1,92	5,55	0,040	0,35	0,35	0,00	0,00
K4_02	6,90	2,10	5,52	0,044	0,52	0,87	0,07	0,05
K4_03	6,50	2,04	5,55	0,042	0,84	1,71	0,09	0,08
K4_04	6,50	2,04	5,53	0,043	0,96	2,67	0,09	0,09
K4_05	6,50	2,01	5,50	0,043	1,56	4,23	0,10	0,11
K4_06	6,75	2,03	5,52	0,043	1,99	6,22	0,28	0,23
K4_07	6,75	2,06	5,53	0,043	2,00	8,22	0,31	0,39
K4_08	6,90	2,04	5,55	0,043	1,17	9,38	0,38	0,50
K4_09	6,75	2,06	5,52	0,043	1,00	10,38	0,47	0,67
K4_10	6,30	2,03	5,55	0,042	0,86	11,24	0,50	0,88
K4_11	6,30	2,01	5,53	0,042	1,10	12,34	0,60	1,07
K4_12	6,75	1,67	5,03	0,042	0,50	12,84	0,59	1,69
K4_13	6,75	2,05	5,54	0,043	1,01	13,85	0,91	2,60
K4_14	6,75	2,06	5,53	0,043	1,00	14,85	1,03	3,41
K4_15	6,75	2,06	5,53	0,043	2,00	16,85	1,12	5,17
K4_16	6,75	2,01	5,50	0,042	2,00	18,85	1,24	6,10
K4_17	6,75	2,08	5,51	0,044	1,70	20,55	1,45	8,25

Tabel 3-6 Proefresultaten serie K4 (inkomende golfcondities)

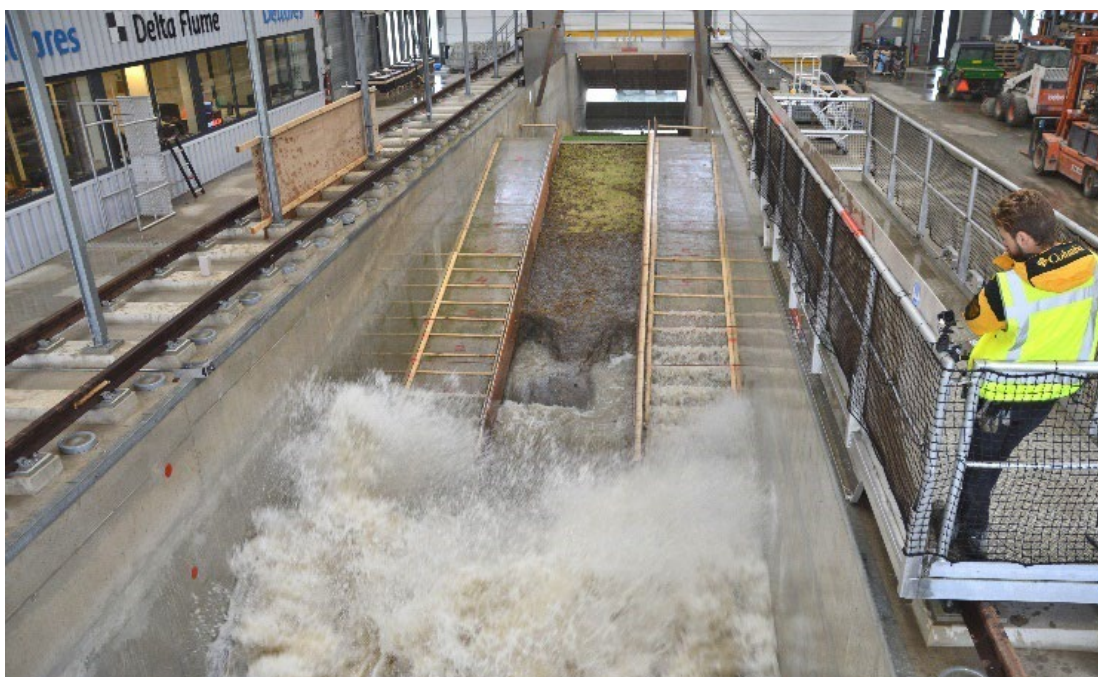
Tijdens proef K4\_06 was er een lokaal erosiegat ontstaan tussen het eerste en tweede kleiblok. Dit was enerzijds omdat de kleiblokken hier kennelijk niet voldoende hard tegen elkaar aangedrukt waren en er een spleet tussen de kleiblokken was, maar anderzijds ook omdat de

klei aan de zijkanten van de kleiblokken bestaat uit vrij losse brokken vanwege de wijze waarop de kleiblokken zijn aangebracht, waarbij de klei enige tijd vrij heeft gestaan zonder steun van opzij. Dit modeffect is vervolgens gerepareerd met klei tot ca 15 cm onder het grasoppervlak (na reparatie was nog een kuil aanwezig van 15 cm diepte).



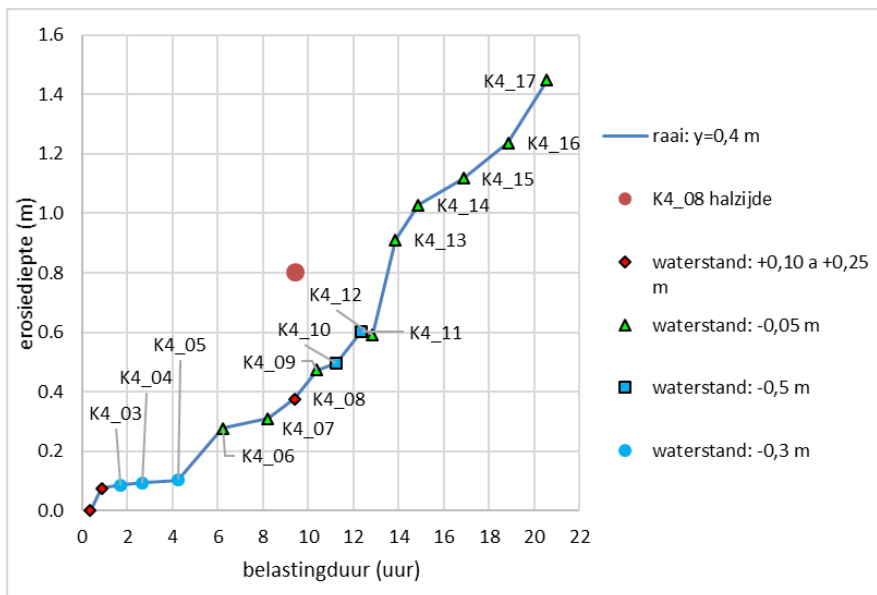
*Figuur 3.17 Lokaal erosiegat na proef K2\_06 ter plaatse van de aansluiting van het eerste en tweede kleiblok.*

Tijdens de proeven was de consequentie hiervan duidelijk te zien. De erosie ging langs de zijkanten van het model aanzienlijk sneller dan in het midden, zie Figuur 3.18. Daarom zijn de resultaten van de metingen in bovenstaande figuren en tabellen gepresenteerd uit een raai in de buurt van de zijkant ( $y = 0,4$  m). Zo wordt een relatief ongunstig resultaat beschouwd (aan de veilige kant).

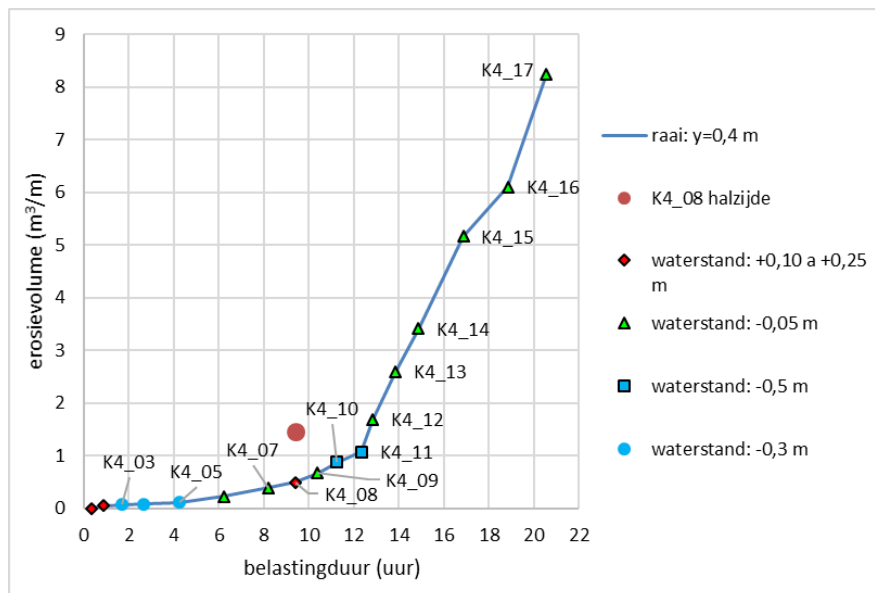


*Figuur 3.18 Erosie gaat het snelst langs de zijkanten van het model (foto's genomen tijdens proef K4\_10)*

Tijdens K4\_08 was er een groot gat ontstaan aan de rechterzijde van het model (halzijde,  $y = 1,6$  tot  $2,0$  m) ter plaatse van de verzwakte klei aan de rand van het model. De erosiediepte was in raai op  $y = 1,8$  m in die proef plotseling toegenomen van  $0,23$  naar  $0,81$  m. Het erosievolume was toegenomen van  $0,40$  naar  $1,46$  m<sup>3</sup>/m. Dit laat zien dat bij deze relatief hoge waterstand een slechte plek in het gras en de klei snel een flinke erosie kan veroorzaken bij deze klei.



Figuur 3.19 Grootste erosiediepte als functie van de belastingduur in proevenserie K4 (waterstand ten opzichte van niveau overgang)



Figuur 3.20 Erosievolume als functie van de belastingduur in proevenserie K4 (waterstand ten opzichte van niveau overgang)

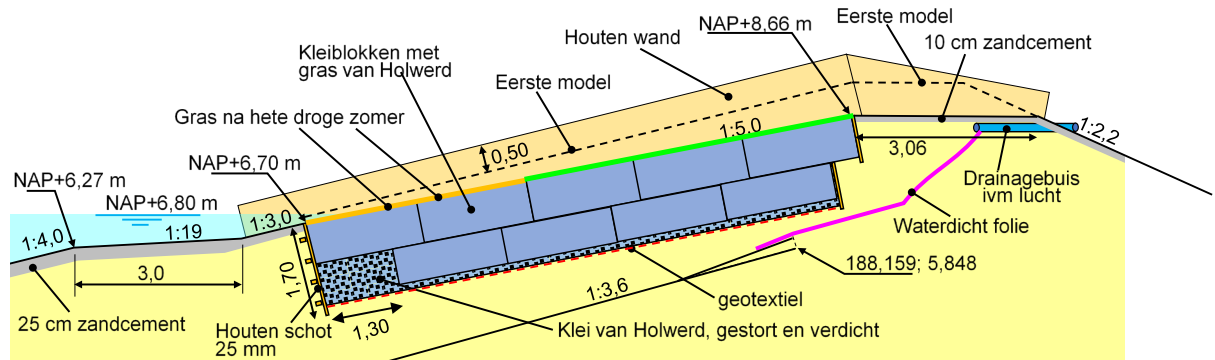
De gemeten erosie van alle Deltagootproeven is bij elkaar in één figuur gezet in bijlage E.

## 3.6 Proevenserie K5 en K6

### 3.6.1 Modelopstelling K5 en K6

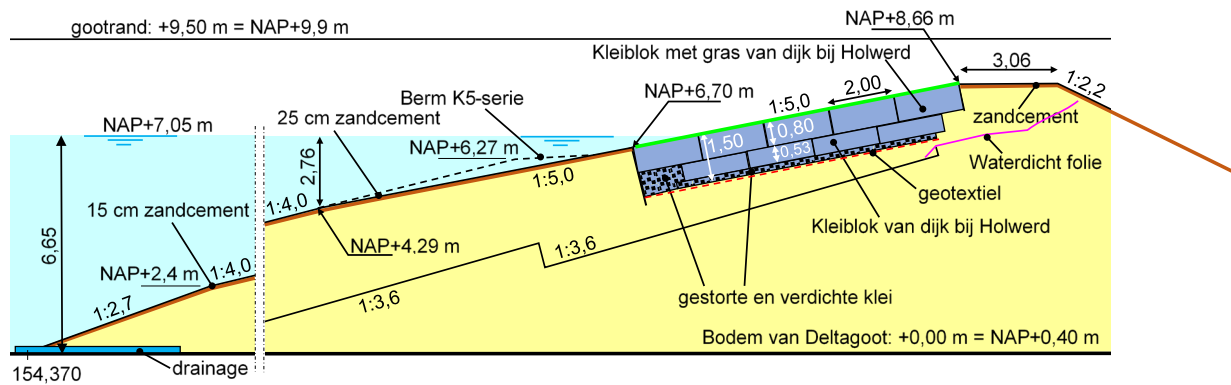
De modelopstelling voor proevenserie K5 lijkt sterk op die van K2 en K3. Ook deze modelopstelling is opgebouwd met kleiblokken met gras van Holwerd met een boventalud van 1:5. De geometrie van de berm en het ondertalud zijn identiek aan die van K3. Het grote verschil is dat er voor K5 gebruik gemaakt is van twee kleiblokken met gras die een extreem droge en hete zomer hebben doorgemaakt.

De modelopstelling is te zien in Figuur 3.21.



Figuur 3.21 Modelopstelling van proevenserie K5

De kleibekleding met gras is na het inbouwen gedurende een beperkte serie proeven belast om met name de erosiebestendigheid van het gras te meten dat een hete en droge zomer had doorgemaakt. Toen de erosiediepte gevorderd was tot ongeveer 50 cm, zijn de proeven gestopt en is de modelstelling aangepast voor proevenserie K6.



Figuur 3.22 Modelopstelling voor proevenserie K6



Figuur 3.23 Aanvangssituatie voor proevenserie K6

De modelopstelling K6 is een voortzetting van K5, met dezelfde kleiblokken met gras van Holwerd. Het doel was om te zien wat het effect is als er geen berm in het talud aanwezig is.

In modelopstelling K6 is de berm verwijderd en vervangen door een talud van 1:5 dat rechtstreeks aansluit op de overgang tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras. In Figuur 3.22 is te zien dat nu zowel het boventalud als het bepalende deel van het ondertalud 1:5 zijn.

De proevenserie K6 is dus gestart met een situatie waarbij er al enige erosie was opgetreden, zie Figuur 3.23, zonder eerst de tijdens proevenserie K5 ontstane schade aan de kleibekleding met gras te herstellen.

### 3.6.2 Proefresultaten K5 en K6

De uitgevoerde proeven in serie K5 zijn te vinden in Tabel 3-7.

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m <sup>3</sup> /m)
K5_01	6,80	1,98	5,51	0,042	0,33	0,33	0,00	0,00
kunstmatig gat van 20x20x5 cm <sup>3</sup> gemaakt								
K5_02	6,80	2,05	5,54	0,043	2,00	2,33	0,05	0,08
Kunstmatig gat vergroot naar 40x40x15 cm <sup>3</sup> .								
K5_03	6,80	2,04	5,54	0,043	2,00	4,33	0,26	0,27
K5_04	6,80	2,08	5,56	0,043	1,88	6,22	0,36	0,56
K5_05	6,80	2,05	5,53	0,043	2,00	8,22	0,43	0,73
K5_06	6,80	2,05	5,54	0,043	1,00	9,22	0,50	0,87

Tabel 3-7 Proefresultaten serie K5 (inkomende golfcondities)

proef	waterstand (m+NAP)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m <sup>3</sup> /m)
K6_01	6,30	1,99	5,48	0,042	1,75	1,75	0,53	0,76
K6_02	6,30	2,02	5,50	0,043	1,35	3,10	0,54	0,97
K6_03	6,80	1,53	4,82	0,042	1,42	4,52	0,54	1,07
K6_04	6,80	2,05	5,53	0,043	2,00	6,52	0,69	1,72
K6_05	6,80	2,04	5,53	0,043	1,00	7,52	0,70	1,94
K6_06	6,80	2,00	5,49	0,043	2,00	9,52	0,84	2,38
K6_07	6,95	2,01	5,50	0,043	1,83	11,35	0,93	2,78
K6_08	7,05	1,97	5,50	0,042	1,50	12,85	0,93	3,52
K6_09	7,05	1,94	5,50	0,041	1,83	14,68	0,96	4,55
K6_10	7,05	1,95	5,49	0,041	2,00	16,68	1,03	5,17
K6_11	7,05	2,10	5,52	0,044	2,50	19,18	1,17	6,88
K6_12	7,05	2,07	5,50	0,044	2,00	21,18	1,29	7,88
K6_13	7,05	2,09	5,57	0,043	0,77	21,95	1,25	8,36

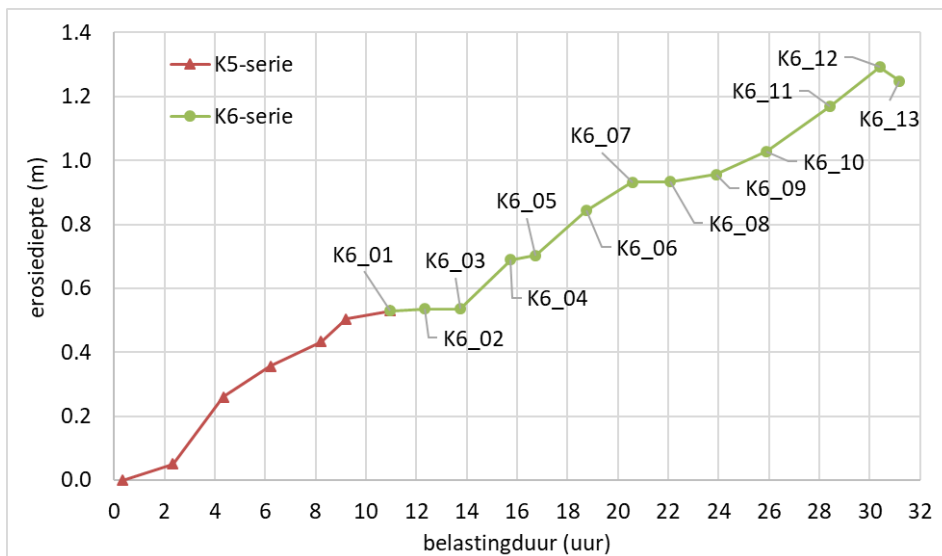
Tabel 3-8 Proefresultaten serie K6 (inkomende golfcondities)(\* = ten opzichte van proef K5\_01)

In Tabel 3-8 zijn de gemeten waarden van de erosiediepte en het erosievolume van de K6-serie gegeven. Voor elke proef van serie K5 en K6 is de erosiediepte en het erosievolume

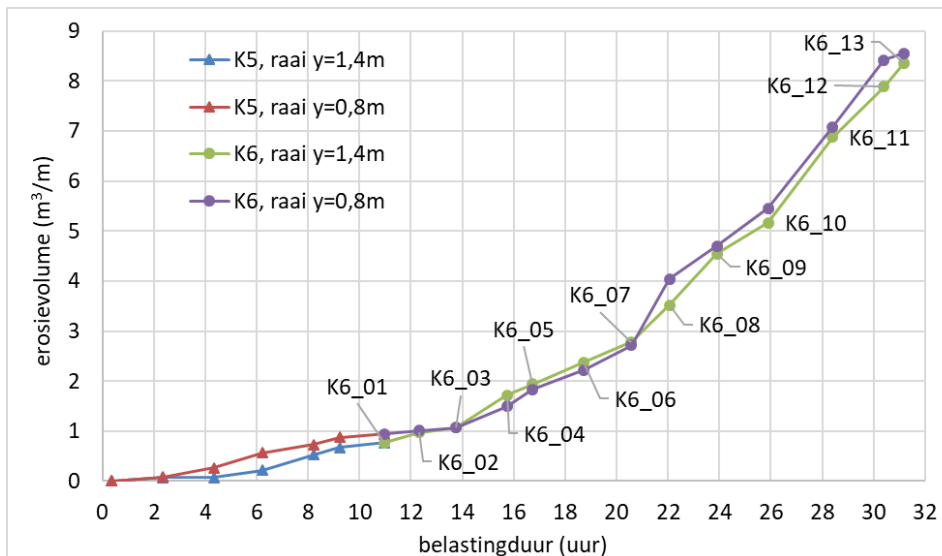


berekend ten opzichte van het profiel vóór proef K5\_01. Het verloop van de erosiediepte en erosievolume als functie van de belastingduur is te zien in Figuur 3.24 en Figuur 3.25.

Het proevenprogramma van serie K6 is gestart met twee proeven met een relatief lage waterstand (40 cm onder de overgang). Tijdens deze proeven is er relatief weinig erosie ontstaan. Vanaf proef K6\_03 is de waterstand verhoogd tot 10 cm boven de overgang. Tijdens de proeven K6\_03 tot en met K6\_07 is de snelheid waarmee het erosievolume toeneemt iets groter dan tijdens de K5-serie. Maar de snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt is ongeveer gelijk aan de K5-serie. Vanaf K6\_08 neemt de erosiesnelheid qua volume duidelijk toe, maar neemt de erosiesnelheid qua diepte juist af. In deze fase van de proeven was er een steile klif die door de erosie steeds verder naar de kruin migreerde. Dat leverde een flinke toename van het erosievolume per uur, maar de erosie ging daarbij wat minder snel de diepte in.



Figuur 3.24 Grootste erosiediepte in raai y=1,4m (aangevuld met handmetingen).



Figuur 3.25 Erosievolume als functie van de belastingduur voor raai y=0,8 m en raai y=1,4m.

De gemeten erosie van alle Deltagootproeven is bij elkaar in één figuur gezet in bijlage E.

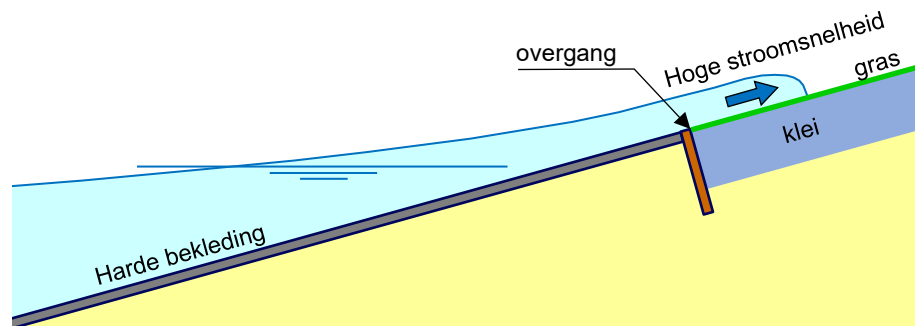
## 4 Erosieproces

### 4.1 Belasting door golfloop en golfklappen

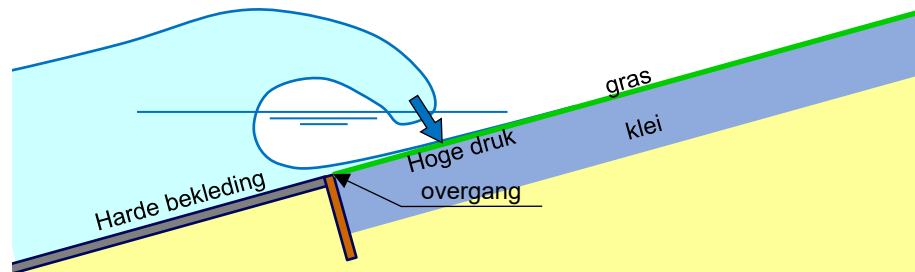
De proeven in de Deltagoot hebben concreet zicht gegeven op de processen die spelen bij het eroderen van het gras en de klei op het boventalud van zeedijken tijdens zware golfaanval.

In het begin van het erosieproces, als er nog nauwelijks schade aan het gras is opgetreden, kunnen de twee hoofdprocessen onderscheiden worden die ook worden onderscheiden voor het beoordelen van gras volgens WBI-2017:

1. Erosie van het grasoppervlak als gevolg van de golfloop (en golfneerloop), zie Figuur 4.1
2. Erosie van het grasoppervlak als gevolg van de golfklappen, zie Figuur 4.2.



Figuur 4.1 Belasting door golfloop: hoge stroomsnelheid over het gras



Figuur 4.2 Belasting door golfklappen: zowel hoge lokale drukpieken als hoge stroomsnelheden op het gras

Door de aanwezigheid van de harde bekleding op het onderste deel van het talud van de dijk, treden deze erosieprocessen al dan niet op. Dit is afhankelijk van de waterstand ten opzichte van het niveau van de overgang tussen de harde bekleding (asfalt, steenzetting) en de bekleding van gras op klei. Dit is onder andere het gevolg van het feit dat golfklappen onder de waterlijn op het talud neerkomen en de golfloop en -neerloop ook boven de waterlijn optreden:

- Bij een waterstand ver onder de overgang is de watersnelheid in de golfloop en -neerloop te klein om schade aan het gras te veroorzaken. Dit kan berekend worden met "BM Gras Buitentalud" (de software voor het beoordelen van grasbekledingen in het kader van WBI-2017).
- Is de waterstand hoger dan die van het vorige punt, maar onder het niveau van de overgang, dan kan er na een bepaalde belastingduur schade aan het gras ontstaan.

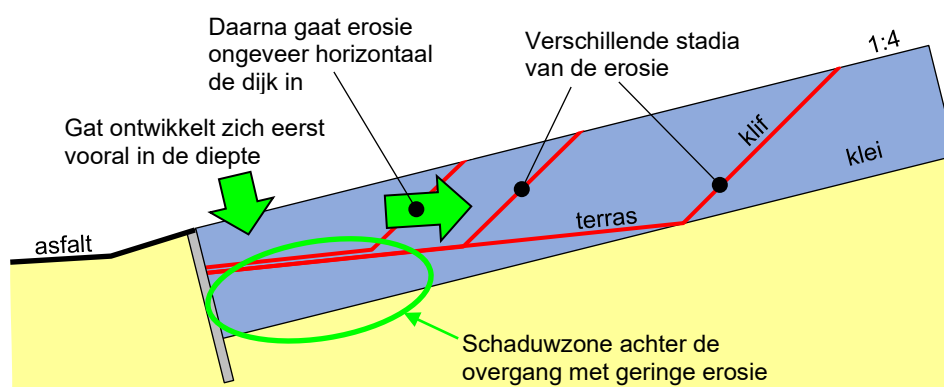
Hoe langer de golfbelasting aanhoudt, hoe meer schade er ontstaat en dan ontstaat er na verloop van tijd een erosiekuil in de klei.

- Bij een waterstand boven de overgang treden er golfklappen op het gras op. Als de waterstand slechts weinig erboven ligt, zullen de grootste golfklappen nog op de harde bekleding onder de overgang neerkomen, waardoor het gras nog enigszins ontzien wordt.

Een harde bekleding op een deel van het talud, met de overgang naar de bekleding met gras en klei net onder de waterlijn, geeft een aanzienlijke bescherming van het gras doordat het de zwaarste golfklappen opvangt, maar er zullen nog steeds enkele golfklappen op het gras komen. Daardoor zal de door golfklappen gedomineerde belasting niet bij een specifieke waterstand ineens overgaan naar een golfploop gedomineerde belasting, maar is er een geleidelijke overgang van het ene type naar het andere type belasting.

## 4.2 Erosieproces met twee fases

Zoals te zien is in de figuren in hoofdstuk 3 (Figuur 3.7 t/m Figuur 3.25) verloopt het erosieproces in eerste instantie heel traag (gering erosievolume per uur) en gaat vervolgens na het bereiken van een bepaalde erosiediepte veel sneller. Dit is in beperkte mate veroorzaakt door de soms wat lagere waterstand tijdens de eerste proeven, maar komt vooral door de invloed van het gras.



Figuur 4.3 Schematische weergave van het erosieproces

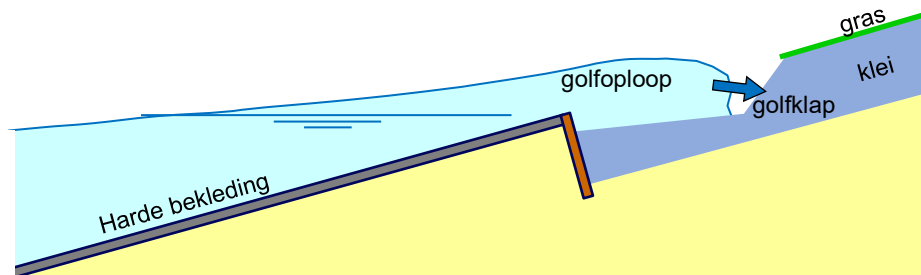
In Figuur 4.3 is schematisch weergegeven hoe het erosieproces verloopt. Het start met het ontwikkelen van een gat in het gras bij de overgang naar de harde bekleding. Zodra het erosiegat voldoende is gegroeid, ontwikkelt zich een klif waar de zwaarste hydraulische belasting op aangrijpt. Daar slaan de golven tegenaan en dat geeft de grootste bijdrage aan de erosie. Door de toenemende erosie schuift de klif steeds verder naar achteren en neemt de diepte van het erosiegat toe.

Dit maakt dat er twee fases in het erosieproces zijn:

1. Erosie van het gras totdat er een kuil is ontstaan en een klif waartegen de golven beuken. Deze fase heeft ongeveer geduurd tot en met proef K1\_07 in serie K1, proef K3\_05 in serie K2&K3, proef K4\_11 in serie K4 en t/m proef K6\_03 in serie K5&K6.
2. Een erosieproces waarbij er een steile klif is die met name onderaan de klif erodeert en het gras ondermijnt. Dit proces speelde zich af in de Deltagoot vanaf proef K1\_08 in serie K1, proef K3\_07 in serie K2&K3, proef K4\_12 in serie K4 en vanaf proef K6\_04 in serie K5&K6.

In de eerste fase is de kwaliteit van de grasmat van belang. Hoewel er in de proeven gras met een gesloten zode is aangebracht, is deze verzwakt door het aanbrengen van kunstmatige schade. Het gras van serie K4 was danig verzwakt door het wekenlange verblijf in de hal van de Deltagoot.

Zodra er een erosieklif ontstaat (tweede fase van het erosieproces) verandert de belasting op de klei (en het gras). Er treden dan golfklappen op tegen de klif. Dit is ook het geval bij een waterstand onder de overgang, omdat de watertong van de golfoploop een golfklap geeft tegen de klif, zie Figuur 4.4 en Figuur 4.5. Zelfs als de waterstand relatief laag staat, en er volgens de indeling uit de vorige paragraaf een belasting door oploop en neerloop zou zijn, treden er dan dus toch golfklappen op tegen de erosieklif.



Figuur 4.4 Golfoploop zorgt voor een golfklap tegen de klif



Figuur 4.5 Tijdens golfoploop botst het water tegen de erosieklif en spat omhoog (proef K1\_11)

Het bovenstaande betekent dat er voor initiële schade aan het gras (aan het begin van het erosieproces) onderscheid is tussen:

- Waterstanden onder de overgang: schade door het golfoploopmechanisme waarbij de hoge stroomsnelheid over het gras schade geeft. Deze belasting is beperkt ten opzichte van de sterkte van het gras en het duurt daardoor lang voordat er een gat in het gras ontstaan is.
- Waterstanden boven de overgang: schade door het golfklapmechanisme waarbij de hoge lokale drukpieken op het gras schade geven. Deze belasting is vrij groot en daardoor ontstaat er relatief snel een gat in het gras.

Na de initiële schade aan het gras gaat de erosie eerst haaks op het talud naar beneden (er wordt een gat gevormd). Dit is de eerste fase van het erosieproces. Zodra er een klif is gevormd, zal ook de golfoploop zorgen voor golfklappen tegen de klif. Er zijn dan dus niet

alleen golfklappen bij een waterstand boven het niveau van de overgang, maar ook als de waterstand onder de overgang staat. Door deze golfklappen tegen de klif wordt klei weggespoeld en migreert de klif landwaarts (tweede fase van het erosieproces). Met het naar achteren migreren van de klif wordt ook de erosiediepte groter.

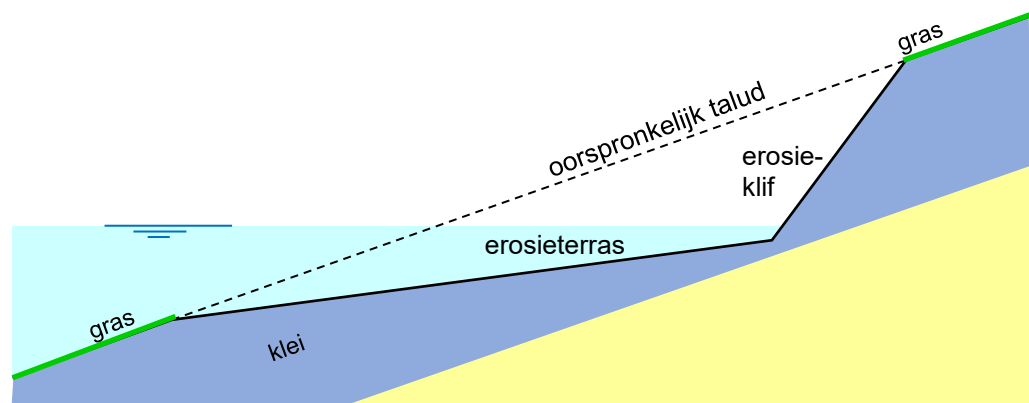
Er wordt dus onderscheid gemaakt tussen golfklappen onder de waterlijn, waar de overstortende golf direct het talud raakt en golfklappen die ontstaan doordat de golfoploop tegen een steile erosieklif aan botst. Beide typen golfklappen kwamen ook voor in de numerieke berekeningen met OpenFoam.

Golfklappen die onder de waterlijn op het talud slaan zijn veel krachtiger dan de golfklappen die door de golfoploop tegen de klif worden veroorzaakt. Daarom is het bij grote golven en een normaal dijktaalud ( $H_{m0} > 1,3$  à  $1,8$  m;  $\tan\alpha > \text{ca. } 0,2$ ) nodig om de overgang, tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras, op een zodanige hoogte te hebben dat de zware golfklappen onder de waterlijn plaatsvinden op de harde bekleding. Want als deze zware golfklappen rechtstreeks op de kleibekleding met gras neerkomen, gaat de erosie zo snel dat alleen met een zeer dikke kleilaag een dijkdoorbraak kan worden voorkomen. In feite gaat het erom dat de kans dat de waterstand en golfcondities zodanig zijn dat de zware golfklappen rechtstreeks op het gras komen, voldoende klein is.

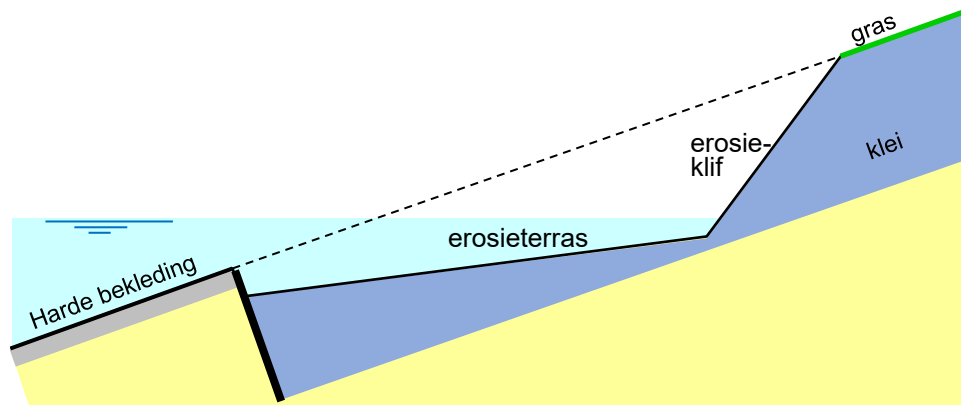
Bij het afleiden van de formules is er van uitgegaan dat er al een klein gat in de grasbekleding aanwezig is bij het begin van een extreme storm, namelijk een gat van  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  en 5 cm diep. Als in de praktijk dergelijke beschadigingen voorkomen kunnen worden, zou de standtijd van de grasbekleding uit BM-Gras-Buitentalud van WBI-2017 bij de standtijd volgens de hier afgeleide formules opgeteld kunnen worden. Voor de beoordeling van het gras volgens WBI-2017 wordt er feitelijk uitgegaan van een onbeschadigde grasmat, omdat de proeven met de simulatoren, waar de formules op gebaseerd zijn, zijn uitgevoerd zonder beschadigingen. Wel is daarbij vastgesteld dat kleine beschadigingen, zoals schapenpaadjes of muizenholletjes een verwaarloosbare invloed hebben op de standtijd van het gras.

### 4.3 Erosieprofiel

Zodra de erosie gaat groeien en er een erosieklif ontstaat, is er een typisch erosieprofiel waarin ook een erosieterras is te onderscheiden. Voor de situatie met een kleibekleding met gras op de dijk, zonder harde bekleding op het ondertalud, is dit schematisch weergegeven in Figuur 4.6.



Figuur 4.6 Schematische weergave van het erosieprofiel als gehele dijk bekleed is met gras op een kleilaag



*Figuur 4.7 Schematische weergave van het erosieprofiel als het ondertalud bekleed is met een harde bekleding*

Het erosieterras heeft in zo'n geval doorgaans een helling van ongeveer 1:8 (bij relatief kleine erosiegaten wat steiler en bij relatief grote erosie wat flauwer) en de erosieklif een helling van 1:1 voor klei zonder gras (Klein Breteler e.a., 2012).

Als er sprake is van een harde bekleding op het ondertalud, wordt het erosieprofiel aan de zeezijde beïnvloed door de overgang. Dit is schematisch geschetst in Figuur 4.7.

In het volgende hoofdstuk is aan de hand van een analyse van de metingen in de Deltagoot de vorm van het erosieprofiel nader gekwantificeerd. Hoewel deze proeven zijn uitgevoerd met een relatief smalle strook gras van 2 m breedte (dijklengte van 2 m), is het toch de verwachting dat hiermee representatieve resultaten zijn verkregen. In feite is de modelopstelling een verticaal uitgesneden plakje uit de werkelijkheid ter plaatse van het midden van de erosiekuil. Deze erosiekuil zal in de werkelijkheid naar beide zijden zich over vele meters uitstrekken, maar naar verwachting zal dit geen invloed hebben op de erosie in het midden van de kuil die gemodelleerd is in de Deltagoot. Dit betekent dat de bijna tweedimensionale situatie in de Deltagoot representatief is voor de driedimensionale werkelijkheid op een dijk.

## 5 Erosieformules

### 5.1 Eerste fase van het erosieproces

De eerste fase van het erosieproces bestaat uit het geleidelijk groter worden van het gat in het gras. De groei van het gat is te zien in Figuur 5.1. Het is gebleken dat het gat in het gras betrekkelijk traag groeit tijdens de proeven in de Deltagoot, waarschijnlijk omdat een belangrijk deel van de hydraulische belasting wordt opgevangen door de harde bekleding en de berm.



Figuur 5.1 Erosie van het gras. Situatie na proef K1\_04 (links) en na proef K1\_05 (rechts)

Als we Figuur 3.7 en Figuur 3.8 van serie K1 vergelijken, dan zien we dat het verschil tussen de eerste fase en de tweede fase vooral goed te zien is bij het verloop van het erosievolume. We zien daar een gemiddelde erosiesnelheid  $\partial V_e / \partial t$  van ongeveer  $0,09 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$  tijdens proef K1\_04 tot en met K1\_07, die daarna in fase 2 toeneemt naar een gemiddelde erosiesnelheid van ongeveer  $1,23 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$ . Dat is dus een meer dan 10 maal zo grote erosiesnelheid.

Een vergelijkbaar beeld zien we tijdens proevenserie K2 & K3 (Figuur 3.13 en Figuur 3.14), proevenserie K4 (Figuur 3.19 en Figuur 3.20) en proevenserie K5 & K6 (Figuur 3.24 en Figuur 3.25).

De vergroting van de kunstmatige schade naar een gat van ca  $40 \times 40 \times 15 \text{ cm}^3$ , zoals vóór proef K1\_05, K2\_03 en K5\_03, had een flinke invloed op het erosievolume. Dit staat gelijk aan ongeveer 1 à 2 uur golven. Dit wordt voorlopig buiten beschouwing gelaten, waardoor de resultaten wat aan de veilige kant zijn.

Verder is de erosie soms tijdelijk trager, zoals tijdens proef K1\_04 en K1\_05 in vergelijking tot K1\_06 en K1\_07. Dit ligt waarschijnlijk maar zeer ten dele aan het verschil in waterstand, maar ligt vooral aan het feit dat in het begin van het erosieproces het gras nog veel dominanter aanwezig is dan aan het eind van de eerste fase. Daarom wordt in onderstaande analyse alleen gewerkt met de gemiddelde erosiesnelheid gedurende een aantal proeven.

#### 5.1.1 Kwantificering van het erosieproces

Voor de kwantificering van de eerste fase van het erosieproces wordt aansluiting gezocht op het onderzoek dat in 2014 is uitgevoerd met twee soorten kleibekleding en met gras en golven van  $H_{m0} = 0,5$  tot  $1,1 \text{ m}$ . Dit onderzoek is gerapporteerd door Van Steeg (2014) en betrof een

talud dat van onder tot boven bestond uit een kleibekleding met gras, dus zonder de invloed van een harde bekleding op het ondertalud.

Toen zijn die proeven uitgevoerd met veel kleinere golven dan in het huidige onderzoek, maar omdat er toen geen harde bekleding was op de locatie waar de zwaarste golfklappen neerkwamen, zijn deze proeven wel relevant. Ook toen bleek de erosie vrij traag te verlopen. De proeven zijn ten behoeve van het WBI-2017 geanalyseerd door Klein Breteler (2015), waarbij ook andere proeven met gras en klei zijn betrokken. Dit resulteerde in de volgende formule voor de erosiediepte op het diepste punt in de erosiekuil:

$$d_e = c_d (H_{m0} - 0,5)(\tan \alpha)^{1,5} \cdot t_{belast} \quad (1)$$

Met (zie ook symbolenlijst op bladzijde 6):

$H_{m0}$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

$c_d$  = 0,6 als zandgehalte < 70%

$d_e$  = grootste diepte in de erosiekuil (haaks op het talud) (m)

$t_{belast}$  = belastingduur (uur)

$\alpha$  = taludhelling (°)

Door op dit onderzoek aan te sluiten wordt in de eerste fase van het erosieproces ook nu de kwantificering gericht op de ontwikkeling van de (grootste) erosiediepte, en niet op het erosievolume. Na het berekenen van de erosiediepte kan het erosievolume bepaald worden met de formules uit paragraaf 5.1.3.

In de huidige analyse van de proefresultaten wordt gekeken naar de snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt:  $\partial d_e / \partial t$ . Volgens bovenstaande formule zou dit als volgt afhankelijk zijn van de golfhoogte en de taludhelling (bij grote waarden van  $h_{overgang}$ ):

$$\frac{\partial d_e}{\partial t} = c_d (H_{m0} - 0,5)(\tan \alpha)^{1,5} \quad (2)$$

Met:

$\partial d_e / \partial t$  = snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt (maximum waarde in de erosiekuil) (m/uur)

In veel gevallen zal de taludhelling niet constant zijn van teen tot kruin. Vooral de taludhelling rond de waterlijn is fysisch gezien relevant. Op basis van engineering judgement wordt gekozen voor de gemiddelde taludhelling tussen  $H_{m0}$  onder de waterlijn en  $H_{m0}$  boven de waterlijn, waarbij de breedte van de eventuele berm niet wordt meegeteld (berm is taluddeel dat flauwer is dan 1:9). Met deze definitie is de gemiddelde taludhelling ( $\alpha_{gem}$ ):

- Serie K1 en K4:  $\tan \alpha_{gem} = 0,261$
- Serie K2, K3 en K5:  $\tan \alpha_{gem} = 0,234$
- Serie K6:  $\tan \alpha_{gem} = 0,200$

Bovenstaande formule is bedoeld voor dijken met gras op klei op het hele talud. Het is te verwachten dat voor dijken met een harde bekleding tot vlak onder de waterlijn de erosie langzamer verloopt. Het vermoeden is dus dat er een relatie is tussen de snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt enerzijds en de waterstand ten opzichte van de overgang anderzijds. Daarom wordt voor de analyse gebruik gemaakt van de volgende dimensieloze parameter:

- $h_{overgang} / H_{m0}$

met:



$h_{\text{overgang}}$  = diepte van de overgang ten opzichte van de stilwaterlijn (als de waterstand hoger is dan de overgang, is deze waarde positief) (m)

Gezien de verwachte invloed van de diepte van de overgang ( $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ ) zal deze formule aangevuld moeten worden met een parameter die deze invloed verdisconteert. Dit kan op verschillende manieren, maar er wordt voor gekozen om een simpele invloedsfactor  $f_{\text{overgang}}$  toe te voegen:

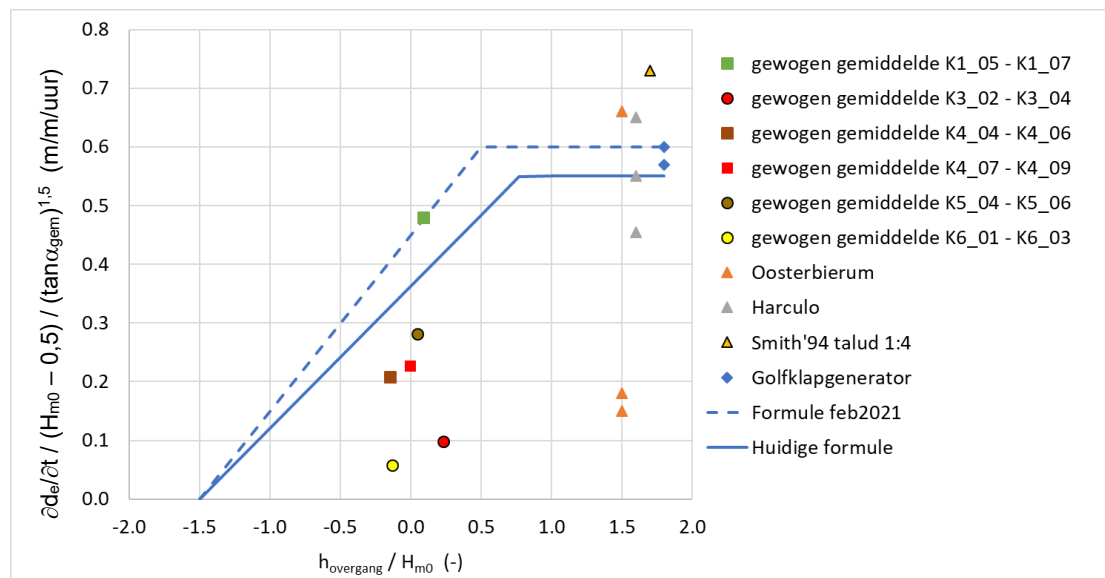
$$\frac{\partial d_e}{\partial t} = c_d f_{\text{overgang}} (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha_{\text{gem}})^{1,5} \quad (3)$$

Met:

$f_{\text{overgang}}$  = parameter die de invloed van de diepte van de overgang  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$  weergeeft (-)

Als er geen invloed is van de overgang, omdat deze zeer diep onder water ligt, is  $f_{\text{overgang}} = 1$ .

In Figuur 5.2 zijn de huidige metingen samen met die uit Klein Breteler (2015) uitgezet als functie van  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ . Op de verticale as is de parameter  $\frac{\partial d_e}{\partial t} / (H_{m0} - 0,5) / \tan \alpha_{\text{gem}}^{1,5} = c_d \cdot f_{\text{overgang}}$  uitgezet, waarin de invloed van de diepte van de overgang tot uiting zou moeten komen. In een dergelijke figuur kan  $f_{\text{overgang}}$  (en  $c_d$ ) gekwantificeerd worden.



Figuur 5.2 Invloed van de overgang op de snelheid waarmee de erosiediepte toeneemt (gewogen gemiddelde met weging op basis van proefduur)

Het eerste dat opvalt is de grote spreiding. Dit was te verwachten, want ook tijdens de proeven was opgevallen dat de ene klei-grascombinatie veel erosiebestendiger is dan de andere. Kennelijk is er een grote natuurlijke spreiding in dit materiaal. Daarom zijn niet de afzonderlijke metingen in de figuur gezet, maar het gewogen gemiddelde van groepjes van drie opeenvolgende proeven. Als weegfactor is de duur van de proeven gebruikt, waarbij dus een langer durende proef zwaarder meetelt in het gemiddelde dan een korte.

De afleiding van een geschikte formule is onderstaand uitgevoerd op enerzijds de meetpunten en anderzijds op engineering judgement. Dat laatste is nodig vanwege de grote spreiding in de meetpunten en het geringe aantal meetpunten, waardoor het niet mogelijk is om uitsluitend op basis van de meetpunten een zinnige relatie af te leiden.

Aan de rechterkant in de figuur zijn de meetpunten uit de rapportage van Klein Breteler (2015) getekend bij een willekeurig gekozen waarde van  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$  in de range van 1.5-2.0. De waarde van  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$  is hier in dit bereik niet meer van belang, omdat de overgang zo diep onder water ligt dat deze geen invloed heeft op het erosieproces. Hier verwachten we daarom een horizontale lijn voor de relatie tussen de erosiesnelheid en  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ . Hoewel de gemiddelde waarde van de meetpunten op  $\partial d_e / \partial t / (H_{m0} - 0,5) / \tan \alpha_{\text{gem}}^{1,5} = 0,5$  ligt, wordt iets minder waarde gehecht aan de twee zeer laag liggende meetpunten, om te voorkomen dat we het erosieproces onderschatten. Daarom wordt voor de relatie een verwachtingswaarde van 0,55 aangehouden. Dit is in de figuur getekend met een horizontale getrokken lijn. Dat betekent dat de verwachtingswaarde van  $c_d$  gelijk is aan 0,55. In dit bereik is  $f_{\text{overgang}} = 1$ . Door Klein Breteler (2015) was destijds een veilige waarde van  $c_d = 0,60$  aanbevolen op basis van deze meetpunten (horizontale gestreepte lijn in Figuur 5.2).

Gezien de fysica is het te verwachten dat naarmate  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$  kleiner wordt (vooral bij negatieve waarden) de erosiesnelheid afneemt. Er zullen dan steeds meer golfklappen op het ondertalud komen en er zijn steeds minder golfklappen die het gras kunnen bereiken. Zodra deze waarde ver onder nul komt, zullen ook niet alle golfoplopen het gras kunnen bereiken en neemt de erosiesnelheid nog verder af. Er is aangenomen dat bij  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} < -1,5$  de erosiesnelheid ongeveer nul is. De golfloop kan dan nog maar nauwelijks het gras bereiken en daarom zal er bij zo'n lage waterstand nauwelijks erosie zijn van het gras.

Naar links in de figuur is een lineaire afname aangehouden. De snelheid waarmee  $f_{\text{overgang}}$  afneemt met afnemende  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$  is hier wat kleiner gekozen dan berekend is in de tweede fase van het erosieproces (zie paragraaf 5.2.4, Figuur 5.24). Dit is gedaan omdat er geen meetgegevens zijn waaruit de trend goed is vast te stellen. De geringere afname levert conservatieve resultaten.

De afname van  $f_{\text{overgang}}$  is wel wat sterker gekozen dan de trend in de formules voor het beoordelen van initiële schade aan gras uit het WBI-2017. Volgens WBI-2017 is er geen afname van de kans op schade aan het gras in de range  $-0,5 < h_{\text{overgang}}/H_{m0} < 0$  en dat is voor de voortgaande erosie na het ontstaan van initiële schade onwaarschijnlijk (zie Figuur 5.24).

Voor het niveau van de lijn is gebruik gemaakt van de punten van proevenserie K1 en K4 (groene en bruine blokjes in de figuur), omdat de klei van Holwerd, die gebruikt is in de proevenseries K2 en K5, onverwoestbaar bleek te zijn en daardoor wellicht een te rooskleurige formule zou kunnen gaan opleveren.

Gezien de gemiddelde ligging van deze meetpunten en de aanname dat de erosiesnelheid ongeveer nul is als  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} < -1,5$ , is gekozen voor de volgende relatie (verwachtingswaarde):

$$\frac{\frac{\partial d_e}{\partial t}}{(H_{m0} - 0,5)(\tan \alpha_{\text{gem}})^{1,5}} = c_d \cdot f_{\text{overgang}} = 0,55 \cdot \max \left( 0; \min \left( 1; 0,44 \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 0,66 \right) \right) \quad (4)$$

Bij  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} > 0,77$  bereikt deze formule het maximum ( $c_d \cdot f_{\text{overgang}} = 1$ ). Dan is er geen invloed meer van de overgang. Gezien het feit dat golfklappen doorgaans een halve golfhoogte onder de waterlijn neerkomen, is dit een plausibele waarde.

De spreiding in de meetpunten is vrij groot. De variatiecoëfficiënt ten opzichte van deze lijn blijkt 0,35 (huidige meetpunten) à 0,40 (meetpunten van Klein Breteler (2015)) te zijn. Dat betekent dat er een brede zone is in Figuur 5.2 waarbinnen de erosiesnelheid zou kunnen liggen. Het heeft daarom ook minder zin om hiervoor een complexe relatie te bedenken en volstaat dus een simpele lineaire relatie.

Voor de Lauwersmeerdijk was door Klein Breteler (2021a) een vergelijkbare relatie voorgesteld, die door het meetpunt van de Lauwersmeerdijk (proevenserie K1) loopt. Deze relatie is met een gestreepte lijn in Figuur 5.2 gegeven. Deze lijn ligt wat hoger (grotere erosiesnelheid), maar heeft vanwege de beperkte toepasbaarheid (alleen de Lauwersmeerdijk) een kleinere onzekerheid.

Het bovenstaande leidt tot de volgende formule voor het berekenen van de erosiediepte (als  $H_{m0} > 0,5$  m):

$$d_e = c_d f_{overgang} (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha_{gem})^{1,5} \cdot t_{belast} \quad (5)$$

$$f_{overgang} = \max \left( 0; \min \left( 1; 0,44 \frac{h_{overgang}}{H_{m0}} + 0,66 \right) \right) \quad (6)$$

$c_d = 0,55$  (of 0,67 zie paragraaf 5.1.5)

Deze formule is met de getrokken lijn weergegeven in Figuur 5.2. Merk op dat de waarde van  $c_d$  moet worden verhoogd naar 0,67 als er rekening gehouden moet worden met een hete en droge zomer die gemiddeld eens per vijf jaar optreedt (zie paragraaf 5.1.5).

### 5.1.2 Erosiediepte aan het eind van de eerste fase van het erosieproces

In Figuur 3.8 is te zien dat de overgang van de eerste fase naar de tweede fase van het erosieproces tijdens proevenserie K1 plaatsvindt aan het eind van proef K1\_07, bij een erosiediepte van ongeveer  $d_e = 0,5$  m. Waarschijnlijk heeft deze overgang te maken met de dikte van de wortellaag van het gras. Als de erosie voldoende diep is doorgedrongen in de klei, kunnen de golven de klei onder de wortellaag eroderen en gaat het erosieproces sneller.

Bij proevenserie K2&K3 treedt de overgang op bij een erosiediepte van ongeveer  $d_e = 0,44$  à  $0,50$  m op, in proevenserie K4 bij ongeveer  $d_e = 0,59$  m en bij proevenserie K5&K6 bij  $d_e = 0,54$  m.

Dit betekent dat gemiddeld bij een erosiediepte van  $d_e = 0,5$  m de eerste fase van het erosieproces eindigt en de tweede begint. De standaardafwijking is 0,05 m. Mogelijk dat er een relatie is met de worteldiepte van het gras, maar dat is in het huidige onderzoek niet uit de beschikbare metingen te halen.

### 5.1.3 Relatie erosiediepte en erosievolume

De erosiediepte kan omgerekend worden naar een erosievolume (en vice versa) voor een geschematiseerd erosieprofiel zoals getekend in Figuur 5.3. In dit geschematiseerde erosieprofiel is  $d_o$  de erosiediepte tegen de overgang en  $d_e$  de grootste diepte in het profiel.

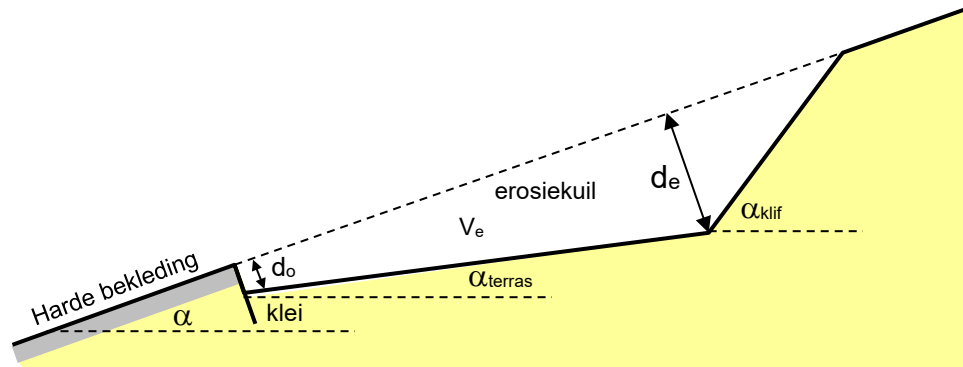
De volgende formules zijn bij deze schematisatie van toepassing:

$$V_e = \frac{d_e^2 - d_o^2}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (7)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{terras}) + d_o^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)}\right)}} \quad (8)$$

Met:

- $d_o$  = erosiediepte tegen de overgang (haaks op het talud) (m)
- $\alpha_{\text{terras}}$  = taludhelling van het erosieterras ( $^\circ$ )
- $\alpha_{\text{klijf}}$  = taludhelling van de erosieklijf ( $^\circ$ )
- $\alpha$  = taludhelling boventalud ( $^\circ$ )

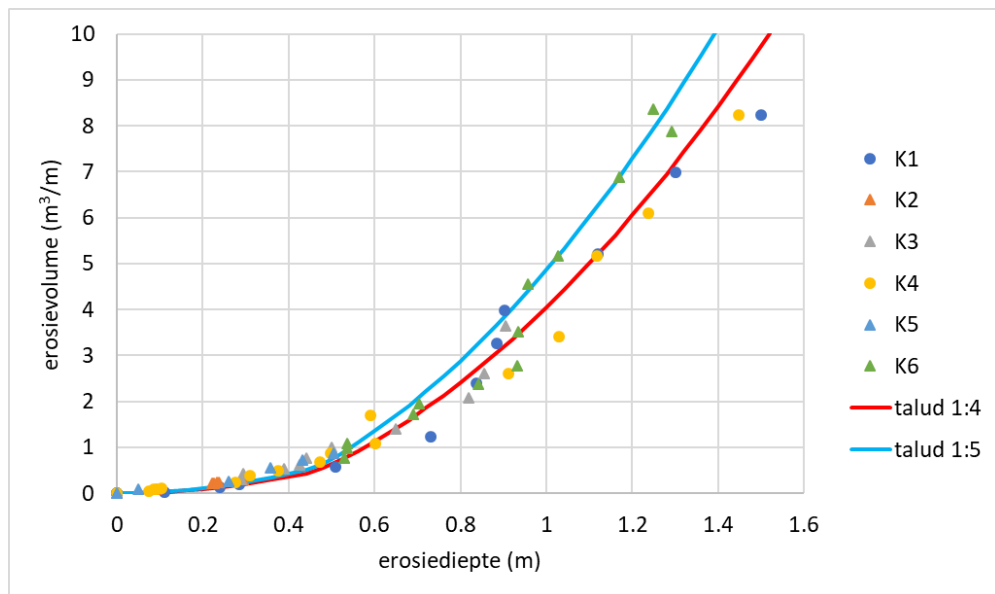


Figuur 5.3 Geschematiseerd erosieprofiel met erosiediepte  $d_e$  en erosievolume  $V_e$

Op basis van de metingen is een inschatting gemaakt van de waarde van  $d_o$ ,  $\alpha_{\text{terras}}$  en  $\alpha_{\text{klijf}}$ . Uit de metingen blijkt het volgende, zie Figuur 5.4:

- Taludhelling boventalud 1:4 (serie K1 en K4):  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/8$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$
- Taludhelling boventalud 1:5 (serie K2&K3 en K5&K6):  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/10$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$

Het blijkt dat hiermee een goede overeenkomst met de metingen wordt bereikt, zoals te zien is in Figuur 5.4.



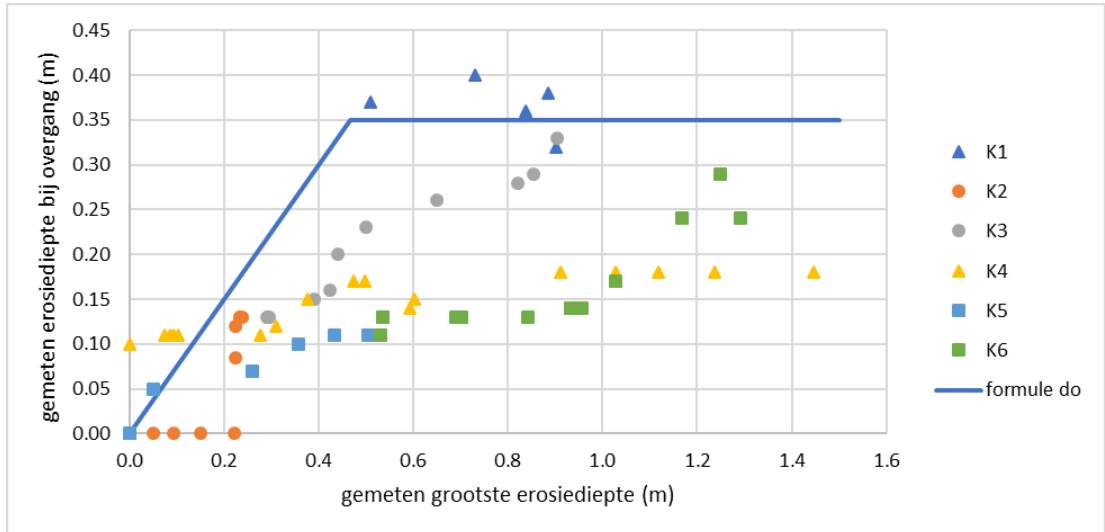
Figuur 5.4 Gemeten relatie tussen de erosiediepte en het erosievolume en de berekende relatie op basis van  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/8$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$  voor een boventalud van 1:4 en  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/10$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$  voor een boventalud van 1:5.

In de formule voor het berekenen van de erosiesnelheid wordt gewerkt met de gemiddelde taludhelling in de zone tussen  $SWL-H_{m0}$  en  $SWL+H_{m0}$ . Bij het omrekenen van de erosiediepte naar het volume en vice versa moet er gerekend worden met de taludhelling van het boventalud (boven de overgang).

### 5.1.4 Erosiediepte bij de overgang

In bovenstaande formule zit ook de grootte van de erosie bij de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras. Deze parameter heeft een vrij grote spreiding, zoals te zien is in figuur 5.5. Verondersteld wordt dat er enige relatie is tussen de grootste erosiediepte en de erosiediepte bij de overgang. Omdat deze parameter wat minder belangrijk is voor de uiteindelijk erosiediepte wordt een eenvoudige formule gehanteerd door de bovenzijde van de puntenwolk:

- eerste fase van het erosieproces:  $d_o = \min(0,75 \cdot d_e ; 0,35)$  (9)
- tweede fase van het erosieproces:  $d_o = 0,35$



Figuur 5.5 Relatie tussen erosiediepte bij de overgang ( $d_o$ ) en grootste erosiediepte ( $d_e$ )

Als  $d_o = 0,75d_e$  wordt gesubstitueerd in Formule (7) dan levert dit het volgende op:

$$V_e = d_e^2 \left( \frac{0,44}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{1}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \right) = d_e^2 c_{geometrie} \quad (10)$$

Met:

$$c_{geometrie} = \frac{0,44}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{1}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (11)$$

$\alpha$  = taludhelling boventalud ( $^\circ$ )

Dit resultaat kan vervolgens met formule (5) gebruikt worden voor het afleiden van een formule voor het erosievolume tijdens de eerste fase van het erosieproces (als  $d_e < 0,5$  m en met  $\tan \alpha_{terras} = 1/8$  en  $\tan \alpha_{klif} = 2$  voor boventalud van 1:4 en  $\tan \alpha_{terras} = 1/10$  en  $\tan \alpha_{klif} = 2$  voor boventalud van 1:5):

$$V_e = c_{geometrie} (f_{overgang} \cdot c_d (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha_{gem})^{1,5} \cdot t_{belast})^2 \quad (12)$$

De waarde van  $d_o$  is overigens wel belangrijk voor het ontwerp van de dijk, want het bepaalt hoe diep het schot bij de overgang van de harde bekleding naar het gras moet worden. Uit figuur 5.5 blijkt dat de erosie zelden groter wordt dan 50 cm, dus daar moet de diepte op afgestemd worden. Het is verstandig om een aanzienlijk grotere diepte voor het schot aan te houden, om te zeker te zijn dat de erosie de overgang niet kan ondermijnen.

### Invloed van de waterstand

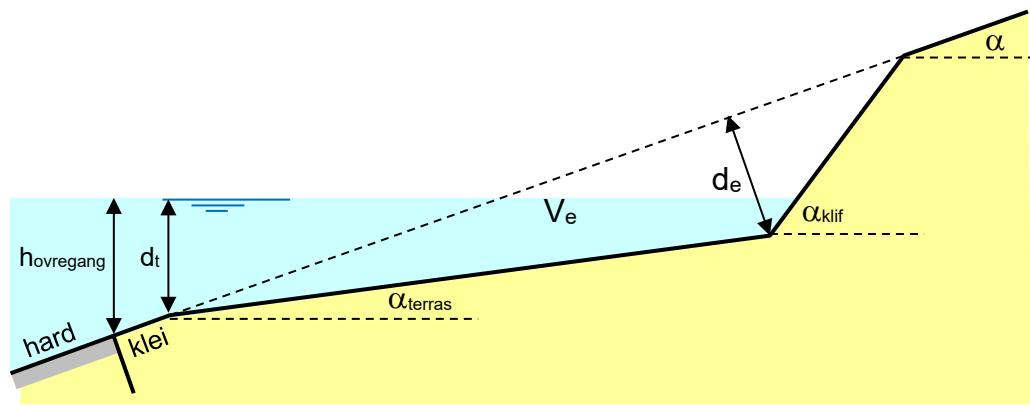
Het is daarnaast ook waarschijnlijk dat de waarde van  $d_o$  beïnvloed wordt door de dimensieloze waterstand ten opzichte van de overgang.

Als de waterstand heel hoog is, zal het niveau van het erosieterras niet lager worden dan wanneer het hele talud een kleibekleding heeft (zonder harde bekleding op het onderste deel van het talud), zie Figuur 5.6. Voor dat niveau van het erosieterras heeft Klein Breteler e.a. (2012) de volgende formule afgeleid:

$$\frac{d_t}{H_{m0}} = \min \left( 0,4 \frac{V_e^{0,25}}{H_{m0}^{1,5}} + \frac{0,7}{H_{m0}}; 2 \right) \quad (13)$$

Met:

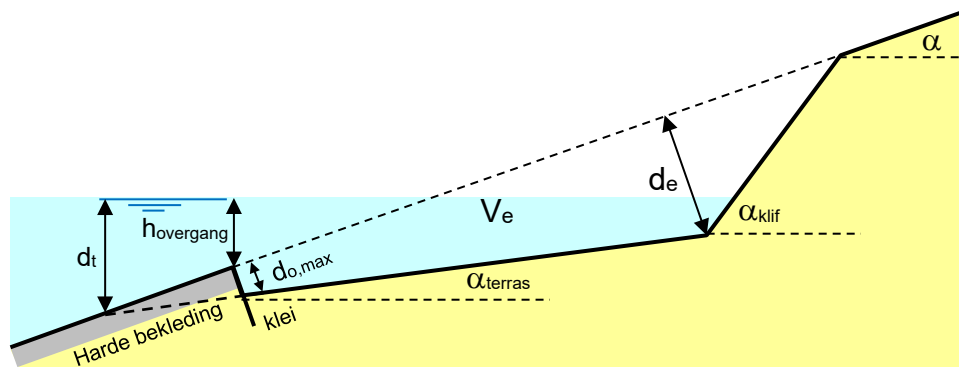
$d_t$  = niveau van aansluiting van erosieterras op het buitentalud ten opzichte van de stilwaterlijn (m)



Figuur 5.6 Erosieterras en klif als de waterstand ver boven de overgang ligt.

Naarmate de waterstand lager is (maar hoger dan die in de Deltagoot is toegepast), zal ook het niveau van het erosieterras lager zijn, totdat de waarde bereikt wordt uit formule (9). Dit betekent dat die formule uitgebreid moet worden met formule (13). De situatie waarbij  $d_t$  de grootte van  $d_o$  beïnvloedt, is getekend in Figuur 5.7. De waarde van  $d_{o,max}$  is:

$$d_{o,max} = \max \left( 0; \frac{d_t - h_{ouergang}}{\sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{terras}) \right) \quad (14)$$



Figuur 5.7 Aansluiting van erosieterras op talud (met weglating van de berm) en niveau ten opzichte van de waterlijn

De formule voor  $d_o$  wordt hiermee:

$$d_o = \min \left( 0,75 \cdot d_e ; \max \left( 0 ; \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{\sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) \right) ; 0,35 \right) \quad (15)$$

Dit wordt als volgt dimensieloos gemaakt met de golfhoogte, waarbij de waarde van 0,35 vervangen wordt door  $0,18 \cdot H_{m0}$  omdat de proeven, waar deze formule op gebaseerd zijn, uitgevoerd zijn met een golfhoogte van 2 m:

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \min \left( 0,75 \cdot \frac{d_e}{H_{m0}} ; \max \left( 0 ; \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) \right) ; 0,18 \right) \quad (16)$$

Bij nog lagere waterstanden, namelijk onder het niveau van de overgang, is het goed denkbaar dat  $d_o$  afneemt, omdat de hydraulische belasting op de klei net achter de overgang dan steeds minder wordt. Dit is ook het geval bij kleinere golven en daarom is het aan te bevelen om de dimensieloze waarde van  $d_o$  te beschouwen:  $d_o/H_{m0}$ .

Zodra de waterstand zo laag is dat de golfoploop (de significante waarde  $z_s$ , namelijk het gemiddelde van het hoogste éénderde deel van de oplopen) de overgang niet meer kan bereiken, is er geen erosie te verwachten en zal dus ook  $d_o$  nul zijn. Dit punt wordt bereikt als  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} = -1,5$ , zoals ook is aangehouden in formule (6).

Als we voorlopig  $d_o/H_{m0}$  lineair laten afnemen tot dat punt als functie van  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ , wordt dit bereikt als formule (16) vermenigvuldigd wordt met de term  $\min(h_{\text{overgang}}/H_{m0} + 1,5; 1)$ . We gaan er daarbij veiligheidshalve vanuit dat bij  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} > -0,5$  de volle erosiediepte bij de overgang bereikt wordt. De formule voor de dimensieloze erosiediepte achter de overgang wordt dan:

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5 ; 1 \right) \cdot \min \left( 0,75 \cdot \frac{d_e}{H_{m0}} ; \max \left( 0 ; \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) \right) ; 0,18 \right) \quad (17)$$

Samen met formule (7) kan hiermee de erosie van de eerste fase van het erosieproces gekwantificeerd worden.

In de tweede fase van het erosieproces is de erosiediepte een stuk groter en kan deze formule vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5 ; 1 \right) \cdot \min \left( \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) ; 0,18 \right) \quad (18)$$

Om te voorkomen dat er negatieve waarden ontstaan met deze formules wordt het:

- Eerste fase van erosieproces:

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \max \left( 0 ; \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5 ; 1 \right) \right) \cdot \max \left( 0 ; \min \left( 0,75 \cdot \frac{d_e}{H_{m0}} ; \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) ; 0,18 \right) \right) \quad (19)$$

- Tweede fase van erosieproces:

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \max \left( 0; \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5; 1 \right) \right) \cdot \max \left( 0; \min \left( \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}); 0,18 \right) \right) \quad (20)$$

### 5.1.5 Invloed van extreem hete en droge zomer

Tijdens proevenserie K5 is gebruik gemaakt van kleiblokken met gras die een extreem hete en droge zomer hebben doorgemaakt. Na deze hete droge zomer hebben ze weer twee maanden buiten gestaan met af en toe regen. Daardoor was het gras grotendeels weer hersteld toen het blootgesteld werd aan de golfbelasting, zie Figuur 5.8.



Figuur 5.8 Onderste deel van het grastalud dat een hete droge zomer heeft doorgemaakt en daarna ruim twee maanden water heeft gekregen tijdens een normaal najaar

Proevenserie K2&K3 is uitgevoerd met ongeveer dezelfde klei en gras als proevenserie K5, echter zonder de voorbehandeling met de droge en hete zomer.

Aan de hand van de proefresultaten in Figuur 5.2 (rode rondje en bruine rondje) is te zien dat de erosie 2,9 keer sneller ging tijdens proevenserie K5, dan tijdens proevenserie K3. Maar tijdens K2&K3 was echter het eerste grasblok een bijzonder geval die nauwelijks erodeerde, behalve tijdelijk na het aanbrengen van kunstmatige schade en dan nog steeds bijzonder traag. Dat maakt dat een deel van het verschil tussen K2&K3 en K5 veroorzaakt wordt doordat het kleiblok van K2&K3 uitzonderlijk erosiebestendig was. Daardoor is de invloed van de hete en droge zomer niet zomaar afzonderlijk te kwantificeren.

Voorlopig wordt (conservatief) aangenomen dat 70% van het verschil veroorzaakt wordt door de hete en droge zomer en 30% door de uitzonderlijke erosiebestendigheid. Daardoor is de erosiesnelheid als gevolg van de hete en droge zomer een factor  $2,9^{0,7} = 2,1$  maal groter dan zonder hete en droge zomer.

Verder geldt dat niet elke zomer zeer heet en droog is met 2 maanden lang temperaturen boven  $30^\circ$  zonder regen. Voorlopig wordt aangenomen dat dit eens in de vijf jaar gebeurt.

Om in een probabilistische analyse dan tot de juiste resultaten te komen, moet gerekend worden met de gemiddelde erosiesnelheid. Steeds geldt met deze aanname dat vier op de vijf jaren een erosiesnelheid hebben conform de formules (factor voor hete en droge zomer = 1) en één op de vijf jaren heeft een 2,1 maal grotere erosiesnelheid. Gemiddeld betekent dit een vergroting van de erosiesnelheid met een factor 1,22.



Deze resulterende factor moet verdisconteerd worden in de coëfficiënt  $c_d$ . Deze coëfficiënt wordt daardoor  $c_d = 0,55 \cdot 1,22 = 0,67$ .

## 5.2 Tweede fase van erosieproces (OpenFOAM)

### 5.2.1 Aanpak

Tijdens de tweede fase van het erosieproces is er een flinke kuil in de klei ontstaan met een erosieterras (bodem van de kuil) en een klif, zie Figuur 5.9. Door het geweld van de golven erodeert de klei, waardoor de klif naar boven schuift en wordt de erosiediepte steeds groter.

Gezien het feit dat er in de Deltagoot slechts een beperkt aantal proeven uitgevoerd kon worden, is ervoor gekozen om met het numerieke rekenmodel OpenFOAM de invloed van diverse aspecten van de golfbelasting en dijkgeometrie op de resultaten te berekenen. Hierbij wordt uitgegaan van de hypothese van Kruse (Klein Breteler e.a. 2012), die zegt dat de piekdruk in de golfklappen tegen de erosieklif bepalend is voor de erosiesnelheid. In Figuur 5.10 is te zien dat de golf tegen de klif klappt en het water omhoog spuit.



Figuur 5.9 Erosiekuil na proef K1\_08

Zoals uitgelegd in paragraaf 2.1 is de verwachting dat het gebruik van OpenFoam en de hypothese van Kruse ons in staat stelt het toepassingsbereik van de Deltagootproeven aanzienlijk te verbreden. Hiermee kan de invloed van veranderingen in de hydraulische belasting of geometrie van de dijk op de erosiesnelheid worden gekwantificeerd. De grootte van de golfdruk is afhankelijk van de grootte van de hydraulische belasting en de vorm van een constructie. Er is in dit onderzoek van uitgegaan dat OpenFoam in een bepaalde range van belastingen en geometrieën, die niet te veel afwijken van de proeven in de Deltagoot, de trend in de golfdruk tegen de klei voldoende nauwkeurig kan berekenen.

De druk die golven uitoefenen tijdens een golfklap op de klei wordt gezien als de primaire belasting die erosie van de klei veroorzaakt. Tijdens proeven met een kleibekleding van teen tot kruin (zonder overgang) is duidelijk vastgesteld dat de erosie ontstaat waar de golfklappen

neerkomen, en niet in de golfoploop- of golfneerloopzone (Klein Breteler e.a., 2012, en Mourik, 2020).

Mede op grond van deze constatering heeft Kruse zijn hypothese geformuleerd dat de erosie voornamelijk gerelateerd is aan de piekdrukken tijdens golfklappen op het kleitalud. Deze hypothese is door Kruse verder uitgewerkt in het rapport van Klein Breteler, Capel, Kruse, Mourik en Kaste (2012).

Deze methode bleek ook goed te werken voor taluds zonder harde bekleding op het ondertalud (kleibekleding van teen tot kruin) (Mourik 2020).



*Figuur 5.10 Golf klapt tegen de klif, waarna het water omhoog spuit. Dit geeft een piekdruk tegen de klif die bepalend is voor de erosiesnelheid*

Deze piekdruk tegen de klif kon tijdens de proeven niet gemeten worden, maar kan wel met OpenFOAM berekend worden.

Allereerst is een relatie gelegd tussen de berekende golfklappendruk en de gemeten erosiesnelheid (paragraaf 5.2.3). Door met OpenFOAM te berekenen in welke mate de golfklappendruk op de klei verandert bij andere golfbelastingen en dijkgeometrieën, is de invloed hiervan op de erosiesnelheid berekend (paragraaf 5.2.4). Deze methode is in 2015 al door Mourik (2020) succesvol toegepast.

De werkwijze is als volgt:

- Stap 1 (paragraaf 5.2.3): met 'OpenFOAM' zijn de proeven uit de Deltagoot nagerekend, zodat de piekdruk op het kleioppervlak in elke golf beschikbaar is. Deze piekdruk is de grootste belasting in een golf, die voor elke golf van de storm is berekend. Een karakteristieke waarde van de zo berekende piekdrukken, namelijk de significante waarde (gemiddelde van hoogste eenderde deel), is gerelateerd aan de in de Deltagoot gemeten erosiesnelheid. Dit levert voor elk gemeten erosieprofiel tijdens de proeven de relatie tussen de berekende piekdruk en de gemeten erosiesnelheid. Deze relatie is in het vervolg gebruikt.

- Stap 2 (paragraaf 5.2.4 en 5.2.5): met 'OpenFOAM' zijn de piekdrukken uitgerekend voor uiteenlopende situaties: verschillende golfhoogtes (bij gelijkblijvende golfsteilheid), verschillende waterstanden, verschillende golfsteilheden, verschillende taludhellingen en hoogte en breedte van de berm.
- Stap 3 (paragraaf 5.2.6): met de relatie tussen de berekende piekdruk en de gemeten erosiesnelheid van stap 1 zijn de resultaten van stap 2 omgerekend naar erosiesnelheden. De uiteindelijke resultaten zijn gebruikt voor het opstellen van formules waarmee de erosiesnelheid voor een breed scala aan situaties kan worden berekend.

Er is gekozen voor de significante waarde van de piekdruk als representatieve waarde voor de belasting, in plaats van de maximale belasting, omdat het bij een erosieproces gaat om de cumulatieve werking van vele golven en niet die van een enkele extreme golf. Daarom is niet gekozen voor de maximale waarde van de piekdruk tijdens de belasting, want die komt maar één keer in een storm voor. Verder geldt dat de kleine piekdrukken weinig erosie veroorzaken, waardoor de kleinste helft van de berekende piekdrukken veel minder relevant zijn dan de grootste helft. Zo is er gekozen voor de significante waarde, namelijk het gemiddelde van het hoogste éénderde deel van de piekdrukken.

Het had overigens voor de uiteindelijke conclusies weinig uitgemaakt of de 10% overschrijdingswaarde, significante waarde of 20% overschrijdingswaarde was gekozen.

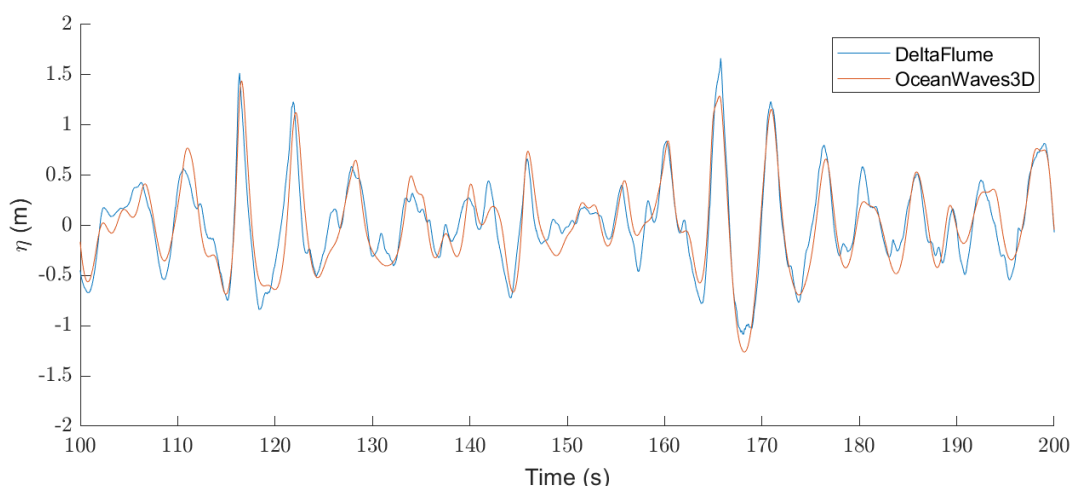
Onderstaand is eerst het numerieke model beschreven, zijn daarna de resultaten van de berekeningen gegeven en is vervolgens de erosieformule afgeleid.

## 5.2.2 Beschrijving van de gebruikte numerieke modellen

Voor het berekenen van de hydraulische belasting op de klei tijdens brekende golven is gebruik gemaakt van twee numerieke modellen:

1. OceanWave3D: voor de golftransformatie vanaf het golfschot tot op ca 40 m daar vandaan (120 m van de dijk).
2. OpenFOAM (versie v1812): voor de golftransmissie door de goot en het breken van de golven op de dijk, inclusief de golfklap, de golfoploop en de golfneerloop.

Er is een overgangsgebied van deze numerieke modellen tussen 40 en 90 m van het golfschot (tussen 120 en 70 m van de dijk) in de vorm van een relaxatie-zone (Jacobsen et al 2011, en Jacobsen et al 2018). Voor beide geldt dat er gerekend wordt in een tweedimensionaal domein (horizontaal haaks op de dijk en verticaal).



Figuur 5.11 Met OceanWave3D berekende golven bij het golfschot en de overeenkomstige golven in de Deltagoot (proef K1\_12)

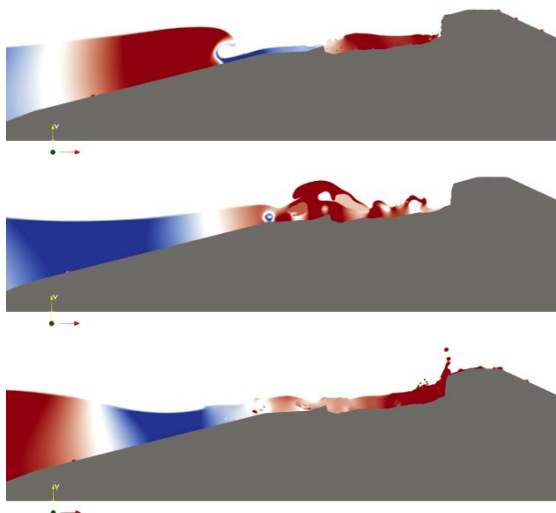
OceanWave3D is een numeriek model dat het voortplanten van niet-lineaire golven op een variabele diepte berekent in het tijdsdomein, zie Figuur 5.11. Het is gebaseerd op het oplossen van de 3D-Laplace vergelijking met een eindige elementenmethode. Het beschouwt de bewegende vloeistof als een potentiaalstroming. Het genereren van de golven aan de zeezijde wordt gerealiseerd met een methode die de beweging van het golfschot simuleert, waarvoor dezelfde beweging als het golfschot in de Deltagoot is gekozen.

Achtergronden van dit numerieke model zijn beschreven door Bingham et al (2007) en Engsig-Karup et al (2008).

OpenFOAM is een numeriek model van het type CFD (Computational Fluid Dynamics). Het wordt hier gebruikt om de brekende golven op het dijktaalud te berekenen. Het gaat daarbij vooral om de druk op de klei als gevolg van golfklappen.

OpenFOAM berekent het breken van de golven door de Navier-Stokes formules op te lossen met gebruikmaking van een Reynolds gemiddelde, waarbij tevens gewerkt wordt met een 'Volume of Fluid'-methode. Dat laatste houdt in dat de cellen in het rekendomein een bepaalde vullingsgraad hebben. De cellen boven de waterlijn zijn leeg, de cellen onder de waterlijn zijn geheel gevuld, en rond de waterlijn zijn ze deels gevuld. De methode is zo opgezet dat er geen gesloten waterlijn hoeft te zijn, maar dat ook rondvliegend water gemodelleerd kan worden. Dit is te zien in Figuur 5.12, dat drie momenten in een brekende golf toont.

Er wordt gebruik gemaakt van het turbulentiemodel van Larsen & Fuhrman (2018) (Stabilised K-omega SST turbulence model). Het rekent met onsamendrukbaar water, maar er zijn wel grote luchtbellen van minstens 4 cm in het water als de waterbeweging daar aanleiding toe geeft.



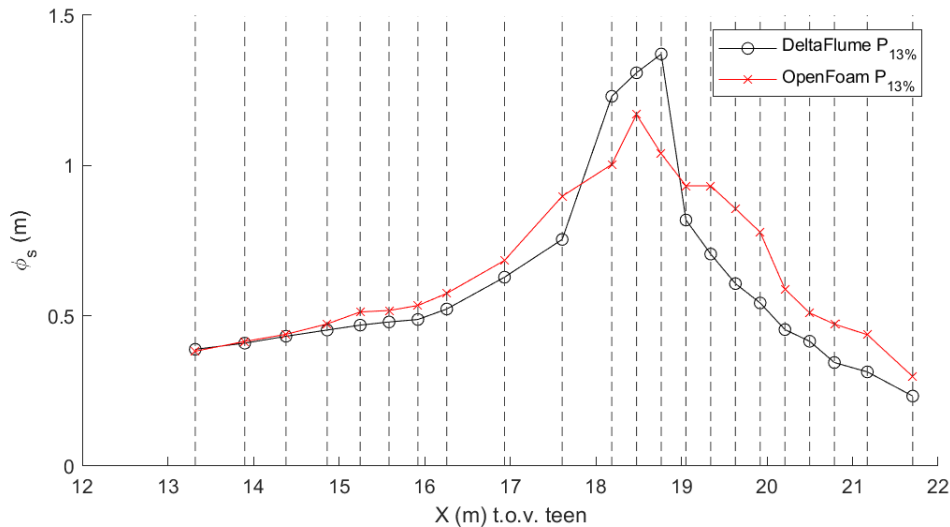
*Figuur 5.12 Drie momenten tijdens het breken van een golf op de dijk met een erosiekuil op het boventalud.*

De waterbeweging zoals berekend met OpenFOAM is geverifieerd aan de hand van Deltagootproeven met een asfalttalud met helling van 1:3,6 (Smale en Jacobsen, 2020). Deze dijk was uitgerust met een groot aantal drukopnemers in het talud waarmee gedurende de proeven de golfdruk op het talud is gemeten (Klein Breteler 2018).

In het huidige onderzoek zijn deze proeven specifiek gebruikt om te controleren of de golfdruk op het talud met OpenFOAM goed wordt berekend (brekende golven op 1:4 talud). Daarbij zijn dezelfde instellingen gebruikt als voor de gepresenteerde berekeningen in paragraaf 5.2.3 tot en met 5.2.5. Een voorbeeld van de gemeten en berekende drukken is gegeven in Figuur 5.13, namelijk proef T03 met  $H_{m0} = 1,03$  m,  $T_p = 4,12$  s en waterdiepte van 5,5 m. Van elke golf is de hoogste druk op elke locatie bepaald en vervolgens is van alle golven het gemiddelde van

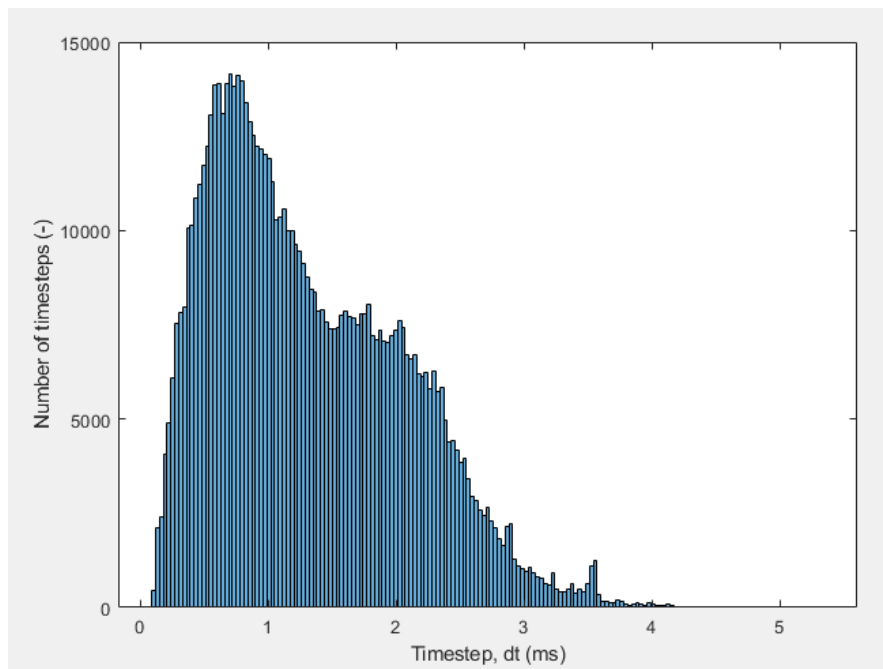
de hoogste één derde deel van de drukken in deze figuur weergegeven. Hierin is te zien dat de orde van grootte van de berekende drukken vrij goed klopt met de metingen in de Deltagoot. De topwaarde (piekdruk), die in dit onderzoek gebruikt is, verschilt slechts 15%.

Vanwege de opzet van het huidige onderzoek, waarin de rekenresultaten alleen onderling worden vergeleken, zijn beperkte afwijkingen tussen de werkelijkheid en de rekenresultaten geen bezwaar.



Figuur 5.13 Vergelijking tussen gemeten drukken op een talud van 1:3,6 in de Deltagoot en berekende drukken met OpenFOAM

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een celgrootte van  $8 \times 8 \text{ cm}^2$ , die verfijnd is bij de klei naar  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ . De tijdstap in de berekeningen is in de golfklappen wat kleiner gekozen dan in de rest van de golfcyclus. De tijdstapgrootte varieerde doorgaans tussen 0,2 ms en 3 ms (0,3 tot 5 kHz), zie Figuur 5.14.

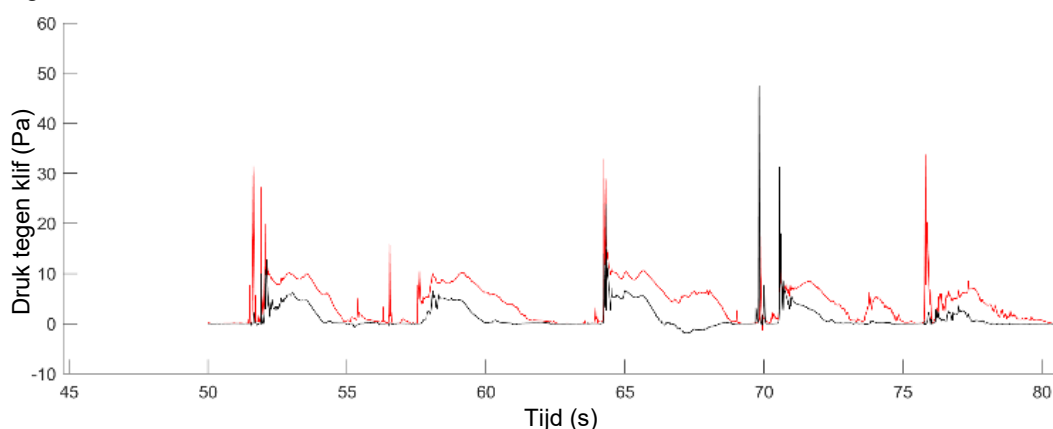


Figuur 5.14 Toegepaste tijd stapgrootte in de berekeningen

Zeer kortdurende of zeer lokaal optredende drukpieken zijn eerst uit de resultaten gefilterd, omdat deze het gevolg kunnen zijn van spetters die geen substantiële erosie kunnen veroorzaken. Er is gebruik gemaakt van een voortschrijdend gemiddelde in de tijd over 0,025 s en in de plaats over 12 cm (3 cellen). Deze waarden zijn gekozen op basis van diverse berekeningen met verschillende keuzes hieromtrent en is dit gekozen omdat het de ongewenste piekjes uit het signaal verwijdert, maar de echte golfklappen niet beïnvloedt. Steeds is de grootste golfklap per golf geselecteerd.

### 5.2.3 Stap 1: Deltagootproeven narekenen

Als eerste stap zijn de Deltagootproeven nagerekend met OpenFOAM. Dit levert de golfklapdruk tegen de klei, zie Figuur 5.15. Dit kon niet gemeten worden in de Deltagoot, omdat het erosie-oppervlak continu wijzigt en meetinstrumenten de erosie beïnvloeden. Van alle berekende golfklapdrukken wordt per locatie de significante waarde geselecteerd (gemiddelde van het hoogste éénderde deel). In Figuur 5.16 is een voorbeeld gegeven van de resultaten voor een specifieke proef. Als het aantal geïdentificeerde piekdrukken lager is dan het aantal golven, dan is voor het berekenen van de significante waarde de reeks piekdrukken eerst aangevuld met nullen.



Figuur 5.15 Voorbeeld van een tijdsignaal van de druk op twee plaatsen tegen de klif

De stijghoogte als gevolg van de golven zoals weergegeven in Figuur 5.16 is als volgt uit de golfdruk berekend:

- onder de stilwaterlijn: 
$$\phi = \frac{p}{\rho g} - z \quad (21)$$

- boven de stilwaterlijn: 
$$\phi = \frac{p}{\rho g} \quad (22)$$

Met (zie ook symbolenlijst op bladzijde 6):

$\phi$  = stijghoogte als gevolg van de golven (exclusief hydrostatische druk) (m)

$p$  = druk als gevolg van golven (exclusief hydrostatische druk) (Pa)

$\rho$  = soortelijke massa van het water ( $\text{kg/m}^3$ )

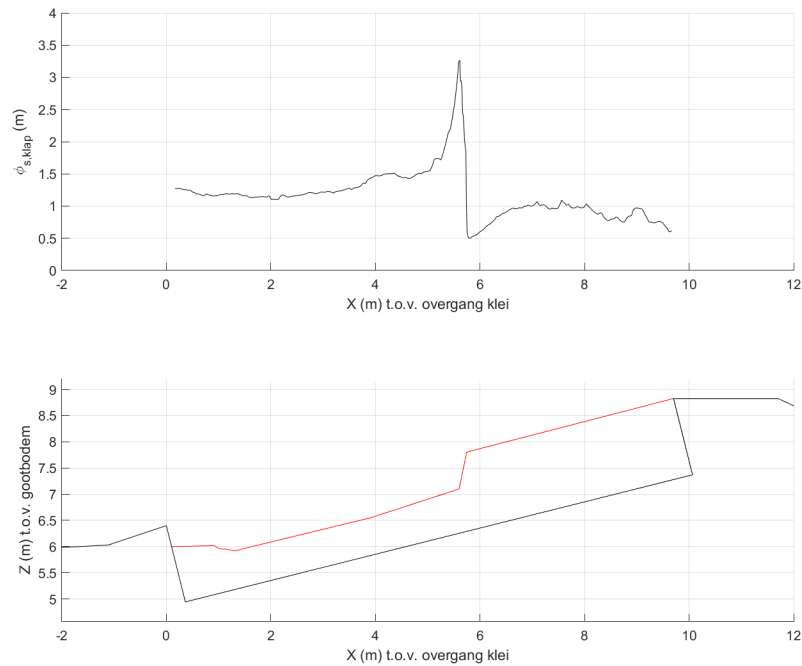
$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$z$  = verticale coördinaat (m)

Voor de berekeningen zijn de erosieprofielen een beetje gladgestreken om te voorkomen dat het rekenmodel veel tijd bezig is met weinig relevante hobbeltjes in het profiel. De gehanteerde profielen zijn te zien in bijlage A.

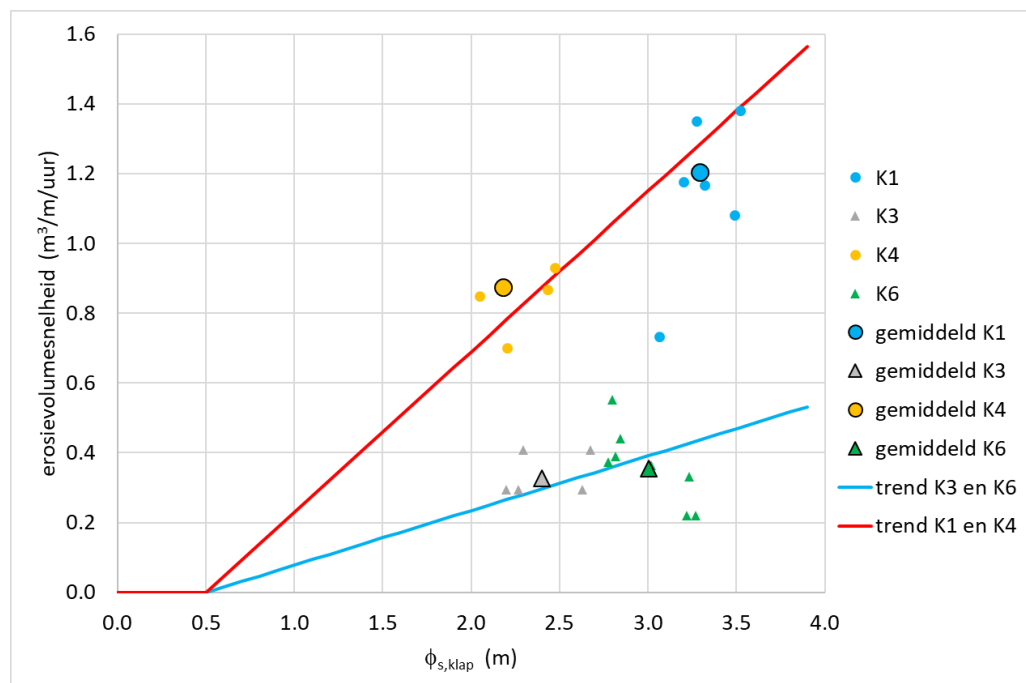
De berekeningen zijn uitgevoerd met ongeveer 200 onregelmatige golven, die zeer vergelijkbaar zijn met die in de Deltagoot, waarbij gedurende deze hele periode op elke locatie de golfdruk is berekend. In Figuur 5.16 is onderin de geometrie gegeven van de betreffende

proef en is in de bovenste figuur voor elke locatie de stijghoogte gegeven als gevolg van de golven. Hier is de significante waarde gegeven. In de figuur is duidelijk te zien dat de erosieklijf de grootste golfbelasting te verwerken krijgt. Tijdens de Deltagootproeven is geconstateerd dat daar ook de meeste erosie optreedt.



Figuur 5.16 Significante golfdruk op de klei, omgerekend naar stijghoogte, als functie van de locatie (geschematiseerd profiel van K1\_11)

De resultaten van het narekenen van de proeven in de Deltagoot en met OpenFoam zijn gegeven in Bijlage B1.



Figuur 5.17 Relatie tussen de stijghoogte in de golfklappen tegen de klif (berekend met OpenFoam) en de erosiesnelheid (gemeten in de Deltagoot)

In Figuur 5.17 zijn de gemeten erosiesnelheden uitgezet tegen de resultaten van de numerieke berekeningen met OpenFoam. Hoewel er ook berekeningen zijn uitgevoerd met kleiprofielen uit de eerste fase van het erosieproces, zijn hier alleen de punten gegeven die betrekking hebben op de tweede fase. De rekenresultaten zijn licht gecorrigeerd als er verschillen waren tussen de golfcondities in de Deltagoot en in de berekeningen met OpenFoam.

In deze figuur is te zien dat er een behoorlijke spreiding is in de punten en daarom is ook het gewogen gemiddelde van elke proevenserie weergegeven, waarbij de duur van de proef is gebruikt in de weging (gemiddelde =  $\Sigma(\text{erosiesnelheid per proef maal de proefduur})/\Sigma(\text{proef duur})$ ). Aan de hand van dit gewogen gemiddelde is te zien dat de kleisoorten van de Lauwersmeerdijk en Blija (proevenseries K1 en K4) bij een bepaalde piekdruk tegen de klif veel sneller eroderen dan de klei van Holwerd (proevenserie K3 en K6). Ook tijdens het uitvoeren van de Deltagootproeven en in de analyse van de eerste fase van het erosieproces was dit verschil al opgevallen.

Het is te verwachten dat er een bepaalde minimale golfklapdruk tegen de klif nodig is om enige erosie te bewerkstelligen. Mourik (2020) had uit zijn metingen geconcludeerd dat dit minimum ligt bij  $\phi_{s,klap} = 0,5$  m. Ook nu lijkt dit een geschikt minimum te zijn. Vandaaruit zijn lijnen getrokken door de gewogen gemiddelden van de proevenseries, resulterend in de volgende formules:

- Klei met gras van Lauwersmeerdijk en Blija (K1 en K4):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,46 \cdot (\phi_{s,klap} - 0,5) \quad (23)$$

- Klei met gras van Holwerd (K3 en K6):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,16 \cdot (\phi_{s,klap} - 0,5) \quad (24)$$

- als  $\phi_{s,klap} \leq 0,5$ :  $\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0$  (25)

met:

$\phi_{s,klap}$  = significante waarde van de piekdruk in de golfklappen: gemiddelde van hoogste één derde deel van de golfklappen tegen de klif van het erosiegat (als het aantal berekende golfklappen minder is dan het aantal golven, dan is de lijst met waarden aangevuld met nullen en is daarna de significante waarde berekend) (m)

$V_e$  = erosievolume per meter dijklengthe, bepaald ter plaatse van de grootste erosiediepte of het grootste erosievolume ( $\text{m}^3/\text{m}$ )

$\partial V_e/\partial t$  = erosiesnelheid, gedefinieerd als de verandering van het erosievolume per uur ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{uur}$ )

Destijds heeft Mourik (2020) een half zo grote waarde van  $\phi_{s,klap}$  berekend bij een bepaalde erosiesnelheid dan nu het geval is. Aan de hand van het narekenen van twee proeven uit het rapport van Mourik (2020) is gebleken dat OpenFOAM ongeveer 20% hogere drukken berekent dan het in 2015 gebruikte rekenmodel ComFlow. Verder heeft Mourik gebruik gemaakt van proeven zonder gras op het talud (kale klei), waardoor de erosie een stuk sneller gaat.

Door Mourik (2020) was een kwadratisch verband tussen de erosiesnelheid en de golfklapdruk gevonden. In de huidige metingen is hier geen bewijs voor gevonden en terugkijkend naar de metingen die Mourik heeft gebruikt, had hij ook een lineair verband kunnen kiezen gezien de grote spreiding in de meetpunten. Later zal blijken (Figuur 5.28) dat met een lineair verband de huidige trend mooi aansluit op de meetpunten van Mourik.



In het vervolg van de analyse wordt verder gegaan met formule (23) voor alle kleisoorten, omdat nog niet helder is hoe in de praktijk het verschil tussen de klei van Holwerd en de klei van Lauwersmeerdijk en Blija kan worden vastgesteld. Zodra een goede categorisering van de klei in relatie tot de erosiesnelheid onder golfbelasting mogelijk is, kan ook gebruikgemaakt worden van formule (24).

De neiging bestaat om alleen te focussen op de twee gemiddelde meetpunten in Figuur 5.17 en te constateren dat er weinig meetpunten zijn. Deze meetpunten zijn echter het resultaat van vele proeven per kleisoort. Bij elke gerapporteerde proef is er een bepaalde erosiesnelheid vastgesteld en omdat de klei geen homogene samenstelling heeft, maar van locatie tot locatie afwijkt van het gemiddelde, is hiermee een veel betrouwbaarder resultaat verkregen dan wanneer slechts één proef per kleisoort zou zijn uitgevoerd. De variatie in alle proeven en het feit dat slechts twee soorten klei in de formule zijn meegenomen, is meegewogen bij het bepalen van de standaardafwijking (onzekerheid) van de modelcoëfficiënt in paragraaf 6.3.2.

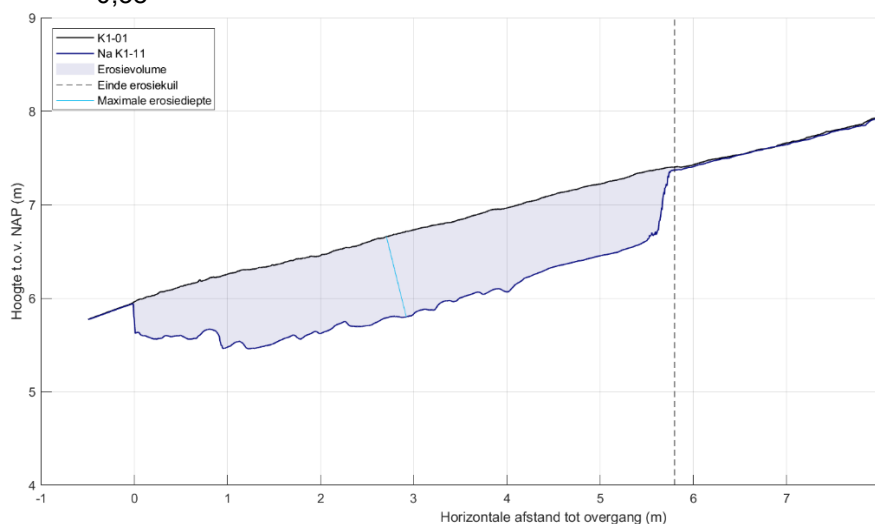
In bijlage D is een alternatieve relatie afgeleid op basis van alle proevenseries. Dit geeft een lagere gemiddelde erosiesnelheid, maar een grotere onzekerheid. Toepassing van deze lagere gemiddelde waarde met grotere onzekerheid leidt uiteindelijk tot een kleinere erosiediepte, zoals te zien is in bijlage G.3.

#### 5.2.4 Step 2a: OpenFOAM berekeningen met diverse golfcondities en waterstanden

In de tweede stap van de procedure die moet leiden tot een erosieformule zijn er met OpenFOAM een aantal berekeningen uitgevoerd met andere waterstand, golfhoogte en golfsteilheid dan toegepast in de Deltagoot. Hiermee is de invloed van de deze aspecten van de hydraulische belasting op de grootte van de erosiesnelheid bepaald.

De volgende variaties zijn doorgerekend:

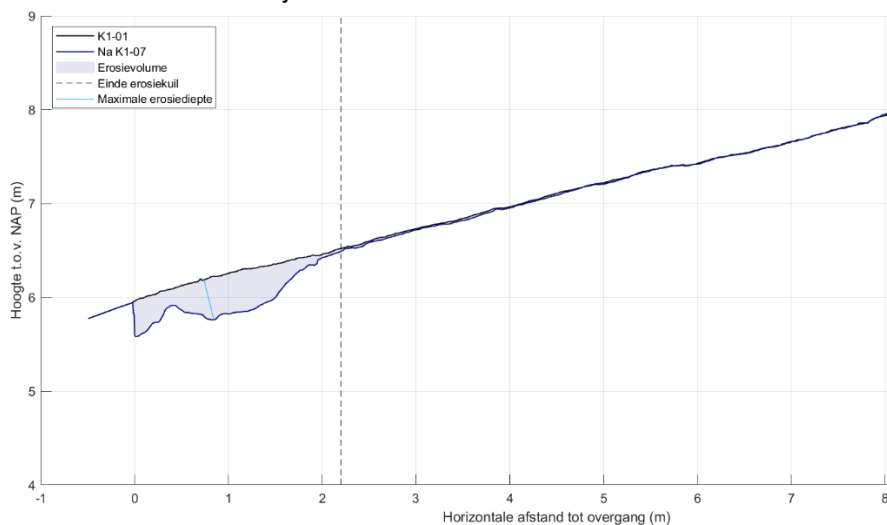
- significante golfhoogte:  $H_{m0} = 1,4; 1,7; 2,0; 2,3; 2,6$  m
- golfsteilheid:  $s_{op} = 0,022; 0,028; 0,034; 0,038; 0,042; 0,048$
- waterstand ten opzichte van de overgang  $h_{overgang}/H_{m0} : -0,63; -0,38; -0,20; -0,13; 0,13; 0,38$



Figuur 5.18 Erosieprofiel na proef K1\_11, dat gebruikt is voor de OpenFOAM berekeningen

In Bijlage B2 zijn de resultaten van de berekeningen met OpenFOAM gegeven. In de laatste kolom zijn berekende waarden van de significante piekdruk tegen de klif omgerekend naar een erosiesnelheid met formule (23).

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het erosieprofiel van na proef K1\_11, zie Figuur 5.18, en voor de berekeningen met diverse golfsteilheden ook met het erosieprofiel van na proef K1\_07, zie Figuur 5.19. De berekeningen met een grotere golfhoogte en lagere waterstand zijn met een dieper voorland berekend om te voorkomen dat de grootste golven breken voordat ze de dijk bereiken.



Figuur 5.19 Erosieprofiel na proef K1\_07, dat gebruikt is voor de OpenFOAM berekeningen

In de paragraaf 5.2.6 zijn op basis van deze rekenresultaten formules afgeleid voor de erosiesnelheid als functie van de waterstand ten opzichte van de overgang en de golfcondities.

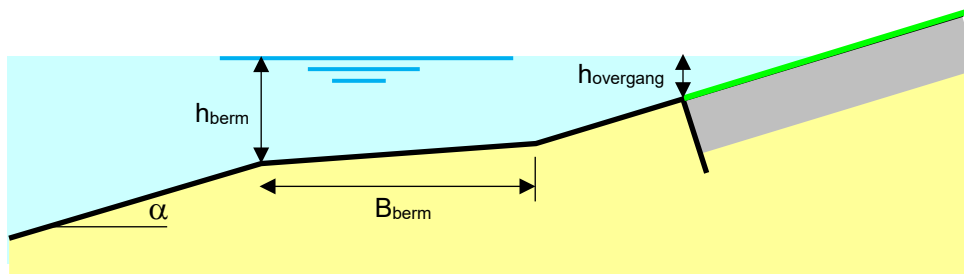
### 5.2.5 Stap 2b: OpenFOAM berekeningen met diverse dijkgeometrieën

In het tweede deel van stap 2 zijn berekeningen uitgevoerd met OpenFoam waarbij de geometrie van de dijk is gevarieerd. De volgende variaties zijn doorgerekend:

- Waterdiepte boven de berm:  $h_{\text{berm}}/H_{m0} = -0,12; 0,08; 0,28; 0,48; 0,68$  (bij  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 1,5$ ,  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} = -0,20$  en  $\tan\alpha = 0,25$ )
- breedte van de berm:  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 0,75; 1,5; 2,5; 4,0$  (bij  $h_{\text{berm}}/H_{m0} = 0,12$ ,  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} = -0,20$  en  $\tan\alpha = 0,25$ )
- taludhelling: 1:3; 1:3,5; 1:4,0; 1:5; 1:6 (zowel onder- als boventalud)

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een waterstand van +6,0 m boven de bodem, golfhoogte  $H_{m0} = 2,0$  m en een golfsteilheid  $s_{op} = 0,042$ .

De geometrie van de berm is gedefinieerd zoals in Figuur 5.20 is aangegeven. Dat betekent dat een berm onder water een positieve waarde heeft van  $h_{\text{berm}}$ . Dit is hetzelfde gedefinieerd als  $h_{\text{overgang}}$ , die ook positief is als de overgang onder water zit.



Figuur 5.20 Definitie van de waterdiepte boven de berm  $h_{\text{berm}}$ , de waterdiepte boven de overgang  $h_{\text{overgang}}$  en de breedte van de berm

Voor de berekeningen ten behoeve van de invloed van de bermbreedte en bermhoogte is gebruik gemaakt van het erosieprofiel van na proef K1\_11, zie Figuur 5.18, en van na proef K1\_07, zie Figuur 5.19. Deze erosieprofielen zijn representatief voor alle proeven. De trend voor deze twee proeven was onderling niet wezenlijk anders en dat geeft vertrouwen dat het niet nodig is om deze trend vast te stellen voor alle gemeten erosieprofielen.

De helling van de berm was steeds 1:18, conform het profiel van proevenserie K1 en K4. De geometrie van de doorgerkende dijken is gegeven in Bijlage B3.

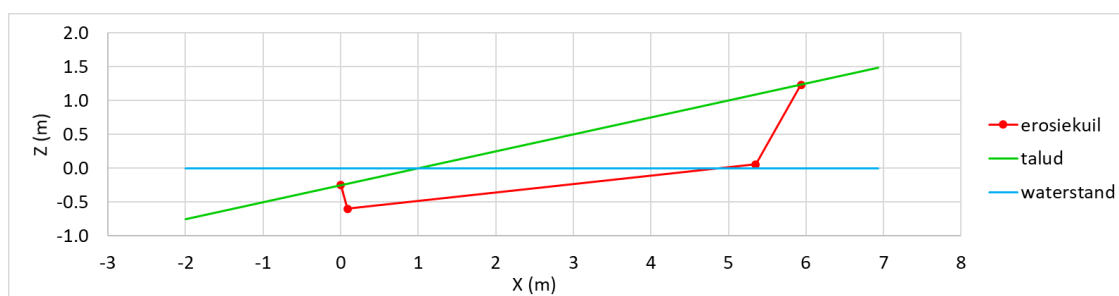
Voor het berekenen van de invloed van de taludhelling zijn kunstmatige erosieprofielen doorgerkend. Deze zijn bepaald met de formules uit paragraaf 5.1.3 en de parameters uit Tabel 5-1. De terrashelling voor een boventaludhelling van 1:4 en 1:5 volgt uit de huidige metingen, namelijk respectievelijk  $\tan\alpha_{\text{terras}} = 1/8$  en  $1/10$ . Bij gebrek aan informatie is de terrashelling bij een boventalud van 1:6 gelijk genomen aan die van 1:5. De terrashelling bij steilere taluds dan 1:4 is gelijk genomen aan die van 1:4.

Het totale erosievolume is bij de flauwe taluds kleiner gekozen dan de steile taluds, conform de trend die gekwantificeerd is door Mourik (2020), namelijk een erosiesnelheid die ongeveer evenredig is met  $(\tan\alpha)^2$ . De gebruikte waarden zijn vermeld in Tabel 5-1.

Verder is er voor de kwantificering van de invloed van de taludhelling gerekend met een golfhoogte van  $H_{m0} = 2,0$  m, golfsteilheid van  $s_{op} = 0,042$  en een waterstand van 25 cm boven de overgang.

Talud	terrashelling	klifhelling	Erosievolume (m <sup>3</sup> /m)
1:3	1:8	2:1	7,2
1:3.5	1:8	2:1	5,6
1:4	1:8	2:1	4,0
1:5	1:10	2:1	2,8
1:6	1:10	2:1	2,0

Tabel 5-1 Karakteristieken van de erosieprofielen die doorgerkend zijn voor de kwantificering van de invloed van de taludhelling



Figuur 5.21 Voorbeeld van kunstmatig erosieprofiel bij  $\tan\alpha = 1/4$  dat is doorgerkend voor het bepalen van de invloed van de taludhelling

In Bijlage B2 zijn de resultaten van de berekeningen met OpenFOAM gegeven. In de laatste kolom van de tabellen zijn berekende waarden van de significante piekdruk tegen de klif omgerekend naar een erosiesnelheid met formule (23).

In de paragraaf 5.2.6 zijn op basis van deze rekenresultaten formules afgeleid voor de erosiesnelheid als functie van deze aspecten van de geometrie van de dijk.

### 5.2.6 Stap 3: Formules afleiden voor de erosiesnelheid

Op basis van de berekende erosiesnelheid uit de tabellen uit Bijlage B2 zijn eerst formules afgeleid voor de invloed van de verschillende aspecten van de hydraulische belasting en dijkgeometrie afzonderlijk. Aan het eind van de paragraaf zijn deze formules samengevoegd.

#### Invloed van golfhoogte

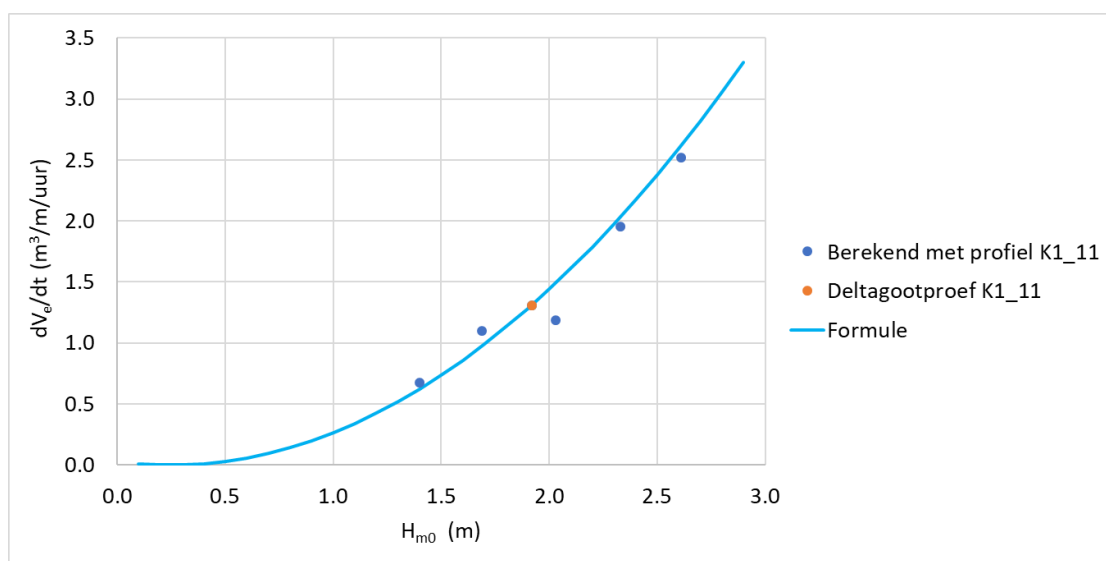
De met OpenFoam berekende invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid is te zien in Figuur 5.22. De punten in de figuur zijn licht gecorrigeerd voor kleine afwijkingen in de golfsteilheid, de dimensieloze waterstand ten opzichte van de overgang ( $h_{\text{overgang}}/H_{m0} = 0,10$  à  $0,18$ ) en invloed van de dimensieloze bermbreedte ( $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 1,2$  à  $2,1$ ).

De volgende formule sluit goed aan op de punten:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,47 \cdot (H_{m0} - 0,25)^2 \quad \text{als } H_{m0} > 0,25 \text{ m} \quad (26)$$

Er zijn ook enkele proeven in de Deltagoot uitgevoerd met een kleinere golfhoogte om zo te meten wat de invloed is van de golfhoogte op de erosiesnelheid. Dit zijn de proeven K4\_12 en K6\_03. Uit deze proeven is helaas de invloed maar moeizaam af te leiden, omdat de erosiesnelheid ook bij constante golfhoogte erg varieert. Zo zien we bij proef K4\_12 dat de erosiesnelheid zelfs toeneemt bij afnemende golfhoogte, terwijl bij K6\_03 de erosiesnelheid een factor drie afneemt. Dit betekent dat er alleen een trend uit te proeven te halen is als er meerdere proeven achter elkaar bij een lagere golfhoogte zijn uitgevoerd, zodat het gemiddelde kan worden beschouwd.

Daarom wordt de formule alleen gebaseerd op de berekeningen met OpenFoam (Figuur 5.22).



Figuur 5.22 Invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid, zoals berekend met OpenFoam

#### Invloed van golfsteilheid

De relatie tussen de golfsteilheid en de met OpenFoam berekende erosiesnelheid is te zien in Figuur 5.23. De golfsteilheid is hier als volgt gedefinieerd:

$$s_{op} = \frac{H_{m0}}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \quad (27)$$

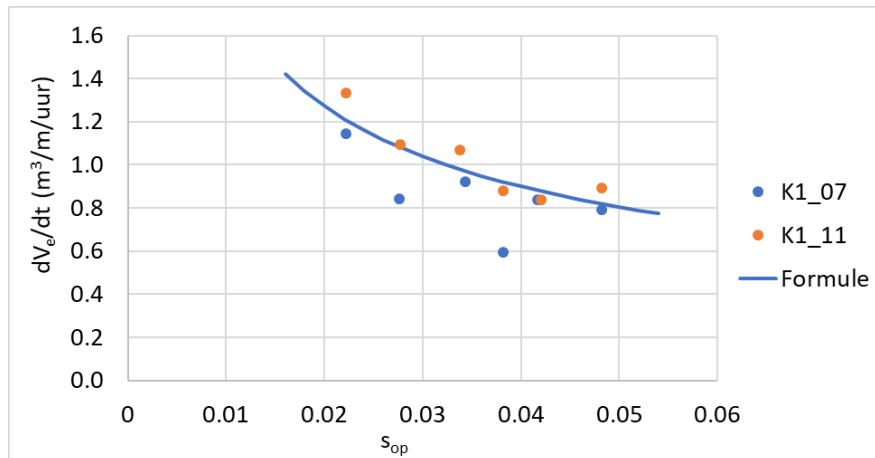
Met:

$H_{m0}$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$s_{op}$  = golfsteilheid (-)



Figuur 5.23 Invloed van de golfsteilheid op de erosiesnelheid, zoals berekend met OpenFoam (de Deltagootproeven hadden een waarde van  $s_{op} = 0,042$ )

De punten in de figuur zijn licht gecorrigeerd voor kleine afwijkingen in de golfhoogte.

De volgende formule sluit goed aan op de punten:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \frac{0,18}{\sqrt{s_{op}}} \quad (28)$$

Slechts twee van de 12 punten wijken wat af van deze trend.

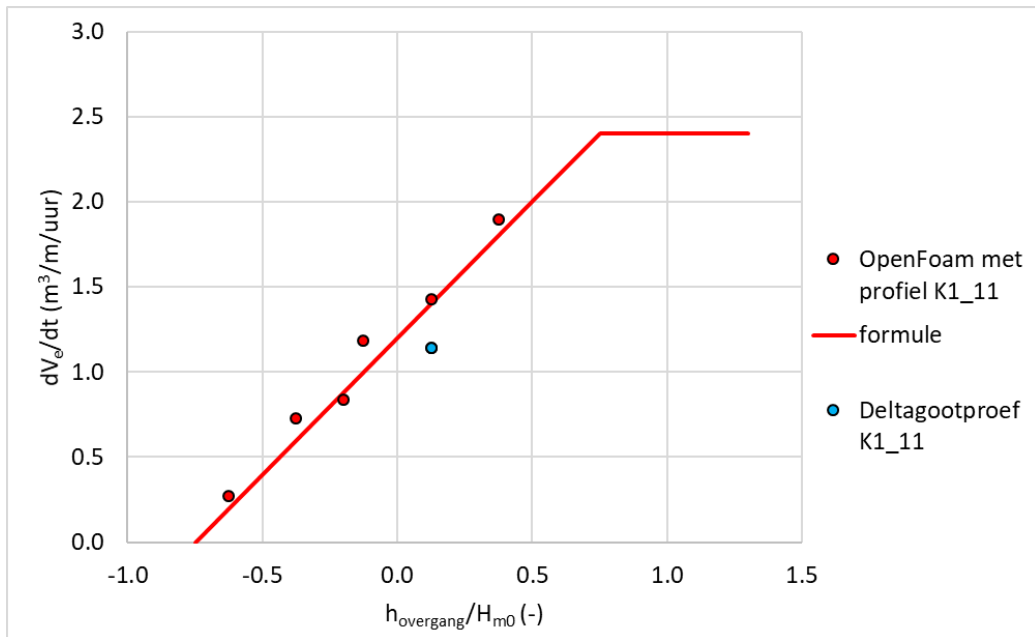
### Invloed van de waterstand ten opzichte van de overgang

De trend in de rekenresultaten bij de verschillende waterstanden ten opzichte van de overgang ( $h_{overgang}/H_{m0}$ ) is getoond in Figuur 5.24 (licht gecorrigeerd voor afwijkingen in de golfhoogte en golfsteilheid). Een positieve waarde in deze figuur betekent dat de overgang onder de waterlijn zit (zie Figuur 5.20).

Duidelijk is te zien dat de erosiesnelheid toeneemt met toenemende waterstand ten opzichte van de overgang. Hoe hoger de waterstand hoe meer golfklappen er tegen de erosieklif komen.

Als de overgang ver boven water zit (negatieve waarden in de figuur) kunnen de golfplooptongen de erosieklif nauwelijks meer bereiken. Uit de berekeningen blijkt dat bij  $h_{overgang}/H_{m0} = -0,75$  de afstand tussen de brekende golven en de erosieklif zo groot is dat de belasting vrijwel verdwenen is.

Anderzijds wordt aangenomen dat als de waterstand hoog boven de overgang staat, namelijk  $h_{overgang}/H_{m0} > ca 0,75$ , de situatie vergelijkbaar is met een talud zonder harde bekleding (gras op klei op het gehele talud). Dat betekent dat vanaf dat niveau de trend horizontaal loopt. Daarom is in de figuur de trendlijn horizontaal gemaakt vanaf  $h_{overgang}/H_{m0} > 0,75$ . Aan het eind van deze paragraaf wordt gecontroleerd of hiermee een goede aansluiting gevonden wordt met de proeven van Mourik (2020), die uitgevoerd zijn met een zeer hoge waterstand ten opzichte van de overgang (Figuur 5.28).



Figuur 5.24 Invloed van de hoogte van de overgang op de erosiesnelheid, zoals berekend met OpenFoam (de Deltagootproeven hadden een waarde van  $h_{\text{übergang}}/H_{m0} = 0,13$ )

Dit alles is verwerkt in de formule die is afgeleid op basis van deze rekenresultaten:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \min \left( 2,4 ; \max \left( 0 ; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{\text{übergang}}}{H_{m0}} \right) \right) \quad (29)$$

Fysisch gezien zijn er twee processen die relevant zijn voor de erosiesnelheid en die beïnvloed worden door de waterdiepte:

- de golfplooitong die tegen de klif botst
- de golfklappen die in de erosiekuil kunnen doordringen

We zien dat naarmate de waterstanden lager zijn de erosiesnelheid afneemt. Als de waterstand onder het niveau van de overgang is, zal geen enkele golfklap direct de erosieklif kunnen bereiken en komt de erosie dus voornamelijk tot stand door de golfplooitong die tegen de klif botst en daar een lokale golfklap geeft. Hoe lager de waterstand, hoe meer moeite de golfplooitong zal hebben om de klif te bereiken.

Bij de laagst doorgerekende waterstand blijkt de significante golfploop (gemiddelde van hoogste eenderde deel van de oplopen) ongeveer ter plaatse van de klif uit te komen (als het talud in de erosiekuil vereenvoudigd wordt tot een talud met helling van 1:8 dat aansluit op de overgang). Het is daarom logisch dat bij die waterstand er vrijwel geen erosie meer is.

Het is overigens niet gezegd dat voor dit deel van het proces de golfploophoogte de maatgevende parameter is voor het kwantificeren. Het is een combinatie van golfploop, de invloed van het water in de erosiekuil en de kracht waarmee de plooitong de klif belast.

Tijdens de Deltagootproeven, met een waterstand van slechts 25 cm boven de overgang, hebben we gezien dat de erosiesnelheid niet afneemt bij het naar achteren migreren van de klif. Dat komt waarschijnlijk omdat de voet van de klif gedurende het hele erosieproces nauwelijks hoger komt dan de overgang, waardoor de golfplooitong al die tijd even hard tegen de klif botst. Ook het tweede proces, namelijk het doordringen van golfklappen in de erosiekuil, wordt niet beïnvloed door de grootte van de erosie of locatie van de klif.

Bij hogere waterstanden dan toegepast bij de Deltagootproeven zullen er meer golfklappen in de erosiekuil kunnen doordringen. Dat zal een toename van de erosiesnelheid geven en dat is te zien aan de hogere piekdrücken in de OpenFOAM-berekening met de hoogste waterstand.

Op basis van bovenstaande analyse omtrent de belangrijkste processen is het duidelijk dat bij waterstanden onder de overgang de golfoploop van belang is. De golfoploophoogte ten opzichte van de locatie van de klif zal waarschijnlijk de erosiesnelheid bepalen.

Bij waterstanden boven de overgang gaat het om het doordringen van de golfklappen in de erosiekuil. Dat wordt vooral bepaald door de verhouding tussen de waterdiepte boven de overgang en de golfhoogte:  $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ . Gezien het feit dat golfklappen ongeveer een kwart tot een halve golfhoogte onder de waterlijn neerkomen, is het logisch dat bij  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} \approx 0,75$  er geen invloed meer is van de harde bekleding en de overgang.

### Invloed van de bermbreedte

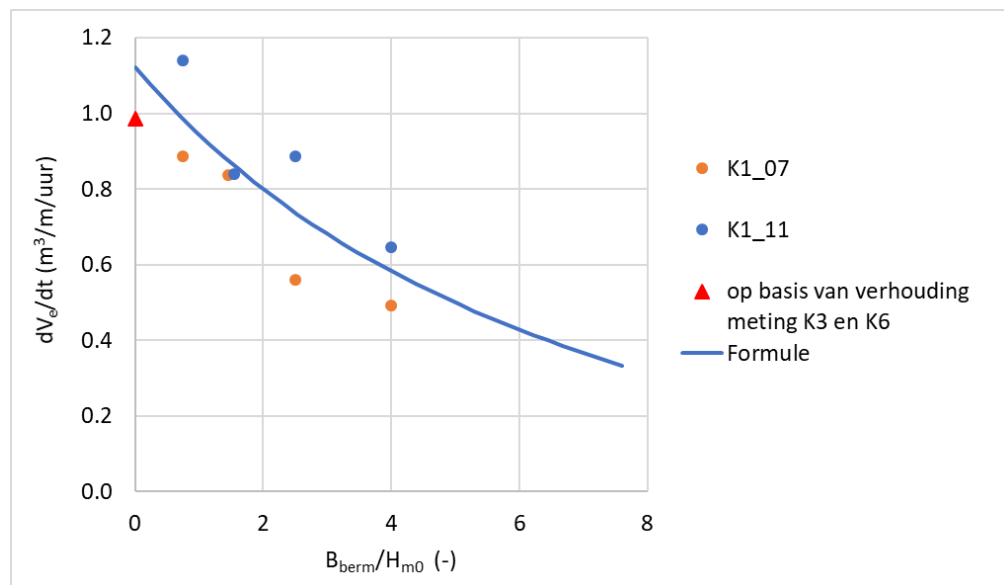
De relatie tussen de bermbreedte en de met OpenFoam berekende erosiesnelheid is te zien in Figuur 5.25. De volgende formule sluit goed aan op de punten:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \frac{13}{B_{\text{berm}} / H_{m0} + 8} - 0,5 \quad (30)$$

Met:

$B_{\text{berm}}$  = breedte van de berm (zie Figuur 5.20) (m)

Er is hier gekozen voor een licht gebogen trend, hoewel een rechte lijn ook door de punten te trekken is, om ervoor te zorgen dat pas bij een zeer brede berm de erosiesnelheid naar nul gaat. Met bovenstaande formule wordt dit bereikt als  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 22$ , terwijl dit bij een lineair verband al het geval zou zijn bij  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 7$  à  $8$ . Dit laatste is fysisch gezien minder logisch.



Figuur 5.25 Invloed van de van de bermbreedte op de erosiesnelheid, zoals berekend met OpenFoam en de gemeten verhouding tussen K3 en K6 (de Deltagootproeven hadden een waarde van  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 1,5$  en  $0,0$ )

Proevenserie K6 is uitgevoerd zonder berm. In vergelijking tot proevenserie K3, die uitgevoerd is met een berm van 3 m was de gemeten erosiesnelheid in de Deltagoot ongeveer 18% groter (gecorrigeerd voor de afwijkingen in de waterstand, golfhoogte en golfsteilheid):

- gemiddelde erosiesnelheid tijdens proef K3\_07 t/m K3\_10:  $0,36 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$

- gemiddelde erosiesnelheid tijdens proef K6\_04 t/m K6\_13: 0,42 m<sup>3</sup>/m/uur

De absolute waarde van de erosiesnelheid kan in dit verband niet gebruikt worden, omdat in paragraaf 5.2 gekozen is voor de erosiesnelheid tijdens de proevenseries K1 en K4 (klei van de Lauwersmeerdijk en van Blija). De klei van Holwerd, die gebruikt is in de proevenseries K3 en K6, was veel erosiebestendiger.

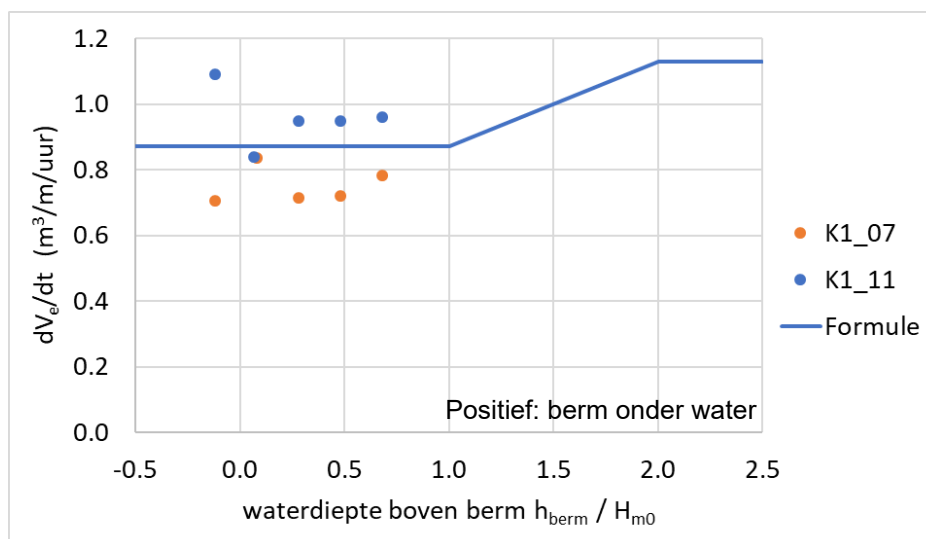
Op basis van deze verhouding is in Figuur 5.25 de driehoek getekend bij  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 0$ , uitgaande van de rekenresultaten bij  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 1,5$ . Dat rekenresultaat was een erosiesnelheid van 0,84 bij  $B_{\text{berm}}/H_{m0} = 1,5$ . Conform bovenstaande verhouding is hier 18% bij opgeteld om de driehoek in de figuur te tekenen. Het blijkt dat dit punt goed past bij de overige punten.

### Invloed van de waterdiepte boven de berm

De bermhoogte is in de formules verwerkt als een waterdiepte boven de berm, zie in Figuur 5.20, zodat een berm onder water een positieve waarde van  $h_{\text{berm}}$  heeft. Het gaat hierbij om het punt aan de zeezijde van de berm.

Binnen de range waarbinnen de berm een invloed zou kunnen hebben op de waterbeweging en de erosiesnelheid zijn berekeningen gemaakt met OpenFoam. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.26.

Het blijkt dat er een verwaarloosbare invloed is van de waterdiepte op de berm binnen deze range.



Figuur 5.26 Invloed van de waterdiepte boven de berm op de erosiesnelheid (de Deltagootproeven hadden een waarde van  $h_{\text{berm}}/H_{m0} = 0,4$ )

Kennelijk is in de gehele doorgerekende range ( $-0,2 < h_{\text{berm}}/H_{m0} < 0,8$ ) de invloed van de berm op de waterbeweging ongeveer hetzelfde. Dit wil niet zeggen dat buiten deze range er ook geen invloed is. Het is te verwachten dat als de waterdiepte op de berm ongeveer  $h_{\text{berm}} = 2H_{m0}$ , de golven deze berm niet meer voelen en het er dus op neerkomt dat de erosiesnelheid hetzelfde zal zijn als zonder berm: bij  $B_{\text{berm}} = 0$ . Volgens Figuur 5.25 en formule (30) zal de erosiesnelheid dus richting  $h_{\text{berm}}/H_{m0} = 2$  groeien van 0.87 naar 1.13 m<sup>3</sup>/m/uur in dit geval.

In de range van  $1 < h_{\text{berm}}/H_{m0} < 2$  wordt een lineair verband verondersteld, zodat de formule voor de invloed van de waterdiepte boven de berm als volgt wordt:



$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \min \left( 1,13 ; \max \left( 0,87 ; 0,25 \cdot \frac{h_{berm}}{H_{m0}} + 0,62 \right) \right) \quad (31)$$

Met:

$h_{berm}$  = waterdiepte op de berm (zie Figuur 5.20)

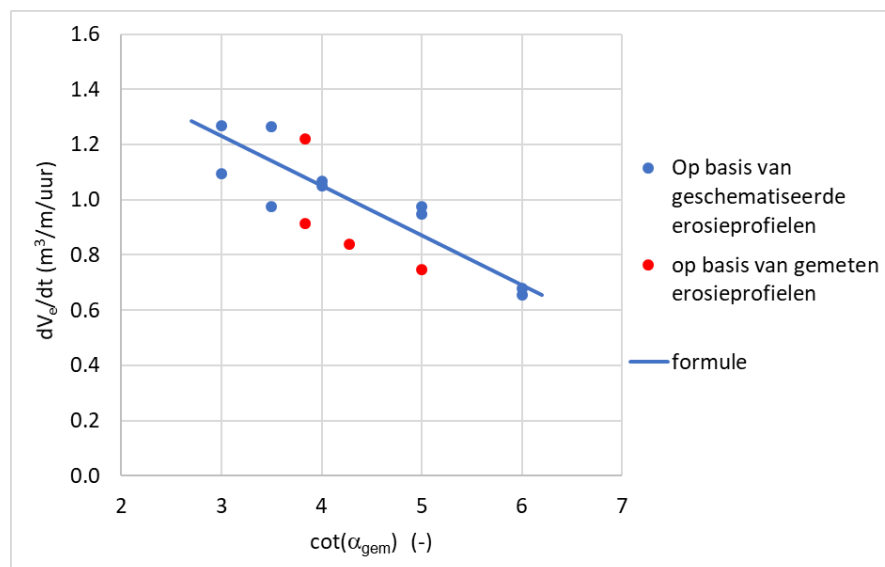
Om te zorgen dat de invloed van de waterdiepte op de berm niet wordt meegeteld als de bermbreedte nul is, moet formule (31) verwerkt worden in formule (30). Dit levert de volgende gecombineerde formule op voor de invloed van de berm:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = \frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \cdot \min \left( 1 ; \max \left( 0 ; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}} \right) \right) + 8} - 0,5 \quad (32)$$

### Invloed van de taludhelling

Om de invloed van de taludhelling te kwantificeren zijn er berekeningen gemaakt met geschematiseerde erosieprofielen (met gelijk onder- en boventalud) en gemeten erosieprofielen tijdens de verschillende proevenseries (erosiefase 2). De met OpenFoam berekende golfklapdruk tegen de klif tijdens de gemeten erosieprofielen is gecorrigeerd voor de invloed van de waterstand, golfcondities en geometrie met bovenstaande formules zodat de resultaten goed vergelijkbaar zijn. De resultaten zijn gegeven in Figuur 5.27. De volgende formule sluit goed aan op de trend van de punten:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 1,77 - 0,18 \cdot \cot(\alpha_{gem}) \quad (33)$$



Figuur 5.27 Invloed van de taludhelling op de erosiesnelheid (de Deltagootproeven hadden een waarde van  $\cot\alpha_{gem} = 3,83$  (K1 en K4),  $4,27$  (K2 en K3) en  $5$  (K6))

Net als voor de eerste fase van het erosieproces wordt er in de analyse weer vanuit gegaan dat de gemiddelde taludhelling tussen  $H_{m0}$  onder de waterlijn en  $H_{m0}$  boven de waterlijn (zonder de breedte van de berm mee te tellen) bepalend is. Met deze definitie is de gemiddelde taludhelling ( $\alpha_{gem}$ ):

- Serie K1 en K4:  $\tan\alpha_{gem} = 0,261$

- Serie K2, K3 en K5:  $\tan\alpha_{gem} = 0,234$
- Serie K6:  $\tan\alpha_{gem} = 0,200$

### Samengestelde formule voor de erosiesnelheid

Bovenstaande formules geven steeds de relatie tussen de erosiesnelheid  $\partial V_e/\partial t$  en één aspect van de hydraulische belasting of de geometrie. Voor de rest gelden de formules slechts voor het volgende (parameterwaarden tijdens vele proeven in de Deltagoot):

- Significante golfhoogte:  $H_{m0} = 2,0$  m
- Golfsteilheid:  $s_{op} = 0,042$
- Waterdiepte boven de overgang:  $h_{overgang} = 0,25$  m
- Bermbreedte:  $B_{berm} = 3,0$  m
- Waterdiepte op de berm (zie Figuur 5.20):  $h_{berm} = 0,78$  m
- Taludhelling boventalud en ondertalud: 1:4

Bij deze omstandigheden was de gemeten erosiesnelheid in de Deltagoot gemiddeld  $1,3$   $m^3/m/uur$ . Alle formules tezamen moeten uiteindelijk voor deze omstandigheden ook hier op uitkomen. Alle formules worden daarom omgewerkt naar een invloedsfactor ten opzichte van deze situatie. De invloedsfactor is 1 bij bovenstaande waarde van de parameter:

- Invloed golfhoogte:

$$f_{H_{m0}} = \frac{0,47 \cdot (H_{m0} - 0,25)^2}{0,47 \cdot (2 - 0,25)^2} = 0,33 \cdot (H_{m0} - 0,25)^2 \quad \text{als } H_{m0} > 0,4 \text{ m} \quad (34)$$

- Invloed golfsteilheid:

$$f_{s_{op}} = \left( \frac{0,18}{\sqrt{s_{op}}} \right) / \left( \frac{0,18}{\sqrt{0,042}} \right) = \frac{0,20}{\sqrt{s_{op}}} \quad (35)$$

- Invloed waterdiepte boven de overgang:

$$f_{h_{overgang}} = \frac{\min\left(2,4; \max\left(0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{overgang}}{H_{m0}}\right)\right)}{1,2 + 1,6 \cdot 0,125} \quad (36)$$

$$f_{h_{overgang}} = 0,71 \cdot \min\left(2,4; \max\left(0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{overgang}}{H_{m0}}\right)\right) \quad (37)$$

- Invloed bermbreedte en waterdiepte boven de berm:

$$f_{berm} = \frac{\frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}}\right)\right)} + 8} - 0,5}{\frac{13}{\frac{3,0}{2,0} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{0,78}{2,0}\right)\right)} + 8} - 0,5} \quad (38)$$

$$f_{berm} = 0,87 \cdot \left( \frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}}\right)\right)} + 8} - 0,5 \right) \quad (39)$$

- Invloed taludhelling:

$$f_{\alpha} = \frac{1,77 - 0,18 \cdot \cot(\alpha_{gem})}{1,77 - 0,18 \cdot 3,83} = 1,64 - \frac{0,17}{\tan(\alpha_{gem})} \quad (40)$$

Al deze invloedsfactoren tezamen vormen de formule voor het berekenen van de erosiesnelheid voor een brede range van omstandigheden:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 1,3 \cdot f_{Hm0} \cdot f_{Sop} \cdot f_{h\text{-overgang}} \cdot f_{berm} \cdot f_{\alpha} \quad (41)$$

Met het bovenstaande wordt de formule derhalve:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,068 \cdot \frac{(H_{m0} - 0,25)^2}{\sqrt{s_{op}}} \cdot \min\left(2,4; \max\left(0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{overgang}}{H_{m0}}\right)\right) \cdot \left[ \frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}}\right)\right) + 8} - 0,5 \right] \cdot \left(1,64 - \frac{0,17}{\tan(\alpha_{gem})}\right) \quad (42)$$

Hierbij is aangenomen dat de invloed van de verschillende aspecten van de hydraulische belasting en dijkgeometrie bij benadering onderling onafhankelijk zijn. De nauwkeurigheid van deze aanname is met name hoog in de buurt van de situaties uit de diverse Deltagootproeven, maar wordt lager naarmate de omstandigheden hier meer van afwijken.

Deze formule is geldig voor de tweede fase van het erosieproces, als  $d_e > 0,5$  m.

Bij constante belasting en waterstand wordt het erosievolume:

$$V_e = t_{belast} \cdot \frac{\partial V_e}{\partial t} \quad (43)$$

Met:

$t_{belast}$  = Duur van de hydraulische belasting (met constante waterstand en golfhoogte) (uur)

### Vergelijking met Mourik (2020)

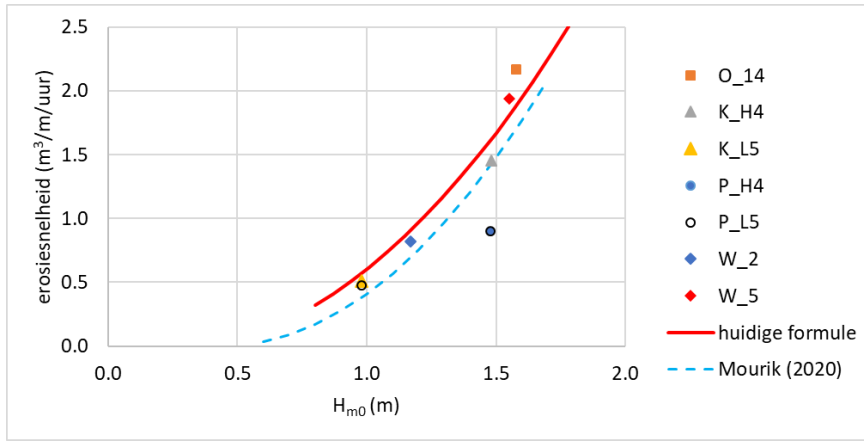
De bovenstaand afgeleide formule is in Figuur 5.28 vergeleken met de formule van Mourik (2020). In deze figuur zijn ook de meetpunten opgenomen van Deltagoot onderzoek dat Mourik gebruikt heeft voor het afleiden van zijn formule. Deze zijn afkomstig van Oosterland (O\_14), Kruiningen (K\_H4 en K\_L5), Perkpolder (P\_H4 en P\_L5) en de Wieringermeerdijk (W\_2 en W\_5).

De huidige formule is hier gebruikt met de gemiddelde waarden van de proeven ( $s_{op} = 0,033$ ) en zonder berm. De formule van Mourik is gebruikt met de gemiddelde waarde van het erosievolume tijdens de proeven ( $V_e = 2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$ ).

De meetpunten uit het huidige onderzoek zijn hierin niet opgenomen, omdat de invloed van de harde bekleding onder de waterlijn invloed heeft op de resultaten die in deze simpele figuur niet verdisconteerd kunnen worden. Daarom is alleen de formule opgenomen (getrokken lijn).

Het blijkt dat de huidige formule goed overeenkomt met die van Mourik en de meetpunten.

In deze figuur zijn overigens de huidige proeven niet opgenomen, omdat deze zijn uitgevoerd met een harde bekleding op het ondertalud.



Figuur 5.28 De huidige formule in vergelijking tot die van Mourik (2020) en Deltagootmetingen die Mourik gebruikt heeft voor het afleiden van zijn formule

### 5.3 Resulterende erosieformules

Het bovenstaande leidt tot de volgende set formules waarmee de erosie van de klei met gras op het boventalud van de Waddenzeedijken kan worden berekend (bij constante golfhoogte en waterstand en loodrechte golfaanval, zie paragraaf 7.2, formule (55)):

- Eerste fase van het erosieproces (zolang  $d_e < 0,50$  m, zie formule (45)):

$$f_{\text{overgang}} = \max\left(0; \min\left(1; 0,44 \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 0,66\right)\right) \quad (44)$$

$$d_e = f_{\text{overgang}} \cdot c_d \cdot \max(0; H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha_{\text{gem}})^{1,5} \cdot t_{\text{belast}} \quad (45)$$

$$V_e = \frac{d_e^2 - d_o^2}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})} + \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{\text{klif}} - \alpha)} \quad (46)$$

$$\frac{d_t}{H_{m0}} = \min\left(0,4 \frac{V_e^{0,25}}{H_{m0}^{1,5}} + \frac{0,7}{H_{m0}}; 2\right) \quad (47)$$

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \max\left(0; \min\left(\frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5; 1\right)\right) \cdot \max\left(0; \min\left(0,75 \cdot \frac{d_e}{H_{m0}}; \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} \sin \alpha \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}); 0,18\right)\right) \quad (48)$$

Formules (46) t/m (48) moeten een paar keer herhaald worden (iteratie). Dit gaat in 2 à 3 iteraties als gestart wordt met  $d_o = 0,75d_e$ .

- Tweede fase van het erosieproces (vanaf  $d_e > 0,50$  m en mits  $H_{m0} > 0,25$  m):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,068 \cdot \frac{(H_{m0} - 0,25)^2}{\sqrt{s_{\text{op}}}} \cdot \min\left(2,4; \max\left(0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}}\right)\right) \cdot \left(\frac{13}{\frac{B_{\text{berm}}}{H_{m0}} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{h_{\text{berm}}}{H_{m0}}\right)\right) + 8} - 0,5\right) \cdot \left(1,64 - \frac{0,17}{\tan(\alpha_{\text{gem}})}\right) \quad (49)$$

$$\frac{d_o}{H_{m0}} = \max \left( 0; \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} + 1,5; 1 \right) \right) \cdot \max \left( 0; \min \left( \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}); 0,18 \right) \right) \quad (50)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) + d_o^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})}{\tan(\alpha_{\text{klijf}} - \alpha)}\right)}} \quad (51)$$

Met:

$\partial V_e / \partial t$  = erosiesnelheid (erosievolumeverandering per meter dijk per uur) (m<sup>3</sup>/m/u)

$H_{m0}$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

$t_{\text{belast}}$  = duur van de hydraulische belasting (met constante waterstand en golfhoogte) (uur)

$C_d$  = coëfficiënt voor de erosie in de eerste fase van het erosieproces (= 0,67 als zandgehalte < 45% en inclusief het effect van eens per vijf jaar een zeer hete en droge zomer)

$d_e$  = grootste diepte in de erosiekuil (haaks op het talud) (m)

$d_o$  = erosiediepte tegen de overgang, zie Figuur 5.3 (haaks op het talud) (m)

$d_t$  = diepte van aansluiting van erosieterras op het buitentalud onder de stilwaterlijn, zie Figuur 5.6 en Figuur 5.7 (m)

$f_{\text{overgang}}$  = invloedsfactor voor de erosiesnelheid in de eerste fase van het erosieproces (-)

$h_{\text{overgang}}$  = waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar het gras, zie Figuur 5.6 en Figuur 5.7 (positief als overgang onder water) (m)

$B_{\text{berm}}$  = breedte van de berm (zie Figuur 5.20)

$h_{\text{berm}}$  = waterdiepte boven de voorrand van de berm (zie Figuur 5.20)

$\alpha$  = taludhelling boventalud (°)

$\alpha_{\text{gem}}$  = gemiddelde taludhelling tussen  $H_{m0}$  onder SWL en  $H_{m0}$  boven SWL (zonder de breedte van de berm mee te tellen) (°)

$\alpha_{\text{terras}}$  = taludhelling van het erosieterras (°)

$\alpha_{\text{klijf}}$  = taludhelling van het erosieklif (°)

Voor de terras- en klifhelling geldt:

- Taludhelling boventalud 1:4 (serie K1 en K4):  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/8$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$
- Taludhelling boventalud 1:5 (serie K2&K3 en K5&K6):  $\tan \alpha_{\text{terras}} = 1/10$  en  $\tan \alpha_{\text{klijf}} = 2$

In de eerste fase van het erosieproces geldt dat als  $H_{m0} \leq 0,5$  m dan geldt  $\partial V_e / \partial t = 0$ . In de tweede fase van het erosieproces is dit het geval als  $H_{m0} \leq 0,25$  m.

De formules van de eerste fase moeten iteratief opgelost worden, maar als gestart wordt met  $d_o = 0,75d_e$  leidt dat meestal in de tweede iteratie al tot een voldoende nauwkeurig resultaat.

Het moment waarop de tweede fase in het erosieproces begint, kan berekend worden met formule (45) als  $d_e = 0,5$  m wordt ingevuld. De startwaarde van  $V_e$  in de tweede fase kan dan berekend worden met formule (46) met  $d_e = 0,5$  m en  $d_o = 0,18H_{m0}$  (bij constante golfhoogte en waterstand).

Deze formules gelden voor de volgende kleikwaliteit, hydraulische belasting en dijkgeometrie (zie paragraaf 6.5):

- Kleikwaliteit (gemiddeld over meerdere monsters uit vele kubieke meters, orde 10 à 20 m<sup>3</sup>):

- gemiddeld zandgehalte < 45% (mits het zand vrij homogeen verdeeld is in de grond en er geen zandlenzen of zandpockets aanwezig zijn), en
  - gemiddelde plasticiteitsindex > 15%
  - gemiddeld lutumgehalte > 10 à 20%, en
  - proctordichtheid > 88% (aanbevolen wordt om bij aanleg naar een hogere proctordichtheid van tenminste 95% te streven bij een consistentieindex van 0,6 à 0,7)
  - De klei mag bij aanleg niet veel te nat verwerkt zijn, omdat dit leidt tot een zeer sterke structurering (zie bijlage H).
  - Daarnaast stelt WV van Rijkswaterstaat dat de resultaten van het huidige onderzoek alleen toegepast mogen worden op waterkeringen rond de Waddenzee, omdat de kennis nog niet voldoende ontwikkeld is om buiten dit gebied toe te passen.
- Graskwaliteit: open of gesloten zode
  - Significante golfhoogte:  $H_{m0} \leq 2,8$  m (equivalente waarde, omgerekend naar loodrechte golfaanval, zie paragraaf 7.2, formule (55))
  - Golfsteilheid ( $s_{op} = H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ ):  $0,020 \leq s_{op} \leq 0,055$  (berekend op basis van de naar loodrechte golfaanval omgerekende significante golfhoogte, zie paragraaf 7.2, formule (55))
  - Diepte van de overgang (van harde bekleding naar kleibekleding met gras) ten opzichte van de stilwaterlijn:  $h_{overgang}/H_{m0} > -0,7$
  - Gemiddelde taludhelling:  $0,16 < \tan\alpha_{gem} < 0,35$
  - Bermbreedte:  $0 \leq B_{berm}/H_{m0} < 5$
  - Bermniveau:  $h_{berm}/H_{m0} > -0,5$

De kwaliteit van de klei is niet opgenomen als parameter in de formules, terwijl tijdens de proeven wel gebleken is dat de klei van Holwerd veel beter presteerde dan die van de Lauwersmeerdijk en Blija. Dat is gedaan omdat we op dit moment nog geen goed verband hebben kunnen leggen tussen de invloed van de kleikwaliteit/klei-eigenschappen en de erosiesnelheid (zie ook paragraaf 8.2.3). Daarom is er een vrij grote onzekerheid in de formules opgenomen en zijn bovenstaande grenzen voor het toepassingsgebied ten aanzien van de klei-eigenschappen gesteld, gebaseerd op de slechtste klei (Lauwersmeerdijk).

Voor het lutumgehalte is er geen scherp criterium gegeven, omdat in TAW (1995) beargumenteed is dat deze eigenschap van secundaire invloed is. Als het lutumgehalte vrij laag is (in de buurt van 10%), dan moeten de andere criteria niet te dicht op de grens zitten.

De nauwkeurigheid van bovenstaande formules neemt af naarmate de omstandigheden meer afwijken van de condities en geometrie die in de Deltagoot zijn gebruikt. Het is met name van belang dat de hydraulische belasting in de buurt van het ontwerppunt ruim binnen bovenstaande geldigheidsgebied ligt. Bij dit ontwerppunt is de bijdrage aan de faalkans het grootst en is het dus van belang dat de nauwkeurigheid voldoende groot is.

De waarde van  $d_0$  bepaalt hoe diep het schot bij de overgang van de harde bekleding naar het gras moet worden. Uit Figuur 5.5 blijkt dat de erosie zelden groter wordt dan 50 cm, dus daar moet de diepte op afgestemd worden. Het is verstandig om een aanzienlijk grotere diepte aan te houden voor het schot, om zeker te zijn dat de erosie de overgang niet kan ondermijnen.

Bij het afleiden van de formules is ervan uitgegaan dat er al een klein gat in de grasbekleding aanwezig is bij het begin van een extreme storm. In de Deltagootproeven, waar de formules op gebaseerd zijn, was dit een gat van  $20 \times 20$  cm<sup>2</sup> en 5 cm diep. Als in de praktijk dergelijke beschadigingen voorkomen kunnen worden, zou de standtijd van de grasbekleding uit BM-

Gras-Buitentalud van WBI-2017 bij de standtijd volgens bovenstaande formules opgeteld kunnen worden. Voor de beoordeling van het gras volgens WBI-2017 wordt er feitelijk uitgegaan van een onbeschadigde grasmat, omdat de proeven met de simulatoren, waar de formules op gebaseerd zijn, zijn uitgevoerd zonder beschadigingen. Wel is daarbij vastgesteld dat kleine beschadigingen, zoals schapenpaadjes of muizenholletjes een verwaarloosbare invloed hebben op de standtijd van het gras.

In paragraaf 8.2.1 wordt aanbevolen dit aspect nader te onderzoeken.

De formules zijn gebruikt om de schade na te rekenen die in 1962 is opgetreden aan de dijk van de Emmapolder bij Eemshaven. Nadere details hierover zijn te vinden in bijlage H. Uit de berekeningen blijkt dat de schade goed verklaarbaar is met de formules. De schade aan de Emmapolderdijk is waarschijnlijk relatief snel gegroeid doordat de klei in slechte staat was. De dijk is destijds aangelegd met natte klei van het voorland die onvoldoende is gerijpt en te nat op de dijk is aangebracht. Dit heeft geleid tot een zeer losse structuur, die gemakkelijk kon eroderen.

## 5.4 Vergelijking formules met metingen en OpenFoam-berekeningen

Met de formules uit paragraaf 5.3 zijn alle proeven uit de Deltagoot nog eens nagerekend. Het resultaat is te zien in Figuur 5.29 t/m Figuur 5.32. In deze figuren is de getrokken lijn met de formules berekend voor de eerste fase van het erosieproces. Vervolgens is de tweede fase van het erosieproces berekend vanaf het moment dat de gemeten erosiediepte 50 cm is, zie de gestreepte lijn. Op dat punt is het berekende erosievolume gelijkgesteld aan het gemeten erosievolume, zodat het verloop volgens de berekeningen goed kan worden vergeleken met die van de metingen. Dit verklaart de sprong in het verloop van de berekende resultaten tussen het einde van de getrokken lijn en het begin van de gestreepte lijn.

Steeds is gerekend met  $c_d = 0,55$ , dus zonder het effect van een zeer hete en droge zomer.

In Figuur 5.29 is te zien dat in de eerste fase van het erosieproces de berekeningen goed overeenkomen met de metingen van serie K1. Ook de berekende trend in de eerste fase van het erosieproces in proevenserie K4 komt goed overeen met metingen, behalve dat in de metingen er aan het begin een paar uur vrijwel geen erosie optreedt, waardoor het rekenresultaat een paar uur verschoven ligt ten opzichte van de metingen.

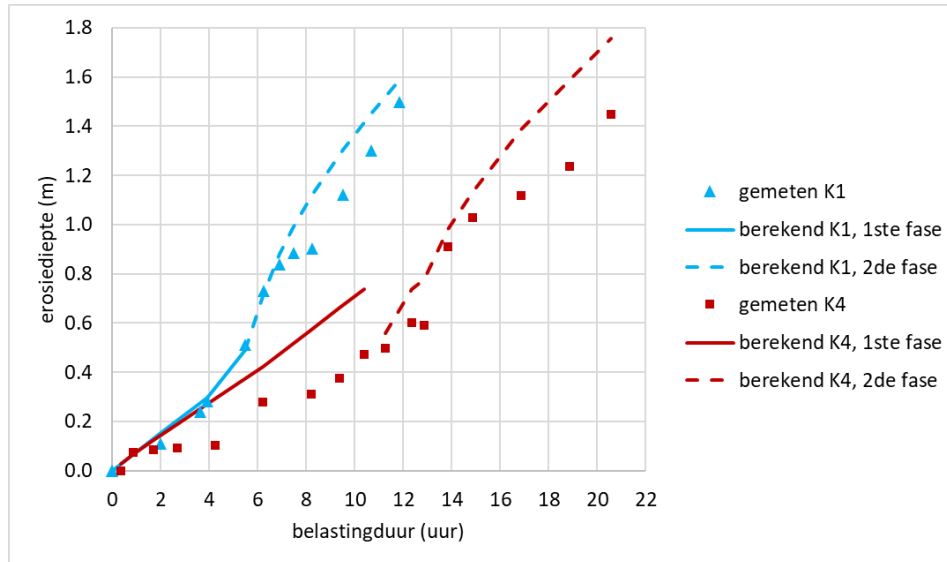
Ook in de tweede fase van het erosieproces sluiten de berekeningen goed aan op de metingen in proevenserie K1. Er is slechts sprake van een lichte overschatting van de erosiediepte. Voor proevenserie K4 is de overschatting echter aanzienlijk groter, ondanks dat deze proeven gebruikt zijn om de formules voor af te leiden. Men zou daardoor een betere overeenstemming verwachten. Deze overschatting is een gevolg van het feit dat de trendlijn voor de invloed van het niveau van de overgang ( $h_{\text{overgang}}/H_{m0}$ ) in Figuur 5.24 ruim 20% hoger ligt dan de meting in de Deltagoot. Dat is namelijk het meetpunt bij  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} = 0,13$  en  $\partial V_e/\partial t = 1,14 \text{ m}^3/\text{m}/\text{uur}$ . Ondanks dat dit het ijkpunt is voor de formules, is toch besloten om de trendlijn door het midden van de puntenwolk te trekken en niet lager te plaatsen (door het meetpunt in de Deltagoot). Er wordt geaccepteerd dat er zo enige veiligheid in de formules zit.

Een vergelijkbare trend is te zien in Figuur 5.30.

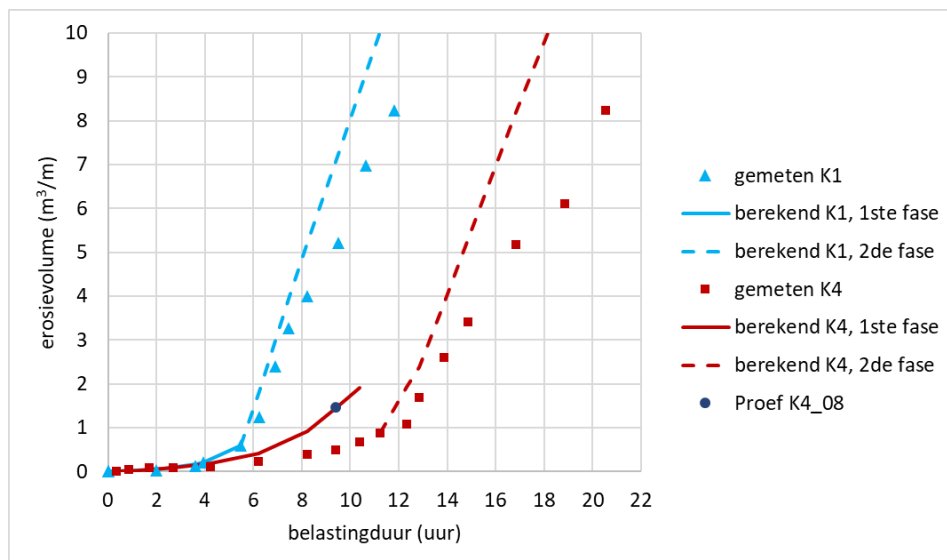
Als de onzekerheden worden meegeteld zoals gekwantificeerd zijn in hoofdstuk 6, dan volgt er een 90% onzekerheidsband voor de erosiediepte met grenzen die in de eerste fase een factor 1,8 ( $=\mu+1,64\sigma$ ) hoger en lager liggen dan de berekende lijnen. In de tweede fase geldt een factor 1,7 voor het erosievolume.

In Figuur 5.31 is te zien dat de berekeningen goed overeenkomen met de metingen in de eerste fase van het erosieproces van serie K5&K6. Bij deze proeven was er gras toegepast dat een zeer droge en hete zomer heeft doorgemaakt.

De gemeten erosiediepte in de proeven van serie K2&K3 liggen voor de eerste fase van het erosieproces duidelijk lager dan de berekeningen. Reeds tijdens het uitvoeren van de proeven was gebleken dat deze bekleding van klei met gras onverwoestbaar was. In de analyse in paragraaf 5.2.6 is er daarom voor gekozen om de formules af te stemmen op proevenserie K1 en K4. Daardoor is het logisch dat de gemeten erosie tijdens proevenserie K2&K3 veel minder is dan de berekende erosie.



Figuur 5.29 Berekende erosiediepte en gemeten waarde in de Deltagoot van serie K1 en K4 (boventalud 1:4 met klei van de Lauwersmeerdijk en Blija)



Figuur 5.30 Berekende erosievolume en gemeten waarde in de Deltagoot van serie K1 en K4 (boventalud 1:4 met klei van de Lauwersmeerdijk en Blija)

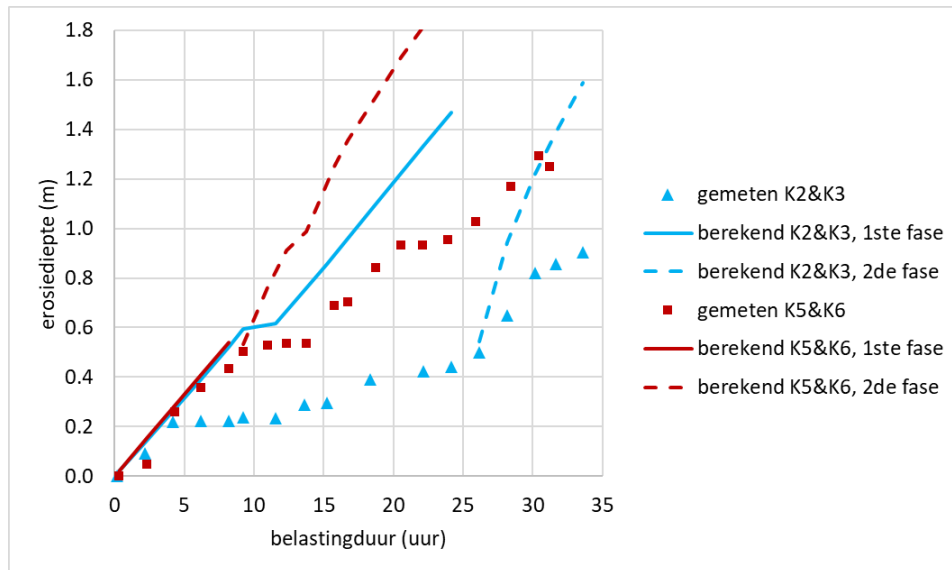
Voor de tweede fase van het erosieproces geldt dat de erosie voor zowel K2&K3 als K5&K6 flink wordt overschat door de berekeningen. Dit komt omdat ook voor de tweede fase van het erosieproces de formules zijn afgestemd op proevenserie K1 en K4, die een veel grotere erosiesnelheid gaven dan K2&K3 en K5&K6. Zolang er niet op basis van de klei-



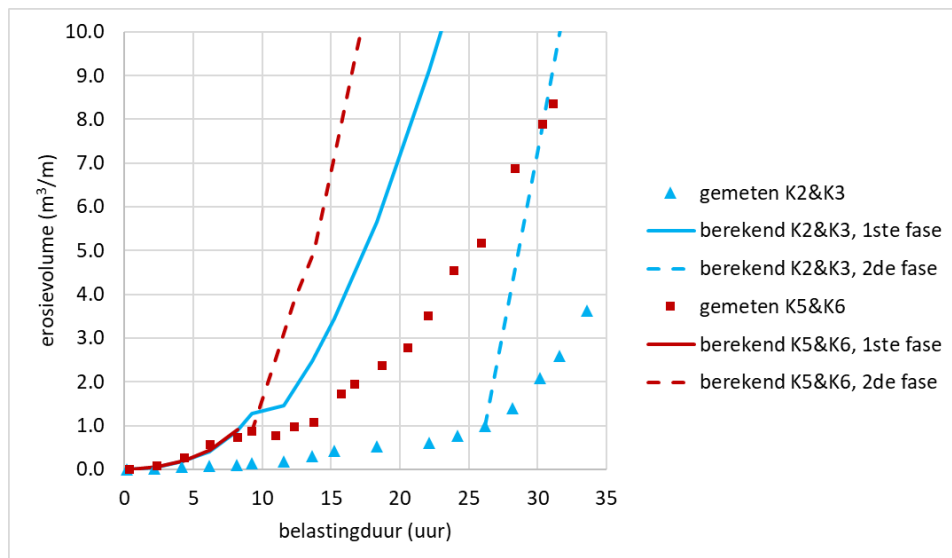
eigenschappen voorspeld kan worden dat de erosiesnelheid zo gering zal zijn als van proeven-serie K2&K3 en K5&K6, moeten de formules veiligheidshalve worden afgestemd op proeven-serie K1 en K4.

Een vergelijkbare trend is te zien in Figuur 5.32.

Tijdens proef K4\_08 was er in korte tijd een vrij groot gat ontstaan langs de rand van het model. Enerzijds was dit een modeffect door de wijze waarop de klei in de Deltagoot is aangebracht, maar anderzijds kan dit ook gezien worden als het effect van een slechte plek in het gras en de klei. In Figuur 5.30 is te zien dat de formules de gemeten erosie overschatten. Het meetpunt na K4\_08 ligt wat hoger dan de berekende lijn, maar gezien de spreiding die meegenomen wordt in de probabilistische berekeningen (zie hoofdstuk 6), valt dit ruim binnen de betrouwbaarheidsband.

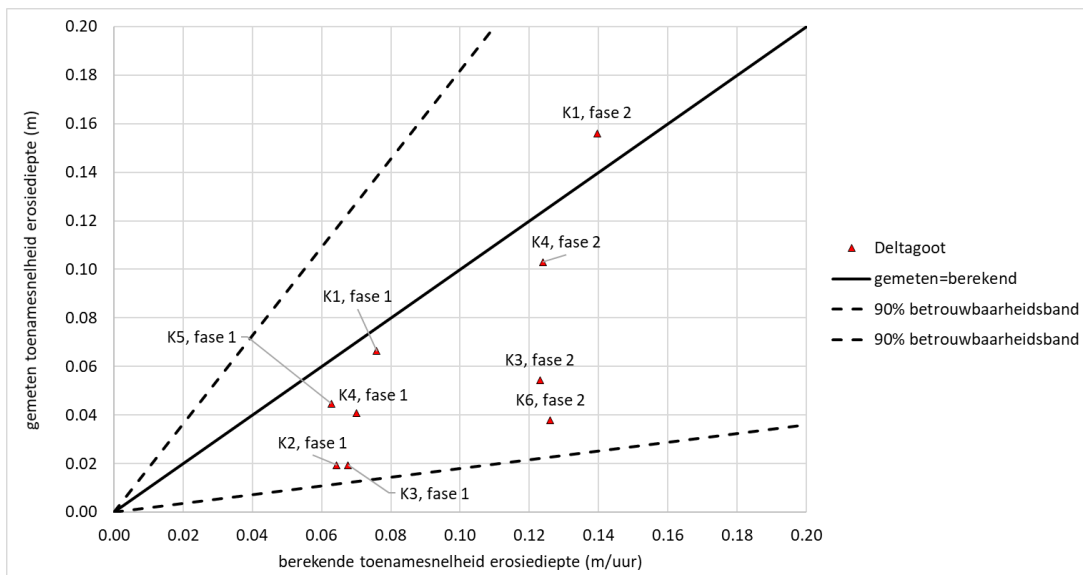


Figuur 5.31 Berekende erosiediepte en gemeten waarde in de Deltagoot van serie K2&K3 en K5&K6 (boventalud 1:5 met klei van Holwerd)

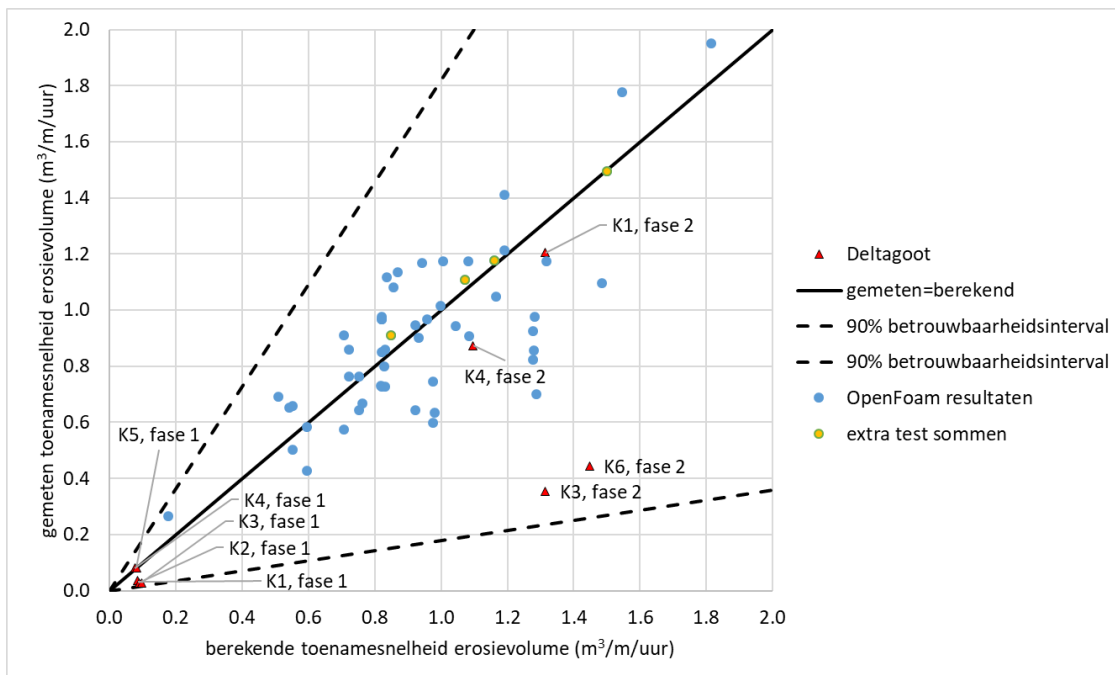


Figuur 5.32 Berekende erosievolume en gemeten waarde in de Deltagoot van serie K2&K3 en K5&K6 (boventalud 1:5 met klei van Holwerd)

Een andere manier om naar de nauwkeurigheid van de formules te kijken ten opzichte van de brongegevens (Deltagootproeven en OpenFoam-berekeningen) is door deze simpelweg tegen elkaar uit te zetten. Dit is gedaan in Figuur 5.33 en Figuur 5.34 (met  $c_d = 0,55$ , dus zonder het effect van een zeer hete en droge zomer). Op de horizontale as staat de met de formules berekende erosiediepte- of erosievolumeverandering per uur en de met de formules berekende erosievolumeverandering per uur. Op de verticale as staat de gemeten waarde in de Deltagoot of de met OpenFoam berekende waarde (waarde van  $\phi_{s,klap}$  die met formule (23) is omgerekend naar  $\partial V_e/\partial t$ ).



Figuur 5.33 In de Deltagoot gemeten gemiddelde erosiesnelheid als functie van de met de formules berekende erosiesnelheid (toename van de erosiediepte per uur)



Figuur 5.34 In de Deltagoot gemeten gemiddelde erosiesnelheid en met OpenFoam berekende erosiesnelheid als functie van de met de formules berekende erosiesnelheid (toename van de erosievolumen per uur)

In de figuren is te zien dat het 90% betrouwbaarheidsinterval vrij breed is ten opzichte van de punten. Desondanks wordt dit niet gezien als een aanleiding om de standaardafwijking in de

parameters te verkleinen, gezien het feit dat er nog betrekkelijk weinig ervaring is met deze materie.

In Figuur 5.34 zijn 4 extra punten toegevoegd die berekend zijn met OpenFoam, maar die niet gebruikt zijn om de formules af te leiden. Deze berekeningen zijn gemaakt met de input zoals vermeld in Tabel 5-2.

	Som 1	Som 2	Som 3	Som 4
$h_{\text{overgang}}$ (m)	0,62	0,62	0,62	0,62
Waterstand (m)	7,02	7,02	7,02	7,02
Taludhelling $\tan(\alpha)$	0,25	0,25	0,25	0,25
$H_{m0}$ (m)	1,44	1,65	1,64	1,84
Golfsteilheid $s_{op}$	0,034	0,035	0,039	0,034
$B_{\text{berm}}$ (m)	3,00	3,00	3,00	3,00
$h_{\text{berm}}$ (m)	0,78	0,78	0,78	0,78

Tabel 5-2 Specificaties van de extra sommen voor het controleren van de formules

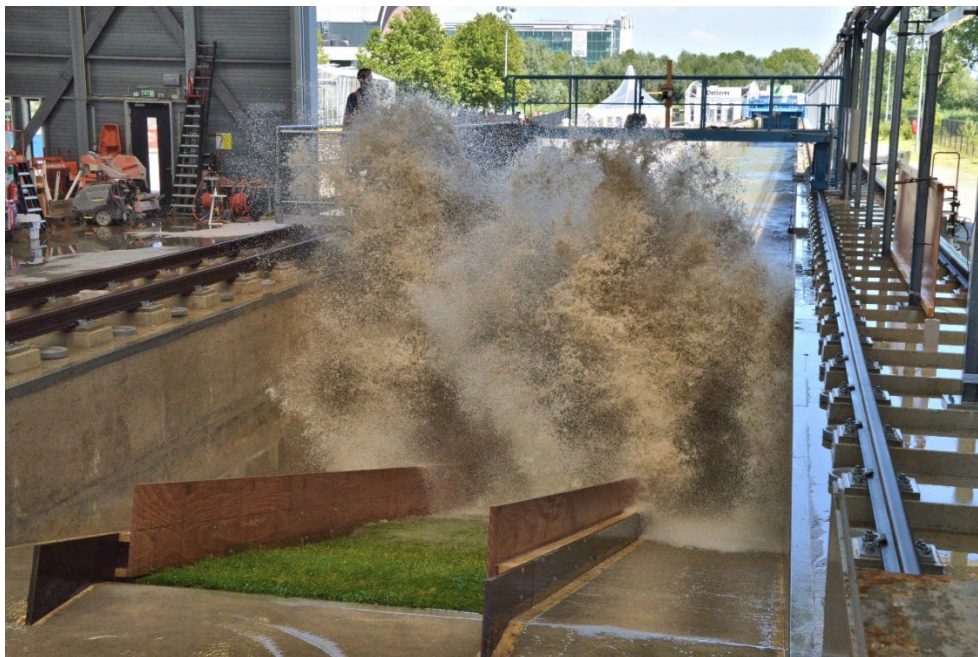
Al bovenstaande formules zijn bedoeld voor loodrechte golfaanval. In werkelijkheid zal er doorgaans scheve golfaanval zijn en moet dit effect dus verdisconteerd worden. Er moet daarom onderscheid gemaakt worden in:

- De significante golfhoogte bij de teen van de dijk:  $H_{m0}$
- De equivalente significante golfhoogte bij de teen van de dijk van loodrecht invallende golven die evenveel erosie geven als de scheef invallende golven:  $H_{m0\perp}$

In al bovenstaande formules zou dus eigenlijk  $H_{m0\perp}$  moeten worden gebruikt. Hoe  $H_{m0\perp}$  kan worden berekend wordt beschreven in paragraaf 7.2 (formule (55)).

## 6 Onzekerheden en afbakening toepassingsgebied

Hoewel de formules voldoende aansluiten op de metingen in de Deltagoot en de berekeningen met OpenFOAM, moet toch rekening gehouden worden met bepaalde onzekerheden. De rekenmethodiek is vrij gecompliceerd en in de afleiding zijn op bepaalde stappen aannames gedaan en zijn gegevens gefit, die maken dat er resterende onzekerheden zijn. In dit hoofdstuk zijn deze gekwantificeerd en is het toepassingsgebied afgebakend.



Figuur 6.1 Tijdens proef K1\_09

Naast de onzekerheden ten aanzien van de sterkte (erosie) zijn er ook onzekerheden aan de kant van de belasting (waterstand en golfcondities). Als gebruikgemaakt wordt van de door Riskeer of Hydra-NL gegenereerde belastingen, dan zijn de relevante onzekerheden daarin al verwerkt conform WBI-2017.

### 6.1 Onzekerheden in de eerste fase van het erosieproces

#### 6.1.1 Initiële schade aan het gras

In de eerste fase van het erosieproces is er aanvankelijk nog een kleibekleding met gras die niet aangetast is door de golfaanval. Veiligheidshalve is er rekening mee gehouden dat op verschillende plekken langs de dijk er enige beperkte initiële schade aanwezig is. De grootte en omvang van deze schade is onzeker, maar gezien het feit dat waterschappen veel energie stoppen in het op orde houden van het gras op zeedijken, zullen de resterende schades vrij beperkt zijn. In het huidige onderzoek is uitgegaan van een beschadiging bestaande uit een gat in het gras van 40×40 cm<sup>2</sup> met een diepte van 15 cm. Alleen voor de klei met gras van Blija is geen kunstmatige schade aangebracht, omdat dit gras al danig aangetast was door de lange tijd dat het in de hal had gelegen.

Deze uitgangssituatie is de eerste onzekerheid: het gat in het gras kan groter en kleiner zijn. Op basis van de ervaringen van waterschappen is de inschatting dat het gat in het gras doorgaans kleiner zal zijn en vrijwel nooit dieper.

Dit betekent dat de aangehouden initiële schade van het gras aan de veilige kant zit. De omvang van deze erosiediepte komt ongeveer overeen met 1 à 2 uur golven, ten opzichte van het eerste initiële gat dat was aangebracht van 20×20 cm<sup>2</sup> en 5 cm diep. Dit geeft een indruk van de hoeveel veiligheid die dit oplevert. Als slechts zo'n klein gat aanwezig is, houdt het gras dus 1 à 2 uur langer stand. Dit is circa 20 à 25% van de eerste fase van het erosieproces.

Dit wordt in rekening gebracht met een factor gelijk aan 0,8, waardoor de duur van de eerste fase 0,8 maal zo lang wordt. De standaardafwijking van deze factor wordt geschat op 0,15. Later zal blijken dat deze standaardafwijking weinig bijdraagt aan de uiteindelijke erosiediepte en dus grof geschat kan worden.

Ook tijdens proevenserie K4, toen in het gras van Blija geen kunstmatige schade was aangebracht, is er ca 2 uur vrijwel geen erosie opgetreden ten opzichte van de berekeningen (zie Figuur 5.29).

### 6.1.2 Onzekerheid in de erosiesnelheid

Voor het kwantificeren van de erosiesnelheid (toename van de erosiediepte per uur) is gebruik gemaakt van de formule van Klein Breteler (2015), zie formule (1). Deze formule is gebaseerd op een aantal proeven in de Deltagoot met diverse soorten klei en gras. Deze formule bevat een fitparameter  $c_d$ , die in het huidige onderzoek is bijgesteld naar een verwachtingswaarde van 0,55. Doordat er geen onderscheid is gemaakt tussen de verschillende soorten gras en klei, van categorie 1 t/m 3, is de spreiding vrij groot. Door Klein Breteler (2015) was vastgesteld dat de variatiecoëfficiënt  $\sigma/\mu$  ongeveer 0,4 was. Nu zien we in de metingen een variatiecoëfficiënt  $\sigma/\mu = 0,35$ .

De invloed van de waterstand is toegevoegd door middel van de coëfficiënt  $f_{\text{overgang}}$ , zie formule (6). Aannemende dat de onzekerheid als gevolg van de invloed van de waterstand ten opzichte van de overgang, golfhoogte en de taludhelling ongeveer de helft is van bovenstaande onzekerheid, moet rekening gehouden worden met een variatiecoëfficiënt  $\sigma/\mu$  van ongeveer 0,40 à 0,45 in de waarde van  $f_{\text{overgang}} \cdot c_d$ .

### 6.1.3 Onzekerheid door de schematisering van de vorm van het erosieprofiel

De vorm van het erosieprofiel is sterk geschematiseerd door middel van twee rechte lijnen met een bepaalde helling, namelijk het erosieterras en de erosieklif. De vorm wordt verder bepaald door de erosiediepte bij de overgang,  $d_o$  en de maximale diepte van het erosieterras  $d_t$ .

Omdat gedurende het grootste deel van deze fase van het erosieproces het erosievolume nog erg beperkt is, is het minder belangrijk voor het eindresultaat om deze drie parameters precies goed te hebben. Daarom is de aandacht volledig geconcentreerd op het einde van de eerste fase van het erosieproces en zijn er verder eenvoudige aannames gedaan om het mogelijk te maken berekeningen uit te voeren.

De erosiediepte aan het eind van de eerste fase wordt met formule (7) omgerekend naar het erosievolume aan het begin van de tweede fase van het erosieproces. Deze omrekening is van belang voor de startwaarde van de tweede fase en heeft daarmee invloed op het eindresultaat.

In Figuur 5.4 is te zien hoe het berekende erosievolume aansluit op de metingen gedurende de eerste fase van het erosieproces ( $0 < t < 5,4$  uur). Hoewel de vorm van het erosieprofiel tijdens verschillende proeven in deze eerste fase behoorlijk afweek van de schematisatie, is het resultaat aan het eind van de eerste fase vrij nauwkeurig. Verder is te zien dat voornamelijk

de erosiediepte toeneemt in de eerste fase en het erosievolume aan het eind van de eerste fase nog vrij gering is. Het erosievolume begint pas sterk toe te nemen in de tweede fase, waardoor een fout in het erosievolume aan het eind van de eerste fase nauwelijks invloed heeft op het erosievolume in de tweede fase.

Deze onzekerheid wordt daarom verwaarloosd.

## 6.2 Onzekerheden in de overgang van de eerste fase naar de tweede fase

Bij de overgang van de eerste fase naar de tweede fase van het erosieproces gaat de erosiesnelheid sterk toenemen. De klif is dan zodanig hoog dat de golven er hard tegenaan klappen, waardoor de verdere erosie gedomineerd wordt door het terugschrijden van de klif.

Omdat de tweede fase start bij een bepaalde hoogte van de klif en de grootste erosiediepte meestal vlakbij deze klif zit, is er een relatie aangenomen tussen de erosiediepte en deze overgang naar de tweede fase van het erosieproces. In de huidige proeven was deze overgang bij een erosiediepte gemiddeld 50 cm. Afhankelijk van de gras- en klei-eigenschappen is het denkbaar dat deze overgang bij een iets grotere of minder grote erosiediepte plaatsvindt. In de huidige proeven is een standaardafwijking van 10 cm gemeten.

## 6.3 Onzekerheden in de tweede fase van het erosieproces

### 6.3.1 Onzekerheden in de OpenFoam berekeningen

De formule voor de erosiesnelheid in de tweede fase van het erosieproces is afgeleid op basis van berekeningen met OpenFoam. Zoals in paragraaf 5.2.1 is beargumenteerd, hebben consequente verschillen tussen de rekenresultaten en de werkelijkheid in deze analyse geen invloed op de afgeleide formule. Maar het is denkbaar dat ook de trend in de rekenresultaten niet precies overeenkomt met de werkelijkheid: de invloed van de hydraulische belasting en/of geometrie op de erosiesnelheid kan in werkelijkheid iets afwijken van de berekende trend.

Deze mogelijke afwijking draagt bij aan de onzekerheid omtrent de afgeleide formule voor de erosiesnelheid. De grootte van deze onzekerheid is vrij beperkt, gezien de goede resultaten die met OpenFoam bereikt zijn in de literatuur (zie paragraaf 5.2.2).

Geschat wordt dat de fout in de formule als gevolg van deze onzekerheid ongeveer 10 à 20% is. Dit betekent dat gerekend moet worden op een variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van 0,10.

### 6.3.2 Erosiesnelheid bij waterstand en golfcondities zoals in de Deltagoot

Voor het kwantificeren van de erosiesnelheid tijdens de tweede fase van het erosieproces wordt voor de huidige waterstand en golfcondities gebruik gemaakt van de Deltagootproeven.

In Figuur 5.17 is te zien dat er betrekkelijk weinig verschil is in de gemiddelde erosiesnelheid tijdens proevenserie K1 en K4, maar dat individuele proeven wel een behoorlijke spreiding hebben. Verder is de klei van Holwerd (proevenserie K3 en K6) veel erosiebestendiger dan die van de Lauwersmeerdijk en Blija. Er is dus onzekerheid omtrent de relatie tussen de erosiesnelheid en de kleikwaliteit.

Voorlopig is er voor gekozen om de hoge erosiebestendigheid van de klei van Holwerd te negeren en de formules te baseren op die van de Lauwersmeerdijk en Blija. Desondanks is het denkbaar dat andere kleisoorten een afwijkende erosiebestendigheid zullen hebben,

waardoor het verstandig is om met een grotere onzekerheid te rekenen dan uitsluitend op basis van proevenserie K1 en K4. Die laatste is  $\sigma/\mu = 0,13$ .

Op basis van engineering judgement wordt een variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van 0,25 ten opzichte van formule (23) aanbevolen.

### 6.3.3 Invloed van de golfhoogte, golfsteilheid en waterstand op het erosievolume

De invloed van de golfhoogte, golfsteilheid en waterstand op het erosievolume als functie van de tijd is gekwantificeerd met de OpenFOAM berekeningen. Doordat de OpenFOAM resultaten alleen gebruikt zijn in relatieve zin (alleen het verschil tussen de ene berekening en de andere, zie paragraaf 5.2.1) levert de nauwkeurigheid van het rekenmodel zelf slechts een beperkte bijdrage aan de onzekerheid, zie paragraaf 6.3.1.

Er is echter ook enige spreiding van de rekenresultaten ten opzichte van de gekozen formule. Deze spreiding is te zien in Figuur 5.22, Figuur 5.23 en Figuur 5.24. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) in elk van deze formules is:

- invloed golfhoogte: 10%
- invloed golfsteilheid: 10%
- invloed waterstand ten opzichte van de overgang: 14%

Hieruit is afgeleid dat de totale variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) ongeveer  $\sqrt{(0,1^2 + 0,1^2 + 0,14^2)} = 0,20$  is.

### 6.3.4 Invloed van de dijkgeometrie

Ook de invloed van de hoogte en breedte van de berm en de invloed van de taludhelling is gekwantificeerd met behulp van de berekeningen met OpenFoam. De spreiding ten opzichte van de afgeleide formules is te zien in Figuur 5.25, Figuur 5.26 en Figuur 5.27. De variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) in elk van deze formules is:

- invloed van bermbreedte: 15%
- invloed van bermhoogte: 15%
- invloed van taludhelling: 11%

Hieruit is afgeleid dat de totale variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) ongeveer  $\sqrt{(0,15^2 + 0,15^2 + 0,11^2)} = 0,24$  is.

### 6.3.5 Onzekerheid in de berekende erosiediepte

De erosiediepte wordt berekend uit het erosievolume op basis van een aanname ten aanzien van de vorm van de erosiekuil, zie Figuur 5.7. Daarbij speelt de helling van het erosieterras en van de erosieklijf een rol, maar ook de diepte van de erosie bij de overgang.

De afgeleide formule voor het berekenen van de erosiediepte is formule (51). In de Deltagoot zijn zowel de erosievolumes als de erosiedieptes gemeten. Deze metingen zijn heel geschikt om de nauwkeurigheid van formule (51) te beoordelen. In Figuur 5.4 zijn de gemeten erosiedieptes vergeleken met de dieptes die verkregen worden als met deze formule op basis van de gemeten erosievolumes de dieptes worden berekend.

De verhouding tussen de berekende en gemeten erosiediepte heeft een variatiecoëfficiënt ( $\sigma/\mu$ ) van 6%.

## 6.4 Resulterende onzekerheden

In het bovenstaande is voor elke fase van het erosieproces bepaald wat de onzekerheden zijn in de formules. Er is voor gekozen om deze onzekerheden mee te nemen in de probabilistische berekeningen door drie stochastische variabelen te gebruiken:

1. Onzekerheden in de erosiediepte tijdens de eerste fase van het erosieprofiel:  $m_1$ .
2. Onzekerheden in het erosievolume tijdens de tweede fase van het erosieprofiel:  $m_2$ .
3. Onzekerheid in het moment van de overgang van de eerste naar de tweede fase

De stochastische variabelen  $m_1$  en  $m_2$  worden als volgt toegevoegd in de formules:

- eerste fase (aangepaste formule (45)):  

$$d_e = m_1 \cdot f_{\text{overgang}} c_d \cdot \max(0; H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha_{\text{gem}})^{1,5} \cdot t_{\text{belast}} \quad (52)$$

- tweede fase (aangepaste formule (49)):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,068 \cdot m_2 \frac{(H_{m0} - 0,25)^2}{\sqrt{s_{op}}} \cdot \min \left( 2,4; \max \left( 0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0}} \right) \right) \cdot \left( \frac{13}{\frac{B_{\text{berm}}}{H_{m0}} \cdot \min \left( 1; \max \left( 0; 2 - \frac{h_{\text{berm}}}{H_{m0}} \right) \right) + 8} - 0,5 \right) \cdot \left( 1,64 - \frac{0,17}{\tan(\alpha_{\text{gem}})} \right) \quad (53)$$

Met (zie ook symbolenlijst op bladzijde 6):

$m_1$  = modelonzekerheid in de eerste fase van het erosieproces (-)

$m_2$  = modelonzekerheid in de tweede fase van het erosieproces (-)

De waarde van  $m_1$  wordt bepaald door de verschillende onzekerheden omtrent de eerste fase van het erosieproces, zie paragraaf 6.1:

- onzekerheid omtrent de initiële schade aan het gras: verwachtingswaarde  $\mu = 0,8$  en standaardafwijking  $\sigma = 0,15$
- onzekerheid in de formule voor de erosiediepte: variatiecoëfficiënt = 40 à 45% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,40$  à  $0,45$ )

Deze onzekerheden worden samengesteld alsof het onafhankelijke normale verdelingen zijn. Bij benadering geldt dan:  $\mu(m_1) = 0,8$  en  $V(m_1) = \sigma/\mu = \sqrt{(0,2^2 + 0,45^2)} = 0,5$ , zodat de standaardafwijking  $\sigma(m_1) = 0,4$ . De voorbeeldberekeningen van hoofdstuk 7 zijn uitgevoerd met  $\mu(m_1) = 1,0$ .

De waarde van  $m_2$  wordt bepaald door de verschillende onzekerheden omtrent de tweede fase van het erosieproces, zie paragraaf 6.3:

- Onzekerheid in de OpenFoam berekeningen:  $\mu = 1$  en variatiecoëfficiënt  $V = \sigma/\mu = 10\%$
- Onzekerheid over de relatie tussen de piekdruk uit de berekeningen met OpenFoam en de gemeten erosiesnelheid:  $\mu = 1$  en variatiecoëfficiënt  $V = \sigma/\mu = 25\%$
- Onzekerheid in de formule voor de invloed van de golfhoogte, golfsteilheid en waterstand: variatiecoëfficiënt = 20% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,2$ )
- Onzekerheid in de formule voor invloed van de hoogte en breedte van de berm en de invloed van de taludhelling: variatiecoëfficiënt = 24% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,24$ )
- Onzekerheid in de formule voor het omrekenen van het erosievolume naar een erosiediepte: variatiecoëfficiënt = 6% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,06$ )

Deze onzekerheden tezamen leveren het volgende voor de normaal verdeelde stochastische parameter  $m_2$ :  $\mu(m_2) = 1$  en  $\sigma(m_2) = \sqrt{(0,10^2 + 0,25^2 + 0,2^2 + 0,24^2 + 0,06^2)} = 0,42$ . Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de verschillende onzekerheden onafhankelijk en normaal verdeeld zijn (benadering).

Deze spreiding is wat meer dan de 0,25 die Mourik (2020) had gevonden in zijn onderzoek.



Voor de onzekerheid in het moment waarop de eerste fase van het erosieproces overgaat naar de tweede fase wordt het volgende aangehouden: een normale verdeling met  $\mu(d_{e,1 \rightarrow 2}) = 0,50$  m en  $\sigma(d_{e,1 \rightarrow 2}) = 0,1$  m, zie paragraaf 6.2.

Naast bovenstaande onzekerheden ten aanzien van de sterkte (erosie) zijn er ook onzekerheden aan de kant van de belasting (waterstand en golfcondities). Als gebruikgemaakt wordt van de door Riskeer of Hydra-NL gegenereerde belastingen, dan zijn de relevante onzekerheden daarin al verwerkt conform WBI-2017.

## 6.5 Toepassingsgebied van het rekenmodel

Het toepassingsgebied wordt bepaald door de range aan hydraulische belastingen, dijkgeometrieën en materialen die gebruikt zijn in het onderzoek. Hoewel dit een vrij beperkte range was in de Deltagootproeven, is het toepassingsgebied aanzienlijk verruimd door middel van de numerieke berekeningen met OpenFoam.

Het toepassingsgebied ten aanzien van de geometrie en de hydraulische belastingen is afgeleid uit de range van OpenFoam berekeningen, die breder was dan de Deltagootproeven:

- Significante golfhoogte:  $H_{m0} \leq 2,8$  m (equivalente waarde, omgerekend naar loodrechte golfaanval)
- Golfsteilheid ( $s_{op} = H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ ):  $0,020 \leq s_{op} \leq 0,055$  (berekend op basis van de naar loodrechte golfaanval omgerekende significante golfhoogte)
- Diepte van de overgang (van harde bekleding naar kleibekleding met gras) ten opzichte van de stilwaterlijn:  $h_{overgang}/H_{m0} > -0,7$
- Taludhelling:  $0,16 < \tan\alpha < 0,35$
- Bermbreedte:  $0 \leq B_{berm}/H_{m0} < 5$
- Bermniveau:  $h_{berm}/H_{m0} > -0,5$
- Gemiddeld eens per vijf jaar een extreem hete en droge zomer met twee maanden lang temperaturen boven de  $30^\circ$  zonder regen.



Figuur 6.2 Proef K1\_04

De nauwkeurigheid van de formules neemt af naarmate de omstandigheden meer afwijken van de condities en geometrie die in de Deltagoot zijn gebruikt. Het is met name van belang dat de hydraulische belasting in de buurt van het ontwerppunt ruim binnen bovenstaande geldigheidsgebied ligt. Bij dit ontwerppunt is de bijdrage aan de faalkans het grootst en is het dus van belang dat de nauwkeurigheid voldoende groot is.

Dit aspect is verdisconteerd door een vrij grote standaardafwijking in de modelparameters ( $m_1$  en  $m_2$ ) te hanteren (zie Figuur 5.33 en Figuur 5.34).

In het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van drie soorten klei met onder andere de eigenschappen uit Tabel 3-1. Deze klei-eigenschappen zijn zodanig dat zowel klei van de categorie 1 als van mindere kwaliteit is toegepast. Verder was er goed verdichte klei (met 95% proctordichtheid) en minder goed verdichte klei beproefd (88% proctordichtheid). Dat maakt dat deze formules ook toepasbaar zijn voor klei met een mindere kwaliteit en mindere verdichting. Uiteraard moeten er wel grenzen gesteld worden aan de kleikwaliteit ten aanzien van de toepasbaarheid van de formules. De klei met de ongunstigste waarde qua lutumgehalte, zandgehalte, plasticiteitsindex en verdichting was die van de Lauwersmeerdijk. Daarom worden de eigenschappen van die klei gebruikt om de grens van het toepassingsgebied mee aan te geven:

- Kleikwaliteit (gemiddeld over vele kubieke meters en meerdere monsters):
  - gemiddeld zandgehalte < 45% (mits het zand vrij homogeen verdeeld is in de grond en er geen zandlenzen of zandpockets aanwezig zijn), en
  - gemiddelde plasticiteitsindex > 15%, en
  - gemiddeld lutumgehalte > 10 à 20%, en
  - proctordichtheid > 88% (aanbevolen wordt om bij aanleg naar een hogere proctordichtheid van tenminste 95% te streven bij een consistentieindex van 0,6 à 0,7), en
  - De klei mag bij aanleg niet veel te nat verwerkt zijn, omdat dit leidt tot een zeer sterke structurering (zie bijlage H), en
  - Daarnaast stelt WVW van Rijkswaterstaat dat de resultaten van het huidige onderzoek alleen toegepast mogen worden op waterkeringen rond de Waddenzee. De kennis is nog niet voldoende ontwikkeld om buiten dit gebied toe te passen.

Voor het lutumgehalte is er geen scherp criterium gegeven, omdat in TAW (1995) beargumenteerd is dat deze eigenschap van secundaire invloed is. Als het lutumgehalte vrij laag is (in de buurt van 10%), dan moeten de andere criteria niet te dicht op de grens zitten.

	% lutum (< 2 $\mu\text{m}$ )	% zand (> 63 $\mu\text{m}$ )	Vloei- grens (%)	Uitrol- grens (%)	Plasticiteits- index (-)	Fase van erosie- proces
Oosterland	42-60	6-13	45-64	22-28	20-36	2
Ferwerd	38-43	12-15	49-64	23-30	26-28	2
Kruiningen	32-42	18-38	36-74	18-34	17-40	2
Perkpolder	26-29	29-32	37-41	17-22	17-23	2
Oosterbierum	18-19	42-48	28-35		6-9	1
Harculo	12-13	64-69	28-33		12-14	1

Tabel 6-1 klei-eigenschappen uit eerder uitgevoerde Deltagootproeven

De formules sluiten ook goed aan op eerder uitgevoerde relevante proeven met klei in de Deltagoot (zie Figuur 5.28 en Figuur 5.2). De eigenschappen van de daarin gebruikte klei is te zien in Tabel 6-1. Dit vergroot het vertrouwen in de gegeven toepassingsgrenzen.

Opgemerkt wordt dat een extreem hoog lutumgehalte problemen kan geven ten aanzien van de verwerkbaarheid van de klei en onderhoudbaarheid van het grastalud. Door sterk krimp- en zwelgedrag kan het ook gaan scheuren, hetgeen de erosiebestendigheid kan verminderen. In de Leidraad Rivierdijken (Addendum I, ENW 2007) wordt een maximum van 35% aanbevolen, maar dat lijkt wel een erg veilige waarde te zijn, gezien de prima klei bij Blija met lutumgehalte van 44%. Voorlopig lijkt 45% een geschikter maximum.

Gezien het feit dat het bij de erosie van de kleibekleding gaat om het wegspoelen van een flinke hoeveelheid klei, zijn de eigenschappen van kleine slechte plekken van enkele liters minder van belang dan de gemiddelde eigenschappen over een hoeveelheid van orde  $10 \text{ m}^3$ . Tijdelijk gaat de erosie wellicht wat sneller bij een slechte plek, maar als daarna weer stevige klei aan de beurt is voor erosie, dan vertraagt de erosie weer. Dat maakt dat monsters die binnen enkele meters van elkaar zijn genomen uit de klei, gemiddeld mogen worden.

Ten aanzien van het berekenen van de rekenwaarde van de kleilaagdikte als er zandlenzen aanwezig zijn, wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding voor steenzettingen (RWS 2019, par. 6.24).

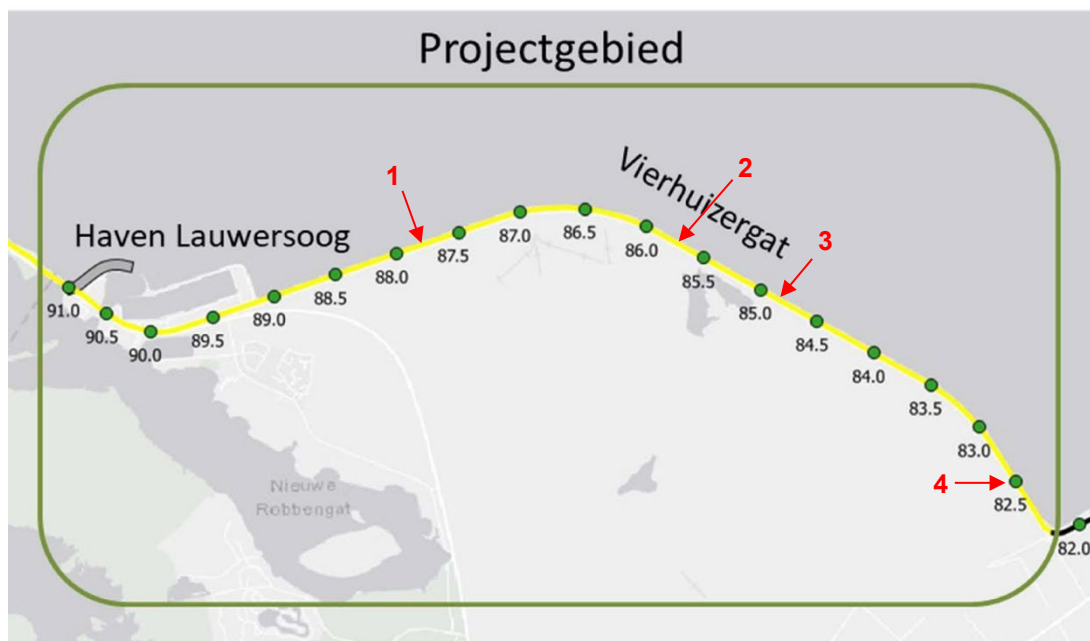
De traditionele onderverdeling in categorie 1 t/m 3 (TAW, 1996) of stevige klei, schrale klei en overige grond (schematiseringshandleiding) lijken niet correct voor het indelen van de klei ten aanzien van erosiebestendigheid bij golfaanval. Voorlopig wordt aanbevolen om bovenstaande criteria aan te houden voor voldoende erosiebestendige klei. Verder wordt aanbevolen nader onderzoek uit te voeren met als doel een nieuwe categorisering op te stellen met relevante meetmethode om de categorie van klei te bepalen (zie ook paragraaf 8.2.3). Suggesties voor aanvullende criteria zijn gegeven in bijlage F, vooral gericht op de samenhang in de klei, omdat dit gebleken is een belangrijk aspect te zijn.

Bij het toepassingsgebied is als criterium voor de waterstand ten opzichte van de overgang  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} > -0,7$  gegeven, hoewel de Deltagootproeven allemaal uitgevoerd zijn met  $h_{\text{overgang}}/H_{m0} > -0,45$ . Deze grens is aangegeven omdat er ook bij lagere waterstanden berekeningen zijn uitgevoerd met OpenFoam, waarmee de trend naar lagere waarden kon worden gekwantificeerd. Voorwaarde is echter dat er al sprake is van een erosiekuil met klif. Daarom is het verstandig om bij berekeningen in de eerste fase van de storm met de formules van 'BM Gras Buitentalud' van WBI-2017 te rekenen of er überhaupt schade aan het gras optreedt. Pas als volgens die formules er initiële schade optreedt, kan er verder gerekend worden met de formules uit hoofdstuk 5 voor het berekenen van de erosie van de klei.

## 7 Voorbeeld van toepassing in probabilistische berekeningen van de faalkans van het boventalud

### 7.1 Gekozen locaties

Met de formules uit paragraaf 5.3 zijn als voorbeeld voor vier locaties langs de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat probabilistische berekeningen uitgevoerd om te bepalen hoe dik de kleilaag moet zijn. De locaties zijn gegeven in Figuur 7.1.



Figuur 7.1 Gekozen locaties langs de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat voor de voorbeeldberekeningen

In Tabel 7-1 is de locatie nader gespecificeerd en is het lokale bodemniveau gegeven. Het maatgevende bodemniveau ligt op een halve golfenlengte voor de dijk. Bij een golfperiode van ongeveer 5 à 6 s is dat  $0,5L_{op} = 0,5 \cdot g / (2\pi) \cdot T_p^2 = 20$  à 28 m van de dijk. Het bodemniveau is afgeleid uit het AHN3 en [www.navionics.com](http://www.navionics.com).

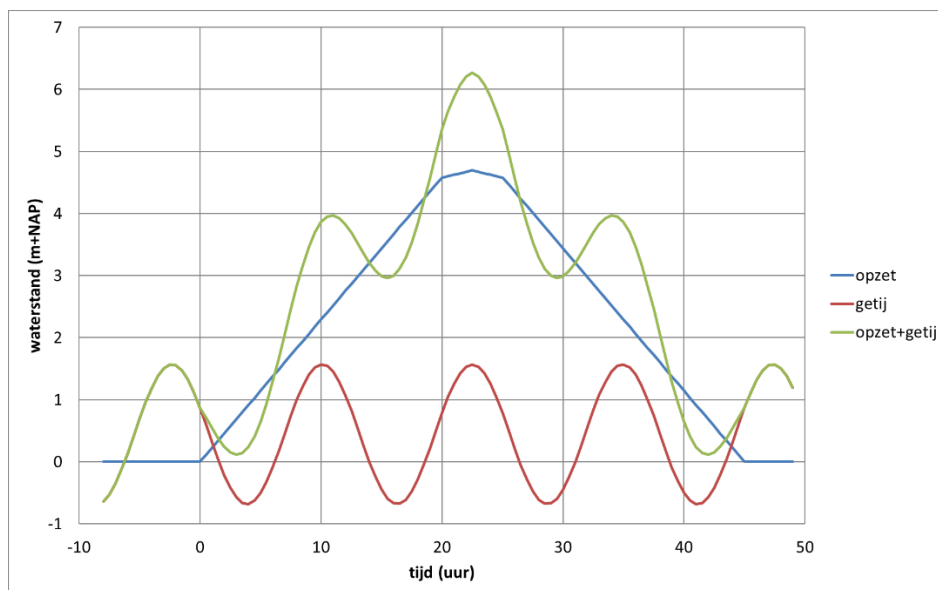
Locatie	Dijkpaal (km)	$x_{dijk}$ (m)	Bodemniveau (m+NAP)
1	km 87,7	211486	NAP-0,3 m
2	km 85,7	213294	NAP+0,3 m
3	km 84,9	213957	NAP+0,0 m
4	km 82,5	215924	NAP+1,4 m

Tabel 7-1 Locatiegegevens en bodemniveau van representatieve locaties langs de dijk

Voor het getij is het volgende aangehouden (alle locaties hetzelfde):

- laagst astronomisch tij: LAT = NAP-1,70 m
- gemiddeld laagwater: NAP-1,26 m
- gemiddeld hoogwater: NAP+1,06 m
- getijamplitude: 1,16 m

Tijdens een extreme storm wordt verondersteld dat het hoogwater samenvalt met de top van de stormopzet, conform de Schematiseringhandleiding Grasbekledingen (RWS, 2019). De stormduur is 45 uur en 2 uur voor de top van de stormopzet is deze 10 cm lager dan de topwaarde. Een voorbeeld van het waterstandverloop is gegeven in Figuur 7.2.



Figuur 7.2 Voorbeeld van waterstandsverloop tijdens extreme storm (de zeespiegelstijging is bij het waterstandsverloop van het getij opgeteld)

## 7.2 Aanpak berekeningen

De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met de speciale Deltares software, die geprogrammeerd is in Matlab. In deze software zijn de afgeleide formules opgenomen, waarbij een aantal parameters als stochastische variabelen worden gebruikt:

- Waterstand ( $h$ )
- Significante golfhoogte ( $H_{m0}$ )
- Golfperiode bij de piek van het spectrum ( $T_p$ )
- Golfrichting ( $\beta$ )
- Modelonzekerheid in formules van eerste fase van het erosieproces ( $m_1$ )
- Modelonzekerheid in formules van tweede fase van het erosieproces ( $m_2$ )
- onzekerheid omtrent de erosiediepte bij de overgang van de eerste naar de tweede fase van het erosieproces

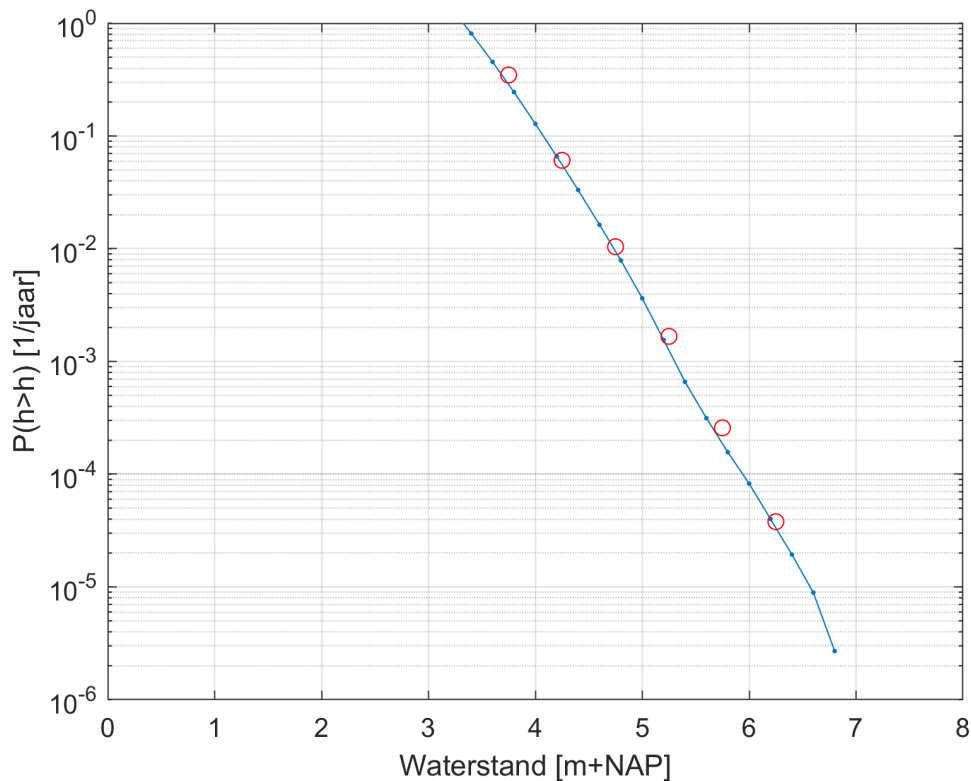
De modelonzekerheden in de formules zijn verdisconteerd zoals aangegeven in paragraaf 6.4 met de stochastische parameters  $m_1$  en  $m_2$  die toegevoegd zijn in de formules voor de twee fases van het erosieproces en een standaardafwijking voor de erosiediepte bij de overgang van de eerste naar de tweede fase.

In de Monte Carlo simulatie zijn honderden miljoenen stormen doorgerekend en zijn daarmee anderhalf miljoen jaren gesimuleerd. De meeste stormen zijn zo zwak dat het gras op het boventalud niet of nauwelijks wordt belast, maar voor alle zware stormen waarbij dit wel het geval is, is de erosiediepte bepaald. Dit levert statistische informatie over de kans op het overschrijden van een bepaalde erosiediepte. Deze kans is vergeleken met de volgens WBI-2017 acceptabele faalkans van de bekleding.

In WBI-2017 is voor elk faalmechanisme een bepaalde kansruimte beschikbaar gesteld, als deel van de totale faalkans op trajectniveau. Voor de bekleding op het boventalud van de Lauwersmeerdijk geldt het volgende:

- norm op trajectniveau (ondergrens) van traject 6-5:  $P_{\max} = 1/1.000$  per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor de bekledingen:  $P_B = 0,1 \cdot P_{\max} = 1/10.000$  per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor gras voor het traject:  $P_G = 0,5 \cdot P_B = 1/20.000$  per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor het traject:  $P_{GE} = 0,9 \cdot P_G = 1/22.000$  per jaar
- maximaal toelaatbare faalkans voor graserosie voor een specifieke locatie op de dijk (dijkdoorsnede):  $P_T = P_{GE}/3 = 1/67.000$  per jaar. Hierin is de factor 3 de lengte-effectfactor voor de hoogte van de waterkering (zie bijlage A in OI2014v4 RWS (2017)).

Dit betekent dat de kleilaagdikte zodanig moet zijn dat de kans op bezwijken van de kleibekleding met gras kleiner is dan  $1/67.000$  per jaar.



Figuur 7.3 Overschrijdingskromme van de waterstand op basis van Hydra-NL (rode rondjes) en punten uit de beschouwde waterstanden in de Monte Carlo simulatie voor het jaar 2075 (blauwe lijn)

De waterstanden en golfcondities voor de Monte Carlo simulatie zijn gegenereerd door Riskeer (Hydra-Ring), waardoor dit perfect past bij WBI-2017. Riskeer kan met een speciale optie miljoenen combinaties genereren van waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting op de top van de storm. Al deze miljoenen realisaties kloppen met de normaal te hanteren overschrijdingskrommes voor waterstanden en golfcondities. De overschrijdingskromme van de waterstand en significante golfhoogte zijn te zien in Figuur 7.3 en Figuur 7.4.

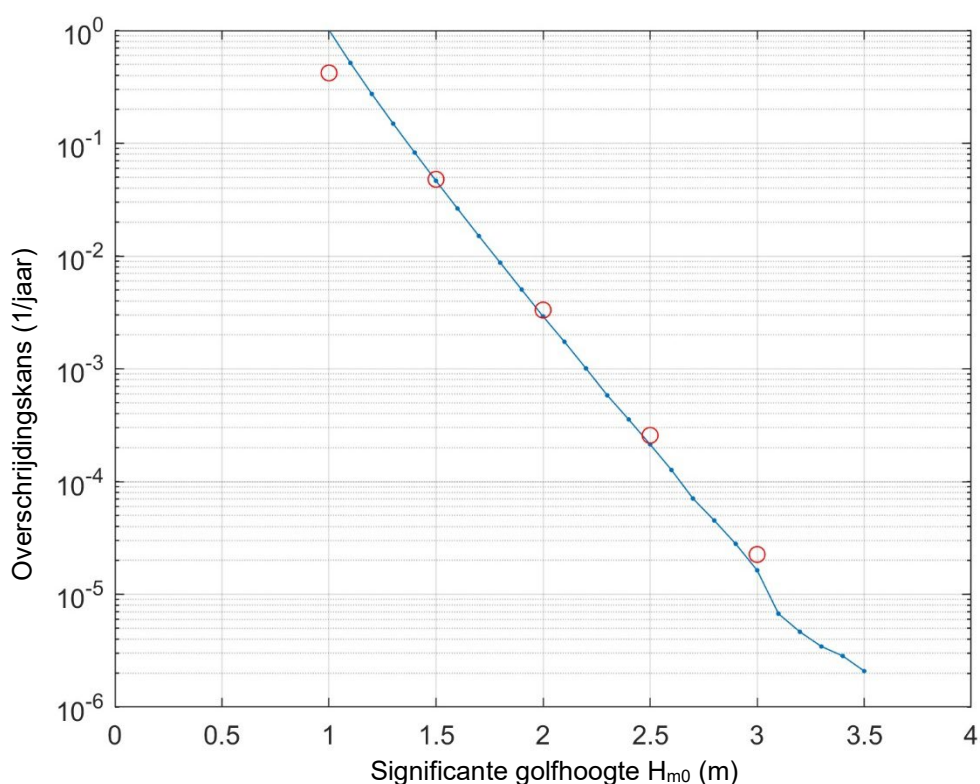
Voor elk van de 16 windrichtingssectoren zijn er evenveel stormen gegenereerd door Hydra-Ring, elk met een duur van 12 uur. Omdat extreme stormen, die maatgevend zijn voor de

erosie van het boventalud, veel langer duren dan 12 uur, zijn deze stormen kunstmatig verlengd tot een verlopende waterstand en golfhoogte zoals te zien is in Figuur 7.2. Als basis voor het berekenen van de terugkeertijd en faalkans is 12 uur gehanteerd gedurende het winterhalfjaar, dus 365 stormen/jaar.

Voor het berekenen van de faalkans is rekening gehouden met de kans van voorkomen van elke windrichting. Zo wordt een storm uit het noordwesten zwaarder meegeteld dan een uit het oosten.

Het bovenstaande betreft de hydraulische belasting (waterstand en golfcondities). Maar er is ook variatie in de sterkte. Deze wordt verdisconteerd via de stochastische variabelen  $m_1$ ,  $d_{e,1 \rightarrow 2}$  en  $m_2$ . Bij elke doorgerekende stormgebeurtenis ('sample' van de Monte Carlo analyse) is een nieuwe trekking gedaan voor deze stochastische variabelen. Bovendien is de Monte Carlo simulatie 10 maal uitgevoerd met steeds een andere seed voor de sterkte-parameters. Dat zorgt ervoor dat er weer andere combinaties zijn van de getrokken belasting en de getrokken sterkte per sample.

Al deze realisaties (ruim 15 miljoen jaren) zijn als één grote verzameling beschouwd voor het berekenen van de overschrijdingskans van de erosiediepte.



Figuur 7.4 Overschrijdingskromme van de significante golfhoogte op basis van Hydra-NL (rode rondjes) en punten uit de beschouwde golfcondities in de Monte Carlo simulatie voor 2075 (blauwe lijn) voor locatie 3.

Op basis van deze waarden op de top van de storm zijn complete kunstmatige stormen gegenereerd. Een voorbeeld van het waterstandsverloop van zo'n storm is gegeven in Figuur 7.2. Het verloop van de golfcondities is als volgt samengesteld:

- De golfhoogte krijgt hetzelfde verloop als het verloop van de opzet. De bijbehorende golfperiode wordt zo gekozen dat de golfsteilheid gedurende de gehele storm hetzelfde is als tijdens de top van de storm.
- Vervolgens wordt de golfhoogte gereduceerd als de waterdiepte ertoe leidt dat de golven breken op het voorland. De maximaal mogelijke golfhoogte,  $H_{m0,max}$ , is berekend met (Klein Breteler, 2018a):

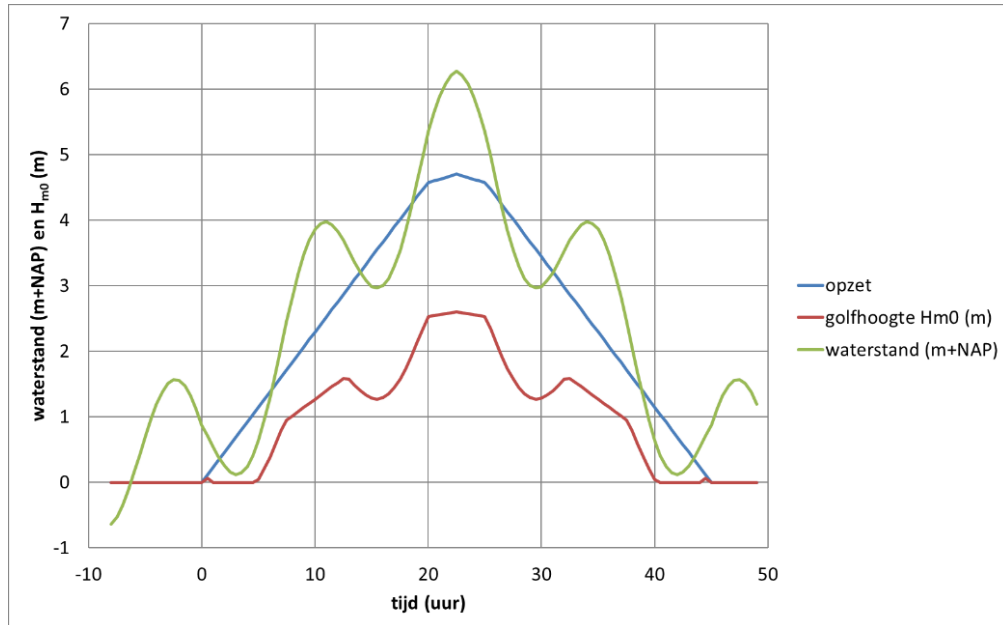
$$H_{m0,max} = 0,53d_m \quad (54)$$

Met:

$d_m$  = maatgevende waterdiepte voor de dijk, namelijk op een halve diepwatergolf lengte van de dijk (m) (berekend op basis van de waarden uit Tabel 7-1)

- De golfrichting is gedurende de gehele storm hetzelfde als tijdens de top van de storm.

Door de beperkte waterdiepte tijdens laagwater breken de golven op het voorland en wordt ook de golfhoogte gereduceerd, zoals te zien is in het voorbeeld in Figuur 7.5.



Figuur 7.5 Voorbeeld van het verloop van de golfhoogte (locatie 2 met op de top van de storm  $H_{m0} = 2,6$  m bij NAP+6,25 m) (de zeespiegelstijging is bij het waterstandsverloop van het getij opgeteld)

Bij scheef invallende golven is de volgende formule gebruikt om de equivalente golfhoogte bij loodrechte golfaanval te berekenen (Klein Breteler en Mourik, 2019):

$$\frac{H_{m0,\perp}}{H_{m0,\beta}} = \max\left(0,35; (\cos \beta)^{0,67}\right) \quad \text{voor } -90^\circ < \beta < 90^\circ \quad (55)$$

$$\frac{H_{m0,\perp}}{H_{m0,\beta}} = 0 \quad \text{voor } \beta > 90^\circ \text{ of } \beta < -90^\circ \quad (56)$$

Met:

$H_{m0,\perp}$  = equivalente significante golfhoogte met loodrechte golfaanval (m)

$H_{m0,\beta}$  = significante golfhoogte van de scheef invallende golven

$\beta$  = hoek van golfaanval ten opzichte van loodrechte golfaanval ( $^\circ$ )

Het berekenen van de equivalente loodrechte golfhoogte is bepaald nadat formule (54) is toegepast.

Deze formule is afgeleid op basis van kleinschalig onderzoek met scheef invallende golven en was gericht op de invloed van de hoek van golfaanval op de grootte van de golfklappen. Dit wordt toegepast in "BM Gras Buitentalud" (de software voor het beoordelen van grasbekledingen in het kader van WBI-2017) en kan ook voor andere processen die gedomineerd worden door golfklappen worden toegepast.

Bij de berekeningen is ook gecontroleerd of de dijk bezwijkt door golfoverslag. Dat faalmechanisme heeft immers een eigen faalkansruimte, en daarom hoeft dit niet meegeteld te



worden bij het beoordelen van het mechanisme “erosie van het buitentalud”. Vanwege de zeer strenge doorsnede-eis worden er zeer extreme waterstanden en golfcondities beschouwd bij het beoordelen van de erosie. Het is dan goed denkbaar dat deze zo extreem zijn dat de dijk ook al faalt door golfoverslag of overlopen.

Verder is 52 cm zeespiegelstijging en 10 cm bodemdaling ter plaatse van de dijk verdisconteerd. Aangenomen wordt dat de bodemdaling geen invloed heeft op het niveau van de bodem van de Waddenzee.

Het aantal samples in de Monte Carlo berekeningen is in dit geval wat kleiner dan idealiter wordt toegepast. Uit de literatuur is bekend dat als het aantal samples 400 maal groter is dan de doelfaalkans, het aantal samples altijd voldoende is. In de huidige berekeningen was dit slechts een factor 240:

- 50 miljoen stormen van 12 uur in winterhalfjaar per windrichting
- 12 windrichtingen, dus totaal 600 miljoen stormen, overeenkomend met 1,6 miljoen jaren
- voor elke storm zijn er 10 berekeningen gedaan met verschillende ‘seeds’ voor de sterkteparameters, dus dat levert 16 miljoen jaarcases.
- De doelfaalkans is 1/67.000 per jaar. Dat betekent dat er een 240 maal groter aantal samples is toegepast dan de doelfaalkans.

In veel gevallen is het echter mogelijk om met minder samples toe te kunnen. Een gevaar daarbij is dat bij deze kleine kansen er sprake is van toeval in het berekeningsresultaat. Het is dan denkbaar dat de meest extreme condities iets te groot of iets te klein zijn. Dit is gecontroleerd aan de hand van Figuur 7.3 en Figuur 7.4. In deze figuren is te zien dat de toegepaste golfcondities en waterstanden goed overeenkomen met de waarden uit Hydra-NL, tot een bepaald niveau.

Bij de waterstanden is dit ongeveer tot NAP+6,50 m. Bij hogere waterstanden zou er een afwijking kunnen zijn, die het gevolg is van toeval. Gezien het feit dat de ontwerppunten beduidend onder deze waterstand blijken te zitten (zie Tabel 7-2), is de invloed van het toeval bij waterstanden hoger dan NAP+6,50 m verwaarloosbaar.

Bij de golfcondities zou er sprake van toeval kunnen zijn boven ongeveer  $H_{m0} = 3,0$  m. Gezien het feit dat de ontwerppunten onder deze golfhoogte blijken te zitten (zie Tabel 7-2), is de invloed hiervan naar verwachting verwaarloosbaar.

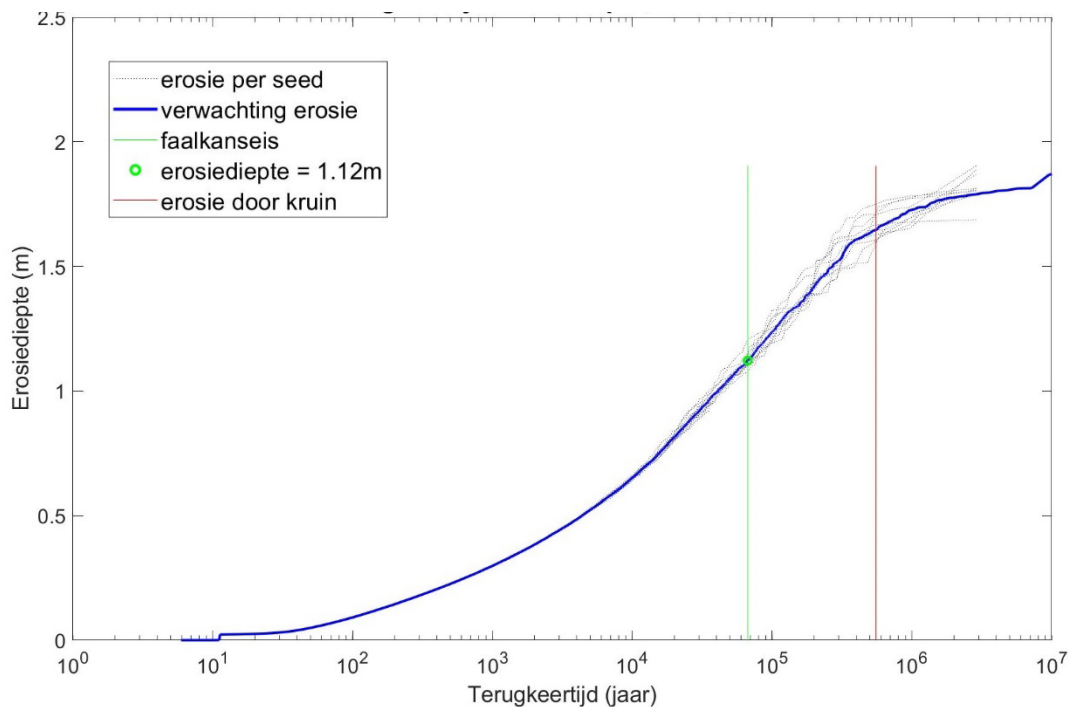
## 7.3 Resultaten van de berekeningen

De probabilistische berekeningen geven de erosiediepte als functie van de terugkeertijd als resultaat, waarbij terugkeertijd = 1/faalkans van de kleibekleding met gras. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 7.6.

De gebruikte database met hydraulische belastingen bevat alleen data voor 2050 en 2100, terwijl de dijk ontworpen wordt voor het zichtjaar 2075. Dit is opgelost door de golfcondities en waterstanden van 2100 als uitgangspunt te gebruiken en alle waterstanden in de Monte Carlo simulaties te verlagen met 25 cm. Deze 25 cm is het verschil in zeespiegelstijging tussen 2100 en 2075.

Omdat de golfcondities uit de database van Hydra-Ring worden gebruikt, die daar gegeven zijn als functie van de windsnelheid, is het mogelijk om de statistiek van de waterstanden aan te passen zonder de statistiek van de golfcondities aan te passen. Dientengevolge is het afdoende om de stijging van de zeespiegel alleen te verwerken in de waterstandsstatistiek en niet in de database van de golven (dit is een bekende benadering in het OI2014).

De golfcondities van 2100 kunnen daarom in combinatie met een aangepaste waterstandsstatistiek voor zichtjaar 2075 gebruikt worden zonder correctie toe te passen.



Figuur 7.6 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 1 bij een niveau van de overgang op NAP+5,95 m

In de figuur is te zien dat een erosiediepte van 1,12 m wordt bereikt met een terugkeertijd van 67.000 jaar. Dit is echter berekend voor een situatie met een hele dikke kleilaag. Omdat aangenomen kan worden dat de onderste 10 cm van de kleilaag op het zand gemakkelijk losbreekt, wordt aanbevolen om een minstens 10 cm dikkere kleilaag aan te houden dan de berekende erosiediepte. Daarnaast is er onderstaand een toeslag van 5 cm beargumenteerd, waarmee de benodigde kleilaagdikte voor deze situatie op 1,27 m komt. Als de kleilaagdikte groter is dan deze waarde, is de kans dat de kleilaag met gras doorbreekt tijdens een extreme storm kleiner dan 1/67.000 per jaar en voldoet het dus aan het faalkanscriterium.

De rode lijn in de figuur geeft aan bij welke terugkeertijd de erosie door de kruin heen gaat of het binnentalud bereikt. In dit geval is dat bij een terugkeertijd van 570.000 jaar (mits de kleilaagdikte tenminste 1,7 m bedraagt). Opgemerkt wordt dat alle berekeningen zijn uitgevoerd met hetzelfde dijkprofiel, terwijl bij locatie 1 de dijk in werkelijkheid iets hoger wordt gemaakt. Hoe hoger de dijk, hoe verder de rode lijn naar rechts verschuift.

De berekeningen zijn een aantal malen herhaald met verschillende startwaarden (seeds) voor de randomgenerator van de sterkteparameters, waardoor er andere combinaties gerealiseerd worden van de stormcondities en sterkteparameters. In de figuur is dit aangegeven door de dunne zwarte stippellijntjes. De blauwe lijn is de verwachtingswaarde van alle berekeningen, nadat ze allemaal als één grote verzameling zijn beschouwd. De dunne zwarte stippellijntjes zijn de afzonderlijke berekeningen met de specifieke startwaarden voor de trekkingen (seeds), waardoor een andere verzameling aselechte trekkingen resulteren voor de sterkteparameters  $m_1$ ,  $m_2$  en de erosiediepte bij de overgang van fase 1 naar fase 2. In de figuur is te zien dat in dit geval de variatie bij een terugkeertijd van 67.000 jaar ongeveer +/-10 cm is. Dit laat zien wat een combinatie van hoge belasting en lage sterkte, of andersom, betekent. De kans op het samengaan van zo'n bijzondere combinatie is ook statistisch meegewogen in de dikke lijn.

De verschillen tussen de dunne lijntjes worden geleidelijk aan groter naarmate de terugkeertijd groter wordt. Dat komt omdat er aan de rechterkant van de figuur (extreme condities) veel minder gebeurtenissen zijn dan aan de linkerkant (veelvoorkomende gebeurtenissen). De logaritmische schaal van de figuur is zodanig opgerekend dat er aan de rechterkant individuele berekeningen herkenbaar zijn aan de knikken in de lijntjes, terwijl dat aan de linkerkant niet kan vanwege de enorme hoeveelheid data.

Doordat er probabilistisch is gerekend, rekening houdend met alle onzekerheden, hoeft niet de bovengrens van deze spreiding aangehouden te worden, maar kan het ontwerp gebaseerd worden op de verwachtingswaarde.

Er zijn berekeningen gemaakt met diverse niveaus van de overgang van de harde bekleding naar het gras. Alle resultaten zijn samengevat in Tabel 7-2, waarbij de erosiediepte bij een terugkeertijd van 67.000 jaar vermeerderd is met 10 cm om rekening te houden met het feit dat de laatste 10 cm gemakkelijk wegspoelt. De relatie tussen de terugkeertijd en de erosiediepte van elk van deze cases is gegeven in bijlage C. Verder is er voor locatie 1 en 4 een extra onzekerheidstoeslag van 5 cm toegevoegd, omdat de golfhoogte in het ontwerp punt vrij ver van die in de Deltagoot ligt (zie onderstaande toelichting).

Locatie	Niveau overgang (m+NAP)			
	NAP+5,15 m	NAP+5,55 m	NAP+5,95 m	NAP+6,35 m
1		1,50	1,27	1,04
2		0,62	0,54	
3		0,85	0,69	
4	0,35	0,35	0,30	

Tabel 7-2 Benodigde kleilaagdikte bij verschillende niveaus van de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras

Uit de rekenresultaten blijkt dat er bij een hoger niveau van de overgang een kleinere kleilaagdikte nodig is, hetgeen te verwachten was. Dit geeft de benodigde speelruimte om het ontwerp te optimaliseren.

De golfcondities in het ontwerp punt (bij een erosiediepte met terugkeertijd van 67,000 jaar) zijn gegeven in Tabel 7-3 ( $h$  = waterstand ten opzichte van NAP;  $H_{m0}$  = de significante golfhoogte;  $H_{m0\perp}$  = de significante golfhoogte, omgerekend naar loodrechte golfaanval). Het ontwerp punt beschrijft de condities op de rand van wel/niet doorbreken van de kleilaag met de grootste kans van voorkomen. Het blijkt dat het ontwerp punt bij locatie 2 en 3 dicht in de buurt ligt van de golfcondities die toegepast zijn in de Deltagoot, maar bij locatie 1 zijn de golven ruim 30% hoger en bij locatie 4 zijn ze ongeveer de helft. Dat maakt dat de onzekerheden in de rekenresultaten voor locatie 1 en 4 mogelijk wat groter zijn dan waarmee rekening gehouden is in de probabilistische berekeningen. Een verdubbeling van de standaardafwijking van de parameters  $m_1$  en  $m_2$  geeft ongeveer 30% grotere erosiediepte (Klein Breteler 2021a). Gezien de verwachting dat de invloed van de grootte van de golven veel kleiner is, is in Tabel 7-2 een toeslag op de benodigde kleilaagdikte toegepast van 5 cm.

Lo-catie	Overgang: NAP+5,15			Overgang: NAP+5,55			Overgang: NAP+5,95			Overgang: NAP+6,35		
	h	H <sub>m0</sub>	H <sub>m0⊥</sub>	h	H <sub>m0</sub>	H <sub>m0⊥</sub>	h	H <sub>m0</sub>	H <sub>m0⊥</sub>	h	H <sub>m0</sub>	H <sub>m0⊥</sub>
1				5,82	2,81	2,67	5,85	2,75	2,63	5,87	2,83	2,68
2				5,77	2,68	1,83	5,80	2,84	1,95			
3				5,80	2,58	2,08	5,79	2,69	2,16			
4	5,96	2,31	1,05	5,96	2,31	1,05	6,07	2,38	1,05			

Tabel 7-3 Waterstand en significante golfhoogte in het ontwerp punt (alle waarden in m)

De berekende waterstanden in Tabel 7-3 hebben een overschrijdingskans van ongeveer 1/5.000 à 1/20.000 per jaar. In combinatie met de grote golven uit deze ongunstige richting is de overschrijdingskans van deze hydraulische belasting ongeveer 1/30.000 à 1/50.000 per jaar. Als ook de onzekerheid omtrent de sterkte wordt meegewogen, komen we op een overschrijdingskans van de erosiediepte van 1/67.000 per jaar (= doorsnede-eis voor deze dijk).

Er zijn ook een aantal extra berekeningen uitgevoerd om de invloed van specifieke aspecten te kwantificeren. Dit betreft enerzijds de gebruikte rekentechniek (aantal seeds en aantal doorgerekende jaren) en anderzijds de aannames ten aanzien van de maatgevende hydraulische belasting (duur van de storm en faseverschil tussen het moment van hoogwater en de top van de stormopzet) en onzekerheid in de sterkte. Figuren van deze berekeningen zijn gegeven in bijlage G. De invloed op de erosiediepte bij een faalkanseis van 1/67.000 per jaar is (de eerstgenoemde is de hier gehanteerde standaardberekening):

- invloed van het aantal seeds (combinaties van sterkte en belastingsituaties):
  - Erosiediepte bij berekeningen met 10 seeds: 0,978 m
  - Erosiediepte bij berekeningen met 30 seeds: 0,976 m
- invloed van het aantal doorgerekende jaren:
  - Erosiediepte bij berekeningen met 1,6 miljoen jaar: 0,533 m
  - Erosiediepte bij berekeningen met 320.000 jaar: 0,521 m
- invloed van verwachtingswaarde van  $m_1$  (in par. 6.1 is beargumenteerd dat er ook gerekend zou kunnen worden met  $m_1 = 0,8$ ):
  - Erosiediepte bij  $\mu(m_1) = 1,0$  en 5,5 uur faseverschil tussen het hoogtepunt van de stormopzet en hoogwater: 1,60 m
  - Erosiediepte bij  $\mu(m_1) = 0,8$  en 5,5 uur faseverschil tussen het hoogtepunt van de stormopzet en hoogwater: 1,53 m
- invloed van verwachtingswaarde en spreiding van parameter  $m_2$  (het volledig meetellen van de proefresultaten met de klei van Holwerd geeft een kleinere verwachtingswaarde en grotere spreiding, zie Bijlage D):
  - Erosiediepte bij  $\mu(m_2) = 1,0$  en  $\sigma(m_2) = 0,4$ : 1,12 m
  - Erosiediepte bij  $\mu(m_2) = 0,67$  en  $\sigma(m_2) = 0,67$ : 1,03 m
- invloed van het faseverschil tussen het hoogtepunt van de stormopzet en hoogwater:
  - Erosiediepte bij geen faseverschil: 1,12 m
  - Erosiediepte bij faseverschil van 5,5 uur: 1,6 m
- invloed van de duur van de storm:
  - Erosiediepte bij stormduur van 45 uur: 1,12 m
  - Erosiediepte bij stormduur van 70 uur: 1,35 m

Hieruit blijkt dat het aantal seeds en aantal doorgerekende jaren vrijwel geen invloed heeft op het rekenresultaat. Als de belasting wordt verzwaaard, neemt de erosie wel toe, zoals te verwachten was. Voor Tabel 7-2 is gekozen om te rekenen met de belasting zoals aangehouden wordt in het WBI-2017, namelijk zonder faseverschil en met een stormduur van 45 uur,

Het is interessant om te zien dat de aangepaste analyse, waarbij ook de resultaten van Holwerd worden meegenomen (zie bijlage D), een iets kleinere erosiediepte geeft.

In verband met andere faalmechanismen wordt aanbevolen voor de kleilaagdikte tenminste 80 cm aan te houden.

Ter controle is een eenvoudige deterministische berekening uitgevoerd voor locatie 1 met de golfcondities in het ontwerppunt (Tabel 7-3) en  $m_1 = m_2 = 1,0$  (verwachtingswaarde). Het resultaat is een erosiediepte van 0,78 m. Het is logisch dat dit wat minder is dan volgens de probabilistische berekeningen, omdat dit lijkt op een semi-probabilistische berekening met een veiligheidsfactor van 1,0. Zoals te verwachten was, moet de veiligheidsfactor groter zijn dan 1,0.

## 7.4 Aanbeveling voor het gebruik van de rekenmethode in de praktijk

Zoals gedemonstreerd in dit hoofdstuk zijn de formules goed bruikbaar om voor concrete praktijkgevallen met probabilistische berekeningen de benodigde kleilaagdikte en/of het niveau van de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras te bepalen. De formules houden rekening met zowel de sterkte van de grasbekleding als die van de kleilaag. Dit geeft de mogelijkheid om te dimensioneren of te beoordelen op de faalkans van de kleibekleding met gras. Hiermee wordt het uiteindelijke doel zoals geformuleerd in de Waterwet, namelijk zorgen dat de kans op een dijkdoorbraak voldoende klein is, nauwkeuriger benaderd dan wanneer alleen naar de grasbekleding wordt gekeken zoals in het WBI-2017.

Aanbevolen wordt om in het geval van een beoordeling van een bestaande dijk eerst gebruik te maken van het WBI-2017, met onder andere de software “BM Gras Buitentalud”. Als dit leidt tot een beoordelingsresultaat “voldoet”, dan zijn verdere berekeningen niet nodig en voldoet de dijk ten aanzien van dit aspect. Als het niet voldoet, dan kan in het kader van de Toets op Maat een probabilistische berekeningen gemaakt worden met de formules uit de onderhavige rapportage. Als dit leidt tot een voldoende lage faalkans van de kleibekleding met gras, dan voldoet de dijk ten aanzien van dit aspect alsnog.

Voor het ontwerp van de dijk kan er gekozen worden voor een niveau van de overgang naar de kleibekleding met gras die zo hoog ligt dat volgens WBI-2017 dit voldoet. Verdere berekeningen zijn dan niet meer nodig.

Anderzijds kan het ontwerp geoptimaliseerd worden door probabilistische berekeningen uit te voeren met de formules uit het onderhavige rapport. Dat geeft de mogelijkheid om de overgang op een lager niveau te leggen en eventueel zo laag dat een iets dikkere kleilaag nodig is. Dit geeft de ruimte om het ontwerp te optimaliseren.

Om de probabilistische berekeningen toegankelijk te maken voor een brede groep deskundigen die betrokken zijn bij deze problematiek gaat er software gemaakt worden waarmee deze berekeningen eenvoudig zijn uit te voeren.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Het onderzoeksprogramma naar de sterkte van de kleilaag met gras op het boventalud van zeedijken is gericht op twee aspecten van deze dijkbekledingen:

- de benodigde dikte van de kleilaag met gras
- het niveau van de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras

Om deze twee aspecten voor dijken langs de Waddenzee nauwkeuriger te kunnen ontwerpen is een onderzoek uitgevoerd bestaande uit drie onderdelen:

1. In de Deltagoot van Deltares zijn dijken op ware grootte nagebouwd met klei en gras op het boventalud (zie hoofdstuk 3). Door deze dijken te belasten met grote golven is experimenteel vastgesteld hoe snel de erosie van het gras en de klei plaatsvindt tijdens extreme omstandigheden.
2. Teneinde de resultaten van de Deltagootproeven breder toepasbaar te maken zijn berekeningen uitgevoerd met het numerieke rekenmodel OpenFOAM (zie hoofdstuk 5). Hiermee was het mogelijk om de invloed van diverse aspecten van de hydraulische belasting en de dijkgeometrie op de erosiesnelheid te kwantificeren. Dit heeft geleid tot formules waarmee de erosiesnelheid van de dijkbekledingen op het boventalud kan worden berekend.
3. De afgeleide formules zijn opgenomen in het rekenmodel van Deltares waarmee probabilistische berekeningen kunnen worden uitgevoerd (zie hoofdstuk 7). Met dit soort berekeningen kan de benodigde dikte van de kleilaag met gras bepaald worden als functie van het niveau van de overgang, waarbij de dijk voldoet aan de faalkansnorm betreffende de erosie van het boventalud.

De proeven in de Deltagoot hebben laten zien dat het erosieproces bestaat uit twee fases. Eerst gaat de erosie in verticale richting door de graslaag en ontstaat er een geleidelijk groeiend gat in de bekleding van de dijk vlak boven de overgang tussen de harde bekleding en de grasbekleding (zie Figuur 4.3). Dit deel van het erosieproces verloopt vrij traag. Het is gebleken dat wanneer de erosiediepte gevorderd is tot ongeveer 50 cm, het erosieproces in een tweede fase komt waarbij de erosie aanzienlijk sneller verloopt. Er is dan een klif van klei ontstaan, waarbij de voet van de klif door de golven erodeert en zo de graslaag ondermijnt.



Figuur 8.1 Golfbelasting in de Deltagoot op een dijk met profiel van de Lauwersmeerdijk

Omdat alle proeven zijn uitgevoerd met loodrechte golfaanval, terwijl op dijken er vaak scheef invallende golven zijn, wordt onderscheid gemaakt in:

- De significante golfhoogte bij de teen van de dijk:  $H_{m0}$
- De equivalente significante golfhoogte bij de teen van de dijk van loodrecht invallende golven die evenveel erosie geven als de scheef invallende golven:  $H_{m0\perp}$

De waarde van  $H_{m0\perp}$  kan berekend worden met formule (55).

De eerste fase van het erosieproces blijkt goed gekwantificeerd te kunnen worden met de formule van Klein Breteler (2015), die ontwikkeld is voor WBI-2017, met een eenvoudige modificatie om rekening te houden met het niveau van de overgang (als  $d_e < 0,50$  m):

$$d_e = m_1 \cdot f_{\text{overgang}} c_d \cdot \max(0; H_{m0\perp} - 0,5) (\tan \alpha_{\text{gem}})^{1,5} \cdot t_{\text{belast}} \quad (57)$$

$$f_{\text{overgang}} = \max\left(0; \min\left(1; 0,44 \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0\perp}} + 0,66\right)\right) \quad (58)$$

Met (zie ook symbolenlijst op bladzijde 6):

$H_{m0}$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk, eventueel scheef invallend (m)

$H_{m0\perp}$  = equivalente significante golfhoogte bij de teen van de dijk van loodrecht invallende golven die evenveel erosie geven als de scheef invallende golven (m)

$t_{\text{belast}}$  = duur van de hydraulische belasting (met constante waterstand en golfhoogte) (uur)

$c_d$  = 0,67 als zandgehalte < 45%, inclusief het effect van eens per vijf jaar een zeer hete en droge zomer

$d_e$  = grootste diepte in de erosiekuil (m)

$f_{\text{overgang}}$  = invloedsfactor van de overgang op de erosiesnelheid in de eerste fase van het erosieproces (-)

$h_{\text{overgang}}$  = waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar het gras, zie Figuur 8.2 (positief als overgang onder water) (m)

$\alpha_{\text{gem}}$  = gemiddelde taludhelling tussen  $H_{m0}$  onder SWL en  $H_{m0}$  boven SWL (zonder de breedte van de berm mee te tellen) ( $^\circ$ )

$m_1$  = modelonzekerheid (-)

De formule van Klein Breteler (2015) was ontwikkeld voor taluds die van onder tot boven bestaan uit een kleilaag met gras. Uit de Deltagootproeven is gebleken dat de erosiesnelheid nu iets kleiner is door de aanwezigheid van de harde bekleding op een deel van het talud. Daarom is de parameter  $f_{\text{overgang}}$  toegevoegd.

Voor het kwantificeren van de tweede fase van het erosieproces is gebruik gemaakt van de resultaten van de Deltagootproeven en de numerieke berekeningen met OpenFOAM. De basis voor deze methode wordt gevormd door de hypothese van Kruse (Klein Breteler e.a. 2012) die zegt dat de erosiesnelheid bepaald wordt door de piekdruk van de golfklappen tegen de klei. Deze piekdrukken zijn berekend met OpenFOAM.

Dit heeft geresulteerd in de volgende formule voor de erosiesnelheid van de klei met gras in de tweede fase van het erosieproces (als  $d_e > 0,50$  m en  $H_{m0\perp} > 0,5$  m):

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,068 \cdot m_2 \frac{(H_{m0\perp} - 0,25)^2}{\sqrt{s_{op}}} \cdot \min \left( 2,4 ; \max \left( 0 ; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{overgang}}{H_{m0\perp}} \right) \right) \cdot \left( \frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0\perp}} \cdot \min \left( 1 ; \max \left( 0 ; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0\perp}} \right) \right) + 8} - 0,5 \right) \cdot \left( 1,64 - \frac{0,17}{\tan(\alpha_{gem})} \right) \quad (59)$$

Met:

$\partial V_e / \partial t$  = erosiesnelheid (erosievolumeverandering per meter dijk per uur) (m<sup>3</sup>/m/u)

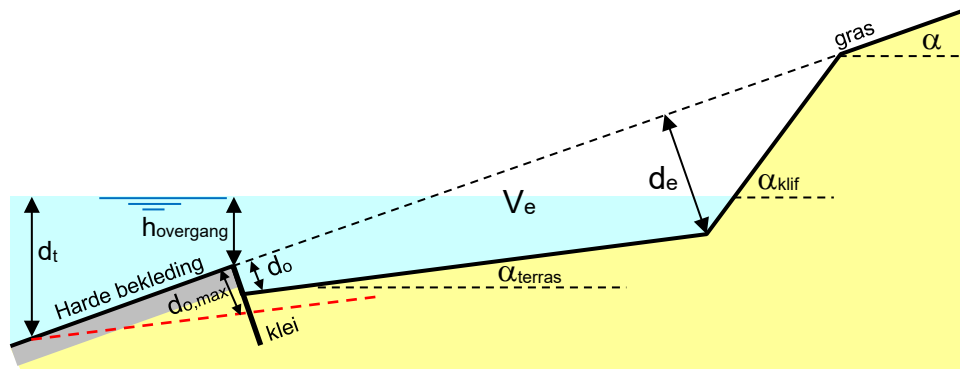
$h_{overgang}$  = waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras (m)

$B_{berm}$  = breedte van de berm (m)

$h_{berm}$  = diepte van de berm (zie Figuur 5.20 voor de definitie) (m)

$s_{op}$  =  $H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$  = golfsteilheid (-)

$m_2$  = modelonzekerheid (-)



Figuur 8.2 Geschematiseerd de vorm van het erosieprofiel zoals gebruikt in het rekenmodel

De vorm van de erosiekuil is geschematiseerd zoals weergegeven in Figuur 8.2. De helling van het erosieterras ( $\tan(\alpha_{terras})$ ) blijkt volgens de proeven in de Deltagoot gemiddeld ongeveer 1:8 te zijn bij een boventalud van 1:4, en 1:10 bij een boventalud van 1:5, terwijl de klif een helling heeft van 2:1 ( $\tan(\alpha_{klif}) = 2$ ).

Het erosieprofiel blijkt gekwantificeerd te kunnen worden met de volgende formules:

- Eerste fase van het erosieproces (zolang  $d_e < 0,50$  m, zie formule (57)):

$$V_e = \frac{d_e^2 - d_o^2}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (60)$$

$$\frac{d_t}{H_{m0\perp}} = \min \left( 0,4 \frac{V_e^{0,25}}{H_{m0\perp}^{1,5}} + \frac{0,7}{H_{m0\perp}} ; 2 \right) \quad (61)$$

$$\frac{d_o}{H_{m0\perp}} = \max \left( 0 ; \min \left( \frac{h_{overgang}}{H_{m0\perp}} + 1,5 ; 1 \right) \right) \cdot \max \left( 0 ; \min \left( 0,75 \cdot \frac{d_e}{H_{m0\perp}} ; \frac{d_t - h_{overgang}}{H_{m0\perp}} \tan(\alpha - \alpha_{terras}) ; 0,18 \right) \right) \quad (62)$$

Door de onderlinge afhankelijkheid van deze formules is een iteratie nodig. Als gestart wordt met  $d_o = 0,75d_e$  geven 2 à 3 iteraties al een voldoende nauwkeurigheid.



- Tweede fase van het erosieproces (vanaf  $d_e > 0,50$  m):

$$\frac{d_o}{H_{m0\perp}} = \max \left( 0; \min \left( \frac{h_{\text{overgang}}}{H_{m0\perp}} + 1,5; 1 \right) \right) \cdot \max \left( 0; \min \left( \frac{d_t - h_{\text{overgang}}}{H_{m0\perp} \sin \alpha} \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}); 0,18 \right) \right) \quad (63)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) + d_o^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})}{\tan(\alpha_{\text{klijf}} - \alpha)}\right)}} \quad (64)$$

Met (zie Figuur 8.2):

$d_o$  = erosiediepte tegen de overgang (m)

$d_t$  = diepte van aansluiting van erosieterras op het buitentalud onder de stilwaterlijn (m)

$\alpha$  = taludhelling van boventalud (kleibekleding met gras) ( $^\circ$ )

$\alpha_{\text{terras}}$  = taludhelling van het erosieterras (als  $\tan(\alpha) = 0,25$ , dan  $\tan(\alpha_{\text{terras}}) = 1/8$ ; als  $\tan(\alpha) = 0,20$ , dan  $\tan(\alpha_{\text{terras}}) = 1/10$ ) ( $^\circ$ )

$\alpha_{\text{klijf}}$  = taludhelling van het erosieklif ( $\tan(\alpha_{\text{klijf}}) = 2$ ) ( $^\circ$ )

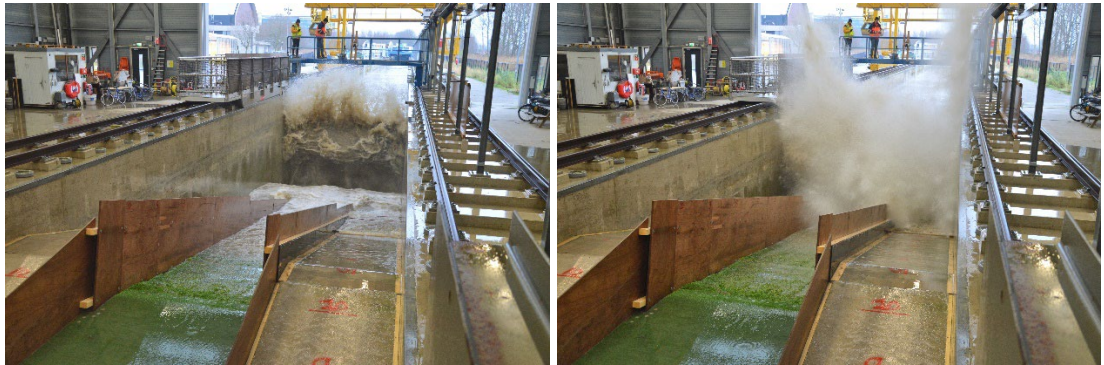
De waarde van  $d_o$  bepaalt hoe diep het schot bij de overgang van de harde bekleding naar het gras moet worden. Uit Figuur 5.5 blijkt dat de erosie zelden groter wordt dan 50 cm, dus daar moet de diepte op afgestemd worden. Het is verstandig om een duidelijk grotere diepte aan te houden voor het schot bij de overgang, om zeker te zijn dat de erosie de overgang niet kan ondermijnen.

Deze formules gelden voor de volgende hydraulische belasting, dijkeometrie en kleieigenschappen (zie paragraaf 6.5):

- Kleikwaliteit (gemiddeld over vele kubieke meters en meerdere monsters):
  - gemiddeld zandgehalte  $< 45\%$ , en
  - gemiddelde plasticiteitsindex  $> 15\%$
  - gemiddeld lutumgehalte  $> 10$  à  $20\%$ , en
- proctordichtheid  $> 88\%$  (aanbevolen wordt om bij aanleg naar een hogere proctordichtheid van tenminste  $95\%$  te streven bij een consistentieindex van  $0,6$  à  $0,7$ )
- De klei mag bij aanleg niet veel te nat verwerkt zijn, omdat dit leidt tot een zeer sterke structurering (zie bijlage H).
- Daarnaast stelt WVL van Rijkswaterstaat dat de resultaten van het huidige onderzoek alleen toegepast mogen worden op waterkeringen rond de Waddenzee. De kennis is nog niet voldoende ontwikkeld om het buiten dit gebied toe te passen.
- Graskwaliteit: open of gesloten zode
- Significante golfhoogte:  $H_{m0\perp} \leq 2,8$  m (equivalente waarde, omgerekend naar loodrechte golfaanval). In de buurt van deze grens wordt aanbevolen wat extra onzekerheid toe te passen (zie ook paragraaf 7.3)
- Golfsteilheid ( $S_{op} = H_{m0\perp}/(gT_p^2/(2\pi))$ ):  $0,020 \leq S_{op} \leq 0,055$  (berekend op basis van de naar loodrechte golfaanval omgerekende significante golfhoogte)
- Diepte van de overgang (van harde bekleding naar kleibekleding met gras) ten opzichte van de stilwaterlijn:  $h_{\text{overgang}}/H_{m0\perp} > -0,7$
- Taludhelling:  $0,16 < \tan \alpha < 0,35$
- Bermbreedte:  $0 \leq B_{\text{berm}}/H_{m0\perp} < 5$
- Diepte van de berm onder de stilwaterlijn:  $h_{\text{berm}}/H_{m0\perp} > -0,5$
- Gemiddeld eens per vijf jaar een extreem hete en droge zomer met twee maanden lang temperaturen boven de  $30^\circ$  zonder regen.

Voor het lutumgehalte is er geen scherp criterium gegeven, omdat in TAW (1995) beargumenteerd is dat deze eigenschap van secundaire invloed is. Als het lutumgehalte vrij laag is (in de buurt van 10%), dan moeten de andere criteria niet te dicht op de grens zitten.

De nauwkeurigheid van bovenstaande formules neemt af naarmate de omstandigheden meer afwijken van de condities en geometrie die in de Deltagoot zijn gebruikt. Het is met name van belang dat de hydraulische belasting in de buurt van het ontwerppunt ruim binnen bovenstaande geldigheidsgebied ligt. Bij dit ontwerppunt is de bijdrage aan de faalkans het grootst en is het dus van belang dat de nauwkeurigheid voldoende groot is.



Figuur 8.3 Aanstormende golf en resulterende golflap tijdens proef K5\_03

De formules zijn afgeleid voor de drie onderzochte kleisoorten, maar ze blijken ook goed aan te sluiten op Deltagootproeven uit het verleden (4 kleisoorten, zie Figuur 5.28). Omdat gebleken is dat de huidige categorisering van klei geen goed onderscheid maakt tussen snel eroderende klei en langzaam eroderende klei in golfaanval, wordt aanbevolen om deze categorisering te verbeteren, zie paragraaf 8.2.

In het derde onderdeel van het onderzoek zijn de afgeleide formules opgenomen in de probabilistische rekentool van Deltares (Matlab-code) (zie hoofdstuk 7). Met dit rekenmodel en de door Hydra-Ring gegenereerde waterstanden en golfcondities zijn vervolgens ruim een miljoen jaren gesimuleerd met een Monte Carlo simulatie. Dit levert de kans dat de dijk bij een specifieke kleilaagdikte en niveau van de overgang (tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras) bezwijkt als gevolg van het falen van de kleibekleding met gras op het boventalud. Er zijn voorbeeldberekeningen gegeven voor de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat.

Voor de probabilistische berekeningen zijn 3 onzekerheden toegevoegd aan de formules:

- In formule (57):  $\mu(m_1) = 0,8$ ,  $\sigma(m_1) = 0,4$  (zie ook formule (52))
- In formule (59):  $\mu(m_2) = 1,0$ ,  $\sigma(m_2) = 0,4$  (zie ook formule (53))
- Overgang 1<sup>ste</sup> naar 2<sup>de</sup> fase:  $\mu(d_{e,1 \rightarrow 2}) = 0,50$  m en  $\sigma(d_{e,1 \rightarrow 2}) = 0,1$  m

Er zijn vier locaties langs de dijk gekozen voor deze berekeningen. Bij een niveau van de overgang (tussen de harde bekleding en de kleibekleding met gras) op NAP+5,95 m hebben de berekeningen geleid tot de volgende minimaal benodigde kleilaagdiktes:

- Locatie 1 (km 87,7): kleilaagdikte = 1,3 m
- Locatie 2 (km 85,7): kleilaagdikte = 0,5 m
- Locatie 3 (km 84,9): kleilaagdikte = 0,7 m
- Locatie 4 (km 82,5): kleilaagdikte = 0,3 m

In verband met andere faalmechanismen wordt aanbevolen voor de kleilaagdikte tenminste 80 cm aan te houden. Hierbij kan gedacht worden aan het watertransport richting de kern van de dijk in verband met macro-instabiliteit en gravende dieren die door de kleilaag naar de zandondergrond graven waardoor kanalen ontstaan die kunnen leiden tot het uitspoelen van zand tijdens golfaanval.

## 8.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Bij het bespreken van onderhavige rapportage met het Adviesteam Dijkontwerp en het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) zijn een aantal suggesties naar voren gekomen voor nader onderzoek. Deze zijn onderstaand beschreven.

### 8.2.1 Aanwezigheid initiële schade

In het huidige onderzoek is aan het begin van de proeven kunstmatige schade aangebracht, namelijk een gat in het gras van ongeveer 20 × 20 cm en 5 cm diep. In het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de huidige beoordelingsmethoden van grasbekledingen ('BM Gras Buitentalud', onderdeel van WBI-2017) is meestal geen schade aangebracht aan het begin van de proeven met de golfloop- en overslagsimulator. Daarnaast zijn wel proeven uitgevoerd op specifieke schades, zoals molshopen en beschadigingen door muizen. Deze beschadigingen hadden doorgaans een beperkt effect.

Aanbevolen wordt om nader uit te zoeken welke methode van het beproeven van gras en klei het beste aansluit op de werkelijkheid.

Verder wordt aanbevolen om het ontstaan van initiële schade aan de grasbekleding toe te voegen aan het rekenproces. Dat kan bijvoorbeeld door initiële schade door golfloop en/of golfklappen te beschouwen op basis van de beoordelingsmethode uit WBI-2017.

Als alternatief kan eventueel overwogen worden om de conditie van de grasbekleding door de gebruiker te laten inschatten als de kans van aanwezigheid van een gat in de grasmat bij de overgang. Daarbij kan eventueel gebruik worden gemaakt van de schouwrappporten van de situatie ter plekke. Hierbij vertegenwoordigt het nu voorgestelde model een situatie met schade aan de overgang naar gras (kans op gat = 1).

### 8.2.2 Vereenvoudigingen aan de veilige kant

Bij de afleiding van de formules zijn soms keuzes gemaakt of vereenvoudigingen doorgevoerd. Om te voorkomen dat uiteindelijk een onveilig resultaat wordt verkregen met de formules, zijn daarbij steeds aannames gedaan aan de veilige kant. Dat leidt tot verborgen veiligheid in de formules en resultaten, dat eigenlijk ongewenst is in een probabilistische aanpak. Aanbevolen wordt om al deze keuzes en vereenvoudigingen nader te analyseren, de veiligheid eruit te halen en als onzekerheid in het eindresultaat toe te voegen.

Bij één van de keuzes is dat reeds gedaan. Dit betreft de keuze om de formules te baseren op de proeven met klei van de Lauwersmeerdijk en de dijk bij Blija. In bijlage D is een alternatieve analyse uitgevoerd waarbij ook de klei van Holwerd is betrokken. In de gevoeligheidsberekeningen in bijlage G.3 is gebleken dat voor de situatie bij de Lauwersmeerdijk dit 8% minder klei-erosie geeft.

### 8.2.3 Verbeterde categorisering van klei

Omdat gebleken is dat de huidige categorisering van klei geen goed onderscheid maakt tussen snel eroderende klei en langzaam eroderende klei in golfaanval, wordt aanbevolen om deze categorisering te verbeteren.

Belangrijke elementen die hierin moeten worden toegevoegd is de verdeling van het zand in de klei (zandlenzen en zandpockets versus volledig verdeeld zand waarbij elke zandkorrel contact maakt met kleideeltjes), de proctordichtheid en de gestructureerdheid van de klei. De invloed van de Atterbergse grenzen lijkt minder groot te zijn.

Verder zou ook de samenhang (brokkeligheid) van de klei meegewogen moeten worden, zie bijlage F voor een mogelijke meetmethode. Tijdens het inbouwen van de klei van Blija bleek deze vrij gemakkelijk af te brokkelen en wellicht heeft dat ertoe bijgedragen dat deze relatief goede klei vrij snel erodeerde.

De samenhang in de klei wordt ook beïnvloed door de wijze van aanleg van de kleilaag. Als de klei bij aanleg erg nat is, dan is het verdichten niet goed mogelijk en zullen er door het verdrogen van de klei scheuren ontstaan. Dit leidt uiteindelijk tot een klei die bestaat uit brokken met scheuren. De klei heeft dan een zeer sterke structurering. Een voorbeeld hiervan is de klei op de Emmapolderdijk in 1962, zoals beschreven in bijlage H.

Zo zouden de geotechnische parameters van de klei gebruikt moeten worden om de klei te karakteriseren of te categoriseren. Aanbevolen wordt om de bestaande beproevingsmethodes nader te analyseren om te zien welke methode het beste geschikt is om de erosiebestendigheid / erosiegevoeligheid van de klei te bepalen. De traditioneel voor dit doel gebruikte beproevingsmethodes, zoals het bepalen van de Atterbergse grenzen, het gehalte aan organisch stof, het kalkgehalte en het zoutgehalte blijken tekort te schieten. Deze methodes zijn voornamelijk gericht op erosie door stroming, en missen de specifieke aspecten die belangrijk zijn voor erosie door golfbelasting.

Mochten de bestaande beproevingsmethodes onvoldoende zijn, dan wordt aanbevolen om nieuwe methodes te ontwikkelen. Aanbevolen wordt ook te kijken in hoeverre de biologische en klimatologische aspecten hierbij meegenomen kunnen worden.

Een goede karakterisering of categorisering van de klei is belangrijk voor de toepassing van de resultaten van het huidige onderzoek op de klei van dijken elders in Nederland.

#### **8.2.4 Onzekerheid omtrent het beschreven erosieproces**

Het erosieproces, zoals beschreven in hoofdstuk 4 bestaat uit twee fases. In de eerste fase gaat het om het eroderen van de grasbekleding en in de tweede fase om de erosie van de klei, met name bij de verticale klif. Aanbevolen wordt om te onderzoeken in hoeverre dit beeld volledig genoeg is om de werkelijkheid te beschrijven. Zo kan ook de krachtige en turbulente stroming tijdens de golfbelasting, bijvoorbeeld tijdens de golfneerloop, bijdragen aan het erosieproces. Verder zou de hypothese van Kruse over de relatie tussen de erosiesnelheid en de piekdruk op de erosieklif nader geverifieerd moeten worden.

Ook in zo'n schematisatie van de werkelijkheid schuilt onzekerheid. Aanbevolen wordt om te trachten deze onzekerheid te kwantificeren en mee te nemen in de probabilistische berekeningen.

#### **8.2.5 Berekeningen met OpenFoam**

In het kader van dit onderzoek zijn er vele berekeningen uitgevoerd met het numerieke rekenmodel OpenFoam. Aanbevolen wordt om de nauwkeurigheid van deze berekeningen nader te analyseren, door bijvoorbeeld een kleinere grid- en tijdstapgrootte te hanteren. Gezien het feit dat de huidige berekeningen al gemiddeld drie weken rekentijd kosten, is dit in het huidige project niet meer nader onderzocht.

Een aantal details over de specifieke settings die gebruikt zijn in het rekenmodel zijn in de onderhavige rapportage vermeld. Maar bij vervolgonderzoek zullen ongetwijfeld specifieke vragen rijzen. Daarvoor zijn alle rekenresultaten en invoerfiles beschikbaar bij de auteur:

mark.kleinbreteler@deltares.nl

Tevens wordt aanbevolen om niet alleen de piekdruk te beschouwen, maar ook de impuls/stoot van het water tegen de klif. Deze waarde is minder gevoelig voor de grid- en tijdstapgrootte in de berekeningen, maar is wel weer heel gevoelig voor de definitie van de duur van de golfklap.

Bij het vervolgonderzoek naar het erosieproces (zie paragraaf 8.2.4) kunnen ook OpenFoam berekeningen worden toegepast. Het rekenmodel kan wellicht verder uitgebreid worden met de scheuren en spleten in de klei. De rekestijd kan daarbij sterk oplopen, maar door dan slechts enkele golven door te rekenen, kan wellicht een bijdrage gegeven worden aan de fundamentele vragen omtrent het erosieproces.

Aanbevolen wordt om het numerieke model beter te valideren aan de hand van grootschalige proeven waarin de druk op een constructie door brekende golven is gemeten.

## Referenties

- Bingham, H.B., and H. Zhang (2007)  
On the accuracy of finite difference solutions for nonlinear water waves  
J. Eng. Math. 58 (2007) 211–228]
- Bouwsema, P. (1978)  
De Emmapolderdijk in de eerste 30 jaar na de aanleg  
Rijkswaterstaat, dienstkring Baflo, januari 1978
- Engsig-Karup, A.P., H.B. Bingham and O. Lindberg (2008)  
An efficient flexible-order model for 3D nonlinear water waves  
Journal of Computational Physics 228 (2009) 2100–2118
- ENW (2007)  
Addendum I bij de Leidraad Rivieren t.b.v. het ontwerpen van rivierdijken  
Leidraad Rivieren  
ENW, juli 2007
- Jacobsen, N.G., D.R. Fuhrman and J. Fredsøe (2011)  
A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM  
International Journal For Numerical Methods In Fluids, DOI: 10.1002/flid.2726, 2011
- Jacobsen, N.G., M.R.A. van Gent, A. Capel and M. Borsboom (2018)  
Numerical prediction of integrated wave loads on crest walls on top of rubble mound structures  
Coastal Engineering 142 (2018) 110–124
- Kaste, D., en M. Klein Breteler (2015)  
Rekenmodel voor klei-erosie bij variërende waterstand  
Deltares, rapport 1209832-010, 16 januari 2015
- Klein Breteler, M. (2015)  
Residual strength of grass on clay in the wave impact zone  
Basis for safety assessment method of WTI-2017, product 5.10  
Deltares, report 1209437-011, 5 June 2015
- Klein Breteler, M., A. Capel, G.A.M. Kruse, G.C. Mourik en D. Kaste (2012)  
Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven  
SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven  
Deltares, rapport 1204200-008, 18 mei 2012
- Klein Breteler, M. (2018)  
Stabiliteit van oud asfalt tijdens golfbelasting  
Meetrapport van Deltagootonderzoek met asfalt van Lauwersmeerdijk  
Deltares, rapport 11200296-009, 7 maart 2018
- Klein Breteler, M. (2018a)  
Maximale significante golfhoogte op ondiep water  
Deltares, memo 11202105-000-GEO-0001, 12 maart 2018

Klein Breteler, M., en G.C. Mourik (2019)  
Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken  
Deltares, rapport 11203720-017, 18 juli 2019

Klein Breteler, M. (2021)  
Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken  
Meetverslag Deltagootproeven  
Deltares, rapport 11204841-006, 27 augustus 2021

Klein Breteler, M. (2021a)  
Benodigde kleidikte en niveau van overgang op boventalud Lauwersmeerdijk  
Resultaat probabilistische berekeningen op basis van Deltagootproeven  
Deltares, rapport 11204841-006, 5 februari 2021

Kruse, G.A.M. (2010)  
Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied  
Deltares, rapport 1202512, 16 juli 2010

Larsen, B.E., and D. R. Fuhrman (2018)  
On the over-production of turbulence beneath surface waves in RANS models  
Journal of Fluid Mechanics, 2018

Mourik, G.C. (2020)  
Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack  
WTI-2017 Product 5.21  
Deltares, report 1209437-017, 20 July 2020

OI-2014 versie 4 (RWS 2017)  
Handreiking ontwerpen met overstromingskansen,  
Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskans-normen,  
RWS, versie v4, Februari 2017

RWS 2019  
Schematiseringshandleiding grasbekleding  
WBI-2017  
Rijkswaterstaat, 28 november 2019

RWS 2019  
Schematiseringshandleiding steenzettingen  
WBI-2017  
Rijkswaterstaat, 28 november 2019

Smale, A.J., and N.G. Jacobsen (2020)  
Validation of OceanWave3D and OpenFOAM, Wave runup on slopes  
Deltares, report 11203719-007, February 13, 2020

Steeg, P. van (2014)  
Residual strength of grass on river dikes under wave attack  
Phase 3: Large scale flume model tests on soil and grass of locations Harculo and  
Oosterbierum  
Deltares, report 1207811-009, 29 July 2014

Steijn, P. van, en M. Klein Breteler (2021)  
Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk  
Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven  
Deltares, concept rapport 11206194-002, 10 augustus 2021

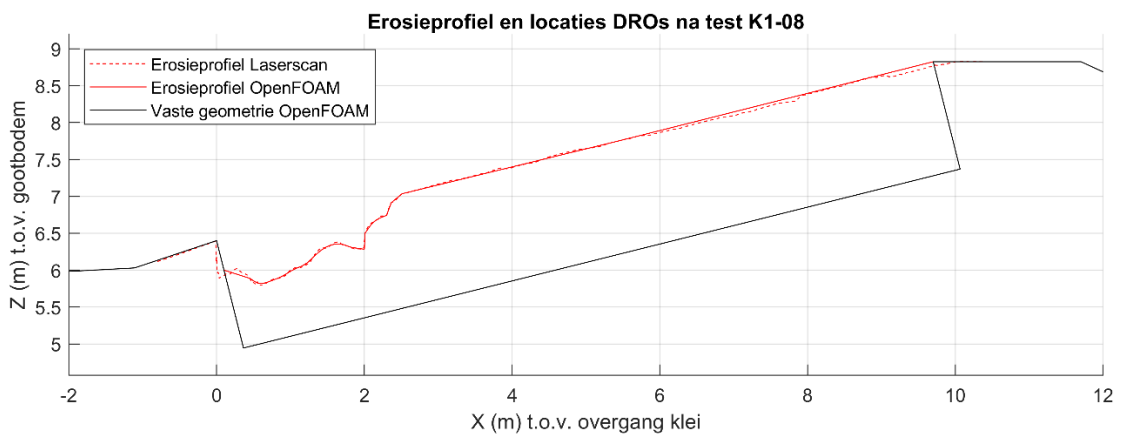
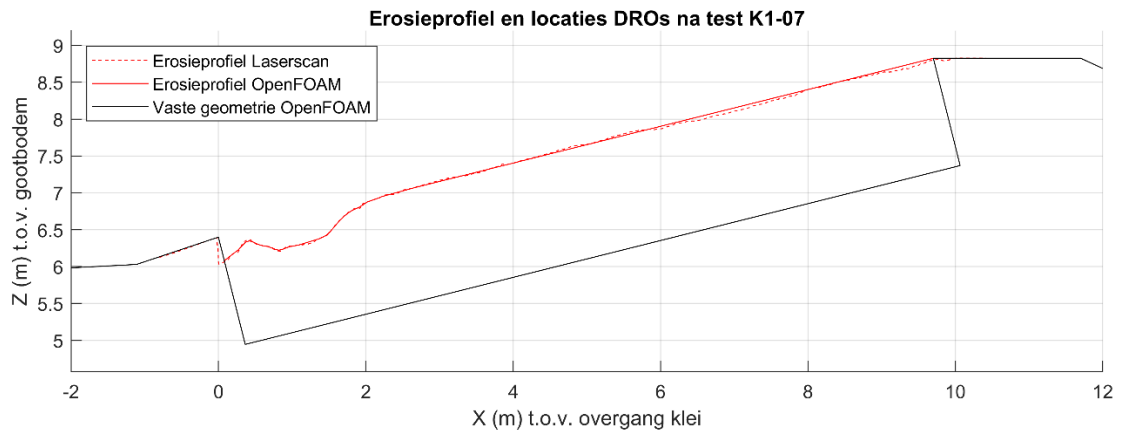
TAW (1996). Technisch rapport klei voor dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 1996.

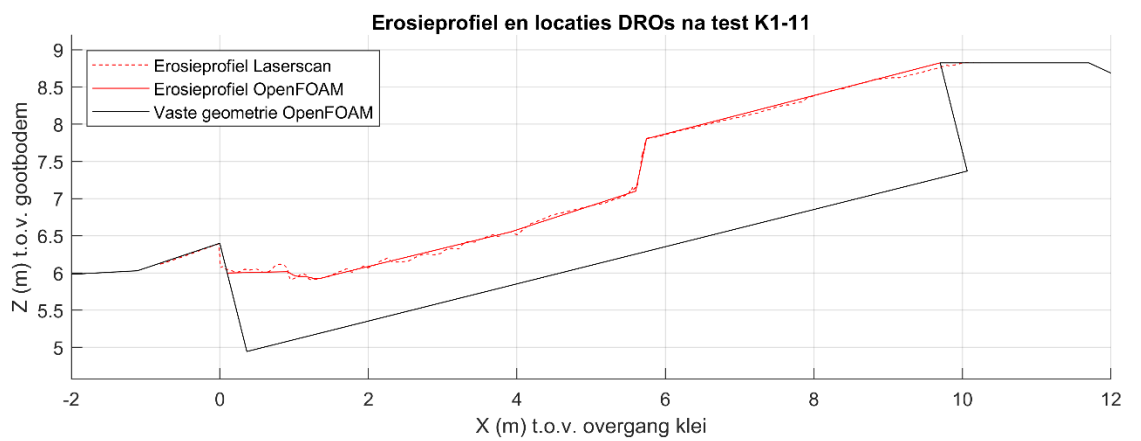
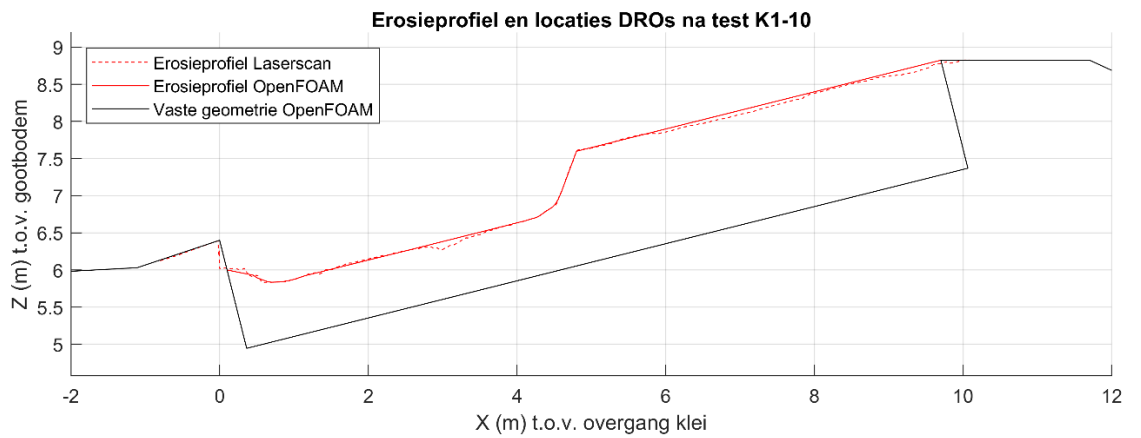
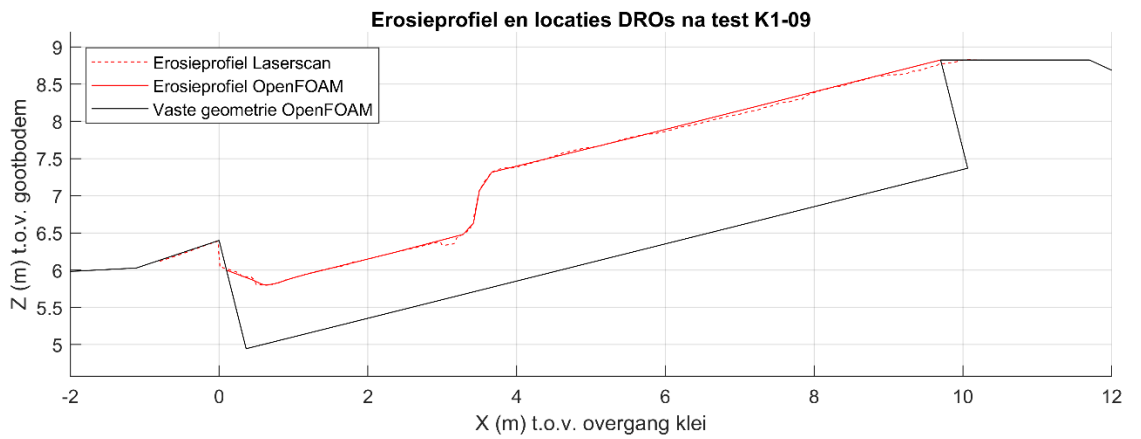
Van der Meer, J.W. (1999)  
Rudimentaire opzet erosiemodel dijken  
Infram, memo i157, december '99

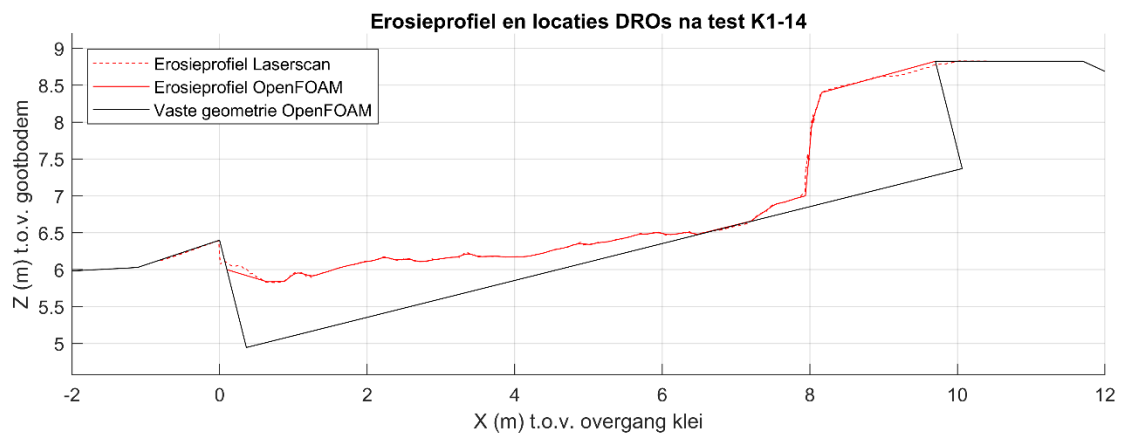
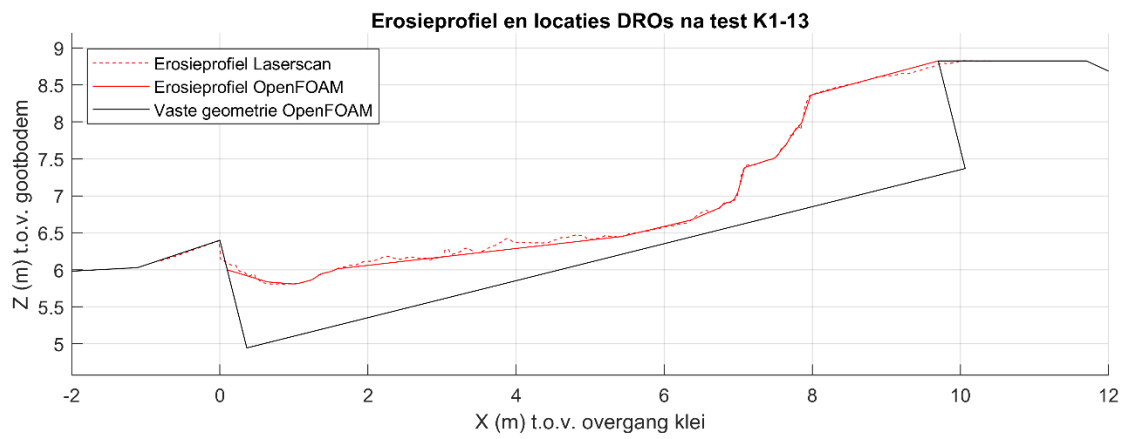
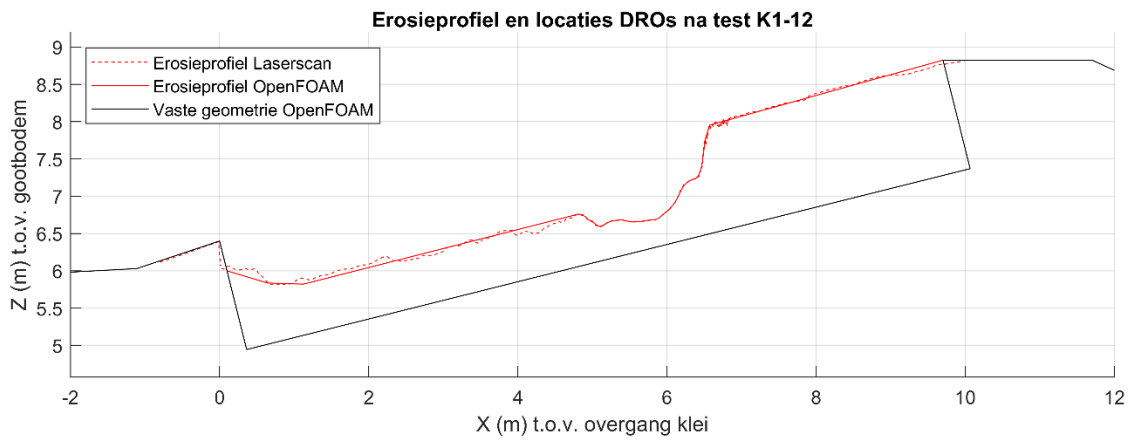


# A Erosieprofielen in OpenFOAM berekeningen

Onderstaand zijn de erosieprofielen gegeven zoals deze gemeten zijn na afloop van de betreffende proef met de laserscan in de Deltagoot (gestippelde lijn) en de enigszins vereenvoudigde profielen zoals deze gebruikt zijn in de berekeningen met OpenFOAM. Op de verticale as staat het niveau ten opzichte van de gootbodembodem, waarbij geldt dat de gootbodembodem omgerekend op NAP-0,45 m ligt, dus de overgang op NAP+5,95 m.







## B Resultaten berekeningen met OpenFoam

In de tabellen in deze bijlage zijn de volgende symbolen gebruikt:

$h$  = waterdiepte voor de dijk (m)

$h_{\text{overgang}}$  = waterstand ten opzichte van de overgang van de harde bekleding naar het gras (m)

$H_{m0}$  = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)

$T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$S_{op}$  = golfsteilheid (-)

$B_{\text{berm}}$  = bermbreedte (m)

$h_{\text{berm}}$  = waterdiepte boven de voorrand van de berm (m)

$\phi_{s,\text{klap}}$  = significante waarde van de stijghoogte in de golfklap tegen de klif (m)

$\partial V_e / \partial t$  = erosiesnelheid: verandering erosievolume per meter dijk per uur ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{u}$ )

### B.1 Nagerekende Deltagootproeven

proef	Deltagoot		OpenFOAM					
	Duur (uur)	Erosievolume ( $\text{m}^3/\text{m}$ )	Som ID	Gerekend met profiel	Raai (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$\phi_{s,\text{klap}}$ (m)
K1_07	1,57	0,58	K1_08_v05	na K1_07	0,60	1,91	5,56	2,92
K1_08	0,75	1,23	K1_09_v05	na K1_08	0,40	1,91	5,56	2,98
K1_09	0,67	2,39	K1_10_v05b	na K1_09	0,25	1,91	5,58	2,97
K1_10	0,56	3,26	K1_11_v05b	na K1_10	0,40	1,92	5,61	3,30
K1_11	0,76	3,99	K1_12_v05b	na K1_11	0,40	1,92	5,61	3,57
K1_12	1,29	5,21	K1_13_v05c	na K1_12	0,25	1,92	5,60	3,20
K1_13	1,15	6,99	K1_14_v05b	na K1_13	0,30	1,93	5,61	3,03
K1_14	1,17	8,23	K1_15_v05b	na K1_14	0,40	1,93	5,59	3,21

Tabel 8-1 Gemeten erosievolume na afloop van de proef in de Deltagoot (cumulatief) en resultaten van de OpenFOAM berekeningen voor tweede fase van erosieproces tijdens proevenserie K1

proef	Deltagoot		OpenFOAM					
	Duur (uur)	Erosievolume (m <sup>3</sup> /m)	Som ID	Gerekend met profiel na	Raai (m)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	φ <sub>s,klap</sub> (m)
K3_07	2,00	1,40	K3_v04_08	K3_07	0,40	2,01	5,56	2,83
K3_08	2,00	2,08	K3_v04_09	K3_08	0,40	2,02	5,58	2,77
K3_09	1,46	2,60	K3_v04_10	K3_09	0,40	2,02	5,59	2,85
K3_10	2,00	3,63	K3_v04b_11	K3_10	0,40	2,02	5,60	2,99
K3_07	2,00	1,40	K3_v14_08b	K3_07	1,40	2,01	5,56	2,55
K3_08	2,00	2,08	K3_v14_09	K3_08	1,40	2,01	5,57	2,42
K3_09	1,46	2,60	K3_v14_10	K3_09	1,40	2,01	5,59	2,20
K3_07	2,00	1,40	K3_v18_08	K3_07	1,80	2,01	5,60	2,39
K3_08	2,00	2,08	K3_v18_09	K3_08	1,80	2,01	5,60	2,29
K3_09	1,46	2,60	K3_v18_10	K3_09	1,80	2,02	5,60	2,40
K3_10	2,00	3,63	K3_v18b_11	K3_10	1,80	2,02	5,60	2,69

Tabel 8-2 Gemeten erosievolume na afloop van de proef in de Deltagoot (cumulatief) en resultaten van de OpenFOAM berekeningen voor tweede fase van erosieproces tijdens proevenserie K3

proef	Deltagoot		OpenFOAM					
	Duur (uur)	Erosievolume (m <sup>3</sup> /m)	Som ID	Gerekend met profiel na	Raai (m)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	φ <sub>s,klap</sub> (m)
K4_12	0,50	1,69	K4_v04b_12_be	K4_11	0,40	1,59	5,05	1,60
K4_13	1,01	2,60	K4_v04b_13_be	K4_12	0,40	1,99	5,63	2,44
K4_14	1,00	3,41	K4_v04b_14_be	K4_13	0,40	1,98	5,63	2,68
K4_15	2,00	5,17	K4_v04b_15_be	K4_14	0,40	1,99	5,66	2,17
K4_16	2,00	6,11	K4_v04b_16_be	K4_15	0,40	1,99	5,66	1,89
K4_17	1,70	8,25	K4_v04b_17_be	K4_16	0,40	1,99	5,65	1,95

Tabel 8-3 Gemeten erosievolume na afloop van de proef in de Deltagoot (cumulatief) en resultaten van de OpenFOAM berekeningen voor tweede fase van erosieproces tijdens proevenserie K4

proef	Deltagoot		OpenFOAM					
	Duur (uur)	Erosievolume (m <sup>3</sup> /m)	Som ID	Gerekend met profiel na	Raai (m)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	φ <sub>s,klap</sub> (m)
K6_04	1,00	1,94	K6_v14_05_be	K6_04	1,40	1,98	5,61	3,18
K6_05	2,00	2,38	K6_v14_06_be	K6_05	1,40	1,98	5,61	3,19
K6_06	2,00	2,38	K6_v14_06_af	K6_06	1,40	1,99	5,63	3,21
K6_07	1,83	2,78	K6_v14_07_af	K6_07	1,40	2,00	5,62	3,49
K6_08	1,83	4,55	K6_v14_09_be	K6_08	1,40	2,00	5,61	3,28
K6_09	2,00	5,17	K6_v14_10_be	K6_09	1,40	2,01	5,61	2,73
K6_10	2,00	5,17	K6_v14_10_af	K6_10	1,40	2,01	5,60	2,98
K6_11	2,00	7,88	K6_v14_12_be	K6_11	1,40	2,12	5,62	3,09
K6_12	0,77	8,36	K6_v14_13_be	K6_12	1,40	2,12	5,64	2,75
K6_13	0,77	8,36	K6_v14_13_af	K6_13	1,40	2,12	5,65	2,64

Tabel 8-4 Gemeten erosievolume na afloop van de proef in de Deltagoot (cumulatief) en resultaten van de OpenFOAM berekeningen voor tweede fase van erosieproces tijdens proevenserie K6

## B.2 Invloed variatie in hydraulische belasting

proef	Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	$\partial V_s / \partial t$ * (m <sup>3</sup> /m/uur)
K1_11	K1_12_v06_h01	1,40	4,73	1,92	0,65
K1_11	K1_12_v06_h02	1,69	5,11	2,85	1,08
K1_11	K1_12_v05b	1,92	5,60	3,44	1,35
K1_11	K1_12_v06_h03	2,03	5,52	3,05	1,17
K1_11	K1_12_v06_h04	2,33	5,88	4,74	1,95
K1_11	K1_12_v06_h05	2,61	6,27	6,06	2,56

Tabel 8-5 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende golfhoogtes (\* berekend met formule (23))

proef	Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	S <sub>op</sub> (-)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	∂V <sub>e</sub> /∂t * (m <sup>3</sup> /m/uur)
K1_07	K1c_08_s22	2,05	7,69	0,022	3,14	1,21
K1_07	K1c_08_s27	2,06	6,92	0,028	2,47	0,91
K1_07	K1c_08_s32	2,08	6,23	0,034	2,71	1,02
K1_07	K1c_08_s37	2,06	5,88	0,038	1,90	0,64
K1_07	K1c_08_0	2,01	5,56	0,042	2,35	0,85
K1_07	K1c_08_s47	1,97	5,12	0,048	2,16	0,76
K1_11	K1c_12_s22	2,05	7,69	0,022	3,57	1,41
K1_11	K1c_12_s27	2,06	6,90	0,028	3,05	1,17
K1_11	K1c_12_s32	2,08	6,28	0,034	3,05	1,17
K1_11	K1c_12_s37	2,06	5,88	0,038	2,56	0,95
K1_11	K1c_12_0	2,02	5,55	0,042	2,37	0,86
K1_11	K1c_12_s47	1,97	5,12	0,048	2,37	0,86

Tabel 8-6 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende golfsteelheden (\* berekend met formule (23))

proef	Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	h <sub>overgang</sub> (m)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	∂V <sub>e</sub> /∂t * (m <sup>3</sup> /m/uur)
K1_11	K1c_12_0	2,02	5,55	-0,40	2,37	0,86
K1_11	K1_12_v05b	1,92	5,60	0,25	3,44	1,35
K1_11	K1_12_v06_w01	1,99	5,55	0,75	1,08	0,27
K1_11	K1_12_v06_w02	1,95	5,53	1,25	2,00	0,69
K1_11	K1_12_v06_w03	1,95	5,54	1,75	2,97	1,14
K1_11	K1_12_v06_h03	2,03	5,52	2,25	3,05	1,17
K1_11	K1_12_v06_w05	1,93	5,50	2,75	4,36	1,78

Tabel 8-7 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende waterstand ten opzichte van de overgang (\* berekend met formule (23))

### B.3 Invloed variatie in dijkgeometrie

proef	Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	B <sub>berm</sub> (m)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	∂V <sub>e</sub> /∂t * (m <sup>3</sup> /m/uur)
K1_07	K1c_08_0	2,01	5,56	3,0	2,35	0,85
K1_07	K1c_08_B15	2,01	5,56	1,5	2,46	0,90
K1_07	K1c_08_B50	2,02	5,55	5,0	1,75	0,58
K1_07	K1c_08_B80	2,01	5,56	8,0	1,59	0,50
K1_11	K1c_12_0	2,02	5,55	3,0	2,37	0,86
K1_11	K1c_12_B15	2,02	5,56	1,5	3,04	1,17
K1_11	K1c_12_B50	2,02	5,56	5,0	2,48	0,91
K1_11	K1c_12_B80	2,01	5,56	8,0	1,93	0,66

Tabel 8-8 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende bermbreedtes (\* berekend met formule (23)) (zie Fig. B-1)

proef	Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	h <sub>berm</sub> (m)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	∂V <sub>e</sub> /∂t * (m <sup>3</sup> /m/uur)
K1_07	K1c_08_0	2,01	5,56	-0,16	2,35	0,85
K1_07	K1c_08_d64	2,02	5,56	0,24	2,08	0,73
K1_07	K1c_08_d56	2,01	5,56	-0,56	2,08	0,73
K1_07	K1c_08_d52	2,01	5,54	-0,96	2,09	0,73
K1_07	K1c_08_d48	2,02	5,54	-1,36	2,24	0,80
K1_11	K1c_12_0	2,02	5,55	-0,13	2,37	0,86
K1_11	K1c_12_d64	2,03	5,52	0,24	2,93	1,12
K1_11	K1c_12_d56	2,01	5,56	-0,56	2,60	0,97
K1_11	K1c_12_d52	2,01	5,56	-0,96	2,60	0,97
K1_11	K1c_12_d48	2,01	5,56	-1,36	2,62	0,98

Tabel 8-9 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende waterdieptes boven de berm (\* berekend met formule (23)) (zie Figuur 5.20 en Fig. B-2)

Som ID	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	cot (α) (-)	φ <sub>s,klap</sub> (m)	∂V <sub>e</sub> /∂t * (m <sup>3</sup> /m/uur)
v9_p_S3_60	2,01	5,56	6	2,03	0,70
v9_p_S3_50	2,01	5,56	5	2,72	1,02
v9_p_S3_40	2,01	5,57	4	2,82	1,07
v9_p_S3_35	2,01	5,60	3,5	2,90	1,10
v9_p_S3_30	2,01	5,56	3	3,03	1,16

Tabel 8-10 Met OpenFoam berekende piekdruk tegen de klif en de daaruit berekende erosiesnelheid bij verschillende taludhellingen (\* berekend met formule (23))



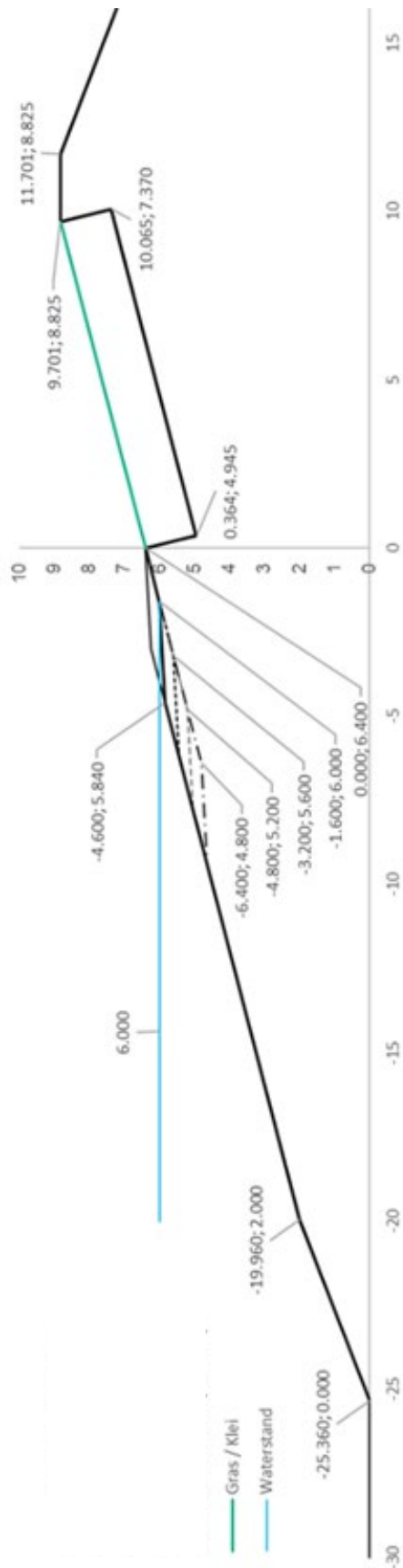


Fig. B-1 Doorgerekende dwarsprofiel voor het bepalen van de invloed van de hoogte van de berm

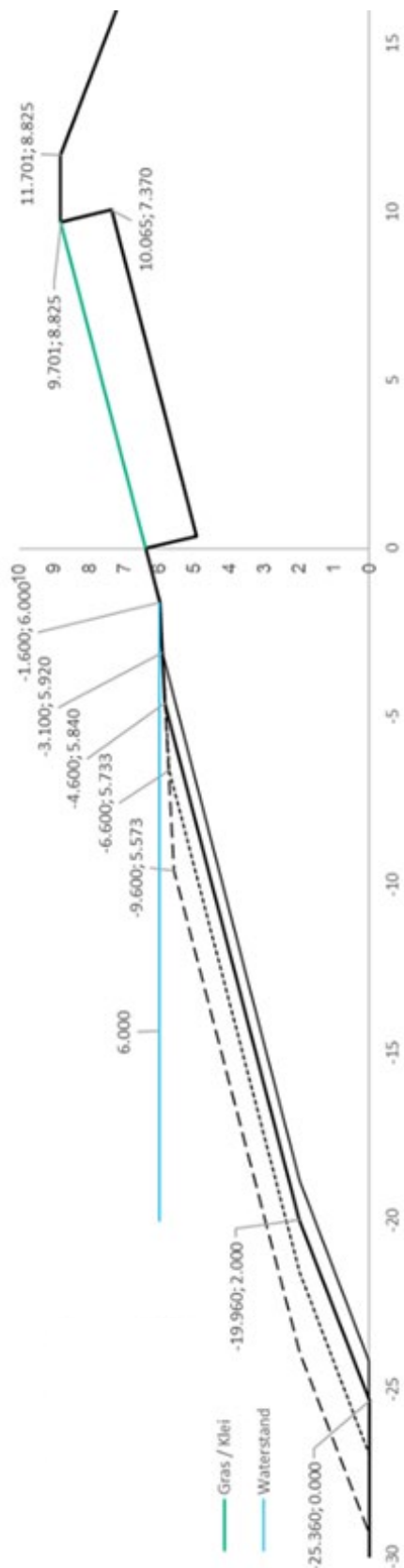


Fig. B-2 Doorgerkende dwarsprofiel voor het bepalen van de invloed van de breedte van de berm

## B.4 Overzicht van alle OpenFoam berekeningen

In onderstaande tabel zijn alle OpenFoam berekeningen weergegeven.

Som ID	Golven van proef	Profiel na proef	$Y_{raai}$ (m)	h (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	Talud $\tan\alpha$ (-)	$B_{berm}$ (m)	$h_{berm}$ (m)	$h_{overgang}$ (m)	$\phi_{s,klap}$ (m)
K1_01_v05	K1_01	K1_01	0.5	6.50	1.91	5.60	0.25	3.00	5.87	6.40	2.15
K1_08_v05	K1_07	K1_07	0.6	6.65	1.91	5.56	0.25	3.00	5.87	6.40	2.92
K1_09_v05	K1_08	K1_08	0.2	6.65	1.91	5.56	0.25	3.00	5.87	6.40	3.04
K1_10_v05b	K1_09	K1_09	0.3	6.65	1.91	5.60	0.25	3.00	5.87	6.40	2.90
K1_11_v05b	K1_10	K1_10	0.5	6.65	1.92	5.61	0.25	3.00	5.87	6.40	3.70
K1_12_v05b	K1_11	K1_11	0.3	6.65	1.92	5.60	0.25	3.00	5.87	6.40	3.44
K1_13_v05c	K1_12	K1_12	0.2	6.65	1.92	5.60	0.25	3.00	5.87	6.40	2.96
K1_14_v05b	K1_13	K1_13	0.4	6.65	1.93	5.61	0.25	3.00	5.87	6.40	3.09
K1_15_v05b	K1_14	K1_14	0.4	6.65	1.92	5.57	0.25	3.00	5.87	6.40	3.32
K2_v06_04	K2_03	K2_03	0.6	6.40	1.98	5.60	0.20	3.62	6.00	6.30	1.97
K2_v06_06	K2_05	K2_05	0.6	6.55	2.05	5.60	0.20	3.62	6.00	6.30	1.91
K2_v12_04	K2_03	K2_03	1.2	6.40	1.99	5.61	0.20	3.62	6.00	6.30	1.89
K2_v12_08	K2_07	K2_07	1.2	6.65	2.00	5.56	0.20	3.62	6.00	6.30	2.11
K3_v04_04	K3_03	K3_03	0.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	2.28
K3_v04_05	K3_04	K3_04	0.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	2.64
K3_v04_06	K3_05	K3_05	0.4	6.75	2.01	5.57	0.20	3.00	5.87	6.30	2.33
K3_v04_07	K3_06	K3_06	0.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	3.02
K3_v04_08	K3_07	K3_07	0.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	2.63
K3_v04_09	K3_08	K3_08	0.4	6.75	2.02	5.59	0.20	3.00	5.87	6.30	2.90
K3_v04_10	K3_09	K3_09	0.4	6.75	2.02	5.59	0.20	3.00	5.87	6.30	2.79
K3_v04b_11	K3_10	K3_10	0.4	6.75	2.02	5.61	0.20	3.00	5.87	6.30	3.19
K3_v14_08	K3_07	K3_07	1.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	2.33
K3_v14_08b	K3_07	K3_07	1.4	6.75	2.01	5.56	0.20	3.00	5.87	6.30	2.55
K3_v14_09	K3_08	K3_08	1.4	6.75	2.01	5.58	0.20	3.00	5.87	6.30	2.40
K3_v14_10	K3_09	K3_09	1.4	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.00
K3_v18_05	K3_04	K3_04	1.8	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.33
K3_v18_06	K3_05	K3_05	1.8	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.43
K3_v18_07	K3_06	K3_06	1.8	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.36
K3_v18_08	K3_07	K3_07	1.8	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.41
K3_v18_09	K3_08	K3_08	1.8	6.75	2.01	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.16
K3_v18_10	K3_09	K3_09	1.8	6.75	2.02	5.59	0.20	3.00	5.87	6.30	2.63
K3_v18b_11	K3_10	K3_10	1.8	6.75	2.02	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.74

Som ID	Golven van proef	Profiel na proef	$Y_{raai}$ (m)	h (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	Talud $\tan\alpha$ (-)	$B_{berm}$ (m)	$h_{berm}$ (m)	$h_{overgang}$ (m)	$\phi_{s,klap}$ (m)
K4_v04_07_be	K4_07	K4_06	0.4	6.35	1.98	5.67	0.25	3.00	5.87	6.40	1.95
K4_v04_07_af	K4_07	K4_07	0.4	6.35	1.98	5.66	0.25	3.00	5.87	6.40	2.08
K4_v04_08_be	K4_08	K4_07	0.4	6.50	2.00	5.64	0.25	3.00	5.87	6.40	2.42
K4_v04_08_af	K4_08	K4_08	0.4	6.50	2.00	5.63	0.25	3.00	5.87	6.40	2.69
K4_v04_09_be	K4_09	K4_08	0.4	6.35	1.98	5.67	0.25	3.00	5.87	6.40	2.67
K4_v04_09_af	K4_09	K4_09	0.4	6.35	1.98	5.65	0.25	3.00	5.87	6.40	2.34
K4_v04_10_be	K4_10	K4_09	0.4	5.90	1.95	5.71	0.25	3.00	5.87	6.40	1.95
K4_v04_11_be	K4_11	K4_10	0.4	5.90	1.95	5.73	0.25	3.00	5.87	6.40	1.98
K4_v04_11_af	K4_11	K4_11	0.4	5.90	1.95	5.72	0.25	3.00	5.87	6.40	1.95
K4_v04b_12_be	K4_12	K4_11	0.4	6.35	1.59	5.05	0.25	3.00	5.87	6.40	1.77
K4_v04_12_af	K4_12	K4_12	0.4	6.35	1.59	5.05	0.25	3.00	5.87	6.40	1.43
K4_v04b_13_be	K4_13	K4_12	0.4	6.35	1.99	5.65	0.25	3.00	5.87	6.40	2.00
K4_v04b_14_be	K4_14	K4_13	0.4	6.35	1.98	5.60	0.25	3.00	5.87	6.40	2.87
K4_v04b_15_be	K4_15	K4_14	0.4	6.35	1.98	5.65	0.25	3.00	5.87	6.40	2.49
K4_v04b_16_be	K4_16	K4_15	0.4	6.35	1.99	5.66	0.25	3.00	5.87	6.40	1.85
K4_v04b_17_be	K4_17	K4_16	0.4	6.35	1.99	5.65	0.25	3.00	5.87	6.40	1.93
K4_v04b_18_be	K4_17	K4_17	0.4	6.35	1.99	5.65	0.25	3.00	5.87	6.40	1.96
K5_v08_05_be	K5_04	K5_04	0.8	6.40	1.99	5.64	0.20	3.00	5.87	6.30	2.65
K5_v08_06_be	K5_05	K5_05	0.8	6.40	1.99	5.60	0.20	3.00	5.87	6.30	2.61
K5_v08_07_be	K5_06	K5_06	0.8	6.40	1.99	5.59	0.20	3.00	5.87	6.30	2.62
K6_v14_01_be	K6_01	K5_06	1.4	5.90	2.00	5.56	0.20	0.00		6.30	1.80
K6_v14_02_be	K6_02	K6_01	1.4	5.90	2.01	5.53	0.20	0.00		6.30	1.88
K6_v14_02_af	K6_02	K6_02	1.4	5.90	2.00	5.56	0.20	0.00		6.30	2.12
K6_v14_03_be	K6_03	K6_02	1.4	6.40	1.49	4.96	0.20	0.00		6.30	2.16
K6_v14_03_af	K6_03	K6_03	1.4	6.40	1.49	4.96	0.20	0.00		6.30	1.90
K6_v14_04_be	K6_04	K6_03	1.4	6.40	1.98	5.62	0.20	0.00		6.30	3.29
K6_v14_05_be	K6_05	K6_04	1.4	6.40	1.98	5.60	0.20	0.00		6.30	3.06
K6_v14_06_be	K6_06	K6_05	1.4	6.40	1.98	5.62	0.20	0.00		6.30	3.32
K6_v14_06_af	K6_06	K6_06	1.4	6.40	1.99	5.64	0.20	0.00		6.30	3.09
K6_v14_07_be	K6_07	K6_06	1.4	6.55	2.00	5.62	0.20	0.00		6.30	3.40
K6_v14_07_af	K6_07	K6_07	1.4	6.55	2.00	5.61	0.20	0.00		6.30	3.57
K6_v14_08_be	K6_08	K6_07	1.4	6.65	2.00	5.60	0.20	0.00		6.30	3.79
K6_v14_09_be	K6_09	K6_08	1.4	6.65	2.00	5.61	0.20	0.00		6.30	2.77
K6_v14_10_be	K6_10	K6_09	1.4	6.65	2.01	5.60	0.20	0.00		6.30	2.68
K6_v14_10_af	K6_10	K6_10	1.4	6.65	2.00	5.60	0.20	0.00		6.30	3.27
K6_v14_11_be	K6_11	K6_10	1.4	6.65	2.11	5.61	0.20	0.00		6.30	3.44
K6_v14_12_be	K6_12	K6_11	1.4	6.65	2.12	5.63	0.20	0.00		6.30	2.73
K6_v14_13_be	K6_13	K6_12	1.4	6.65	2.12	5.65	0.20	0.00		6.30	2.76
K6_v14_13_af	K6_13	K6_13	1.4	6.65	2.12	5.65	0.20	0.00		6.30	2.52

Som ID	Golven van proef	Profiel na proef	$Y_{raai}$ (m)	h (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	Talud $\tan\alpha$ (-)	$B_{berm}$ (m)	$h_{berm}$ (m)	$h_{overgang}$ (m)	$\phi_{s,klap}$ (m)
K1_12_v06_h01	K1_11	K1_11	0.3	8.65	1.40	4.73	0.25	3.0	7.87	8.40	1.92
K1_12_v06_h02	K1_11	K1_11	0.3	8.65	1.69	5.11	0.25	3.0	7.87	8.40	2.85
K1_12_v06_h03	K1_11	K1_11	0.3	8.65	2.03	5.52	0.25	3.0	7.87	8.40	3.05
K1_12_v06_h04	K1_11	K1_11	0.3	8.65	2.33	5.88	0.25	3.0	7.87	8.40	4.74
K1_12_v06_h05	K1_11	K1_11	0.3	8.65	2.61	6.27	0.25	3.0	7.87	8.40	6.06
K1_12_v06_w01	K1_11	K1_11	0.3	7.15	1.99	5.55	0.25	3.0	7.87	8.40	1.08
K1_12_v06_w02	K1_11	K1_11	0.3	7.65	1.95	5.53	0.25	3.0	7.87	8.40	2.00
K1_12_v06_w03	K1_11	K1_11	0.3	8.15	1.95	5.54	0.25	3.0	7.87	8.40	2.97
K1_12_v06_w05	K1_11	K1_11	0.3	9.15	1.93	5.50	0.25	3.0	7.87	8.40	4.36
K1c_08_0	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.01	5.56	0.25	3.0	5.84	6.40	2.35
K1c_08_d64	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.02	5.56	0.25	3.0	6.24	6.40	2.08
K1c_08_d56	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.01	5.56	0.25	3.0	5.44	6.40	2.08
K1c_08_d52	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.01	5.54	0.25	3.0	5.04	6.40	2.09
K1c_08_d48	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.02	5.54	0.25	3.0	4.64	6.40	2.24
K1c_08_B15	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.01	5.56	0.25	1.5	5.87	6.40	2.46
K1c_08_B50	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.02	5.55	0.25	5.0	5.87	6.40	1.75
K1c_08_B80	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.01	5.56	0.25	8.0	5.87	6.40	1.59
K1c_08_s22	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.05	7.69	0.25	3.0	5.87	6.40	3.14
K1c_08_s27	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.06	6.92	0.25	3.0	5.87	6.40	2.47
K1c_08_s32	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.08	6.23	0.25	3.0	5.87	6.40	2.71
K1c_08_s37	K1_07	K1_07	0.6	6.00	2.06	5.88	0.25	3.0	5.87	6.40	1.90
K1c_08_s47	K1_07	K1_07	0.6	6.00	1.97	5.12	0.25	3.0	5.87	6.40	2.16
K1c_12_0	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.02	5.55	0.25	3.0	5.87	6.40	2.37
K1c_12_d64	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.03	5.52	0.25	3.0	6.24	6.40	2.93
K1c_12_d56	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.01	5.56	0.25	3.0	5.44	6.40	2.60
K1c_12_d52	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.01	5.56	0.25	3.0	5.04	6.40	2.60
K1c_12_d48	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.01	5.56	0.25	3.0	4.64	6.40	2.62
K1c_12_B15	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.02	5.56	0.25	1.5	5.87	6.40	3.04
K1c_12_B50	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.02	5.56	0.25	5.0	5.87	6.40	2.48
K1c_12_B80	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.01	5.56	0.25	8.0	5.87	6.40	1.93

Som ID	Golven van proef	Profiel na proef	$Y_{raai}$ (m)	h (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	Talud $\tan\alpha$ (-)	$B_{berm}$ (m)	$h_{berm}$ (m)	$h_{overgang}$ (m)	$\phi_{s,klap}$ (m)
K1c_12_s22	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.05	7.69	0.25	3.0	5.87	6.40	3.57
K1c_12_s27	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.06	6.90	0.25	3.0	5.87	6.40	3.05
K1c_12_s32	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.08	6.28	0.25	3.0	5.87	6.40	3.05
K1c_12_s37	K1_11	K1_11	0.3	6.00	2.06	5.88	0.25	3.0	5.87	6.40	2.56
K1c_12_s47	K1_11	K1_11	0.3	6.00	1.97	5.12	0.25	3.0	5.87	6.40	2.37
K3_01_v01	K3_01	K3_01	1.4	6.65	2.01	5.56	0.20	3.0	5.87	6.30	2.29
K3_08_v02	K3_07	K3_07	1.4	6.65	2.01	5.56	0.20	3.0	5.87	6.30	2.51
K3_09_v01	K3_08	K3_08	1.4	6.65	2.01	5.57	0.20	3.0	5.87	6.30	2.36
K3_10_v01	K3_09	K3_09	1.4	6.65	2.01	5.60	0.20	3.0	5.87	6.30	2.02
K4_v04c_11_af	K4_11	K4_11	0.4	6.35	1.95	5.72	0.25	3.0	5.87	6.40	2.55
K4_v04b_12_be	K4_12	K4_11	0.4	6.35	1.59	5.05	0.25	3.0	5.87	6.40	1.77
K4_v04_12_af	K4_12	K4_12	0.4	6.35	1.59	5.05	0.25	3.0	5.87	6.40	1.43
K6_v14_01_be	K6_01	K5_06	1.4	5.90	2.00	5.56	0.20	0.0	0.00	6.30	1.80
K6_v14_02_be	K6_02	K6_01	1.4	5.90	2.01	5.53	0.20	0.0	0.00	6.30	1.88
K6_v14_02_af	K6_02	K6_02	1.4	5.90	2.00	5.56	0.20	0.0	0.00	6.30	2.12
K6_v14_03_be	K6_03	K6_02	1.4	6.40	1.49	4.96	0.20	0.0	0.00	6.30	2.16
K6_v14_03_af	K6_03	K6_03	1.4	6.40	1.49	4.96	0.20	0.0	0.00	6.30	1.90
S3_30				6.65	1.99	5.68	0.33	3.0	5.87	6.40	2.88
S3_35				6.65	1.93	5.60	0.29	3.0	5.87	6.40	2.62
S3_40				6.65	1.92	5.58	0.25	3.0	5.87	6.40	2.78
S3_50				6.65	1.91	5.56	0.20	3.0	5.87	6.40	2.60
S3_60				6.65	1.91	5.56	0.17	3.0	5.87	6.40	1.95
S3b_30				6.65	1.93	5.60	0.33	3.0	5.87	6.40	3.26
S3b_35				6.65	1.92	5.60	0.29	3.0	5.87	6.40	3.25
S3b_50				6.65	1.91	5.56	0.20	3.0	5.87	6.40	2.58
S3b_60				6.65	1.91	5.56	0.17	3.0	5.87	6.40	1.95
S4_13_30		K1_11	0.3	7.02	1.44	5.20	0.25	3.0	6.24	6.40	2.48
S4_15_30		K1_11	0.3	7.02	1.65	5.53	0.25	3.0	6.24	6.40	3.06
S4_15_35		K1_11	0.3	7.02	1.64	5.16	0.25	3.0	6.24	6.40	2.91
S4_17_30		K1_11	0.3	7.02	1.84	5.87	0.25	3.0	6.24	6.40	3.75

## C Resultaten van probabilistische berekening

In onderstaande figuren zijn de resultaten gegeven van de probabilistische berekeningen. In de figuren staat op de verticale as de erosiediepte en op de horizontale as de terugkeertijd, waarbij terugkeertijd = 1/faalkans van de kleibekleding met gras. De dikke lijnen zijn de verwachtingswaarden van de erosiediepte, op basis waarvan de benodigde kleilaagdikte kan worden bepaald (zie paragraaf 7.3).

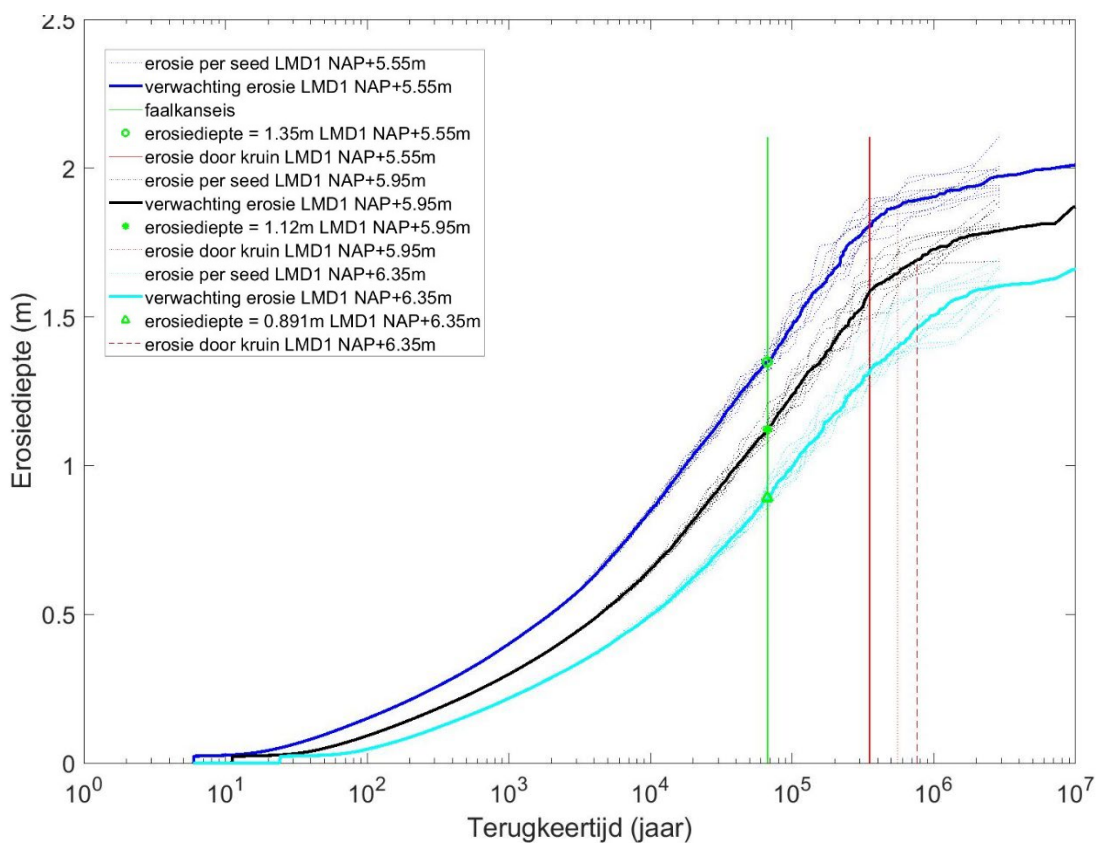


Fig. C-1 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 1 bij het niveau van de overgang op respectievelijk NAP+5,55 m, NAP+5,95 m en NAP +6,35 m (zie ook Figuur 7.6)

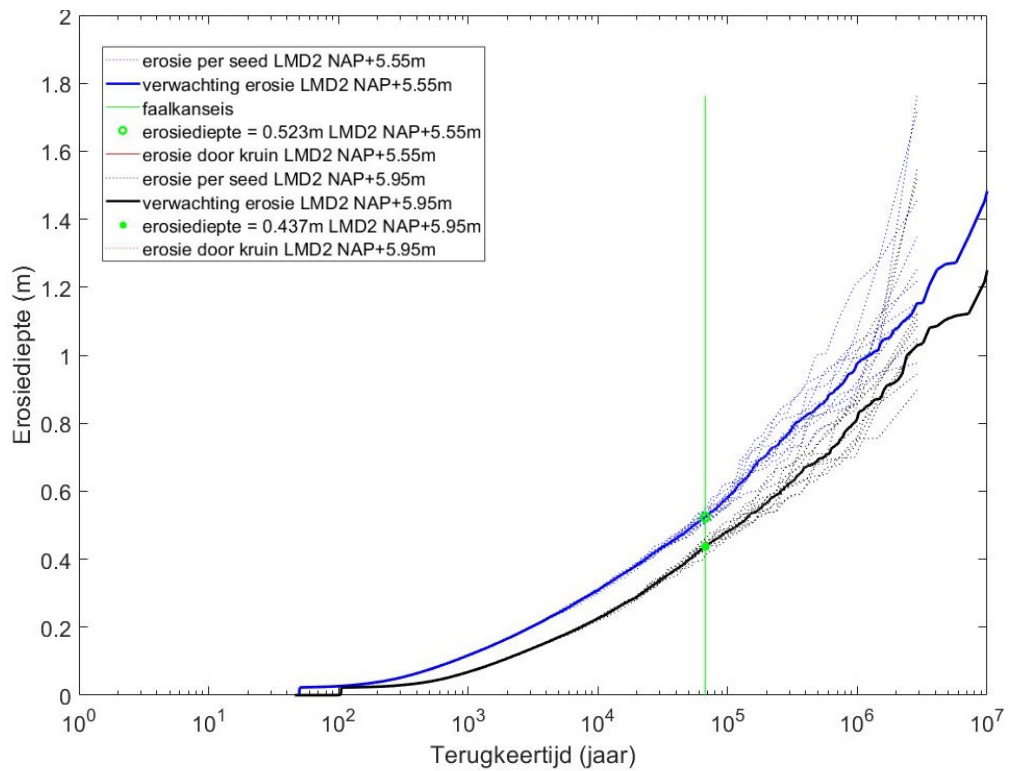


Fig. C-2 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 2 bij het niveau van de overgang op respectievelijk NAP+5,55 m en NAP +5,95 m

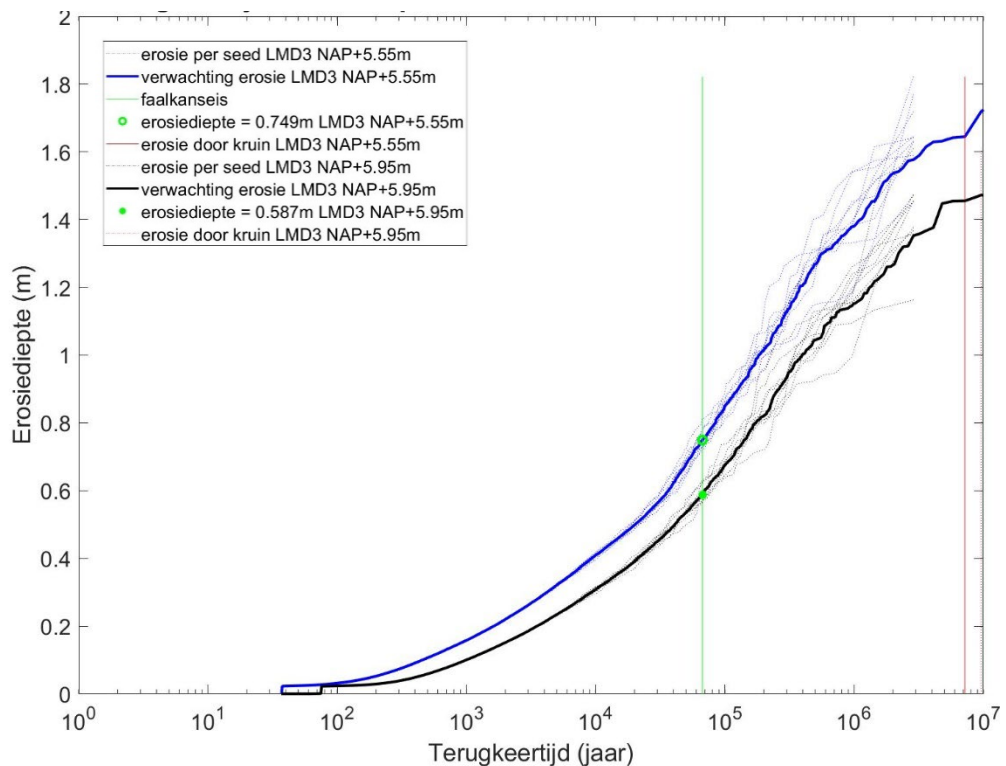


Fig. C-3 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 3 bij het niveau van de overgang op respectievelijk NAP+5,55 m en NAP +5,95 m



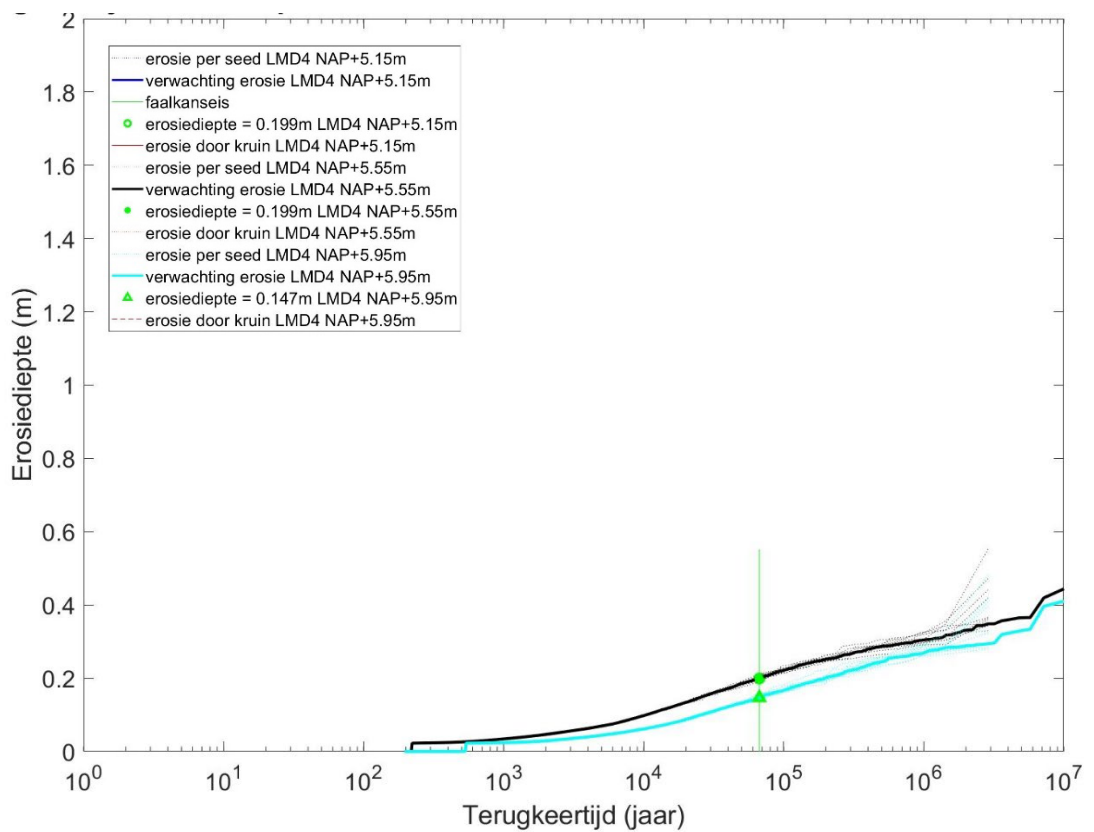


Fig. C-4 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 4 bij het niveau van de overgang op respectievelijk NAP+5,15, NAP+5,55 m en NAP +5,95 m

## D Alternatieve berekening van modelcoëfficiënt

In paragraaf 5.2.3 is de relatie bepaald tussen de berekende piekdruk uit OpenFoam en de gemeten erosiesnelheid (zie Figuur 5.17). Daarbij is ervoor gekozen om alleen de metingen van de Lauwersmeerdijk en Blija te gebruiken, omdat Holwerd veel erosiebestendiger is en uit de toon valt ten opzichte van de andere twee. De gedachte was om op deze manier een conservatief resultaat te verkrijgen. Om te controleren of dit inderdaad een conservatief resultaat oplevert, is in deze bijlage de relatie bepaald door ook de metingen van Holwerd mee te nemen. Dat levert een andere relatie met een grotere onzekerheid. Doordat de lijn in Figuur 5.17 dan veel lager komt te liggen, hoeft de grotere onzekerheid nog niet te leiden tot een dikkere kleilaag bij het gebruik van de formules. In deze bijlage is dit nader gekwantificeerd.

De trendlijn als alle proevenseries worden beschouwd ten aanzien van de tweede fase van het erosieproces is de magenta lijn in Fig. D-1. Deze relatie is als volgt:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,31 \cdot (\phi_{s,klap} - 0,5) \quad (65)$$

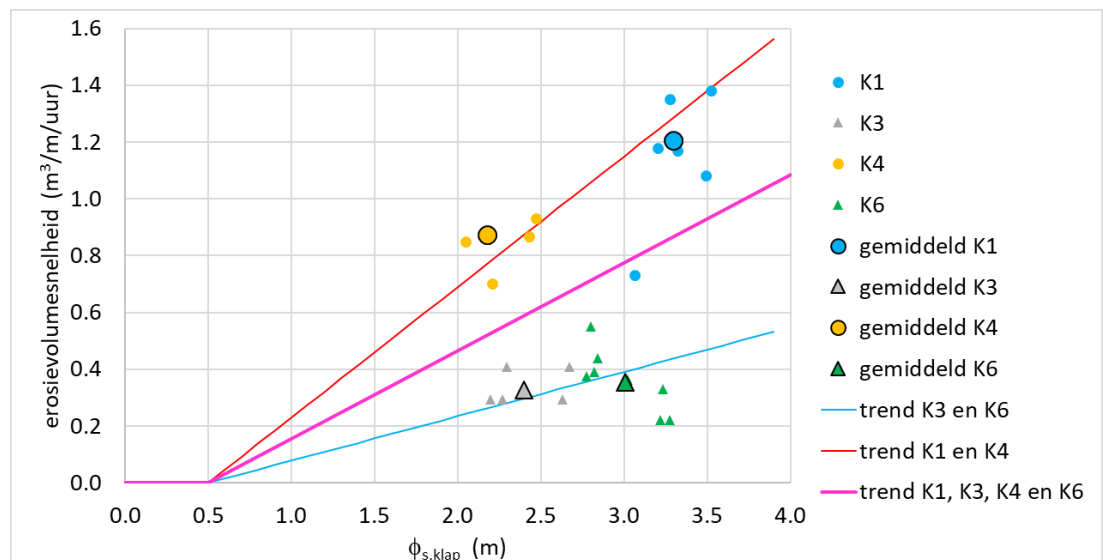


Fig. D-1 Relatie tussen berekende piekdruk uit OpenFoam ( $\phi_{s,klap}$ ) en de gemeten erosiesnelheid ( $\partial V_e/\partial t$ )

Als deze relatie gebruikt wordt voor het afleiden van de formules zoals gedaan is in paragraaf 5.2.6, dan resulteert dit in de volgende formule:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0,047 \cdot \frac{(H_{m0} - 0,25)^2}{\sqrt{s_{op}}} \cdot \min\left(2,4; \max\left(0; 1,2 + 1,6 \cdot \frac{h_{overgang}}{H_{m0}}\right)\right) \cdot \left(\frac{13}{\frac{B_{berm}}{H_{m0}} \cdot \min\left(1; \max\left(0; 2 - \frac{h_{berm}}{H_{m0}}\right)\right) + 8} - 0,5\right) \cdot \left(1,75 - \frac{0,18}{\tan(\alpha)}\right) \quad (66)$$

Het enige dat in deze formule is gewijzigd ten opzichte van formule (49) is de coëfficiënt aan het begin van de formule.

De bijbehorende onzekerheid, zoals afgeleid in paragraaf 6.4, is nu groter. Dit wordt voor fase 2 van het erosieproces nu als volgt:

- Onzekerheid in de OpenFoam berekeningen:  $\mu = 1$  en variatiecoëfficiënt  $V = \sigma/\mu = 10\%$  (niet veranderd)
- Onzekerheid over de relatie tussen de piekdruk uit de berekeningen met OpenFoam en de gemeten erosiesnelheid:  $\mu = 1$  en variatiecoëfficiënt  $V = \sigma/\mu = 60\%$  (verhoogd vanwege hoge spreiding rond magenta lijn in Fig. D-1)
- Onzekerheid in de formule voor de invloed van de golfhoogte, golfsteilheid en waterstand: variatiecoëfficiënt = 20% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,2$ ) (niet veranderd)
- Onzekerheid in de formule voor invloed van de hoogte en breedte van de berm en de invloed van de taludhelling: variatiecoëfficiënt = 24% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,24$ ) (niet veranderd)
- Onzekerheid in de formule voor het omrekenen van het erosievolume naar een erosiediepte: variatiecoëfficiënt = 6% (normale verdeling met  $\mu = 1$  en  $\sigma = 0,06$ ) (niet veranderd)

Deze onzekerheden tezamen leveren het volgende voor de normaal verdeelde stochastische parameter  $m_2$ :  $\mu(m_2) = 1$  en  $\sigma(m_2) = \sqrt{0,10^2 + 0,6^2 + 0,2^2 + 0,24^2 + 0,06^2} = 0,67$ . Hierbij is ervan uitgegaan dat de verschillende onzekerheden onafhankelijk en normaal verdeeld zijn (benadering).

Met formule (66) en  $\mu(m_2) = 1$  en  $\sigma(m_2) = 0,67$  is locatie 1 van de Lauwersmeerdijk nogmaals doorgerekend om te zien hoeveel effect dit heeft. Dit resulteert in 9 cm minder erosiediepte, zie bijlage G.3.

# E Overzicht gemeten erosie alle Deltagootproeven

In onderstaande figuren zijn alle resultaten van de Deltagootproeven bij elkaar weergegeven in een figuur voor de erosiediepte en een figuur voor het erosievolume. Tevens is met rode vierkantjes aangegeven op welk moment er kunstmatige schade is aangebracht.

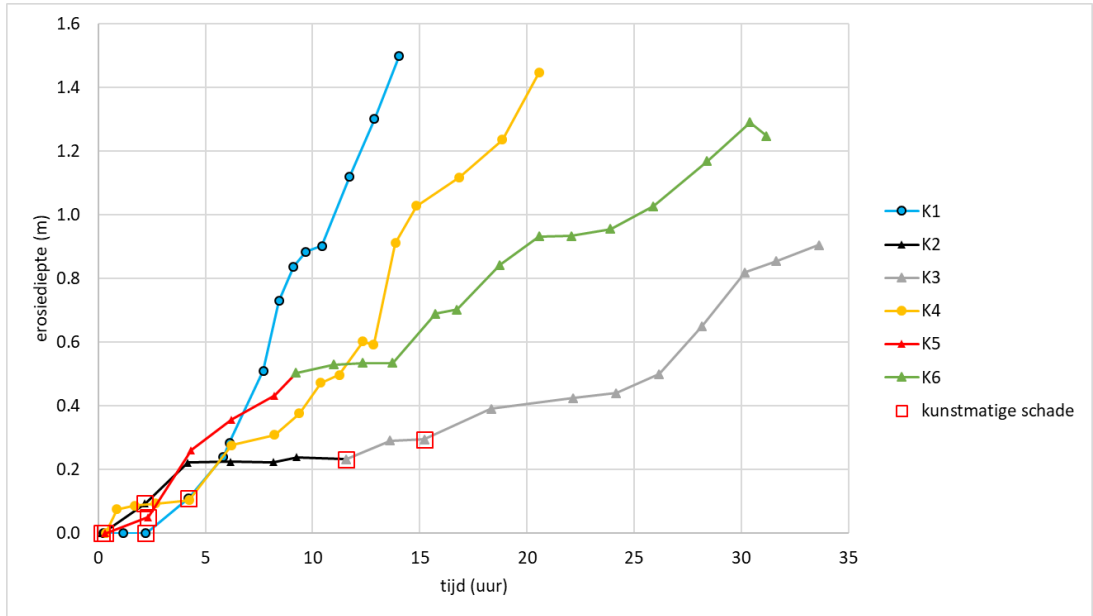


Fig. E-1 Gemeten erosiediepte als functie van de tijd van alle Deltagootproeven

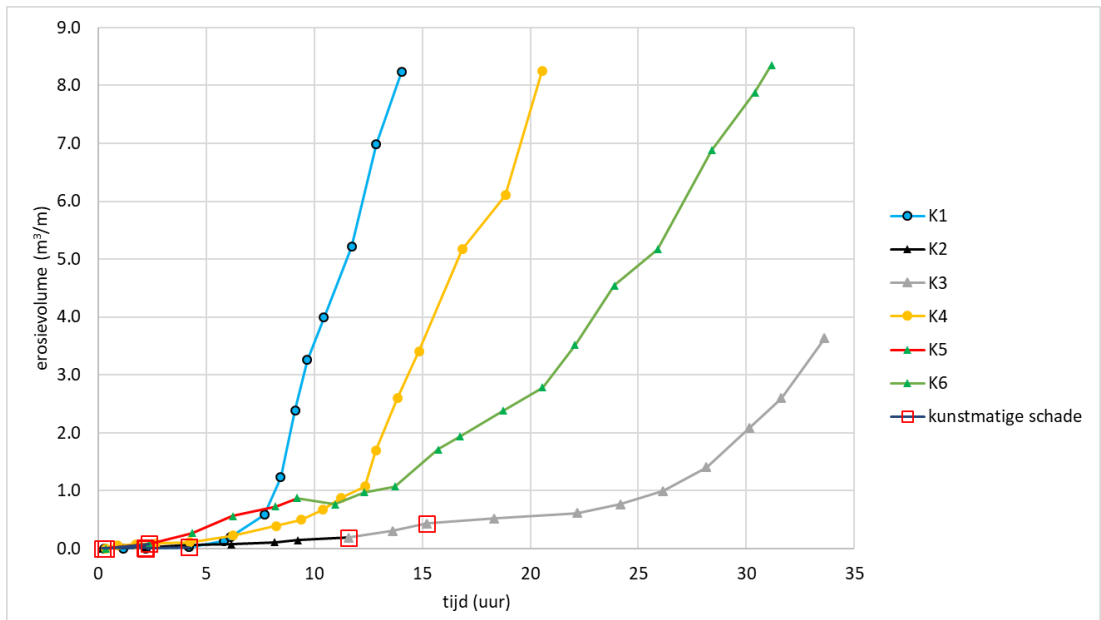


Fig. E-2 Gemeten erosievolume als functie van de tijd van alle Deltagootproeven

## F Categorisering van klei

### F.1 Huidige categorisering van klei

Voor de categorisering van klei ten aanzien van de erosiebestendigheid wordt veelal gebruik gemaakt van TAW (1996), waar ook de RAW (2015) op gebaseerd is, of het recentere rapport van Van Meurs en Kruse (2017). Er worden daarbij drie categorieën onderscheiden:

- I. Erosiebestendig (TAW 1996) of Stevige klei (Van Meurs en Kruse, 2017)
- II. Matig erosiebestendig (TAW 1996) of Schrale klei (Van Meurs en Kruse, 2017)
- III. Weinig erosiebestendig (TAW 1996) of Overig (Van Meurs en Kruse, 2017)

Voor de indeling in deze drie categorieën worden ten eerste de Atterbergse grenzen beschouwd, zie Fig. F-1.

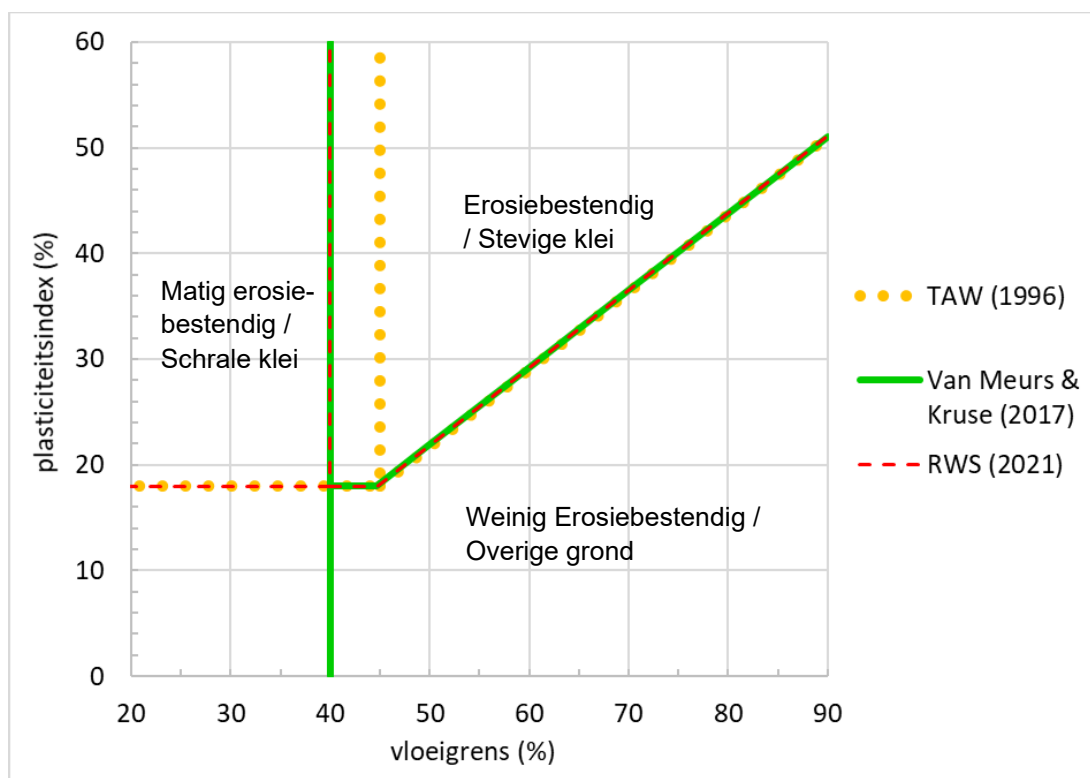


Fig. F-1 Erosiebestendigheid uitgezet in het plasticiteitsdiagram

Verder geldt voor een stevige, erosiebestendige, klei:

- Het is afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal.
- Het zandgehalte ( $> 63 \mu\text{m}$ ) is maximaal 40%.
- Er is minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode (of minder dan 7% volgens Van Meurs en Kruse (2017), als er rekening gehouden wordt met enige klink van de grond).
- Zoutgehalte van maximaal 4% (NaCl g/l bodemvocht)
- Er is minder dan 25% gewichtsverlies bij de HCl-behandeling.
- Er zijn geen significante bijmengingen van puin, grind en dergelijke en het heeft weinig heldere (rode, bruine en gele, soms blauwe) verkleuringen.

## F.2 Ervaring in het huidige project

In het huidige project is geconstateerd dat zowel de klei van de Lauwersmeerdijk als die van Holwerd en Blija een goede erosiebestendigheid hebben. De klei van Holwerd was het beste, maar is volgens de kleicategorieën uit de vorige paragraaf een klei met slechts weinig/matige erosiebestendigheid (categorie II of III, afhankelijk van de methodiek). Toch presteerde deze beter dan de klei van Blija die volgens bovenstaande categorieën een goede erosiebestendigheid heeft.

Hieruit blijkt dat de indeling in categorieën, voor het geval de belasting bestaat uit golven, verbetering behoeft.

Er zijn verschillende testmethodes die toegevoegd kunnen worden in de procedure om de erosiecategorie vast te stellen, zoals:

- Proctorproef voor de mate van verdichting (proctordichtheid ten opzichte van het maximum van de proctorcurve, waarvoor een vijfpunts proctorproef nodig is)
- Roto-erosiemeter
- Bore-hole test
- Jet erosion test
- de verdeling van het zand in de klei (zandlenzen en zandpockets versus volledig verdeeld zand waarbij elke zandkorrel contact maakt met kleideeltjes)

Maar gezien de ervaring dat klei die relatief brokkelig is, relatief snel erodeert, is het aan te bevelen om dit aspect ook mee te nemen in de criteria voor de categorieën. Bij het plaatsen van de kleiblokken van Blija is duidelijk gebleken dat deze klei moeite heeft om te blijven staan als het verticaal is afgegraven over een hoogte van circa 80 cm. Zeker bij het eerste kleiblok met gras, waar vrij snel relatief veel erosie optrad, stortte zo'n verticale wand van klei gemakkelijk in, waardoor het moeilijk was om de kleilaag mooi ongeschonden in de Deltagoot te krijgen. De klei van Holwerd daarentegen, maar ook die van de Lauwersmeerdijk, waren veel minder brokkelig.

Het is denkbaar dat de invloed van de samenhang (brokkeligheid) in de Deltagoot wordt uitvergroet. Doordat het brokkelig is, is het moeilijker om de kleiblokken ongeschonden in de Deltagoot te krijgen, waardoor de erosiebestendigheid mogelijk iets minder is dan op de dijk. Is de klei niet brokkelig (relatief grote samenhang), dan zal de erosiebestendigheid in de Deltagoot hetzelfde zijn als op de dijk.

De brokkeligheid van de klei kan waarschijnlijk vastgesteld worden met een specifieke proef die gericht is op de samenhang in de klei op een schaal van een paar decimeter. Een voorstel hiervoor is iets verder uitgewerkt in de volgende paragraaf.

Het is denkbaar dat de weersomstandigheden in de maanden voorafgaande aan een samenhangproef invloed hebben op het resultaat. Er zijn ook aanwijzingen dat de weestomstandigheden daadwerkelijk invloed hebben op de erosiebestendigheid (Van Steijn en Klein Breteler, 2021), wat ook betekent dat de samenhang inderdaad een goede maat is voor de erosiebestendigheid.

## F.3 Testmethode voor categorisering van de samenhang in de klei

De samenhang in de klei kan bepaald worden aan de hand van een eenvoudige trekproef, waarbij een klein monster van de klei wordt beproefd.

Voorgesteld wordt om te werken met een blok klei van  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$  en te meten hoeveel kracht er voor nodig is om dit uit elkaar te trekken. Hoe groter deze kracht hoe groter de samenhang.

De proefopstelling is onderstaand getekend in diverse figuren. Er is een procedure voor als er klei voor een dijkverbetering moet worden gekeurd en een voor het beoordelen van de klei in een bestaande dijk.

### F.3.1 Beoordelen van klei voor een nog aan te leggen dijkverbetering

De proefopstelling bestaat uit twee bakjes met één open zijkant waarin de klei aangebracht moet worden. De twee bakjes worden tegen elkaar gezet en vervolgens gevuld, zie Fig. F-2. De klei moet met dezelfde consistentieindex en mate van verdichting worden aangebracht als minimaal geëist wordt tijdens de aanleg.

De proef bestaat uit het uit elkaar trekken van de twee bakjes en het meten van de kracht die daarvoor nodig is. Mogelijk dat de bakjes aan de binnenkant wat ruw moeten zijn om te zorgen dat de klei er niet uitschuift, maar scheurt op de aansluiting van de twee bakjes.

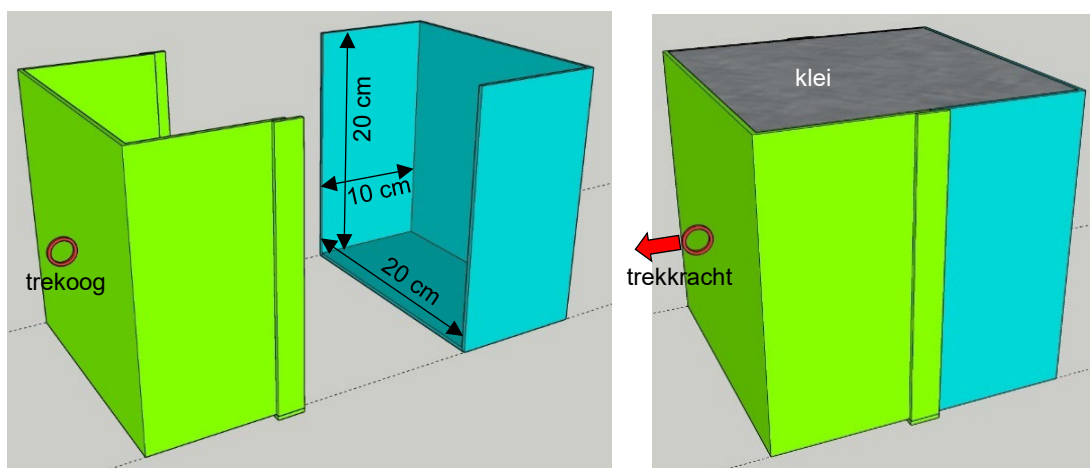


Fig. F-2 Twee bakjes die gevuld kunnen worden met klei en vervolgens uit elkaar getrokken kunnen worden

De bakjes moeten recht uit elkaar getrokken worden, haaks op het aansluitvlak van de twee bakjes, zodat een verticaal vlak op zuivere trek wordt belast. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door de bakjes op een tafel tegen de muur te plaatsen en vervolgens horizontaal langs de muur te trekken.

De trekkracht kan gemeten worden met een eenvoudige unster.

### F.3.2 Beoordelen van klei van een bestaande dijk

Voor het beoordelen van klei uit een bestaande dijk is het nodig om een blok klei van  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$  in ongeroerde staat te prepareren uit de kleilaag. Dit kan door een gat te graven in de klei met een verticale zijwand. In deze verticale zijwand kan een uit twee delen bestaande staalplaat van  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  in de klei worden geslagen met een hamer, zie Fig. F-4. Een tekening van deze uit twee delen bestaande staalplaat is gegeven in Fig. F-3.

Vervolgens moet de klei rondom de stalen plaat voorzichtig worden weggegraven door met een spade het haaks op de staalplaat af te steken, zodat een blok klei van  $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$  op de staalplaten overblijft.

Tenslotte wordt de klei vastgepakt met een klem en uit elkaar getrokken, zie Fig. F-5. De benodigde trekkracht is een maat voor de samenhang (brokkeligheid).

Doordat gebruik gemaakt wordt van twee staalplaten is de wrijving met de ondergrond geminimaliseerd.

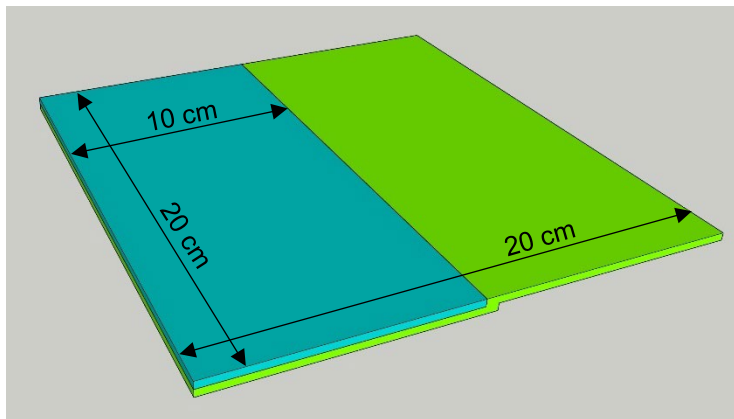


Fig. F-3 Uit twee delen bestaande staalplaat

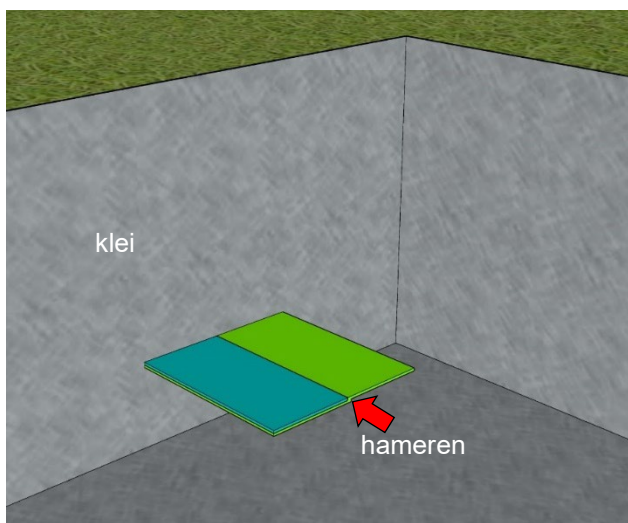


Fig. F-4 Staalplaat in de zijwand van een kuil in de klei hameren

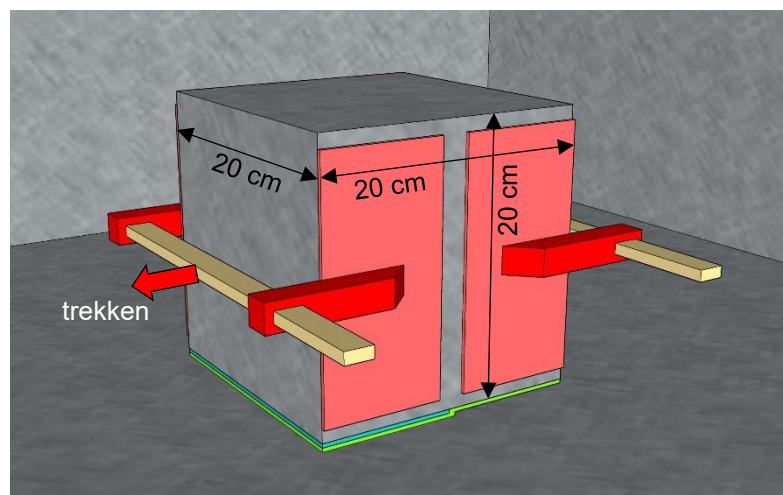


Fig. F-5 Kleiblok uit elkaar trekken.



## G Gevoeligheidsberekeningen

Er zijn ook een aantal gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd om de invloed van specifieke aspecten te kwantificeren. Dit betreft enerzijds de gebruikte rekentechniek (aantal seeds en aantal doorgerekende jaren) en anderzijds de aannames ten aanzien van de maatgevende hydraulische belasting (duur van de storm en faseverschil tussen het moment van hoogwater en de top van de stormopzet) en onzekerheid in de sterkte. Onderstaand zijn de resultaten van de berekeningen gegeven.

### G.1 Invloed van het aantal seeds

Alle berekeningen zijn een aantal malen herhaald met verschillende startwaarden (seeds) voor de randomgenerator van de sterkteparameters, waardoor er andere combinaties gerealiseerd worden van de stormcondities en sterkteparameters. Bij de meeste berekeningen zijn er 10 seeds gehanteerd, waardoor er 10 verschillende combinaties van de golfcondities en sterkteparameters zijn doorgerekend. Bij een van de berekeningen zijn 30 seeds toegepast, om de invloed ervan te kunnen vaststellen. Zie Fig. G-1 en Fig. G-2. Dit blijkt een verwaarloosbare invloed te hebben.

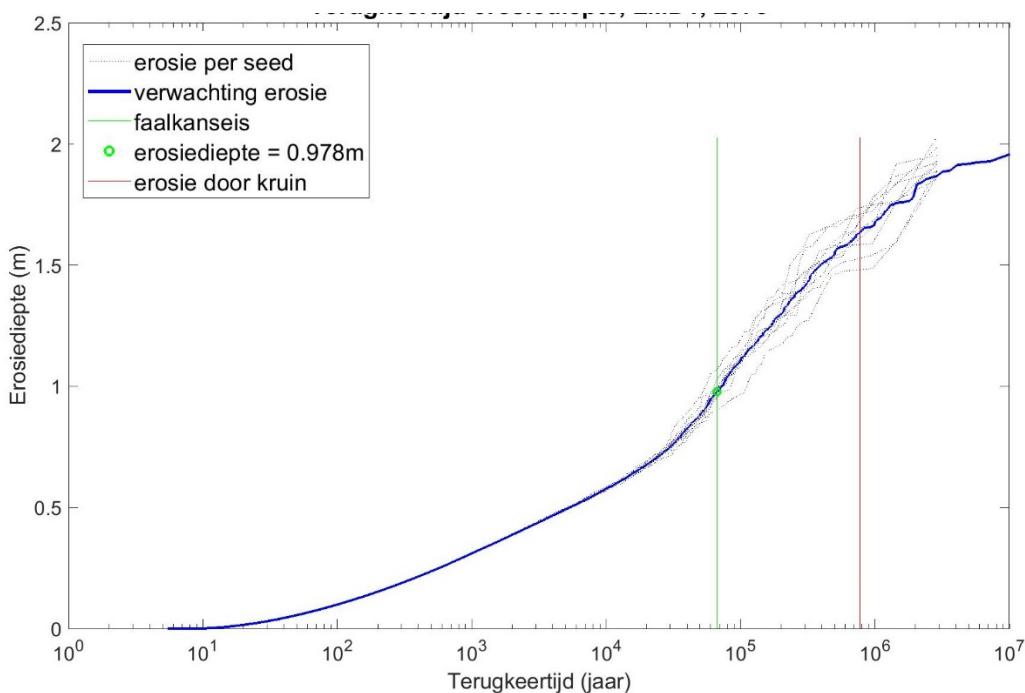


Fig. G-1 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij 10 seeds voor zelfde situatie als die van Fig. G-2

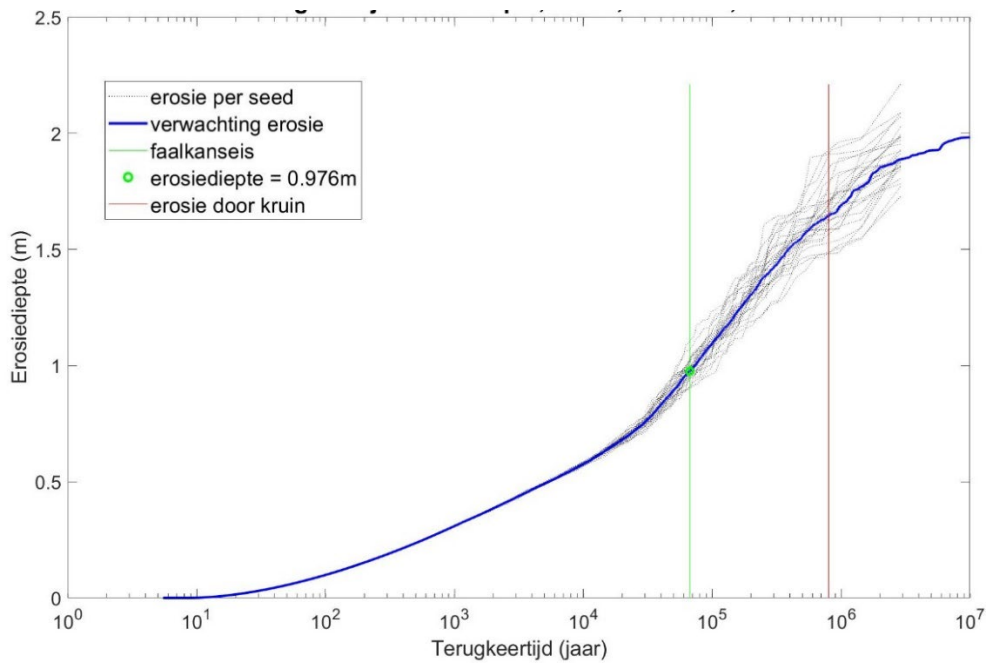


Fig. G-2 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij 30 seeds voor zelfde situatie als die van Fig. G-1

## G.2 Invloed van het aantal doorgerekende jaren

Alle berekeningen zijn uitgevoerd door 1,6 miljoen jaar te simuleren. Om te controleren of dit voldoende is, is er een berekening herhaald met een simulatie van 320.000 jaar. Zie Fig. G-3. Dit blijkt op het resultaat weinig uit te maken.

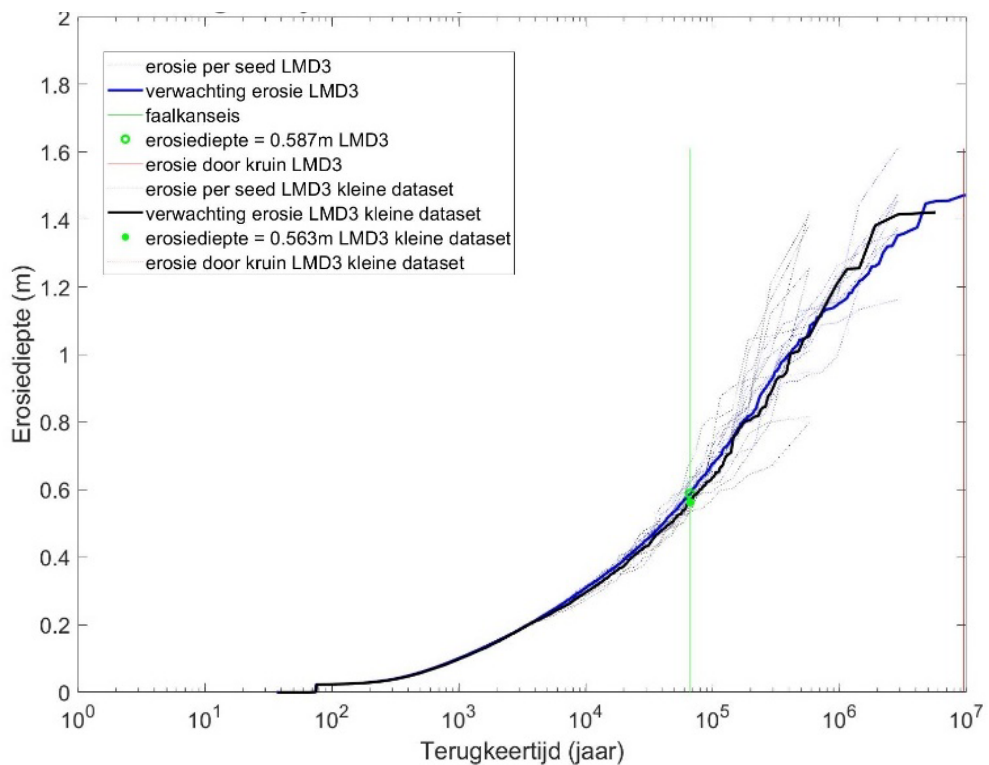


Fig. G-3 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij dataset van 1,6 miljoen jaar (blauwe lijn) en 320.000 jaar (zwarte lijn)

### G.3 Invloed van de verwachtingswaarde en spreiding van parameter $m_2$

In bijlage D is een alternatieve analyse van de proefresultaten uitgevoerd, waarbij ook de proeven met de klei van Holwerd volledig zijn meegeteld. Dat levert een kleinere verwachtingswaarde van de sterkteparameter  $m_2$ , maar een grotere spreiding. De invloed hiervan is te zien in Fig. G-4. Als ook Holwerd wordt meegeteld in de analyse, wordt de berekende erosiediepte voor locatie 1 van de Lauwersmeerdijk 9 cm minder.

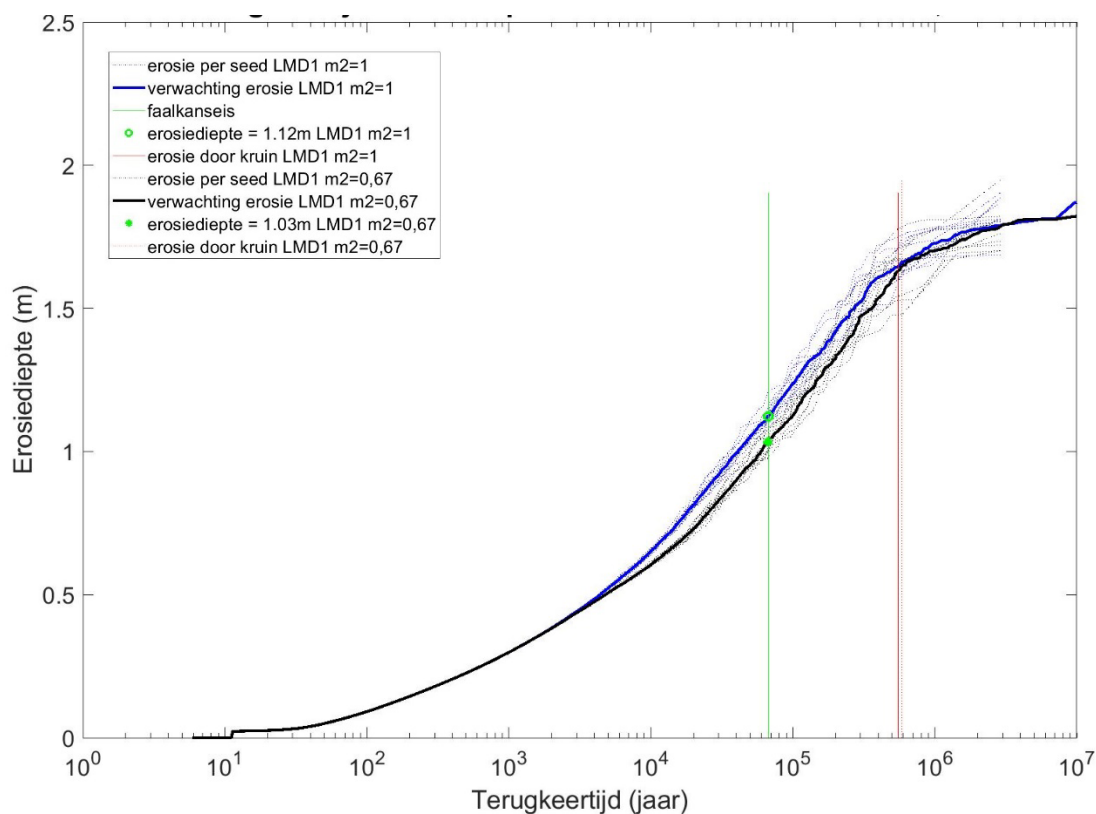


Fig. G-4 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij  $\mu(m_2) = 1$  en  $\sigma(m_2) = 0,4$  (analyse op basis van proefresultaten met klei van Lauwersmeerdijk en Blija, hoofdstuk 5 en 6) (blauwe lijn) en bij  $\mu(m_2) = 0,67$  en  $\sigma(m_2) = 0,67$  (als ook Holwerd in de analyse wordt betrokken, bijlage D) (zwarte lijn)

### G.4 Invloed van de duur van de storm

Om een indruk te krijgen van de invloed van de duur van de storm op de erosiediepte zijn ook berekeningen uitgevoerd met een stormduur van 70 uur in plaats van 45 uur. De invloed hiervan is te zien in Fig. G-5.

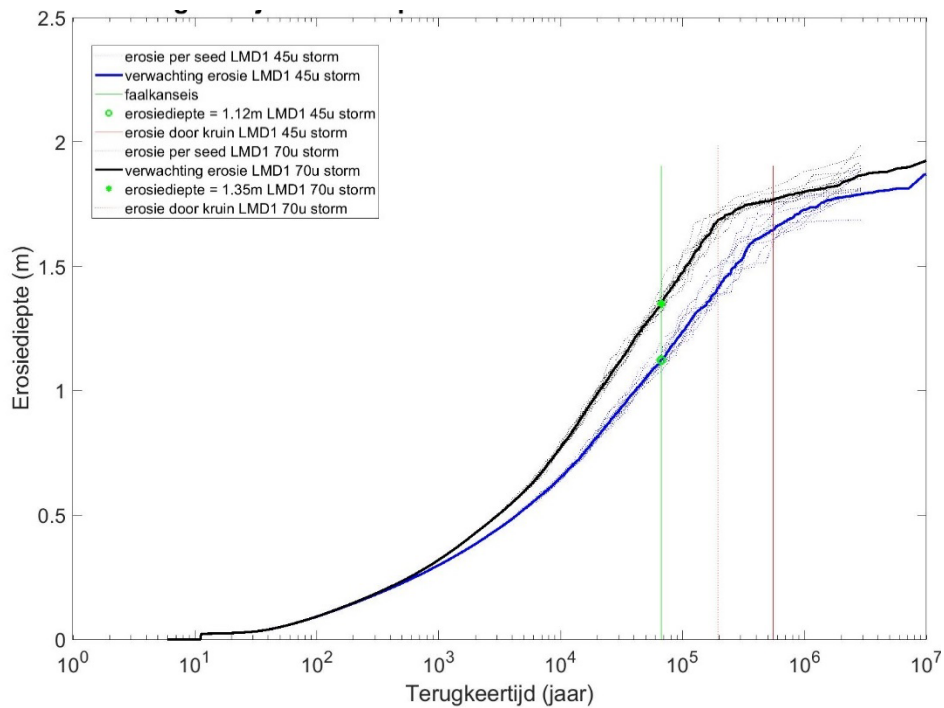


Fig. G-5 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij storm duur van 45 uur (blauwe lijn) en stormduur van 70 uur (zwarte lijn) voor locatie 1.

## G.5 Invloed van het faseverschil tussen de opzet en het hoogwater

In WBI-2017 wordt voor dijkbekledingen geen faseverschil aangehouden tussen de maximale opzet in de storm en het moment van hoogwater. Dit levert een maatgevend waterstandsverloop in de storm zoals weergegeven in Figuur 7.2. Het is denkbaar dat dit in de toekomst gaat veranderen en er een faseverschil van 5,5 uur gehanteerd moet worden voor de dijken langs de Waddenzee. Het verloop van de waterstand wordt dan zoals in Fig. G-6.

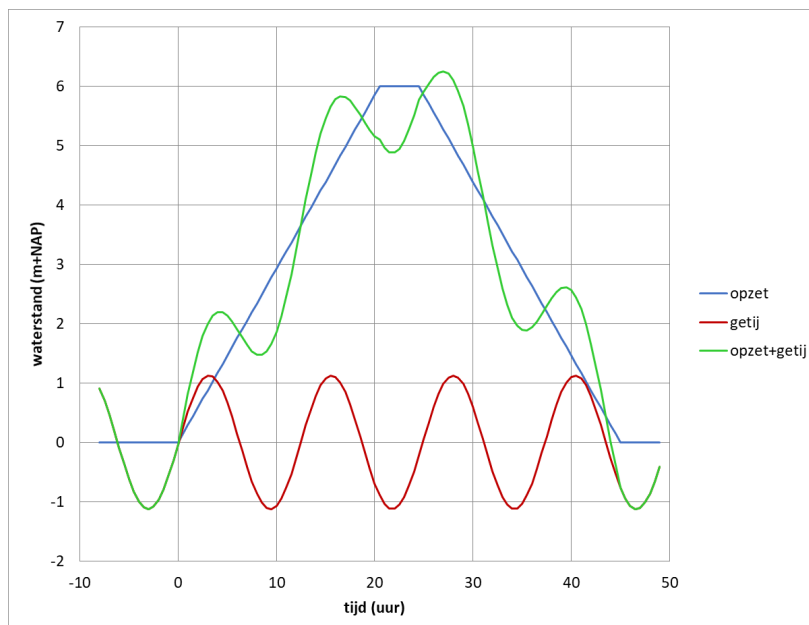


Fig. G-6 Verloop van de waterstand bij een faseverschil van 5,5 uur tussen de top van de stormopzet en het hoogwater

Als er sprake is van een faseverschil blijft de waterstand veel langer op een hoog niveau, omdat dan gerekend wordt met een veel hogere stormopzet. Dat leidt tot een veel grotere erosiediepte, zoals de zien is in Fig. G-7 t/m Fig. G-10. Het blijkt dat de erosiediepte dan ongeveer anderhalf keer zo groot is.

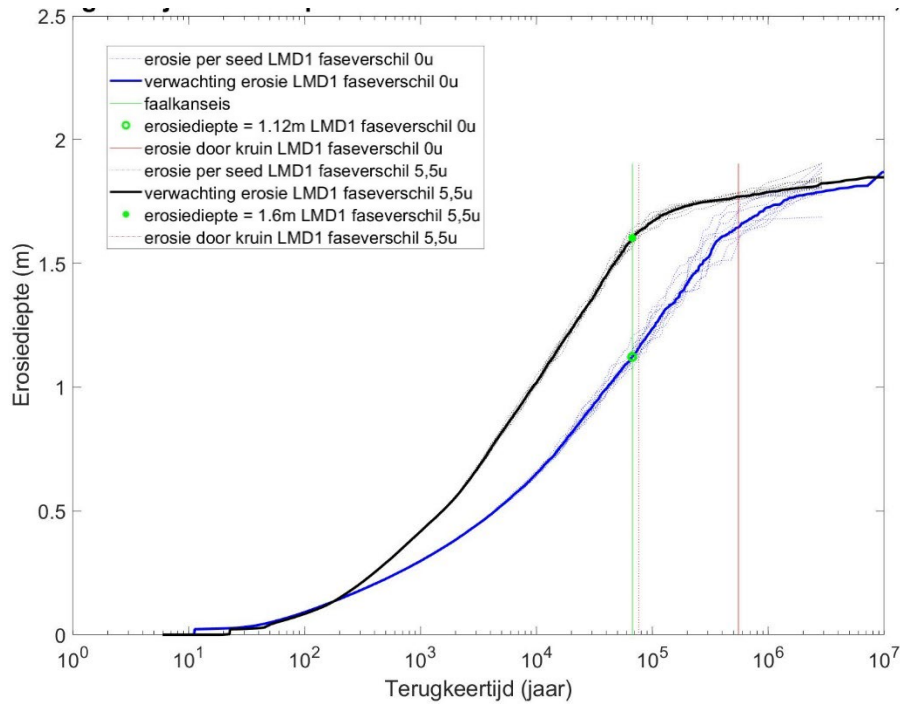


Fig. G-7 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 1 bij geen faseverschil (blauwe lijn) en bij een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet (zwarte lijn).

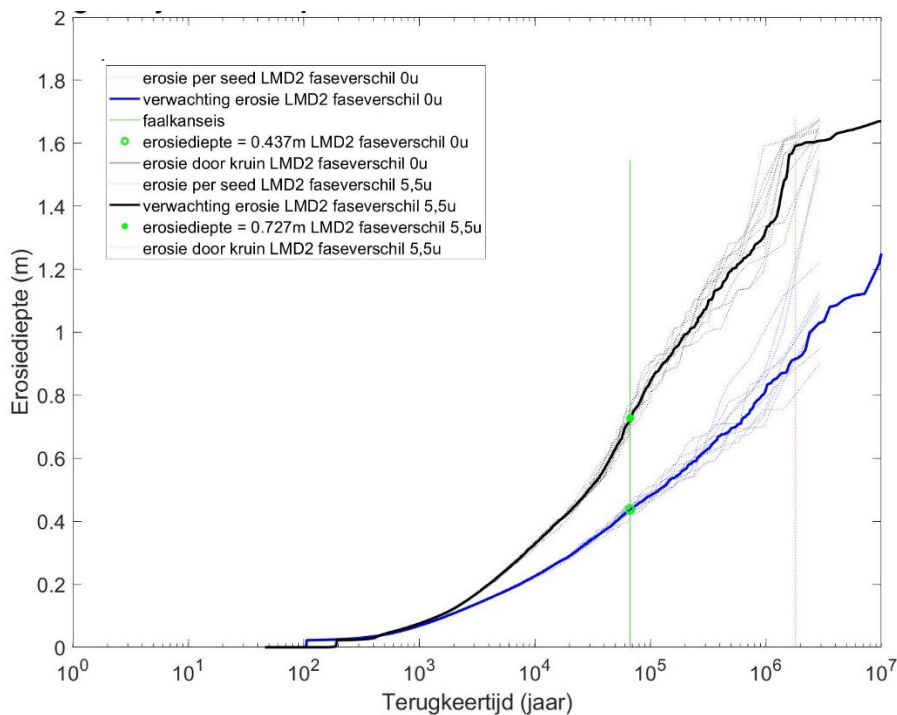


Fig. G-8 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 2 bij geen faseverschil (blauwe lijn) en bij een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet (zwarte lijn).

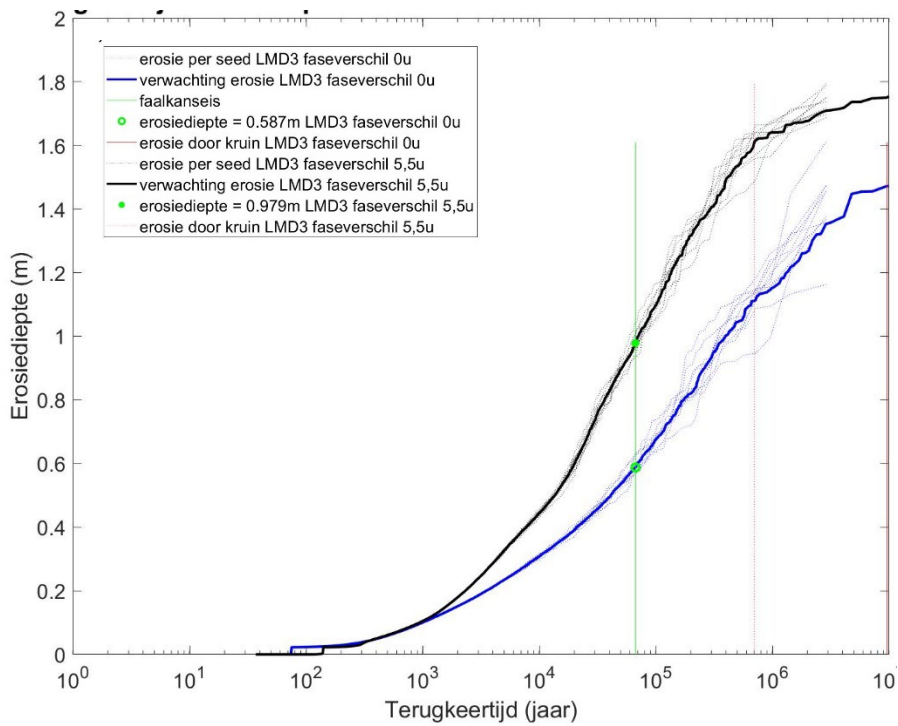


Fig. G-9 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 3 bij geen faseverschil (blauwe lijn) en bij een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet (zwarte lijn).

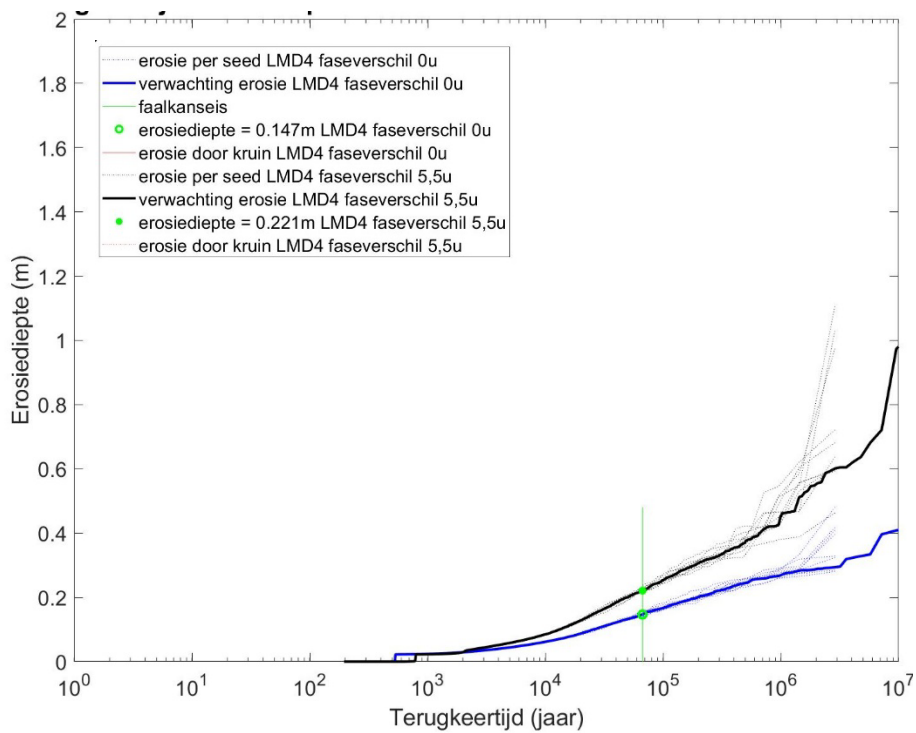


Fig. G-10 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd voor locatie 4 bij geen faseverschil (blauwe lijn) en bij een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet (zwarte lijn).

## G.6 Invloed van de verwachtingswaarde van parameter $m_1$

In alle berekeningen is gerekend met een verwachtingswaarde van de sterkteparameters  $m_1$  van 1,0. In paragraaf 6.1.1 is beargumenteerd dat er wellicht gerekend kan worden met 0,8. De invloed hiervan op het resultaat is te zien in onderstaande figuren, waarbij er gerekend is met een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet. Het blijkt dat de erosiediepte dan 7 cm minder is.

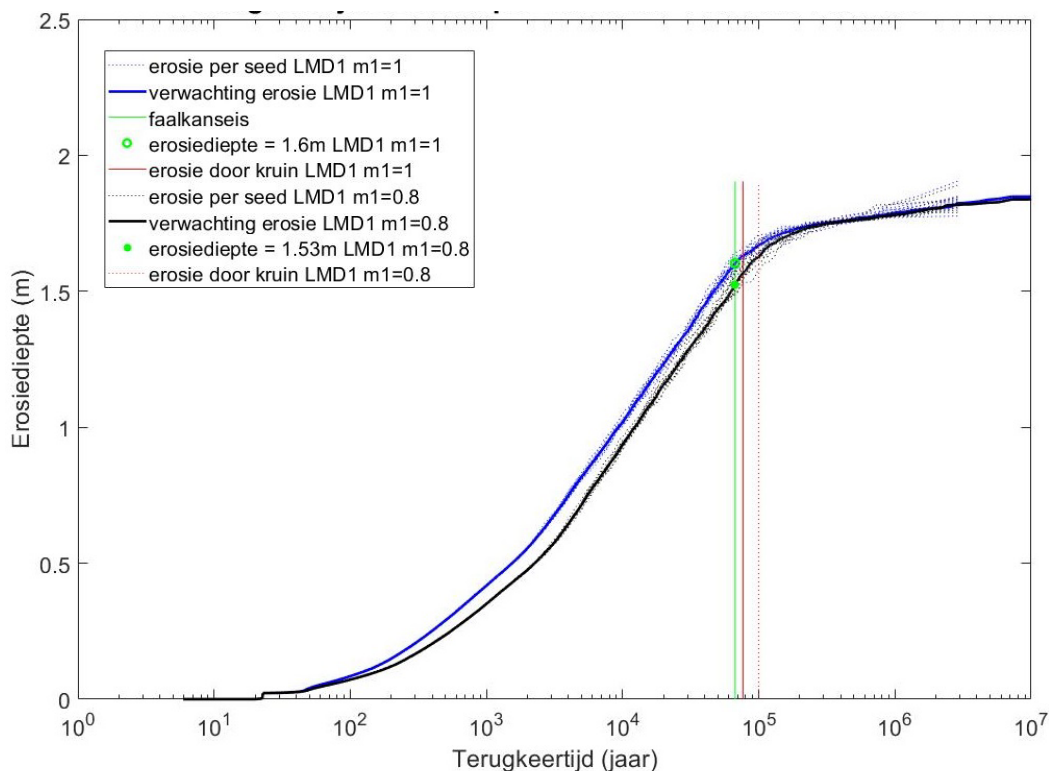


Fig. G-11 Erosiediepte als functie van de terugkeertijd bij  $\mu(m_1) = 1$  (blauwe lijn) en  $\mu(m_1) = 0,8$  (zwarte lijn) bij een faseverschil van 5,5 uur tussen het hoogwater en de top van de stormopzet

# H Schade Emmapolderdijk

Op 17 februari 1962 heeft een zware storm schade toegebracht aan de Emmapolderdijk (Fig. H-1). Deze 10,3 km lange dijk bestaat uit twee secties:

- 2,4 km met een ondertalud van baksteen en boventalud met gras. De overgang ligt op NAP+3,3 m
- 7,9 km met een ondertalud van asfalt en boventalud met gras. De overgang ligt op NAP+3,8 m

De maximale waterstand tijdens de storm was ongeveer NAP+4,55 m. Op de eerste sectie waren 104 erosiekuilen in het gras ontstaan (43 per km) en in de tweede sectie 20 (2,5 per km). Hieruit blijkt dat het gras van de eerste sectie zwaarder belast was dan de tweede, hetgeen te verklaren is aan de hand van het niveau van de overgang. De schade in sectie 2 was voornamelijk tussen km6,3 en km7,3, waar ook schade was aan het asfalt.

Waarschijnlijk waren de golven op het dijkvak km0,0-km1,0 (sectie 1) en km6,3-km7,0 (sectie 2) het grootst.

De kleilaag was 0,5 m dik en de taludhelling van het boventalud bedroeg 1:4, zie Fig. H-2.



Fig. H-1 Locatie van Emmapolder bij Eemshaven

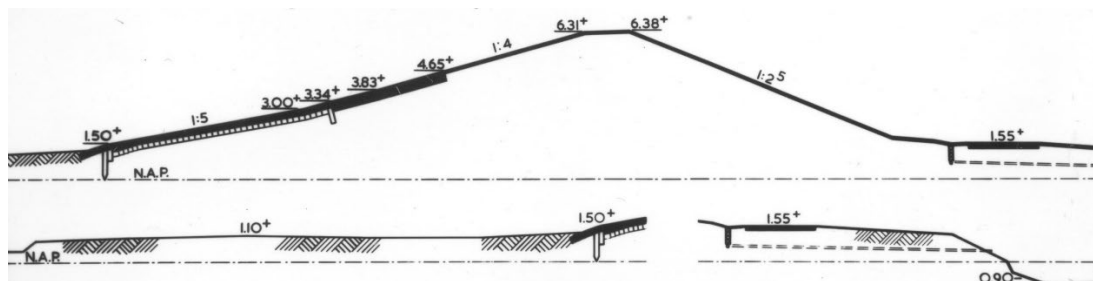


Fig. H-2 Profiel van Emmapolderdijk (Van der Meer, 1999)





Fig. H-3 Schade bij km1,85

De bovenrand van de steenbekleding ligt op 3,3 m+NAP, zie Fig. H-2.

De schade ontstond bij deze rand (dus net onder de stilwaterlijn) en liep bij het grootste gat door tot 0,75 m verticaal gemeten onder de kruin, welke op +6,3 m NAP lag (Van der Meer 1999). Het gat strekte zich dus uit van NAP+3,3 m tot NAP+5,5 m.

Bij een waterstand van +3,8 m NAP en een voorlandligging van +1,1 m NAP, bedraagt de waterdiepte 2,7 m. Dit houdt in dat de golfhoogte volgens Van der Meer (1999) maximaal ongeveer  $H_{m0} = 1,2$  à  $1,3$  m geweest moet zijn. De duur van de storm is helaas niet bekend.

In de rapportage van Bouwsema (1978) staat dat de kleilaag van zeer slechte kwaliteit was omdat deze van natte klei uit de voorliggende kwelder was samengesteld. De klei was veel te nat aangebracht en was weinig gerijpt en had een hoog slibgehalte.

Er was sprake van zeer sterke structurering: in feite bestond de laag uit losse brokken klei. Het wordt als volgt omschreven:

- 0-5 cm - mv: zodelaag, goed doorworteld en goede kruimelstructuur
- 5-10 cm - mv: grove kruimels, met scherpe ribben  $\varnothing$  2-5 mm, weinig doorworteld
- 10-20 cm - mv: fijne kluiten met scherpe ribben. Vrijwel geen wortels.
- 20-50 cm - mv: grove kluiten die als basaltzuiltjes op het zand stonden, met krimpscheuren van 2-20 mm ertussen.

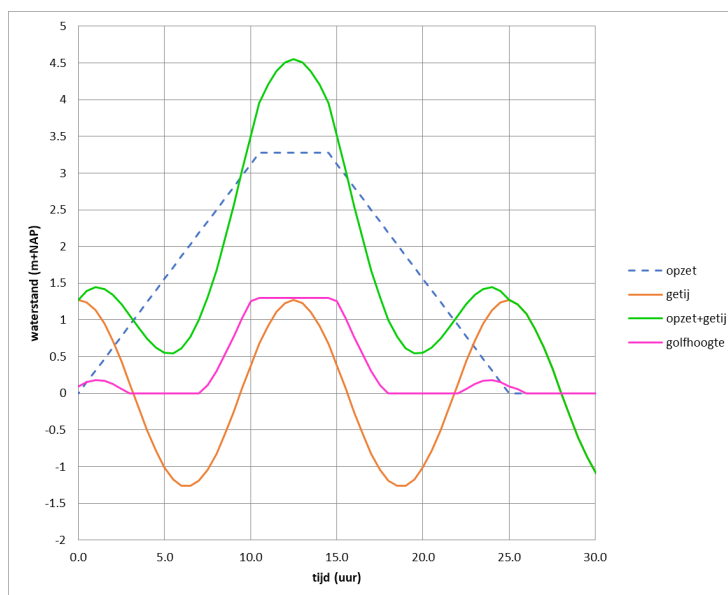


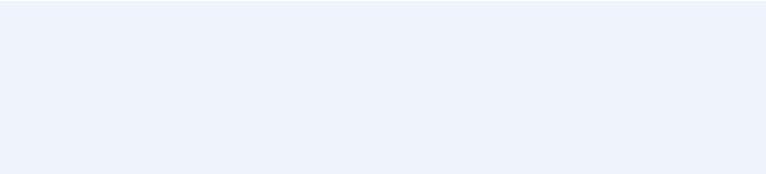
Fig. H-4 Aangenomen verloop van de waterstand en golfcondities voor berekening van erosie

Met de formules uit hoofdstuk 5 en 6 is deze schade nagerekend. Daarbij is het verloop van de waterstand en golfhoogte aangehouden uit Fig. H-4. Als modelcoëfficiënt is gerekend met de verwachtingswaarde plus eenmaal de standaardafwijking. Er waren immers meer plaatsen zonder schade dan met schade.

Het resultaat van de berekeningen is een erosiediepte van 0,67 m. Op de top van de storm is de erosie al zo diep dat de kleilaag doorbreekt en het zand eronder bloot komt te liggen. Daarna gaat de erosie snel als gevolg van het uitspoelen van zand en het ondermijnen van de bovenliggende kleilaag.

Deze berekening gaat uit van goed aangebrachte klei, terwijl bekend is dat de klei in slechte staat was. Dat zal zeker de erosie versneld hebben.

Geconcludeerd kan worden dat de geconstateerde schade in overeenstemming is met de berekende erosie.



**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)