

Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Meetverslag Deltagootproeven



Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Meetverslag Deltagootproeven

Auteur(s)

M. Klein Breteler

Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Meetverslag Deltagootproeven

Opdrachtgever	Waterschap Noorderzijlvest
Contactpersoon	Bert de Wolff, Ate Wijnstra en Heine van Maar
Referenties	Opdracht van 7 juli 2020 met kenmerk Z/20/036703
Trefwoorden	Zeedijken, reststerkte, kleilaag, grasbekleding, erosie

Documentgegevens

Versie	2
Datum	27-08-2021
Projectnummer	11204841-006
Document ID	11204841-006-HYE-0008
Pagina's	187
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1	M. Klein Breteler	S. Zwanenburg	M.R.A. van Gent
2	M. Klein Breteler	G. Wolters	J.J. Schouten

Samenvatting

De kennis over de erosie van een kleibekleding met gras op het boventalud van zee- en meerdijken schiet nog tekort om te kunnen inschatten of dit deel van de dijk voldoende veiligheid biedt. Om deze kennisleemte in te vullen is er een onderzoeksprogramma opgestart. Het onderzoeksprogramma is in eerste instantie gericht op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat van het waterschap Noorderzijlvest en de dijk Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân, maar daarna kan het waarschijnlijk ook op vergelijkbare dijken langs vergelijkbare watersystemen worden toegepast.

Dit onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Deltagootproeven voor 6 specifiek gekozen situaties (combinatie van geometrie en waterstand) met blokken klei met gras die op drie verschillende locaties van een dijk langs de Waddenzee zijn gehaald. Een van deze situatie betreft een herhaling van een proevenserie met een andere kleikwaliteit.
2. Numerieke berekeningen met OpenFoam waarmee het toepassingsgebied van de proefresultaten wordt 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.

De huidige rapportage heeft betrekking op de proeven in de Deltagoot (onderdeel 1). Dit meetverslag geeft de modelopstelling, de uitgevoerde proeven en de meetresultaten.

In de Deltagoot van Deltares zijn op ware grootte verschillende dijken opgebouwd om te onderzoeken hoe sterk de kleibekleding met gras op het boventalud is. Gedurende vele uren is er een grote hydraulische belasting op deze dijken geweest met golven van doorgaans $H_{m0} = 2,0$ m en $T_p = 5,5$ s.

Het onderzoek in de Deltagoot bestond uit 6 proevenseries:

- 1 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met een boventalud van 1:4 en klei en gras van de Lauwersmeerdijk (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3) ,
- 2 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met een boventalud van 1:5 en klei en gras van Holwerd (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3) ,
- 3 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met een boventalud van 1:5, verlaagde berm en met klei en gras van Holwerd,
- 4 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met een boventalud van 1:4 en klei en gras van Blija (stevige klei, erosiebestendig, categorie 1),
- 5 Dijk met berm met klei van Holwerd op het boventalud met helling van 1:5, waarvan de eerste 4 m kunstmatig een zeer warme en droge zomer had doorgemaakt.
- 6 Dijk zonder berm met taludhelling van 1:5 (zowel onder- als boventalud) met klei van Holwerd op het boventalud.

Tijdens de meeste proeven was de waterstand iets hoger dan de overgang tussen de harde bekleding en het gras. Alleen tijdens proevenserie K4 was het nodig de waterstand wat lager te kiezen vanwege de wat kleinere erosiebestendigheid van de klei en het gras. Desondanks was de waterstand relatief hoog voor de dijk Koehool-Lauwersmeer en was de golfbelasting op de kleibekleding met gras op het boventalud relatief zwaar.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat de kleibekleding met gras zeer goed in staat is om deze hydraulische belasting te weerstaan. De harde bekleding op het ondertalud en de berm vangen het grootste deel van de golfklappen op, waardoor de kleibekleding met gras slechts af en toe een golfklap krijgt en verder alleen door de golfoploop wordt belast.

Uiteindelijk is pas na 14 tot 36 uur golven de kleilaag doorgebroken (= standduur). Gezien de maximale duur dat er zo'n zware hydraulische belasting op het boventalud optreedt tijdens een extreme storm, namelijk hooguit 8 uur, is de standduur van deze kleibekleding met gras aanzienlijk.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
2	Aanpak	11
2.1	Aanpak van gehele onderzoek	11
2.2	Aanpak van de Deltagootproeven	13
2.2.1	Golfcondities en waterstand	14
2.2.2	Modelopstelling	15
3	Klei met gras van de dijken	17
4	Modelopstelling in de Deltagoot	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Modelopstelling K1	23
4.3	Modelopstelling K2 en K3	27
4.4	Modelopstelling K4	31
4.5	Modelopstelling K5 en K6	32
5	Proevenprogramma	36
5.1	Algemeen	36
5.2	Proevenserie K1	37
5.3	Proevenserie K2	38
5.4	Proevenserie K3	40
5.5	Proevenserie K4	43
5.6	Proevenserie K5	44
5.7	Proevenserie K6	45
6	Proefresultaten	47
6.1	Algemeen	47
6.2	Proevenserie K1	49
6.3	Proevenserie K2 en K3	53
6.4	Proevenserie K4	56
6.5	Proevenserie K5 en K6	61
7	Conclusies	65
	Referenties	69

A	Figuren	70
A.1	Meetresultaten van Faro laserscans K1	70
A.2	Meetresultaten van Faro laserscans K2 en K3	73
A.3	Meetresultaten van Faro laserscans K4	77
A.4	Meetresultaten van Faro laserscans K5 en K6	81
A.5	Dwarsprofielen op basis van laserscans K1	86
A.6	Dwarsprofielen op basis van laserscans K2	87
A.7	Dwarsprofielen op basis van laserscans K3	88
A.8	Dwarsprofielen op basis van laserscans K4	89
A.9	Dwarsprofielen op basis van laserscans K5	90
A.10	Dwarsprofielen op basis van laserscans K6	91
A.11	Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum	92
B	Foto's	93
B.1	Opbouw modelopstelling	93
B.2	Proeven K1	104
B.3	Verbouwing naar K2	120
B.4	Proeven K2	123
B.5	Verbouwing naar K3	128
B.6	Proeven K3	129
B.7	Verbouwing naar K4	136
B.8	Proeven K4	138
B.9	Verbouwing naar K5	150
B.10	Proeven K5	153
B.11	Verbouwing naar K6	157
B.12	Proeven K6	158
C	Faalpaden en faalkans van de dijkbekleding	170
D	Klei-eigenschappen	173
D.1	Locatie van herkomst	173
D.2	Klei-eigenschappen	174
D.3	Verdichting van de klei	176
E	Figuren van modelopstellingen	178

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 er vanuit 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 de zware stormen.

De kans op 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).



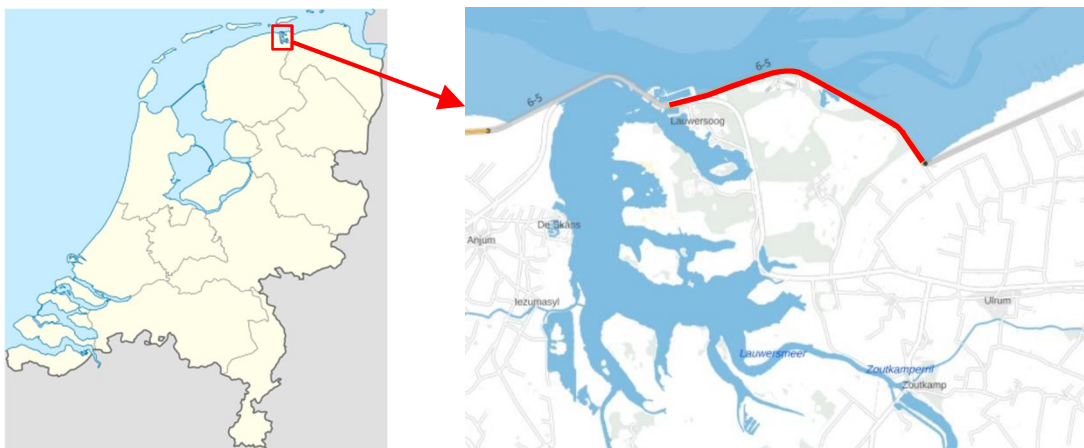
Figuur 1.1 Dijkbekleding van gras op een kleilaag op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat

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 Noorderzijvest (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-Vierhuizergat 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 ondertalud; 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 het meetverslag van deze proeven. Het geeft de modelopstelling, de uitgevoerde proeven en de meetresultaten.

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 dat hierin een belangrijke rol speelt.

Hoofdstuk 3 beschrijft de wijze waarop de klei en het gras van de waddenzeedijken is gehaald en getransporteerd is naar de Deltagoot, waarna in Hoofdstuk 4 de modelopstelling is gegeven. In Hoofdstuk 5 zijn het proevenprogramma en de resultaten beschreven. 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 paragraaf 2.2.2)

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 buitentalud” komen, zoals het eigenlijk zou moeten zijn volgens de overstromingskansbenadering, zie ook Bijlage C.

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 buitentalud. Het doel van het huidige onderzoek is om dit rekenmodel verder uit te breiden voor de situatie met alleen een kleibekleding met gras op het boventalud.

Voor het onderzoek wordt de Deltagoot gebruikt om de sterkte van de kleibekleding met gras op het boventalud te kwantificeren (Figuur 2.1). Er zijn proeven uitgevoerd op 6 dwarsprofielen. Hoewel dit een omvangrijk onderzoek is, kunnen niet alle situaties in de Deltagoot proefondervindelijk onderzocht worden. De focus van de Deltagootproeven is de situatie waarbij er een aanzienlijke hydraulische belasting is op de kleibekleding met gras, terwijl de harde bekleding op het ondertalud en de berm de hydraulische belasting op de kleibekleding met gras in grote mate reduceren. De verwachting is 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).



Figuur 2.1 Deltagoot van Deltares (proef K1_04)

Andere situaties, zoals hogere of lagere waterstanden, andere bermbreedte, andere golfhoogtes etc., worden beschouwd met het numerieke model OpenFoam. In dit numerieke model kan de hydraulische belasting op de dijk berekend worden. Hoewel de nauwkeurigheid van dit rekenmodel nog niet optimaal is, kunnen hiermee wel trends worden afgeleid ten aanzien van de grootte van de hydraulische belasting op het boventalud. Om hiermee uitspraken te kunnen doen over de te verwachten erosiesnelheid bij deze andere situaties, wordt gebruik gemaakt van de hypothese van Kruse (Klein Breteler e.a. 2012), die zegt dat de piekdrukken in de golfklappen in de erosiekuil bepalend zijn voor de grootte van de erosiesnelheid.

De volgende aspecten van de geometrie en belasting zijn mogelijk belangrijk voor de erosie van het boventalud:

- Significante golfhoogte bij de teen van de dijk
- Golfperiode bij de piek van het spectrum (golfsteilheid)
- Waterstand ten opzichte van het niveau van de overgang tussen de harde bekleding en het gras
- Taludhelling
- Breedte van de berm
- Niveau van de berm (ten opzichte van de waterstand en/of het niveau van de overgang)

Enkele van deze aspecten zijn gekwantificeerd met behulp van de Deltagootproeven, maar de meeste zijn gekwantificeerd met het numerieke model OpenFoam.

De werkwijze met het numerieke model is als volgt (zie ook Klein Breteler 2020):

- Stap 1: 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 (gemiddelde van hoogste een derde deel), 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: met 'OpenFoam' worden de piekdrukken uitgerekend voor uiteenlopende situaties: verschillende niveaus van de berm, verschillende niveaus van de overgang, verschillende golfhoogtes en verschillende golfsteilheden en enkele combinaties hiervan.
- 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.
- Stap 4: De uiteindelijke resultaten worden 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.

Dit onderzoek bestaat daarom 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 wordt 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 wordt 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.

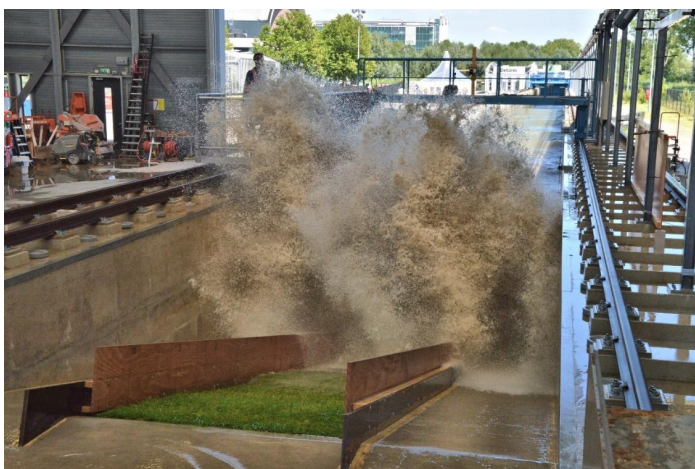
Het eerste deel van het onderzoeksprogramma bestaat uit 6 proevenseries in de Deltagoot:

- 1.1 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met klei en gras van de Lauwersmeerdijk (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3, zie Figuur 3.4) op het boventalud,
- 1.2 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met klei en gras van Holwerd (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3, zie Figuur 3.4) op het boventalud,
- 1.3 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met verlaagde berm en met klei en gras van Holwerd op het boventalud
- 1.4 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met klei en gras van Blija (stevige klei, erosiebestendig, categorie 1, zie Figuur 3.4) op het boventalud
- 1.5 Dijk met berm en klei van Holwerd op het boventalud met taludhelling van 1:5, waarvan de eerste 4 m kunstmatig een zeer warme en droge zomer heeft doorgemaakt.
- 1.6 Dijk zonder berm met taludhelling van 1:5 (zowel onder- als boventalud) en klei van Holwerd op het boventalud.

De huidige rapportage omschrijft de modelopstelling, de uitgevoerde proeven en de meetresultaten van onderdeel 1 van het gehele onderzoek.

2.2 Aanpak van de Deltagootproeven

Om de erosiesnelheid van de kleibekleding met gras op het boventalud te meten tijdens zware golfaanval, is in de Deltagoot van Deltares een dijk opgebouwd op ware grootte (schaal 1:1). De geometrie van de eerste modelopstelling is zo gekozen dat deze overeenkomt met het toekomstige ontwerp van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat en bovendien gemakkelijk kan worden omgebouwd naar de geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer en varianten daarvan. Voor de tweede proevenserie is de modelopstelling omgebouwd naar een geometrie die overeenkomt met de gemiddelde geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer. Daarna zijn er varianten op deze modelopstellingen ingebouwd voor de 3^{de} t/m 6^{de} proevenserie. De modelopstellingen zijn nader beschreven in Hoofdstuk 4.



Figuur 2.2 Tijdens proef K1_09

2.2.1 Golfcondities en waterstand

De waterstand en golfcondities tijdens de proeven van de eerste serie zijn zo gekozen dat ze in de buurt liggen van het ontwerppunt van de toekomstige probabilistische berekeningen voor de kleibekleding met gras op het boventalud. Doordat deze berekeningen vooraf nog niet mogelijk waren, zijn deze condities geschat aan de hand van berekeningen met Hydra-NL.

Voor de andere proevenseries is de waterstand zo gekozen dat er een passende erosiesnelheid werd verkregen en binnen de mogelijkheden van de Deltagoot.

Voor een deel van de Waddenzeedijken vallen de golven bij extreme omstandigheden scheef in, met voor de oostelijke Lauwersmeerdijk een hoek van ongeveer 50° ten opzichte van de dijknormaal. Dat maakt de golfbelasting veel minder zwaar dan wanneer er loodrechte golfaanval zou zijn. De golfbelasting kan omgerekend worden naar een equivalente belasting door golven die haaks op het talud aankomen met de formule van Klein Breteler en Mourik (2019). De golfperiode blijft daarbij gelijk en de equivalente golfhoogte bij loodrechte golfaanval kan als volgt berekend worden:

$$\frac{H_{m0\perp}}{H_{m0}} = \max\left((\cos \beta)^{0,67}; 0,35 \right)$$

Met:

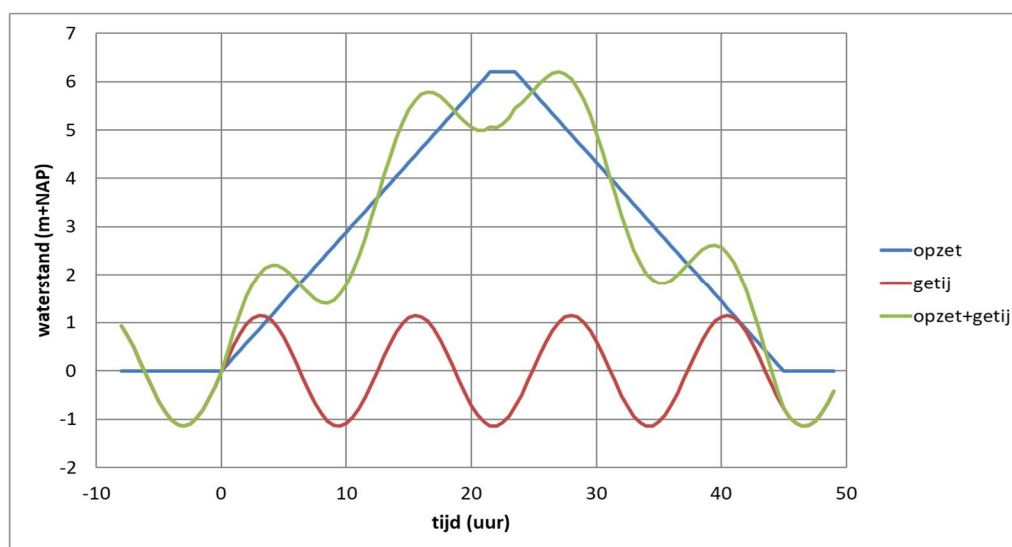
$H_{m0\perp}$ = equivalente significante golfhoogte bij loodrecht invallende golven (m)

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

β = hoek van golfaanval ten opzichte van de dijknormaal (°)

Gezien de grootte van de golven onder extreme omstandigheden op de Waddenzee, moet de maximale golfhoogte tijdens de proeven gebruikt worden die mogelijk is in de Deltagoot, namelijk een significante golfhoogte van $H_{m0} = 2,0$ m met loodrechte golfaanval.

Een golfhoogte van $H_{m0\perp} = 2,0$ m bij loodrechte golfaanval, zoals toegepast in de Deltagoot, komt volgens bovenstaande formule overeen met $H_{m0} = 2,7$ m bij scheve golfaanval met $\beta = 50^\circ$.



Figuur 2.3 Waterstand met dubbele top (gedurende 6 uur is de waterstand hoger dan de topwaterstand minus 0,5 m)

Voor de belastingduur geldt dat het gras voornamelijk zwaar belast wordt op de top van de storm, als de waterstand het hoogst is. Vanwege het getij is de duur van zo'n zware belasting vrij beperkt, namelijk orde 4 uur per hoogwater. In het uitzonderlijke geval dat er twee hoogwaters direct na elkaar met extreem hoge waterstand en golven optreden, is de

belastingduur maximaal 6 à 8 uur (zie Figuur 2.3). De modelopstelling en de waterstand zijn zo gekozen dat de condities in de buurt zitten van het ontwerp punt van probabilistische berekeningen voor het onderwerp van zo'n boventalud. Dan leveren de proeven voldoende informatie over het erosieproces als functie van de tijd.

2.2.2 Modelopstelling

In de Deltagoot is een dijk op ware grootte gebouwd met een ondertalud en berm met harde bekleding en een boventalud met kleibekleding met gras. Hoewel langs de Waddenzee de harde bekleding vaak bestaat uit asfalt (waterbouwasfaltbeton, WAB) is om praktische redenen in de Deltagoot gebruik gemaakt van zandcement als harde bekleding. Deze vereenvoudiging heeft geen invloed op de erosie van het boventalud.

Voor het boventalud is gebruik gemaakt van klei en gras van verschillende Waddenzeedijken (zie Figuur 3.4):

- van de Lauwersmeerdijk in het traject van Lauwersmeerdijk-Vierhuizen
- van de dijk Koehool-Lauwersmeer bij Holwerd
- van de dijk Koehool-Lauwersmeer bij Blija.

De kleibekleding met gras is zo goed mogelijk in ongeroerde/onverstoorde toestand van de Waddenzeedijken gehaald en getransporteerd naar de Deltagoot. Dit is gedaan door met stalen mallen blokken van 2x2 m² en circa 80 cm dik van de dijk te halen (zie Figuur 2.4). Dit is nader omschreven in hoofdstuk 3. Op deze wijze is bereikt dat er klei, inclusief de gestructureerdheid die in de loop der jaren ontstaat, en volgroeid gras in de modelopstelling is toegepast. Dat is belangrijk om een betrouwbaar proefresultaat te verkrijgen.



Figuur 2.4 blokken klei met gras in stalen mallen

In de meeste modelopstellingen zijn twee lagen van dergelijke kleiblokken gebruikt om een voldoende dikke laag klei op het boventalud te krijgen. Van de onderste laag kleiblokken is de graszode van 15 à 20 cm dik afgehaald. In de breedte-richting van de Deltagoot is er voor gekozen om slechts één rij van dergelijke kleiblokken met gras toe te passen, zodat in feite een dijk lengte met gras van 2 m is gerealiseerd in de Deltagoot. Naast het gras in de 5 m brede Deltagoot is een betontalud aangebracht, zoals te zien is in Figuur 2.5. Dit beton is niet meer gewijzigd gedurende het gehele onderzoek, terwijl het grastalud tijdens de eerste en vierde proevenserie een talud van 1:4 had en tijdens de andere series een talud van 1:5.



Figuur 2.5 Boventalud in de Deltagoot

Verder wordt in het onderzoek aandacht besteed aan klimaatverandering, dat kan leiden tot zeer droge en warme zomers. Dat heeft een belangrijk effect op de kwaliteit van het gras. Voor dat doel zijn twee kleiblokken in een tent geplaatst en zo gedurende een paar maanden warm en droog gehouden (zie Figuur 1.4). Deze kleiblokken zijn in de laatste modelopstelling gebruikt (proevenserie K5 en K6).

3 Klei met gras van de dijken

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. 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:

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

De locaties zijn aangegeven in bijlage D.



Figuur 3.1 De dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat

Voor het steken van de klei zijn stalen mallen van Deltares gebruikt waarmee blokken klei van $2 \times 2 \times 0,85 \text{ m}^3$ kunnen worden gestoken. Eerst zijn de zijwanden van de stalen mal als een doos zonder bodem in het taludoppervlak gedrukt, zie Figuur 3.2. 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. 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 3.3. Dit leverde het gewenste blok klei met gras dat naar de Deltagoot is vervoerd. In Figuur 3.7 is een kleiblok met gras van de Lauwersmeerdijk te zien waar de mal vanaf gehaald is. Dit is het reserveblok dat uiteindelijk niet gebruikt hoefde te worden.

Op de locatie waar de kleiblokken van de dijk zijn gestoken zijn zes monsters genomen van de klei en zijn de belangrijkste eigenschappen bepaald. Er zijn drie monsters op 15 à 25 cm onder het maaiveld genomen en drie monsters dieper in de klei. De resultaten van de analyses zijn gegeven in Tabel 3-1 en in Bijlage D. Het blijkt dat er geen substantieel verschil is tussen de eigenschappen van de klei vlak onder het gras en in de diepere lagen. Aangezien volgens de beheerder zowel bij Holwerd als bij Blija er een leeflaag voor het gras is toegepast op de kleibekleding, zijn de bovenste monsters net onder de leeflaag ingewonnen. De leeflaag was bij Holwerd en bij Blija ongeveer 10 à 20 cm dik. Bij de Lauwersmeerdijk was de leeflaag minder duidelijk herkenbaar.

	% lutum (< 2 µm)	% zand (> 63 µm)	Vloei-grens (%)	Uitrol-grens (%)	Plasticiteits-index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Lauwersmeerdijk	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



Figuur 3.2 Stalen mal in taludoppervlak drukken en vervolgens rondom vrijgaven



Figuur 3.3 Staalplaat eronder drukken en vervolgens in de vrachtwagen laden

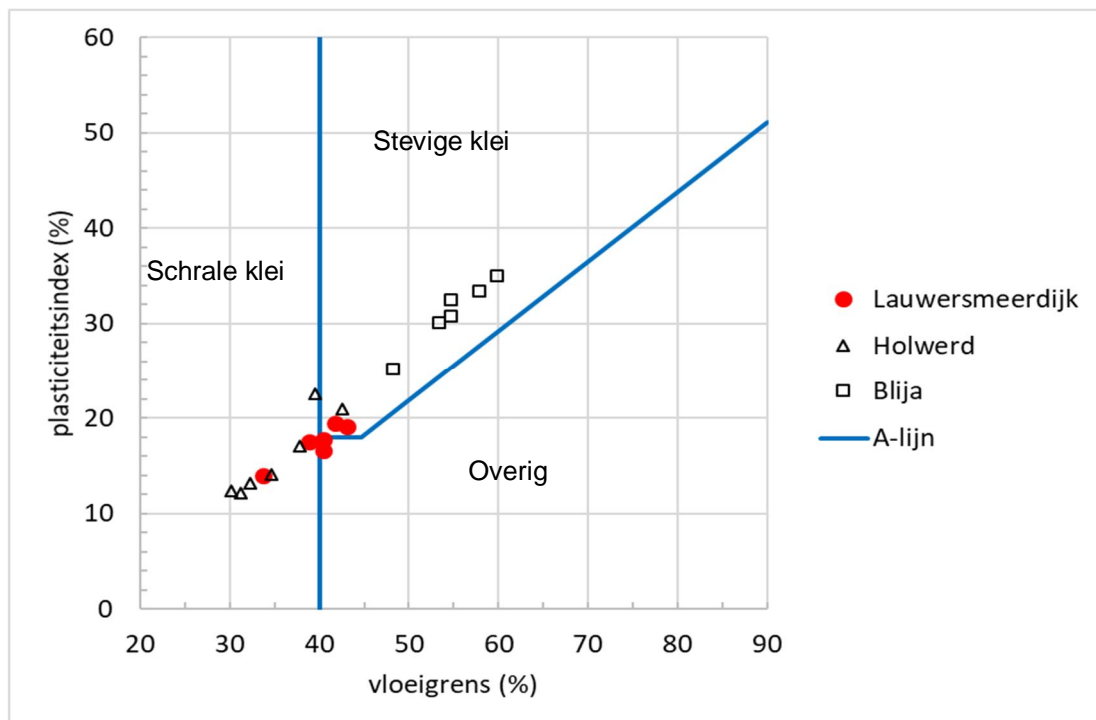
De klei van Holwerd is visueel ten opzichte van die van de Lauwersmeerdijk wat dichter en harder en heeft minder wormen. In de Lauwersmeerdijkklei zaten veel wormen. Er zitten minder dunne zandlaagjes, kleine zandlenzen en kleine blokjes zand in de klei bij Holwerd dan in de klei van de Lauwersmeerdijk.

De klei van Blija bevat ook veel wormen, en is in tegenstelling tot de klei van de Lauwersmeerdijk en die van Holwerd vrij sterk gestructureerd. De klei valt gemakkelijk uiteen in brokken van ongeveer 5-15 cm. Ook na het verhogen van het vochtgehalte van de klei bleef het brokkelig.

Volgens de categorisering van de Schematiseringshandleiding Grasbekledingen (RWS 2019) is de klei van de Lauwersmeerdijk en van Holwerd gemiddeld 'schrale klei' (zie Figuur 3.4), maar zeer dicht tegen stevige klei. Volgens de indeling uit TAW (1996) is het klei van categorie 3 (weinig erosiebestendig), omdat de plasticiteitsindex nog net onder 18% ligt en de vloeigrens kleiner is dan 45% (volgens RWS (2021) is het categorie 'overig'). De klei van Blija is stevige klei volgens RWS (2019) en van categorie 1 volgens TAW (1996). De verschillende monsters hebben echter een behoorlijke spreiding, waarbij er van de Lauwersmeerdijk en Holwerd ook monsters zijn die in de categorie stevige klei vallen. De spreiding wordt enerzijds veroorzaakt door de beperkte nauwkeurigheid waarmee een laboratorium deze eigenschappen kan bepalen en anderzijds door variatie in de kleilaag. Gezien het feit dat de monsters relatief dicht bij elkaar zijn genomen (binnen enkele tientallen meters) en de uiteindelijke standduur van de kleilaag bepaald wordt door de erosie van orde 5 à 15 m³/m, hetgeen groot is ten opzichte van de geanalyseerde monsters, is het de verwachting dat het gemiddelde een betere indicatie is voor de relevante klei-eigenschappen dan de extremen in de metingen.

Verder geldt voor deze klei-soorten (criteria voor stevige klei uit Schematiseringshandleiding Grasbekledingen (RWS 2021)):

- Het is afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal.
- Het zandgehalte (> 63 mm) is gemiddeld minder dan 40% voor de klei van alle drie de locaties (zie Tabel 3-1).
- Er is minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode, namelijk gemiddeld 1 à 3%.
- Er is minder dan 25% gewichtsverlies bij de HCl-behandeling, namelijk een kalkgehalte van gemiddeld 5 à 8%
- Er zijn geen significante bijmengingen van puin, grind en dergelijke geconstateerd



Figuur 3.4 Plasticiteitsindex als functie van de vloeigrens met grenzen volgens RWS (2019)

Tijdens de proevenseries K2 en K3 is vastgesteld dat de erosiebestendigheid van de klei uit Holwerd verrassend groot is. Daarom zijn na afloop van de proeven nog twee extra monsters

uit het restprofiel in de Deltagoot genomen om de klei-eigenschappen te bepalen. De resultaten daarvan zijn opgenomen in Tabel 7-4 van Bijlage D.2. Het blijkt dat de klei-eigenschappen niet wezenlijk afwijken van de 6 monsters die eerder op de dijk bij Holwerd waren genomen uit (Tabel 7-2 van Bijlage D.2).

Verder zijn er proctorproeven uitgevoerd om de mate van verdichting vast te stellen. De klei die in de Deltagoot is toegepast, is in ongeroerde staat door middel van kleiblokken in de goot aangebracht. Dat betekent dat de mate van verdichting in de Deltagoot exact gelijk is aan die van de Waddenzeedijken waar deze klei van afkomstig is.

De verdichting van de klei in de Deltagoot is bepaald door middel van vijfpunts proctorproeven, zie Bijlage D. De resultaten zijn:

- klei van de Lauwersmeerdijk: 89% proctordichtheid
- klei van de dijk bij Holwerd: 94% proctordichtheid
- klei van de dijk bij Blija: 97% proctordichtheid



Figuur 3.5 Aankomst kleiblokken met gras bij de Deltagoot en gras maaien



Figuur 3.6 De kleiblokken zijn regelmatig gewogen om het vochtgehalte te monitoren

Eenmaal bij de Deltagoot aangekomen zijn de kleiblokken met gras bijna dagelijks een half uur besproeid met water, behalve op regenachtige dagen en in het weekend. Hierdoor is het vochtgehalte van de klei geleidelijk toegenomen. Dit is gemonitord door de kleiblokken af en toe te wegen, zie Figuur 3.6.

Tussen de proeven en na afloop van de proeven van serie K1 is het vochtgehalte van de klei gemeten. Tussen de proeven is dat gebeurd door een klein monster uit het erosiegat te nemen en na afloop van de proeven is een 40 cm diep monster genomen. Het vochtgehalte bleek niet

afhankelijk te zijn van de diepte van het kleimonster en bovendien was de spreiding vrij klein, zie Bijlage D. Gemiddeld was het vochtgehalte 30% (9 metingen op 3 momenten met standaarddeviatie van 0,9%). Daarom is het vochtgehalte van de klei van Holwerd en Blija alleen na afloop van de proevenseries bepaald. Deze bleek respectievelijk 23% en 29% te zijn.

Verder is het gras gemaaid op een lengte van 4 à 6 cm (zie Figuur 3.5).



Figuur 3.7 Uitgepakt kleiblok met gras van Lauwersmeerdijk (ongebruikt reserveblok)



Figuur 3.8 Beoordeling van de graszode van de Lauwersmeerdijk

Vlak voor de start van de proeven is de kwaliteit van het gras beoordeeld op het reserveblok dat uiteindelijk niet nodig bleek te zijn voor het opbouwen van de modelopstelling. Zoals te zien is in Figuur 3.8 was de samenhang van een uitgestoken grasplag van de Lauwersmeerdijk goed. Samen met de overige kenmerken van het gras is geconcludeerd dat er sprake is van een gesloten zode.

De laag met de grootste dichtheid van worteltjes is ongeveer 10 à 15 cm dik. Bij de Lauwersmeerdijk reiken de langste wortels tot een diepte van 40 à 50 cm; bij Holwerd reiken de

langste wortels tot een diepte van ongeveer 30 cm en bij Blija komen er nauwelijks wortels dieper dan de leeflaag van 20 cm.

Het gras op de klei van Blija bleek veel kwetsbaarder te zijn dan die van de Lauwersmeerdijk en Holwerd. Hoewel het aanvankelijk mooi dicht en dik gras was, ging het in de modelopstelling vrij snel in kwaliteit achteruit.

Ook van het gras van Blija en Holwerd is een grasplag gestoken om te zien hoeveel kracht er voor nodig is om deze uit elkaar te trekken. Bij die van Holwerd was het nodig om met zijn tweeën keihard te trekken, maar die van Blija was met beduidend minder kracht uit elkaar te trekken. Dit duidt op een minder sterk wortelstelsel.

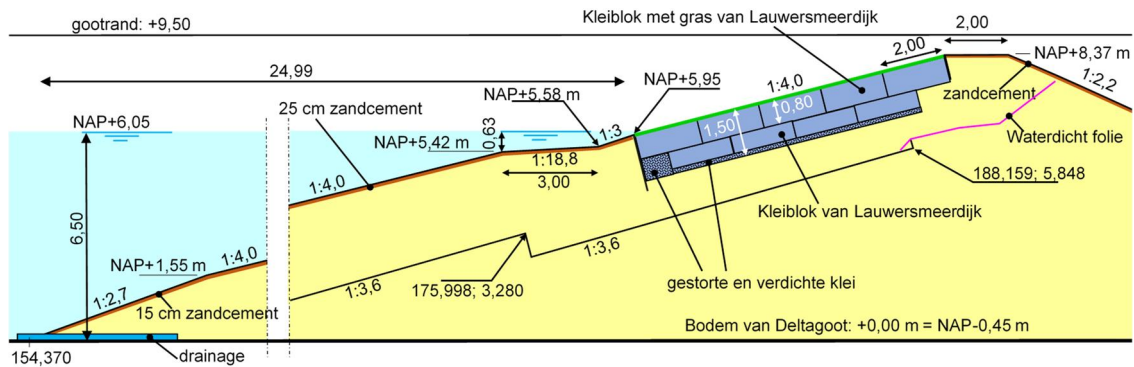
Het gras van Blija was een bijna monocultuur van Engels Raaigras, terwijl er in die van Holwerd veel meer soorten voorkwamen. Een grotere soortenrijkdom maakt de grasbekleding minder kwetsbaar voor bijzondere omstandigheden, zoals het verblijf in de hal van de Deltagoot. Vlak voor de start van de proeven zag het gras van Blija er minder sterk uit dan toen het nog buiten stond, zie Figuur 3.9.



Figuur 3.9 Gras van Blija vlak voor de start van de proeven.

Het doel van de proeven is om vast te stellen op welke hoogte de overgang van de asfaltbekleding (talud 1:3 boven de stormvloedberm) kan overgaan naar gras (talud 1:4). De inschatting is dat dit lager kan dan de NAP+7,0 m die aangehouden is in Figuur 4.1. Gekozen is om de overgang op NAP+5,95 m te leggen.

Het dwarsprofiel dat in de Deltagoot voor de eerste modelopstelling is ingebouwd, is weergegeven in Figuur 4.2 (zie ook Fig. E-1 voor de maten ten opzichte van de bodem in de Deltagoot). 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 4.2 Verticale langsdoorsnede van de eerste modelopstelling (K1) in de Deltagoot (zie ook Figuur 4.3)

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.

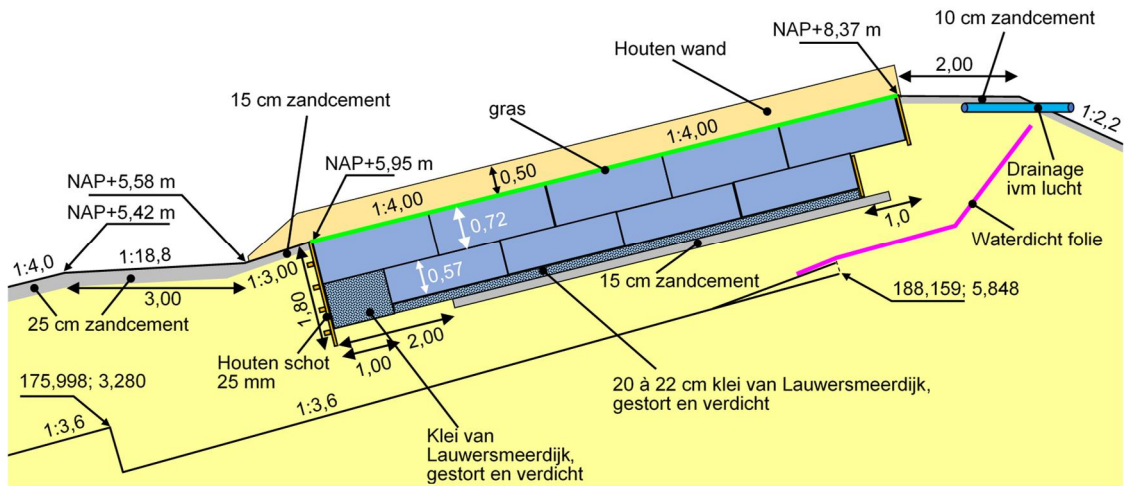
In Figuur 4.2 is te zien dat het ondertalud niet helemaal tot de bodem is doorgetrokken met een taludhelling van 1:4,0. Onder het niveau NAP+1,55 m is de helling wat steiler gekozen omdat dit geen invloed heeft op de erosie van het gras en de klei en zo de kosten wat gereduceerd konden worden.

De voorrand van de berm ligt op NAP+5,42 m, zoals ook weergegeven in Figuur 4.1, en de overgang van de harde bekleding naar het gras ligt op NAP+5,95 m.

De kruinhoogte is NAP+8,37 m. Dit is ongeveer de gemiddelde kruinhoogte van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat en bovendien zodanig dat er een geheel aantal kleiblokken op het boventalud past.

Een detail van de doorsnede is gegeven in Figuur 4.3 (zie ook Fig. E-2).

De blokken klei met gras (zie hoofdstuk 3) hebben een oppervlak van $2 \times 2 \text{ m}^2$ 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 4.4. 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 4.5.



Figuur 4.3 Verticale langsdoorsnede van de modelopstelling in de Deltagoot ter plaatse van de berm en het boventalud

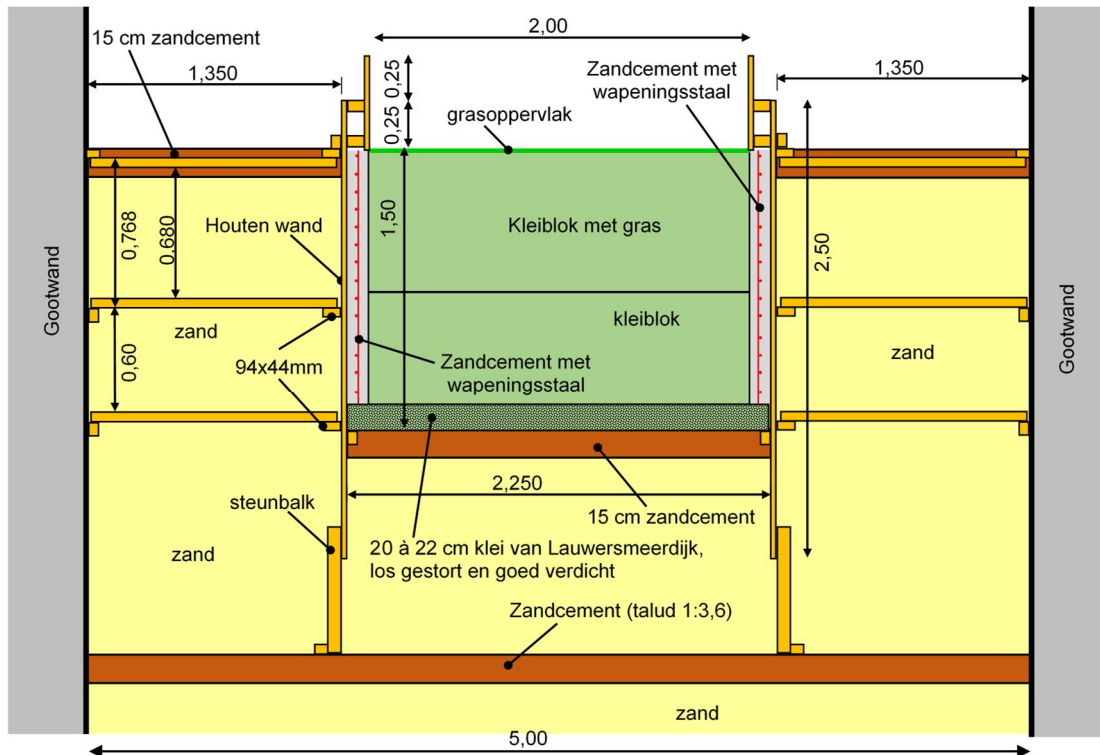


Figuur 4.4 Boventalud van de (toekomstige) Lauwersmeerdijk in de Deltagoot

Onder een groot deel van de kleilaag is een vloer van 15 cm zandcement aangebracht. Dit maakt 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 kan afwateren richting het zand.

Onder de kruin is waterdicht folie in het zand aangebracht om te zorgen dat er tijdens langdurige proeven geen water richting het binnentalud gaat stromen, dat ongewenste instabiliteit van het relatief steile binnentalud kan veroorzaken.

In Bijlage B.1 is een serie foto's te zien die toont hoe de modelopstelling stap voor stap is opgebouwd.



Figuur 4.5 Dwarsdoorsnede van de modelopstelling

Voor het opbouwen van de kleilaag is begonnen met een laagje geroerde en verdichte klei met een dikte van ongeveer 20 à 22 cm (Fig. B-10 in Bijlage B.1). De kleilaag op de Lauwersmeerdijk was niet dik genoeg om de gehele kleilaagdikte met kleiblokken te realiseren. De bovenste blokken (met gras) waren 70 à 75 cm dik en de onderste (waar de graslaag van 15 cm vanaf was gehaald) waren 56 à 61 cm dik. Verder is aan het begin van het talud, ter hoogte van de onderste rij kleiblokken, geroerde en verdichte klei aangebracht met een laagdikte van 75 cm over een lengte van 1 m (zie Fig. B-11). Vervolgens zijn de kleiblokken zonder gras op het talud gezet (onderste laag kleiblokken), zie Fig. B-13 t/m Fig. B-16. Tenslotte zijn de kleiblokken met gras daarop gezet (Fig. B-17 t/m Fig. B-20).

Steeds zijn de blokken klei in de Deltagoot als volgt geplaatst (zie foto's in bijlage B.1):

- Het kleiblok is langs het talud naar beneden opgeschoven, zodat de spleet met het lager op het talud liggende blok zo klein mogelijk is.
- Met een lier op een frame is de stalen onderplaat er deels onder uitgetrokken (Fig. B-13)
- De onderste zijmalhelft is eruit getrokken (Fig. B-14)
- Het blok is weer opgeschoven om de spleet aan de onderzijde dicht te drukken door de onderplaat er helemaal onderuit te trekken met de lier
- De bovenste zijmalhelft is eruit getrokken
- Er is zandcement met wapening naast de kleiblokken aangebracht om de spleet tussen de klei en de houten wand op te vullen (Fig. B-15, Fig. B-19 en Fig. B-20).

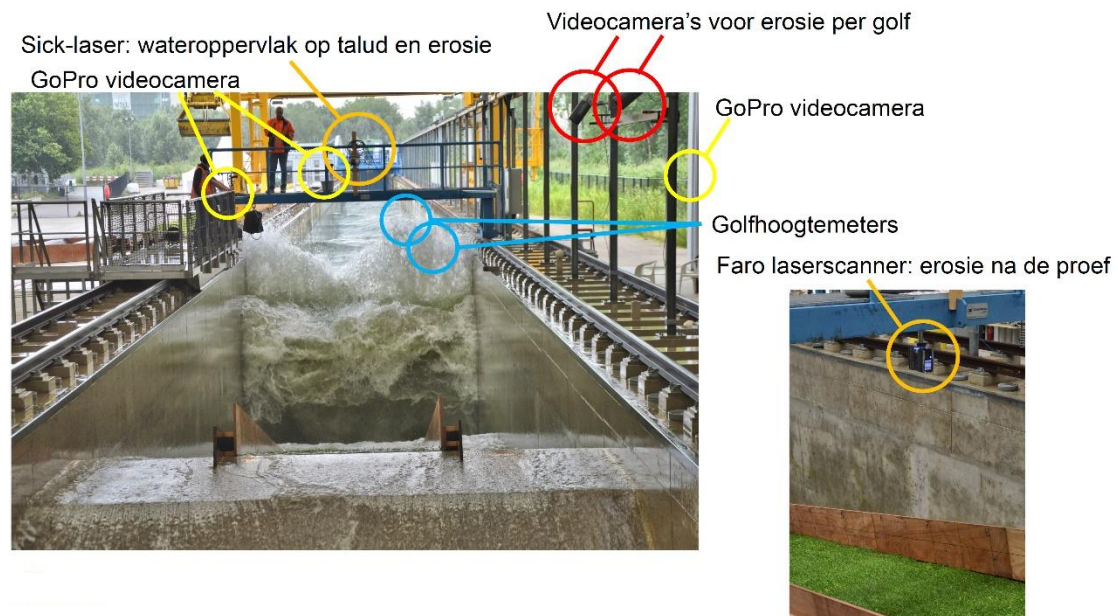
Op deze wijze is een bijna naadloze kleilaag met gras aangebracht.

Als laatste zijn de kruin en het binnentalud afgewerkt met zandcement.

Er zijn diverse camera's en een laser opgesteld om de waterbeweging en erosie tijdens de proeven vast te leggen, zie Figuur 4.6:

- Op de brug over de goot is een Sick-laser geplaatst voor het meten van de waterbeweging op het buitentalud en het volgen van de erosie tijdens de proeven. De bij dit onderzoek aangesloten universiteiten (Delft en Twente) gaan de resultaten van de Sick-laser gebruiken voor een nadere analyse. De coördinaten van de locatie waren: $(X, Y, Z) = (171,0; 2,50; 11,48)$ (m), X in m t.o.v. het golfschot, Y in m t.o.v. de gootwand aan de meetcabinezijde en Z de hoogte t.o.v. de gootbodem.
- Boven de gootrand aan de meetcabinezijde zijn twee camera's opgesteld voor het volgen van de erosie tijdens de proeven. De bij dit onderzoek aangesloten universiteiten (Delft en Twente) gaan de resultaten van deze camera's gebruiken om de erosie per golf te bepalen. De coördinaten van de twee camera's waren: $(X, Y, Z) = (183,0; 0,00; 12,18)$ en $(187,0; 0,00; 12,18)$ (m)
- Er zijn drie GoPro camera's opgesteld, namelijk eentje op het observatieplatform (bordes), eentje op de blauwe brug naast de Sick-laser en eentje aan het ophoogschot.

Na elke proef is met de Faro-laser het taludoppervlak gescand om het erosieoppervlak nauwkeurig te kunnen bepalen.



Figuur 4.6 Instrumentatie

4.3 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. 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 het opgevuld met geroerde klei van Holwerd, zoals te zien is in Figuur 4.7.



Figuur 4.9 Afwerking van modelopstelling K2



Figuur 4.10 Klei van Holwerd heeft weinig structuurvorming

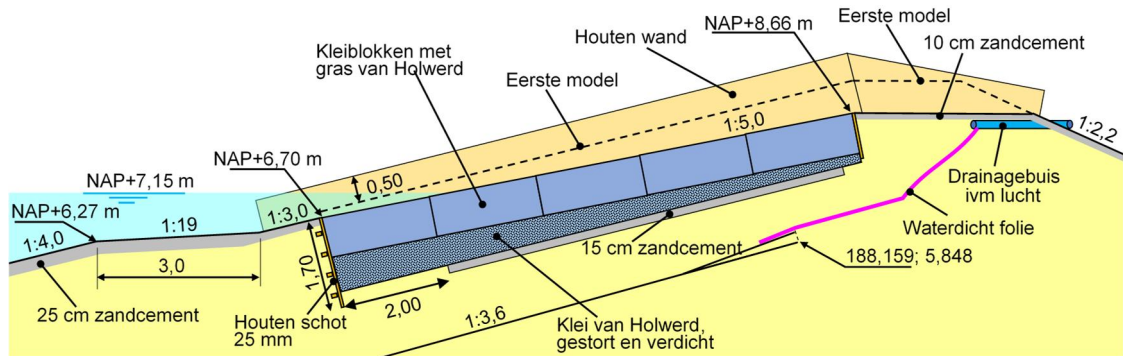


Figuur 4.11 Versterking van het houten schot door middel van een balk en verbinding naar de gootwand met latten

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 4.12.

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 is te zien in Figuur 4.13.



Figuur 4.12 Modelopstelling K3



Figuur 4.13 Erosie van de kleibekleding met gras voor aanvang van proef K3-01

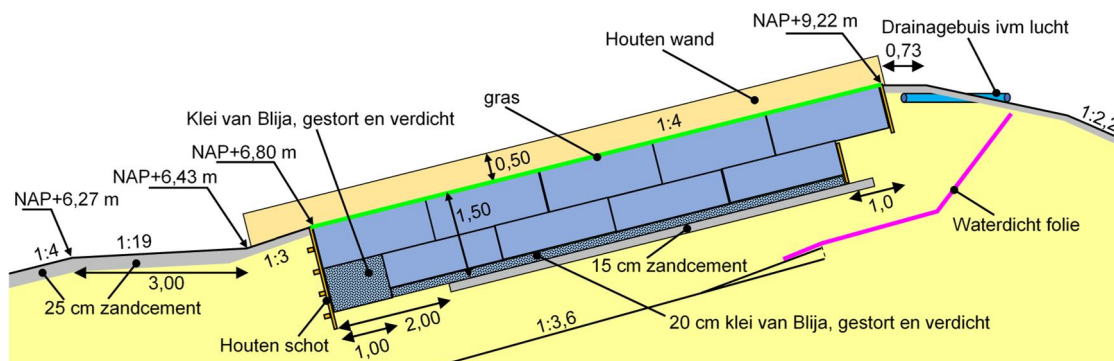


Figuur 4.14 Verhoging van de kruin na proef K3_03

Tijdens proevenserie K3 is de waterstand steeds verder verhoogd. Dat heeft als nadeel dat de golfoverslag toeneemt en daarmee de golfneerloop wordt gereduceerd. Dat laatste zou enig effect kunnen hebben op de erosie en daarom is na K3_03 de kruin iets verhoogd, zoals te zien is in Figuur 4.14.

4.4 Modelopstelling K4

De vierde modelopstelling is identiek aan de eerste, behalve dat er kleiblokken met gras van de dijk bij Blija zijn gebruikt. De modelopstelling is getekend in Figuur 4.15, waarbij de hoogtematen zijn afgestemd op de situatie van de dijk Koehool-Lauwersmeer. De berm was ten opzichte van de modelopstelling K1 identiek in de Deltagoot, maar omdat de bodem van de Deltagoot nu gedefinieerd is als NAP+0,40 m, zijn alle hoogtematen in de figuur anders dan in Figuur 4.2.



Figuur 4.15 Modelopstelling voor proevenserie K4 (zie ook Fig. E-7)

Tijdens het inbouwen van de kleiblokken was opgevallen dat de klei van Blija duidelijk anders is dan de klei van de Lauwersmeerdijk en Holwerd. Deze klei is enerzijds vetter (en dat is goed voor de erosiebestendigheid) maar anderzijds veel sterker gestructureerd (ongunstig voor de erosiebestendigheid). De klei bestaat uit een opeenstapeling van kleine brokken van 10-200 cm³ en er is veel activiteit van wormen, zie Figuur 4.16.

De graskwaliteit was ook duidelijk minder dan van de Lauwersmeerdijk en Holwerd.



Figuur 4.16 Sterkere structurering van de klei en grote activiteit van wormen

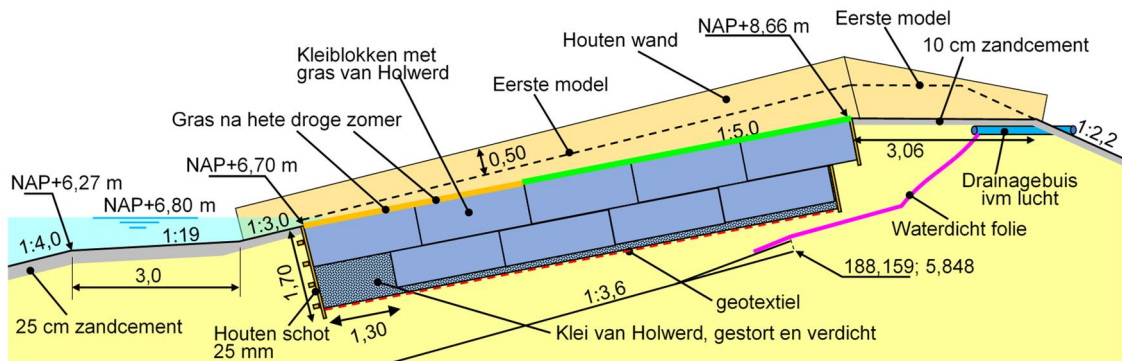
Door de wijze van inbouwen van de klei is het denkbaar dat de klei langs de wanden in de modelopstelling wat zwakker is geworden dan in het midden van het model. Dit speelde met name bij de klei van Blija, omdat deze heel brokkelig was van structuur. De zijkant van de kleiblokken hebben even zonder steun 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. Daarna 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.

4.5 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 talud 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 4.17.

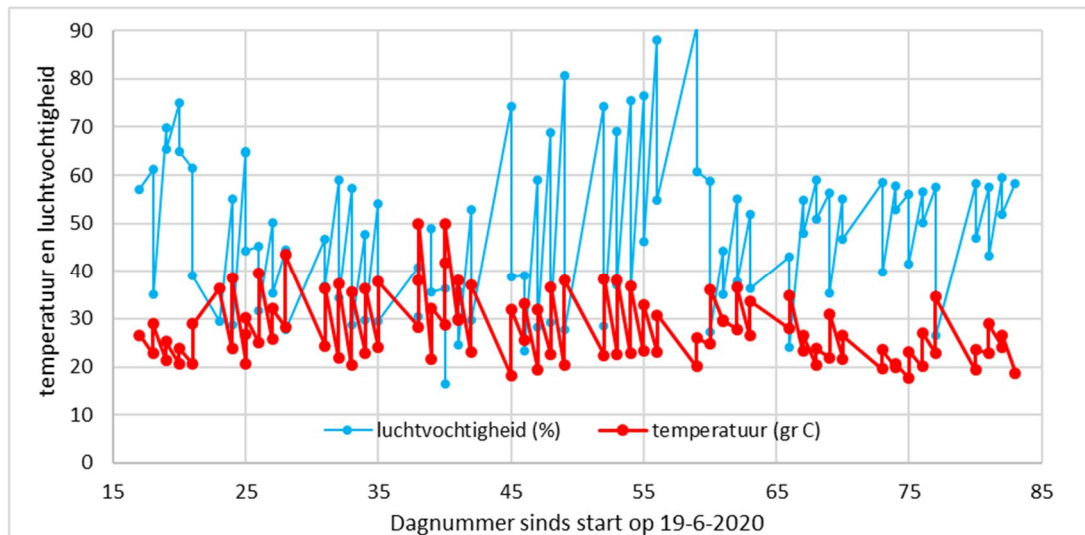


Figuur 4.17 Modelopstelling van proevenserie K5



Figuur 4.18 Tent met twee kleiblokken met gras voor het simuleren van een hete droge zomer

De eerste twee kleiblokken boven de overgang in de modelopstelling hebben voor het inbouwen in de Deltagoot gedurende 83 dagen (van 6 juni tot 10 september) in een tent gestaan zonder water, zie Figuur 4.18. Door middel van verwarming is er voor gezorgd dat de temperatuur relatief hoog was en met een luchtontvochtiger is de luchtvochtigheid verlaagd. Vanaf dag 17 is tweemaal daags de temperatuur en de luchtvochtigheid gemeten. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 4.19. Verder waren er drie ventilatoren in de tent opgesteld.



Figuur 4.19 Temperatuur (°C) en luchtvochtigheid (%) in de tent bij de simulatie van een hete droge zomer voor twee kleiblokken met gras.

In het verloop van de temperatuur en luchtvochtigheid is duidelijk het dag-nachtritme te onderkennen. Aan het begin van de dag is de luchtvochtigheid hoog en de temperatuur relatief laag en aan het eind van de dag is dit andersom, zoals normaal is in Nederlandse zomers. De temperatuur was doorgaans 20° à 25° in de ochtend en in de middag vaak 30° à 40°. In Figuur 4.20 is te zien dat het gras hier flink onder te lijden had, maar door het grote kleiblok had het nog lang de beschikking over een beetje water. Een groot deel van het oppervlak is verdord, maar enkele plekjejes bleven toch nog groen.



Figuur 4.20 Het gras tijdens de hete droge zomer (links na 39 dagen rechts na 59 dagen)

Na de periode in de tent zijn de kleiblokken weer buiten gezet in de periode van 10 september tot 30 november. In die tijd heeft het de hoeveelheid regen gekregen die normaal is in het najaar. Zo is gesimuleerd dat de superstorm niet direct na de hete zomer optreedt, maar pas in de winter.

Ondanks dat het gras weer ruim twee maanden water heeft gekregen, was duidelijk te zien dat de hete zomer zijn tol had geëist. In Figuur 4.21 zijn de kleiblokken met gras te zien na het inbouwen in de modelopstelling.



Figuur 4.23 Aanvangssituatie voor proevenserie K6

5 Proevenprogramma

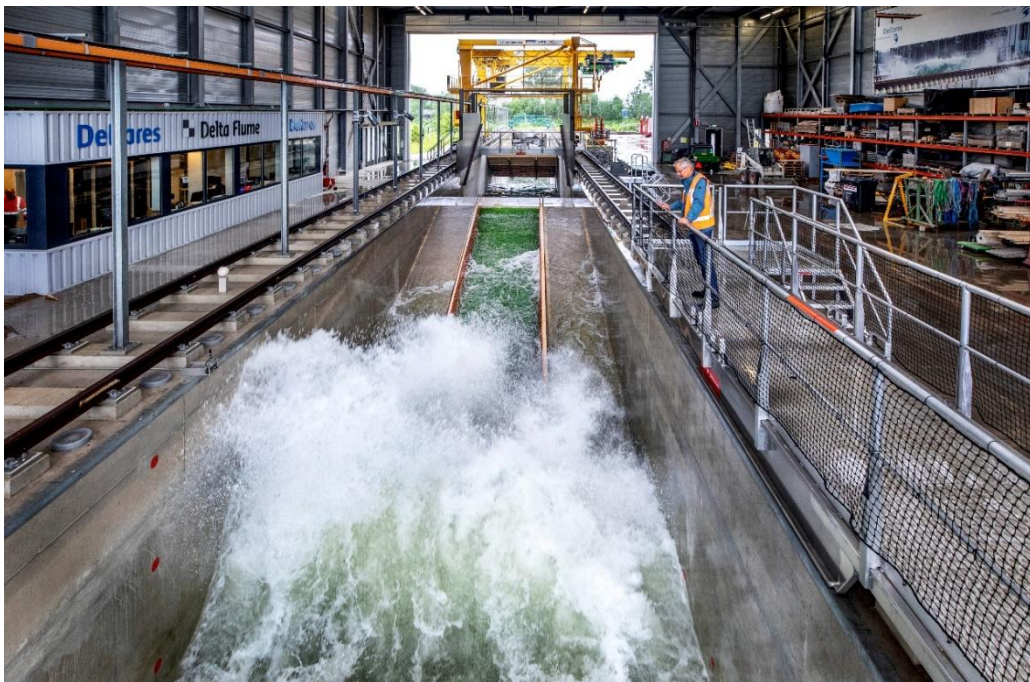
5.1 Algemeen

De opgebouwde dijk met de kleibekleding met gras op het boventalud is in de Deltagoot langdurig belast met een zware golfbelasting. Deze golfbelasting is vaak onderbroken na ongeveer 0,5 à 2 uur om de opgetreden erosie te kunnen meten met de Faro-laser, want tijdens de proeven was de waterbeweging op het talud zo wild, dat het nauwelijks mogelijk was om de hoeveelheid erosie te zien. Soms was tussen de golven een groot deel van het kleioppervlak te zien, maar bleef er nog veel water achter in de diepste delen van de kuil. De migratie van de grasrand van de kuil, waar het aansluit op het nog niet aangetaste gras hoger op het talud, was wel goed te zien en gaf een indicatie om te beoordelen of het zinvol was de proef weer eens te onderbreken voor een meting van het erosieprofiel. Hierdoor is een gedetailleerd beeld verkregen van de ontwikkeling van de erosie in de tijd. De duur van elke proef is afhankelijk van de mate van erosie.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met ongeveer dezelfde golfcondities, namelijk het maximaal haalbare in de Deltagoot:

- Significante golfhoogte: $H_{m0} = 2,0$ m
- Golfperiode bij de piek van het spectrum: $T_p = 5,5$ s
- Golfsteilheid: $s_{op} = 0,042$

De karakteristieken van de golfcondities van de uitgevoerde proeven zijn te vinden in Tabel 5-1 t/m Tabel 5-6. Het betreft in deze tabellen steeds de inkomende golfhoogte en golfperiode.



Figuur 5.1 Proef K1_04

Elke proevenserie, behalve K3 en K6, is gestart met een korte proef om het gras plat te krijgen. Dat was nodig om een goede referentiescan met de Faro-laser te maken.

5.2 Proevenserie K1

Het proevenprogramma is gestart met proeven bij een waterstand van NAP+6,05 m, zie Tabel 5-1. Na proef K1_03 was er nog zo weinig erosie opgetreden dat besloten is om een kunstmatige schade van 20x20 cm² en 5 cm diep aan te brengen (zie Fig. B-26 in Bijlage B). Na proef K1_04 is dit vergroot naar 40x40 cm² en 15 cm diep omdat de erosie nog steeds vrij traag ging (zie Fig. B-30).

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K1_01	6,050	1,964	5,493	0,042	0,25	-	-
K1_02	6,050	2,037	5,553	0,042	0,91	Fig. B-25	-
K1_03	6,050	2,025	5,547	0,042	1,05	-	Fig. A-1
Kunstmatig gat van ca 20x20x5 cm gemaakt (Fig. B-26)							
K1_04	6,050	1,996	5,501	0,042	2,00	Fig. B-28	Fig. A-1
Kunstmatig gat vergroot naar ca 40x40x15 cm (Fig. B-30)							
K1_05	6,050	2,012	5,505	0,043	1,62	Fig. B-32	Fig. A-2
K1_06*	6,200	1,943	5,632	0,039	0,30	-	-
K1_07	6,200	1,948	5,501	0,041	1,57	Fig. B-34	Fig. A-2
K1_08	6,200	2,003	5,557	0,042	0,75	Fig. B-36	Fig. A-3
K1_09	6,200	2,030	5,571	0,042	0,67	Fig. B-38	Fig. A-3
K1_10	6,200	2,016	5,549	0,042	0,56	Fig. B-40	Fig. A-4
K1_11	6,200	1,996	5,553	0,041	0,76	Fig. B-44	Fig. A-4
K1_12	6,200	1,941	5,528	0,041	1,29	Fig. B-47	Fig. A-5
K1_13	6,200	1,967	5,529	0,041	1,15	Fig. B-51	Fig. A-5
K1_14	6,200	1,947	5,534	0,041	1,17	Fig. B-53	Fig. A-6

Tabel 5-1 Proevenprogramma serie K1 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef (*: Na proef K1_06 is direct doorgegaan met proef K1_07, zonder tussentijds de erosie te meten of te fotograferen)

Vanaf proef K1_06 is de waterstand 15 cm hoger gemaakt om de erosiesnelheid nog verder te vergroten. Hiermee is het doel bereikt om in een periode van 8 à 15 uur een doorbraak door de 1,5 m dikke kleilaag te bereiken.

Proef K1_06 is onbedoeld gestopt na 18 minuten en 12 seconden, omdat het golfschot uitviel. Na deze proef is de erosie niet opgemeten en is direct verder gegaan met proef K1_07. Na proef K1_07 is het gras kunstmatig verzwakt door middel van een verticuteermachine. Hiermee zijn 2 mm brede gleuven in het gras gemaakt met een diepte van ca 4 cm en onderlinge afstand van 3,3 cm, evenwijdig aan de gootas.

In de tabel is ook een verwijzing naar de proefresultaten in de bijlage gegeven. De meest relevante gemeten dwarsprofielen van de erosie zijn gegeven in bijlage A.5. De proefresultaten worden in paragraaf 6.2 toegelicht.

Tijdens het uitvoeren van de proeven was reeds geconstateerd dat de golven wat moeite hadden om de onderste rij kleiblokken te eroderen. Daarom zijn na proef K1_09 enkele kleine gleufjes van 20x2 cm² en 3 cm diep met een spade in het kleioppervlak aangebracht om het erosieproces in de onderste rij kleiblokken op gang te brengen. Omdat dit toch weinig effect

had, zijn na proef K1_10 gaatjes van 15x15 cm² en 4 cm diep gemaakt (Fig. B-42) en na proef K1_11 gaatjes van 15x15 cm² en 6 cm diep.

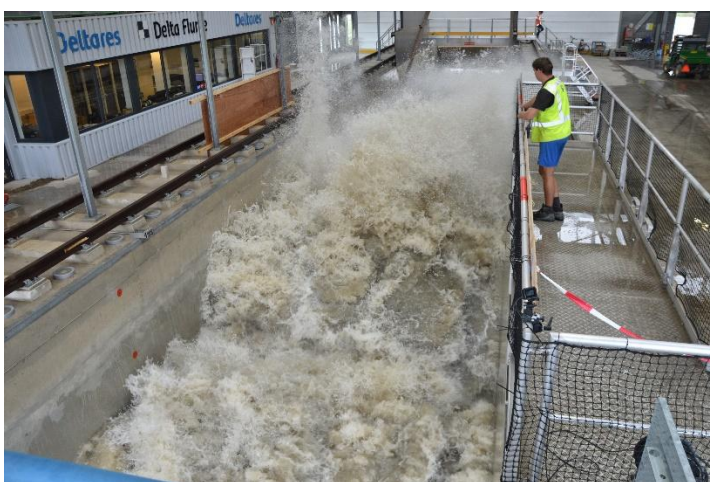
5.3 Proevenserie K2

Het proevenprogramma van serie K2 is te zien in Tabel 5-2. Direct na de ingolfproef van ruim 10 minuten om het gras plat te krijgen, is er een kunstmatige schade aangebracht van 20 x 20 cm² met een diepte van 5 cm, zie Figuur 5.2. De onderrand van deze schade zat op 10 cm van de overgang tussen de harde bekleding grasbekleding. Het gras is tevens evenwijdig aan de gootas geverticuteerd (op stand 3 met een diepte van 4 cm). Omdat er vervolgens na 2 uur golven in proef K2_02 nog steeds niet veel erosie was opgetreden, is de kunstmatige schade vergroot naar 40 x 40 cm² met een diepte van 15 cm.



Figuur 5.2 Kunstmatige schade aan de grasbekleding (links na K2_01; rechts na K2_02)

De waterstand is na proef K2_03 verhoogd naar NAP+6,55 m om de hydraulische belasting op het gras te vergroten. Na proef K2_05 bleek de erosiesnelheid nog steeds heel beperkt te zijn en is besloten om het gras op het onderste kleiblok ook in dwarsrichting, haaks op de gootas, te verticuteren. Er was wel een spleet ontstaan tussen het eerste en het tweede kleiblok. Deze spleet was aanwezig omdat deze twee kleiblokken niet goed tegen elkaar aangedrukt waren tijdens het bouwen van de modelopstelling. Zo'n spleet leidt tot een versnelde erosie (model-effect). Daarom is deze spleet gevuld met klei, zie Figuur 5.4.



Figuur 5.3 Tijdens proef K2_08

Na proef K2_06 is de waterstand wederom verhoogd voor het vergroten van de hydraulische belasting, namelijk naar NAP +6,65 m. Maar ook dat leverde onvoldoende erosiesnelheid op en daarom is na proef K2_07a een kunstmatige klif gegraven in de klei, zie Figuur 5.5 t/m Figuur

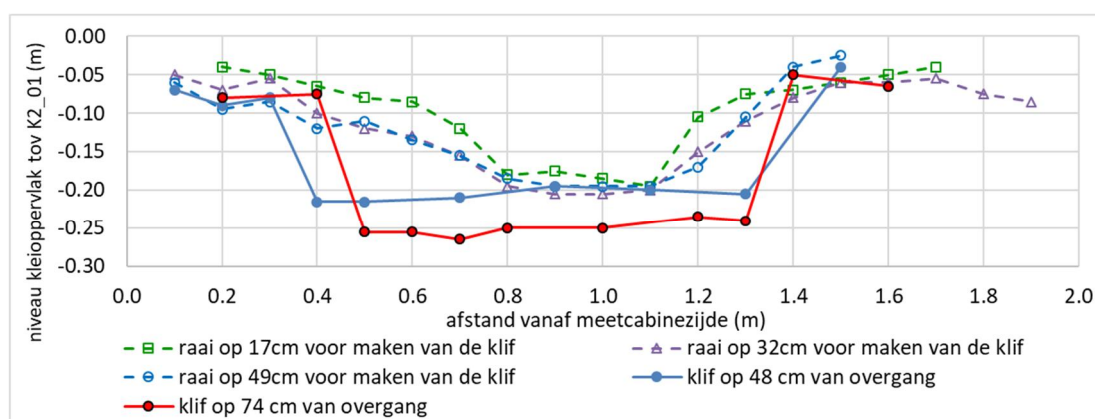
5.7. Toen ook dat de erosie niet deed versnellen, is besloten om proevenserie K2 te beëindigen en de berm te verlagen (proevenserie K3).



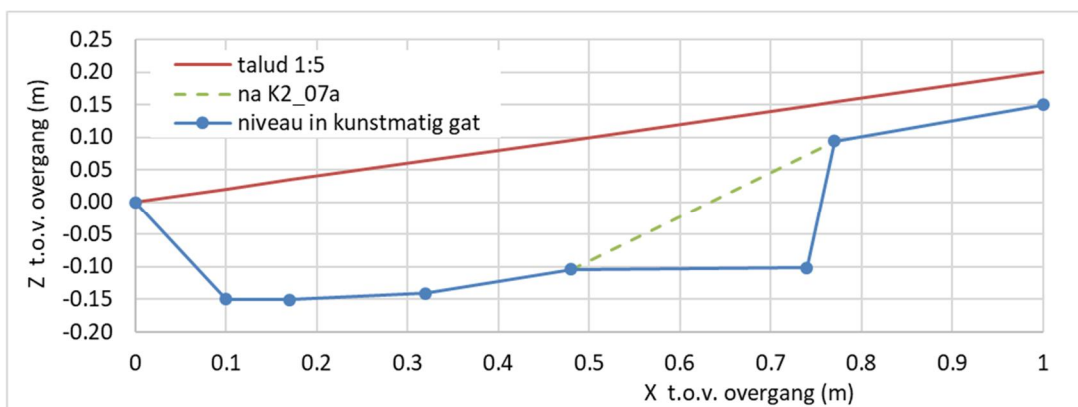
Figuur 5.4 Reparatie van de spleet tussen de eerste twee kleiblokken na proef K2_05

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K2_01	6,40	1,96	5,49	0,042	0,17	-	-
Kunstmatig gat van ca 20x20x5 cm gemaakt en geverticuteerd in langsrichting							
K2_02	6,40	2,00	5,49	0,042	2,00	Fig. B-64	Fig. A-7
Kunstmatig gat vergroot naar ca 40x40x15 cm							
K2_03	6,40	2,00	5,51	0,042	2,00	Fig. B-65	Fig. A-7
K2_04	6,55	1,92	5,49	0,041	2,00	Fig. B-66	Fig. A-8
K2_05	6,55	1,96	5,49	0,042	2,00	Fig. B-67	Fig. A-8
Gras van onderste kleiblok geverticuteerd in dwarsrichting							
K2_06	6,55	2,02	5,53	0,042	1,08	Fig. B-68	Fig. A-9
K2_07	6,65	1,92	5,50	0,041	2,31	Fig. B-70	Fig. A-9
Kunstmatige klif gemaakt, zie Figuur 5.5 t/m Figuur 5.7							
K2_08	6,65	1,93	5,48	0,041	2,00	Fig. B-71	Fig. A-10

Tabel 5-2 Proevenprogramma serie K2 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef



Figuur 5.5 Vorm van het erosieprofiel en de kunstmatig gemaakte klif na proef K2_07a (verticale doorsnede haaks op de gootas)



Figuur 5.6 Vorm van het erosieprofiel en de kunstmatig gemaakte klif na proef K2_07a (verticale doorsnede parallel aan de gootas)



Figuur 5.7 Aanbrengen van een kunstmatige klif na K2_07 in de kleibekleding om de erosie te stimuleren.

5.4 Proevenserie K3

Proevenserie K3 is een voortzetting van de proeven uit de serie K2. Omdat de erosiesnelheid tijdens de serie K2 bijzonder gering was, is besloten om de berm te verlagen, zodat de hydraulische belasting op de klei groter wordt. De proevenserie is dus gestart met een situatie waarbij er al enige erosie aanwezig was, zie Figuur 5.8.

Het proevenprogramma is te zien in Tabel 5-3. Het proevenprogramma is gestart met ruim 2 uur golven in proef K3_01a. Daarna is vastgesteld dat het kleioppervlak bijzonder dicht is, wellicht door de langdurige golfbelasting (gecompacteerd). Daarom is met een troffel het kleioppervlak in de kuil een beetje losgemaakt, zie Figuur 5.9. Verder was er sprake van een modeffect op de aansluiting van het eerste kleiblok en het tweede kleiblok. Hier was sprake van een spleet, die een versnelde erosie te zien gaf.

Tijdens proef K3_02 en K3_02a was de erosiesnelheid nog steeds vrij laag. Daarom is besloten weer een kunstmatige klif in de klei te graven. De vorm van de klif is te zien in Figuur 5.10 en Figuur 5.11. Daarna kwam de erosie wel op gang, maar duurde het uiteindelijk toch nog totaal 22 uur om een erosie van 80 à 90 cm diepte te krijgen.



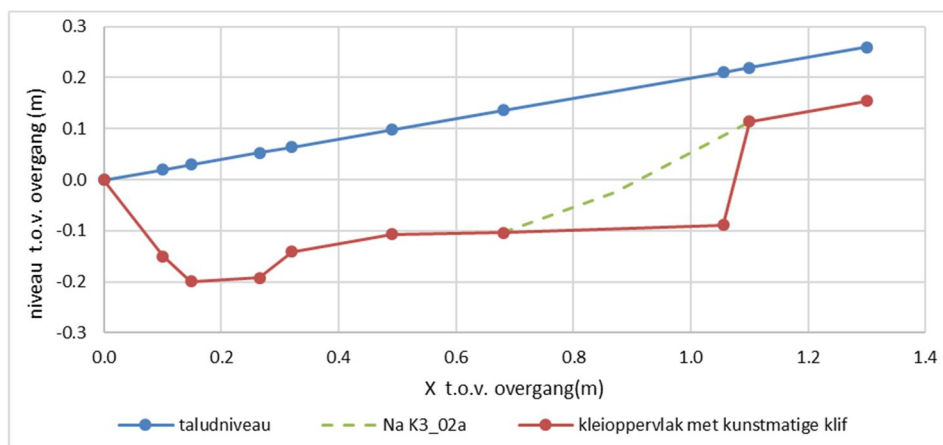
Figuur 5.8 Erosie aan het eind van de K2-serie waarmee gestart is in de K3 serie



Figuur 5.9 Kleioppervlak is plaatselijk wat ruw gemaakt met een troffel na proef K3_01

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K3_01	6,65	1,93	5,47	0,041	2,05	Fig. B-75	Fig. A-10
onderste deel van erosiekuil los gemaakt met troffel (zie Figuur 5.9), rivierklei in spleet tussen kleiblok 1 en 2 gedaan							
K3_02	6,75	1,90	5,55	0,040	1,60	Fig. B-76	Fig. A-11
Erosiegat vergroot: terras doorgetrokken zodat het gat tot ~1.05m doorgaat en steil klif gemaakt, max diepte ~34cm (zie Figuur 5.10 en Figuur 5.11)							
K3_03	6,75	1,95	5,52	0,041	3,11	Fig. B-77 & Fig. B-78	Fig. A-11
K3_04	6,75	1,94	5,51	0,041	3,83	Fig. B-79	Fig. A-12
K3_05	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	Fig. B-80 & Fig. B-81	Fig. A-12
K3_06	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	Fig. B-82	Fig. A-13
K3_07	6,75	1,95	5,51	0,041	2,00	Fig. B-83	Fig. A-13
K3_08	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	Fig. B-84	Fig. A-14
K3_09	6,75	1,95	5,52	0,041	1,46	Fig. B-85	Fig. A-14
K3_10	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	Fig. B-86	Fig. A-15

Tabel 5-3 Proevenprogramma serie K3 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef



Figuur 5.10 Vorm van de kunstmatige klif die voor proef K3_03 is aangebracht.

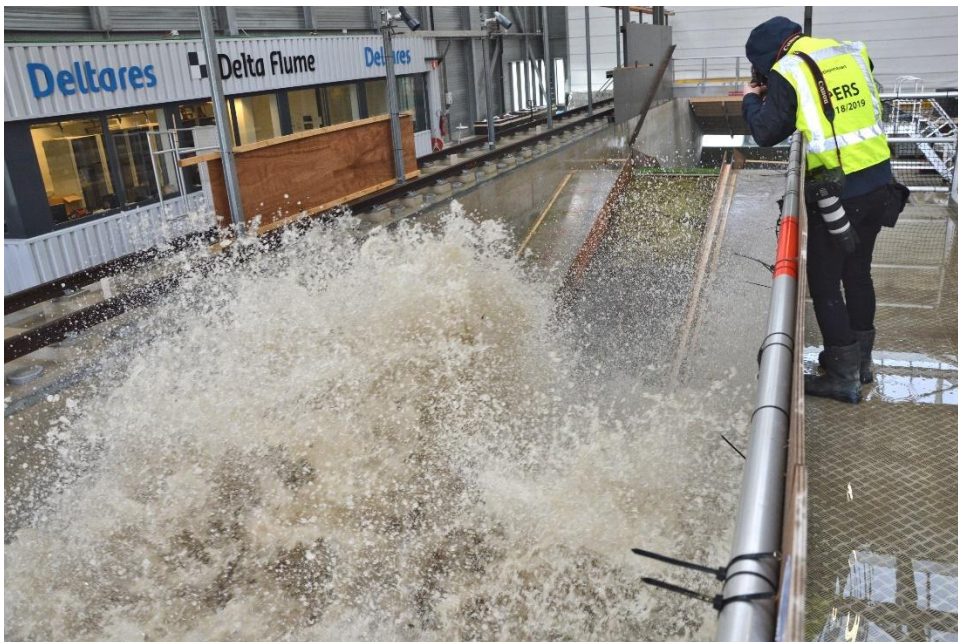


Figuur 5.11 Het aanbrengen van een kunstmatige klif voor proef K3_03

5.5 Proevenserie K4

Proevenserie K4 is uitgevoerd met de klei van Blija met het dwarsprofiel zoals die van de Lauwersmeerdijk. Het doel van deze proef was het vaststellen van de invloed van de kwaliteit van de klei op de erosiesnelheid.

Het proevenprogramma is weergegeven in Tabel 5-4. Zelfs zonder het aanbrengen van een kunstmatige schade in het gras, kwam de erosie al direct op gang. De kwaliteit van het gras was bij aanvang een stuk minder dan die van de voorgaande proeven en bovendien was de erosiebestendigheid van de klei minder. Daarom is na proef K4_02 de waterstand een flink stuk verlaagd naar een niveau op 30 cm onder de overgang (NAP+6,10 m). Die verlaagde waterstand ligt naar verwachting dichterbij de buurt van het ontwerppunt van de dijk Koehool-Lauwersmeer.



Figuur 5.12 De pers aanwezig tijdens proef K4_10

Vanaf proef K4_06 is de waterstand weer iets verhoogd tot 5 cm onder de overgang, omdat er niet veel erosie meer bijkwam.

Na proef K4_06 bleek er een modeffect te zijn ontstaan, namelijk een spleet tussen de eerste twee kleiblokken. Kennelijk waren de twee kleiblokken onvoldoende tegen elkaar aan geschoven tijdens het opbouwen van de modelopstelling, waardoor hier sprake was van een spleet die snel verder erodeerde tijdens de golfaanval. Gezien het feit dat dit een modeffect is, is de spleet opgevuld met klei.

Na proef K4_07 is de waterstand weer wat verhoogd tot 5 cm onder de overgang.

Tijdens proef K4_08, die uitgevoerd is met deze relatief hoge waterstand, was er plotseling bij de overgang tussen het onderste kleiblok en het zandcement aan de zijkant een groot gat ontstaan in de kleilaag met een diepte van ongeveer 80 cm, zie Figuur 5.13. Kennelijk was hier sprake van lokaal wat erosiegevoeligere klei. Omdat dit gat de verdere voortgang van de proeven dreigde te beïnvloeden, is besloten het op te vullen met klei tot een niveau van 35 cm onder het oorspronkelijke grasoppervlak.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K4_01	6,65	1,92	5,55	0,040	0,35	Fig. B-91	-
K4_02	6,50	2,10	5,52	0,044	0,52	Fig. B-92	Fig. A-16
K4_03	6,10	2,04	5,55	0,042	0,84	Fig. B-93	Fig. A-16
K4_04	6,10	2,04	5,53	0,043	0,96	Fig. B-94	Fig. A-17
K4_05	6,10	2,01	5,50	0,043	1,56	Fig. B-95	Fig. A-17
K4_06	6,35	2,03	5,52	0,043	1,99	-	Fig. A-18
K4_07	6,35	2,06	5,53	0,043	2,00	Fig. B-96	Fig. A-18
K4_08	6,50	2,04	5,55	0,043	1,17	Fig. B-97 & Fig. B-98	Fig. A-19
Diep erosiegat bij de overgang (zie Figuur 5.13) is opgevuld met klei tot 35 cm onder het oorspronkelijke taludoppervlak							
K4_09	6,35	2,06	5,52	0,043	1,00	Fig. B-99 & Fig. B-100	Fig. A-19
K4_10	5,90	2,03	5,55	0,042	0,86	Fig. B-101 & Fig. B-102	Fig. A-20
K4_11	5,90	2,01	5,53	0,042	1,10	Fig. B-103 & Fig. B-104	Fig. A-20
K4_12	6,35	1,67	5,03	0,042	0,50	Fig. B-105	Fig. A-21
K4_13	6,35	2,05	5,54	0,043	1,01	Fig. B-107	Fig. A-21
K4_14	6,35	2,06	5,53	0,043	1,00	Fig. B-108 & Fig. B-109	Fig. A-22
K4_15	6,35	2,06	5,53	0,043	2,00	Fig. B-110 & Fig. B-111	Fig. A-22
K4_16	6,35	2,01	5,50	0,042	2,00	Fig. B-112 & Fig. B-113	Fig. A-23
K4_17	6,35	2,08	5,51	0,044	1,70	Fig. B-115	Fig. A-23

Tabel 5-4 Proevenprogramma serie K4 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef

Specifiek voor het meten van de invloed van de waterstand is tijdens proef K4_10 en K4_11 de waterstand flink verlaagd naar 50 cm onder de overgang (NAP+5,90 m). Proef K4_12 is uitgevoerd met een kleinere golfhoogte (H_{m0} = 1,67 m) om de invloed hiervan te meten.



Figuur 5.13 Diep erosiegat dat plotseling ontstaan was tijdens proef K4_08 bij een relatief hoge waterstand (links) en de situatie na het deels opvullen van dit gat (rechts)

5.6 Proevenserie K5

Voor de vijfde proevenserie is weer een kleibekleding met gras van Holwerd toegepast met een taludhelling van 1:5. In vergelijking tot proevenserie K3 zijn twee kleiblokken met gras gebruikt

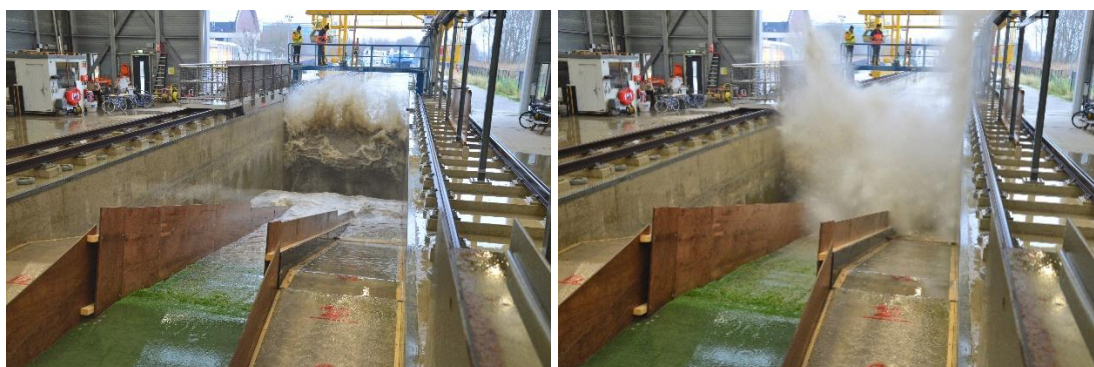
die een zeer hete en droge zomer hebben doorgemaakt. Het proevenprogramma is te zien in Tabel 5-5.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K5_01	6,40	1,98	5,51	0,042	0,33	Fig. B-122	-
Gras geverticuteerd evenwijdig aan gootas en kunstmatig gat van 20x20x5 cm ³							
K5_02	6,40	2,05	5,54	0,043	2,00	Fig. B-124	Fig. A-24
Kunstmatig gat vergroot naar 40x40x15 cm ³ .							
K5_03	6,40	2,04	5,54	0,043	2,00	Fig. B-125	Fig. A-24
K5_04	6,40	2,08	5,56	0,043	1,88	Fig. B-126	Fig. A-25
K5_05	6,40	2,05	5,53	0,043	2,00	Fig. B-127	Fig. A-25
K5_06	6,40	2,05	5,54	0,043	1,00	Fig. B-128	Fig. A-26

Tabel 5-5 Proevenprogramma serie K5 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef

Na de eerste proef is een kunstmatige schade aangebracht van 20 × 20 cm² en 5 cm diep. Tevens is het gras geverticuteerd evenwijdig aan de gootas. Omdat dit nog onvoldoende erosie teweegbracht, is de kunstmatige schade na de tweede proef vergroot naar 40 × 40 cm² en 15 cm diep.

Het proevenprogramma van de serie K5 is gestopt toen er 50 cm erosie was ontstaan. Vervolgens is de berm verwijderd en is verder gegaan met proevenserie K6 met dezelfde klei en gras.



Figuur 5.14 Aanstormende golf en resulterende golfklap tijdens proef K5_03

5.7 Proevenserie K6

Proevenserie K6 is een voortzetting van serie K5, waarbij de berm is verwijderd en het ondertalud verflauwd is naar 1:5. De details van deze proevenserie zijn te vinden in Tabel 5-6.

Van tijd tot tijd is de spleet tussen het eerste en tweede kleiblok, en later ook de spleet tussen het tweede en derde kleiblok, opgevuld met klei om modeffecten te verminderen. Plaatselijk waren de kleiblokken niet perfect tegen elkaar aan gedrukt en leidde de spleet tot extra erosie.

Toen de erosie was aangekomen op de onderste laag kleiblokken, bleek dit een barrière te zijn in de voortgang van de erosie. Tijdens het inbouwen is het onvermijdelijk dat de staalplaat onder de bovenste kleiblokken worden weggetrokken, waardoor er een dunne laag versmeerde klei

ontstaat. Deze heeft een grotere erosiebestendigheid. Daar waar dit is geconstateerd, is tussen de proeven dit oppervlak wat open gemaakt door met de schep gaatjes van ongeveer 5 cm diepte aan te brengen. Dit is na K6_06 in de zone $3 < x < 4$ m en na proef K6_09 gedaan.

Na K6_09 is de kruin van de dijk wat opgehoogd met stalen bakken met zand erin. Dit is gedaan omdat bij veel golfoverslag de golfneerloop wat minder is. Vanwege de relatief hoge waterstand was het daarom nodig de kruin iets op te hogen. Het maakt voor de erosie weinig uit of dit met een verticale wand op de kruin (stalen bakken) of met een talud wordt gerealiseerd.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Figuren van erosie in bijlage	
						foto	laserscan
K6_01	5,90	1,99	5,48	0,042	1,75	Fig. B-131	-
K6_02	5,90	2,02	5,50	0,043	1,35	Fig. B-132	Fig. A-27
K6_03	6,40	1,53	4,82	0,042	1,42	Fig. B-133	Fig. A-27
K6_04	6,40	2,05	5,53	0,043	2,00	Fig. B-134 & Fig. B-135	Fig. A-28
K6_05	6,40	2,04	5,53	0,043	1,00	Fig. B-137	Fig. A-28
K6_06	6,40	2,00	5,49	0,043	2,00	Fig. B-138	Fig. A-29
K6_07	6,55	2,01	5,50	0,043	1,83	Fig. B-139	Fig. A-29
K6_08	6,65	1,97	5,50	0,042	1,50	Fig. B-140 & Fig. B-141	Fig. A-30
K6_09	6,65	1,94	5,50	0,041	1,83	Fig. B-144 & Fig. B-145	Fig. A-30
K6_10	6,65	1,95	5,49	0,041	2,00	Fig. B-147 & Fig. B-148	Fig. A-31
K6_11	6,65	2,10	5,52	0,044	2,50	Fig. B-149 & Fig. B-150	Fig. A-31
K6_12	6,65	2,07	5,50	0,044	2,00	Fig. B-152	Fig. A-32
K6_13	6,65	2,09	5,57	0,043	0,77	Fig. B-153	Fig. A-32

Tabel 5-6 Proevenprogramma serie K6 en verwijzing naar figuren van de erosie na afloop van de betreffende proef



Figuur 5.15 Golfklap tijdens proef K6_09

6 Proefresultaten

6.1 Algemeen

De proefresultaten bestaan uit de ontwikkeling van de erosie als functie van de tijd bij de opgelegde golfcondities. In de bijlage is de ontwikkeling van de erosie op drie manieren in beeld gebracht (zie ook verwijzingen in Tabel 5-1 t/m Tabel 5-6):

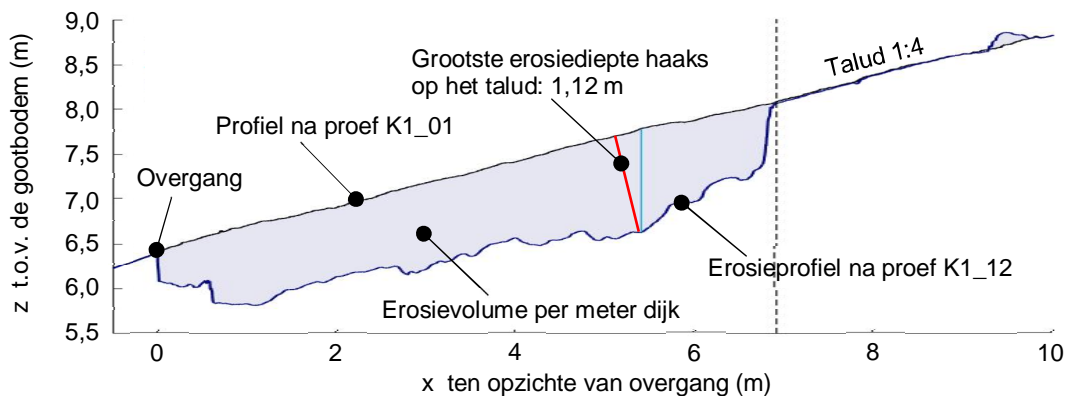
- Een reeks foto's van het gras met de erosiekuil: K1 in Bijlage B.2, K2 in Bijlage B.4, K3 in Bijlage B.6, K4 in Bijlage B.8, K5 in Bijlage B.10 en K6 in Bijlage B.12.
- De met de Faro laserscanner gemeten erosiediepte haaks op het talud: Fig. A-1 t/m Fig. A-32 in bijlage A.
- Het dwarsprofiel van de erosie ter plaatse van enkele raaien (zie Figuur 6.3): Fig. A-33 t/m Fig. A-49 in bijlage A (zie ook Figuur 6.2 voor uitleg over deze figuren).



Figuur 6.1 Golven in de Deltagoot met golfoverslag tijdens proef K2_07

Het dwarsprofiel is berekend uit de metingen met de Faro laserscanner, waarbij een kleine correctie is toegepast als in de erosiekuil wat troebel water aanwezig was. De laser kan daar niet doorheen kijken en meet daardoor een te kleine erosiediepte. Dit water is zo goed mogelijk verwijderd voor het scannen, maar bleef soms toestromen vanuit de omringende klei. Het dwarsprofiel is het gemiddelde over een strookbreedte van 10 cm.

De locatie van de strook is gekozen uit een aantal naast elkaar gelegen dwarsprofielen, waarbij de keuze is gevallen op het dwarsprofiel met een grote diepte en ver naar boven doorgegroeide erosieklijf. Dit is het meest relevante dwarsprofiel voor de numerieke berekeningen, waarbij een constant erosieprofiel over de breedte van het grastalud (lengte van de dijk) wordt aangehouden. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 6.2.



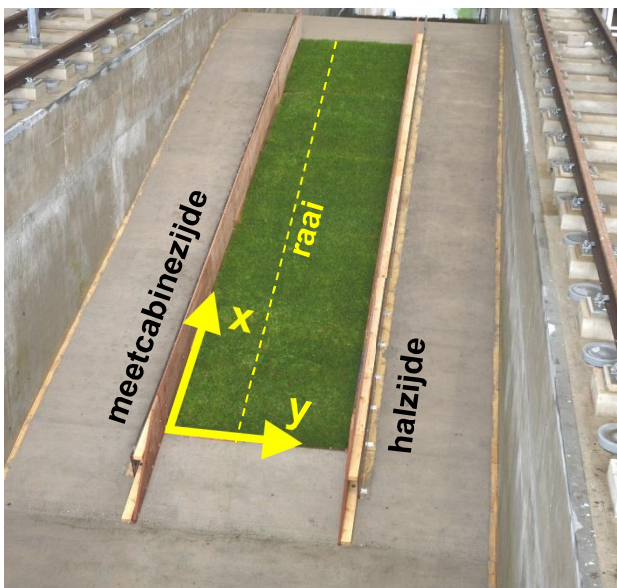
Figuur 6.2 Voorbeeld van maatgevend erosieprofiel (na proef K1_12)

Het erosievolume per meter dijk is in dit rapport gedefinieerd als het oppervlak van de erosie in zo'n dwarsprofiel, waarbij alleen het lichtblauwe oppervlak links van de stippellijn is meegeteld. Het bultje rechts van de stippellijn is een geërodeerde brok klei die op het talud is blijven liggen, dit oppervlak wordt niet meegeteld.

Door het erosievolume zo te definiëren, wordt van de aanvankelijk driedimensionale erosie gelijk vanaf het begin een tweedimensionaal proces gemaakt. Dit sluit aan op de rekenmethode die met deze proeven verder ontwikkeld gaat worden. Vanaf het moment dat de erosie halverwege het boventalud zit, was het erosieproces doorgaans in de Deltagoot ook tweedimensionaal: elke dwarsdoorsnede had ongeveer evenveel erosie. In de eerste serie was dit het geval vanaf proef K1_12.

In onderstaande paragrafen is voor elke proevenserie een beschrijving gegeven van de resultaten ten aanzien van de erosie van de kleibekleding met gras. In paragraaf 6.2 is ook ingegaan op het geconstateerde erosieproces.

De locatie van een dwarsprofiel van de erosie wordt aangegeven met de afstand y vanaf de linker zijkant van de modelsectie, zie Figuur 6.3. In het midden is $y = 1,0$ m en aan de rechterkant is $y = 2,0$ m.



Figuur 6.3 Assenstelsel op het oorspronkelijke grasoppervlak (langs het talud)

6.2 Proevenserie K1

Proevenserie K1 is uitgevoerd met de klei en het gras van de Lauwersmeerdijk met een talud van 1:4, zie Figuur 4.2. De gemeten erosie van elk van de proeven uit de proevenserie K1 is te zien in Tabel 6-1. 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 wordt als het meest representatieve erosieprofiel ($0,2 \leq y \leq 0,6$ m). Het erosievolume is het oppervlak van het erosieprofiel, dat uitgedrukt wordt in een erosievolume per meter dijk.

De raai waarin het erosievolume is berekend, is subjectief gekozen door mee te wegen dat we liever geen randeffecten meenemen of uitzonderlijke erosie bij de aansluiting tussen de verschillende kleiblokken. In de toekomst kan overwogen worden om de mediaan van de erosiediepte per x-locatie aan te houden.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosievolume (m ³ /m)
K1_01	6,050	1,964	5,493	0,042	0,25	0,25	0,00	0,00
K1_02	6,050	2,037	5,553	0,042	0,91	1,16	0,00	0,00
K1_03	6,050	2,025	5,547	0,042	1,05	2,21	0,00	0,00
K1_04	6,050	1,996	5,501	0,042	2,00	4,21	0,11	0,03
K1_05	6,050	2,012	5,505	0,043	1,62	5,83	0,24	0,13
K1_06&07	6,200	1,947	5,522	0,041	1,87	7,70	0,51	0,58
K1_08	6,200	2,003	5,557	0,042	0,75	8,44	0,73	1,23
K1_09	6,200	2,030	5,571	0,042	0,67	9,11	0,84	2,39
K1_10	6,200	2,016	5,549	0,042	0,56	9,68	0,88	3,26
K1_11	6,200	1,996	5,553	0,041	0,76	10,44	0,90	3,99
K1_12	6,200	1,941	5,528	0,041	1,29	11,73	1,12	5,21
K1_13	6,200	1,967	5,529	0,041	1,15	12,87	1,30	6,99
K1_14	6,200	1,947	5,534	0,041	1,17	14,04	1,50	8,23

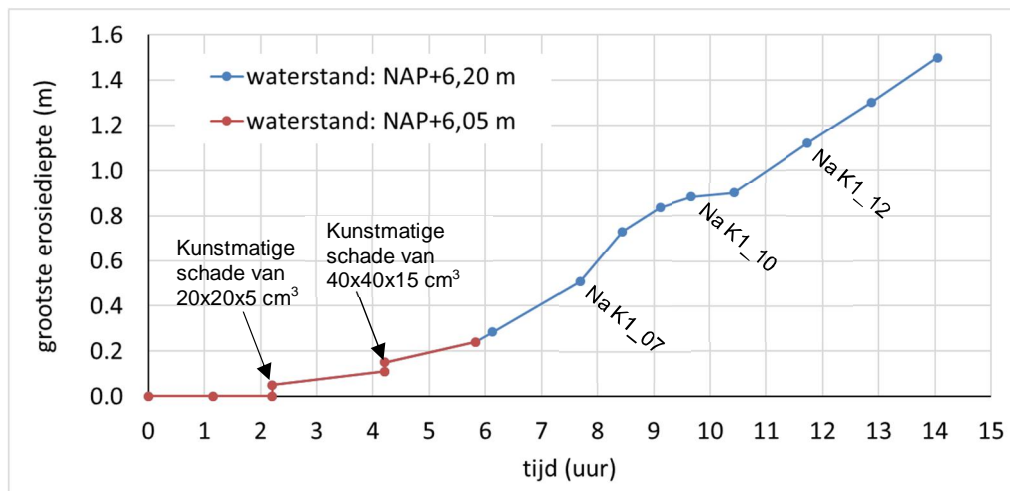
Tabel 6-1 Proefresultaten serie K1 (inkomende golfcondities)

Tijdens proef K1_01 t/m K1_03 is gekeken of onbeschadigd gras in staat is deze golfbelasting te weerstaan. Het is gebleken dat na 2,21 uur golven er nog totaal geen schade aan het gras was ontstaan. Gezien het feit dat een werkelijke dijk altijd wel ergens kleine beschadigingen in het gras heeft, is een kunstmatige schade aangebracht van 20x20 cm² en 5 cm diep, zie Figuur 5.2 en Fig. B-26 in Bijlage B2. Na 2,00 uur golven was deze schade iets dieper en groter geworden, namelijk 33x22 cm² en 11 cm diep. Hieruit blijkt dat een kleine beschadiging reeds leidt tot een voortgaande erosieontwikkeling.

Om de erosie te versnellen is vervolgens de schade kunstmatig vergroot naar 40x40 cm² en 15 cm diep (zie Figuur 5.2 en Fig. B-30), die na 1,62 uur golven tijdens proef K1_05 groeide naar een diepte van 0,42 m, zie Fig. B-32 en Fig. A-2.

Vanaf proef K1_06 is de waterstand 15 cm hoger gemaakt, waardoor er meer golfklappen in staat waren het gras en de erosiekuil te bereiken. Dit heeft ook bijgedragen aan een vergroting van de erosiesnelheid, samen met het feit dat er een flink erosiegat was ontstaan in het gras en er inmiddels een vrij groot oppervlak met kale klei bloot lag.

Het verloop van de erosiediepte als functie van de tijd is gegeven in Figuur 6.4. In deze figuur is te zien dat er eerst helemaal geen erosie is, en na het maken van kunstmatige schade de erosie geleidelijk toeneemt. De erosiesnelheid (helling van de lijn in de figuur) wordt vanaf $t = 5,9$ uur weer wat groter omdat er inmiddels een vrij groot oppervlak aan kale klei bloot lag en de waterstand 15 cm verhoogd was.



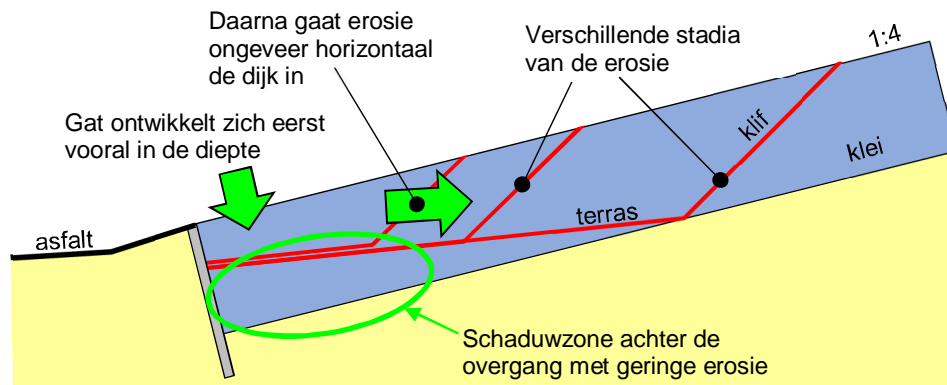
Figuur 6.4 Grootste diepte in de erosiekuil tijdens proevenserie K1 (haaks op het talud) als functie van de belastingduur

De erosiesnelheid nam rond $t = 8$ uur eerst weer toe om vervolgens bij $t = 9$ a 10 uur flink af te nemen. De erosiediepte is dan aangekomen op de laagscheiding tussen de bovenste kleiblokken met gras en de onderste kleiblokken. Kennelijk plakt de klei van de bovenste kleiblokken niet goed op de onderste kleiblokken, waardoor de laatste (onderste) klei van de bovenste kleiblokken snel wegspoelt. Vervolgens blijkt de erosiebestendigheid van de onderste kleiblokken wat groter te zijn. Dit kan een gevolg zijn van de wijze waarop de constructie is opgebouwd. Door het wegtrekken van de staalplaat tussen de onderste en bovenste kleiblokken, zal de klei in de onderste kleiblokken versmeerd geraakt zijn en daardoor erosiebestendiger zijn. Verder is er 15 cm gras met klei van de onderste kleiblokken afgehaald, maar is het denkbaar dat er ook nog wortels dieper zitten die de erosie hier beperken. Als de erosie eenmaal wat verder gevorderd is, blijkt de erosiesnelheid vanaf $t = 11$ uur weer ongeveer hetzelfde te zijn als rond $t = 7$ uur. Het lijkt alsof deze twee aspecten elkaar ongeveer compenseren, omdat de lijn van $t = 6,1$ uur tot $t = 7,7$ uur ongeveer in het verlengde ligt van de lijn van $t = 10,4$ uur tot $t = 14,0$ uur.

Tijdens het uitvoeren van de proeven was reeds geconstateerd dat de golven wat moeite hadden om de onderste rij kleiblokken te eroderen. Daarom zijn na proef K1_09 enkele kleine gleufjes van 20×2 cm² en 3 cm diep met een spade in het kleioppervlak aangebracht om het erosieproces in de onderste rij kleiblokken op gang te brengen. Omdat dit toch weinig effect had, zijn na proef K1_10 gaatjes van 15×15 cm² en 4 cm diep gemaakt (Fig. B-42) en na proef K1_11 gaatjes van 15×15 cm² en 6 cm diep.

De erosie van de onderste rij kleiblokken ving echter pas aan toen de klif voldoende ver naar boven was opgeschoven. Pas toen hadden de golven voldoende kracht om de erosie de diepte in te laten gaan. Dit zal ook te maken hebben met het feit dat er een schaduwzone achter de overgang aanwezig is waar de hydraulische belasting op de klei slechts beperkt is, zie Figuur 6.5. De dikke waterlaag die achter de overgang blijft staan tijdens de golfaanval werkt als een kussen die de hydraulische belasting opvangt.

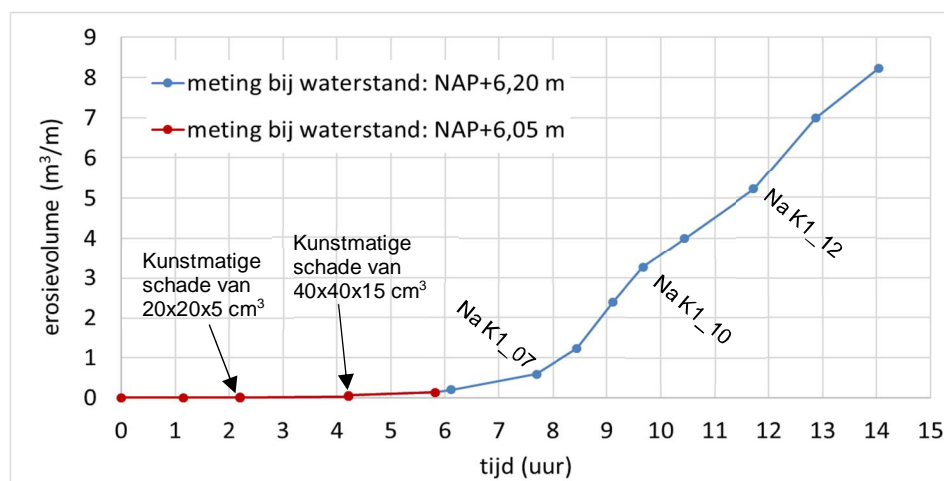
In Figuur 6.6 is de ontwikkeling van het erosievolume per meter dijk als functie van de tijd weergegeven. Dit is het oppervlak van de erosie in het maatgevende dwarsprofiel, zie Figuur 6.2. Ook hier zien we dat aanvankelijk het erosievolume gering is en pas op gang komt als er kunstmatige schade is aangebracht en de waterstand is verhoogd. Verder speelt mee dat in het beginstadium van de erosie het gras flink weerstand biedt tegen de erosie. De erosie wordt dan wel dieper (zoals te zien is in Figuur 6.4), maar het erosievolume groeit nog niet zo snel. Dat komt pas op gang rond $t = 8$ uur, als de erosie een flinke diepte heeft gekregen en het gras ondermijnd kan worden door de golven.



Figuur 6.5 Schematische weergave van het erosieproces

De vertraging van de ontwikkeling van de erosiediepte, zoals te zien rond $t = 9$ uur in Figuur 6.4, is veel minder duidelijk te zien in de ontwikkeling van het erosievolume. In Figuur 6.6 is wel te zien dat rond $t = 10$ uur de helling van de lijn iets flauwer is, maar veel minder dan in Figuur 6.4. Dit geeft aan dat de erosiekuil wel verder naar boven groeide toen de groei in de diepte even stagneerde.

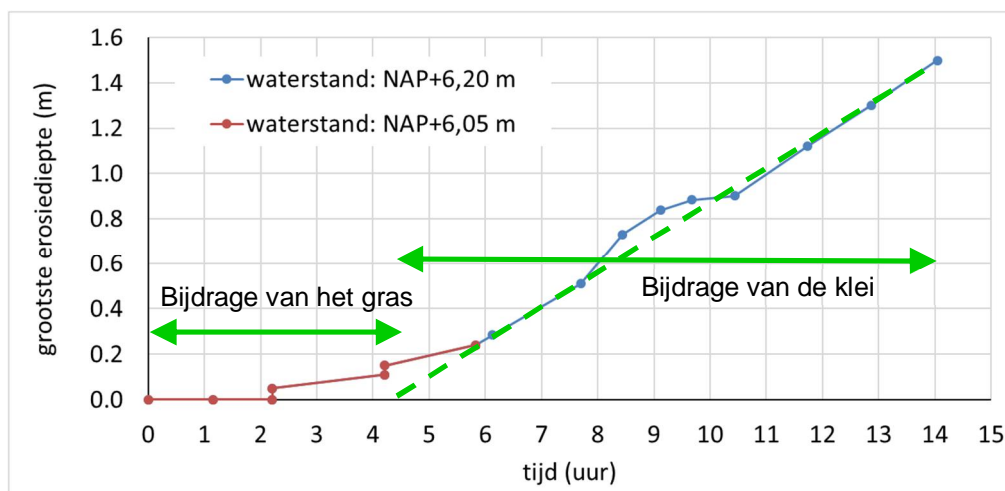
De proefresultaten laten zien dat de totale standduur van de bekleding (duur totdat de erosie door de kleilaag is) ongeveer 14 uur is.



Figuur 6.6 Erosievolume per meter dijk tijdens proevenserie K1, bepaald in het maatgevende dwarsprofiel, als functie van de belastingduur

Zoals te zien is in Figuur 6.6 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 wat lagere waterstand tijdens de eerste proeven, maar komt vooral door de invloed van het gras.



Figuur 6.7 Verloop van de erosie met bijdrage van het gras en van de klei tijdens proevenserie K1

In Figuur 6.5 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.
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 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.

Hoewel gedurende het hele erosieproces er een samenspel is van het gras en de klei, die samen weerstand bieden tegen de golven, kan op basis van Figuur 6.4 toch een inschatting gemaakt worden van de bijdrage van het gras aan de sterkte van de bekleding. In Figuur 6.7 is dezelfde figuur nogmaals getoond, maar nu met een groene stippellijn die de trend aangeeft van de erosie in de tweede helft van de proeven (2^{de} fase van erosieproces). Het snijpunt van deze lijn met de as geeft een globale inschatting van het deel van de proeven waarbij de erosie traag verloopt vanwege het aanwezige gras (1^{ste} fase van erosieproces) en het deel van de proeven met veel snellere erosie omdat over een flink oppervlak het gras weg is (kale klei) en de golven het overgebleven gras kunnen ondermijnen. Op deze wijze beschouwd is de bijdrage van het gras aan de sterkte ongeveer 4 à 5 uur en de bijdrage van de kleilaag ongeveer 9 à 10 uur.

Het einde van de bijdrage van het gras ligt ongeveer op het moment waarop de grote kunstmatige schade is aangebracht van 40x40 cm². Zonder deze kunstmatige schade was de standduur van het gras waarschijnlijk nog een stuk groter. Kijken we op dezelfde wijze naar het

verloop van het erosievolume in Figuur 6.6, dan komen we uit op een standduur van het gras van ongeveer 7 uur.

Als er op gerekend wordt dat er op een dijk altijd wel ergens wat schade aan het gras is, dan zouden de eerste 2 uur van de bijdrage van het gras eraf getrokken moeten worden.

6.3 Proevenserie K2 en K3

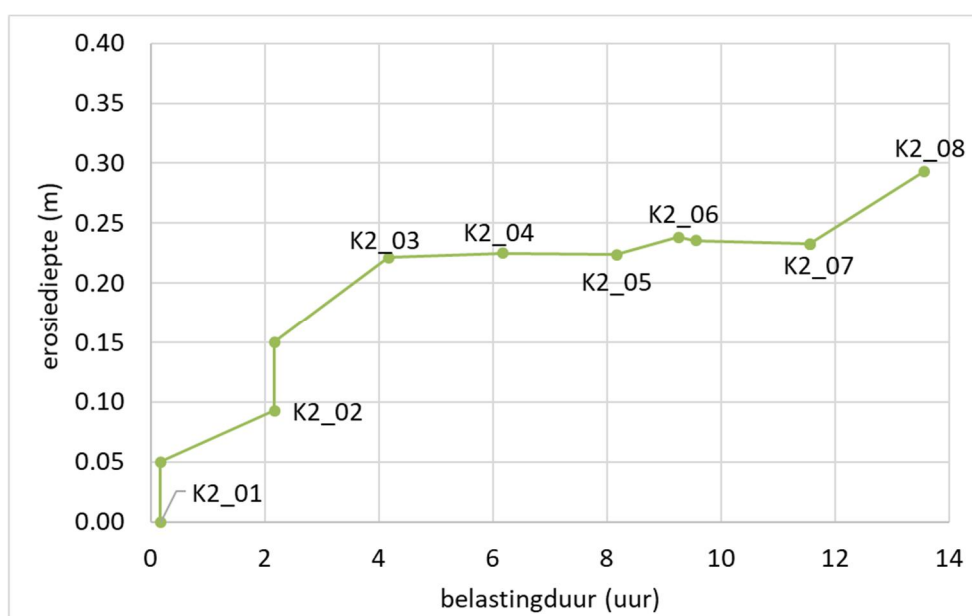
Proevenserie K2 en K3 zijn uitgevoerd met de klei en het gras van de dijk bij Holwerd met een talud van 1:5, zie Figuur 4.7.

De gemeten erosie van elk van de proeven uit de proevenserie K2 is te zien in Tabel 6-2. De waarden zijn op basis van handmetingen en lasermetingen in de raai $y = 0,6$ m en 1,2 m, omdat deze raaien representatief zijn voor het geheel.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m ³ /m)
K2_01	6,40	1,96	5,49	0,042	0,17	0,17	0,00	0,00
K2_02	6,40	2,00	5,49	0,042	2,00	2,17	0,09	0,02
K2_03	6,40	2,00	5,51	0,042	2,00	4,17	0,22	0,06
K2_04	6,55	1,92	5,49	0,041	2,00	6,17	0,22	0,07
K2_05	6,55	1,96	5,49	0,042	2,00	8,17	0,22	0,11
K2_06	6,55	2,02	5,53	0,042	1,08	9,26	0,24	0,15
K2_07	6,65	1,92	5,57	0,039	0,31	11,57	0,23	0,19
K2_08	6,65	1,93	5,50	0,041	2,00	13,57	0,29	0,30

Tabel 6-2 Proefresultaten serie K2 (inkomende golfcondities)

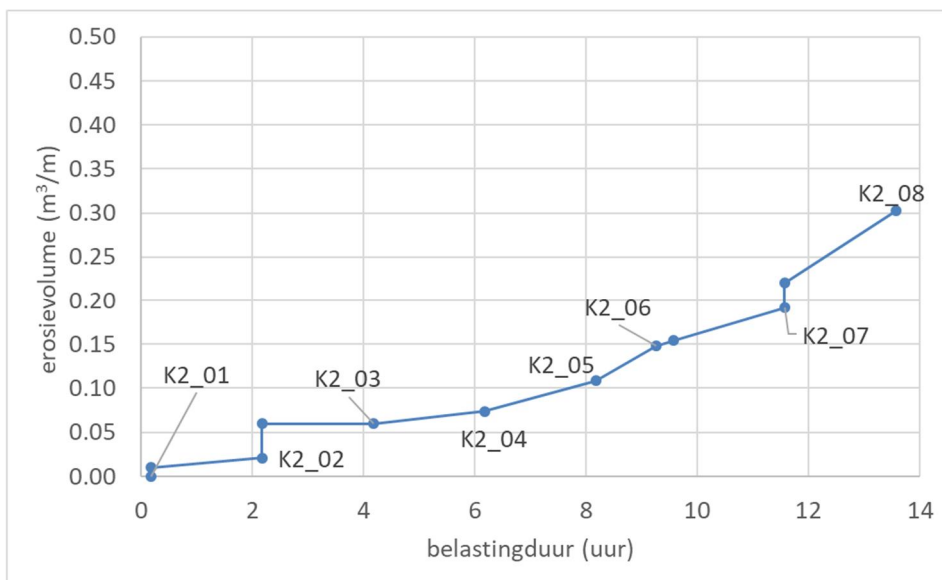
Het verloop van de grootte van de erosiediepte en erosievolume als functie van de tijd is gegeven in Figuur 6.8 en Figuur 6.9. De verticale lijnen in de figuur betreffen de momenten waarop de erosie kunstmatig vergroot is. Dit is gedaan omdat de erosie zo traag verliep.



Figuur 6.8 Erosiediepte als functie van de tijd tijdens proevenserie K2

In Figuur 6.8 is te zien dat de erosiediepte steeds 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 na deze tijdelijke toename van de erosiediepte stagneert de erosie en is in de periode $4,14 < t < 11,57$ uur nauwelijks toegenomen. In diezelfde periode is het erosievolume wel toegenomen, zoals te zien is in Figuur 6.9. Het erosiegat wordt dus niet dieper, maar beslaat wel een steeds groter oppervlak.

Na proef K2_07 is een iets kleinere erosiediepte gemeten dan na proef K2_06. Dat kan komen door klei die van elders is geërodeerd en is blijven liggen op het diepste punt van de erosiekuil.



Figuur 6.9 Gemeten erosievolume als functie van de tijd tijdens proevenserie K2

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte* (m)	Erosie-volume* (m³/m)
K3_01	6,65	1,93	5,47	0,041	2,05	2,05	0,29	0,30
K3_02	6,75	1,90	5,55	0,040	1,60	3,65	0,30	0,43
K3_03	6,75	1,95	5,52	0,041	3,11	6,76	0,39	0,52
K3_04	6,75	1,94	5,51	0,041	3,83	10,59	0,43	0,62
K3_05	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	12,59	0,44	0,77
K3_06	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	14,59	0,50	0,99
K3_07	6,75	1,95	5,51	0,041	2,00	16,59	0,65	1,40
K3_08	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	18,59	0,82	2,08
K3_09	6,75	1,95	5,52	0,041	1,46	20,05	0,86	2,60
K3_10	6,75	1,94	5,50	0,041	2,00	22,05	0,91	3,63

Tabel 6-3 Proefresultaten serie K3 (inkomende golfcondities) (* = ten opzichte van proef K2_01)

Omdat de erosie zo traag verliep, is besloten de berm te verlagen. De proeven met de verlaagde berm vallen onder proevenserie K3, waarvan de erosiemetingen te zien zijn in Tabel 6-3. In deze tabel zijn waarden van de erosiediepte en erosievolume gegeven ten opzichte van het begin van proevenserie K2 (ten opzichte van proef K2_01).

De gemeten erosiediepte is met name afkomstig van handmetingen, aangevuld met de metingen van de laserscan, waarbij de diepe erosiekuil bij de aansluiting van het eerste en tweede kleiblok is weggelaten. Zo heeft dit modeffect minder invloed op de proefresultaten.

Zodra de erosie in het tweede kleiblok kwam, was de diepe erosie bij de spleet wel een belangrijke stimulans voor de erosie in dit tweede kleiblok. Het proefresultaat zoals hier gepresenteerd is daardoor toch aan de conservatieve kant.

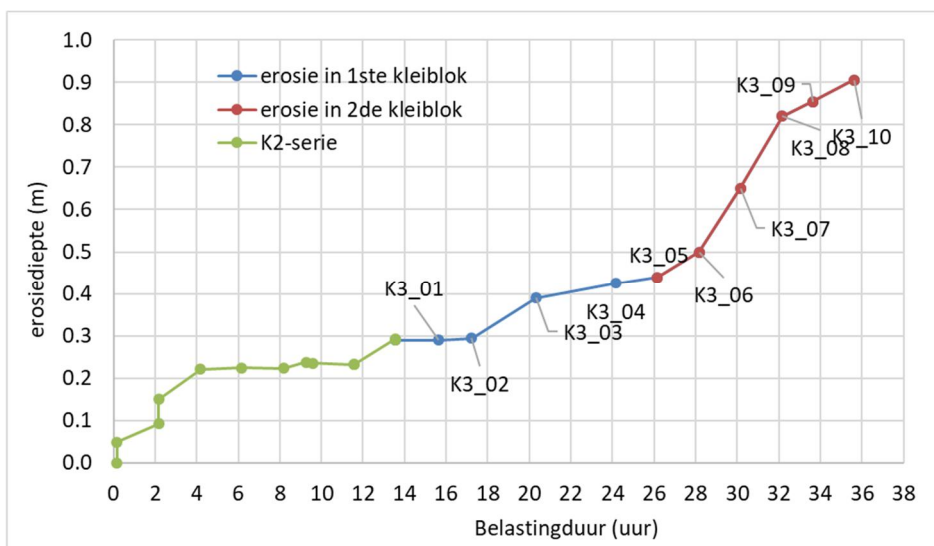
Het erosievolume is ontleend aan de meting met de laser in raai $y = 0,4$ m, omdat die representatief is geacht voor de proef en niet al te veel is beïnvloed door de erosie bij de aansluiting tussen de eerste twee kleiblokken.

Proevenserie K3 is gestart met de erosie van het eind van de K2-serie, zie Figuur 5.8. In Figuur 6.11 en in Figuur 6.12 zijn respectievelijk het verloop van de erosiediepte en erosievolume gegeven, inclusief de resultaten van de K2-serie. In Figuur 6.11 is te zien dat de toename van de diepte van de erosie in de K3-serie aanvankelijk maar weinig sneller ging dan de K2-serie (proef K3_01 t/m K3_05), totdat de erosie in het tweede kleiblok is aangekomen. Vanaf dat moment wordt de erosie beïnvloed door de niet optimale aansluiting tussen het eerste en tweede kleiblok. Daar was een diepe spleet aanwezig die de erosie sterk versneld heeft. Deze spleet is niet tussentijds gerepareerd en zorgde voor een aangrijpingspunt voor de golven. Dit leidde vanaf proef K3_06 tot een duidelijke klif in het tweede kleiblok (zie Figuur 6.10) die tot een flinke versnelling van de erosie leidde.

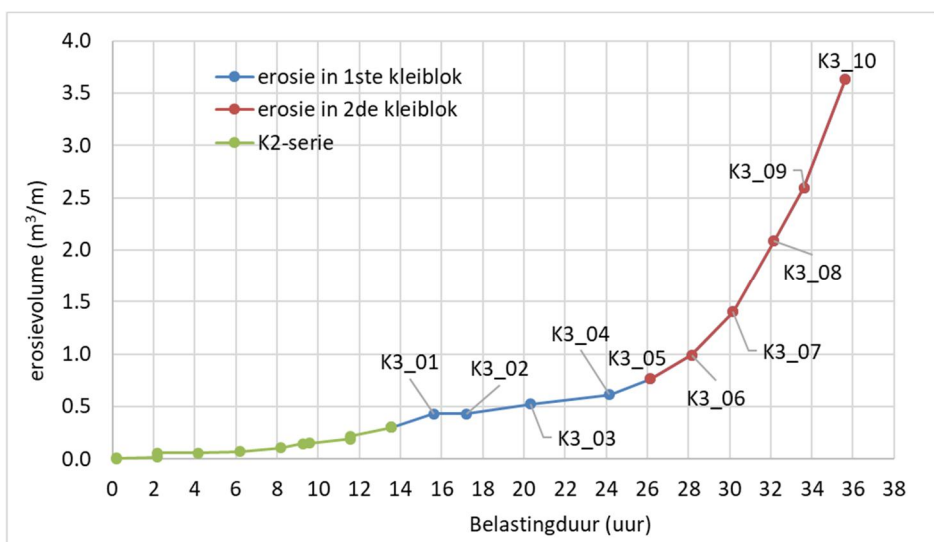
Ook in Figuur 6.12 is te zien dat er een aanzienlijke versnelling van het erosievolume optreedt vanaf proef K3_06. Zodra er een klif aanwezig is, ontstaat er erosie aan de voet van de klif die de graslaag kan ondermijnen. Hoe hoger de klif hoe zwaarder de golfklappen er tegen klappen. Tot proef K3_06 speelt met name de eerste fase van het erosieproces, waarbij de golven door de graslaag proberen heen te komen. Na proef K3_06 is er een klif en is de erosie in de tweede fase aangekomen (zie Figuur 6.5). Dit is dus na totaal 28 uur golven in serie K2 en K3 tezamen.



Figuur 6.10 Vanaf proef K3_06 is er een duidelijke klif in het tweede kleiblok.



Figuur 6.11 Ontwikkeling van de erosiediepte als functie van de belastingduur van proevenserie K2 en K3.



Figuur 6.12 Ontwikkeling van het erosievolume als functie van de belastingduur van proevenserie K2 en K3.

6.4 Proevenserie 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 gemeten erosie tijdens deze proevenserie is te vinden in Tabel 6-4.

Direct na proef K4_01 was er al enige erosie ontstaan bij de overgang (zie Figuur 6.13) 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 6.13 Erosie bij de overgang na proef K4_01

Tijdens proef K4_06 was er een lokaal erosiegat ontstaan tussen het eerste en tweede kleiblok, zie Figuur 6.14. 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 modeleffect is vervolgens gerepareerd met klei tot ca 15 cm onder het grasoppervlak (na reparatie was nog een kuil aanwezig van 15 cm diepte).



Figuur 6.14 Lokaal erosiegat na proef K2_06 ter plaatse van de aansluiting van het eerste en tweede kleiblok.

De in de tabel genoemde erosiediepte en erosievolume zijn waarden uit de raai op 0,4 m van de linker zijkant van het model ($y = 0,4$ m ten opzichte van meetcabinezijde). Deze raai is gekozen omdat deze representatief is voor het grootste deel van het bekledingsoppervlak, behalve voor de slechte plek aan de halzijde die tijdens proef K4_08 plotseling sterk ging eroderen.

Tijdens K4_08 was er een groot gat ontstaan aan de rechterzijde van het model (halzijde, $y = 1,6$ tot $2,0$ m). 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 $1,46$ m³/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.

Bij de analyse van de proefresultaten (Klein Breteler 2021) zal bekeken worden in hoeverre deze plaatselijke erosie past binnen de spreiding van de formules.

Tijdens proef K4_12 is de erosiediepte iets afgenomen ten opzichte van de vorige proef. Waarschijnlijk is er wat losse klei in de diepste erosiekuil terechtgekomen.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m ³ /m)
K4_01	6,65	1,92	5,55	0,040	0,35	0,35	0,00	0,00
K4_02	6,50	2,10	5,52	0,044	0,52	0,87	0,07	0,05
K4_03	6,10	2,04	5,55	0,042	0,84	1,71	0,09	0,08
K4_04	6,10	2,04	5,53	0,043	0,96	2,67	0,09	0,09
K4_05	6,10	2,01	5,50	0,043	1,56	4,23	0,10	0,11
K4_06	6,35	2,03	5,52	0,043	1,99	6,22	0,28	0,23
K4_07	6,35	2,06	5,53	0,043	2,00	8,22	0,31	0,39
K4_08	6,50	2,04	5,55	0,043	1,17	9,38	0,38	0,50
K4_09	6,35	2,06	5,52	0,043	1,00	10,38	0,47	0,67
K4_10	5,90	2,03	5,55	0,042	0,86	11,24	0,50	0,88
K4_11	5,90	2,01	5,53	0,042	1,10	12,34	0,60	1,07
K4_12	6,35	1,67	5,03	0,042	0,50	12,84	0,59	1,69
K4_13	6,35	2,05	5,54	0,043	1,01	13,85	0,91	2,60
K4_14	6,35	2,06	5,53	0,043	1,00	14,85	1,03	3,41
K4_15	6,35	2,06	5,53	0,043	2,00	16,85	1,12	5,17
K4_16	6,35	2,01	5,50	0,042	2,00	18,85	1,24	6,11
K4_17	6,35	2,08	5,51	0,044	1,70	20,55	1,45	8,25

Tabel 6-4 Proefresultaten serie K4 (inkomende golfcondities)



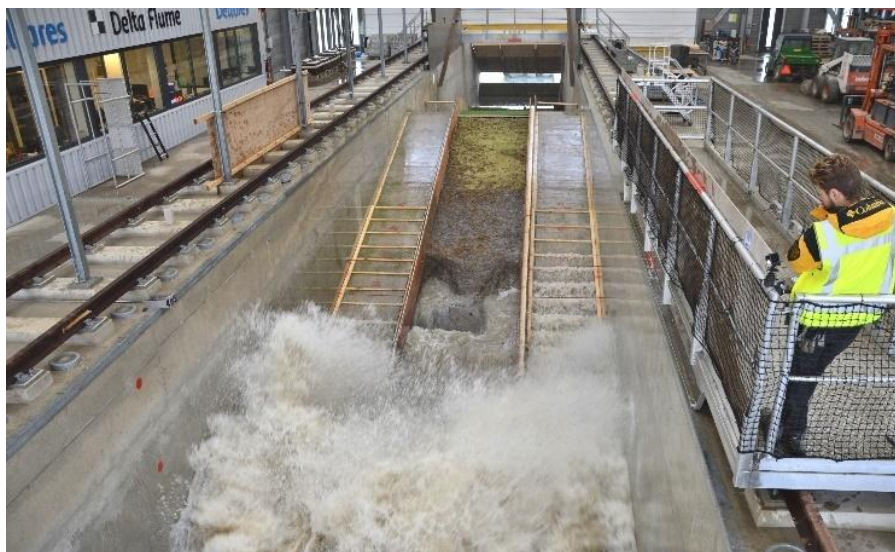
Figuur 6.15 Stukjes klei vliegen door de lucht tijdens golfaanval

In Figuur 6.17 en Figuur 6.18 is het verloop van respectievelijk de grootste erosiediepte en het erosievolume als functie van de tijd gegeven. Hierin is ook het meetpunt aan de halzijde na proef K4_08 te zien. Hieruit blijkt dat na ruim 9 uur golfbelasting de erosie ineens doorschoot naar het niveau dat normaal na ongeveer 13 uur wordt bereikt.

Na afloop van de proef K4_08 is de verdichting van de klei naast het erosiegat gemeten om te beoordelen of de klei op grond hiervan kan worden onderscheiden van de rest. Het resultaat is te zien in bijlage D.3 (locatie $x' = 2,5$ m). Het blijkt dat de proctordichtheid hier 95,5% is en dat is een vrij normale waarde. Opgemerkt moet worden dat dit monster is genomen in het tweede kleiblok vanaf de overgang, terwijl het erosiegat als eerste ontstaan is in het eerste kleiblok. Daar waar de erosie had plaatsgevonden, was het niet meer mogelijk om de dichtheid bepalen.

Net als tijdens proevenserie K1 is er een duidelijk onderscheid te zien tussen de eerste fase van het erosieproces (naar beneden gerichte erosie door het gras) en de tweede fase van het erosieproces, waarbij er een klif is gevormd en deze door de golven steeds verder naar boven migreert (zie Figuur 6.5). De omslag van de eerste naar de tweede fase vond plaats na ongeveer 12 uur, bij een erosiediepte van ongeveer 60 cm. In Figuur 6.18 is te zien dat de erosiesnelheid dan flink toeneemt, hetgeen kenmerkend is voor de tweede fase van het erosieproces (zie Figuur 6.5).

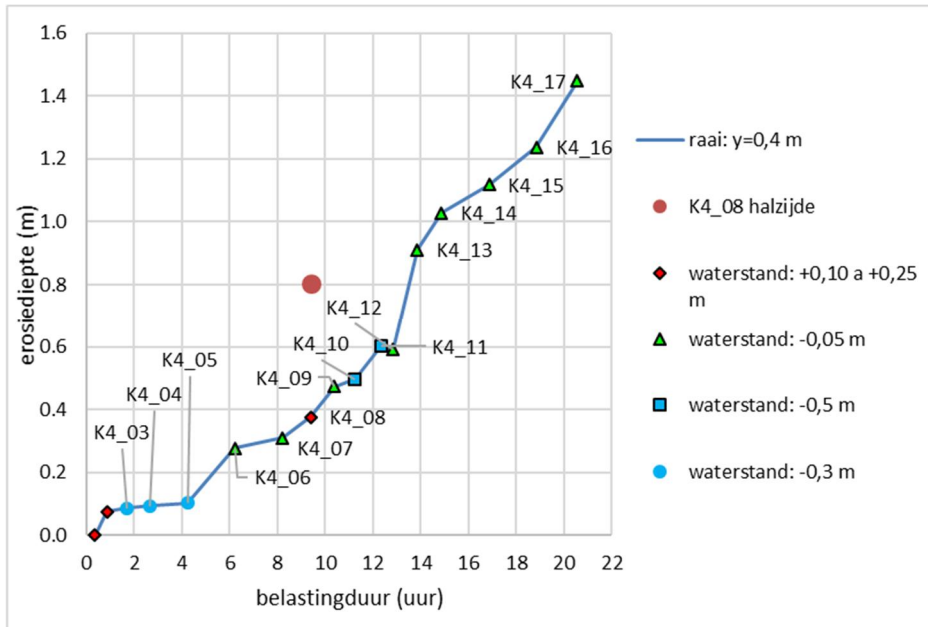
Uiteindelijk is na ruim 20 uur de kleilaag doorgebroken. In vergelijking tot proevenserie K1, toen met de zelfde geometrie de klei van de Lauwersmeerdijk is beproefd, heeft de klei van Blija het langer volgehouden. Daarbij moet wel aangetekend worden dat de waterstand gemiddeld 30 cm lager stond waardoor er minder golfklappen op de klei kwamen.



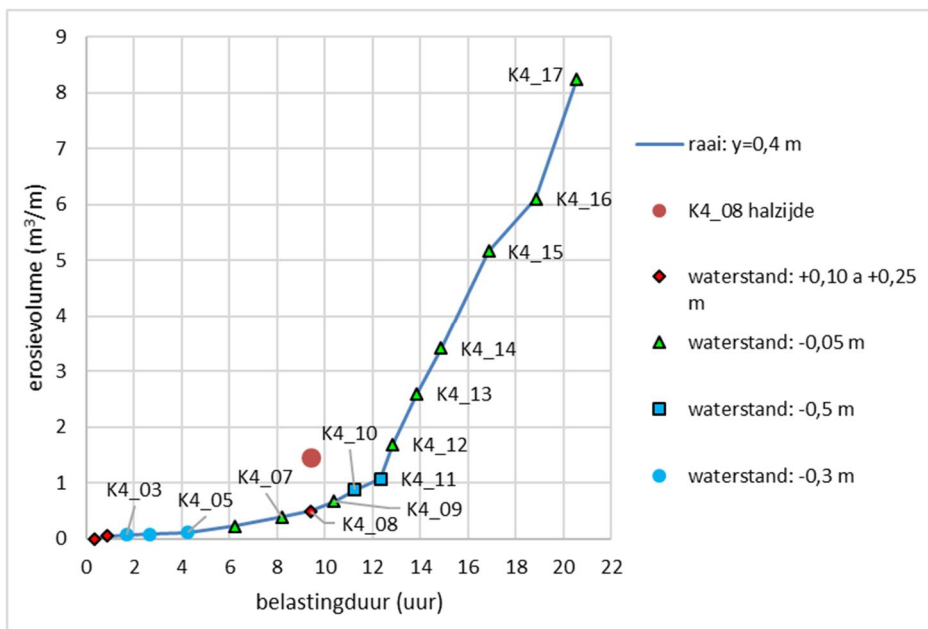
Figuur 6.16 Erosie gaat het snelst langs de zijkanten van het model (foto's genomen tijdens proef K4_10)

Tijdens het inbouwen van de kleiblokken was al opgevallen dat de klei van Blija duidelijk anders is dan de klei van de Lauwersmeerdijk en Holwerd. Deze klei is enerzijds vetter (en dat is goed voor de erosiebestendigheid) maar anderzijds veel sterker gestructureerd (ongunstig voor de erosiebestendigheid). De klei bestaat uit een stapeling kleine brokken van 10-200 cm³ (zie Figuur 4.16) die onderling wel enigszins plakken, maar toch gemakkelijk als brok eroderen tijdens de golfaanval. Tijdens de proeven is dit duidelijk geconstateerd, want het was goed te zien dat er brokken klei van 10-100 cm³ tijdens een golfklap door de lucht vlogen, zie Figuur 6.15.

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, zie paragraaf 4.4. 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 6.16. Daarom zijn de resultaten van de metingen in bovenstaande figuren en tabellen gepresenteerd uit een raai in de buurt van de zijkant ($y = 0,4 \text{ m}$). Zo wordt een relatief ongunstig resultaat beschouwd (aan de veilige kant).



Figuur 6.17 Grootste erosiediepte als functie van de belastingduur in proevenserie K4 (waterstand ten opzichte van niveau overgang)



Figuur 6.18 Erosievolume als functie van de belastingduur in proevenserie K4 (waterstand ten opzichte van niveau overgang)

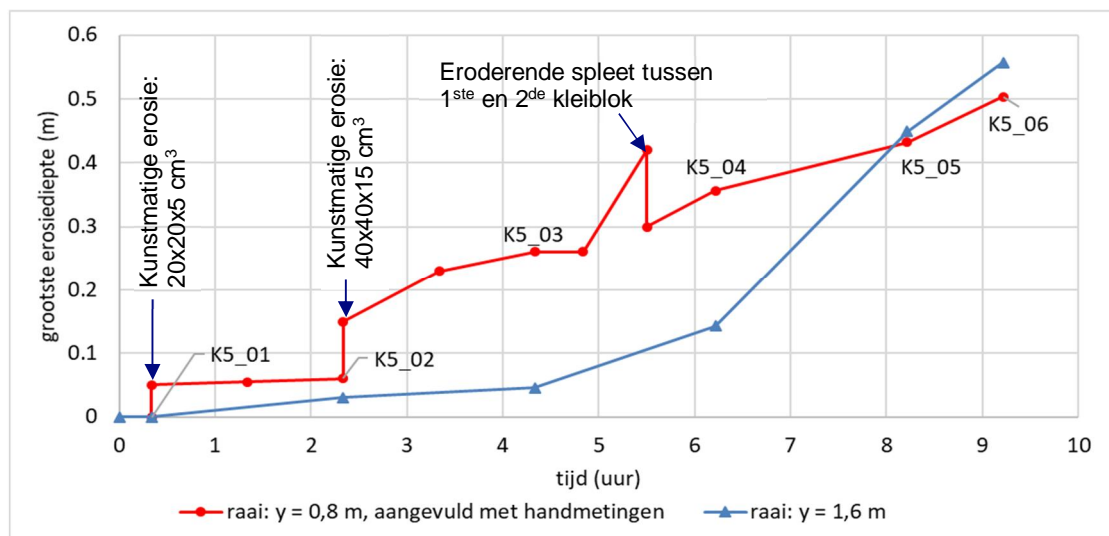
6.5 Proevenserie K5 en K6

Voor proevenserie K5 is klei met gras van Holwerd op het boventalud geplaatst op een talud van 1:5. In vergelijking tot proevenserie K2 zijn er twee kleiblokken met gras toegepast die een paar maanden in de tent een zeer hete en droge zomer hebben doorgemaakt. De uitgevoerde proeven zijn te vinden in Tabel 6-5.

proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m ³ /m)
K5_01	6,40	1,98	5,51	0,042	0,33	0,33	0,00	0,00
K5_02	6,40	2,05	5,54	0,043	2,00	2,33	0,05	0,08
K5_03	6,40	2,04	5,54	0,043	2,00	4,33	0,26	0,27
K5_04	6,40	2,08	5,56	0,043	1,88	6,22	0,36	0,56
K5_05	6,40	2,05	5,53	0,043	2,00	8,22	0,43	0,73
K5_06	6,40	2,05	5,54	0,043	1,00	9,22	0,50	0,87

Tabel 6-5 Proefresultaten serie K5 (inkomende golfcondities)

De in de tabel genoemde erosiediepte en erosievolume zijn waarden uit de raai op 0,8 m van de linker zijkant van het model ($y = 0,8$ m ten opzichte van meetcabinezijde). Deze raai is gekozen omdat deze representatief is voor het grootste deel van het bekledingsoppervlak. Deze meetresultaten zijn ook weergegeven in Figuur 6.19 en Figuur 6.20, waarin ter vergelijking ook de erosie in de raai $y = 1,6$ m is gegeven.

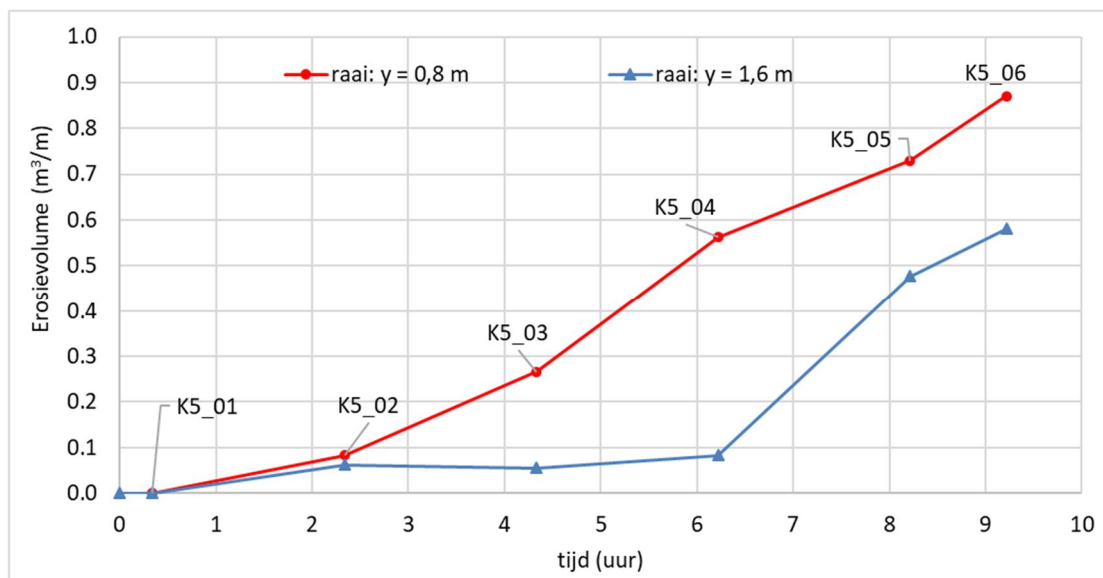


Figuur 6.19 Grootste erosiediepte in raai $y=0,8$ m (aangevuld met handmetingen) en raai $y=1,6$ m.

In Figuur 6.19 is duidelijk het effect van de kunstmatige erosiegaten te zien. Deze zijn toegevoegd in het verloop van de lijn bij raai $y = 0,8$ m, hoewel ze net buiten deze raai lagen. Verder valt in het verloop van de erosiediepte in deze raai op dat er rond $t = 5$ uur ineens veel erosie is. Toen is de spleet tussen het eerste en tweede kleiblok bloot komen te liggen. Hier sloten deze kleiblokken niet goed op elkaar aan, waardoor er een versnelde erosie optrad. Gezien het feit dat dit een modeffect is, is het gat daarna volgestopt met klei en is dit ook zo goed mogelijk in de spleet tussen de kleiblokken geduwd. Daardoor is de invloed van dit modeffect verminderd. Deze zone bleef echter in het vervolg het diepste punt.

In Figuur 6.19 is verder het verloop van de erosiediepte in de raai $y=1,6$ m te zien. In deze raai speelde het probleem van de erosie bij de aansluiting van het eerste en tweede kleiblok niet. We zien dat er tot ongeveer $t = 6$ uur heel weinig erosie is, totdat de erosie bij de aansluiting tussen de eerste twee kleiblokken zover begint te verbreden dat ook in deze raai dat merkbaar wordt.

Het verloop van het erosievolume is te zien in Figuur 6.20. Door het geringe volume van de kunstmatige schade, komt dat niet tot uiting in deze lijnen. Wel is het grote verschil tussen het erosievolume in raai $y=0,8$ m en $y=1,6$ m te zien.



Figuur 6.20 Erosievolume als functie van de belastingsduur voor raai $y=0,8$ m en raai $y=1,6$ m.

Deze resultaten kunnen ook vergeleken worden met die van proevenserie K2. Toen is na bijna 14 uur golven een erosiediepte bereikt van 0,29 m en een erosievolume van 0,33 m³/m. De modelopstelling verschilt in de serie K5 alleen in het feit dat er twee kleiblokken met gras zijn toegepast die een zeer hete en droge zomer hebben doorgemaakt, maar daarnaast is er tijdens de serie K5 extra erosie ontstaan door de slechte aansluiting tussen de eerste twee kleiblokken. De eerste 5 uur van de K5-serie, toen de slechte aansluiting tussen de eerste twee kleiblokken nog geen rol speelde, gaf net als de K2-serie vrij weinig erosie. Er is toen een erosiediepte bereikt van ongeveer 30 cm, terwijl dat in de K2-serie ongeveer 23 cm was. In beide gevallen was het erosievolume klein, maar in de K5-serie wel drie keer zo groot als in de K2 serie.

Op basis van de resultaten kan geconcludeerd worden dat de zeer hete en droge zomer een duidelijk effect heeft gehad op het verloop van de erosie, maar de erosiebestendigheid van de Holwerdklei was zo groot dat de standduur nog steeds zeer aanzienlijk was.

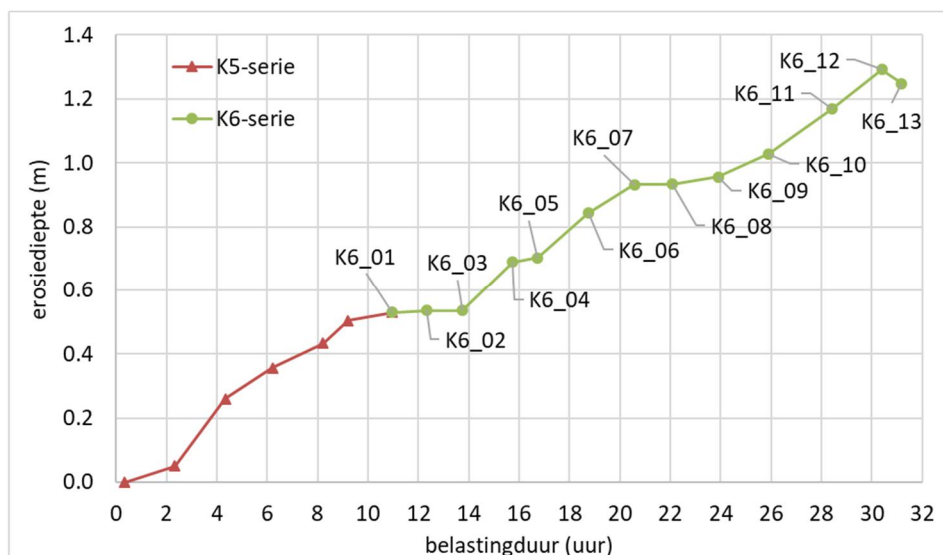
Met dezelfde kleibekleding met gras, die dus al wat aangetast is tijdens de proeven van de K5-serie, is verder gegaan met de K6-serie. Tussen deze twee series is de berm uit de modelopstelling verwijderd en is het talud onder de kleibekleding met gras ook uitgevoerd met een helling van 1:5. Daardoor is te verwachten dat de golfbelasting op de kleibekleding met gras een stuk groter wordt.

In Tabel 6-6 zijn de gemeten waarden van de erosiediepte en het erosievolume van de K6-serie gegeven. Als referentie is de situatie aan het begin van de K5-serie aangehouden. Het verloop van de erosiediepte en erosievolume als functie van de belastingduur is te zien in Figuur 6.21 en Figuur 6.22.

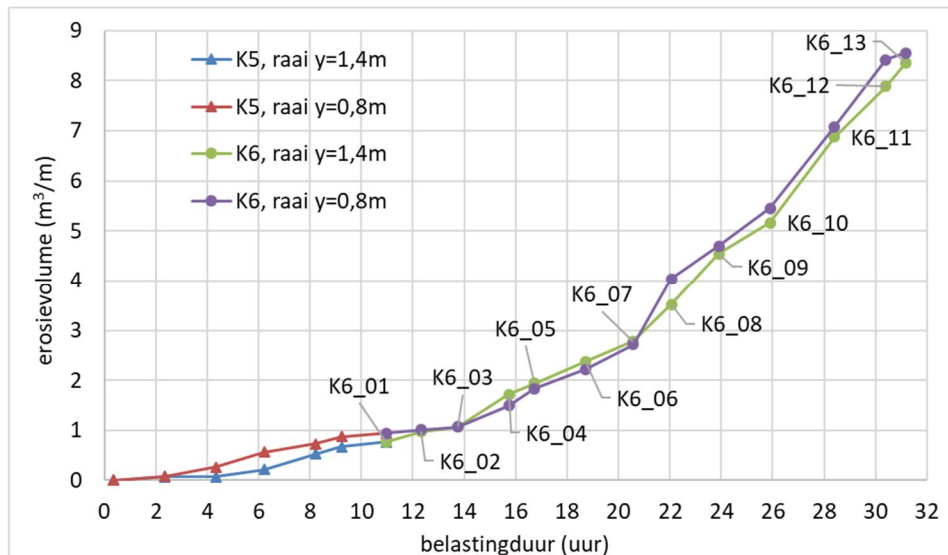
proef	waterstand (m+NAP)	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)	Erosie-diepte (m)	Erosie-volume (m ³ /m)
K6_01	5,90	1,99	5,48	0,042	1,75	1,75	0,53	0,76
K6_02	5,90	2,02	5,50	0,043	1,35	3,10	0,54	0,97
K6_03	6,40	1,53	4,82	0,042	1,42	4,52	0,54	1,07
K6_04	6,40	2,05	5,53	0,043	2,00	6,52	0,69	1,72
K6_05	6,40	2,04	5,53	0,043	1,00	7,52	0,70	1,94
K6_06	6,40	2,00	5,49	0,043	2,00	9,52	0,84	2,38
K6_07	6,55	2,01	5,50	0,043	1,83	11,35	0,93	2,78
K6_08	6,65	1,97	5,50	0,042	1,50	12,85	0,93	3,52
K6_09	6,65	1,94	5,50	0,041	1,83	14,68	0,96	4,55
K6_10	6,65	1,95	5,49	0,041	2,00	16,68	1,03	5,17
K6_11	6,65	2,10	5,52	0,044	2,50	19,18	1,17	6,88
K6_12	6,65	2,07	5,50	0,044	2,00	21,18	1,29	7,88
K6_13	6,65	2,09	5,57	0,043	0,77	21,95	1,25	8,36

Tabel 6-6 Proefresultaten serie K6 (inkomende golfcondities)(* = ten opzichte van proef K5_01)

Het proevenprogramma 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 6.21 Grootste erosiediepte in raai $y=1,4m$ (aangevuld met handmetingen).



Figuur 6.22 Erosievolume als functie van de belastingsduur voor raai $y=0,8$ m en raai $y=1,4$ m.

Tijdens proef K6_13 is de erosiediepte iets minder geworden, waarschijnlijk omdat er wat losse klei in de diepste erosiekuil is gevallen.

In figuur 6.20 is geen duidelijke scheiding te zien tussen de eerste fase van het erosieproces en de tweede fase. Dat komt onder meer omdat de K5-serie, die uitgevoerd is gedurende de eerste fase van het erosieproces, een andere modelopstelling had dan de K6-serie. Daardoor is het onderscheid tussen deze twee fases wat minder duidelijk.

Het blijkt dat de erosie zonder de berm wat sneller is gegaan dan met een berm als serie K6 vergeleken wordt met serie K3. Het is nu echter nog niet goed mogelijk om een goede conclusie te trekken over de invloed van de berm op het erosieproces. De waterstand tijdens deze proeven was anders dan tijdens de proeven van serie K3, waardoor een en ander wat moeilijker te vergelijken is. Dit is wel goed mogelijk in de analysefase van het onderzoek, omdat dan ook de resultaten van de OpenFoam berekeningen meegenomen kunnen worden in de beschouwingen.

7 Conclusies

In de Deltagoot van Deltares is op ware grootte een representatief profiel van het ontwerp van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat (van Waterschap Noorderzijlvest) en de dijk Koehool-Lauwersmeer (Wetterskip Fryslân) nagebouwd om te onderzoeken hoe sterk de kleibekleding met gras op het boventalud is. Gedurende vele uren is er een grote hydraulische belasting op deze dijken geweest met golven van doorgaans $H_{m0} = 2,0$ m en $T_p = 5,5$ s.

Het onderzoek in de Deltagoot bestond uit 6 proevenseries:

- 1 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met een boventalud van 1:4 en klei en gras van de Lauwersmeerdijk (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3),
- 2 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met een boventalud van 1:5 en klei en gras van Holwerd (schrle klei, weinig erosiebestendig, categorie 3),
- 3 Geometrie van de dijk Koehool-Lauwersmeer met verlaagde berm, een boventalud van 1:5 en met klei en gras van Holwerd,
- 4 Geometrie van de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat met een boventalud van 1:4 en klei en gras van Blija (stevige klei, erosiebestendig, categorie 1),
- 5 Dijk met berm met klei van Holwerd op het boventalud met helling van 1:5, waarvan de eerste 4 m kunstmatig een zeer warme en droge zomer had doorgemaakt.
- 6 Dijk zonder berm met taludhelling van 1:5 (zowel onder- als boventalud) met klei van Holwerd op het boventalud.

De golfcondities en waterstand zijn zo gekozen dat ze ongeveer overeenkomen met de golfcondities die naar verwachting de grootste bijdrage aan de faalkans van de bekleding op het boventalud van deze dijken geven. Een lagere waterstand komt weliswaar vaker voor, maar dan wordt het boventalud minder zwaar belast. Bij een hogere waterstand is de belasting weliswaar groter, maar dit komt minder vaak voor en geeft daardoor toch een kleinere bijdrage aan de faalkans. Deze overwegingen sluiten aan bij de wijze waarop in de overstromingskansbenadering wordt gekeken naar dijken. Het gaat er daarbij primair om dat de faalkans van de dijk niet groter is dan de waarde die in de Waterwet wordt genoemd.



Figuur 7.1 Tijdens proef K1_08

Tijdens de meeste proeven was de waterstand iets hoger dan de overgang tussen de harde bekleding en het gras. Alleen tijdens proevenserie K4 was het nodig de waterstand wat lager te kiezen vanwege de wat kleinere erosiebestendigheid van de klei en het gras. Desondanks was de waterstand relatief hoog voor de dijk Koehool-Lauwersmeer en was de golfbelasting op de kleibekleding met gras op het boventalud relatief zwaar.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat een kleibekleding met gras zeer goed in staat is om deze hydraulische belasting te weerstaan. De harde bekleding op het ondertalud en de berm vangen het grootste deel van de golfklappen op, waardoor de kleibekleding met gras slechts af en toe een golfklap krijgt en verder alleen door de golfploop wordt belast.

Om het erosieproces op gang te krijgen was het bij alle proevenseries, behalve K4, nodig om een kunstmatige schade aan te brengen. Dit sluit aan op de praktijk, omdat ook een kilometerslange dijk wel hier en daar beschadigingen heeft in het gras. Na enkele uren golven op het beschadigde gras groeide het erosiegat steeds dieper de klei in en ontstond er een klif die met de toenemende erosie geleidelijk aan richting de kruin verschoof, zie Figuur 6.5.

De klei met gras van Holwerd had de grootste erosiebestendigheid en heeft het in de twee proevenseries die hiermee uitgevoerd zijn maar liefst 31 en 36 uur uitgehouden (standduur). De kleibekleding met gras van Blija was het zwakste. De proeven zijn bij een iets lagere waterstand dan die met de bekleding van Holwerd en de Lauwersmeerdijk uitgevoerd, zodat de golfbelasting iets minder was. Dit leverde als resultaat een standduur van ruim 20 uur. De bekleding van de Lauwersmeerdijk heeft 14 uur standgehouden, maar met een hogere waterstand en dus zwaardere belasting dan de bekleding van Blija. Een kanttekening hierbij is wel dat de proeven met de bekleding van Holwerd zijn uitgevoerd met een boventalud van 1:5 en de proeven met de bekleding van de Lauwersmeerdijk en de bekleding van Blija zijn uitgevoerd met een boventalud van 1:4. Het flauwere boventalud en daardoor lagere belasting op de bekleding van Holwerd heeft waarschijnlijk ook bijgedragen aan een langere standduur. Tijdens proevenserie K1 (Lauwersmeerdijk) is eerst een kunstmatige schade aangebracht van $20 \times 20 \text{ cm}^2$ en 5 cm diep, die later vergroot is naar $40 \times 40 \text{ cm}^2$ en 15 cm diep. Datzelfde is ook gedaan tijdens proevenserie K2, K3 en K5 (Holwerd) en is bovendien een kunstmatige klifje gemaakt om de erosie op gang te krijgen (behalve bij K5). De kleine gaten zijn gemaakt omdat een dijk altijd wat beschadigingen heeft en de grote gaten en het klifje zijn gemaakt omdat de erosie zo traag verliep.

De klei van de Lauwersmeerdijk en van Holwerd waren van de categorie 3 volgens de indeling van TAW-1996, terwijl die van Blija categorie 1 was. Dit maakt het opmerkelijk dat juist de klei van Blija het minste presteerde. Deze klei is, in tegenstelling tot de klei van de Lauwersmeerdijk en die van Holwerd, vrij sterk gestructureerd. De klei valt gemakkelijk uiteen in brokken van ongeveer 3-15 cm. Ook na het verhogen van het vochtgehalte van de klei bleef het brokkelig. De klei bestaat uit een stapeling kleine brokken van $30\text{-}3000 \text{ cm}^3$ (zie Figuur 4.16) die onderling wel enigszins plakken, maar toch gemakkelijk als brok eroderen tijdens de golfaanval. Tijdens de proeven is dit duidelijk geconstateerd, want het was goed te zien dat er brokken klei van $10\text{-}100 \text{ cm}^3$ tijdens een golfklap door de lucht vloog.

Aanbevolen wordt om te werken aan een nieuwe categorie-indeling voor klei ten aanzien van erosie door golven.

Verder was de grasbekleding van Blija een monocultuur van Engels Raaigras, die tijdens het onderzoek vrij kwetsbaar bleek. Ondanks de goede zorg met beregenen en verlichting met groeilampen ging de kwaliteit van de grasmat vrij snel achteruit tijdens het verblijf in de hal van de Deltagoot. Het gras van de Lauwersmeerdijk en van Holwerd was soortenrijker en bleef wel in goede conditie. Die is kunstmatig verzwakt door middel van verticuleren en het aanbrengen

van kunstmatige schade om de erosie op gang te brengen. Dat was bij het gras van Blija niet nodig.

In het erosieproces kunnen twee fases onderscheiden worden (Figuur 6.5):

- 1 Erosie haaks op het taludoppervlak door het gras totdat er een flink gat is ontstaan met een klif in de kleibekleding.
- 2 Erosie bij de voet van de klif waardoor deze richting de kruin migreert tijdens het erosieproces

De eerste fase van het erosieproces duurde tijdens de proeven met de klei van de Lauwersmeerdijk en de klei van Blija respectievelijk ongeveer 7 en 12 uur. Bij de kleibekleding met gras van Holwerd duurde deze fase veel langer, namelijk circa 28 uur.

De tweede fase van het erosieproces duurde bij al deze kleisoorten orde 7 à 8 uur, maar daarbij moet opgemerkt worden dat de waterstanden niet bij alle proeven hetzelfde waren en de kleilaagdikte van ongeroerde klei in serie K2/K3 slechts 90 cm was. Daardoor zijn de verschillende series niet zo makkelijk met elkaar te vergelijken. Dit zal in de analyse nader beschouwd gaan worden (Klein Breteler 2021).

Gezien de maximale duur dat er zo'n zware hydraulische belasting op het boventalud optreedt tijdens een extreme storm, namelijk hooguit 8 uur, is de standduur van deze kleibekleding met gras aanzienlijk.



Figuur 7.2 Tijdens proef K4_08

Het blijkt dat de erosie zonder de berm wat sneller is gegaan dan met een berm als serie K6 vergeleken wordt met serie K3. Het is nu echter nog niet goed mogelijk om een goede conclusie te trekken over de invloed van de berm op het erosieproces. De waterstand tijdens deze proeven was anders dan tijdens de proeven van serie K3, waardoor een en ander wat moeilijker te vergelijken is. Dit is wel goed mogelijk in de analysefase van het onderzoek, omdat dan ook de resultaten van de OpenFoam berekeningen meegenomen kunnen worden in de beschouwingen.

In proevenserie K5 zijn er twee kleiblokken met gras toegepast die een paar maanden in een tent een zeer hete en droge zomer hebben doorgemaakt. In vergelijking met proevenserie K2, met normale kleiblokken met gras, is gebleken dat de erosie circa 30% sneller de diepte in gaat en het erosievolume wel drie keer zo snel toeneemt. Ondanks dat de erosie in serie K5 sneller ging, was de erosiesnelheid nog steeds vrij beperkt. Op basis van de resultaten kan geconcludeerd worden dat de zeer hete en droge zomer een duidelijk effect heeft gehad op het verloop van de erosie, maar de erosiebestendigheid van de Holwerdklei was zo groot dat de standduur nog steeds zeer aanzienlijk was.

Referenties

Kaste, D., en M. Klein Breteler (2015)

Rekenmodel voor klei-erosie bij variërende waterstand

Deltares, rapport 1209832-010, 16 januari 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. en G.C. Mourik (2019)

Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken

Deltares, rapport 11203720-017, 18 juli 2019

Klein Breteler, M. (2020)

Benodigde kleidikte en niveau van overgang op boventalud Lauwersmeerdijk

Resultaat probabilistische berekeningen op basis van Deltagootproeven

Deltares, conceptrapport 11204841-006, 17 november 2020

Klein Breteler, M. (2021)

Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken

Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam

Deltares, conceptrapport 11204841-006, 17 mei 2021

Kruse, G.A.M. (2010)

Studie voor richtlijnen klei op dijktaluds in het rivierengebied

Deltares, rapport 1202512, 16 juli 2010

Rijkswaterstaat (2019)

Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019

Rijkswaterstaat (2021)

Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 mei 2021

TAW (1996)

Technisch rapport klei voor dijken

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, mei 1996

A Figuren

A.1 Meetresultaten van Faro laserscans K1

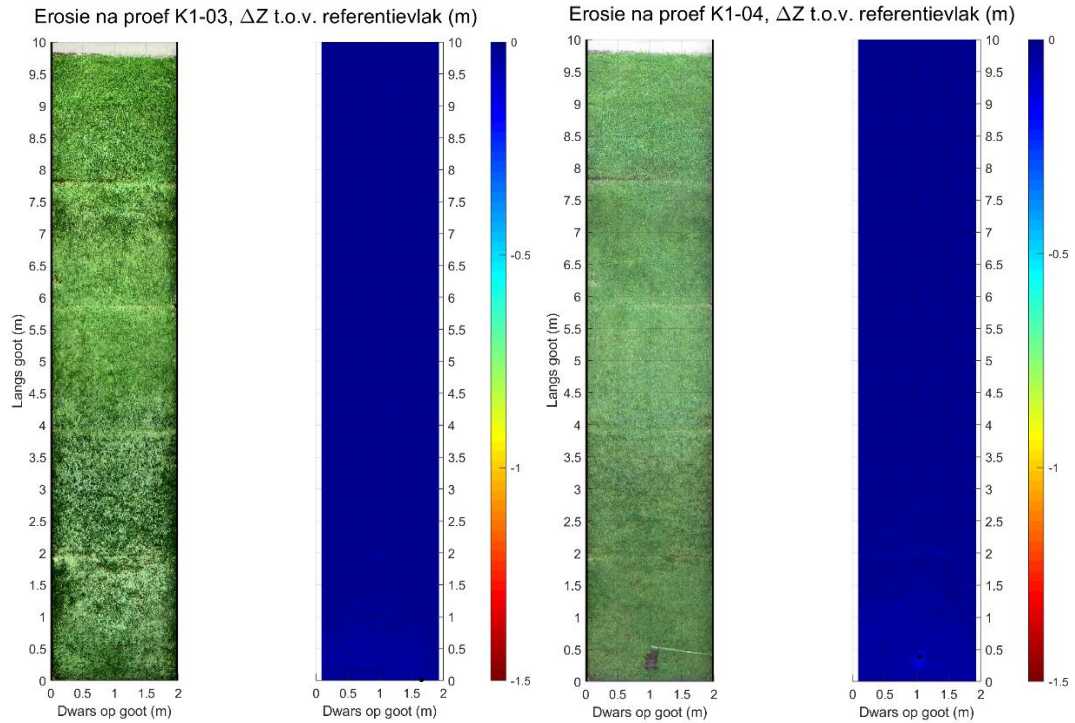


Fig. A-1 Resultaat laserscan Proef K1_03 en K1_04 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

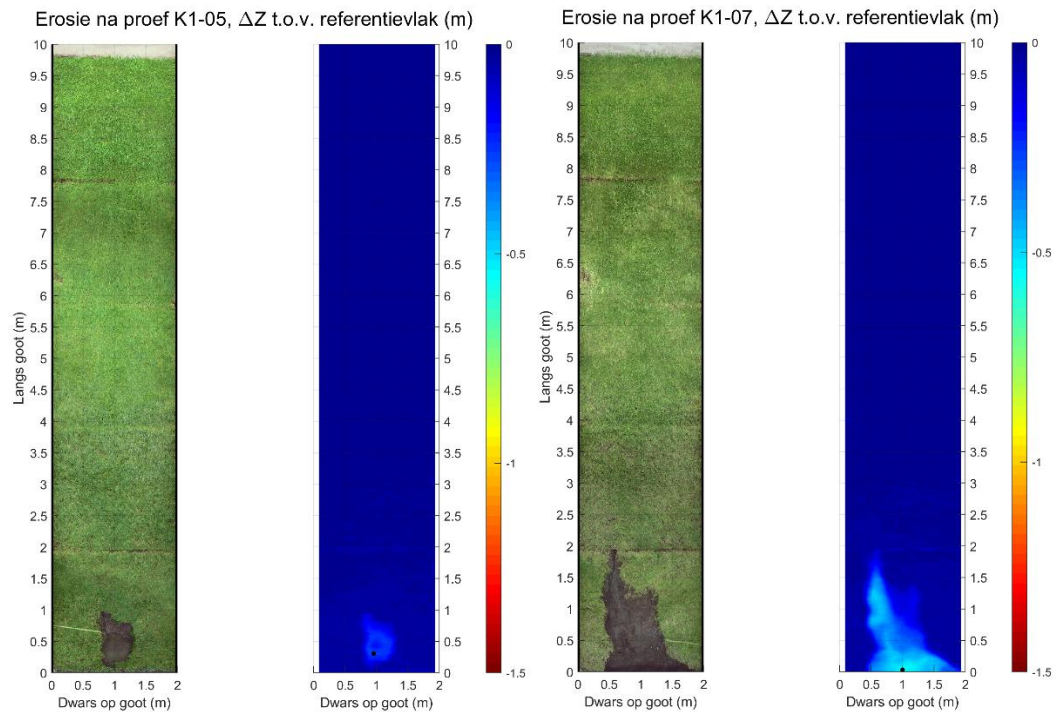


Fig. A-2 Resultaat laserscan Proef K1_05 en K1_07 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

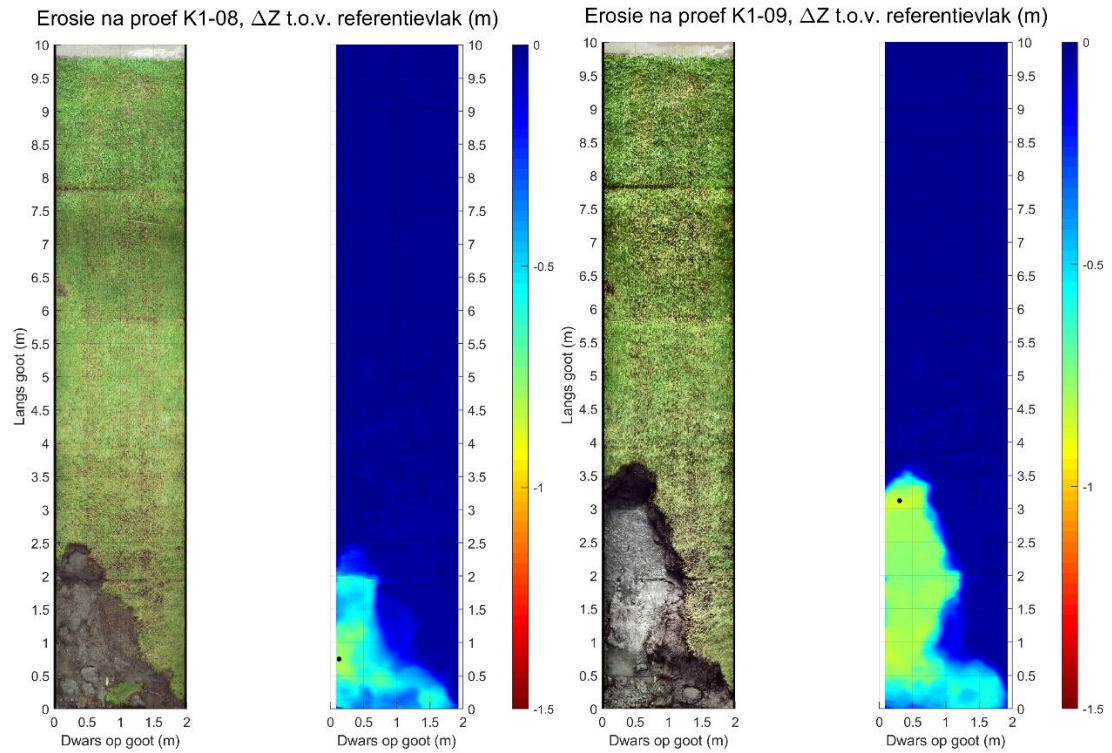


Fig. A-3 Resultaat laserscan Proef K1_08 en K1_09 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

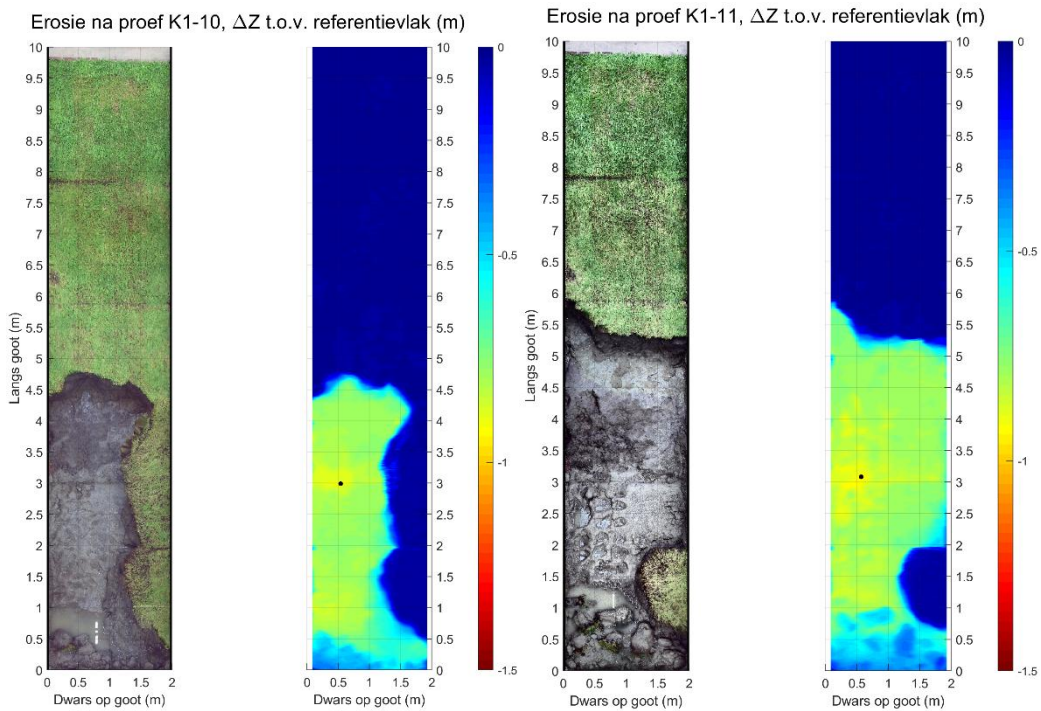


Fig. A-4 Resultaat laserscan Proef K1_10 en K1_11 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

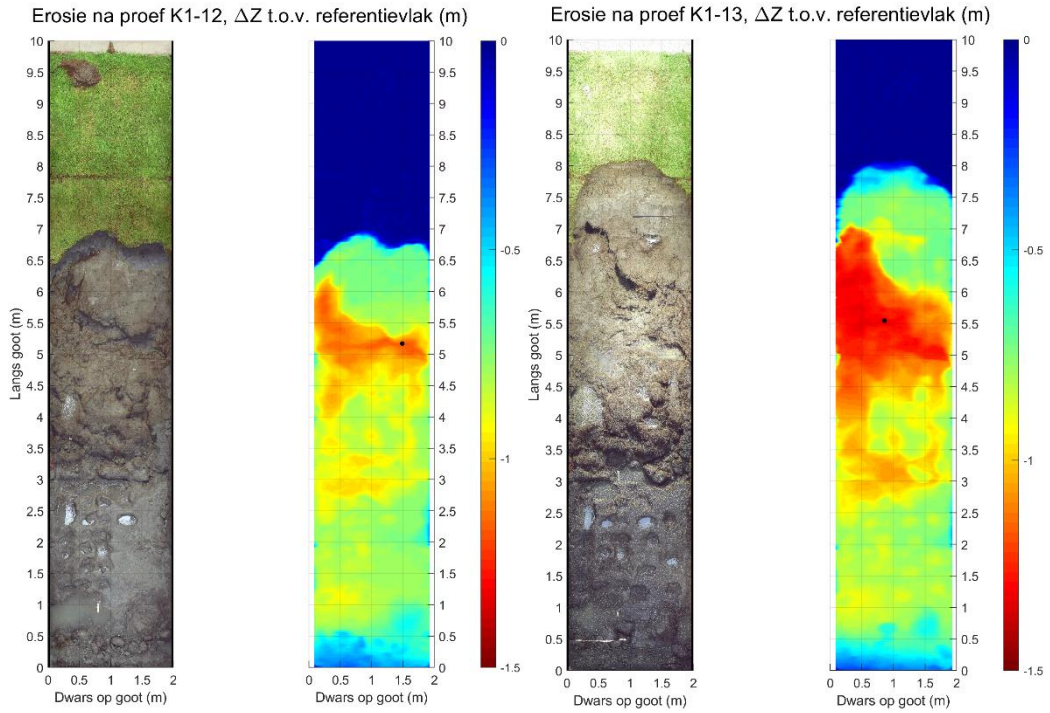


Fig. A-5 Resultaat laserscan Proef K1_12 en K1_13 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

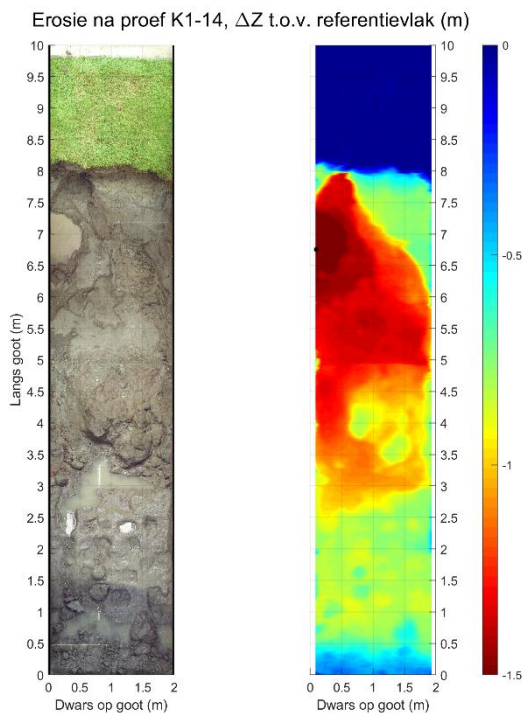


Fig. A-6 Resultaat laserscan Proef K1_14 (erosiediepte t.o.v. na K1_01)

A.2 Meetresultaten van Faro laserscans K2 en K3

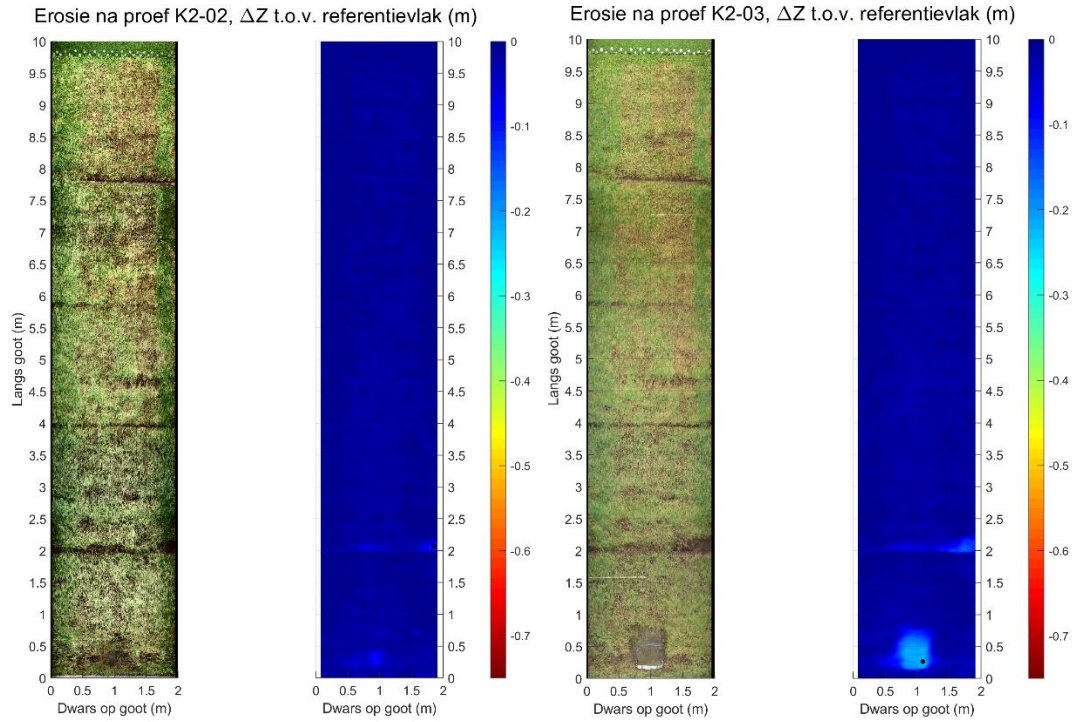


Fig. A-7 Resultaat laserscan Proef K2_02 en K2_03 (erosiediepte t.o.v. na K2_01)

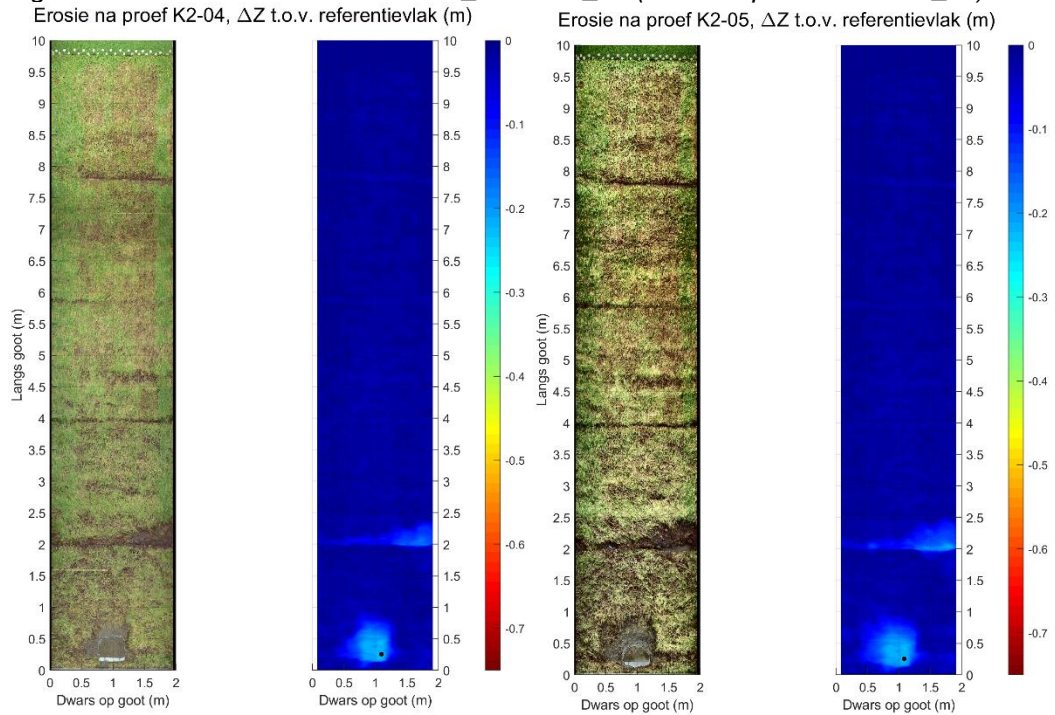


Fig. A-8 Resultaat laserscan Proef K2_04 en K2_05 (erosiediepte t.o.v. na K2_01)

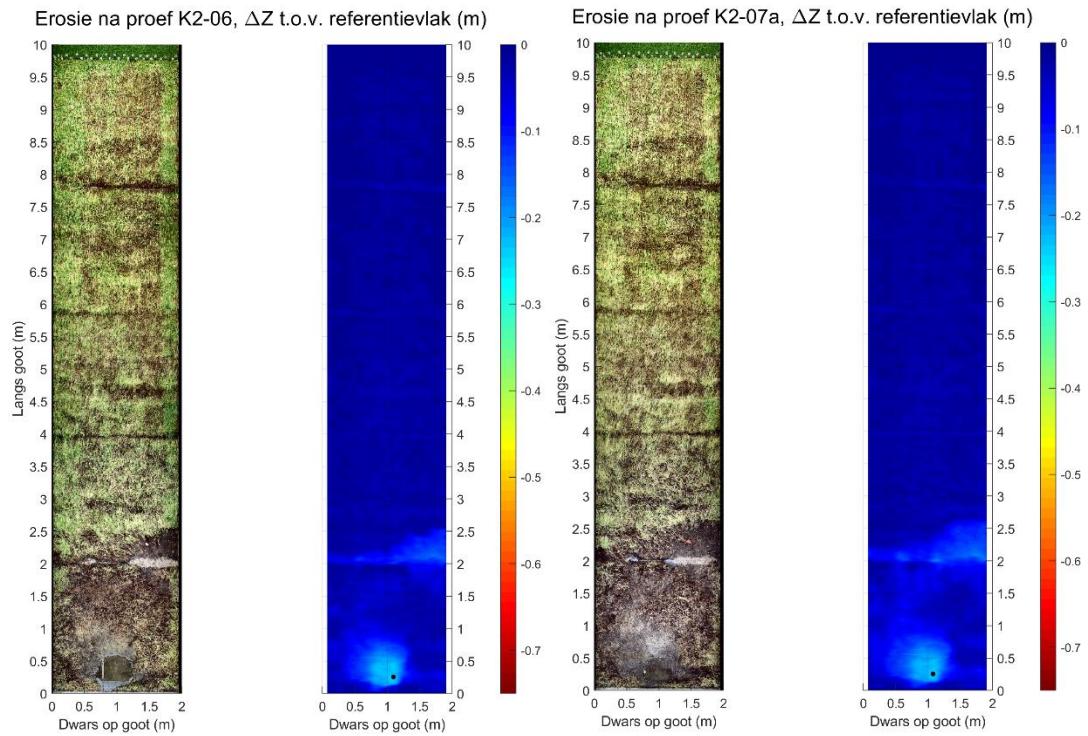


Fig. A-9 Resultaat laserscan Proef K2_06 en K2_07 (erosiediepte t.o.v. na K2_01)

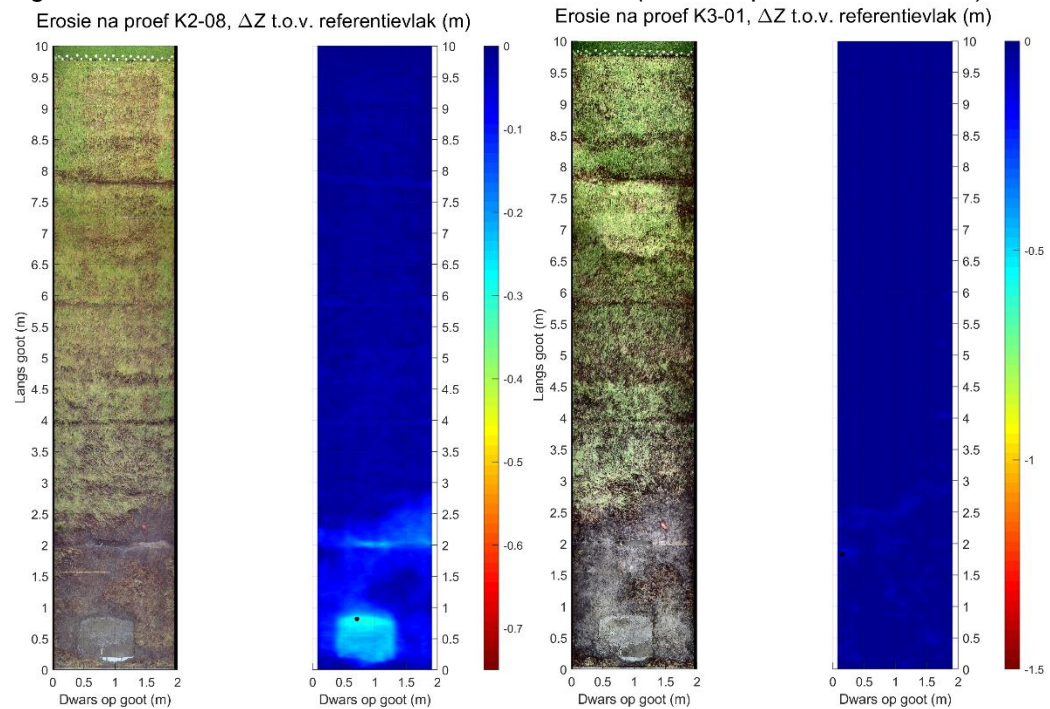


Fig. A-10 Resultaat laserscan Proef K2_08 (erosie t.o.v. na K2_01) en K3_01 (erosie t.o.v. na K2_08)

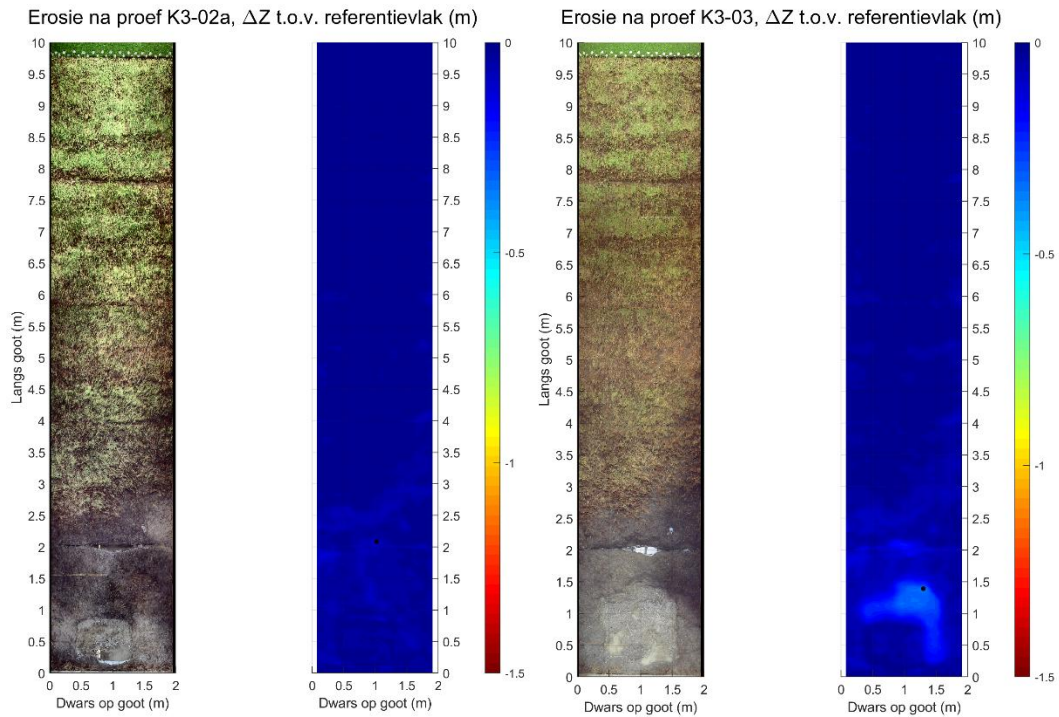


Fig. A-11 Resultaat laserscan Proef K3_02 en K3_03 (erosie t.o.v. na K2_08)

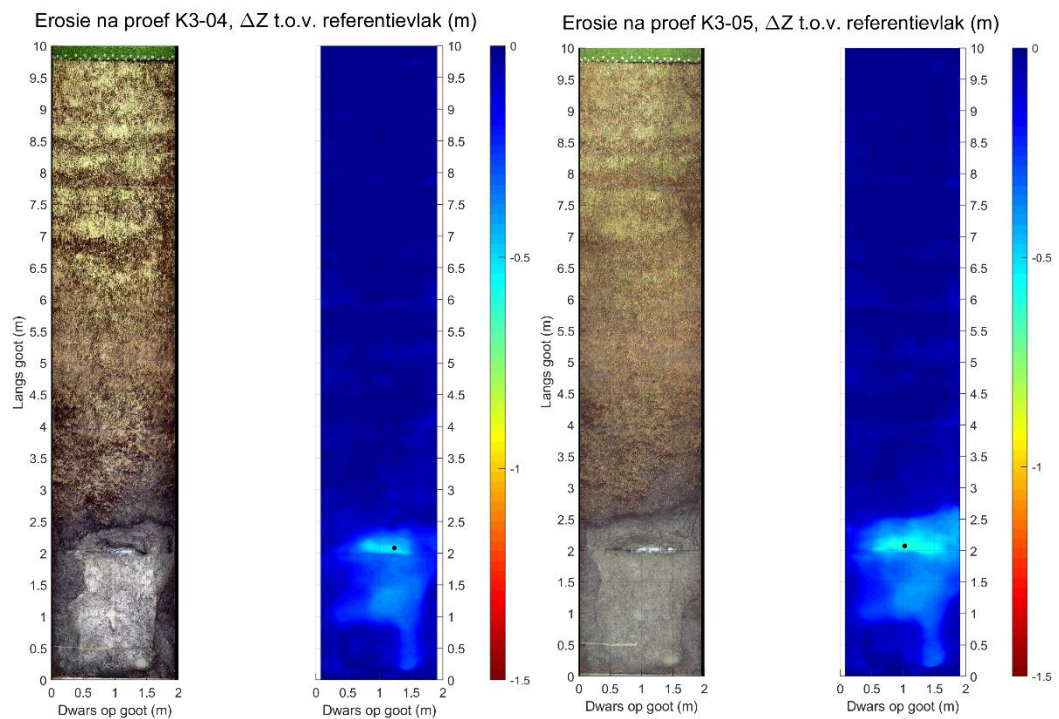


Fig. A-12 Resultaat laserscan Proef K3_04 en K3_05 (erosie t.o.v. na K2_08)

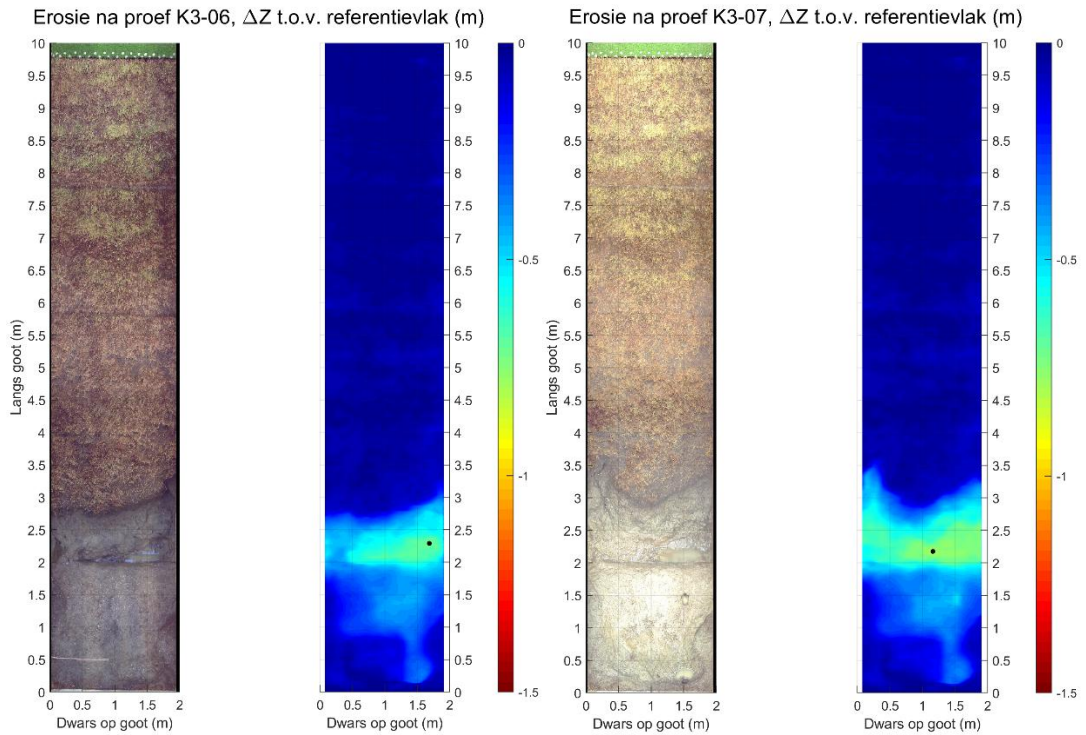


Fig. A-13 Resultaat laserscan Proef K3_06 en K3_07 (erosie t.o.v. na K2_08)

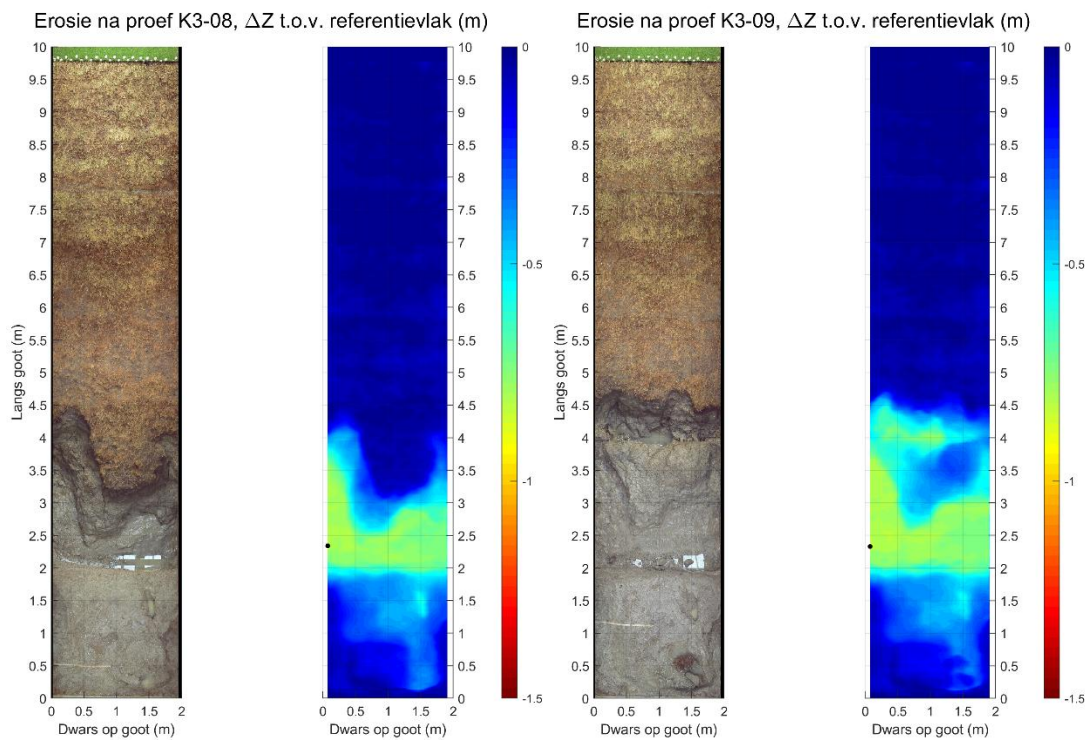


Fig. A-14 Resultaat laserscan Proef K3_08 en K3_09 (erosie t.o.v. na K2_08)

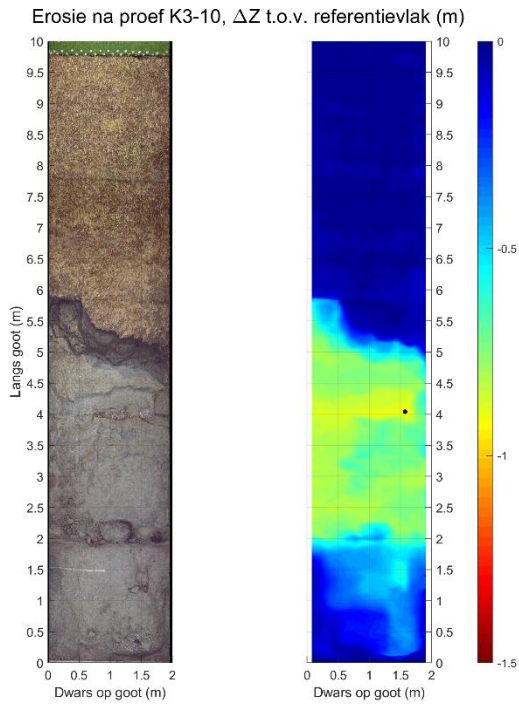


Fig. A-15 Resultaat laserscan Proef K3_10 (erosie t.o.v. na K2_08)

A.3 Meetresultaten van Faro laserscans K4

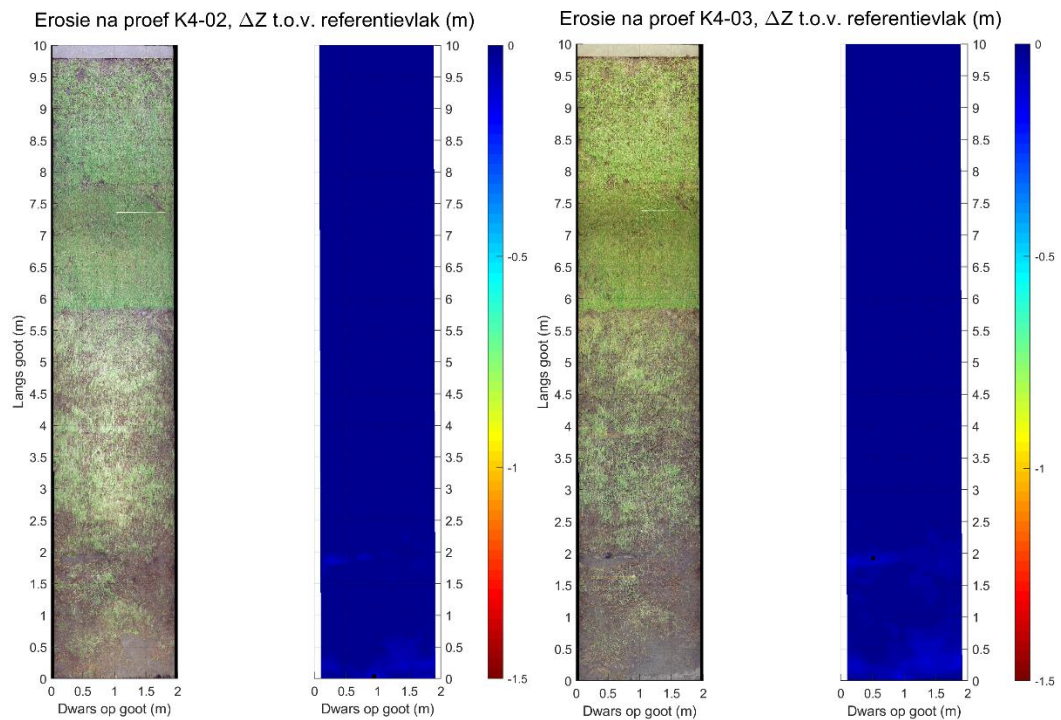


Fig. A-16 Resultaat laserscan Proef K4_02 en K4_03 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

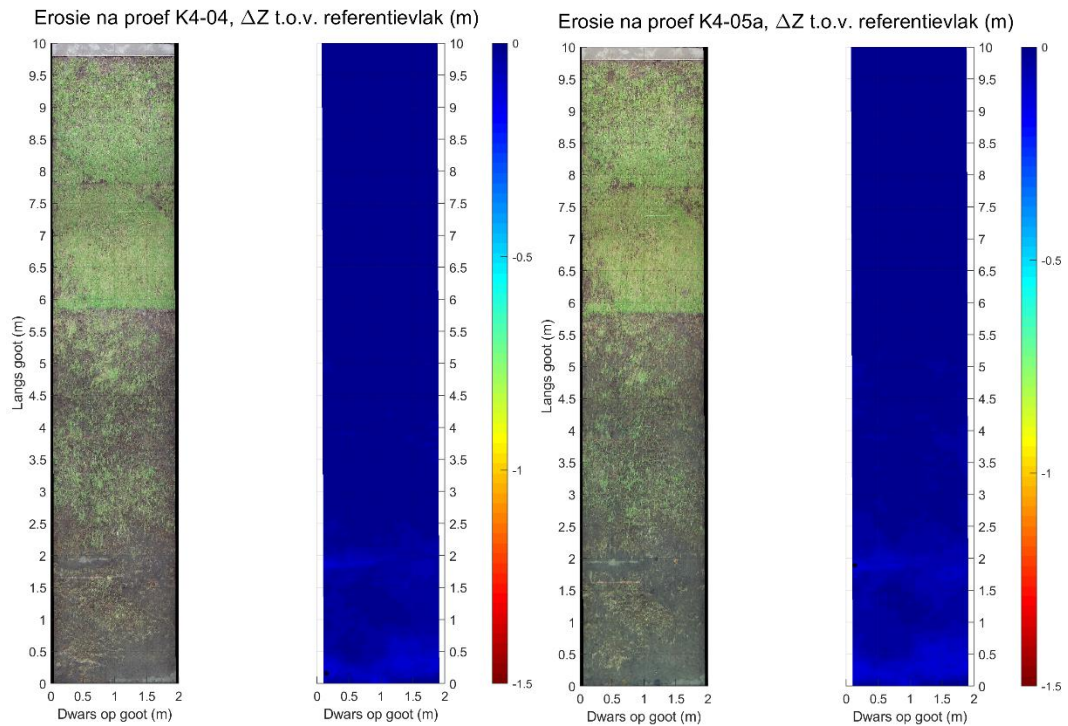


Fig. A-17 Resultaat laserscan Proef K4_04 en K4_05 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

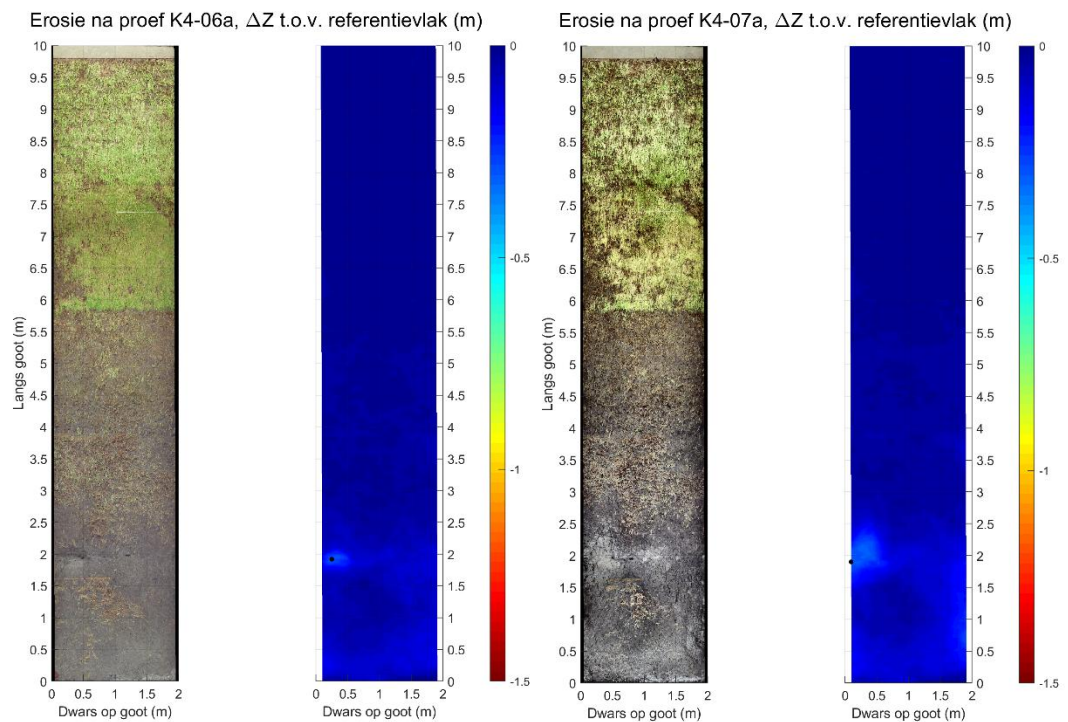


Fig. A-18 Resultaat laserscan Proef K4_06 en K4_07 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

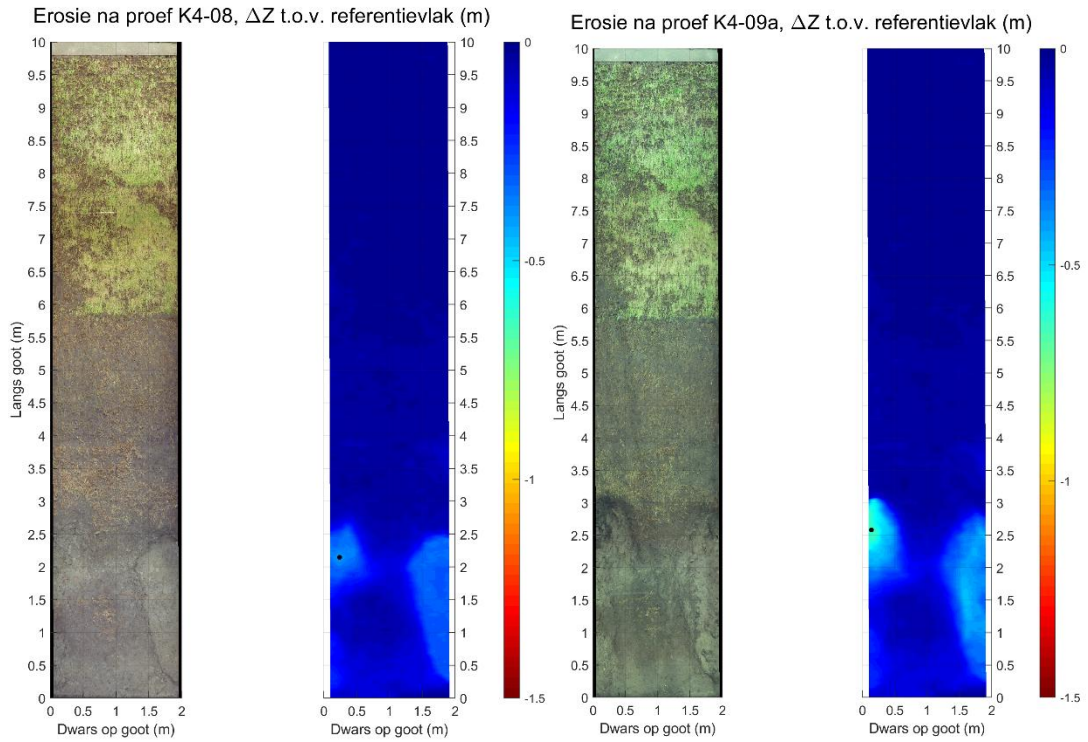


Fig. A-19 Resultaat laserscan Proef K4_08 en K4_09 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

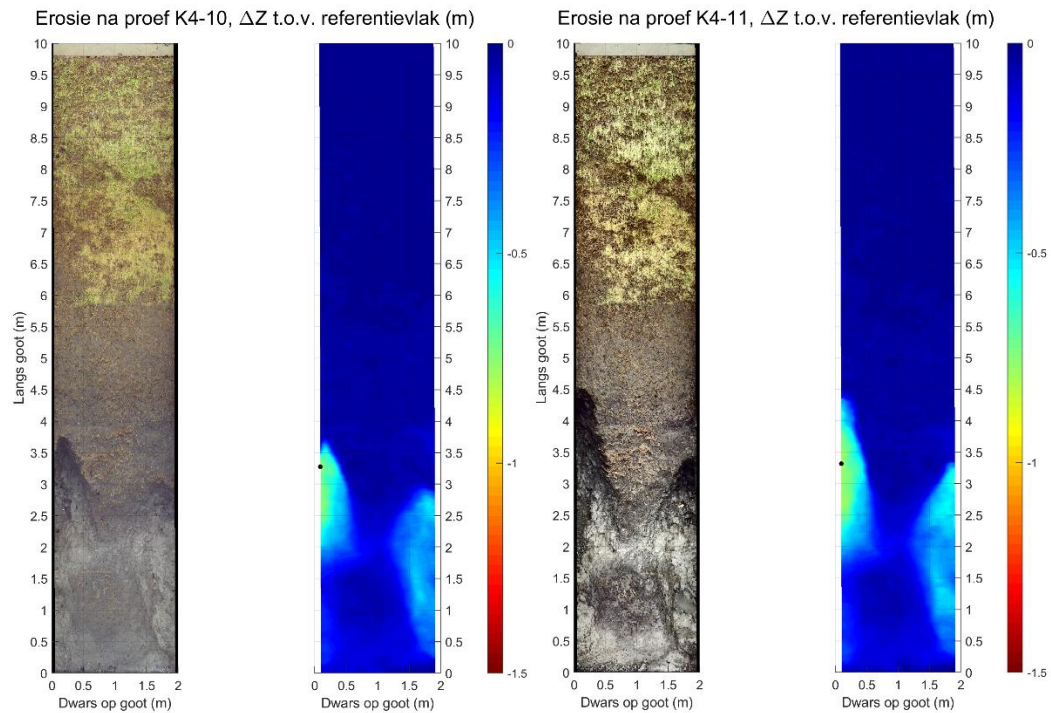


Fig. A-20 Resultaat laserscan Proef K4_10 en K4_11 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

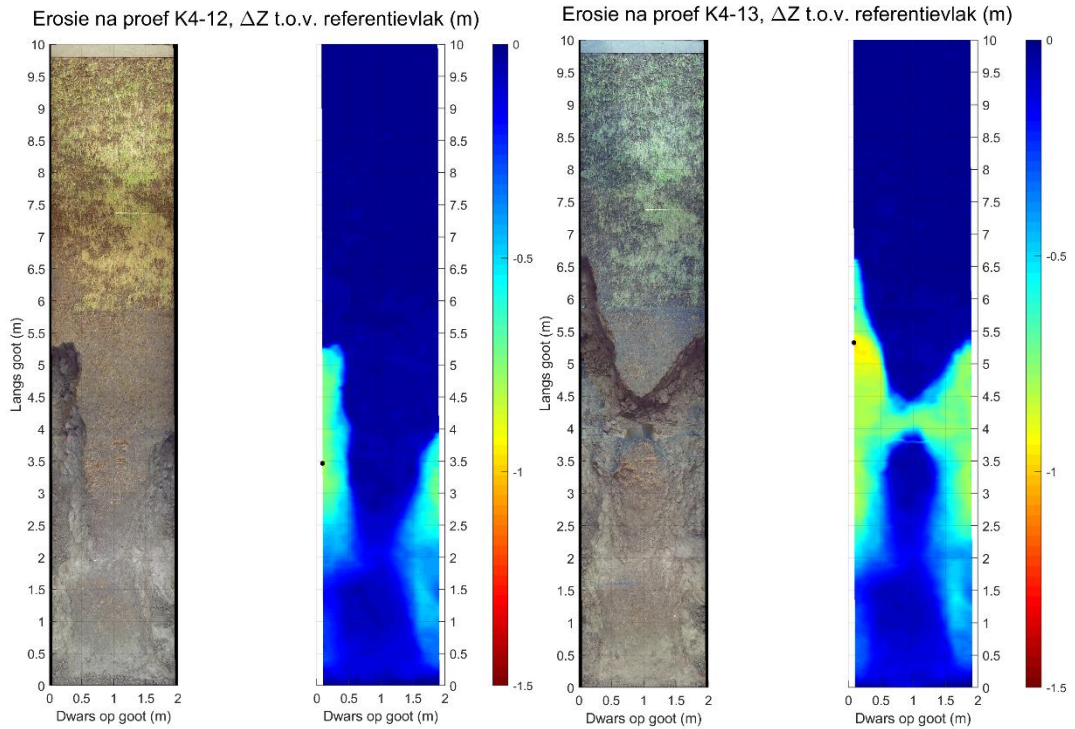


Fig. A-21 Resultaat laserscan Proef K4_12 en K4_13 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

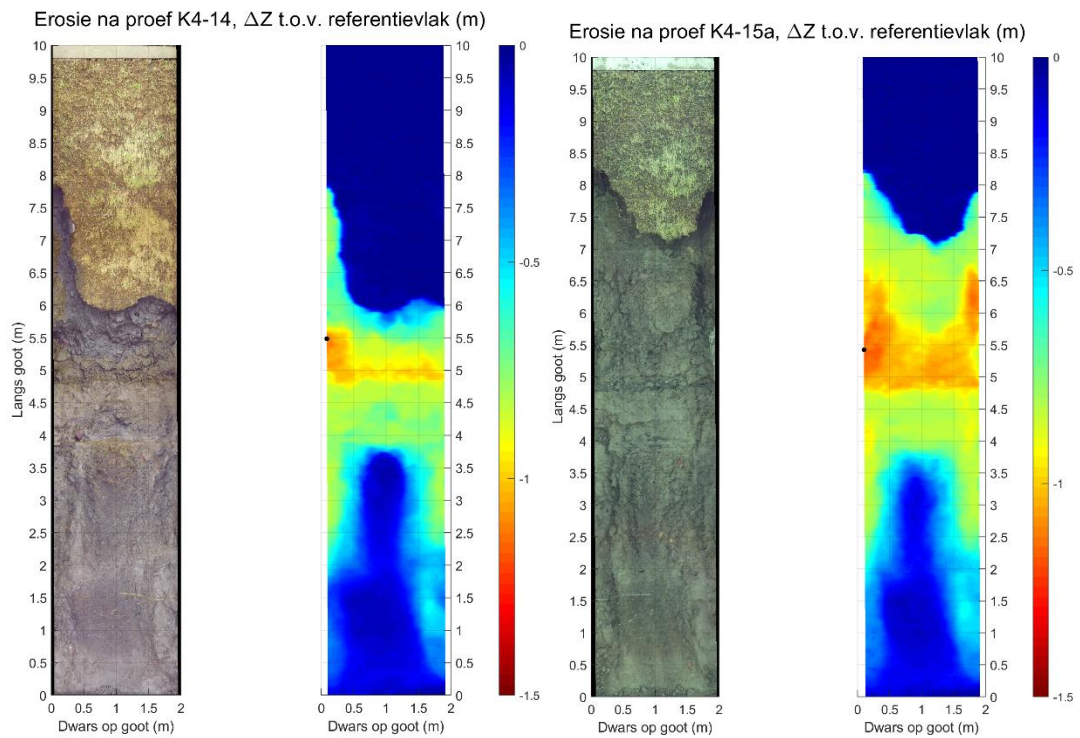


Fig. A-22 Resultaat laserscan Proef K4_14 en K4_15 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

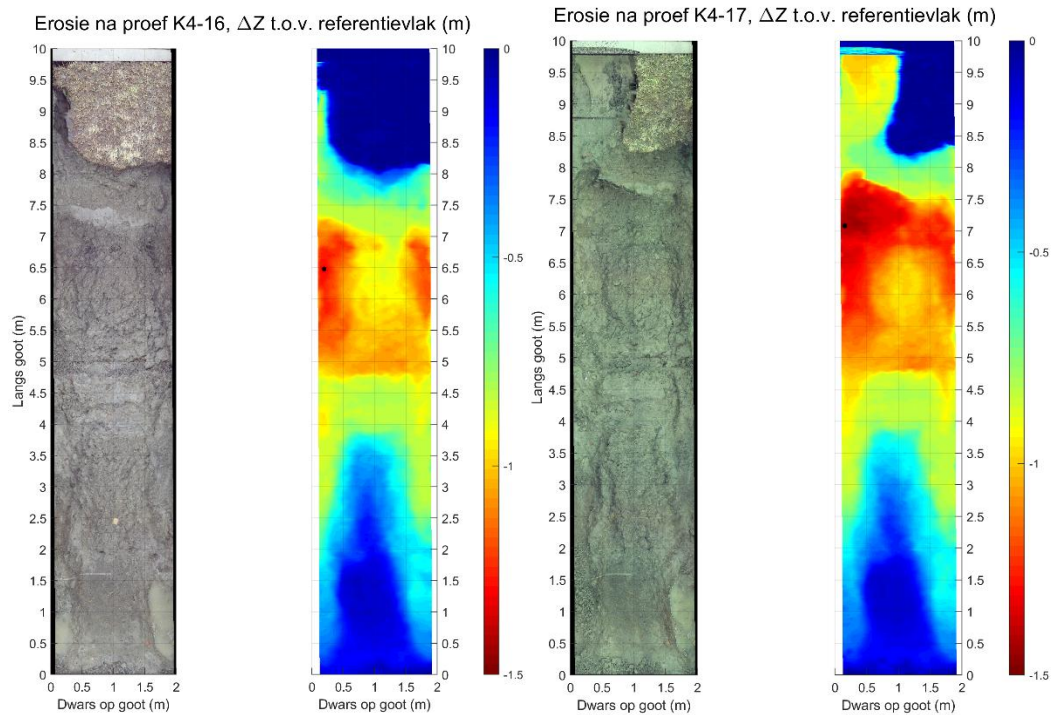


Fig. A-23 Resultaat laserscan Proef K4_16 en K4_17 (erosiediepte t.o.v. na K4_01)

A.4 Meetresultaten van Faro laserscans K5 en K6

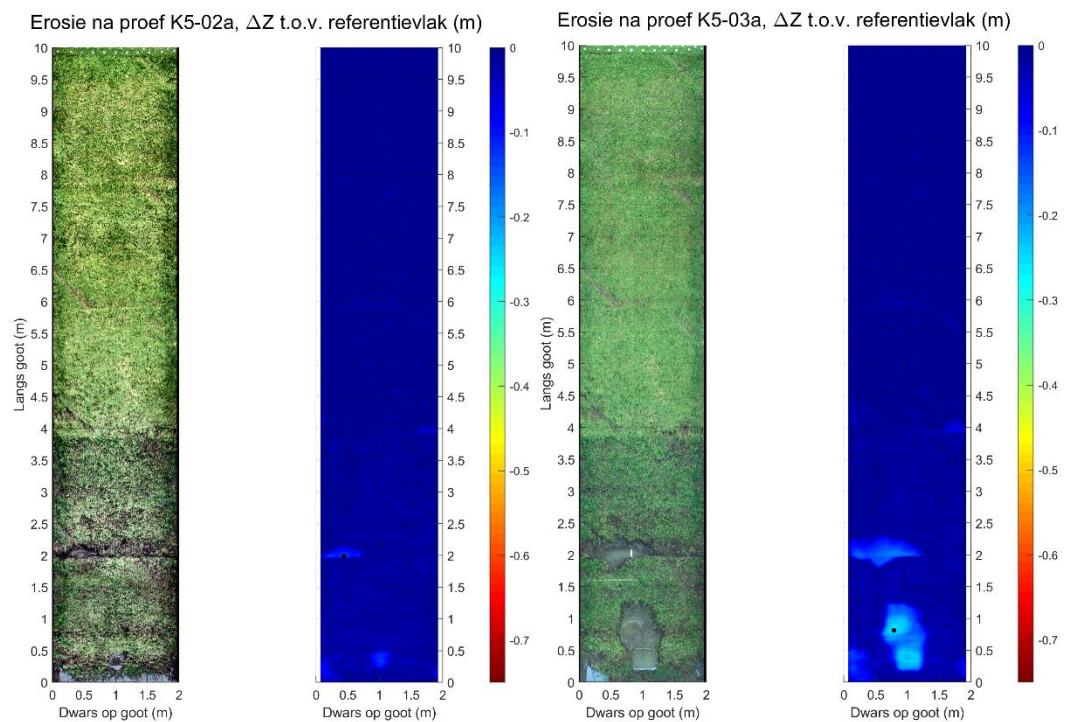


Fig. A-24 Resultaat laserscan Proef K5_02 en K5_03 (erosiediepte t.o.v. na K5_01)

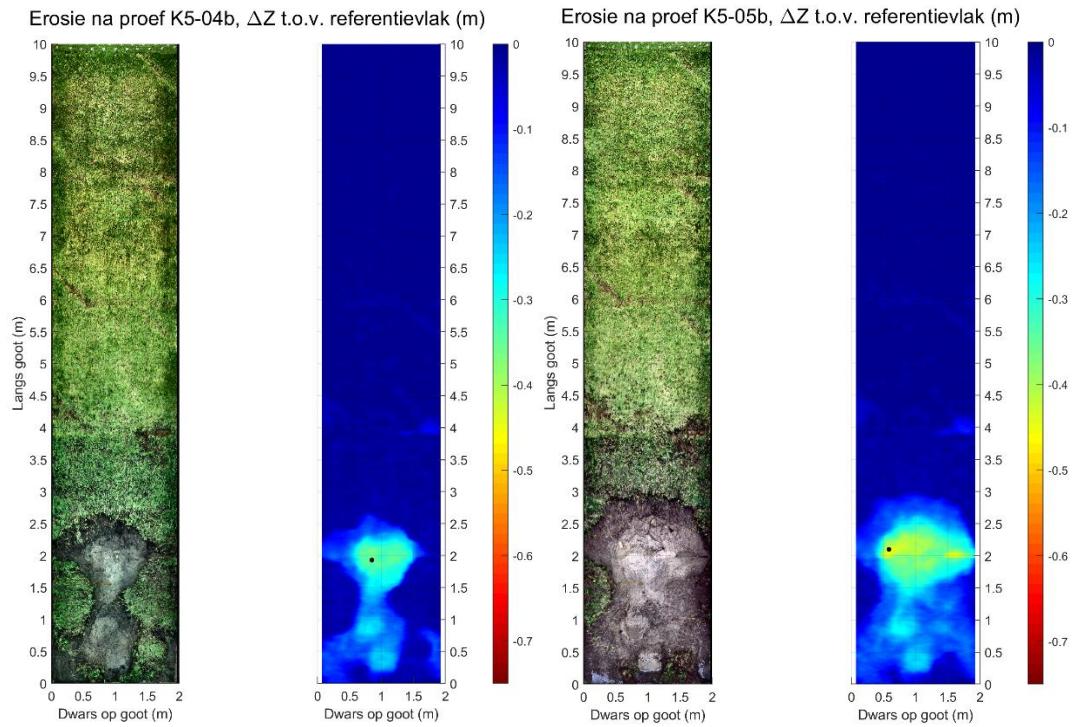


Fig. A-25 Resultaat laserscan Proef K5_04 en K5_05 (erosiediepte t.o.v. na K5_01)

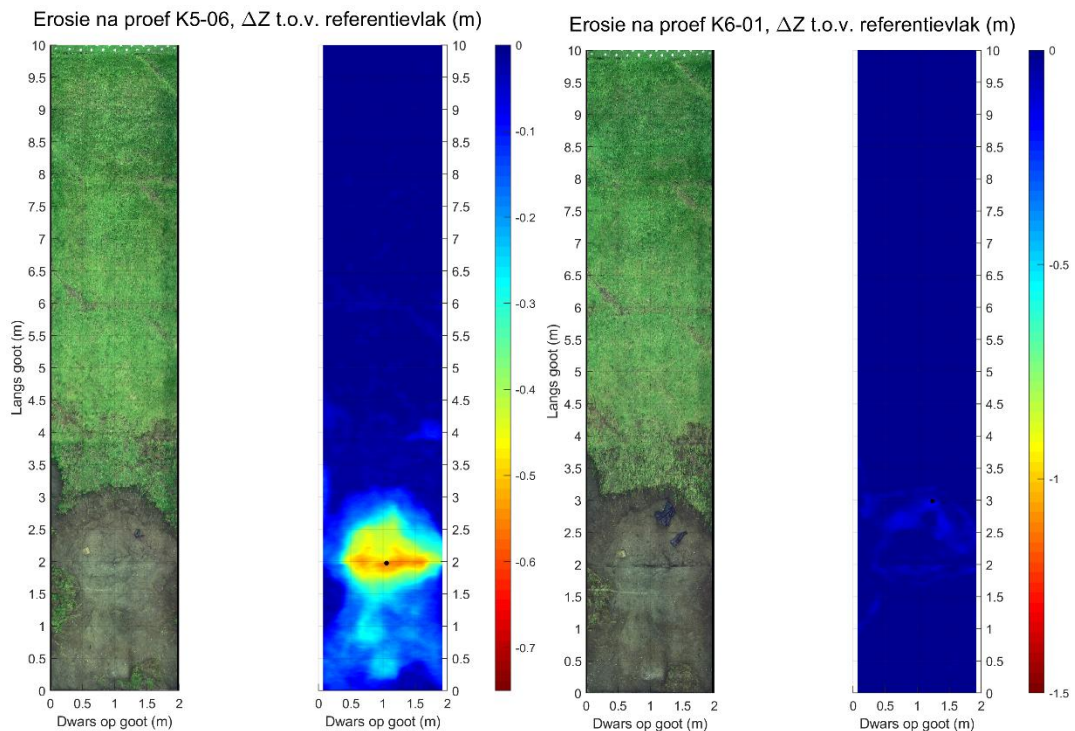


Fig. A-26 Resultaat laserscan Proef K5_06 (erosiediepte t.o.v. na K5_01) en K6_01 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

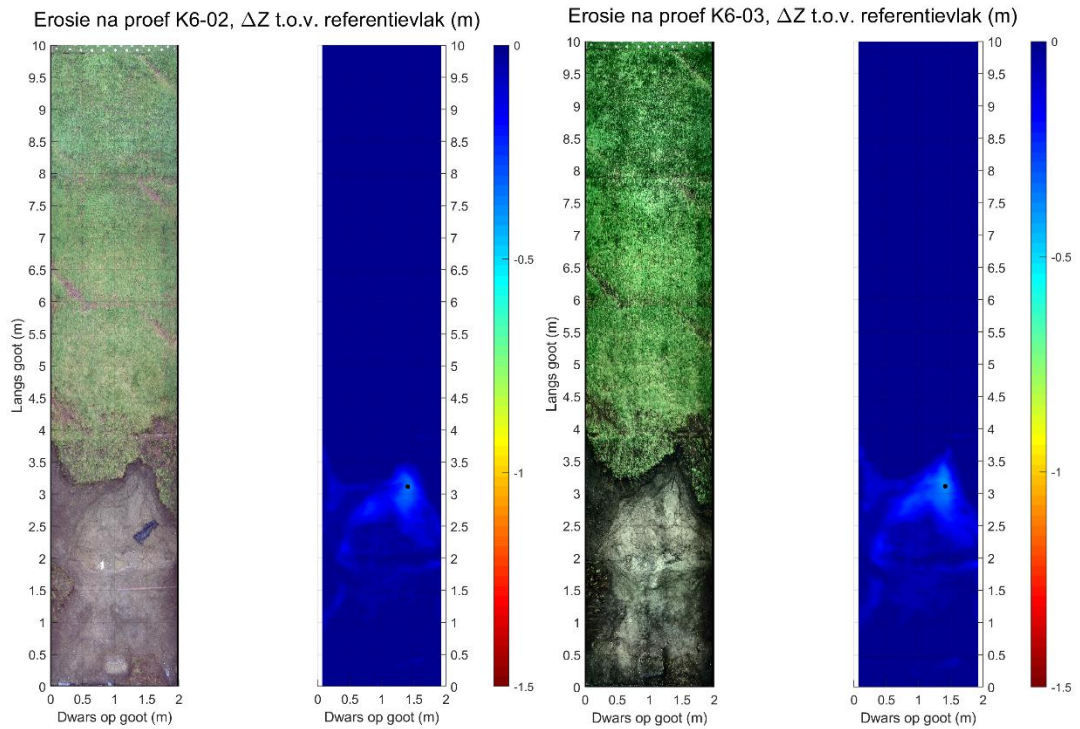


Fig. A-27 Resultaat laserscan Proef K6_02 en K6_03 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

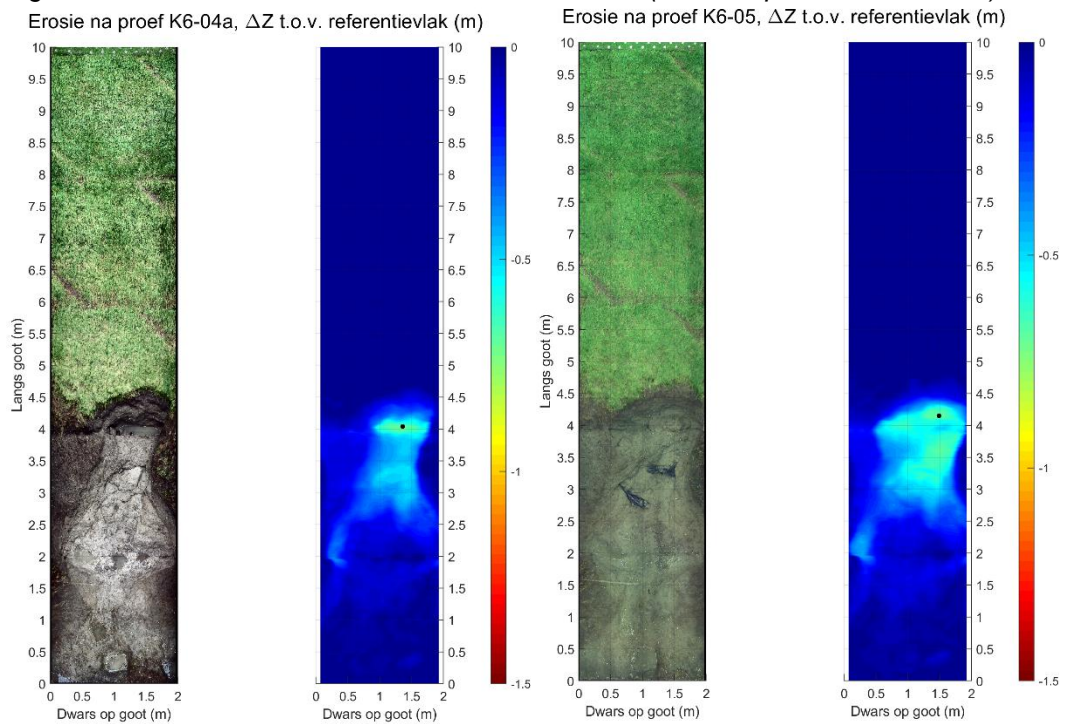


Fig. A-28 Resultaat laserscan Proef K6_04 en K6_05 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

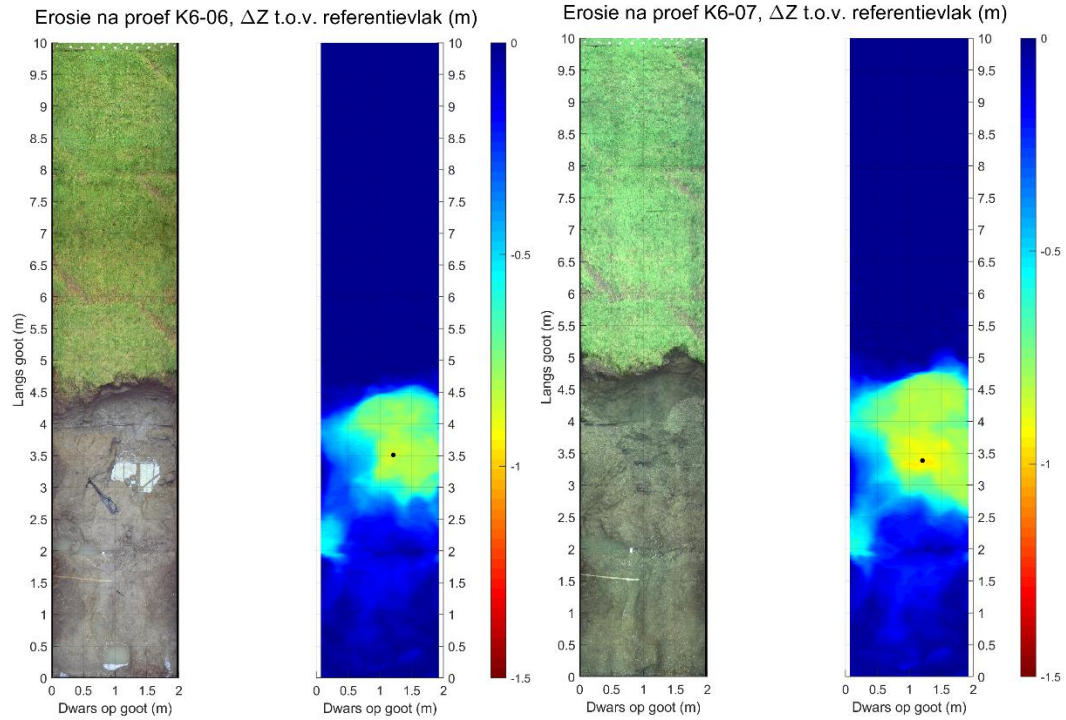


Fig. A-29 Resultaat laserscan Proef K6_06 en K6_07 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

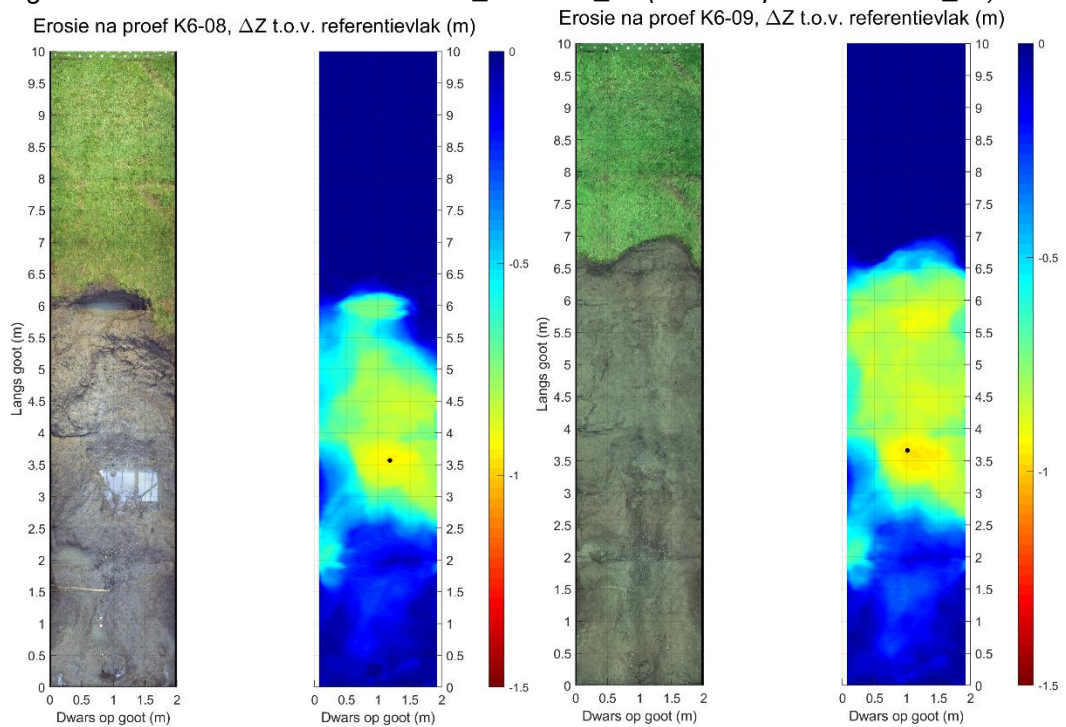


Fig. A-30 Resultaat laserscan Proef K6_08 en K6_09 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

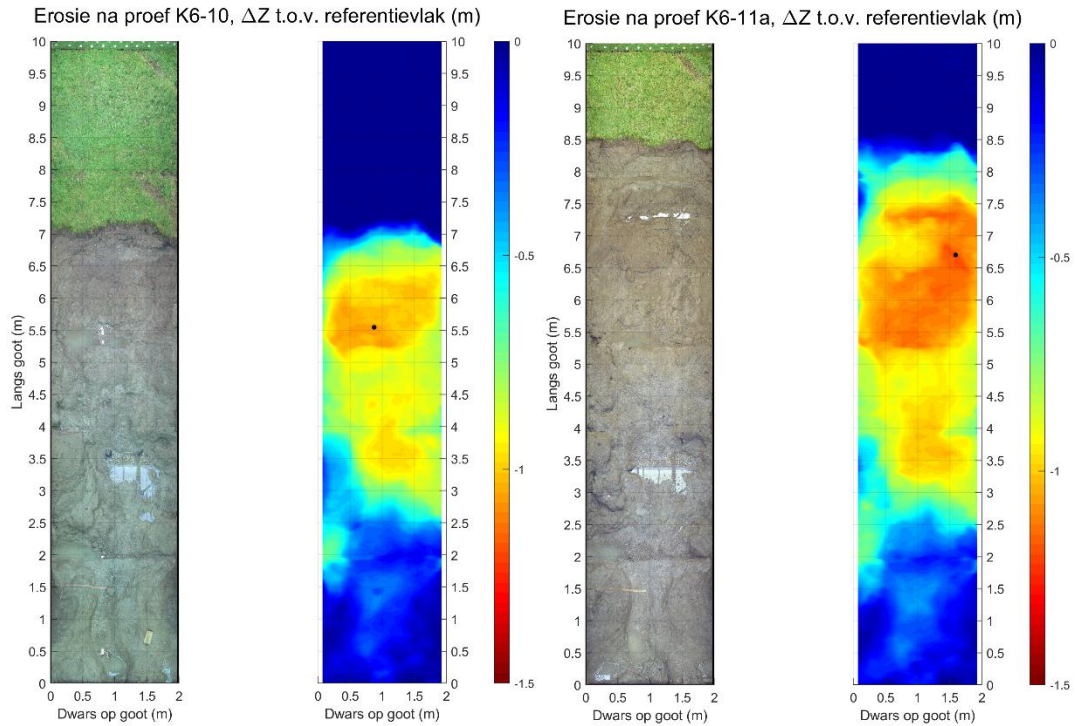


Fig. A-31 Resultaat laserscan Proef K6_10 en K6_11 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

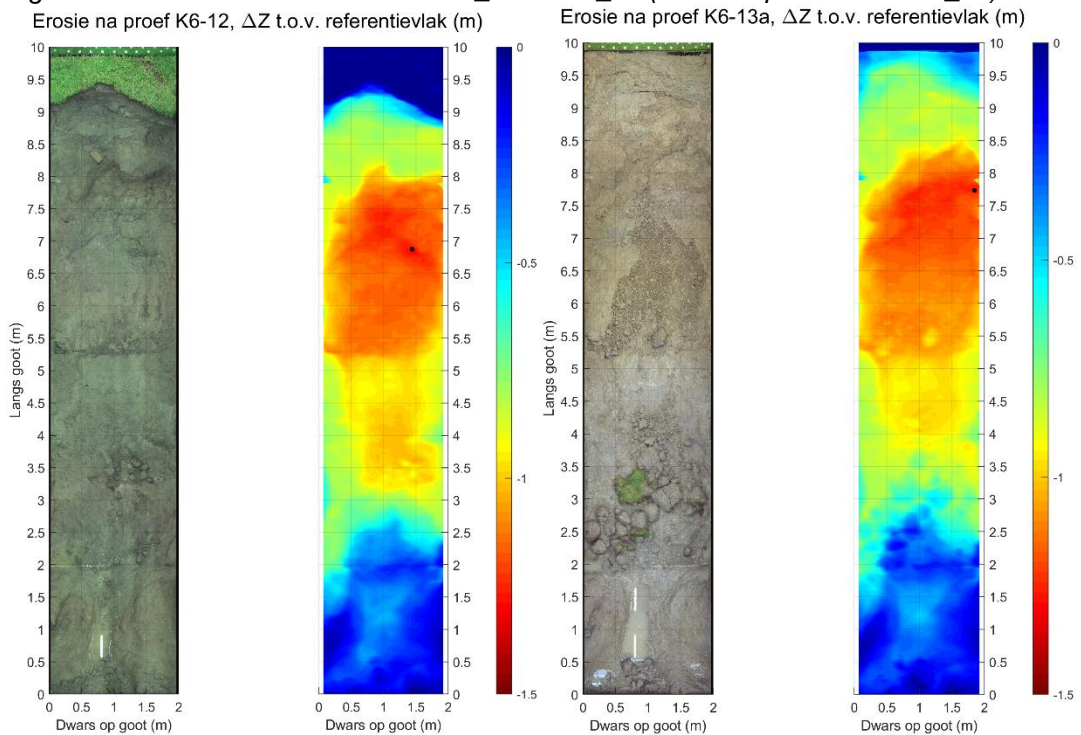


Fig. A-32 Resultaat laserscan Proef K6_12 en K6_13 (erosiediepte t.o.v. na K5_06)

A.5 Dwarsprofielen op basis van laserscans K1

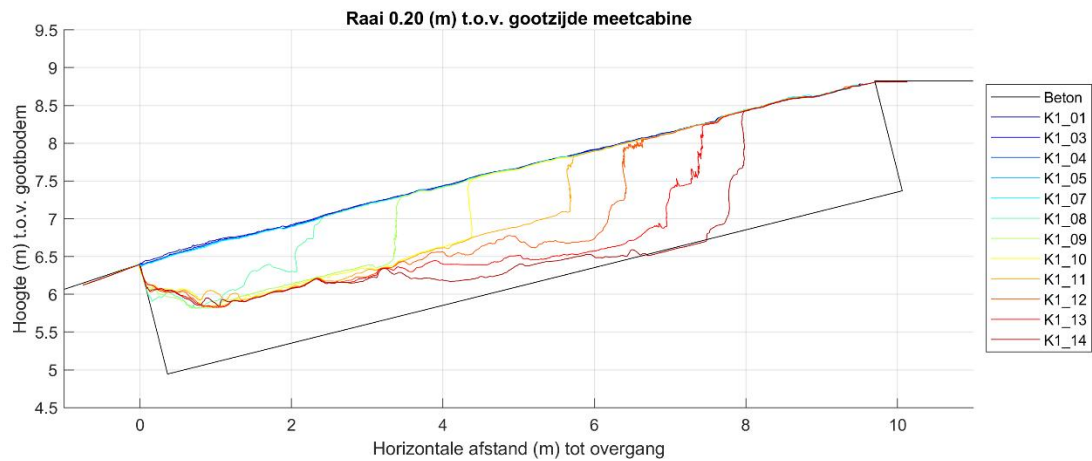


Fig. A-33 Dwarsprofielen serie K1 in raai $y = 0,20$ m

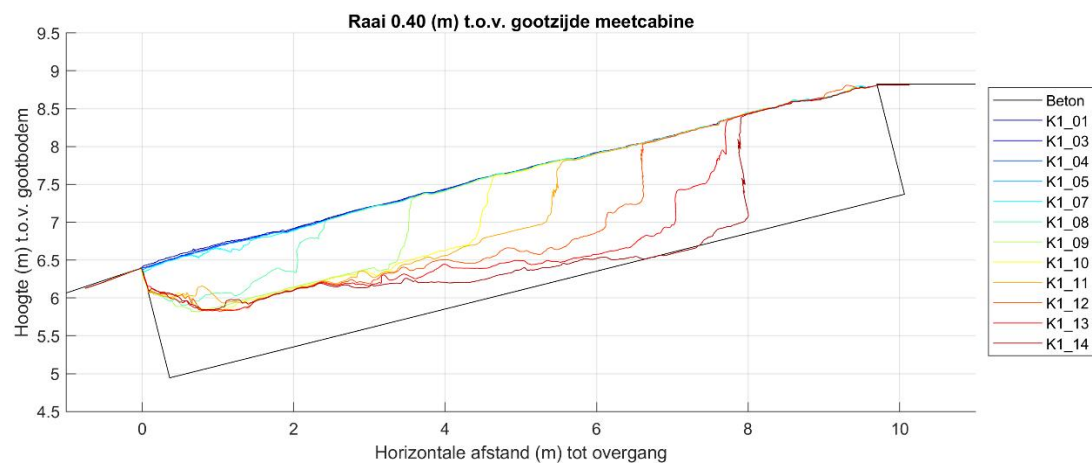


Fig. A-34 Dwarsprofielen serie K1 in raai $y = 0,40$ m

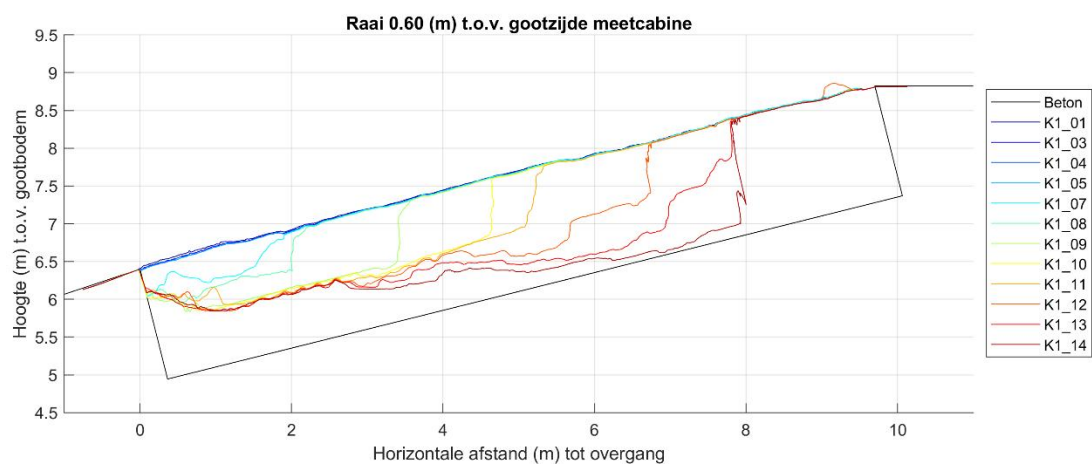


Fig. A-35 Dwarsprofielen serie K1 in raai $y = 0,60$ m

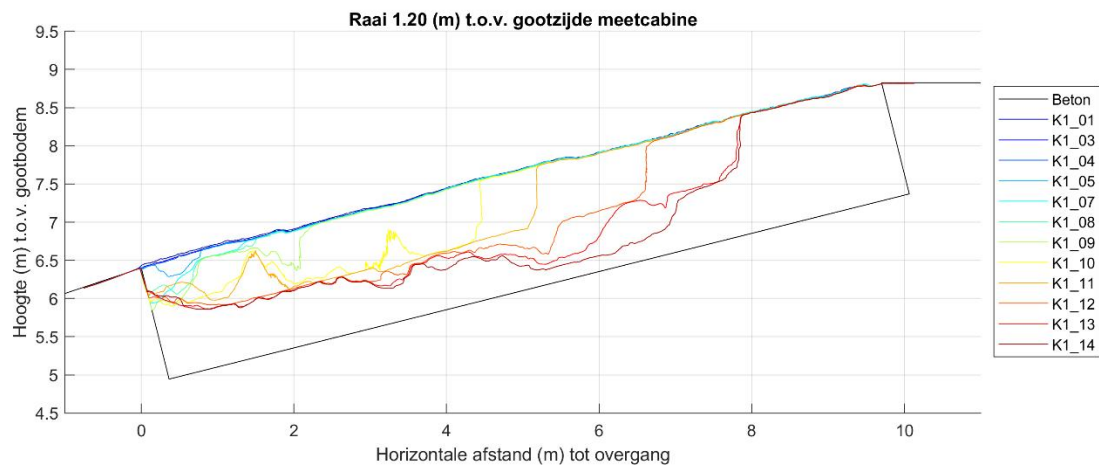


Fig. A-36 Dwarsprofielen serie K1 in raai $y = 1,20$ m

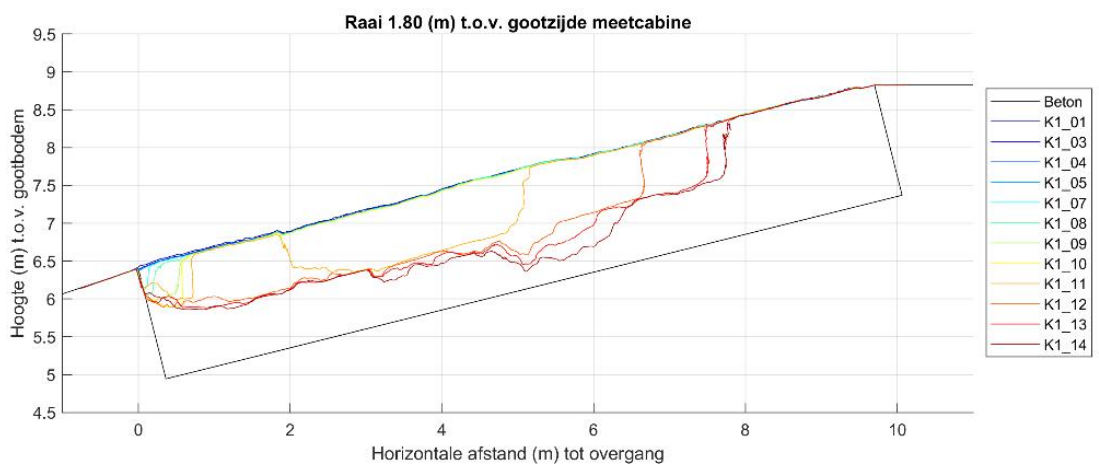


Fig. A-37 Dwarsprofielen serie K1 in raai $y = 1,80$ m

A.6 Dwarsprofielen op basis van laserscans K2

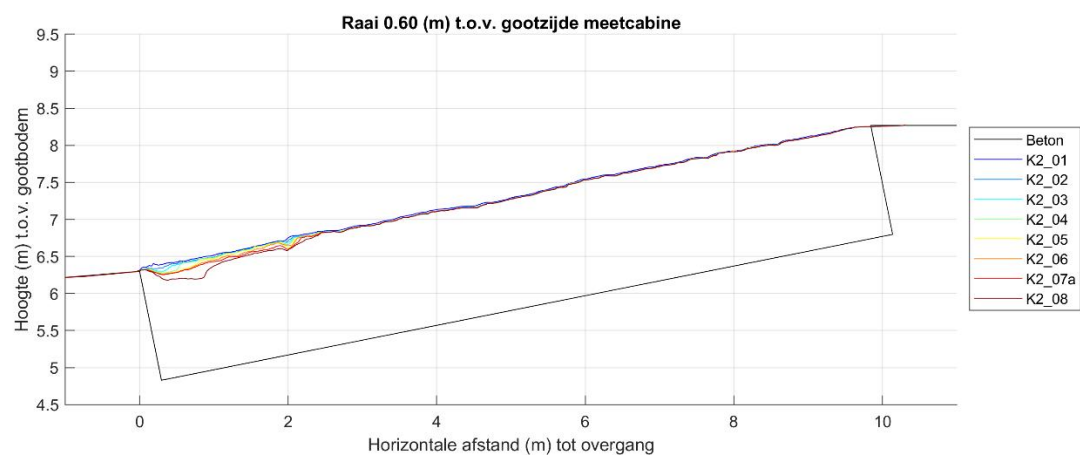


Fig. A-38 Dwarsprofielen serie K2 in raai $y = 0,60$ m

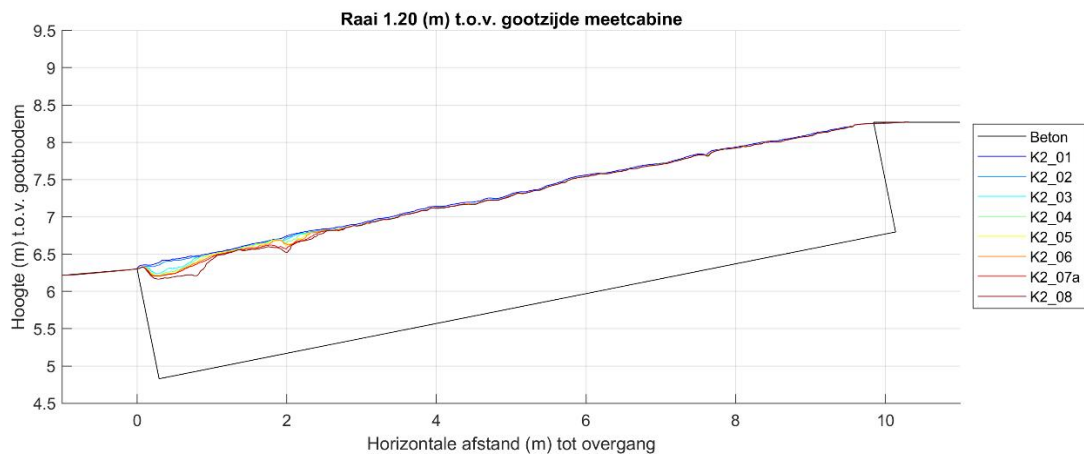


Fig. A-39 Dwarsprofielen serie K2 in raai $y = 1,20$ m

A.7 Dwarsprofielen op basis van laserscans K3

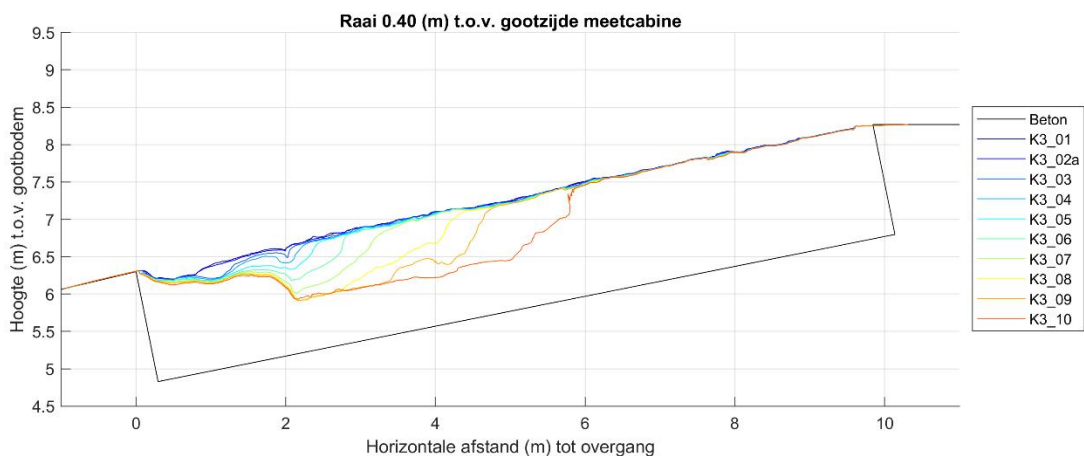


Fig. A-40 Dwarsprofielen serie K3 in raai $y = 0,40$ m

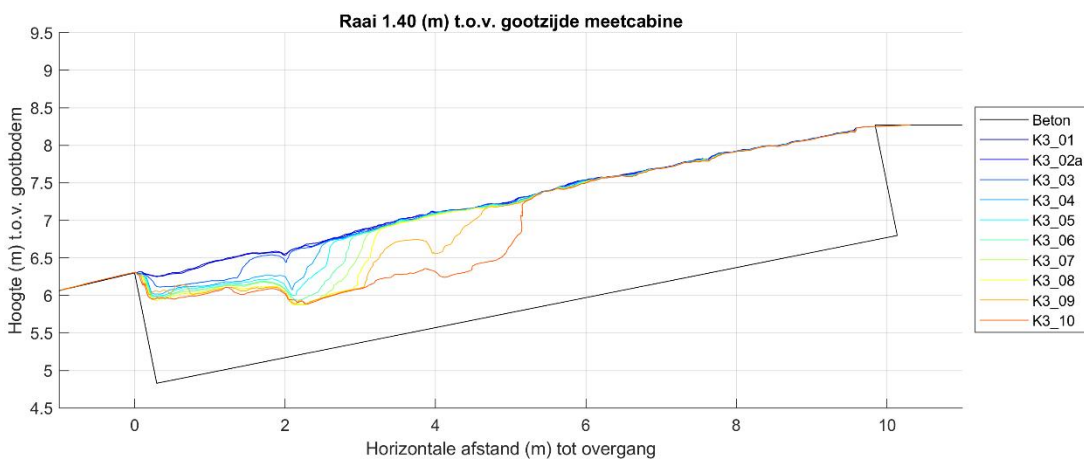


Fig. A-41 Dwarsprofielen serie K3 in raai $y = 1,40$ m

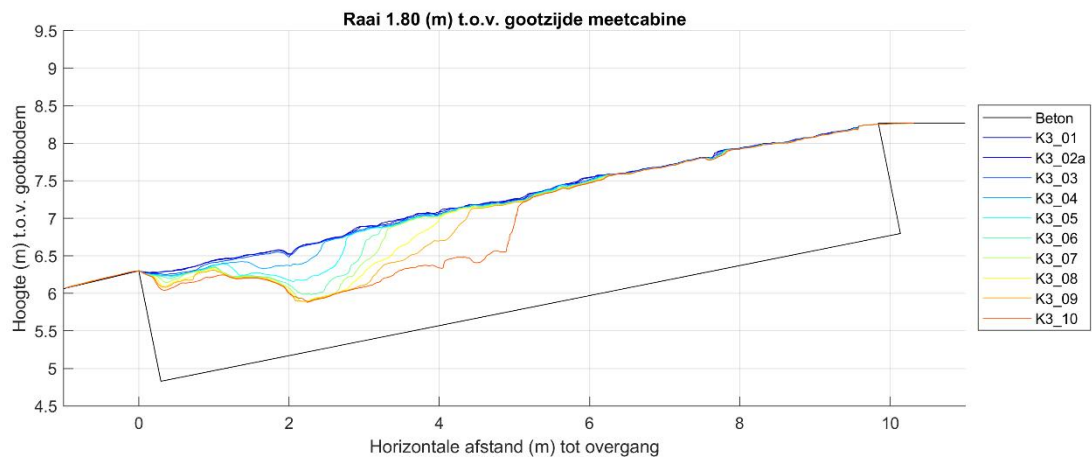


Fig. A-42 Dwarsprofielen serie K3 in raai $y = 1,80$ m

A.8 Dwarsprofielen op basis van laserscans K4

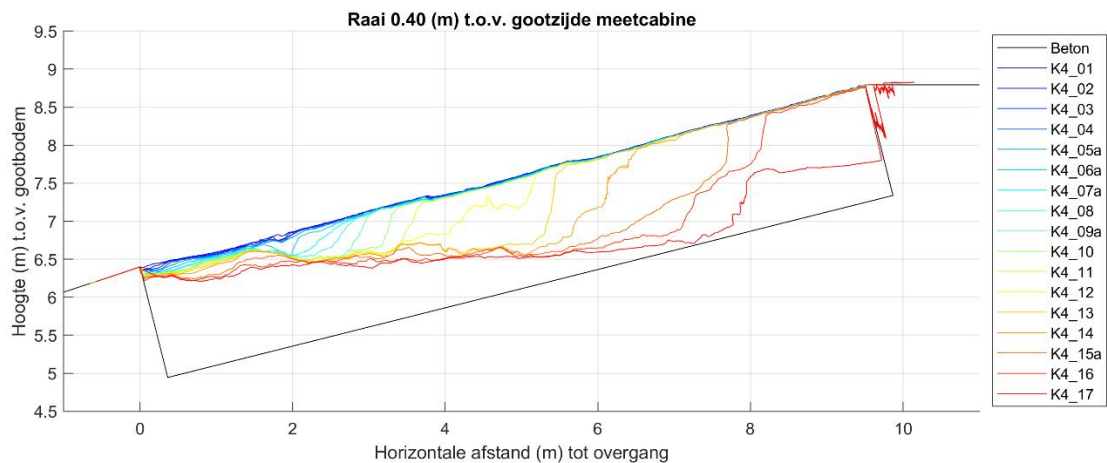


Fig. A-43 Dwarsprofielen serie K4 in raai $y = 0,40$ m

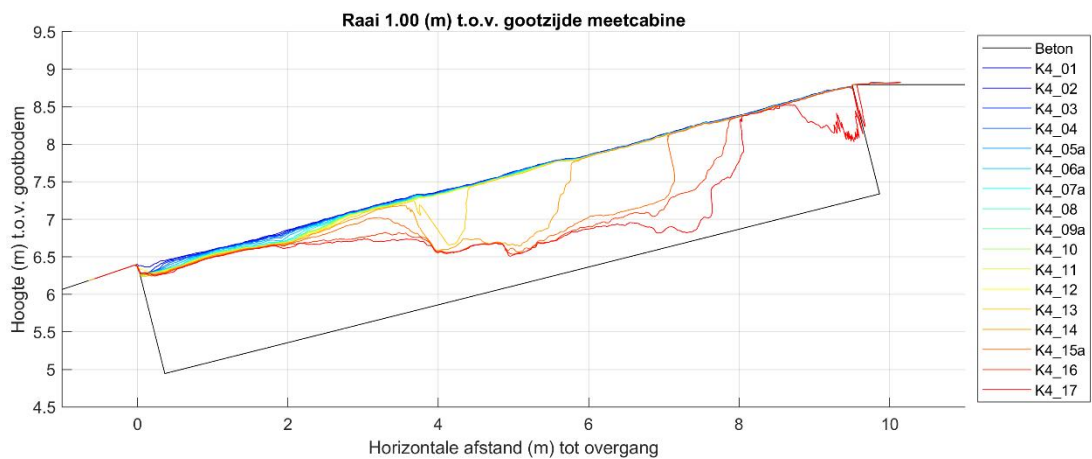


Fig. A-44 Dwarsprofielen serie K4 in raai $y = 1,00$ m

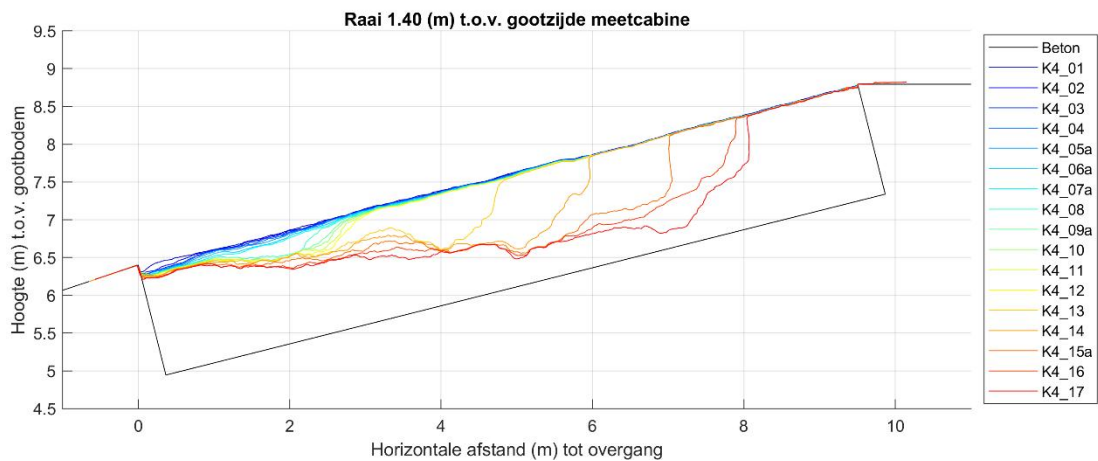


Fig. A-45 Dwarsprofielen serie K4 in raai $y = 1,40$ m

A.9 Dwarsprofielen op basis van laserscans K5

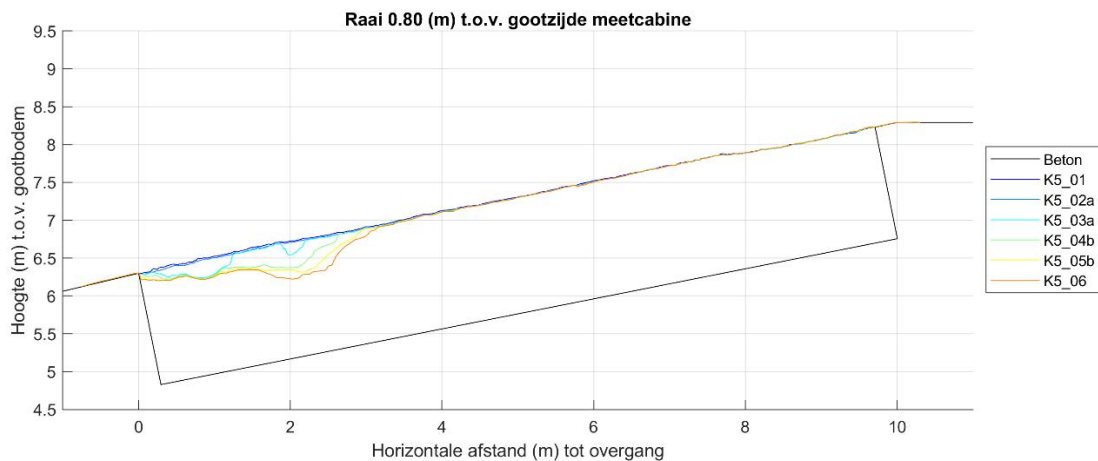


Fig. A-46 Dwarsprofielen serie K5 in raai $y = 0,80$ m

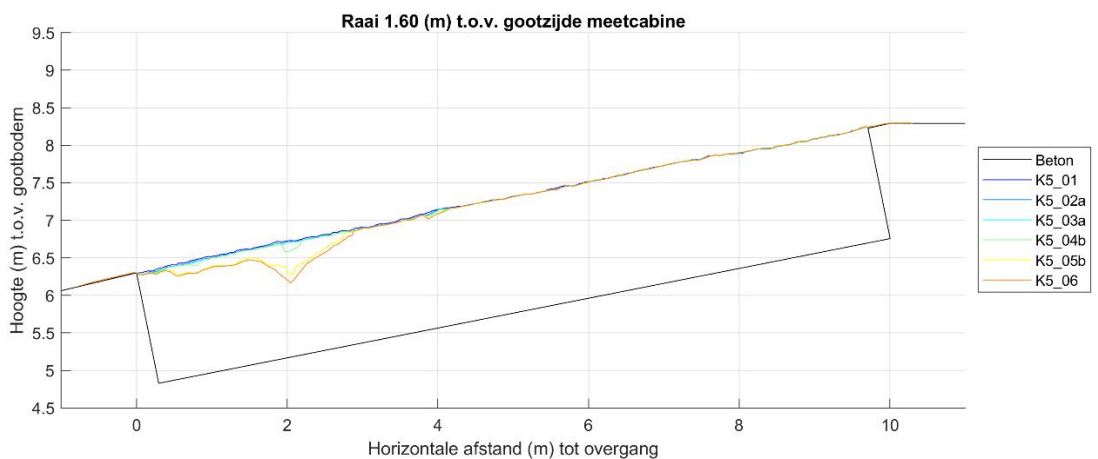


Fig. A-47 Dwarsprofielen serie K5 in raai $y = 1,60$ m

A.10 Dwarsprofielen op basis van laserscans K6

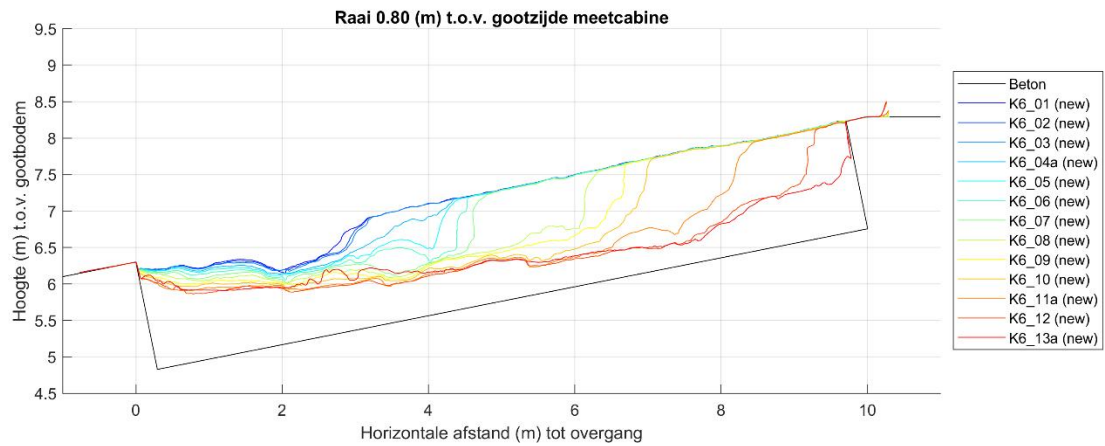


Fig. A-48 Dwarsprofielen serie K6 in raai $y = 0,80$ m

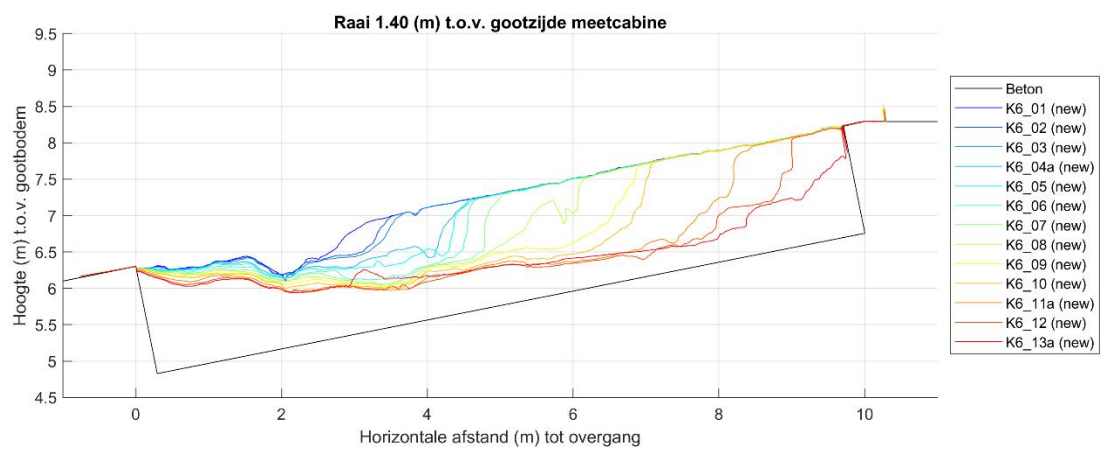


Fig. A-49 Dwarsprofielen serie K6 in raai $y = 1,40$ m

A.11 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum

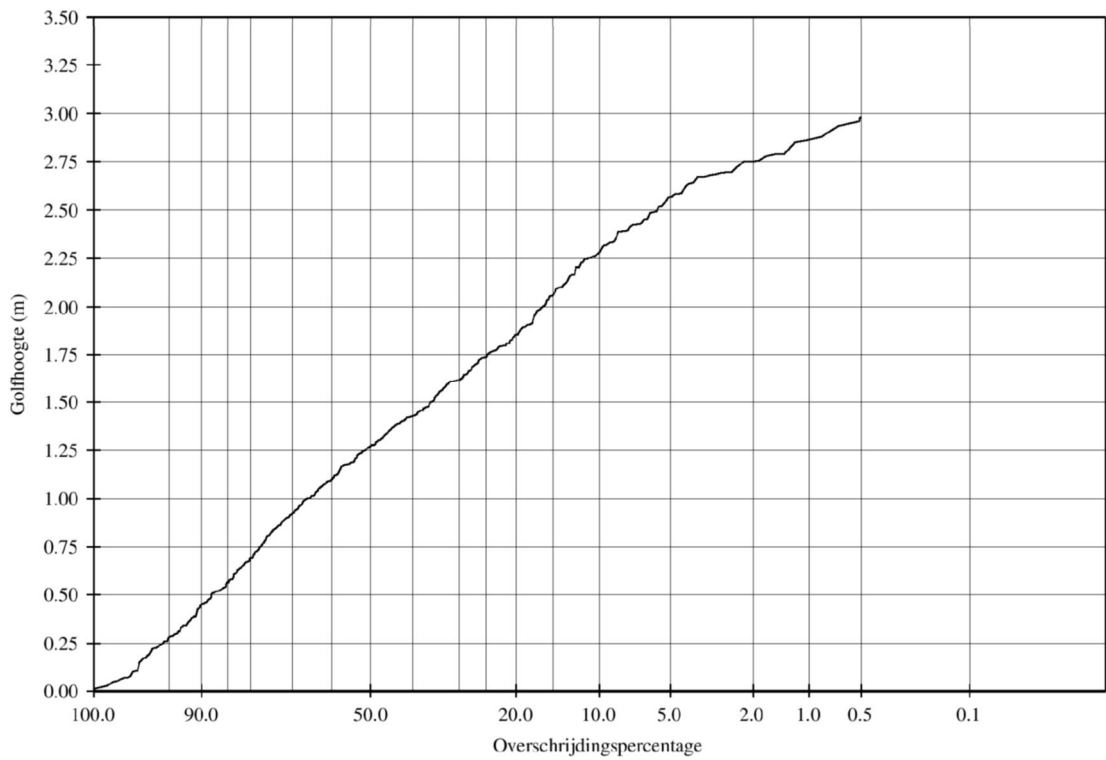


Fig. A-50 Golfhoogte overschrijdingskromme van proef K1_11

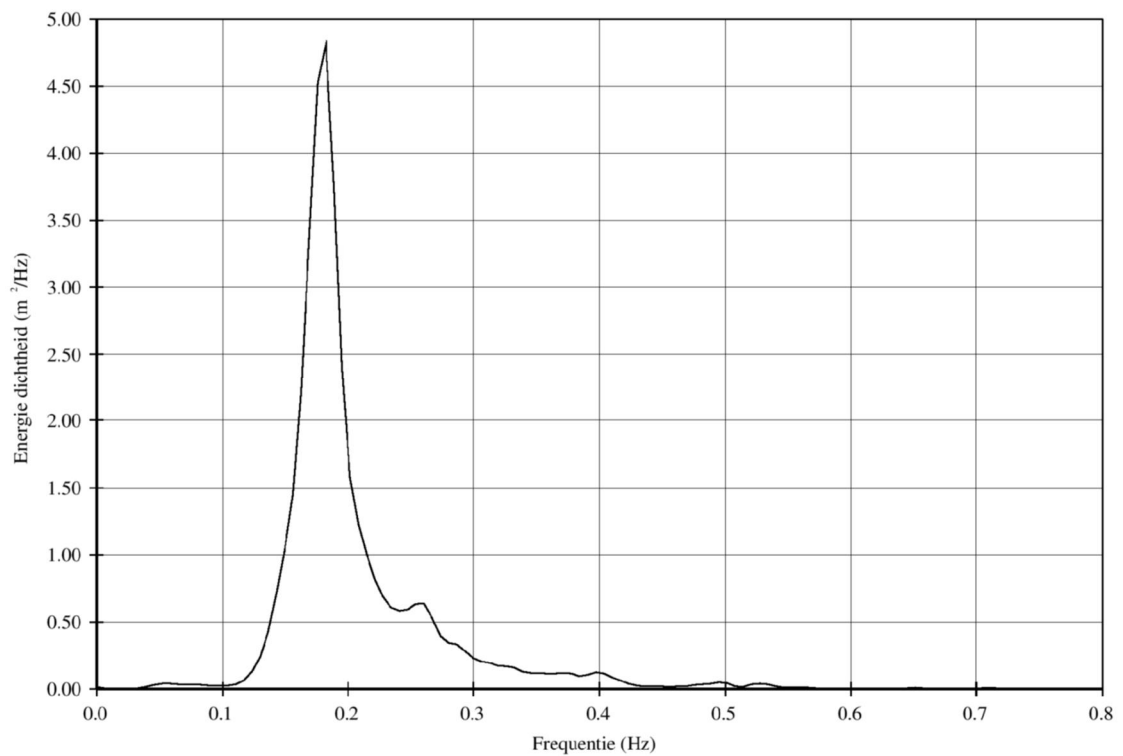


Fig. A-51 Spectrum van de golven van proef K1_11

B Foto's

B.1 Opbouw modelopstelling



Fig. B-1 Aanleg van de zandkern van het ondertalud

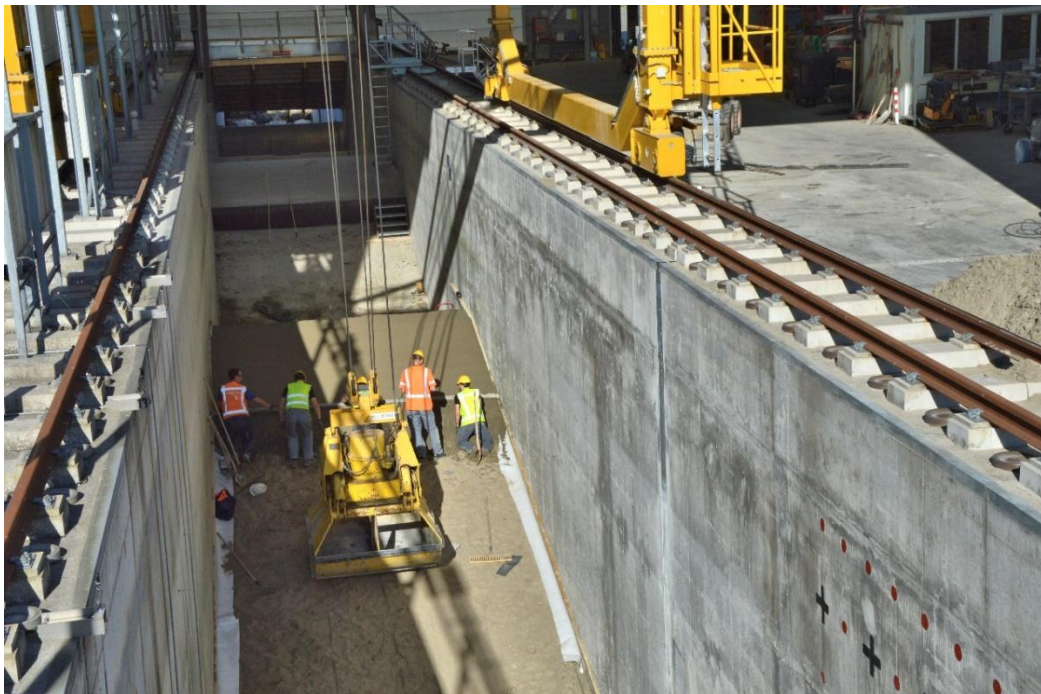


Fig. B-2 Zandcement aanbrengen op het ondertalud



Fig. B-3 Zandcement aanbrengen op het ondertalud

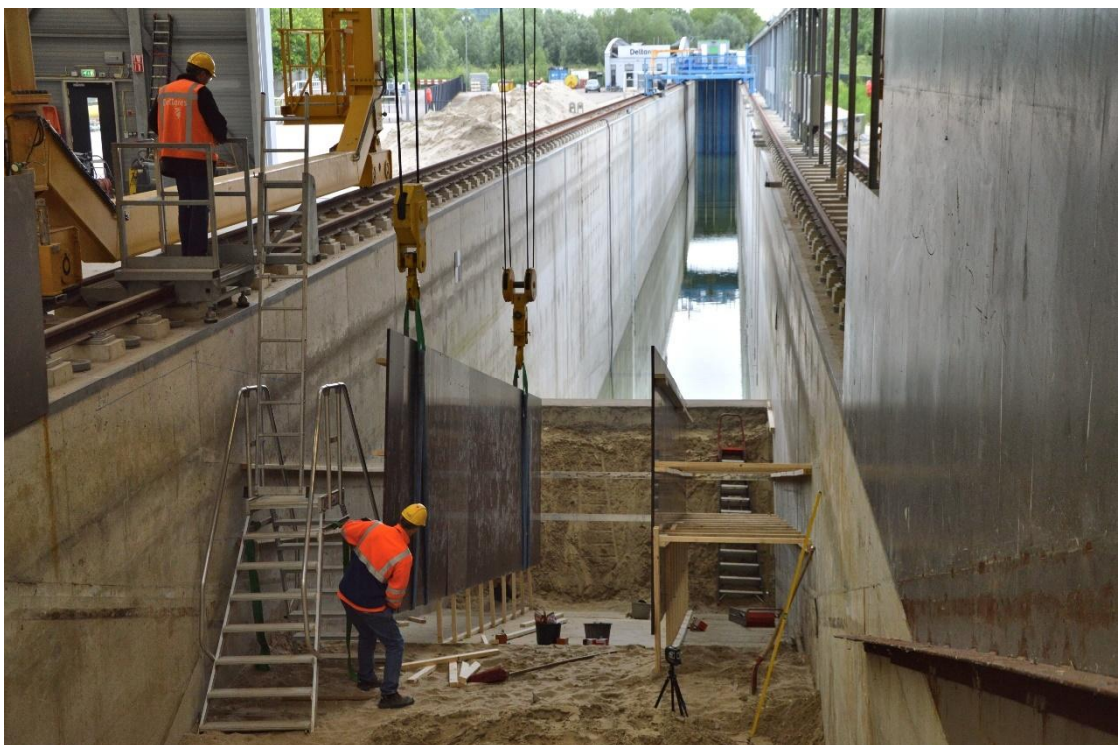


Fig. B-4 Houten wanden aan weerszijden van het grastalud plaatsen

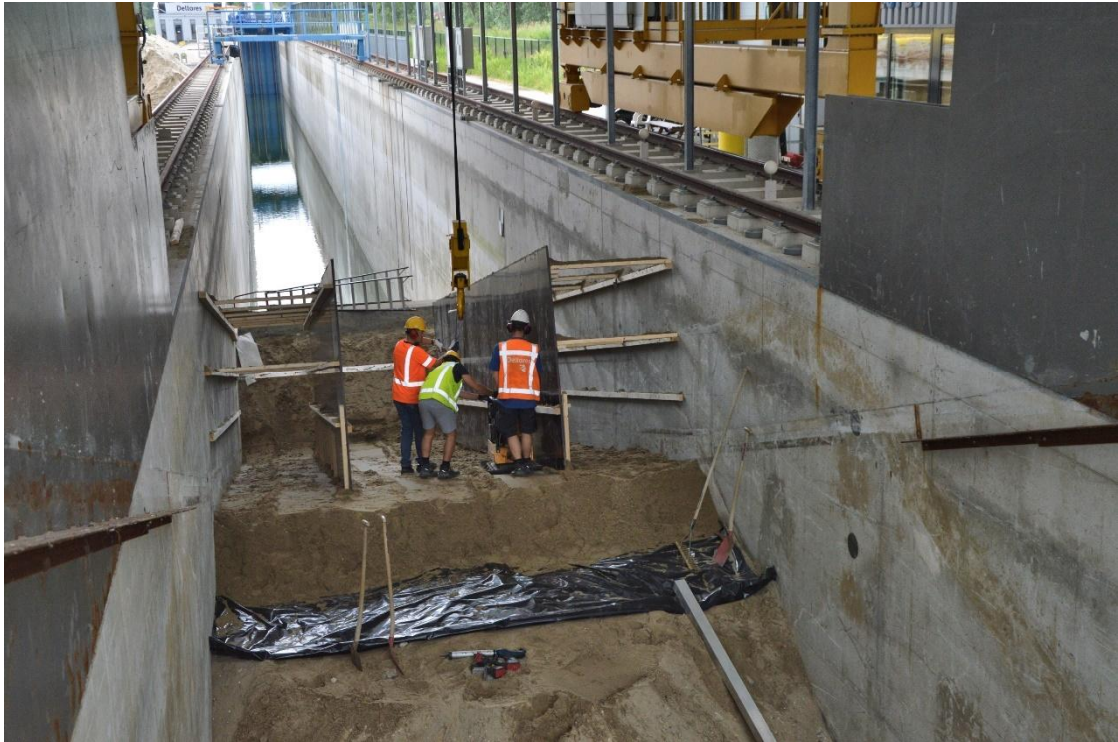


Fig. B-5 Zand aanvullen en verdichten tot het niveau van de onderzijde van de kleilaag

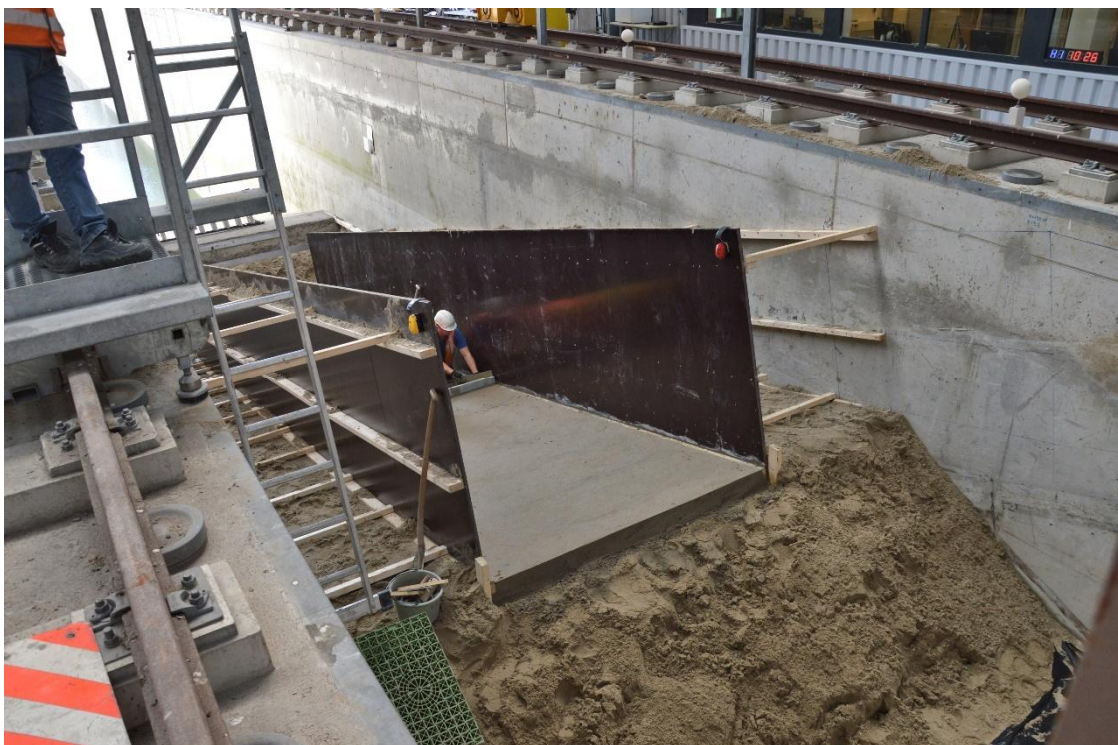


Fig. B-6 Zandcement aanbrengen als vloer onder de klei



Fig. B-7 Overgangsconstructie monteren

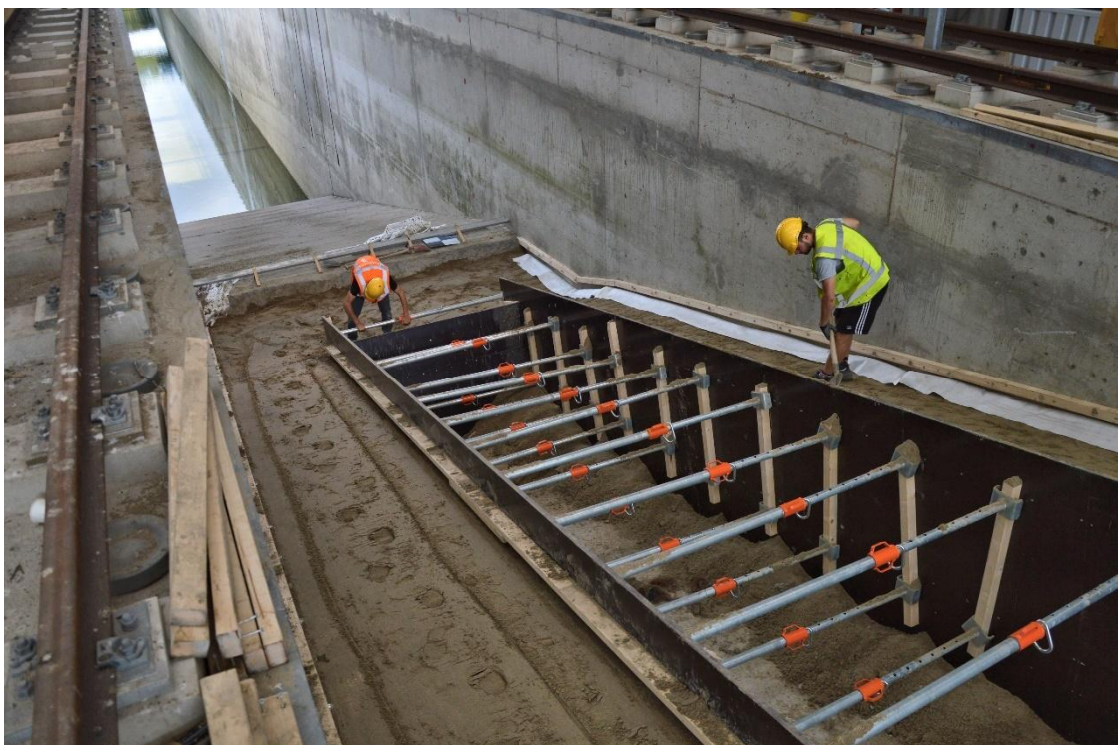


Fig. B-8 Zand onder de stoepen naast het gras aanbrengen en verdichten



Fig. B-9 Zandcement aanbrengen op de stoepen naast het gras

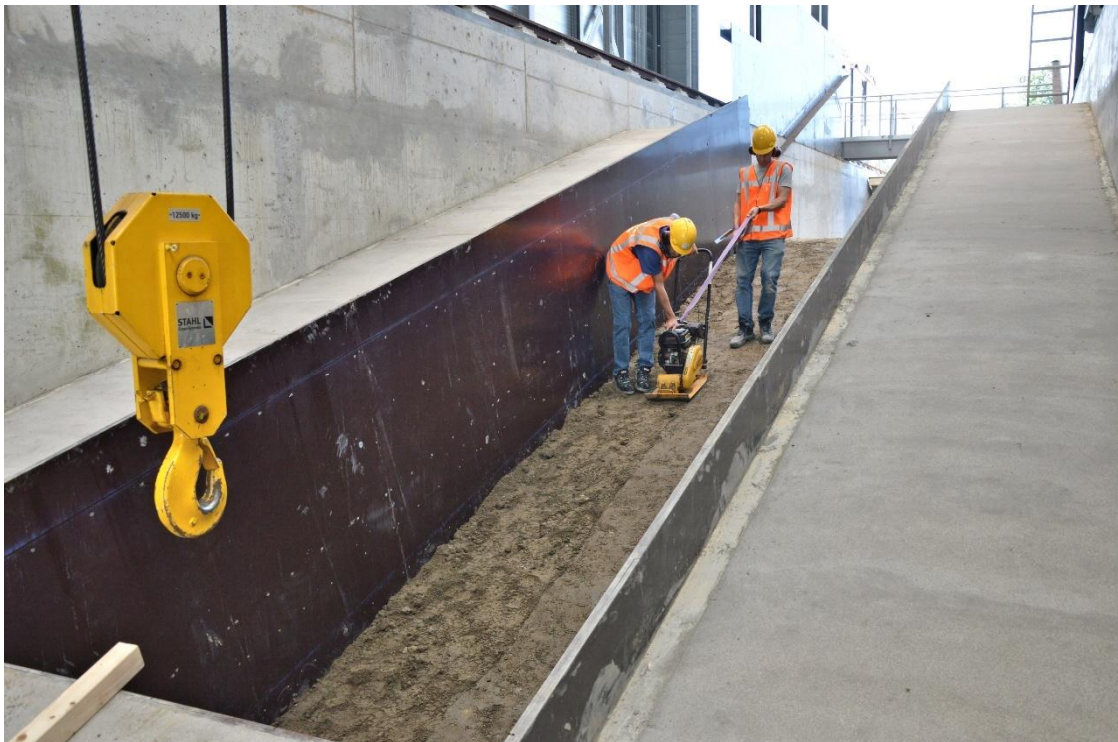


Fig. B-10 Kleilaag aanbrengen van 20 à 22 cm dik van geroerde en verdichte klei

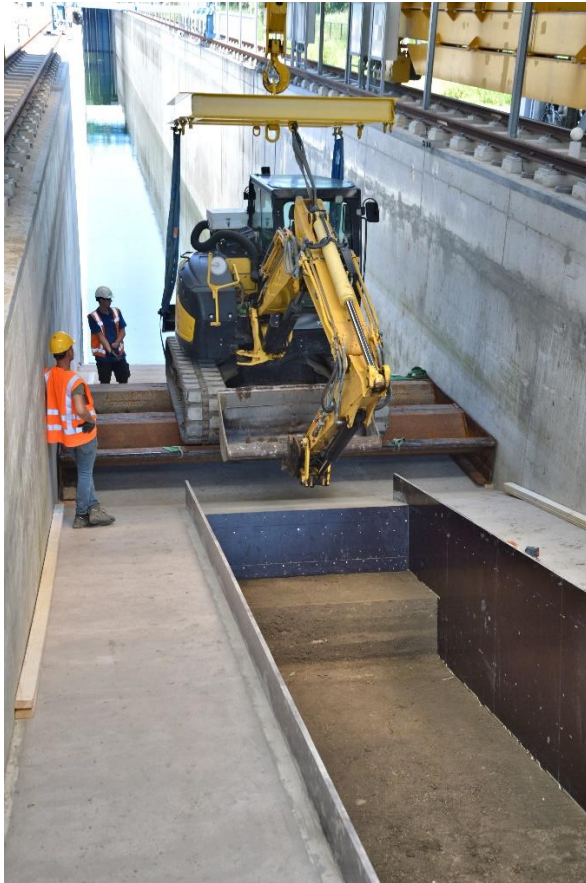


Fig. B-11 Kraantje op stalen brug staat klaar om te assisteren bij het plaatsen van de kleiblokken



Fig. B-12 Gras verwijderen van de kleiblokken (bij twee kleiblokken was dit reeds op de Lauwersmeerdijk gedaan; bij de andere twee is dit naast de Deltagoot gedaan)



Fig. B-13 Staalplaat onder het eerste kleiblok uittrekken met een lier op een frame. Er wordt water op de staalplaat gespoten als smeermiddel bij het uittrekken van de staalplaat.

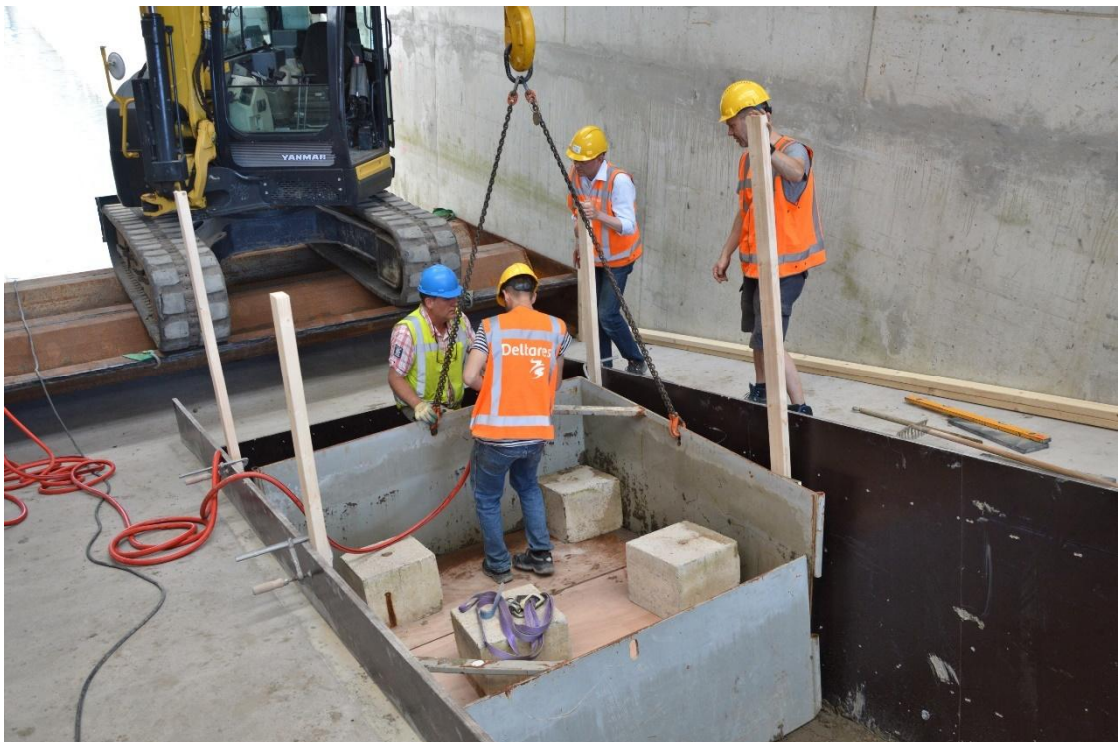


Fig. B-14 Zijwand van het kleiblok eruit trekken (de zijwanden bestaan uit twee delen). Ook bij het trekken van de zijwanden wordt er water gebruikt als smeermiddel om te voorkomen dat de klei aan de wanden blijft kleven.

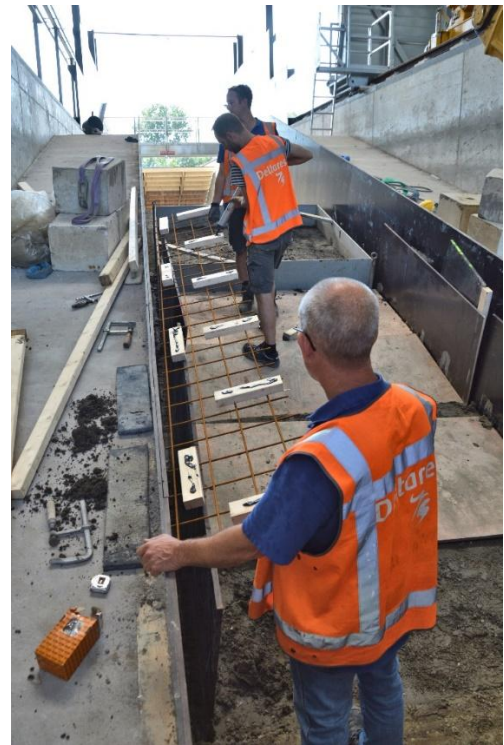


Fig. B-15 Wapeningsstaal voorbereiden en aanbrengen tussen de kleiblokken en de zijwand



Fig. B-16 Onderste laag kleiblokken is gereed



Fig. B-17 Staalplaat onder eerste kleiblok met gras uittrekken



Fig. B-18 Zijwand van een kleiblok met gras eruit trekken

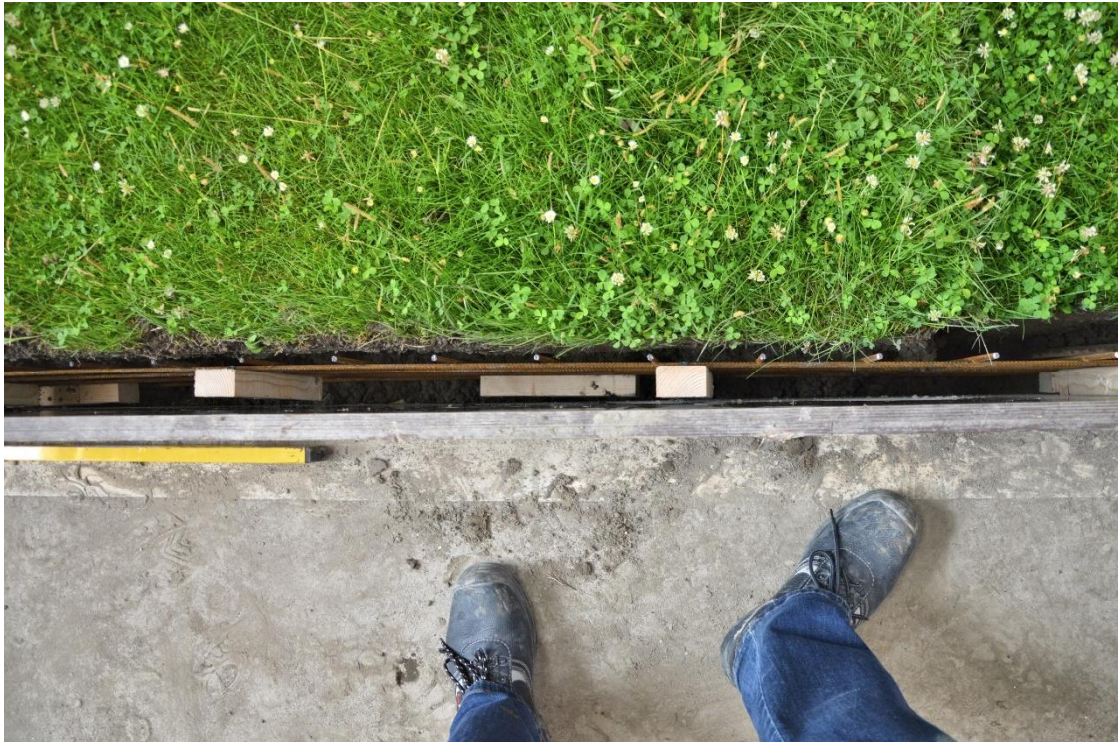


Fig. B-19 Wapeningsstaal tussen kleiblokken met gras en zijwand (deze ruimte wordt volgestort met zandcement voor een optimale aansluiting tussen klei en zijwand)



Fig. B-20 Zandcement aanbrengen in de spleet tussen de kleiblokken en de zijwand

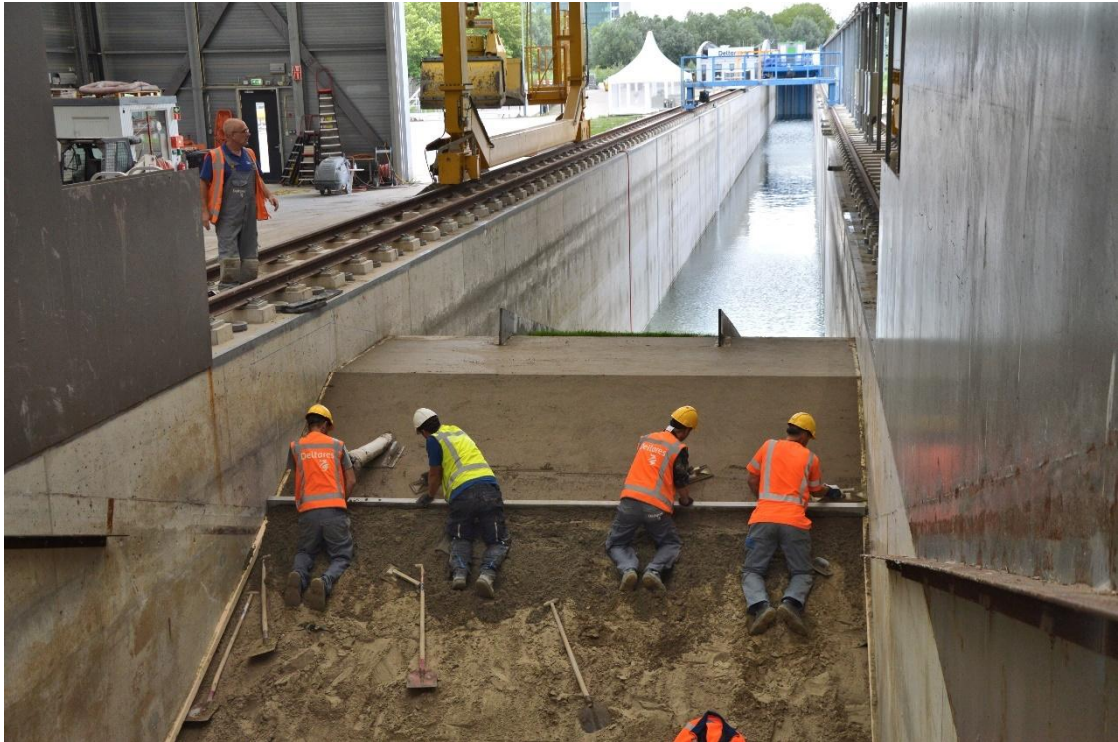


Fig. B-21 Zandcement aanbrengen op kruin en binnentalud

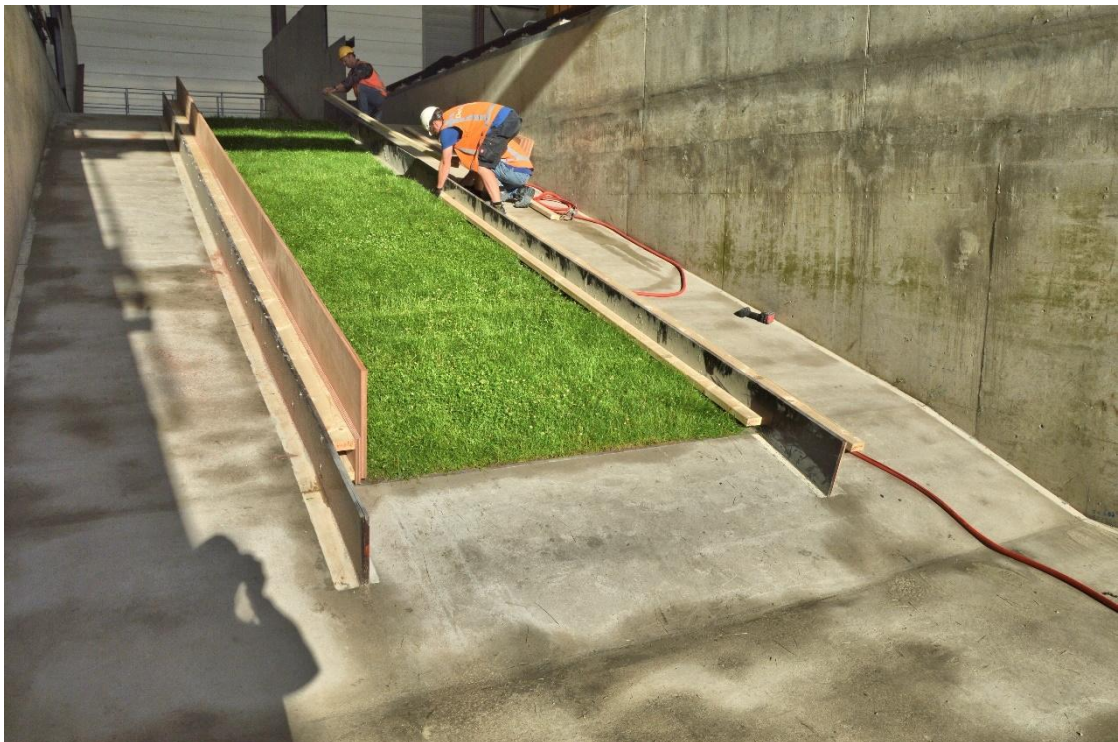


Fig. B-22 Houten schotten monteren boven het zandcement dat tussen het gras en de zijwand is gestort



Fig. B-23 Verlichting met groeilampen boven het gras om het in optimale conditie te houden

B.2 Proeven K1



Fig. B-24 Tijdens proef K1_01



Fig. B-25 Na proef K1_02



Fig. B-26 Kunstmatige schade vóór proef K1_04



Fig. B-27 Tijdens proef K1_04



Fig. B-28 Erosie na proef K1_04



Fig. B-29 De aansluiting tussen eerste en tweede blok is niet helemaal vlak



Fig. B-30 Kunstmatige schade vóór proef K1_05



Fig. B-31 Tijdens proef K1_05



Fig. B-32 Erosiekuil na proef K1_05



Fig. B-33 Tijdens proef K1_07



Fig. B-34 Erosiekuil na proef K1_07



Fig. B-35 Erosiekuil na proef K1_07



Fig. B-36 Erosiekuil na proef K1_08



Fig. B-37 Erosiekuil na proef K1_08



Fig. B-38 Erosiekuil na proef K1_09



Fig. B-39 Erosiekuil na proef K1_09



Fig. B-40 Erosiekuil na proef K1_10



Fig. B-41 Erosiekuil na proef K1_10



Fig. B-42 Kunstmatige schade aan bodem van erosiekuil omdat erosie moeite had om in de onderste rij kleiblokken te komen



Fig. B-43 Tijdens golfploop botst het water tegen de erosieklif en spat omhoog (proef K1_11)



Fig. B-44 Erosiekuil na proef K1_11



Fig. B-45 Erosiekuil na proef K1_11

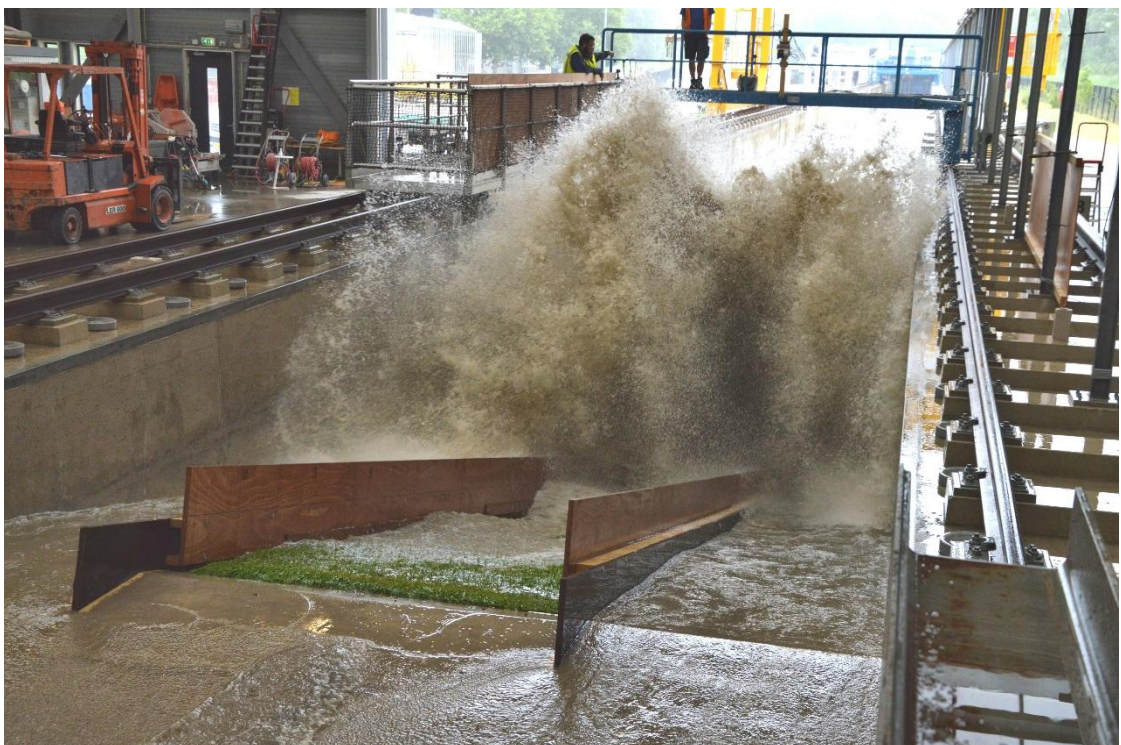


Fig. B-46 Tijdens proef K1_12



Fig. B-47 Erosiekuil na proef K1_12



Fig. B-48 Erosiekuil na proef K1_12



Fig. B-49 Tijdens golfoploop botst het water tegen de erosieklif en spat omhoog (proef K1_13)



Fig. B-50 Tijdens proef K1_13



Fig. B-51 Erosiekuil na proef K1_13



Fig. B-52 Erosiekuil na proef K1_13



Fig. B-53 Erosiekuil na proef K1_14



Fig. B-54 Erosiekuil na proef K1_14

B.3 Verbouwing naar K2



Fig. B-55 Verhogen van de berm

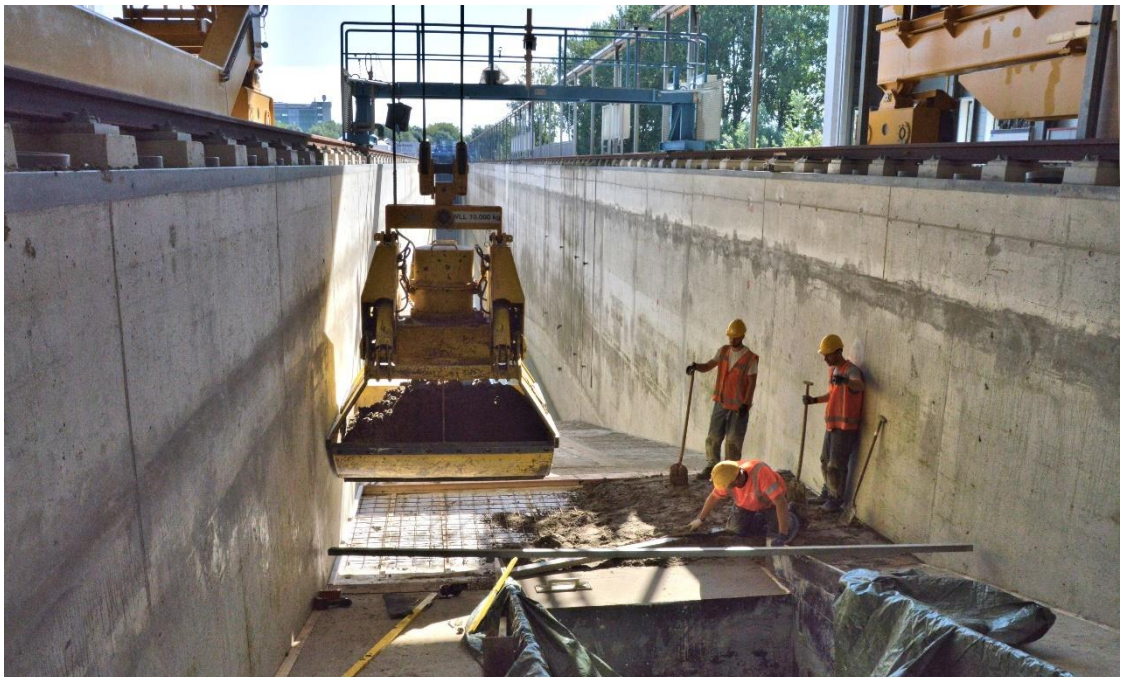


Fig. B-56 Storten van zandcement op de berm



Fig. B-57 De bodemplaat onder het grasblok uittrekken



Fig. B-58 Het lichten van de zijkant van de stalen mal bij het plaatsen van de grasblokken



Fig. B-59 Kruin afwerken



Fig. B-60 Houten platen langs het gras plaatsen



Fig. B-61 Gras in de hal van de Deltagoot krijgt water

B.4 Proeven K2



Fig. B-62 Tijdens proef K2_01



Fig. B-63 Verticureren van het gras ter verzwakking van de grasbekleding



Fig. B-64 Na proef K2_02



Fig. B-65 Na proef K2_03



Fig. B-66 Na proef K2_04



Fig. B-67 Na proef K2_05



Fig. B-68 Na proef K2_06



Fig. B-69 Tijdens proef K2_07



Fig. B-70 Na proef K2_07a



Fig. B-71 Na proef K2_08

B.5 Verbouwing naar K3



Fig. B-72 Verwijderen van de bermverhoging



Fig. B-73 Aanbrengen van zandcement op aansluiting naar de overgang met het gras

B.6 Proeven K3

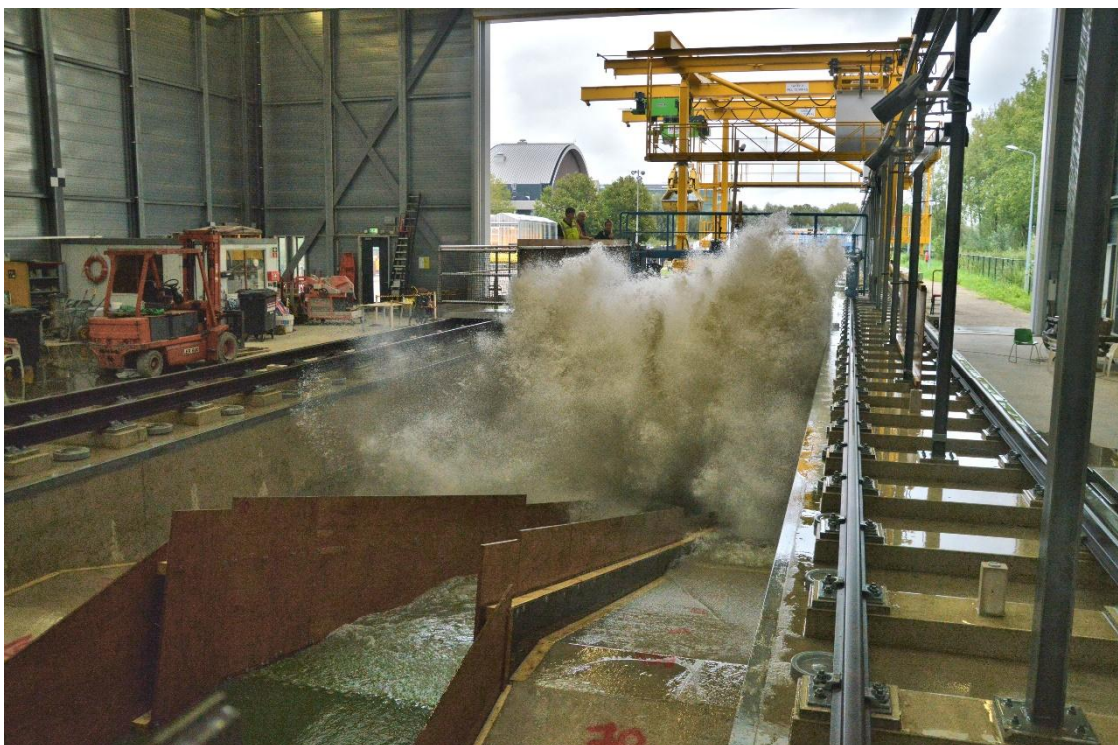


Fig. B-74 Tijdens proef K3_01



Fig. B-75 Na proef K3_01



Fig. B-76 Na proef K3_02



Fig. B-77 Na proef K3_03



Fig. B-78 Na proef K3_03



Fig. B-79 Na proef K3_04



Fig. B-80 Na proef K3_05



Fig. B-81 Na proef K3_05



Fig. B-82 Na proef K3_06



Fig. B-83 Na proef K3_07



Fig. B-84 Na proef K3_08



Fig. B-85 Na proef K3_09



Fig. B-86 Na proef K3_10

B.7 Verbouwing naar K4



Fig. B-87 Plaatsing eerste kleiblok



Fig. B-88 Verwijderen gras van de onderste laag kleiblokken



Fig. B-89 Lichten van de zijkant van een stalen mal rond een kleiblok met gras



Fig. B-90 Afwerken van de kruin

B.8 Proeven K4



Fig. B-91 Na proef K4_01



Fig. B-92 Na proef K4_02



Fig. B-93 Na proef K4_03



Fig. B-94 Na proef K4_04



Fig. B-95 Na proef K4_05



Fig. B-96 Na proef K4_07a



Fig. B-97 Na proef K4_08



Fig. B-98 Na proef K4_08



Fig. B-99 Na proef K4_09



Fig. B-100 Na proef K4_09



Fig. B-101 Na proef K4_10



Fig. B-102 Na proef K4_10



Fig. B-103 Na proef K4_11



Fig. B-104 Na proef K4_11



Fig. B-105 Na proef K4_12



Fig. B-106 Tijdens proef K_13 breekt op een gegeven moment de kleirug in het midden door



Fig. B-107 Na proef K4_13



Fig. B-108 Na proef K4_14



Fig. B-109 Na proef K4_14



Fig. B-110 Na proef K4_15



Fig. B-111 Na proef K4_15



Fig. B-112 Na proef K4_16

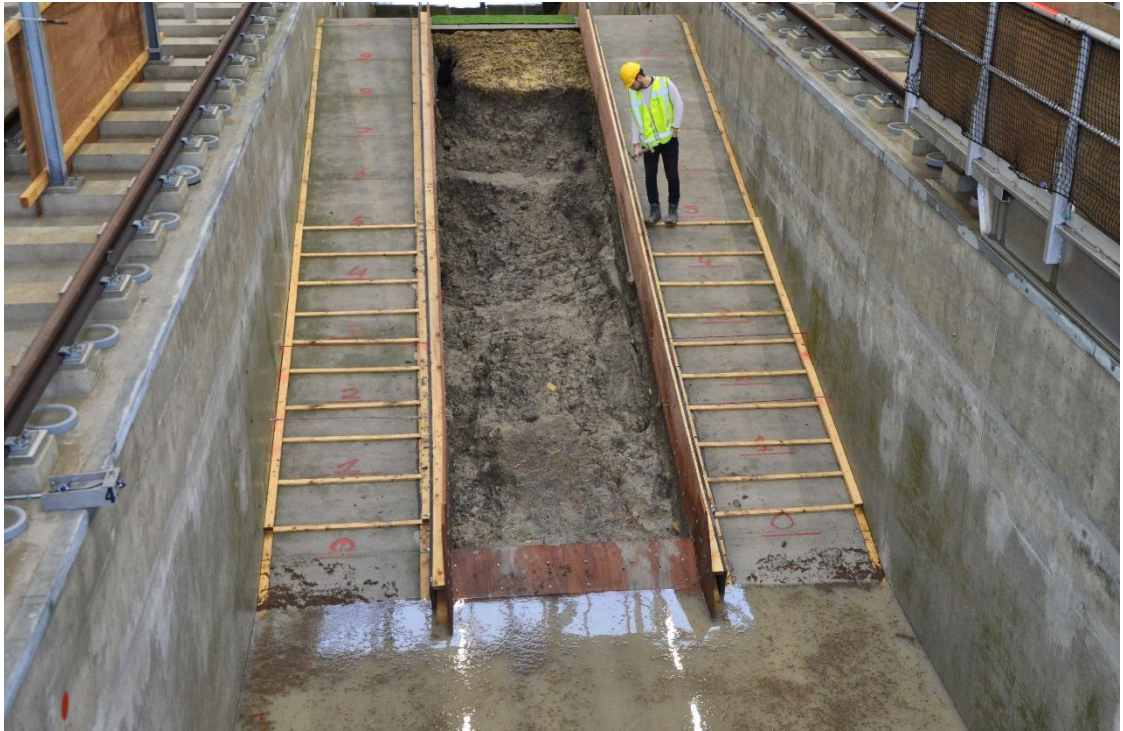


Fig. B-113 Na proef K4_16

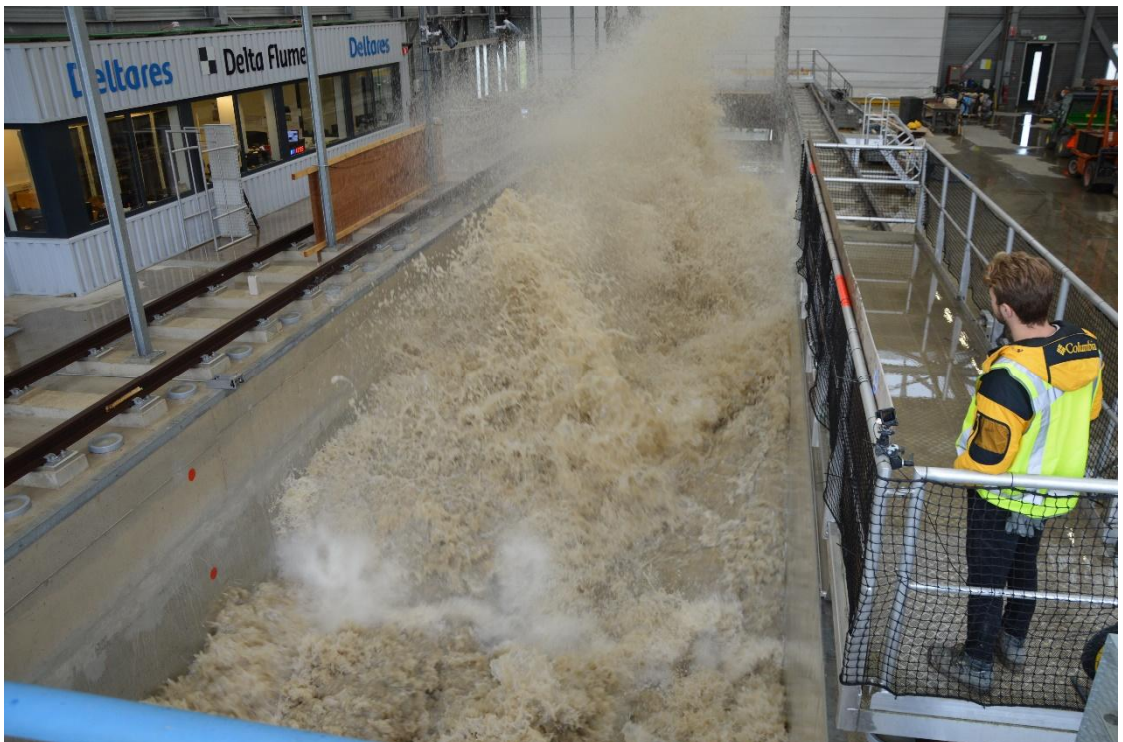


Fig. B-114 Tijdens proef K4_17 klap de golf tijdens de golfoploop tegen de klif aan

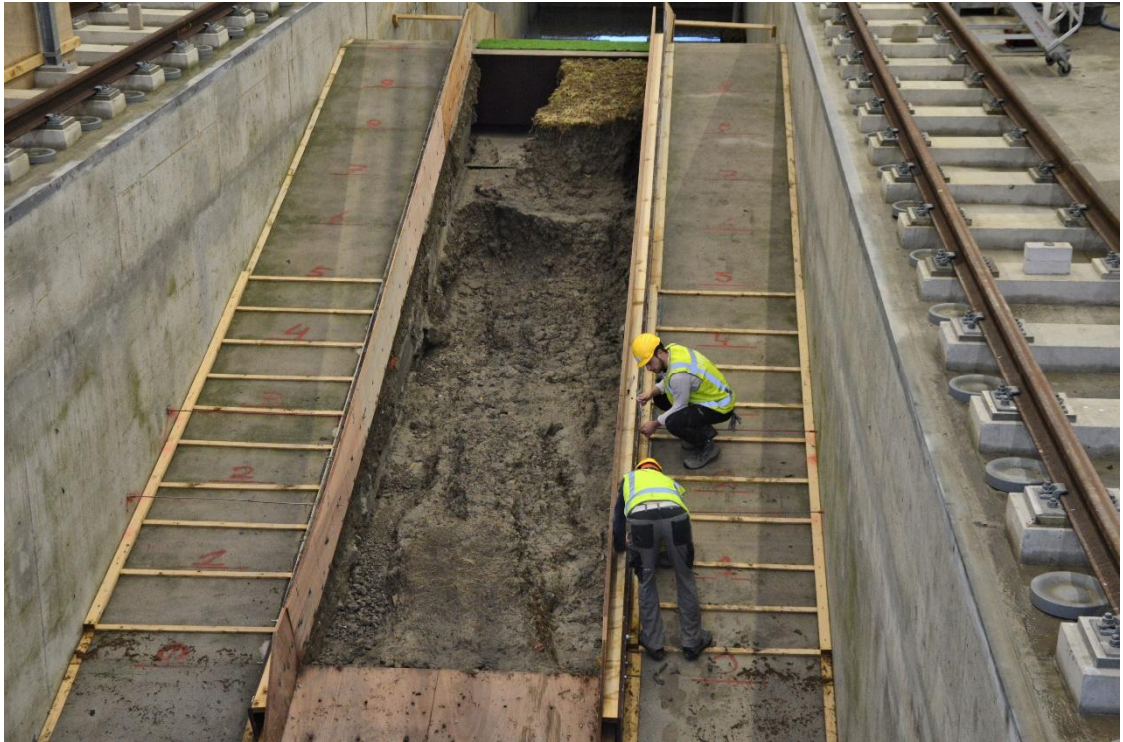


Fig. B-115 Na proef K4_17

B.9 Verbouwing naar K5



Fig. B-116 Kleilaag van geroerde klei aantrillen onder de kleiblokken



Fig. B-117 Lichten van de zijkant van de stalen mal van het kleiblok



Fig. B-118 Graslaag van onderste laag kleiblokken verwijderen



Fig. B-119 Onderste twee Grasblokken hebben een zeer hete en droge zomer doorgemaakt en hebben daarna in het najaar weer water gekregen, maar zijn daardoor niet volledig hersteld.



Fig. B-120 Plaatsing van houten schotten boven het gras

B.10 Proeven K5



Fig. B-121 Kunstmatige schade die voor proef K5_01 is aangebracht ($20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$)



Fig. B-122 Na proef K5_01



Fig. B-123 Vergroting van de kunstmatige schade (40 x 40 x 15 cm³)



Fig. B-124 Na proef K5_02a



Fig. B-125 Na proef K5_03a



Fig. B-126 Na proef K5_04b



Fig. B-127 Na proef K5_05



Fig. B-128 Na proef K5_06

B.11 Verbouwing naar K6



Fig. B-129 Verwijderen van de berm



Fig. B-130 afwerken van het talud met helling van 1:5

B.12 Proeven K6



Fig. B-131 Na proef K6_01



Fig. B-132 Na proef K6_02



Fig. B-133 Na proef K6_03



Fig. B-134 Na proef K6_04a



Fig. B-135 Na proef K6_04a



Fig. B-136 Tussen het tweede en derde kleiblok was een spleet aanwezig die de erosie sterk doet versnellen en die voor proef K6_05 deels is dicht gestopt



Fig. B-137 Na proef K6_05



Fig. B-138 Na proef K6_06



Fig. B-139 Na proef K6_07



Fig. B-140 Na proef K6_08

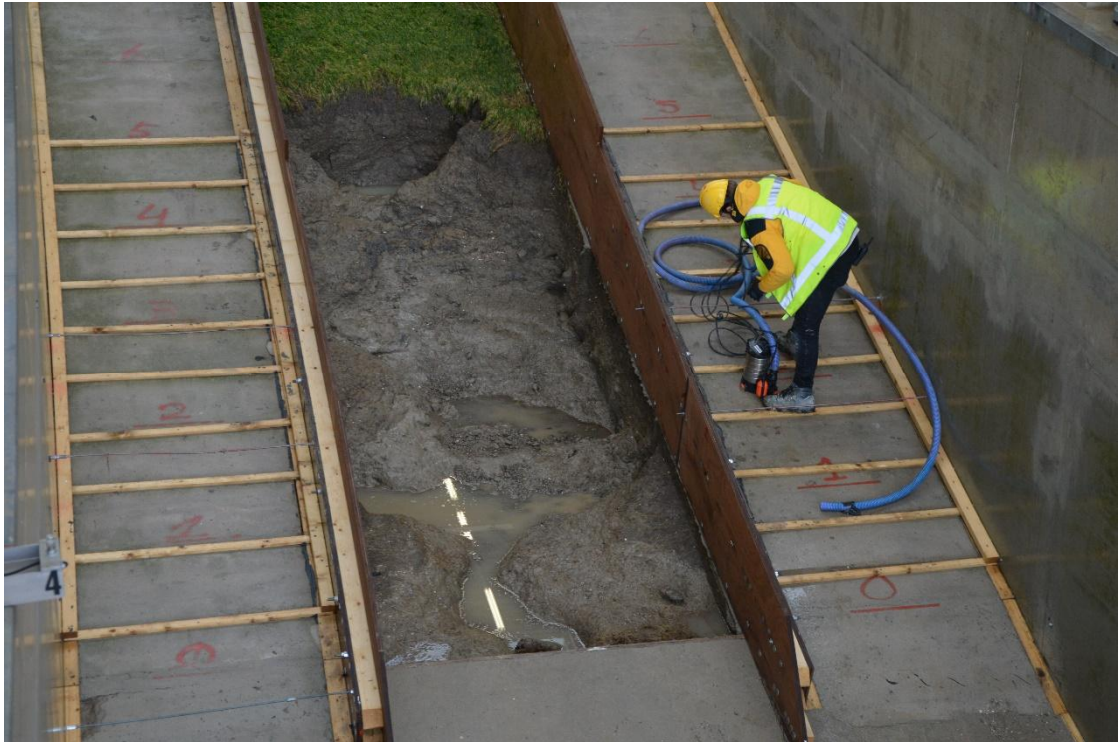


Fig. B-141 Na proef K6_08



Fig. B-142 Om de golfoverslag te beperken en te zorgen voor voldoende golfneerloop zijn er stalen balken op de kruin geplaatst voor proef K6_09



Fig. B-143 Tijdens proef K6_09: de golf klapt tijdens de golfoploop tegen de erosieklif



Fig. B-144 Na proef K6_09



Fig. B-145 Na proef K6_09



Fig. B-146 Tijdens proef K6_10: de golf klapt tijdens de golfloop tegen de erosieklif



Fig. B-147 Na proef K6_10



Fig. B-148 Na proef K6_10



Fig. B-149 Na proef K6_11a



Fig. B-150 Na proef K6_11a



Fig. B-151 Tijdens proef K6_12: de golf klapt tijdens de golfoploop tegen de erosieklif



Fig. B-152 Na proef K6_12



Fig. B-153 Na proef K6_13a

C Faalpaden en faalkans van de dijkbekleding

Bij de overstromingskansbenadering van dijken gaat het erom dat de kans op een dijkdoorbraak in een dijktraject niet te groot is. Daarbij wordt de kansbijdrage van alle mogelijke mechanismen meegewogen, zoals:

- macro-instabiliteit
- piping
- erosie buitentalud
- falen van kunstwerken in het traject
- etc.

In het huidige onderzoek gaat het om de kansbijdrage van de erosie van het buitentalud als gevolg van golfaanval. Dit betreft de rode gebeurtenissen in Fig. C-1, waarin het faalpad in schematische vorm is weergegeven.

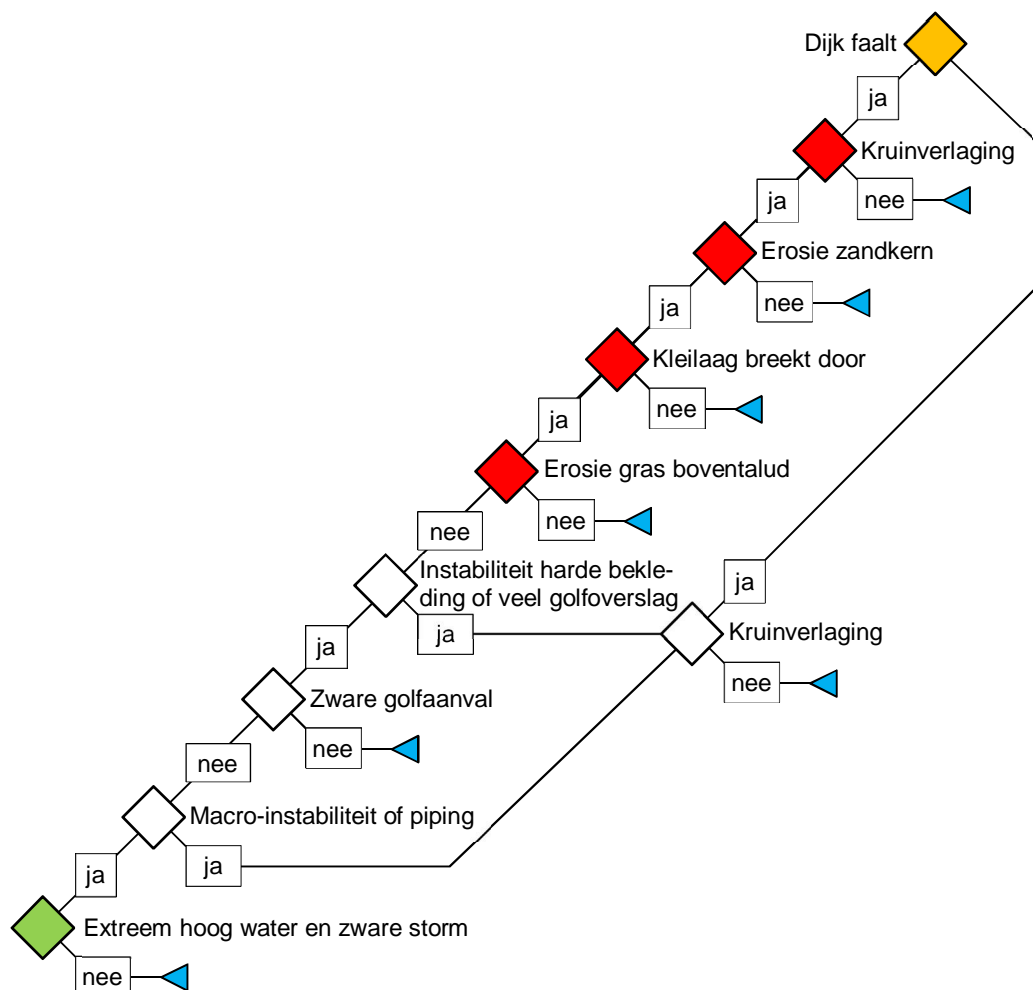


Fig. C-1 Schematische weergave van de faalpaden (vooral gericht op erosie buitentalud van zee- en meerdijken met stabiele harde bekleding en kleibekleding met gras op boventalud)

Er zijn diverse technieken om de faalkans van een dijk te berekenen. In deze bijlage is gekozen om een en ander toe te lichten aan de hand van de Monte Carlo simulatie. Daarbij worden in

feite enkele miljoenen jaren gesimuleerd door heel veel stormen te beschouwen. De waterstanden en golfcondities bij al deze stormen kloppen precies met de kansverdelingen zoals deze gegenereerd kunnen worden met Riskeer of Hydra-NL. Bovendien wordt voor de sterkte van de dijk (gras- en kleikwaliteit, taludhelling, et cetera) trekkingen gedaan, zodat ook de onzekerheid omtrent de sterkte meegerekend wordt.

Voor elk van deze (extreme) gebeurtenissen wordt het schema van Fig. C-1 doorlopen. Daarbij wordt ook de stormduur en het verloop van de waterstand en golfcondities beschouwd. Voor het mechanisme “erosie buitentalud”, waaronder het instabiel worden van de harde bekleding en de erosie van het gras op het boventalud vallen, wordt stap voor stap de hele storm doorlopen (bijvoorbeeld in stappen van een uur). Elke stap heeft een (kleine) bijdrage aan de degeneratie van het buitentalud. Als gedurende de storm de gesommeerde bijdrage van de degeneratie van het buitentalud leidt tot het falen van de bekleding, dan wordt deze storm geteld als een gebeurtenis waarbij falen optreedt.

Zo worden alle stormen doorgerekend en wordt er geteld hoe vaak er falen optreedt en hoe vaak niet. Het quotiënt hiervan is de faalkans van de bekleding.

Deze opzet is globaal gekozen voor de erosie-tool die momenteel bij Deltares aanwezig is om de faalkans van dijken door te rekenen, gegeven het instabiel worden van de bekleding. Deze software kan de kans op het doorbreken van de kleibekleding en het doorbreken van de dijk berekenen voor de situatie dat er van onder tot boven een kleibekleding met gras aanwezig is (zoals doorgaans op rivierdijken het geval is).

Doordat het hele verloop van de waterstand en de golfcondities tijdens een storm moet worden doorgerekend, is dit slechts mogelijk als voor alle waterstanden en golfcondities de bijdrage aan het degenereren van de kleibekleding met gras op het boventalud kan worden berekend. Voor elke storm, met bepaalde overschrijdingsfrequentie, is de topwaterstand en maximale golfhoogte ook weer verschillend. Daarom is het nodig om de erosiesnelheid van de kleibekleding te kennen voor een breed scala aan golfcondities en waterstanden ten opzichte van de overgang. Als in dit verband gesproken wordt over de ‘overgang’, dan wordt daarmee de overgang van de harde bekleding naar de kleibekleding met gras bedoeld.

Ook de belastingduur is relevant. Hoe langer de golven een substantiële belasting geven van de kleibekleding met gras, hoe meer erosie er zal zijn. Door te werken met de erosiesnelheid wordt dit aspect afdoende meegenomen. Daarbij geldt dat naarmate het erosievolume groter wordt, de erosiesnelheid afneemt bij gelijke waterstand en golfcondities. Dat neemt enerzijds af vanwege het afnemen van de hydraulische belasting op het kleioppervlak, en anderzijds omdat dieper gelegen klei doorgaans minder gestructureerd is en daardoor minder snel erodeert. In het huidige onderzoek is het eerste aspect wel verdisconteerd, maar het tweede aspect niet (conservatieve aanpak).

Voor een groot aantal situaties is echter de bijdrage aan de degeneratie zeer klein (bij veelvoorkomende gebeurtenissen), of is de bijdrage weliswaar zeer groot, maar is de kans dat dergelijke extreme gebeurtenissen optreden zeer klein. In beide gevallen zal de faalkansbijdrage verwaarloosbaar zijn en is een nauwkeurige kwantificering van de erosie niet zo belangrijk.

Het bovenstaande leidt tot de conclusie dat het voor het berekenen van de faalkans nodig is om de erosiesnelheid te kunnen kwantificeren voor diverse waterstanden in de buurt van de overgang en voor diverse golfcondities. Daar is het huidige onderzoek opgericht.

Strikt genomen gaat het bij het beoordelen en ontwerpen op basis van faalkansen om de kans op extreme gebeurtenissen en de onzekerheid omtrent de sterkte van de dijk. Het huidige

onderzoek is erop gericht de onzekerheid omtrent de sterkte van de dijk te verkleinen. Bovendien wordt de stap gemaakt van “falen = schade aan de grasbekleding” naar “falen = falen van de kleibekleding met gras”. Daarmee komen we veel dichterbij het uiteindelijke doel, namelijk het falen van de dijk als gevolg van erosie van het buitentalud.

D Klei-eigenschappen

D.1 Locatie van herkomst

De blokken klei met gras zijn van de volgende dijken gehaald:

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

De locaties zijn aangegeven in Fig. D-1 t/m Fig. D-3.

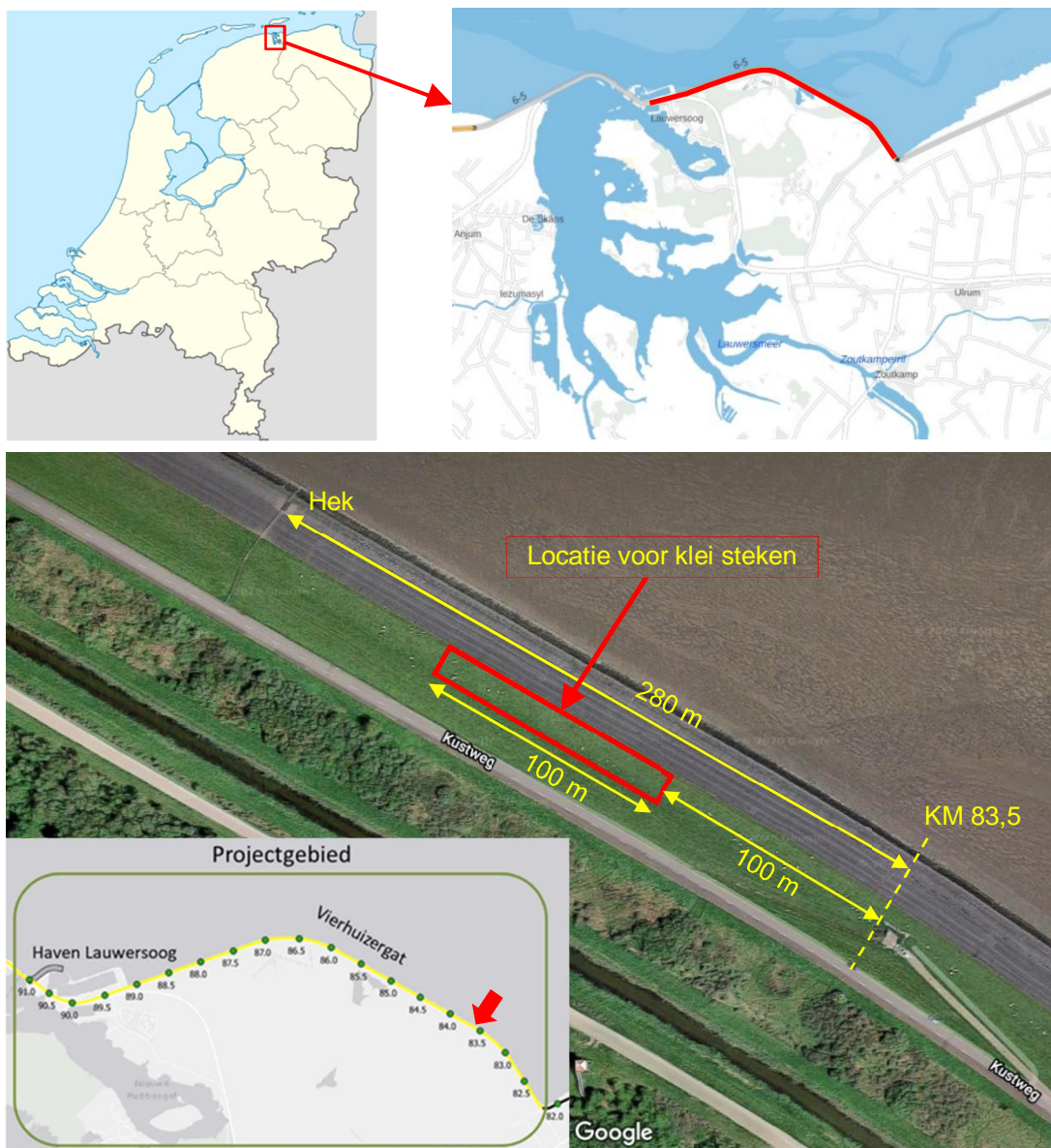


Fig. D-1 Locatie op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizen waar kleiblokken met gras zijn gestoken

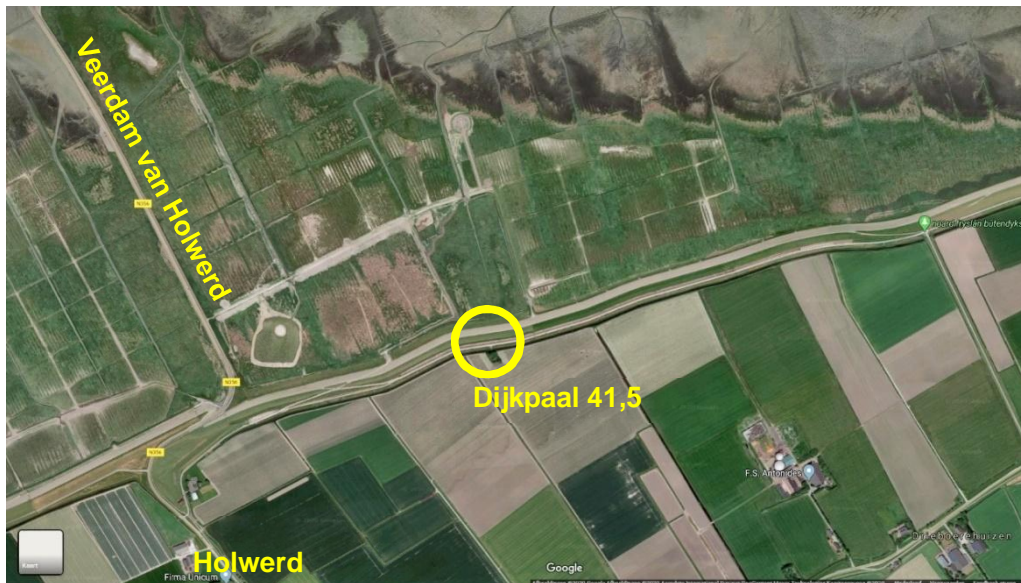


Fig. D-2 Locatie op de dijk Koehool-Lauwersmeer bij Holwerd waar kleiblokken met gras zijn gestoken

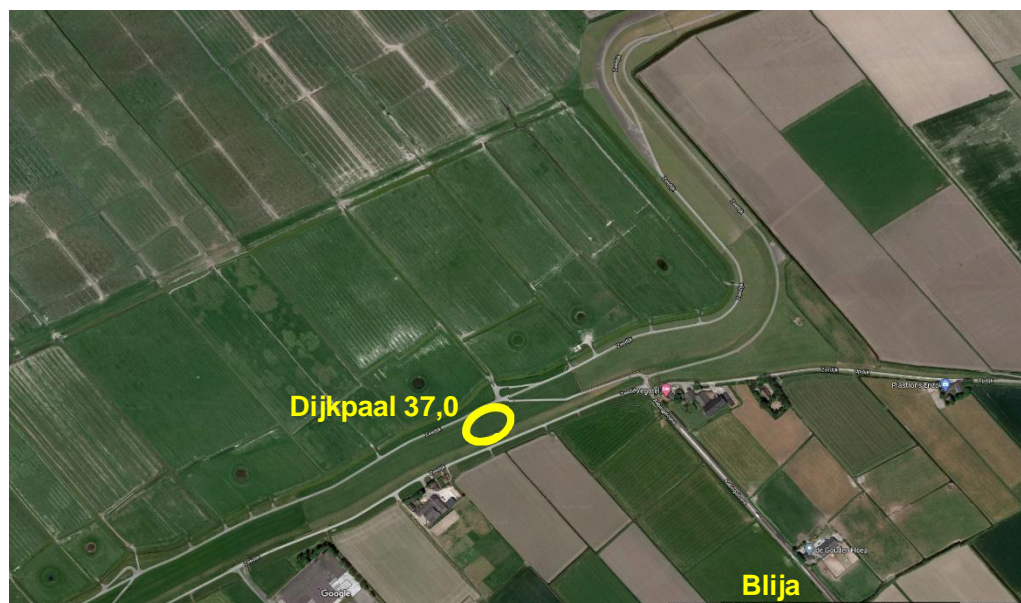


Fig. D-3 Locatie op de dijk Koehool-Lauwersmeer bij Blija waar kleiblokken met gras zijn gestoken

D.2 Klei-eigenschappen

Op de locatie waar de kleiblokken van de dijk zijn gestoken zijn zes monsters genomen van de klei en zijn de belangrijkste eigenschappen bepaald. Er zijn drie monsters op 15 à 25 cm onder het maaiveld genomen en drie monsters dieper in de klei. De resultaten van de analyses zijn gegeven in Tabel 7-1 t/m Tabel 7-3. Het blijkt dat er geen substantieel verschil is tussen de eigenschappen van de klei vlak onder het gras en in de diepere lagen.

	% lutum ($< 2 \mu\text{m}$)	% zand ($> 63 \mu\text{m}$)	Vloei- grens (%)	Uitrol- grens (%)	Plasticiteits- index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Monsters op 15-25 cm onder maaiveld	28,3	27,9	43,1	24,0	19,1	1,4	4,8
	24,3	38,6	40,5	22,7	17,8	1,2	5,6
	23,2	38,1	38,9	21,5	17,5	0,8	3,8
Monsters uit onderste 60 cm	24,1	33,9	40,5	24,0	16,6	0,9	6,0
	21,2	53,4	33,7	19,7	14,0	0,5	5,2
	25,5	45,5	41,7	22,2	19,5	1,1	3,2
Gemiddeld	24,4	39,6	39,7	22,4	17,4	1,0	4,8

Tabel 7-1 Eigenschappen van de klei van de Lauwersmeerdijk bij de gestoken kleiblokken

	% lutum ($< 2 \mu\text{m}$)	% zand ($> 63 \mu\text{m}$)	Vloei- grens (%)	Uitrol- grens (%)	Plasticiteits- index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Monsters op 15-25 cm onder maaiveld	26,1	27,2	39,5	16,9	22,5	1,3	9,2
	25,4	29,6	37,8	20,7	17,1	1,2	8,8
	24,1	31,6	34,6	20,5	14,1	1,2	9,4
Monsters uit onderste 60 cm	24,4	36,3	32,3	19,1	13,2	0,2	3,2
	23,5	27,9	42,6	21,7	20,9	0,8	7,4
	24,3	31,0	30,1	17,7	12,4	0,9	9,7
	25,7	29,9	31,2	19,0	12,2	0,6	10,0
Gemiddeld	24,8	30,5	35,4	19,4	16,1	0,9	8,2

Tabel 7-2 Eigenschappen van de klei van de dijk bij Holwerd bij de gestoken kleiblokken

	% lutum ($< 2 \mu\text{m}$)	% zand ($> 63 \mu\text{m}$)	Vloei- grens (%)	Uitrol- grens (%)	Plasticiteits- index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Monsters op 15-25 cm onder maaiveld	44,1	13,1	57,9	24,5	33,4	3,0	8,1
	42,4	15,1	54,7	22,2	32,5	2,9	7,3
	44,0	14,6	53,4	23,2	30,1	2,6	7,8
Monsters uit onderste 60 cm	45,3	13,8	59,9	24,9	35,0	2,8	7,8
	46,4	12,3	54,7	23,9	30,8	3,0	7,7
	43,5	13,6	48,2	23,0	25,2	3,0	8,0
Gemiddeld	44,3	13,8	54,8	23,6	31,2	2,9	7,8

Tabel 7-3 Eigenschappen van de dijk bij Blija bij de gestoken kleiblokken

Tijdens de proevenseries K2 en K3 is vastgesteld dat de erosiebestendigheid van de klei uit Holwerd verrassend groot is. Daarom zijn na afloop van de proeven nog twee extra monsters uit de resterende klei genomen om de klei-eigenschappen te bepalen. De resultaten daarvan zijn opgenomen in Tabel 7-4. Het blijkt dat de klei-eigenschappen niet wezenlijk afwijken van de monsters uit Tabel 7-2.

	% lutum (< 2 µm)	% zand (> 63 µm)	Vloei- grens (%)	Uitrol- grens (%)	Plasticiteits- index (-)	Organische stofgehalte (%)	Kalk gehalte (%)
Monsters uit Deltagoot	24,4	35,9	32,3	18,2	14,1	0,8	8,3
	25,4	32,7	37,6	18,1	19,5	0,6	8,0
Gemiddeld	24,9	34,3	35,0	18,2	16,8	0,7	8,2

Tabel 7-4 Eigenschappen van de klei van de dijk bij Holwerd op basis van monsters uit de Deltagoot

Tussen de proeven en na afloop van de proeven van serie K1 is het vochtgehalte van de klei gemeten. Tussen de proeven is dat gebeurd door een klein monster uit het erosiegat te nemen en na afloop van de proeven is een 40 cm diep monster genomen. Het vochtgehalte bleek niet afhankelijk te zijn van de diepte van het kleimonster en bovendien was de spreiding vrij klein. Gemiddeld was het vochtgehalte 30%. Vervolgens is in de winter het vochtgehalte bepaald van het reserveblok dat vele maanden buiten in weer en wind heeft gestaan. Dat vochtgehalte bleek 31% te zijn.

Gezien de geringe spreiding van het meetresultaten van de Lauwersmeerdijk is het vochtgehalte van de klei van Holwerd en Blija alleen na afloop van de proevenseries bepaald. Deze bleek respectievelijk 23% (na K3 en na K6) en 29% (na K4) te zijn.

	Monster 1	Monster 2	Monster 3	Gemiddeld
Voor K1-10	30,2	30,5	31,2	30,6
Na K1-11	28,9	28,5	30,6	29,3
Na K1-14	30,4	30,5	30,3	30,4
Gemiddeld				30,1

Tabel 7-5 Vochtgehalte (percentage van de droge stof) van de klei van de Lauwersmeerdijk in de Deltagoot

D.3 Verdichting van de klei

De klei die in de Deltagoot is toegepast, is in ongeroerde staat door middel van kleiblokken in de goot aangebracht. Dat betekent dat de mate van verdichting in de Deltagoot exact gelijk is aan die van de Waddenzeedijken waar deze klei van afkomstig is.

De verdichting van de klei in de Deltagoot is bepaald door middel van vijfpunts proctorproeven. De relatie tussen de gestandaardiseerde dichtheid en het vochtgehalte, zoals dit bepaald wordt tijdens dit soort proeven, is gegeven in Fig. D-4 t/m Fig. D-6. Vervolgens is op basis van de actuele dichtheid de mate van verdichting in een percentage van de maximale dichtheid bij het optimale vochtgehalte bepaald. De resultaten zijn vermeld in Tabel 7-6.

	Lauwers- meerdijk	Holwerd	Blija bij $x' = 2,5$ m	Blija bij $x' = 4,1$ m	Blija bij $x' = 9,1$ m
Natte dichtheid (kg/m ³)	1866	1977	1910	1966	1899
Droge dichtheid (kg/m ³)	1424	1603	1478	1536	1468
Vochtgehalte (%)	31	23	29	28	29
Proctordichtheid (%)	88,7%	93,5%	95,5%	99,3%	94,9%

Tabel 7-6 Resultaten van de proctorproeven (x' is de afstand langs het talud tot de overgang naar de harde bekleding)

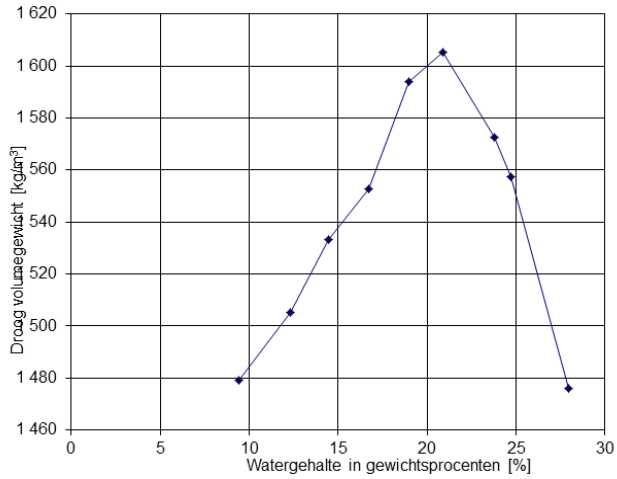


Fig. D-4 Relatie tussen het vochtgehalte en de dichtheid bij een standaard verdichting volgens de methode van Proctor voor de klei van de Lauwersmeerdijk

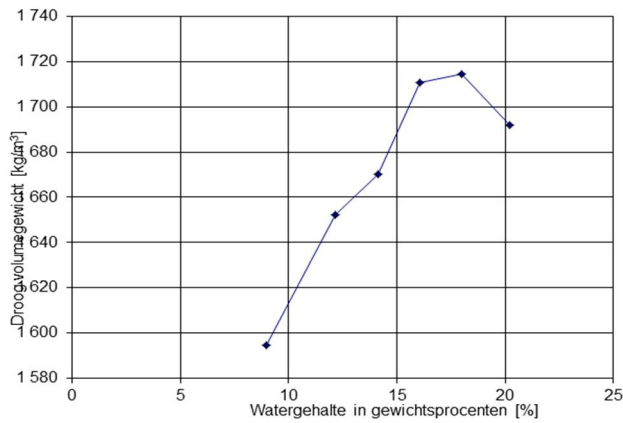


Fig. D-5 Relatie tussen het vochtgehalte en de dichtheid bij een standaard verdichting volgens de methode van Proctor voor de klei van de dijk bij Holwerd

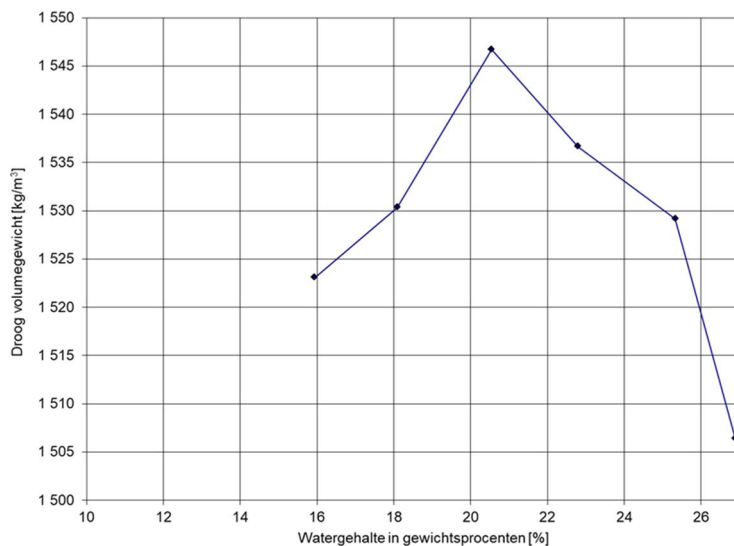


Fig. D-6 Relatie tussen het vochtgehalte en de dichtheid bij een standaard verdichting volgens de methode van Proctor voor de klei van de dijk bij Blija

E Figuren van modelopstellingen

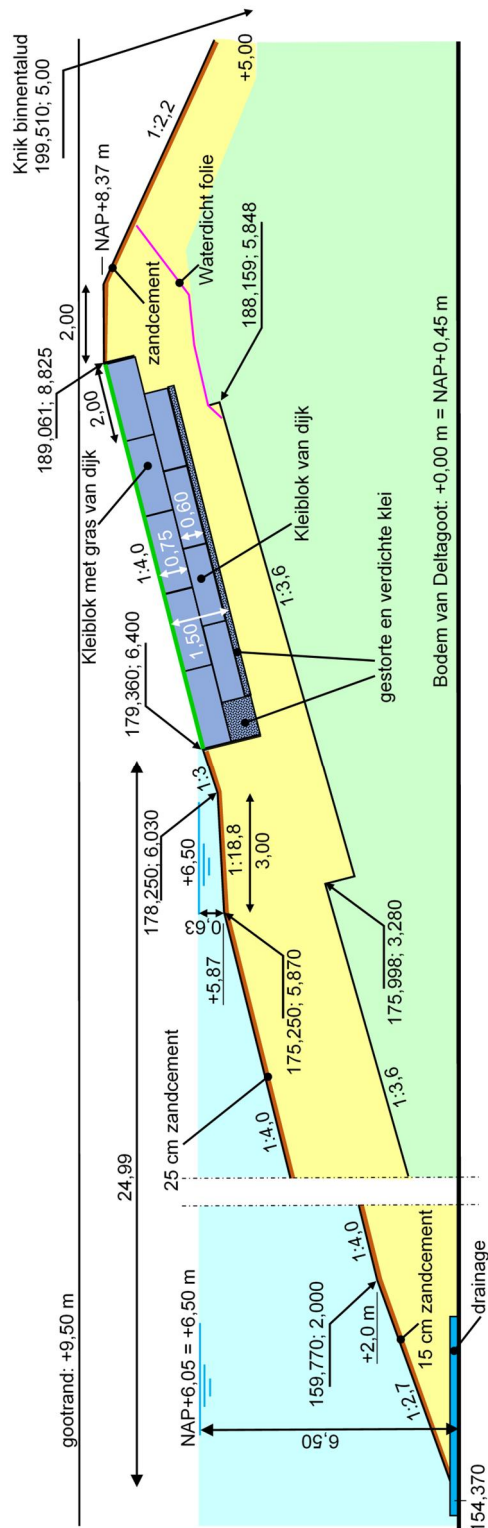


Fig. E-1 Verticale langsdoorsnede modelopstelling proevenserie K1

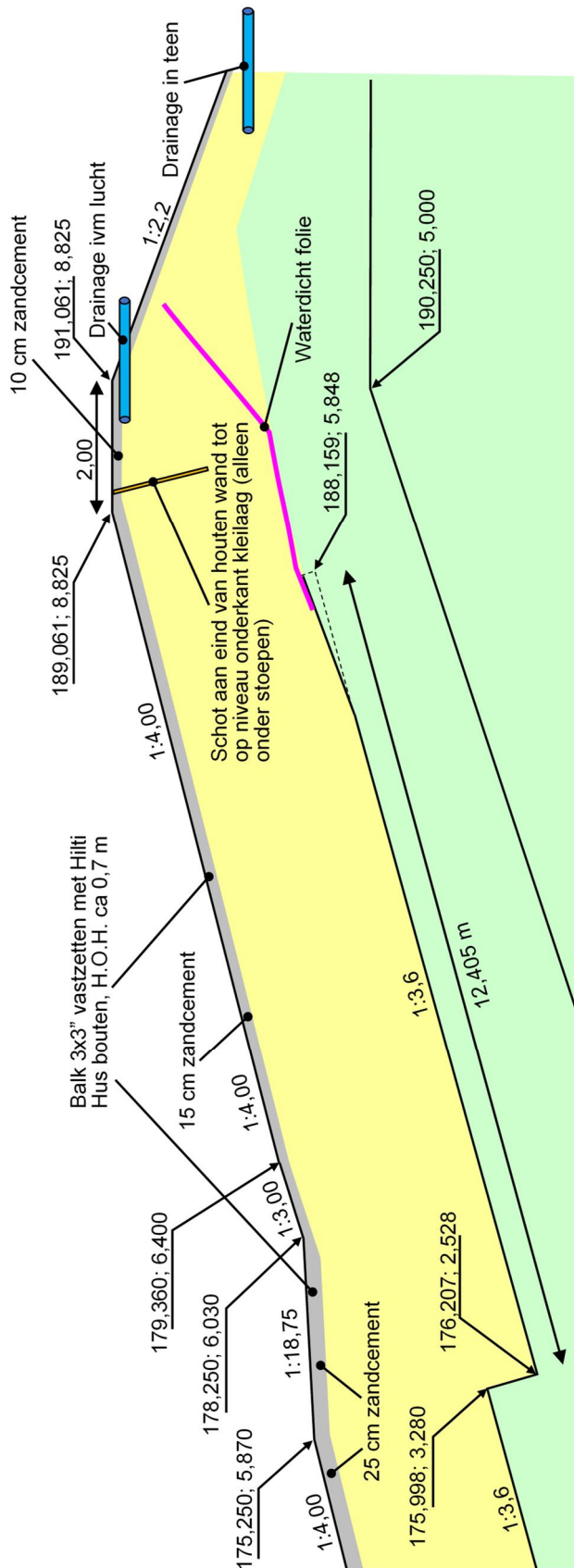


Fig. E-3 Verticale langsdoorsnede betontaluds naast de modelsectie (alle proevenseries)

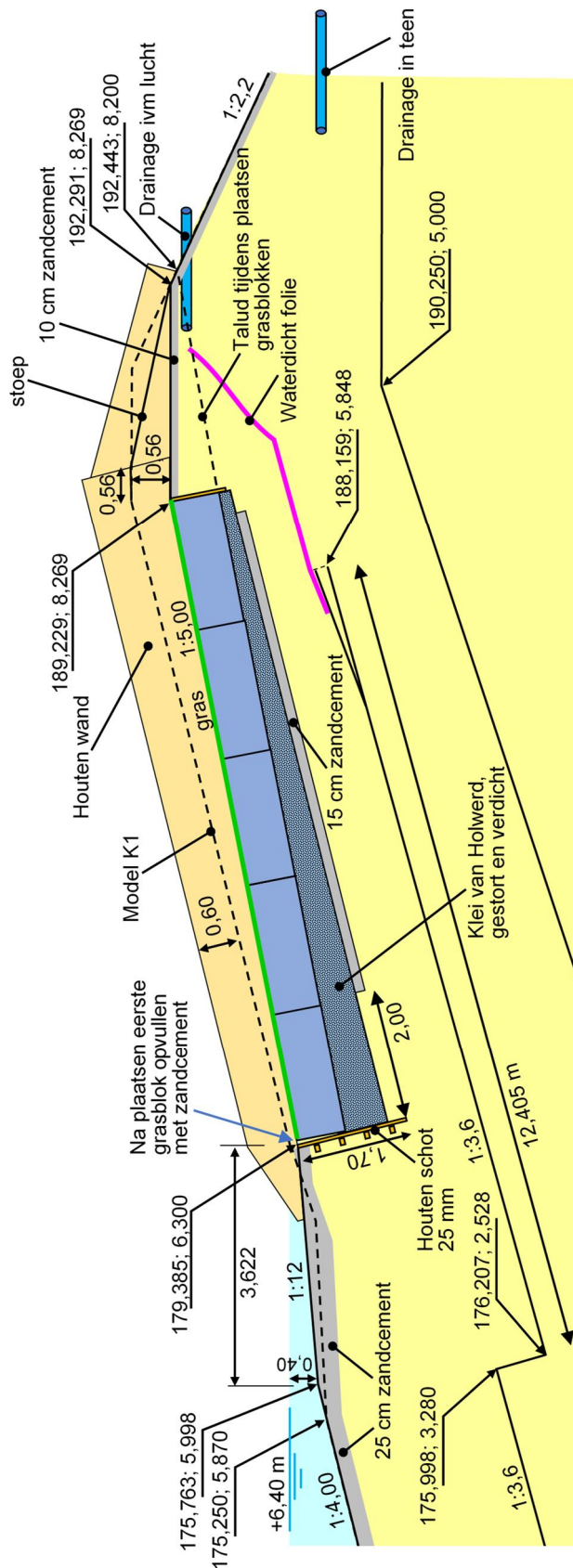


Fig. E-5 Verticale langsdoorsnede modelsectie proevenserie K2 (met maten zoals in de Deltagoot)

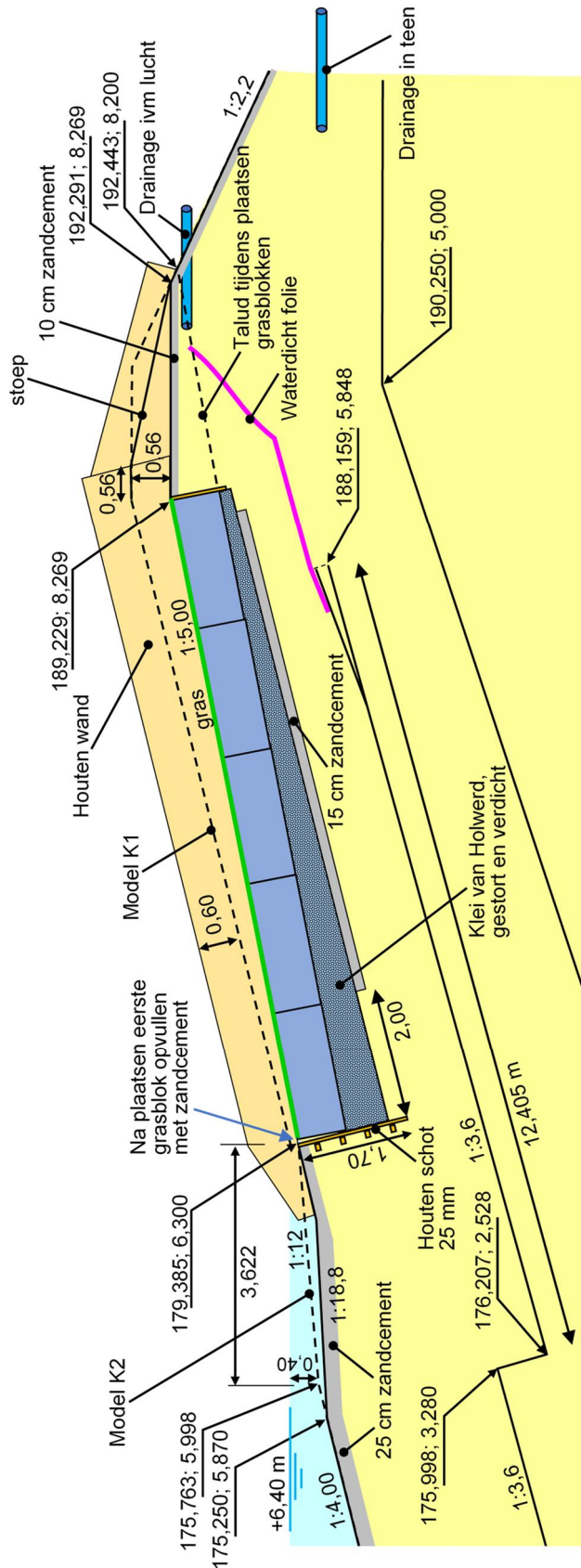


Fig. E-6 Verticale langdoorsnede modelsectie proevenserie K3 (met maten zoals in de Deltagoot)

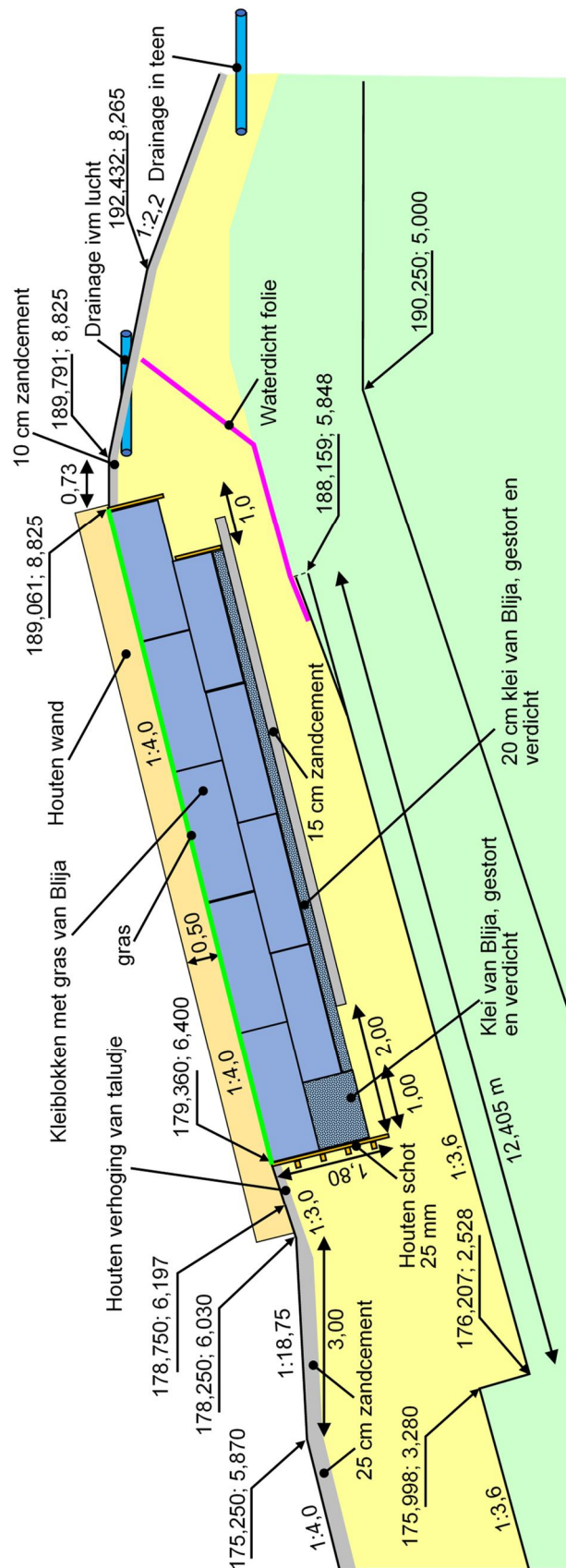


Fig. E-7 Verticale langsdoorsnede modelsectie proevenserie K4 (met maten zoals in de Deltagoot)

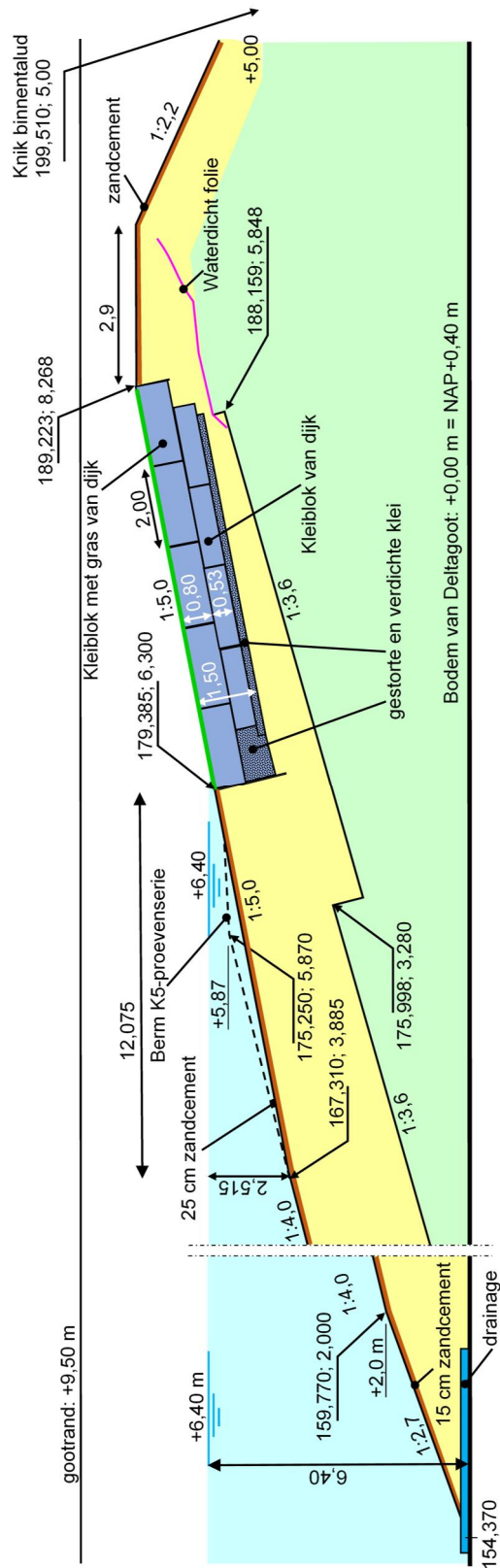


Fig. E-9 Verticale langsdoorsnede modelopstelling proevenserie K6 (met maten zoals in de Deltagoot)

Deltares

www.deltares.nl