

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven

Auteur(s)

Pim van Steijn

Mark Klein Breteler

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven

Opdrachtgever	Waterschap Hunze en Aa's
Contactpersoon	Erik Jolink, Henk van Norel en Marco Veendorp
Referenties	
Trefwoorden	Kleibekleding, erosie, Deltagoot, dijk, kleirijperij

Documentgegevens

Versie	2
Datum	05-10-2021
Projectnummer	11206194-002
Document ID	11206194-002-HYE-0014
Pagina's	192
Status	definitief

Auteur(s)

Pim van Steijn en Mark Klein Breteler

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Datum
1	Pim van Steijn	Mark Klein Breteler	Marcel van Gent	8-6-2021
2	Pim van Steijn	Gijsbert Mourik	Marcel van Gent	10-8-2021
3	Pim van Steijn Mark Klein Breteler 	Marien Boers 	Marcel van Gent 	5-10-2021

Samenvatting

In het kader van het Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (onderdeel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk) zijn twee series proeven uitgevoerd in de Deltagoot waarmee de erosiesnelheid is gemeten van vier kleisoorten:

- Eerste proevenserie (gestort en verdicht):
 - lokaal gewonnen kwelder materiaal uit de “Klutenplas”, zonder gras
 - gerijpte baggerslib van de Kleirijperij aan de “Valgenweg”, zonder gras
- Tweede proevenserie (aangebracht in ongeroerde blokken van 2x2 m²):
 - gestructureerde klei in ongeroerde staat van de Dollarddijk, inclusief gras
 - gestructureerde klei in ongeroerde staat van de Groene Dijk bij Blija, inclusief gras

Het kwelder materiaal uit de “Klutenplas” is recent gewonnen uit de kwelder langs de Dollard, terwijl de klei uit de Dollarddijk dezelfde oorsprong heeft, maar daar al sinds de tachtiger jaren in de dijk zit. De klei uit de Groene Dijk bij Blija is ook kwelder materiaal, maar dan van een andere locatie. Deze dijk is deels opgebouwd met de klei van de oude dijk (van voor de dijkversterking in de jaren 80). Het kleitekort is destijds aangevuld door deze te winnen uit een sleuf langs de buitenteen, die daarna is opgevuld met zand.

Het doel van de proeven is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid) van het lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten en tevens een bijdrage te leveren aan de beoordeling van de Groene Dijk van het Wetterskip Fryslân (dijkvak Noorderleeg-Blija op het dijktraject Koehool-Lauwersmeer).

Het kwelder materiaal en de gerijpte baggerspecie voldoen niet (volledig) aan de voorschriften van de TR Klei voor dijken (TAW, 1996). Toch zijn er dijken waar dergelijke afwijkende materialen al vele jaren liggen en waar de dijk naar behoren functioneert. De vraag is of door een aangepast ontwerp, adequate uitvoering en een afgestemd beheer en onderhoud gekomen kan worden tot een waterveilige dijk.

Voor de Groene Dijk van het dijkvak Noorderleeg-Blija geldt dat deze net niet door de periodieke beoordeling in het kader van WBI 2017 komt met de huidige beoordelingsmethodiek, die eigenlijk niet geheel geschikt is voor de flauwe taludhelling, de dikke kleilaag en zware golfaanval. De Deltagootproeven kunnen aantonen of de dijk toch voldoende veiligheid geeft.

Daarnaast blijkt uit het demonstratieproject Brede Groene Dijk dat de waarde van een erosiecoëfficiënt in het huidige rekenmodel van afwijkende kleisoorten niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters. Ook blijkt het toegepaste rekenmodel niet geschikt voor taluds flauwer dan 1:5 en voor hoge golven ($H_{m0} > 1,5$ m). De huidige proeven leveren daarom de benodigde informatie om het rekenmodel te verbeteren.

Voor de proeven is de Brede Groene Dijk op werkelijke schaal nagebouwd. Het model is opgesplitst in twee helften zodat twee soorten klei gelijktijdig naast elkaar zijn beproefd. Van elke klei is een laag van 1,85 m aangebracht over een taludlengte van 26 m en een breedte van 2,25 m (eerste proevenserie) en 2,00 m (tweede proevenserie).

Tijdens de proeven van de eerste proevenserie is geconstateerd dat de erosie zich langzaam ontwikkelde, hetgeen gunstig is voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk. Voor de Valgenwegklei heeft het 21 uur geduurd voordat de klei-erosie de kruin van de dijk bereikte. Na een testduur van 27 uur was er sprake van kruinverlaging door de erosie en moest de dijk

als gefaald beschouwd worden. De erosie aan de zijde met klei van de Klutenplas was toen nog niet bij de kruin aangekomen. Dit is langer dan de te verwachten equivalente golfbelasting tijdens een extreme storm.

Tijdens de tweede proevenserie is een groot verschil geconstateerd tussen de klei met gras van de Dollarddijk en die van Blija. De eerste ruim 3 uur was er aan beide zijden nog niet veel erosie ontstaan. Daarna is ter plaatse van een kleine beschadiging in het gras van de Dollarddijk in 3 uur tijd een erosiekuil van 80 cm diepte ontstaan die vervolgens in de uren daarna groter is geworden met een klif die migreerde richting de kruin. Na 15 uur golven bereikte de erosieklif de kruin en na ruim 19 uur golven was ook de kruin bezweken. De klei met gras van Blija gaf geen erosie te zien, zelfs niet na het aanbrengen van een vrij grote kunstmatige schade (gat van 80 cm breed, 50 cm lang en 25 cm diep). Er is totaal 32 uur op deze kleibekleding met gras gegolfd met golven van 2 m, terwijl dit nagenoeg geen erosie heeft veroorzaakt.



Golfbelasting op het kleitalud in de Deltagoot.

Wat in alle proeven opviel is dat de erosie minder de diepte in gaat dan gedacht, maar dat de erosiekuil wel vlot doorgroeit naar de kruin. Uiteindelijk faalde de ingebouwde dijk doordat de kruin was weggeërodeerd. Om dit goed te kunnen vaststellen was er voor gekozen om ook de kruin in het model uit te voeren met een dikke kleibekleding. De erosie van de kruin is in dit geval maatgevend over het doorbreken van de kleilaag als de kleilaag dikker is dan ongeveer 1,9 m (Dollarddijk) of 1,4 m (klei van Valgenweg).

Op basis van de proefresultaten zijn de formules van Mourik (2020) iets aangepast (zie paragraaf 6.4) en zijn de waardes van de erosiecoëfficiënt gekwantificeerd (hoe groter de waarde, des te groter de erosiesnelheid bij golfaanval):

- ongestructureerde klei van de Valgenweg: $\mu(C_e) = 0,54$
- ongestructureerde klei van de Klutenplas: $\mu(C_e) = 0,37$
- kleibekleding met gras van de Dollarddijk: $\mu(C_e) = 1,0$
- kleibekleding met gras van de Groene Dijk bij Blija: $\mu(C_e) = 0,23$

Op basis van de proefresultaten kan gesteld worden dat de erosie van de klei van de Valgenweg ongeveer anderhalf maal sneller gaat dan die van de Klutenplas en dat de erosie van de klei van de Dollarddijk ongeveer tweemaal zo snel gaat als die van de Valgenweg. De

erosiesnelheid van de Dollarddijk was waarschijnlijk zo groot vanwege de beperkte samenhang in de klei (brokkeligheid), zandlenzen en zandpockets, de aangetroffen poriën in de klei en de schades in het gras. Waarschijnlijk zijn de problemen tijdens de aanleg, toen de klei vrij nat is aangebracht, de oorzaak hiervan.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.1.1	Aanleiding project	9
1.1.2	Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk	10
1.1.3	Fasering onderzoek	10
1.2	Onderhavige deelproject	11
2	Modelopstelling eerste proevenserie	13
2.1	Dijkschematisering	13
2.2	Herkomst klei	15
2.3	Klei eigenschappen	16
2.4	Klei aanbrengen in de Deltagoot	18
3	Modelopstelling tweede proevenserie	22
3.1	Dijkschematisering	22
3.2	Steken van de kleiblokken	24
3.3	Eigenschappen van de klei en het gras	26
3.4	Opbouw in de Deltagoot	30
4	Resultaten eerste serie	33
4.1	Proevenprogramma	33
4.2	Resultaten	35
4.2.1	Proefbeschrijving	35
4.2.2	Representatieve dwarsdoorsnedes	38
4.2.3	Erosiediepte en volume	39
5	Resultaten tweede serie	42
5.1	Proevenprogramma	42
5.2	Resultaten	43
5.2.1	Proefbeschrijving en klifmigratie	43
5.2.2	Representatieve dwarsdoorsnedes	46
5.2.3	Erosiediepte en -volume van Dollarddijk	46
5.2.4	Erosiediepte en -volume van dijk bij Blija	49
6	Analyse	51
6.1	Brede Groene Dijk (Dollard)	51
6.1.1	Erosievolume	51
6.1.2	Erosiediepte	53
6.1.3	Erosievolume in de eerste fase van erosieproces	55
6.1.4	Locatie van de erosie	56

6.2	Groene Dijk bij Blija	57
6.3	Invloed kleikwaliteit	58
6.4	Resulterende formules	60
7	Conclusie en aanbevelingen	62
7.1	Brede Groene Dijk (Dollard)	62
7.2	Groene Dijk bij Blija	64
7.3	Invloed kleikwaliteit	65
	Referenties	66
A	3D metingen met laserscanner	67
B	Foto's	99
B.1	Opbouw modelopstelling	99
B.2	Eerste proevenserie	104
B.2.1	Opbouwfase	104
B.2.2	Proeven	109
B.3	Tweede proevenserie	148
B.3.1	Steken van de kleiblokken	148
B.3.2	Opbouwfase	151
B.3.3	Proeven	156
C	Belasting in extreme storm	185
C.1	Dollarddijk	185
C.2	Dijk bij Blija	186
D	Ervaringen van het beheer van Dollarddijk	189
E	Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum	191

1 Inleiding

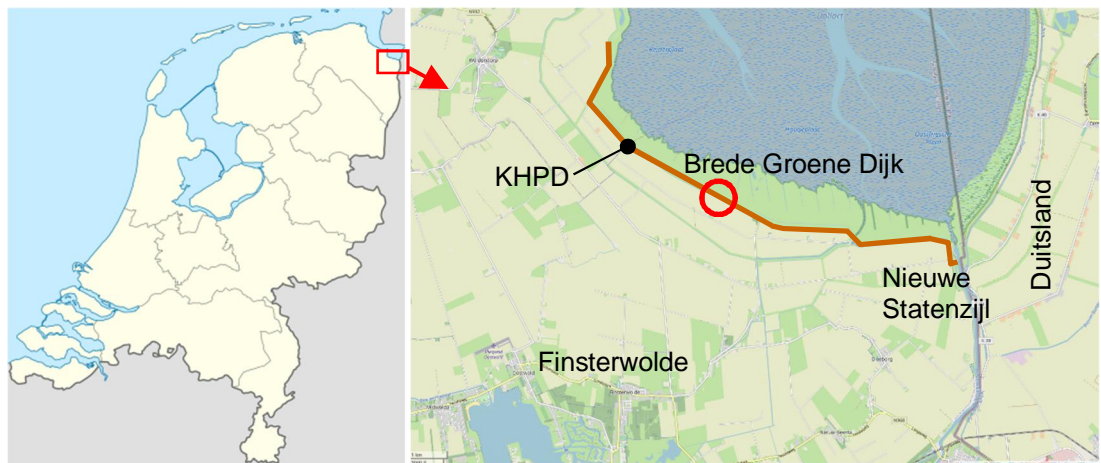
1.1 Achtergrond

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) wordt onderzocht of een dijk gebouwd kan worden met lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Het onderzoek wordt uitgevoerd onder de naam Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD). Binnen het OGD wordt een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht wordt hoe slib om te vormen tot klei.

Uit de voorbereidingen van het demonstratieproject blijkt dat extra onderzoek in Nederland nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. De verwachting is dat een aantal van deze eigenschappen verbeteren door verdere rijping van de klei in de loop van de tijd. Bij de start van een rijpingsproces is er inzicht gewenst of er een geschikt bouw materiaal van te maken is.

Het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is onderdeel van het dijktraject Kerkhovenpolder-Duitsland (normtraject 6-7), zie Figuur 1.1. Aan de zeezijde grenst de kering aan het Natura 2000-gebied van de Dollard, onderdeel van de Waddenzee. Aan de landzijde grenst de kering aan polders van Oost-Groningen. Voorzien is om het project uit te voeren met gerijpte klei afkomstig van de Kleirijperij en van de kwelder. Uit bepalingen op dit materiaal is echter vastgesteld dat het zoutgehalte en het gehalte aan organisch stof van de gerijpte klei niet voldoen aan de voor klei als dijkbouw materiaal geldende eisen (TAW, 1996).

Ter voorbereiding op het demonstratieproject wordt daarom onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid om met dit materiaal wel een waterveilige dijk te kunnen bouwen. Dit extra onderzoek richt zich op vragen zoals: welke dimensionering is nodig, hoeveel materiaal is daarvoor nodig, is de uitvoering realiseerbaar, hoe gedragen de functionele eigenschappen zich als functie van ouderdom e.d..



Figuur 1.1 Locatie van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (KHPD = dijktraject Kerkhovenpolder - Duitsland).

1.1.1 Aanleiding project

Voor het omvormen van de bestaande afgekeurde dijk tot een Brede Groene Dijk is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD op het traject Kerkhovenpolder-Duitsland dit ca. 1,7

miljoen m³ klei is. Om aan de huidige en toekomstige veiligheidseisen te kunnen voldoen, wordt het talud van de nieuwe dijk namelijk een stuk flauwer. Alleen dan is de dijk in staat om de golfklappen die op de dijk slaan op te vangen. Natuurlijk kan die grote hoeveelheid klei van elders worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. Waterschap Hunze en Aa's vroeg zich af of dit anders kon. Er zijn diverse alternatieve kleibronnen in de buurt van de dijk die ook gebruikt kunnen worden. In het demonstratieproject BGD wordt onderzocht of dit kan. Samen met andere partijen kijkt het Waterschap naar de mogelijkheden van klei uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurpleider Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

Het gebruik van (bagger)slib creëert een win-win situatie. Het wegnemen van slib verbetert de waterkwaliteit in de Eems Dollard, wat positief is voor biodiversiteit in het gebied. Daarnaast kan het gesedimenteerde materiaal, na rijping, vervolgens gebruikt worden bij dijkversterkingen en krijgt het daarmee een maatschappelijke en economische waarde. Kortom, het gebruik van lokaal materiaal draagt bij aan een circulaire inzet.

1.1.2 Doel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk

Het doel van dit project is aan te tonen, en daarmee vertrouwen op te bouwen, dat het gerijpte materiaal (het sediment), ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof, geschikt is om er een waterveilige dijk mee te realiseren. Met name het toetsen van verwerkbaarheid en erosiebestendigheid van de gerijpte klei in het veld (proefdijk) en in het laboratorium is hierbij van belang. Bovendien zal een antwoord worden gegeven op de vraag op welke wijze het materiaal verantwoord kan worden toegepast.

Voor het demonstratieproject BGD zal gekeken worden wat het effect is van een flauw talud met helling van 1:7 in combinatie met relatief hoge golven op de erosiesnelheid van de klei. Dit effect is nooit eerder op deze schaal getest en valt momenteel niet binnen het toepassingsgebied van het huidige rekenmodel voor klei-erosie. Het gevolg hiervan is dat er mogelijk te conservatieve aannames worden gedaan voor de dikte van de kleilaag. Daarnaast blijkt uit het demonstratieproject Brede Groene Dijk dat de waarde van een erosiecoëfficiënt van afwijkende kleisoorten niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters.

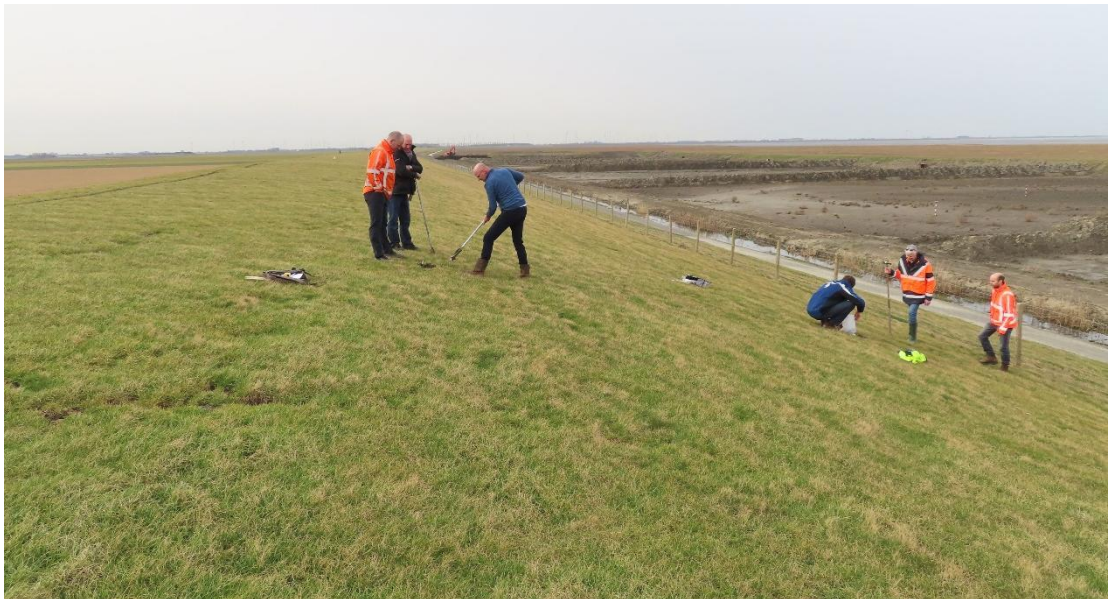
1.1.3 Fasering onderzoek

Voor het verwerven van meer inzicht in de toepasbaarheid, en dus inzicht in de functionele eigenschappen, van de huidige Kleirijperij klei – en de manier waarop met een aangepast ontwerp, adequate uitvoering en een afgestemd beheer kan worden gekomen tot een waterveilige dijk – is het onderzoeksplan onderverdeeld in de volgende onderdelen:

1. Definitiefase en bronnenonderzoek
2. Materiaalonderzoek
 - a. Bestaande dijken
 - b. Aanleg proefdijk
3. Probabilistische berekeningen
4. Structuurproeven met bakken klei
5. Evaluatie en tussenrapportage
6. Krimpgrens en erosiemeterproeven
7. Onderzoek diverse parameters
8. Analyse gevolgen afwijkende parameters
9. Deltagootproeven
10. Eindrapportage

1.2 Onderhavige deelproject

De onderhavige rapportage betreft Stap 9 uit paragraaf 1.1.3, waarin de erosiebestendigheid van verschillende kleisoorten is gemeten in twee proevenseries in de Deltagoot. Deze onderzoeksfaciliteit is bij uitstek geschikt om dit te meten, omdat hierin natuurgetrouwe golven opgewekt kunnen worden, die voldoende vergelijkbaar zijn met de maatgevende omstandigheden bij de Brede Groene Dijk. De proefresultaten worden gebruikt om het rekenmodel van Mourik (2020) te ijken, zodat hiermee het ontwerp kan worden geoptimaliseerd. Tevens is de erosiebestendigheid van de klei van de Groene Dijk van het Wetterskip Fryslân (dijkvak Noorderleeg-Blija in het dijktraject Koehool-Lauwersmeerdijk) gemeten ten behoeve van de periodieke beoordeling van deze dijk en ter vergelijking met de erosiebestendigheid van de huidige Dollarddijk.



Figuur 1.2 De huidige Dollarddijk (rechts: kleirijperij met slib uit de polder Breebaart)

De proevenseries in de Deltagoot geven inzicht in de erosiesnelheid bij golfaanval van de gerijpte en gestructureerde klei op een flauw talud. Deze informatie is belangrijk om aan te tonen of de klei gebruikt kan worden voor de Brede Groene Dijk, ondanks het feit dat deze nu niet voldoet aan de huidige geldende eisen voor dijkklei (TAW, 1996). Daarnaast zullen de testresultaten gebruikt worden om het huidige rekenmodel van Deltares voor klei-erosie door te ontwikkelen. De gemeten erosiesnelheid zal in dit model vertaald worden naar een erosiecoëfficiënt, waarna op probabilistische wijze de faalkans van een dijk met zo'n kleilaag kan worden bepaald. Dit is belangrijke informatie voor het kunnen ontwerpen en optimaliseren van de benodigde laagdikte van de klei op de Brede Groene Dijk. Momenteel is dit model alleen gevalideerd voor klei op een talud steiler dan 1:5, golven tot $H_{m0} = 1,5$ m en normale dijkklei. De Deltagootproeven zijn daarom noodzakelijk om de erosiesnelheid te bepalen voor een afwijkende kleisoort op het flauwe talud van 1:7 van de Brede Groene Dijk met golven van ruim 2 m hoog (zie Bijlage C).

De proeven bestaan uit twee series. In de eerste serie zijn twee soorten geroerde klei aangebracht en verdicht, waarmee de sterkte van de ongestructureerde klei is bepaald die diep onder het maaiveld in de dijk ligt. De structuurvorming vindt namelijk alleen plaats in de buurt van het dijkoppervlak, namelijk in de bovenste 1 à 2 m. In de ene helft van de modelopstelling is gerijpte baggerspecie gebruikt uit de Kleirijperij aan de Valgenweg uit Depot D7. De andere helft is opgebouwd met klei gewonnen uit de kwelder na uitgraving van de Klutenplas. Deze klei is eerst van 2018 tot 2021 gebruikt in de depotdijk rond het kwelderdepot voordat deze is

ingebracht in de Deltagoot. In het vervolg van deze rapportage zullen deze kleisoorten afgekort worden tot “Valgenweg” en “Klutenplas”.

De bovenste laag van de kleibekleding raakt wel gestructureerd. Deze gestructureerde klei inclusief volgroeide grasmat is beproefd in de tweede proevenserie. In samenwerking met het waterschap Hunze en Aa's en het Wetterskip Fryslân zijn hiervoor kleiblokken gestoken van de huidige Dollarddijk en de Friese dijk bij Blija. Zo is de klei ongeroerd in blokken van 2x2 m² in de Deltagoot ingebouwd om de sterkte van de gestructureerde klei met gras te beproeven. Beide dijken zijn in het verleden gemaakt met lokaal beschikbare klei uit de kwelders. Tijdens de structuurproeven met bakken klei (stap 4, zie paragraaf 1.1.3) bleek verder dat de klei uit Blija een vergelijkbaar sterkte structurering had als de gerijpte baggerspecie van de Valgenweg (Klein Breteler, 2021).

Wel kan hier aan toegevoegd worden dat de structuurvorming in de natte winterperiode vermoedelijk minder is dan in de zomer. Toen de klei bij Blija aan het einde van de zomer 2020 is gestoken (Klein Breteler 2021a) bleek deze sterker gestructureerd en minder samenhangend dan de huidige klei van Blija, die na het relatief natte voorjaar van 2021 is gestoken.

De resultaten van beide series geven een compleet beeld van de erosiebestendigheid van het gras, de gestructureerde klei in de toplaag en de ongestructureerde klei dieper in de dijk.

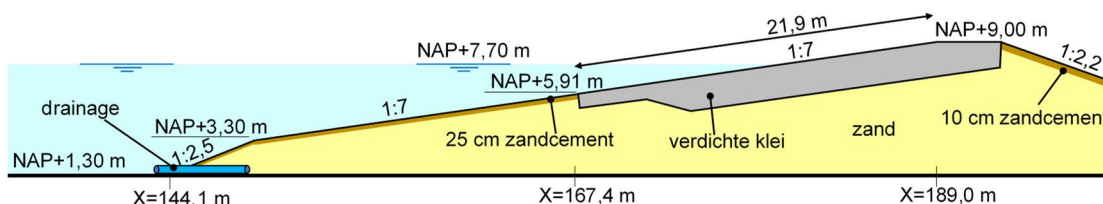
2 Modelopstelling eerste proevenserie

2.1 Dijkschematisering

De modelopstelling voor de Brede Groene dijk, weergegeven in Figuur 2.1, bestaat uit een dijk met een 1,85 m dikke kleilaag en een taludhelling van 1:7. De horizontale maten in de figuur zijn de afstanden tot het golfschot in de Deltagoot. De verticale maten zijn gegeven ten opzichte van NAP. De kruin van de Brede Groene Dijk is 4 m breed en ligt op NAP+9,0 m, wat in de Deltagoot overeenkomt met +7,7 m boven de gootbodem. De bodem van de goot is 1,2 m dieper gekozen dan het kwelderniveau van NAP+2,5 m voor de dijk om voldoende hoge golven te kunnen opwekken met het golfschot. Daardoor is het mogelijk om golven op te wekken die overeenkomen met de golven bij de Brede Groene Dijk tijdens een superstorm.

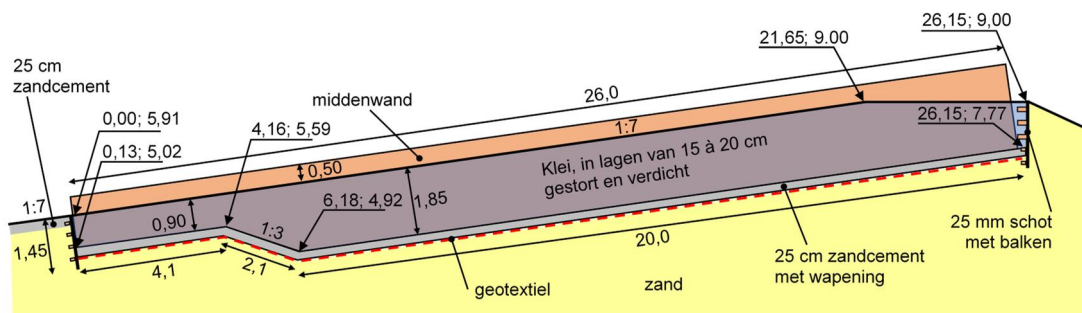
Alle proeven zijn uitgevoerd bij een waterstand van +6,4 m ten opzichte van de gootbodem. Dit is de optimale waterstand voor het genereren van grote golven in de Deltagoot. Deze waterstand komt overeen met een extreme waterstand bij de Brede Groene Dijk van NAP+7,7 m.

In totaal heeft de dijk een taludlengte van bijna 50 m. De kleilaag is alleen aangebracht in de bovenste 26 m van het talud. Dat is de zone waar de erosie te verwachten is. Het onderste deel van het talud, vanaf NAP+3,3 m tot 1,8 m onder de waterlijn, is afgedekt met zandcement op een taludhelling van 1:7. Tot NAP+3,3 m (+2,0 m boven de gootbodem) is een steiler talud gemaakt van 1:2,5. Dit deel zit zo diep onder water dat het geen invloed heeft op de golfbelasting van de klei.



Figuur 2.1 Verticale doorsnede van de eerste modelopstelling in de Deltagoot.

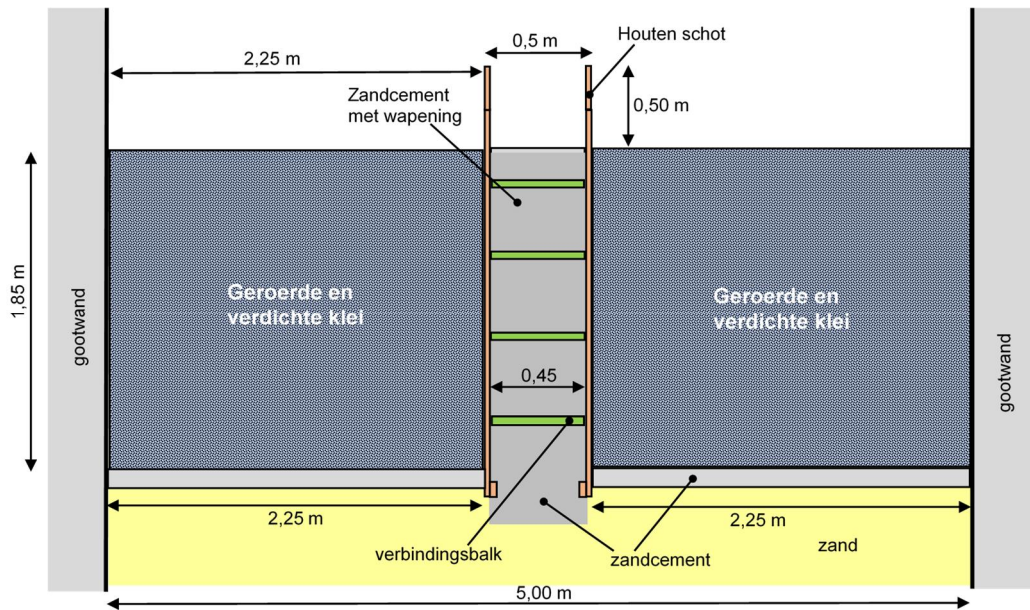
In Figuur 2.2 is ingezoomd op het taluddeel met klei. Hierin zijn alle hoogtematen weergegeven ten opzichte van NAP. De horizontale maat is ten opzichte van het linker beginpunt van de kleibekleding. In het grootste gedeelte is in totaal een pakket van 1,85 m aan klei geplaatst, wat in tien verschillende lagen parallel aan het talud is verdicht. In het onderste deel van het talud is de kleidikte 0,9 m omdat hier minder erosie wordt verwacht.



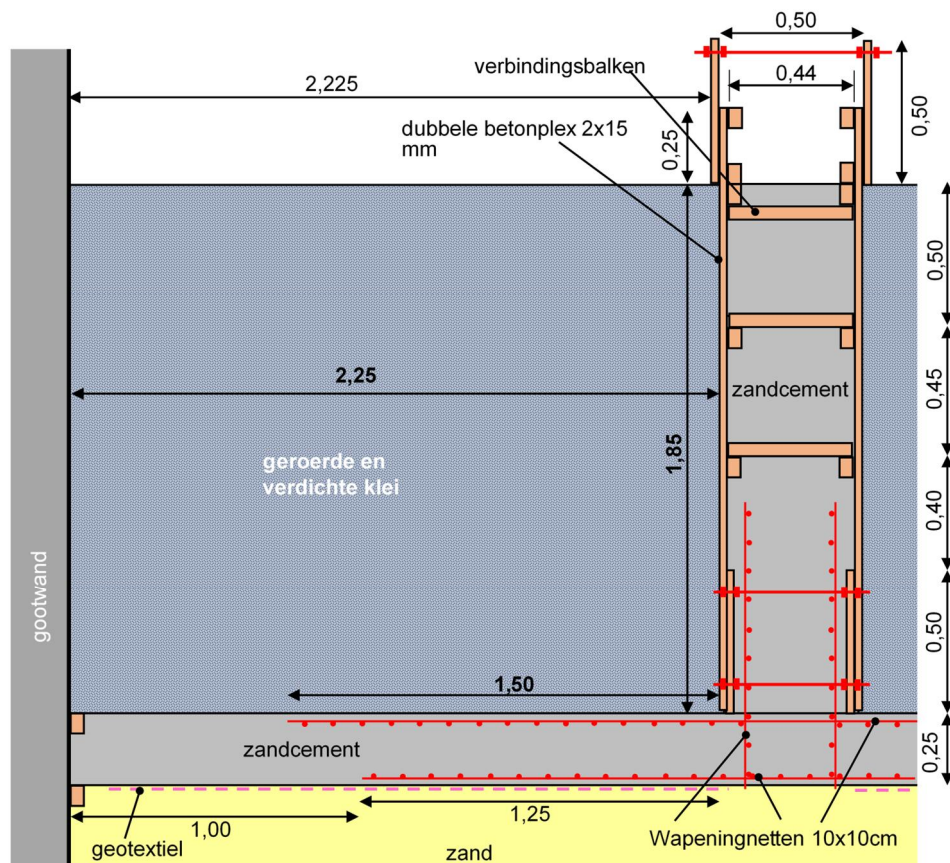
Figuur 2.2 Modelopstelling met geroerde en verdichte klei in de eerste proevenserie, hoogtematen t.o.v. NAP.

In Figuur 2.3 is de dwarsdoorsnede van de modelopstelling gegeven. Hierin is te zien dat er twee kleitaluds naast elkaar liggen op een laag zandcement, met een scheidingswand ertussen. Figuur 2.4 laat een detailtekening zien met de constructieve onderdelen waaruit de

opstelling bestaat. De scheidingswand is opgebouwd uit houten platen die als bekisting fungeren voor het zandcement wat ertussen is gestort. Het is zo vormgegeven dat ook de tweede modelopstelling hiermee gemakkelijk kan worden opgebouwd. Aan weerszijden van de scheidingswand zijn beide kleisoorten aangebracht in laagjes van 15-20 cm dik die elk zorgvuldig zijn verdicht. Zo is een goed verdichte kleilaag verkregen met een dikte van 1,85 m. De opbouwfase van deze opstelling is beschreven met foto's en bijschriften in Bijlage B.1.



Figuur 2.3 Dwarsdoorsnede van de eerste modelopstelling met geroerde en verdichte klei.

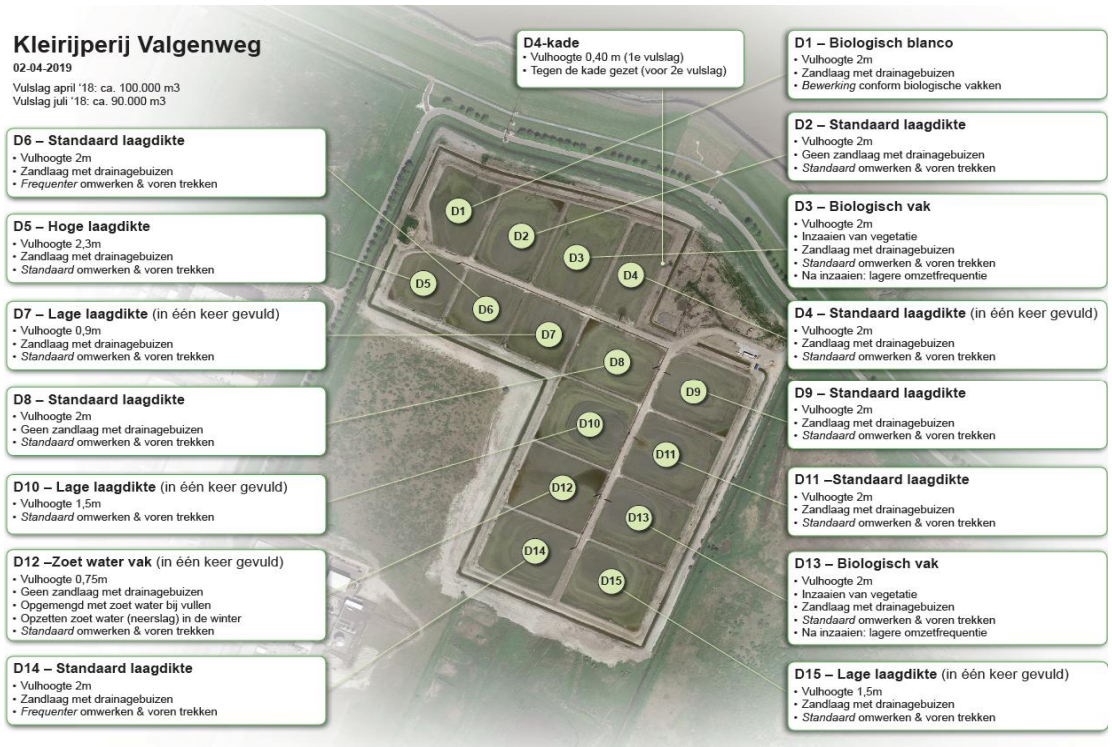


Figuur 2.4 Dwarsdoorsnede van de modelopstelling met constructieve details.

2.2 Herkomst klei

Voor de eerste proevenserie in de Deltagoot is gebruikgemaakt van klei uit twee verschillende bronnen:

- Uit de Kleirijperij langs de Valgenweg, depot D7, oorspronkelijk afkomstig uit het Havenkanaal van Delfzijl (Figuur 2.5)
- Klei oorspronkelijk afkomstig uit de Klutenplas, die gewonnen is uit de ringdijk rond de Kleirijperij op de kwelder (Figuur 2.6)



Figuur 2.5 Kleidepot Valgenweg waarvan klei van depot D7 is gebruikt in de Deltagoot.



Figuur 2.6 Kleirijperij op de kwelder bij de Klutenplas. De klei uit de ringdijk is gebruikt voor de Deltagoot-proeven. Deze is oorspronkelijk afgegraven uit de kwelder voor het maken van de Klutenplas, op de foto te zien net rechts van de depots met het eilandje in het midden.

De eerste klei afkomstig van de Valgenweg is in de Pilot Kleirijperij omgezet van slib naar klei. In de Pilot Kleirijperij onderzoeken Rijkswaterstaat, de provincie Groningen, Groningen Seaports, waterschap Hunze & Aa's, Het Groninger Landschap en EcoShape verschillende manieren om slib om te vormen tot klei. Onderzoekers van EcoShape voeren praktijkproeven uit om te kijken welke manier van rijpen het best werkt. Er is specifiek gekozen voor de klei uit depot D7. Dit depot bevat zanddrainage en was in één keer gevuld met een kleine laagdikte in april 2018 en is daarna diverse malen omgezet. Deze klei is daarmee het verst gerijpt en lijkt daarom het meest op het eindproduct.

De tweede kleisoort is afkomstig van de kwelder (het voorland) van de locatie waar de Brede Groene Dijk gaat worden aangelegd. Deze klei is in augustus / september 2018 enkele weken gedroogd en daarna gebruikt voor de ringdijk rond het kwelderdepot.

2.3 Klei eigenschappen

Een aantal belangrijke eigenschappen van de twee soorten klei zijn gegeven in Tabel 2.1 en Tabel 2.2. Deze waarden zijn afkomstig van een geotechnisch laboratoriumonderzoek van zes kleimonsters, uitgevoerd door Wiertsema & Partners en opgeleverd op 30 april 2021 (Feenstra, 2021). Deze zes monsters zijn willekeurig genomen uit de geleverde klei die is ingebracht in de Deltagoot in Delft.

Er zijn een aantal opvallende verschillen tussen de gemeten eigenschappen van de klei uit de Deltagoot en de gemeten waarden voor de proefdijk uit Van den Heuvel (2020). Het lutumgehalte is meer dan 10 procentpunt hoger voor beide kleisoorten. Wat verder opvalt is het relatief hoge zandgehalte van de Valgenwegklei, namelijk rond de 30%, terwijl bij de aanleg van de proefdijk dit nog 11,8% was. Voor de Klutenplasklei is het zandgehalte van 11,8% ook iets hoger dan de gemeten waarden voor de proefdijk, die 5,5% was. Het kalkgehalte is daarentegen iets afgenomen.

De Valgenwegklei heeft verder een veel lager gehalte organische stof in vergelijking met de metingen voor de proefdijk, die toen is bepaald op 10,9%. De oorzaak van deze verschillen is niet duidelijk. De locatie waar de klei precies is weggehaald kan een rol spelen. De klei die naar de Deltagoot is gebracht komt uit één deel van het Valgenwegdepot en uit één specifiek deel van de ringdijk rond het kwelderdepot. De monsters uit de ringdijk tijdens het aanleggen van de proefdijk zijn destijds wat meer verspreid genomen.

Verder geldt dat in de depots meer zand terecht kwam bij de locatie waar de persleiding lag tijdens het vullen. Hier zijn in het verleden geen monsters genomen. Mogelijk dat we nu in die zone zijn gekomen. Anderzijds is het denkbaar dat er lokaal wat drainagezand in de klei gemengd is geraakt. Visuele inspectie van de klei heeft getoond dat het zand volledig verdeeld in de klei gemengd is, waardoor de invloed op de erosiesnelheid bij golfbelasting vermoedelijk beperkt is. Elke zandkorrel is dan omgeven door kleideeltjes, waardoor het geheel overal goede samenhang heeft.

Het gemeten zoutgehalte is omgerekend naar een gehalte bij een watergehalte van 50%, namelijk het watergehalte waarmee de klei in de Deltagoot is aangelegd. Hiermee zijn de waarden van de verschillende metingen met elkaar te vergelijken. Wat opvalt is de grote variatie in het zoutgehalte voor de Klutenplasklei. Dit zou kunnen komen doordat de klei voor langere tijd in de ringdijk heeft gezeten waardoor er variatie is ontstaan in het zoutgehalte over de diepte. Zout gaat migreren in de klei door regen en verdroging.

Op beide kleisoorten zijn ook vijfpunts-proctorproeven uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 2.7. De gegevens hiervoor zijn ontleend aan de rapportage van de aanleg van de proefdijk, namelijk de T0-meting (Van den Heuvel, 2020). De klei afkomstig van de

Kleirijperij (Valgenweg en de Klutenplas) heeft een relatief hoog optimaal vochtgehalte. Mogelijk komt dit door het hoge gehalte aan zout en organische stof.

Valgenweg	Monster 1	Monster 2	Monster 3	Gemiddeld
Lutumgehalte, fractie < 2µm (%)	38,8	39,8	38,0	38,9
Zandfractie, fractie > 63µm (%)	30,0	28,8	32,3	30,4
Uitrolgrens (%)	30,9	31,5	38,2	33,5
Vloeigrens (%)	99,4	87,1	93,2	93,2
Plasticiteitsindex (%)	68,5	55,6	55,0	59,7
Watergehalte (%)	46,3	50,2	49,8	48,8
Organische stof (%) d.m.v. gloeiverlies	6,1	5,8	6,5	6,1
Organische stof (%) d.m.v. massaverlies H ₂ O ₂	6,0	2,0	6,1	4,7
Kalkgehalte (%) d.m.v. gloeiverlies	10,2	9,8	10,6	10,2
Kalkgehalte (%), d.m.v. massaverlies HCl	12,5	10,3	13,8	12,2
Zoutgehalte in bodemvocht (g/l)	19,4	16,9	20,3	18,9
Berekend zoutgehalte bij 50% watergehalte (g/l)	18,0	17,0	20,2	18,5

Tabel 2.1 Enkele relevante eigenschappen van de Valgenwegklei. Alle massapercentages zijn t.o.v. de droge stof.

Klutenplas	Monster 1	Monster 2	Monster 3	Gemiddeld
Lutumgehalte, fractie < 2µm (%)	44,3	49,7	44,1	46,0
Zandfractie, fractie > 63µm (%)	10,6	8,3	16,3	11,7
Uitrolgrens (%)	33,0	32,0	32,5	32,5
Vloeigrens (%)	89,1	90,0	95,7	91,6
Plasticiteitsindex (%)	56,1	58,0	63,2	59,1
Watergehalte (%)	49,0	37,1	45,1	43,7
Organische stof (%) d.m.v. gloeiverlies	6,6	7,0	6,7	6,8
Organische stof (%) d.m.v. massaverlies H ₂ O ₂	6,0	7,8	6,1	6,6
Kalkgehalte (%) d.m.v. gloeiverlies	11,9	11,0	12,2	11,7
Kalkgehalte (%), d.m.v. massaverlies HCl	13,7	15,2	13,5	14,1
Zoutgehalte in bodemvocht (g/l)	5,3	37,4	10,0	17,6
Berekend zoutgehalte bij 50% watergehalte (g/l)	5,2	27,8	9,0	14,0

Tabel 2.2 Enkele relevante eigenschappen van de Klutenplasklei. Alle massapercentages zijn t.o.v. de droge stof.

Er zijn ook Roto-erosiemeterproeven uitgevoerd op dit materiaal (Van Essen, 2021). De Roto-erosiemeter bestaat uit een trommel met schoepen die rond een cilindrisch monster draait. De trommel is met water gevuld, waardoor het rond het monster stromende water erosie geeft. De massa van het monster wordt tijdens vooraf in te stellen pauzemomenten, waarbij de trommel tijdelijk stilstaat, gemeten door het automatisch optillen van het monster. De massa-afname geeft de mate van erosie, die afhankelijk is van de snelheid waarmee de schoepen rondraaien.

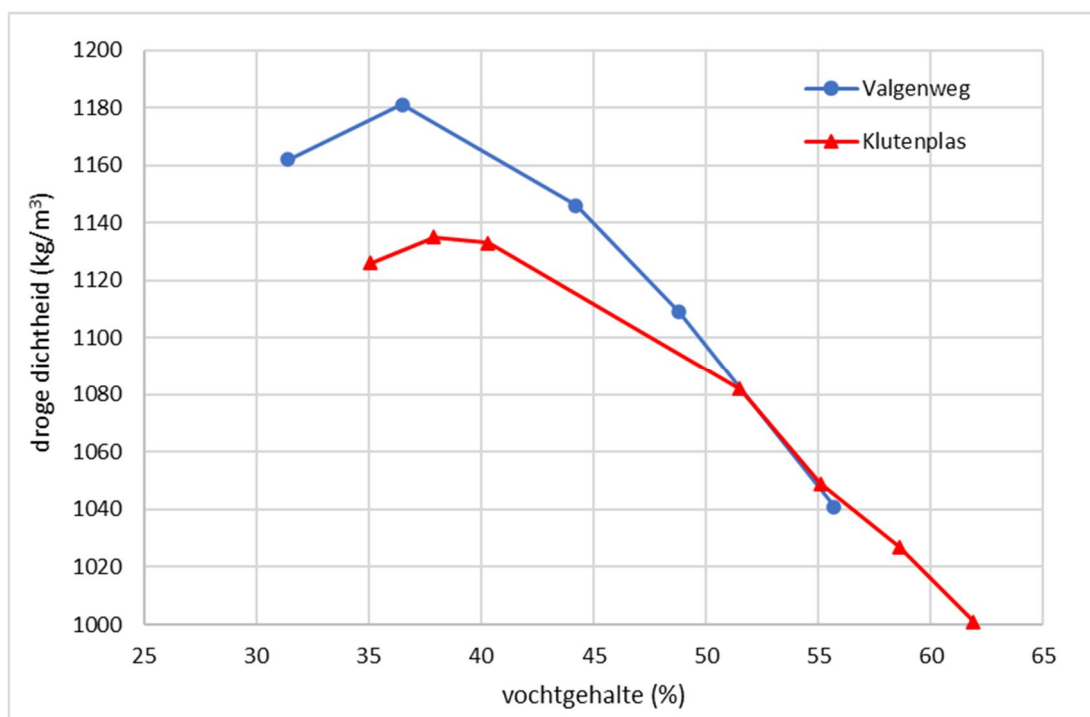
De proeven laten zien dat de klei van de Valgenweg begint te eroderen bij 1100 toeren/minuut en die van de Klutenplas nog nauwelijks erodeert bij 1300 toeren/minuut. Ook in de Deltagoot bleek de klei van de Klutenplas beter erosiebestendig dan de Valgenwegklei (zie paragraaf 4.2).

2.4 Klei aanbrengen in de Deltagoot

Bij de start van het onderzoek was gesteld dat we streven naar de volgende consistentie-index en mate van verdichting van de klei:

- Consistentie-index van ruim 0,6, behalve in de bovenste halve meter van de laag, want daar is het streven ongeveer 0,7
- Proctordichtheid van iets onder 97% bij het heersende vochtgehalte

Deze eisen sluiten aan bij de minimum eisen die gesteld gaan worden in de uitvoering. Er is bewust gekozen om de klei volgens deze minimum eisen aan te brengen, zodat in de Deltagoot de minimale sterkte van de dijk gemeten wordt. In de praktijk zal de dijksterkte van de Brede Groene Dijk dus gelijk of beter zijn dan in de Deltagoot. Om deze consistentie-index te behalen is een vochtgehalte benodigd onder de 52% als massapercentage van de droge stof. Na levering van de klei is voor beide kleisoorten het vochtgehalte bepaald door meerdere monsters te drogen. Hieruit bleek dat de Klutenplasklei rond het gewenste watergehalte zat en is besloten deze goed af te dekken met plastic zeil.



Figuur 2.7 Resultaten van de vijfpunts-proctorproeven voor de Valgenweg en Klutenplasklei.

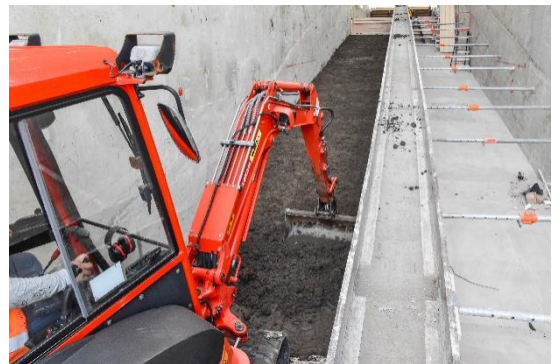
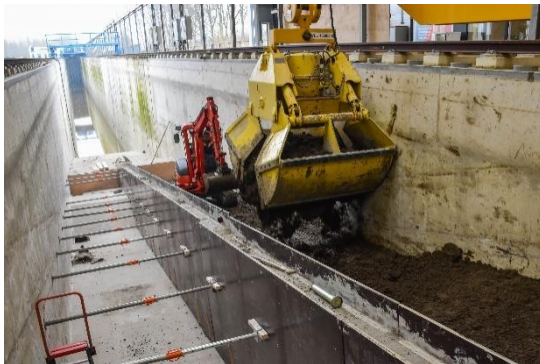
De klei van de Valgenweg bleek echter veel te nat te zijn met een watergehalte tussen de 60 en 75%. Allereerst is geprobeerd de klei te drogen in tenten met elektrische verwarming op het terrein. Omdat dit onvoldoende heeft geholpen, is de klei op 19 maart bij een bedrijf gespecialiseerd in het drogen van grond uitgespreid in een kas in een vak van 1500 m². Hier is de klei 7 tot 12 dagen gedroogd. Met een speciale omzetmachine is de klei dagelijks omgezet voor een gelijkmatige droging. Na een week zijn er dagelijks ladingen klei teruggebracht en direct geplaatst in de Deltagoot. Figuur 2.8 laat de klei op het Deltagootterrein zien en in Figuur 2.9 is een foto weergegeven van het drogen in de kas.



Figuur 2.8 Klei op het Deltagoot terrein: links de klei van de Klutenplas die wordt afgedekt, rechts de te natte klei van de Valgenweg in tenten met verwarming om te drogen.



Figuur 2.9 Drogen van de Valgenwegklei op ruggen in de kas (links) en terugbrengen van de klei in de hal langs de Deltagoot (rechts).



Figuur 2.10 Aanbrengen van de Klutenplasklei met grijper en verspreiden tot een laag met rupskraan.



Figuur 2.11 Verdichten van de klei met wals en rupskraan.



Figuur 2.12 Gestoken steekring in klei (links) en afgesneden steekringen (rechts) voor dichtheidsmeting.

Beide kleisoorten zijn in 10 lagen van 15 tot 20 cm aangebracht parallel aan het talud (zie Figuur 2.10). Na het aanbrengen van elke laag is de klei verdicht met een 2,5 tons wals door er 1 tot 2 keer overheen te rijden. Na aanbrengen van de vierde kleilaag aan de Valgenwegkant is besloten met de 3 tons rupskraan te verdichten omdat met de wals de verdichting iets te groot werd. Figuur 2.11 laat zien hoe de kleilagen zijn verdicht. Door de wijze van werken zijn er bepaalde stroken iets meer verdicht geraakt dan andere stroken.

In de praktijk wordt vaak een grotere dikte per laag aangehouden, maar omdat dan zwaarder materieel wordt gebruikt voor het verdichten, is het resultaat naar verwachting vergelijkbaar.

Tijdens het aanbrengen is in elke laag op twee of meer plekken de dichtheid bepaald door het nemen van steekringmonsters (Figuur 2.12). Door de steekring met bekend volume in de klei te drukken en vervolgens strak af te snijden, is de natte dichtheid bepaald. Na droging van een deel van het monster zijn vervolgens het watergehalte, consistentie-index, droge dichtheid, en 1-puntsproctordichtheid (bij in-situ watergehalte) bepaald.

Tabel 2.3 en Tabel 2.4 geven de gemeten waarden die volgen uit de steekringmonsters per aangebrachte laag en gemiddeld per kleisoort. Beide kleisoorten zijn verdicht bij een watergehalte rond de 50% tot een gemiddelde proctordichtheid van 97,5% bij het heersende vochtgehalte. Verder zit de consistentie-index rond 0,7. In de praktijk is het plan om als ondergrens 0,6 aan te houden. Wat het effect van dit verschil is op de erosiesnelheid is niet bekend.

	Watergehalte (%)	Consistentie-index (-)	Natte dichtheid (kg/m ³)	Droge dichtheid (kg/m ³)	Proctor dichtheid (%)
Laag 1	52	0,69	1598	1051	97,8
Laag 2	52	0,70	1598	1055	97,6
Laag 3	50	0,73	1590	1061	97,4
Laag 4	50	0,72	1605	1071	98,3
Laag 5	52	0,69	1600	1053	97,7
Laag 6	50	0,73	1581	1058	96,9
Laag 7	51	0,71	1574	1046	96,5
Laag 8	49	0,75	1588	1068	97,6
Laag 9	51	0,71	1582	1050	97,1
Laag 10	48	0,75	1597	1077	98,2
gemiddeld	50	0,72	1592	1062	97,6

Tabel 2.3 Gemeten waarden van aangebrachte Valgenwegklei per aangebrachte laag en het gemiddelde.

	Watergehalte (%)	Consistentie-index (-)	Natte dichtheid (kg/m ³)	Droge dichtheid (kg/m ³)	Proctor dichtheid (%)
Laag 1	50	0,70	1623	1081	99,3
Laag 2	51	0,68	1588	1050	97,4
Laag 3	54	0,63	1554	1008	95,3
Laag 4	50	0,71	1591	1062	97,5
Laag 5	54	0,63	1583	1026	97,1
Laag 6	52	0,67	1578	1038	97,0
Laag 7	52	0,67	1598	1052	97,9
Laag 8	51	0,69	1583	1049	96,9
Laag 9	51	0,69	1597	1061	97,8
Laag 10	51	0,69	1590	1056	97,5
gemiddeld	51	0,68	1589	1050	97,4

Tabel 2.4 Gemeten waarden van aangebrachte Klutenplasklei per aangebrachte laag en het gemiddelde.

3 Modelopstelling tweede proevenserie

3.1 Dijkschematisering

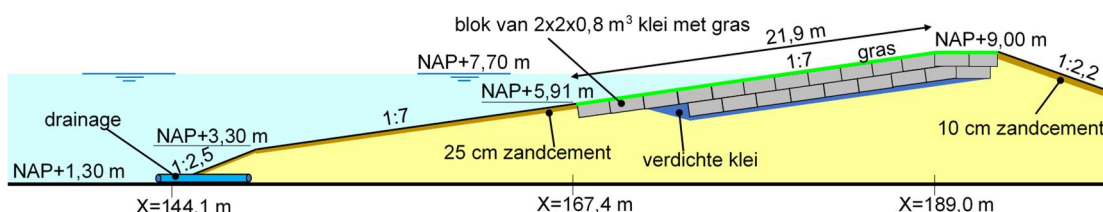
De modelopstelling van de tweede proevenserie was in grote lijnen gelijk aan die van de eerste proevenserie, zie Figuur 3.1. Ook nu is er sprake van een taludhelling van 1:7 en een kleilaagdikte van 1,85 m. In dit geval was de kruinhoogte aan de halzijde, waar klei van de Dollarddijk is aangebracht, hetzelfde als in de eerste proevenserie. De kruinhoogte aan de meetcabinezijde, waar de klei van de Groene Dijk bij Blija was aangebracht, was in de Deltagoot 56 cm hoger. Door het verschil in referentieniveau voor deze twee dijken is de kruinhoogte vertaald naar de werkelijkheid voor de Dollarddijk NAP+9,00 m en voor de dijk bij Blija NAP+8,26 m. Dit is te zien in Figuur 3.2 t/m Figuur 3.5.

De proeven zijn uitgevoerd met een waterstand van +6,40 m ten opzichte van de gootbodem, dat omgerekend naar de werkelijkheid overeenkomt met NAP+7,70 m voor de Dollarddijk (Brede Groene Dijk) en NAP+6,40 m voor de dijk bij Blija.

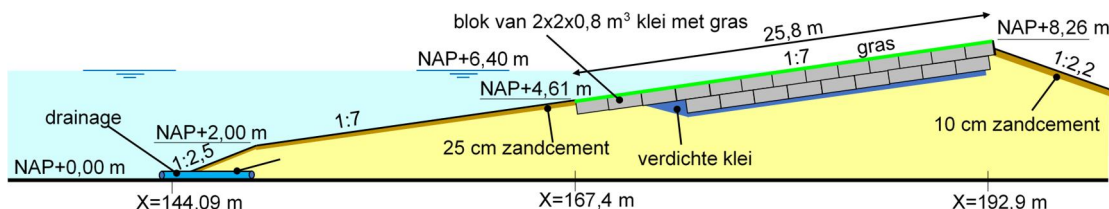


Figuur 3.1 Tweede modelopstelling in de Deltagoot met kleibekleding met gras van de Dollarddijk (halzijde) en een kleibekleding met gras van de Groene Dijk bij Blija (meetcabinezijde)

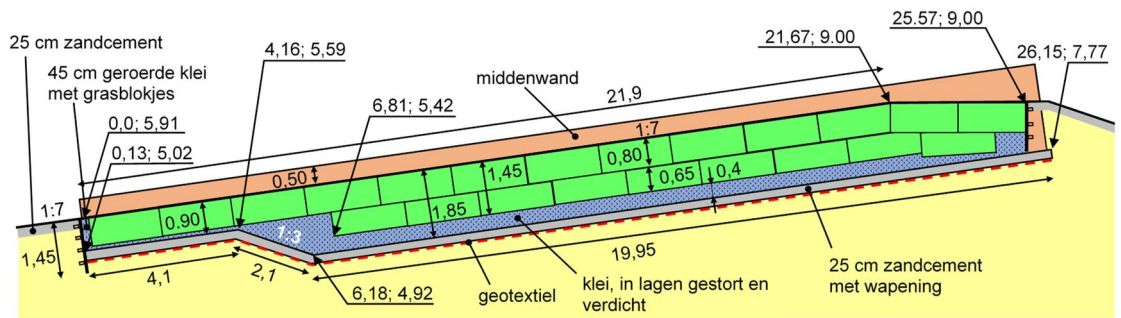
Een ander belangrijk verschil met de eerste proefopstelling is dat er nu klei van een bestaande dijk is gehaald in ongeroerde staat, inclusief gras. Dit is gerealiseerd door blokken klei van 2 x 2 m² en circa 80 cm dik van de dijk te halen en met deze blokken de modelopstelling in de Deltagoot op te bouwen. Deze blokken zijn ook getekend in Figuur 3.2 t/m Figuur 3.5.



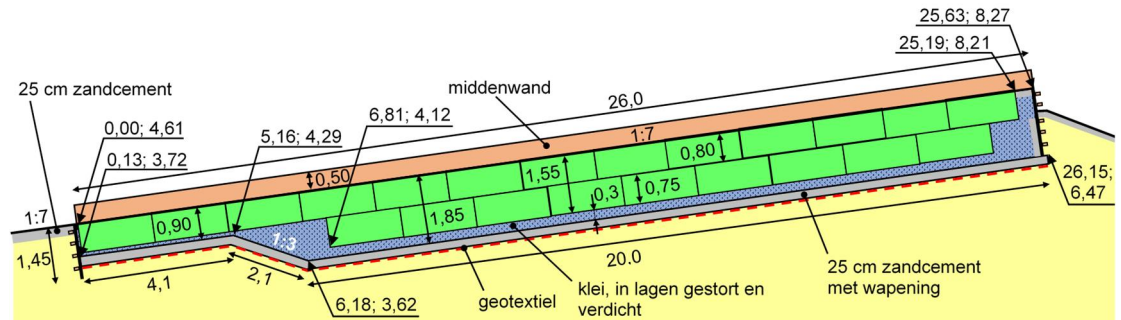
Figuur 3.2 Tweede modelopstelling in de Deltagoot aan de halzijde met klei en gras van de Dollarddijk



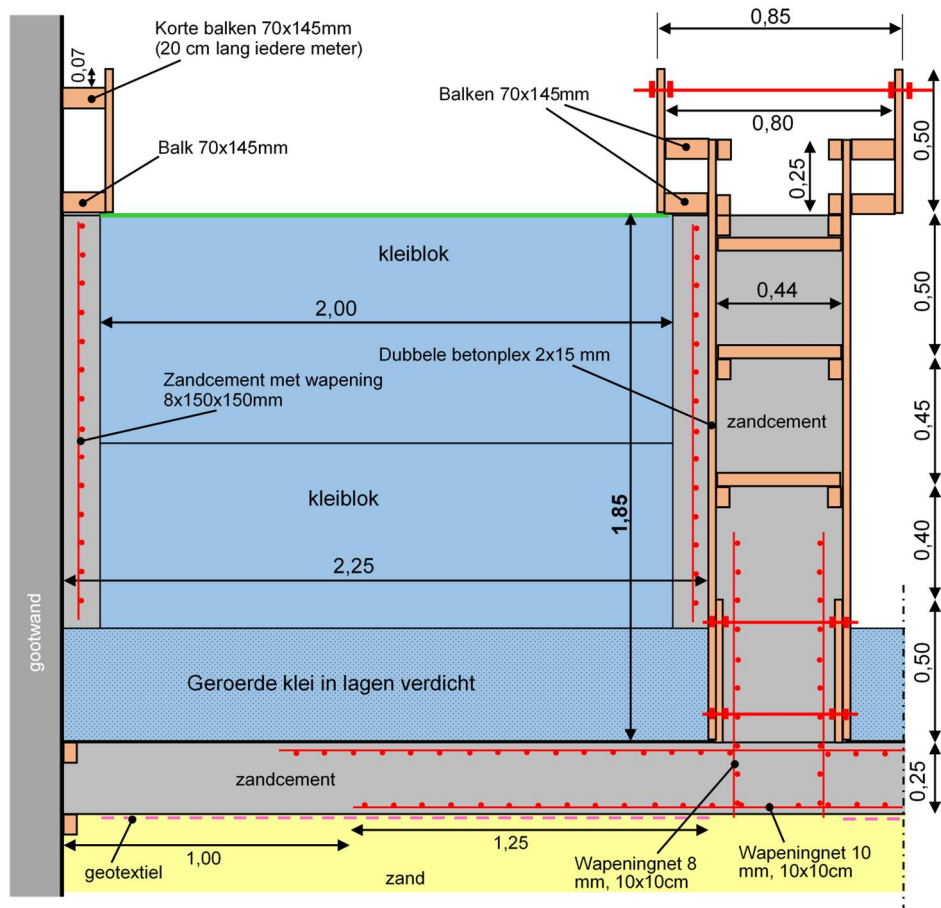
Figuur 3.3 Tweede modelopstelling in de Deltagoot aan de meetcabinezijde met klei en gras van de dijk bij Blija



Figuur 3.4 Detail van de modelopstelling in de Deltagoot met klei en gras van de Dollarddijk (hoogtes t.o.v. NAP)



Figuur 3.5 Detail van de modelopstelling in de Deltagoot met klei en gras van de dijk bij Blija (hoogtes t.o.v. NAP)



Figuur 3.6 Verticale dwarsdoorsnede over de Deltagoot (rechterzijde is niet getekend. Deze is gespiegeld ten opzichte van de linkerzijde)

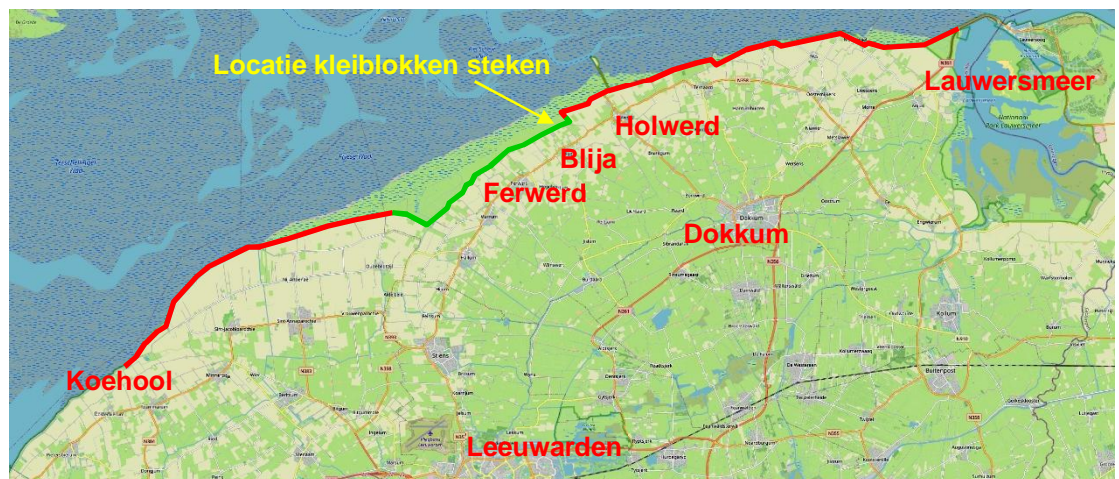
In Figuur 3.6 is de verticale dwarsdoorsnede te zien. Er is eerst een laag geroerde klei in lagen aangebracht en verdicht door er met een rupskraantje overheen te rijden. De laagdikte was bij de zijde met klei van de Dollarddijk 40 cm en aan de zijde met Blija klei was dit 30 cm. Daarop zijn kleiblokken van 2 x 2 m² geplaatst in twee lagen. Tussen de kleiblokken en de middenwand en tussen de kleiblokken en de gootwand is wapening geplaatst en is zandcement gestort, zoals te zien is in de figuur. Hierdoor is een goede aansluiting gerealiseerd tussen de klei en de wand. Het steken van de kleiblokken op de dijken en de plaatsing ervan in de Deltagoot is nader toegelicht in paragraaf 3.2.

3.2 Steken van de kleiblokken

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 waardoor het dus van belang is dat de erosieproef wordt uitgevoerd met gestructureerde klei. Daarom zijn voor de proeven blokken gestructureerde klei in ongeroerde toestand van de Dollarddijk en de dijk bij Blija gehaald. De locatie waar de kleiblokken zijn gestoken, is aangegeven in Figuur 3.7 t/m Figuur 3.9.



Figuur 3.7 Locatie waar de kleiblokken met gras zijn gestoken op het buitentalud van de Dollarddijk (zie ook Figuur 1.1)



Figuur 3.8 De dijk Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân (rood: met harde bekleding op het ondertalud; groen: volledig met kleibekleding en gras)



Figuur 3.9 Locatie waar kleiblokken met/zonder gras zijn gestoken op het buitentalud van de dijk bij Blija (Wetterskip Fryslân) ter plaatse van dijkpaal 36,90-36,94

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 met een hydraulische kraan als een doos zonder bodem in het taludoppervlak gedrukt, zie Figuur 3.10. Er is visueel gecontroleerd of dit invloed had op de structuur van de klei, maar er is vastgesteld dat hier geen sprake van was. Vervolgens is de klei rondom weggegraven en is de bodemplaat eronder geschoven, zie Figuur 3.11. Dit leverde het gewenste blok klei met gras dat naar de Deltagoot is vervoerd. Meer foto's van de werkzaamheden zijn te vinden in bijlage B.3.1.



Figuur 3.10 Drukken van de zijwanden van de mal in het taludoppervlak.



Figuur 3.11 Ontgraven van de gedrukte mal (links) en het eronder schuiven van de bodemplaat (rechts)

Voor de onderste laag kleiblokken is op de dijk bij Blija eerst de graslaag verwijderd voordat de kleiblokken zijn gestoken, zie Figuur 3.12. Dit is nader toegelicht in paragraaf 3.4.



Figuur 3.12 Verwijderen graslaag voor het steken van de onderste kleiblokken van Blija

3.3 Eigenschappen van de klei en het gras

Voor het bepalen van de eigenschappen van de klei zijn zowel monsters genomen uit de leeflaag vlak onder het gras als dieper in de kleilaag. De resultaten zijn te zien in Tabel 3.1, Tabel 3.2 en Figuur 3.14. Deze eigenschappen zijn bepaald door Wiertsema&Partners.

De eigenschappen van de klei van de Dollarddijk vertonen een vrij grote spreiding. Er is een monster bij met 51% lutum en 5% zand en een monster met 30% lutum en 38% zand. Ook op de dijk is visueel geconstateerd dat de klei in het oostelijke deel van het steekgebied veel meer zand bevatte dan in het westelijke deel. De klei in de leeflaag wijkt niet af van de rest van de kleilaag. Bij de aanleg van deze dijk waren er diverse problemen, zoals het hoge vochtgehalte van de klei. Dit is beschreven in Bijlage D.

In paragraaf 5.2 is te zien dat de erosie aanving in een kleiblok dat aan de oostkant was gestoken en daarom vermoedelijk van mindere kwaliteit was.

Het tweede kleiblok met gras in de Deltagoot, gerekend vanaf de onderkant van het kleitalud, had een relatief hoog zandgehalte. In dat kleiblok is de erosie tijdens de proeven gestart.

De eigenschappen van de klei op de dijk bij Blija hebben veel minder spreiding. Hier zien we dat de leeflaag een hogere vloeigrens, uitrolgrens en plasticiteitsindex heeft dan de eronder gelegen kleilaag, terwijl het lutumgehalte en zandgehalte niet veel verschillen.

De klei was gestructureerd, maar dat was niet goed te zien. De structuurvorming in de natte winterperiode is vermoedelijk minder dan in de zomer. Toen de klei bij Blija aan het einde van de zomer van 2020 is gestoken (Klein Breteler 2021a) bleek deze sterker gestructureerd en minder samenhangend dan de huidige klei van Blija, die na het relatief natte voorjaar van 2021 is gestoken.

Voor beide kleisoorten geldt dat het volgens TAW (1996) categorie 1 is en volgens de schematiseringshandleiding voor gras (RWS, 2019) is het stevige klei.

Tijdens de proeven zijn voor elke kleisoort drie steekringmonsters genomen om de dichtheid te bepalen. Voor de klei van de Dollarddijk zijn deze monsters genomen in het 5^{de} en 7^{de} onderblok en in het 13^{de} bovenblok (geteld vanaf de zeezijde richting de kruin) na proef B2_14. Voor de klei uit de dijk bij Blija zijn deze genomen aan het eind van het proevenprogramma in het 4^{de}, 5^{de} en 8^{ste} bovenblok. De gemeten waarden zijn weergegeven in Tabel 3.3. De droge

dichtheid van de klei uit Blija heeft met gemiddeld 1401 kg/m³ een hogere dichtheid dan de klei van de Dollarddijk met gemiddeld 1212 kg/m³. In vergelijking tot recent gerijpte klei (droge dichtheid van ca 1000 à 1100 kg/m³) zijn deze waarden een stuk hoger. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het hoge gehalte aan organisch materiaal in de klei uit de kleirijperij. .

Ten opzichte van het optimale watergehalte is hiermee in de proctordichtheid van de klei van de Dollarddijk 89% en die van Blija 91% (zie Figuur 3.13).

Dollarddijk	leeflaag			kleilaag				
	2	4	gem,	1	3	5	6	gem,
Monsternummer								
Monsterdiepte tov taludoppervlak (cm)	15	15	15	65	65	75	65	68
Lutumgehalte, fractie < 2µm (%)	44,3	38,4	41,4	50,7	46,3	30,0	36,8	41,0
Zandfractie, fractie > 63µm (%)	13,3	24,8	19,1	5,2	6,4	37,7	24,2	18,4
Uitrolgrens (%)	31,7	32,9	32,3	31,5	28,9	23,2	28,5	28,0
Vloeigrens (%)	69,6	70,9	70,3	80,3	73,9	61,6	67,0	70,7
Plasticiteitsindex (%)	37,9	38,0	38,0	48,8	45,0	38,4	38,5	42,7
Organische stof (%) d.m.v. massaverlies H ₂ O ₂	3,9	4,3	4,1	3,3	3,9	3,7	3,3	3,6
Kalkgehalte (%), d.m.v. massaverlies HCl	12,3	12,8	12,6	11,8	11,7	9,1	8,6	10,3
Zoutgehalte in bodemvocht (g/l)	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1

Tabel 3.1 Enkele relevante eigenschappen van de klei van de Dollarddijk. Alle massapercentages zijn t.o.v. de droge stof (gem. = gemiddeld)

Blija	leeflaag			kleilaag				
	2	5	gem.	1	3	4	6	gem.
Monsternummer								
Monsterdiepte tov taludoppervlak (cm)	10	10	10,0	90	55	90	55	72,5
Lutumgehalte, fractie < 2µm (%)	40,8	41,8	41,3	47,1	41,5	47,3	44,1	45,0
Zandfractie, fractie > 63µm (%)	10,0	10,3	10,2	7,5	9,3	4,5	9,9	7,8
Uitrolgrens (%)	37,0	40,6	38,8	22,8	24,9	26,5	27,7	25,5
Vloeigrens (%)	85,9	83,7	84,8	56,4	52,0	59,8	62,3	57,6
Plasticiteitsindex (%)	49,0	43,2	46,1	33,6	27,1	33,3	34,5	32,1
Organische stof (%) d.m.v. massaverlies H ₂ O ₂	4,3	7,3	5,8	4,1	1,1	1,5	3,3	2,5
Kalkgehalte (%), d.m.v. massaverlies HCl	8,2	10,8	9,5	10,5	9,5	10,0	11,5	10,4
Zoutgehalte in bodemvocht (g/l)	0,1	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,1

Tabel 3.2 Enkele relevante eigenschappen van de klei van de dijk bij Blija. Alle massapercentages zijn t.o.v. de droge stof (gem. = gemiddeld)

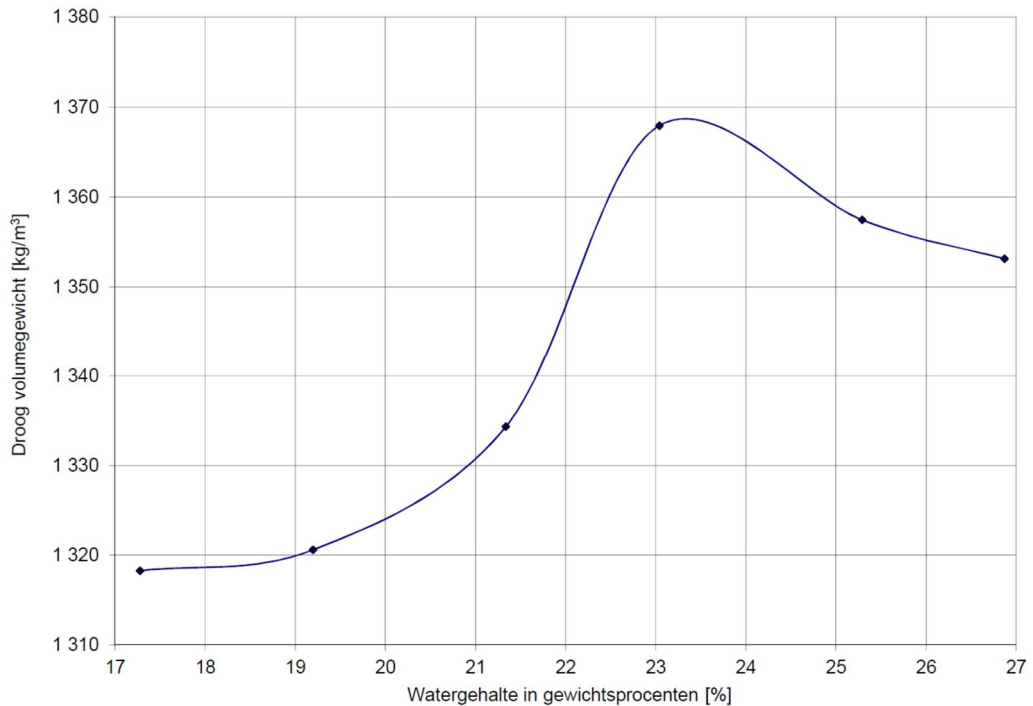
		Bloknummer	Diepte in blok (cm)	Droge dichtheid (kg/m ³)
Dollarddijk	Steekring 1	Onderblok 5	15	1267
	Steekring 2	Onderblok 7	20	1226
	Steekring 3	Bovenblok 13	10	1143
Dijk bij Blija	Steekring 1	Bovenblok 4	25	1389
	Steekring 2	Bovenblok 5	15	1368
	Steekring 3	Bovenblok 8	25	1445

Tabel 3.3 Gemeten dichtheid bepaald middels 6 steekringmonsters in de verschillende kleiblokken geteld vanaf de zeezijde richting de kruin.

Vlak naast waar de erosiekuil in de klei van de Dollarddijk is ontstaan tijdens de proeven (zie paragraaf 5.2) is een monster genomen en zijn de volgende eigenschappen bepaald:

- Lutumgehalte: 40,7%
- Zandgehalte: 27,2%
- Vloeigrens: 61,9%
- Uitrolgrens: 25,1%
- Plasticiteitsindex: 36,8%

Omdat dit naast het erosiegat is bepaald, nadat de erosie al flink ver was gevorderd, is het denkbaar dat de klei hier van betere kwaliteit is dan die in het erosiegat.



Figuur 3.13 Resultaat 5-punts proctorproef van klei van de Dollarddijk met als resultaat 1368 kg/m³ bij 23% vochtgehalte

Bij het steken van de klei op de Dollarddijk en het inbouwen in de Deltagoot was opgevallen dat de klei van de Dollarddijk vrij brokkelig is. Er was sprake van een plaatselijk beperkte samenhang. Dit was vooral bij de oostelijk gestoken kleiblokken met gras het geval. Een verticale wand van klei met hoogte van 80 cm bleef niet goed vrij staan en brokkelde plaatselijk spontaan af, ondanks pogingen om dit te voorkomen. Bij de klei van Blija was dit geen probleem. Deze klei brokkelde niet af en kon uren vrij staan.

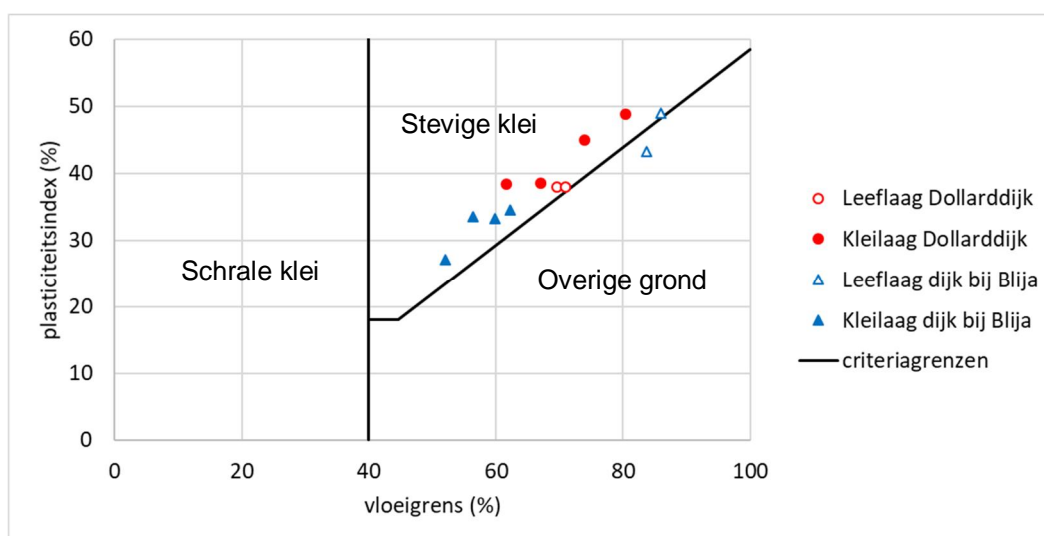
Voor beide dijken geldt dat de grasbekleding een gesloten zode had, hoewel de grasmat van de Dollarddijk lokale beschadigingen had van soms meer dan 15 x 15 cm². Ook ter plaatse van de geregeld voorkomende beschadigingen (kalere plekken kleiner dan ca. 15 x 15 cm²) zijn de kleiblokken gestoken, maar niet op de grotere kale plekken en op plekken met extreem grote beschadigingen (door muizen/mollen).

Deze grasbekleding is qua vegetatie geanalyseerd door Kelly Elschot en Marinka van Puijenbroek van de WUR. Het resultaat van de analyse is te zien in Tabel 3.4. Het blijkt dat het gras op de dijk van Blija voor het overgrote deel bestaat uit Engels Raaigras. Ook op de Dollarddijk is veel Engels Raaigras aangetroffen, maar daarnaast ook een behoorlijke hoeveelheid Roodzwenkgras. Op beide dijken zijn weinig kruidachtigen aangetroffen.

	Soort		Bedekking Dollarddijk		Bedekking dijk Blija	
	Latijnse naam	Nederlandse naam	Londo*	%	Londo*	%
Grassen	Lolium perenne	Engels Raaigras	6	60	9	90
	Festuca rubra	Roodzwenkgras	5	50	1	10
	Bromus hordeaceus	Zachte Dravik	2	20	1+	12.5
	Poa annua	Straatgras		0	1-	7.5
	Cynosurus cristatus	Kamgras		0	.4a	4
	Agrostis stolonifera	Fioringras	.1a	1	.1a	1
Kruidachtigen	Cerastium fontanum	Gewone hoornbloem	.1p	1		0
	Taraxicum officinale	Paardenbloem	.1r	1	.1r	1
	Sonchus sp.	Melkdistel	.1r	1		0
	Geranium molle	Zachte Ooievaarsbek	.1r	1		0
	Plantago lanceolata	Smalle Weegbree		0	.1r	1
	Trifolium repens	Witte Klaver		0	.2a	2
Totale bedekking (geschat)				99		100

Tabel 3.4 Vegetatiesoorten en dichtheid in grasbekleding (* = decimale schaal voor vegetatiekundige opnamen, Londo 1973)

Op de Dollarddijk is geconstateerd dat hier en daar het gras was aangetast, mogelijk door knaagdieren en/of insecten. Dat leverde hier en daar wat slechte plekken op in het gras. Op de dijk bij Blija waren deze slechte plekken vrijwel niet aangetroffen.



Figuur 3.14 Plasticiteitsindex als functie van de vloeigrens met grenzen volgens RWS (2019)

Toen de kleiblokken van de Dollarddijk werden gehaald, zijn er ook twee kuilen in de klei gemaakt voor een gedetailleerde inspectie van de kleilaag (Hijma 2021). Deze zijn aan de westkant van het gebuikte dijkvak gemaakt, waar de klei van betere kwaliteit is dan richting het oosten. Daar is geconstateerd dat een zekere porositeit in de klei aanwezig is, die dieper onder het taludoppervlak afnam van ca 10% naar ca 5%. Dat is met het oog zichtbare ruimte. Een voorbeeld van de geconstateerde structuur in de klei is gegeven in Tabel 3.5.

Diepte onder maaiveld (m)	structuur
0,00 - 0,10	Zodelaag, gras met grond met kruimels. Losse fijne structuur
0,10 - 0,30/0,35	Losse fijne structuur met open pakking. Brokjes van 5-30 mm
0,30/0,35 - 0,70	Open tot dichte grove structuur, brokken van 30-50 mm, 10% zichtbare poriënruimte
0,70 - 0,90	Dichte grove structuur, 3-10% zichtbare poriënruimte
0,90 - 0,94	Dichte grove structuur, <3% zichtbare poriënruimte

Tabel 3.5 Structuur ter plaatse van proefkuil 2 (Hijma 2021)

De losse structuur eindigt na het bovenste kwart ongeveer en gaat dan geleidelijk over in een dichte structuur. Los is in dit verband zonder samenhang. Als je dit uitsteekt en in je hand houdt dan valt het snel uit elkaar in brokjes. Bij de dichte structuur moet je het echt breken. De klei is behoorlijk brokkelig.

3.4 Opbouw in de Deltagoot

In de Deltagoot is met de kleiblokken het dijktafgebied opgebouwd. Om aan de juiste totale laagdikte aan klei te komen, is er eerst een laagje geroerde klei aangebracht van dezelfde locatie op de dijk. Deze geroerde klei is in lagen van circa 10 à 15 cm aangebracht en verdicht met een rupskraantje.

Steeds zijn de blokken klei in de Deltagoot als volgt geplaatst (zie foto's in bijlage B.3.2):

- Het kleiblok is in de Deltagoot getakeld
- Het kleiblok is over de onderplaat 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 onderuit getrokken (Figuur 3.15)
- De onderste zijmalhelft is eruit getrokken (Figuur 3.16). De zijmallen bestaan uit twee delen: onderzijde en rechterzijde enerzijds en bovenzijde en linker zijde anderzijds.
- Het blok is opgeschoven met de lier om de spleet aan de onderzijde dicht te drukken
- De onderplaat is er helemaal onderuit getrokken met de lier
- De bovenste zijmalhelft is eruit getrokken (Figuur B.94)
- Tenslotte is zandcement met wapening naast de kleiblokken aangebracht om de spleet tussen de klei en de houten middenwand en tussen de klei en de gootwand op te vullen (Figuur B.96 en B.97).

Op deze wijze is een bijna naadloze kleilaag met gras aangebracht. Het onderste deel van het talud zit zo diep onder water dat daar niet zoveel erosie werd verwacht. Daarom zijn de eerste 4 m van het talud (twee kleiblokken) opgebouwd uit een enkele laag kleiblokken. Onder het derde kleiblok wordt de laagdikte groter door aanvankelijk de laag geroerde klei dikker te maken totdat er twee lagen met kleiblokken in het profiel passen, zie Figuur 3.4 en Figuur 3.5.

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

Voor de onderste laag kleiblokken in de Deltagoot is het gras er vanaf geschraapt met een graafmachine. Voor de zijde met klei van de Dollarddijk is dit in de Deltagoot gedaan, zie Figuur 3.17, terwijl voor de zijde met klei van Blija dit al op de dijk is gedaan. Dit laatste heeft de voorkeur, omdat er dan een flinke laag klei met gras, inclusief alle wortels, kan worden verwijderd. Vervolgens kunnen er kleiblokken gestoken worden met dikte van 80 cm. Op de dijk bij Blija is er 40 cm graslaag met klei verwijderd en na het plaatsen in de Deltagoot is er nog 5 à 10 cm extra van afgehaald.



Figuur 3.15 Het eronder uittrekken van de bodemplaat



Figuur 3.16 Onderste zijmal eruit trekken



Figuur 3.17 Graslaag eraf schrapen met hydraulisch kraantje

Op de Dollarddijk was de dikte van de kleilaag slechts 80 à 100 cm, en daardoor was deze procedure niet mogelijk. Daarom is voor de onderste laag kleiblokken van de Dollarddijk de klei inclusief gras in de Deltagoot geplaatst en is daarna een laag van 20 cm ervan afgeschraapt met een graafmachine. Dat heeft als nadeel dat de resulterende laag met ongeroerde klei wat dunner is dan bij Blija. Dit is opgelost door te beginnen met een wat dikkere laag geroerde klei onder de kleiblokken.

De kleiblokken voor de onderste laag van de Dollarddijk zijn zo vol mogelijk gemaakt tijdens het steken op de dijk, waardoor deze inclusief gras 85 cm waren en na het afgraven 65 cm. De kleiblokken in de onderste laag aan de Blijzijde zijn na het plaatsen ook afgeschraapt met een graafmachine, zodat een mooi vlak oppervlak werd verkregen voor het plaatsen van de bovenste laag kleiblokken. Daardoor was de onderste laag kleiblokken aan de Blijzijde 75 cm dik.

Om met het talud van de Dollarddijk op de juiste kruinhoogte uit te komen, is gestart met een strook van 40 cm grasblokjes van $20 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Omdat deze blokjes na de eerste korte test niet voldoende stabiel waren, is er een wapeningsnet op gezet. Dit is te zien in Figuur 3.18.



Figuur 3.18 Grasbekleding van Dollarddijk, waarbij de eerste 40 cm is opgebouwd uit kleine grasblokjes van $20 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ met een wapeningsnet erop.

De kleiblokken en kleiblokken met gras zijn tijdens de aanleg tot de proeven geregeld gesproeid, zodat het vochtgehalte op peil bleef.

4 Resultaten eerste serie

4.1 Proevenprogramma

Alle proeven zijn uitgevoerd bij een waterstand van 6,4 m boven de bodem van de Deltagoot. Dit is gelijk aan een waterstand van NAP +7,7 m voor de Brede Groene Dijk. Het grootste deel van de testen is uitgevoerd met een golfhoogte (H_{m0}) van 2,0 m en een piekperiode (T_p) van 5,5 s. Dit geeft een golfsteilheid (s_{op}) van 0,042 die representatief is voor de Waddenzee. Deze golfhoogte is afgestemd op datgene dat verwacht kan worden bij de Brede Groene Dijk (zie bijlage C) en de dijk bij Blija.



Figuur 4.1 Golven tijdens de eerste proevenserie.

In proef B1_07 en B1_08 is getest met een lagere golfhoogte (H_{m0} van respectievelijk 1,6 m en 1,2 m) bij gelijkblijvende golfsteilheid, om het effect op de erosiesnelheid te bepalen. De eerste proeven hadden een duur van ongeveer 1 uur. Naarmate de erosie vorderde, is deze proefduur verlengd naar 1,5 tot 5 uur. In totaal is er 24,3 uur getest met een golfhoogte van 2,0

m en 2,5 uur met een lagere golfhoogte. Het proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities is weergegeven in Tabel 4.1. Een impressie van de golven tijdens deze testen is gegeven in Figuur 4.1.

Na elke proef werd de waterstand verlaagd om het erosieprofiel in te meten met een Faro laserscanner. Hierdoor is een gedetailleerd beeld verkregen van de ontwikkeling van de erosie in de tijd.

Na een aantal proeven is geconstateerd dat er randeffecten ontstonden, namelijk erosie langs de gootwand met een duidelijk grotere diepte dan elders. Om te voorkomen dat dit ongewenste modeffect de proefresultaten ging beïnvloeden, is na sommige proeven de erosie langs de gootwand kunstmatig opgevuld met klei waarmee de groei van de randeffecten is vertraagd. Dit is gedaan na proef B1_01, B1_02, B1_03, B1_07, B1_08, B1_09 en B1_10. Uiteindelijk is vastgesteld dat deze randeffecten de erosie in het midden van de modelsectie weinig hebben beïnvloed, omdat het zich concentreerde in een paar decimeter langs de gootwand en niet uitgroeide naar het midden.

Tijdens de proeven werd duidelijk dat de erosie aan de Valgenwegzijde zich sneller voltrok dan aan de Klutenplaszijde. Lange tijd was er zelfs zo weinig erosie aan de Klutenplaszijde dat gevreesd werd dat er te weinig informatie uit de proeven zou komen. Daarom is er na test B1_10 een kunstmatig gat gemaakt in de Klutenplasklei om de erosie te versnellen.

proef	waterstand	H _{m0} (m)	T _p (s)	S _{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)
B1_01	6,40	2,04	5,54	0,043	1,00	1,00
B1_02	6,40	2,05	5,53	0,043	1,00	2,00
B1_03	6,40	2,06	5,53	0,043	1,00	3,00
B1_04	6,40	2,07	5,53	0,043	1,00	4,00
B1_05	6,40	2,04	5,53	0,043	1,00	5,00
B1_06	6,40	1,96	5,61	0,040	0,81	5,81
B1_07	6,40	1,63	4,99	0,042	1,50	7,31
B1_08	6,40	1,21	4,31	0,042	1,00	8,31
B1_09	6,40	2,04	5,53	0,043	1,00	9,31
B1_10	6,40	1,99	5,51	0,042	2,00	11,31
Gat gemaakt van 2 m lang en 0,2 à 0,4 m diep in Klutenplasklei						
B1_11	6,40	2,00	5,51	0,042	1,50	12,81
B1_12	6,40	2,00	5,51	0,042	1,50	14,31
B1_13	6,40	2,00	5,51	0,042	1,50	15,81
B1_14	6,40	2,00	5,52	0,042	5,00	20,81
B1_15	6,40	1,98	5,52	0,042	5,00	25,81
B1_16	6,40	2,09	5,65	0,042	1,00	26,81

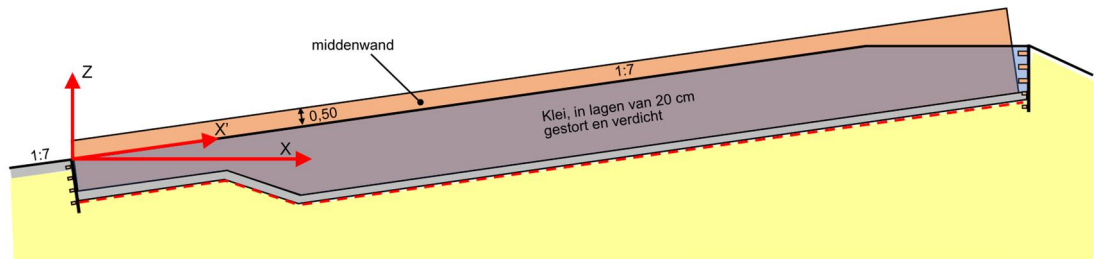
Tabel 4.1 Proevenprogramma eerste testserie met gemeten golfcondities en duur (de waterstand is in deze tabel weergegeven als het niveau ten opzichte van de gootbodem).

Het gehele proevenprogramma heeft in totaal 9 dagen in beslag genomen. Na een testduur van 27 uur zijn de proeven gestopt omdat er voldoende erosie was ontstaan in beide kleisoorten waarmee een duidelijk beeld is verkregen van het erosieverloop in de tijd. Voor de Valgenwegklei was na de laatste proef het grootste deel van de kruin weggeslagen.

Deze proefduur is lang ten opzichte van datgene wat onder extreme omstandigheden verwacht kan worden op de Dollard, namelijk 17 à 20 uur (zie Bijlage C).

Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum voor de golven.

Voor het weergeven van de proefresultaten wordt gebruikgemaakt van een assenstelsel met de X'-as langs het talud, vanaf het begin van het gras, zie Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Assenstelsel

4.2 Resultaten

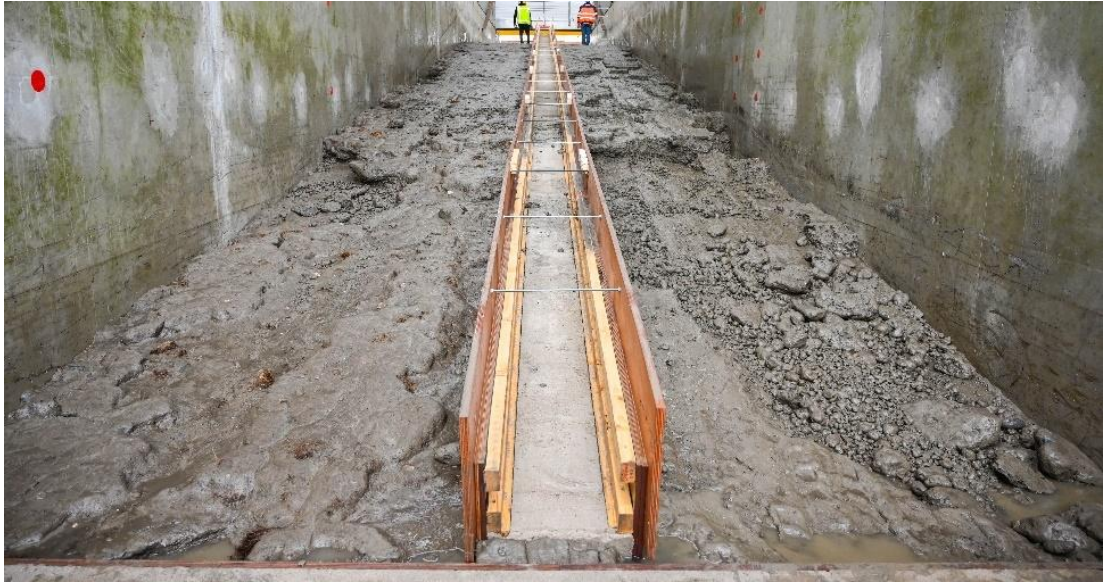
4.2.1 Proefbeschrijving

De proefresultaten bestaan uit de ontwikkeling van de erosie in de tijd bij de opgelegde golfcondities. In de bijlage is deze erosieontwikkeling op drie manieren in beeld gebracht:

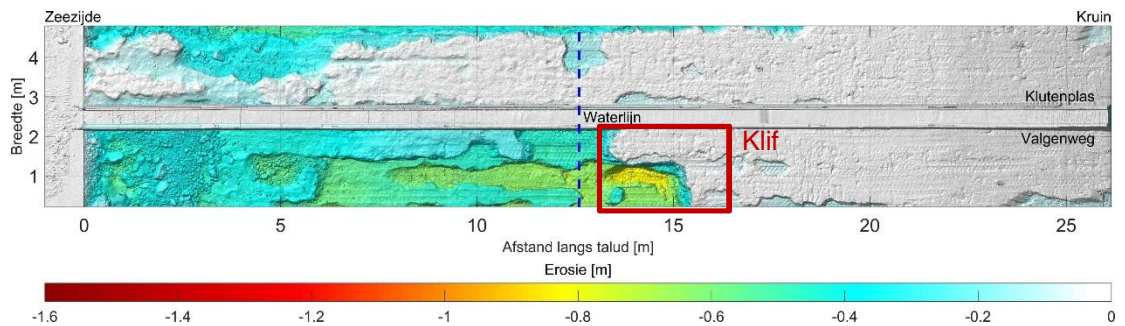
- Een reeks foto's tijdens en na de proeven in Bijlage B.2.2;
- De gemeten erosiediepte loodrecht op het talud met de laserscanner in Bijlage A;
- Verwerking van de laserscanmeting tot een representatief dwarsprofiel in Bijlage A.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat de erosie betrekkelijk traag gaat, hetgeen gunstig is voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk. Het kostte uiteindelijk 27 uur om zoveel erosie te krijgen dat de waterveiligheid van de dijk in gevaar kwam: de kruin raakte verlaagd. Dit was nog uitsluitend aan de Valgenwegzijde. De zijde met klei van de Klutenplas had nog langer stand kunnen houden. Deze 27 uur golfbelasting (waarvan 2,5 uur met een lagere golfconditie) is relatief lang ten opzichte van de te verwachten equivalente golfbelasting tijdens extreme omstandigheden op de Dollard (zie Bijlage C). Deze equivalente duur is de tijd die nodig is om met een constante waterstand en golfhoogte in de Deltagoot dezelfde erosiediepte te bereiken als in werkelijkheid zou optreden voor de Brede Groene Dijk met variërende waterstand en golfhoogte. Hier zal in meer detail op ingegaan worden in stap 3 van het Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD).

Tijdens de eerste 4 uur ontwikkelde de eerste oppervlakkige erosie zich langzaam in het onderste deel van het kleitalud onder de waterlijn. Figuur 4.3 laat deze erosie zien na 4 uur golfbelasting. De Valgenwegklei erodeert hier sneller dan de Klutenplasklei. De lagen van deze klei voelden qua structuur ook brokkeliger dan de Klutenplasklei: het was gemakkelijker om losse stukjes klei met de hand uit de laag te breken. Dit kan te maken hebben met de leeftijd van de gerijpte klei en mogelijk het hogere zandgehalte. Verder ontstond de eerste erosie iets dieper onder de waterlijn dan van te voren verwacht. Daardoor wordt de groei van de erosie naar beneden geremd door de aanwezigheid van het zandcementtalud op het onderste deel van de dijk.



Figuur 4.3 Klei-erosie na test B1_04 met links de Klutenplasklei en rechts de Valgenwegklei. De meeste erosie vindt plaats onder de waterlijn en is nog vrij oppervlakkig.



Figuur 4.4 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) in de klei van de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) na test B1_07. In rood is de locatie van de klif aangegeven.

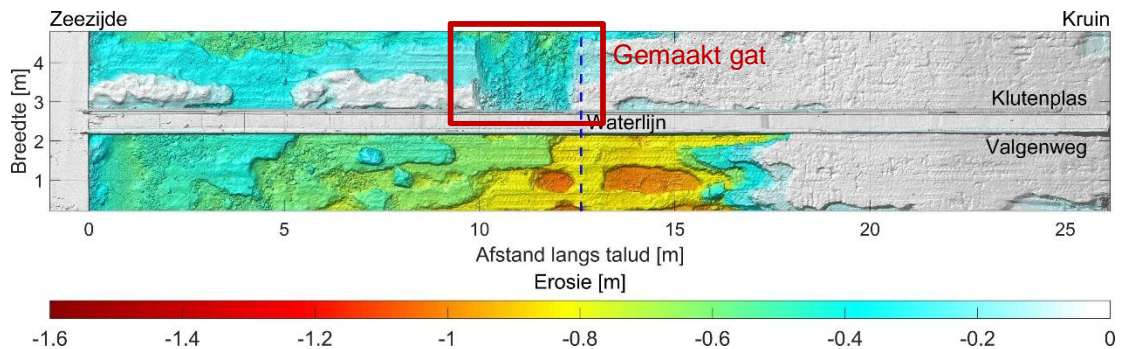


Figuur 4.5 Klif aan de Valgenwegkant na test B1_07 met laagsgewijze erosie (links) en klif zichtbaar tijdens proef B1_10 (rechts).

Naarmate de golfbelasting langer duurde, groeide de klei-erosie met name aan de Valgenwegkant verder naar boven toe met toenemende erosiediepte. Dit is weergegeven in Figuur 4.4 met een bovenaanzicht van de gemeten erosiediepte loodrecht op het talud. Aan de kruinzijde van de erosiekuil ontstaat een klif van klei waarin de verschillende kleilagen zichtbaar zijn (zie Figuur 4.5). De belangrijkste erosie wordt daardoor niet beïnvloed door het dummy zandcementtalud op het onderste deel van de dijk.

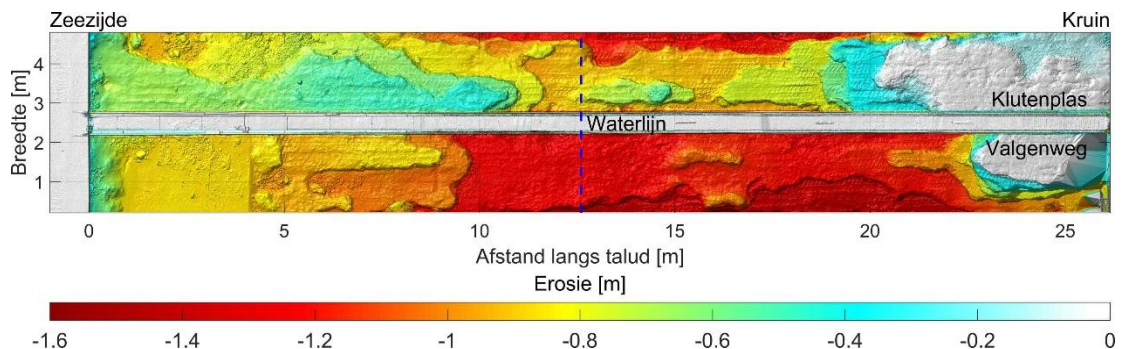
De erosiediepte en klifhoogte in de Valgenwegklei namen tijdens de testen verder toe en de klif schoof langzaam op richting de kruin. Omdat de erosie aan de Klutenplaszijde zo langzaam

ging dat gevreesd werd dat er te weinig informatie uit de proeven zou komen, is na test B1_10 een gat gemaakt in de Klutenplasklei van 20-40 cm diep in de zone $10 < x' < 12$ m (x' = afstand tot de zeewaartse rand van de modelsectie met klei, gemeten langs het talud). Het gat is aan de kruinzijde verticaal afgestoken zodat er een kleine verticale klif ontstond, verwachtend dat juist bij een klif de meeste erosie gaat ontstaan. Figuur 4.6 laat het verschil in erosie zien tussen beide kleisoorten na test B1_10 met daarbij het gemaakte gat in de Klutenplasklei.



Figuur 4.6 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes in de klei van de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) na test B1_10.

Tijdens de proeven na het maken van het kunstmatige gat, was er een versnelde erosie en verdere vorming van een klif te zien aan de Klutenplaskant, zij het iets minder duidelijk en met een kleinere erosiediepte dan aan de Valgenwegkant. Uiteindelijk heeft de klif in de Valgenwegklei de kruin van de dijk bereikt. Deze is na een golfbelasting van 27 uur voor een groot deel weggeslagen (zie Figuur 4.7). Na deze duur zijn de proeven gestopt omdat er voldoende erosie was ontstaan in beide kleisoorten waarmee een duidelijk beeld is verkregen van het erosieverloop in de tijd.



Figuur 4.7 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes in de klei van de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) na test B1_16.

Tijdens de proeven was een laagsgewijze erosie-ontwikkeling te zien. Deze lagen komen overeen met de wijze waarop de klei is aangebracht in laagjes van 15 à 20 cm die vervolgens verdicht zijn tot een paar cm kleinere laagdikte. Deze laagjes waren aangebracht evenwijdig aan het dijktaald, terwijl in de praktijk horizontale lagen worden aangebracht. In de toekomst is het aan te bevelen om een dergelijk talud in de Deltagoot ook aan te brengen met horizontale lagen. De erosie zal er dan natuurlijker uitzien. Verder geldt dat in de praktijk de verdichtingslagen niet meer zichtbaar zijn door biologische activiteit en seizoensinvloeden. Waarschijnlijk heeft dit geen invloed gehad op het algehele erosieproces, omdat de verdichtingslagen dun waren en toch wel eroderen als de golfkrachten daar aanleiding toe geven. Het geeft een trapsgewijs verloopende erosie in de tijd, met relatief kleine treden, terwijl de werkelijkheid naar verwachting de gemiddelde lijn door de treden zal geven. Wellicht is de erosie in de Deltagoot iets sneller doordat de laagjes onderling iets minder hechting hebben dan de klei in de werkelijkheid na verloop van tijd, als de klei een meer homogene verdichting heeft verkregen. Anderzijds kan het iets langzamer verlopen doordat de erosie op elke nieuwe

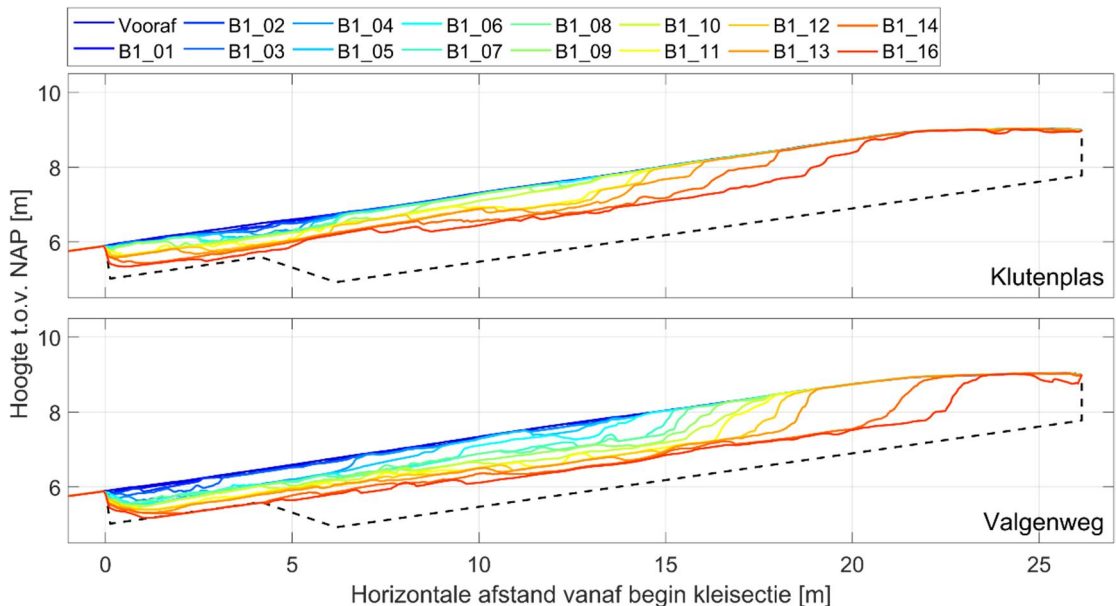
verdichtslaag even tijd nodig heeft om er goed grip op te krijgen. Gezien de grote kracht van de brekende golven zal deze invloed beperkt zijn.

4.2.2 Representatieve dwarsdoorsnedes

Elke laserscanmeting is verwerkt tot een representatieve dwarsdoorsnede voor beide kleisoorten. Dit is gedaan door allereerst de meetpunten te filteren met een voortschrijdend gemiddelde over 10 cm, en vervolgens de mediaan voor ieder X'-coördinaat (zie Figuur 4.2) te nemen over een breedte van 1,8 m (loodrecht op de gootas). Door deze methode zijn optredende randeffecten langs de gootrand niet meegenomen in de dwarsdoorsnedes. Er is bewust gekozen om niet te werken met de diepst gemeten punten omdat deze vaak lokaal zijn en deels worden veroorzaakt door randeffecten langs de goot- en middenwand. Deze zijn daarmee niet representatief. De dwarsdoorsnedes zijn voor beide kleisoorten per test weergegeven in Bijlage A, samen met de maximale erosiediepte (loodrecht op het talud) en erosievolume. Figuur 4.8 toont alle profielen in één grafiek met in blauw het initiële profiel voor de proeven en in rood het profiel na 27 uur golven.

Figuur 4.8 toont duidelijk het verschil in erosiesnelheid tussen beide kleisoorten. Verder is te zien dat de erosie onder de waterlijn start en daarna richting de kruin groeit. Aan de Valgenwegkant is een erosieklif zichtbaar die start na test B1_07 rond $x = 15$ m. Deze schuift gedurende de proeven richting de kruin en neemt toe in hoogte. Na 27 uur testen heeft de erosie de kruin aan de Klutenplaskant nog niet bereikt. Aan de Valgenwegkant begon de kruin weg te slaan na test B1_14. Voor deze klei heeft het daarmee 21 uur geduurd voordat de erosie de kruin in is gegroeid (waarvan 2,5 uur met een lagere golfhoogte). Dit kan vergeleken worden met de belastingduur op de Dollard tijdens extreme omstandigheden, namelijk 17 à 20 uur, zie Bijlage C.

De taludhelling van het erosieterras links van de klif loopt bijna parallel aan het talud van 1:7 voor de dijk terwijl dit in het theoretische model vlakker verloopt. In paragraaf 6.1 wordt hierop teruggekomen.



Figuur 4.8 Representatieve mediane dwarsdoorsnedes op basis van lasermetingen voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) na elke test. De zwart gestippelde lijn geeft het oppervlak van het onder de klei gelegen zandcement.

4.2.3 Erosiediepte en volume

Van elke laserscan is het geërodeerde kleivolume per strekkende meter berekend. Daarnaast is de maximale erosiediepte loodrecht op het talud uit de representatieve mediane dwarsdoorsnedes van Figuur 4.8 gehaald. Beide parameters zijn in Figuur 4.9 en Figuur 4.10 geplot als functie van de tijd in uren en opgenomen in Tabel 4.2.

De erosiediepte nam in het begin snel toe en vlakke af naar mate de duur van de golfbelasting toenam, zoals ook bij eerdere proeven met klei in de Deltagoot is vastgesteld (Mourik 2020). In de eerste drie proeven was de toename van het erosievolume beperkt en redelijk vergelijkbaar voor beide kleisoorten. Na proef B1_04 versnelde de erosie voor de Valgenwegklei doordat er na de derde proef onderaan een kleine verticale klif was ontstaan die naar boven begon te migreren. Bij de Klutenplas was zo'n versnelling nauwelijks opgetreden. De erosiesnelheid van de Klutenplas bleef lange tijd vergelijkbaar met de eerste drie proeven: de maximale erosiediepte van het representatieve dwarsprofiel bleef voor langere tijd rond de 0,35 – 0,4 m en het erosievolume nam maar langzaam toe en vooral toen er kunstmatige schade was aangebracht.

proef	H _{m0} (m)	Cumulatieve duur (uur)	Klei van Valgenweg		Klei van Klutenplas	
			Erosiediepte (m)	Erosievolume (m ³ /m)	Erosiediepte (m)	Erosievolume (m ³ /m)
B1_01	2,04	1,00	0,08	0,47	0,09	0,26
B1_02	2,05	2,00	0,14	0,76	0,11	0,46
B1_03	2,06	3,00	0,28	1,36	0,19	0,77
B1_04	2,07	4,00	0,41	2,84	0,32	1,01
B1_05	2,04	5,00	0,50	3,80	0,33	1,30
B1_06	1,96	5,81	0,54	5,08	0,35	1,79
B1_07	1,63	7,31	0,65	6,77	0,35	2,20
B1_08	1,21	8,31	0,65	6,95	0,34	1,86
B1_09	2,04	9,31	0,83	8,88	0,37	2,76
B1_10	1,99	11,31	0,88	10,89	0,37*	3,60*
B1_11	2,00	12,81	1,03	12,80	0,59	5,68
B1_12	2,00	14,31	1,09	14,48	0,63	6,92
B1_13	2,00	15,81	1,19	16,15	0,77	8,31
B1_14	2,00	20,81	1,23	21,64	0,89	12,06
B1_16	2,00	26,81	1,28	25,67	0,97	16,32

Tabel 4.2 Gemeten erosiediepte (loodrecht op het talud) en erosievolume in de eerste proevenserie (*: vóór het maken van het kunstmatige gat)

Zoals in eerdere onderzoeken ook is geconstateerd (Klein Breteler, 2021a) is de toename van het erosievolume aanvankelijk vrij traag en gaat later sneller. Dat komt doordat er twee fases zijn te onderscheiden in het erosieproces:

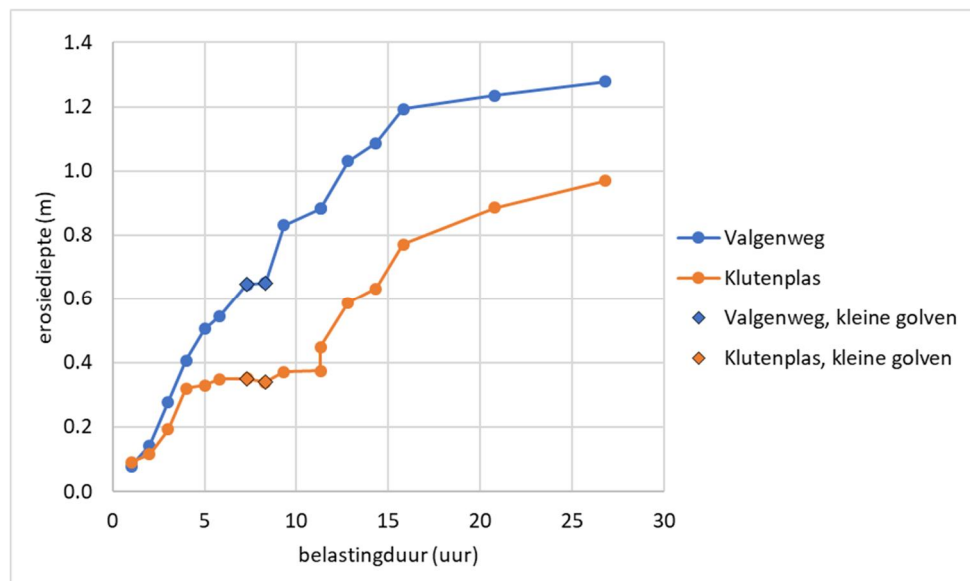
1. Eerst is er een redelijk vlak kleitalud waar de golven kuilen in proberen te maken. In dit deel van het proces is de toename van de erosievolume beperkt.
2. Na verloop van tijd is er enige erosie ontstaan en is er sprake van één of meerdere kliffen in het talud. Dit zijn vrij steile delen van het kleioppervlak, waar de golven tegenaan kunnen beuken. De toename van het erosievolume is in deze fase veel groter dan in de vorige fase.

Dit maakt dat de erosie op een gegeven moment wat gaat versnellen. Later kan dit weer vertragen doordat de klif zo ver naar achteren is gemigreerd dat de golven er moeilijker bij

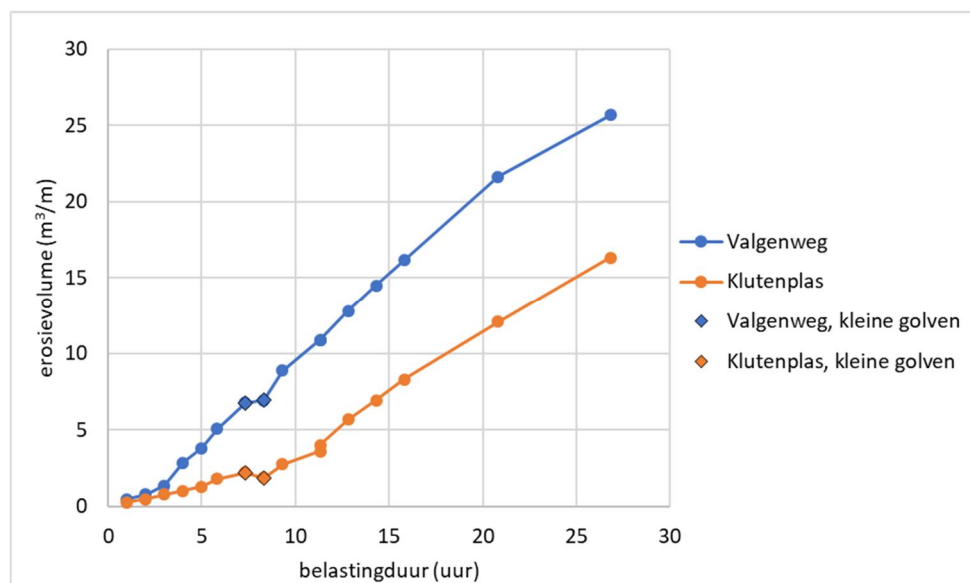
kunnen. In het huidige erosiemodel worden deze twee fases nog niet onderscheiden. Wel is verdisconteerd dat na verloop van tijd de erosie weer wat begint te vertragen.

Tijdens proef B1_07 en B1_08 is er getest met een lagere significante golfhoogte van respectievelijk 1,63 m en 1,21 m. Tijdens de proef B1_07, met $H_{m0} = 1,63$ m, nam de erosiesnelheid iets af, maar nog niet zo veel. Tijdens proef B1_08, met $H_{m0} = 1,21$ m, was de golfbelasting nog verder gereduceerd en nam de erosiesnelheid flink af. Tijdens deze proeven met lagere golfhoogte breken de golven iets hoger op het talud waardoor de erosie op een andere locatie optreedt.

Na test B1_07 is besloten een randeffect op te vullen bij de Klutenplasklei. Tijdens B1_08 is een deel van deze minder verdichte klei geërodeerd en lager op het talud terecht gekomen. Hierdoor nam de maximale erosiediepte en het volume zelfs iets af ten opzichte van B1_07. De erosiesnelheid van de Klutenplasklei was bij deze lage golven zo klein dat dit dicht bij een grenswaarde zit waaronder er geen erosie optreedt binnen het tijdsbestek van een storm.



Figuur 4.9 Maximale erosiediepte (loodrecht op het talud) als functie van de cumulatieve proefduur in uren.



Figuur 4.10 Erosievolume per strekkende meter (als functie van de cumulatieve proefduur in uren).

Na test B1_10 is het gat gemaakt in de Klutenplasklei, wat te zien is als een kleine verticale sprong in de blauwe lijnen van Figuur 4.9 en Figuur 4.10. Daarna nam de erosie vanuit daar sneller toe waarbij het gat verdiepte en zich uitbreidde langs het talud.

Voor de nadere analyse van de resultaten wordt verwezen naar paragraaf 6.1.

5 Resultaten tweede serie

5.1 Proevenprogramma

Net als tijdens de eerste proevenserie zijn alle proeven uitgevoerd bij een waterstand van 6,4 m boven de bodem van de Deltagoot. Dit is gelijk aan een waterstand van NAP +7,7 m voor de Brede Groene Dijk. Het proevenprogramma staat in Tabel 5.1.

Voordat er gestart is met het proevenprogramma van de tweede serie is een kleine kunstmatige schade aangebracht in beide grasbekledingen. Deze was 20x20 cm² en 5 cm diep en is aangebracht in het midden van het derde grasblok (zie Figuur 5.1 en Figuur B.103):

- Dollarddijk: NAP+6,65 m (5,35 m boven de gootbodem, $X' = 5,4$ m)
- dijk van Blija: NAP+5,30 m (5,30 m boven de gootbodem, $X' = 5,0$ m)



Figuur 5.1 Aanbrengen van kunstmatige schade in de grasmat (20x20 cm² en 5 cm diep)

Deze locatie is gekozen omdat dit het niveau was waar de erosie in de eerste proevenserie aanving en verder is het in het midden van een grasblok gekozen om zo min mogelijk beïnvloeding van de aansluitingen tussen de grasblokken te hebben.

Vervolgens is eerst een korte proef uitgevoerd van een kwartier om het gras plat te golven, zodat er een goede laserscan van het taludoppervlak gemaakt kon worden. Daarna is steeds dezelfde waterstand en golfbelasting met significante golfhoogte van $H_{m0} = 2,0$ m aangehouden in de proeven. Alleen proef B2_09 en B2_10 zijn met kleinere golven uitgevoerd om enig inzicht te krijgen in de invloed van de golfhoogte, zie Tabel 5.1.

De eerste ruim 3 uur was er aan beide zijden nog niet veel erosie ontstaan. Omdat de erosie na 3,25 uur nog niet op gang kwam, is het gras van de Dollarddijk na proef B2_04 licht verzwakt door er met een verticuteermachine overheen te gaan. Hiermee zijn er snedes van ongeveer 2 cm diepte in het gras gemaakt, in de richting van teen naar kruin, met een onderlinge afstand van 5 cm. Dit is gedaan om te zorgen dat de proeven betrekking hebben op de sterkte van iets minder sterk gras dan datgene wat toevallig in de Deltagoot is aangebracht. De invloed van het verticuteren is echter vrij beperkt.

De erosie aan de kant van de dijk van Blija bleef tot het eind toe zeer beperkt. Daarom is de kunstmatige schade op drie momenten verder vergroot (zie Figuur 4.2 voor definitie van X'):

- Na B2_11:
 - Op $X' = 3$ m: 20 × 20 cm en 5 cm diep (midden in het tweede kleiblok)
 - Op $X' = 5$ m: 40 × 40 cm en 15 cm diep (midden in het derde kleiblok)
- Na B2_12:
 - Op $X' = 3$ m: 40 × 40 cm en 15 cm diep (midden in het tweede kleiblok)
 - Op $X' = 5$ m: 80 × 50 cm en 25 cm diep (midden in het derde kleiblok)
 - Op $X' = 7$ m: 40 × 40 cm en 15 cm diep (midden in het vierde kleiblok)
- Na B2_15:
 - Op $X' = 9$ m: 65 × 50 cm en 20 cm diep (midden in het vijfde kleiblok)

proef	Waterstand (m+bodem)	H_{m0} (m)	T_p (s)	S_{op} (-)	Duur (uur)	Cumulatieve duur (uur)
B2_01	6,40	1,95	5,63	0,04	0,25	0,25
B2_02	6,40	2,00	5,53	0,04	1,00	1,25
B2_03	6,40	1,99	5,53	0,04	1,00	2,25
B2_04	6,40	1,99	5,53	0,04	1,00	3,25
B2_05	6,40	2,02	5,55	0,04	0,58	3,83
B2_06	6,40	1,95	5,52	0,04	3,00	6,83
B2_07	6,40	2,00	5,55	0,04	0,75	7,58
B2_08	6,40	2,00	5,53	0,04	1,00	8,58
B2_09	6,40	1,00	3,90	0,04	1,50	10,08
B2_10	6,40	1,51	4,74	0,04	1,50	11,58
B2_11	6,40	2,03	5,53	0,04	1,10	12,68
B2_12	6,40	2,01	5,49	0,04	2,00	14,68
B2_13	6,40	2,01	5,49	0,04	2,00	16,68
B2_14	6,40	2,04	5,49	0,04	2,00	18,68
B2_15	6,40	2,05	5,51	0,04	5,00	23,68
B2_16	6,40	2,04	5,50	0,04	6,00	29,68
B2_17	6,40	2,04	5,51	0,04	5,00	34,68

Tabel 5.1 Proevenprogramma tijdens de tweede proevenserie met gemeten golfcondities en duur (de waterstand is in deze tabel weergegeven als het niveau ten opzichte van de gootbodemp)

Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Een voorbeeld van het spectrum is te zien in bijlage E.

5.2 Resultaten

5.2.1 Proefbeschrijving en klifmigratie

Tijdens de eerste 4 proeven met een totale duur van 3,25 uur is er betrekkelijk weinig erosie ontstaan. Aan de kant van de Dollarddijk zijn kleine beschadigingen in de grasmat geconstateerd bij $X' = 1,5$ m (zie Figuur 4.2 voor definitie van de X' -as), bedekt met gras, zie Figuur 5.2. Deze zijn door de graslaag niet te zien op de laserscan. Na proef B2_05 (totale belastingduur: 3,8 uur) is dit uitgroeid tot een gat met een diameter van ongeveer 40 cm en diepte van circa 15 cm, zie Figuur 5.3.

Tijdens proef B2_06 was dit gat aan de Dollarddijkzijde gedurende de 3 uur durende proef uitgeroeid tot een groot gat van 2,8 m lang (langs het talud gemeten) en met een diepte van 0,7 m. In het midden van de grasstrook ($Y = 1$ m) zat toen de klif (bovenbegrenzing van het erosiegat) op $X' = 3,5$ m. Deze klif is in de proeven daarna verschoven richting de kruin.

Opgemerkt kan worden dat de kleilaagdikte van de huidige Dollarddijk ca 80 à 110 cm is en veel steiler is dan de beproefde dijk in de Deltagoot. Deze zal dus al ongeveer zijn doorgebroken na totaal 6 uur golven. Dit toont de noodzaak van de versterking van deze dijk.

De locatie van de klif is als functie van de tijd gegeven in Figuur 5.5. De kruin begint bij $X' = 21,9$ m.



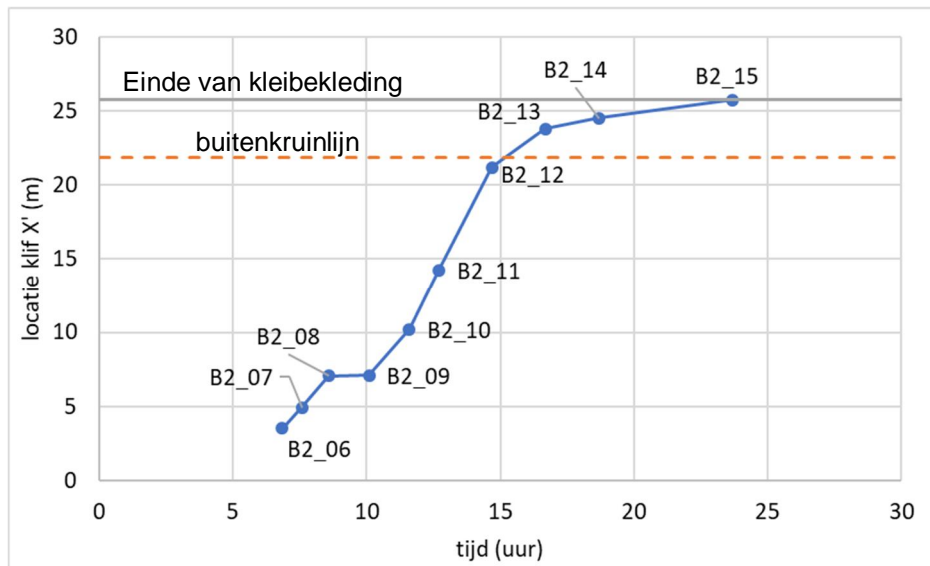
Figuur 5.2 Kleine beschadigingen in het gras van de Dollarddijk na proef B2_04 die later zijn uitgegroeid tot een groot gat



Figuur 5.3 Gat in het gras van de Dollarddijk na proef B2_05 rond $X' = 1,5$ m



Figuur 5.4 Erosiekuil na proef B2_06 (na totaal 6,8 uur golven)



Figuur 5.5 Locatie van de klif aan het eind van de proef in het midden van de grasstrook (zijde Dollarddijk) (proef B2_09 is uitgevoerd met $H_{m0} = 1,0$ m en B2_10 met $H_{m0} = 1,5$ m en geven daardoor minder verplaatsing van de klif)

Duidelijk is te zien dat de klif niet opschuift bij golven van $H_{m0} = 1,0$ m (proef B2_09). Tijdens deze proef bevond de klif zich echter vrij ver onder het wateroppervlak waardoor de golven niet vol tegen de klif aan klapten. Als de klif wel maximaal belast zou worden zou bij deze lagere golfhoogte nog wel enige erosie van de klif kunnen optreden.

Verder ging de kliferosie ook minder snel naarmate de klif hoger op het talud kwam. Toen de klif ter hoogte van de kruin was ging de erosie veel minder snel doordat nog maar een deel van de brekende golven de klif konden bereiken (vanaf B2_13). Tijdens sommige proeven was de klif bij de gootwand wat verder omhoog gemigreerd dan bij de middenwand.

Het duurde uiteindelijk 19,4 uur voordat de 4 m brede kruin van deze dijk was doorgebroken bij de gootwand, terwijl het 24 uur duurde voordat dit ook bereikt was in het midden van de grasstrook. Dat betekent dat de lokale kruinverlaging door de erosie vrij traag breder groeit, waardoor de golfoverslag door het gat in de kruin nog enige uren vrij beperkt blijft.

Deze duur kan vergeleken worden met de belastingduur op de Dollard tijdens extreme omstandigheden, namelijk 17 à 20 uur, zie Bijlage C. Toen was de erosiediepte in de Dollardklei ongeveer 1,4 m en was de klif bijna bij de kruin aangekomen, terwijl er in de kleibekleding van Blija nog nauwelijks erosie was.

Op de foto van Figuur 5.4 is een geel stukje drainagebuis te zien. Dit zat al in de dijk en is met het kleiblok meegekomen en nu tijdens de proeven blootgespoeld. Een vergelijkbaar stuk drainagebuis is aanwezig bij $X' = 17,2$ m.

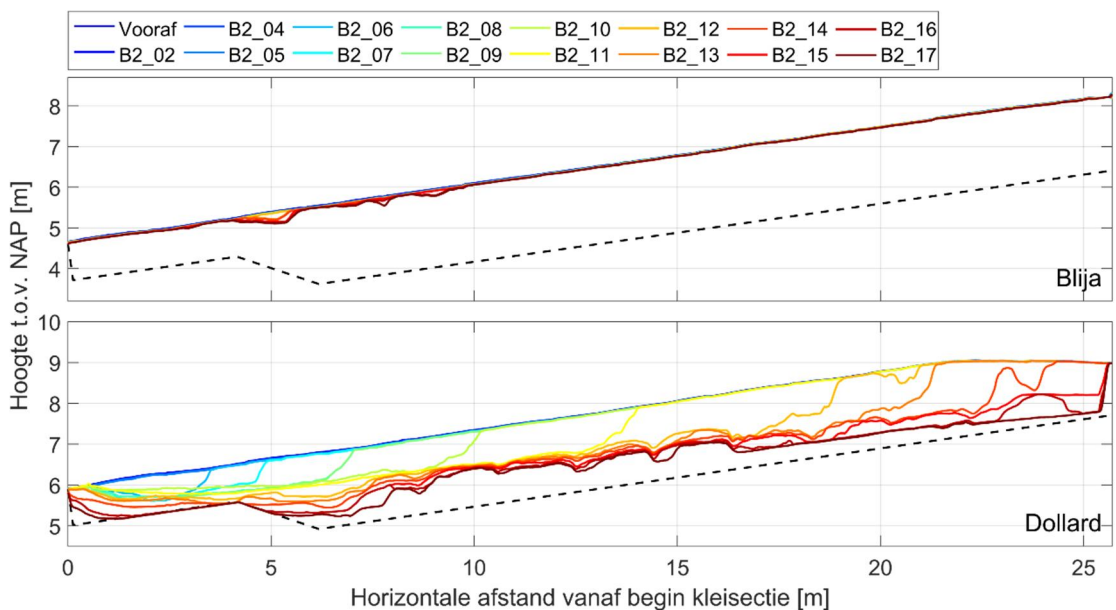
Gedurende al deze tijd is de erosie in de kleibekleding met gras van Blija nauwelijks toegenomen, zie Figuur 5.10.

Het verloop van de erosie is verder in detail te zien in de figuren in bijlage A.

5.2.2 Representatieve dwarsdoorsnedes

Net als voor de eerste serie proeven zijn voor de tweede serie de data van de laserscans uitgewerkt tot bovenaanzichten met in kleur de erosiediepte loodrecht op het talud (zoals Figuur 5.10) en representatieve erosieprofielen. Dat laatste is berekend door voor elke X' -waarde (locatie) over een breedte van 1,8 m de mediaan van de erosiediepte te berekenen. Al die waarden tezamen geven het representatieve erosieprofiel na een specifieke proef. In de figuur is te zien dat de helling van de bodem van de erosiekuil maar weinig verschilt van de taludhelling, net als in de eerste proevenserie. Deze helling is ongeveer 1:8 à 1:10.

De bovenaanzichten met in kleur de erosiediepte zijn te zien in Bijlage A, samen met de erosieprofielen per proef. Alle erosieprofielen tezamen zijn te zien in Figuur 5.6



Figuur 5.6 Representatieve mediane dwarsdoorsnedes op basis van lasermetingen voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder) na elke test. De zwart gestippelde lijn geeft het oppervlak van het onder de klei gelegen zandcement

5.2.3 Erosiediepte en -volume van Dollarddijk

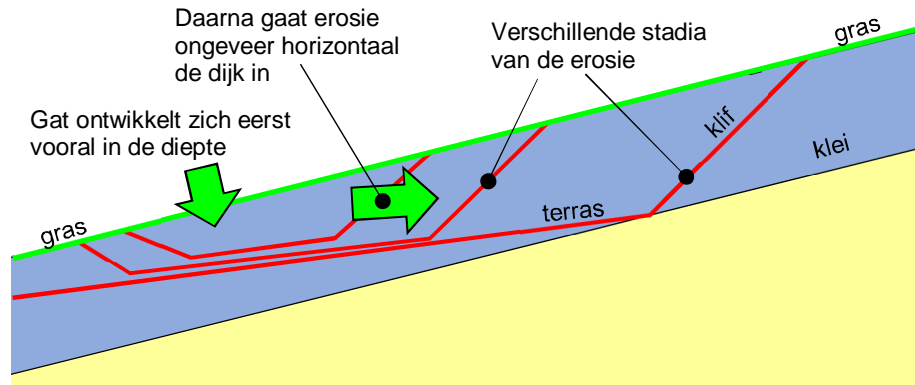
Op basis van de representatieve erosieprofielen is de grootste erosiediepte (loodrecht op het talud) en het erosievolume per meter dijk berekend. De resultaten daarvan zijn gegeven in Tabel 5.2. In dit hoofdstuk wordt alleen gekeken naar de ontwikkeling van de erosie aan de kant van de Dollarddijk, omdat de dijk met klei van Blija vrijwel niet erodeerde.

Het verloop van de erosiediepte is grafisch weergegeven in Figuur 5.8. De resultaten van de Dollarddijk laten na ca. 4 à 5 uur een flinke versnelling van de erosie zien, terwijl dat voor de bekleding van de dijk bij Blija uitblijft. Het kleine gat bij $X' = 1,5$ m (zie Figuur 5.3) is snel dieper en groter geworden tijdens proef B2_06. De diepte van het gat is gegroeid van circa 5 cm naar 67 cm. Het volume van het gat was toegenomen van 0,4 naar 1,6 m³/m (zie Figuur 5.9), hetgeen echter nog niet zoveel is in het licht van het totale erosievolume aan het eind van de proevenserie (32 m³/m).

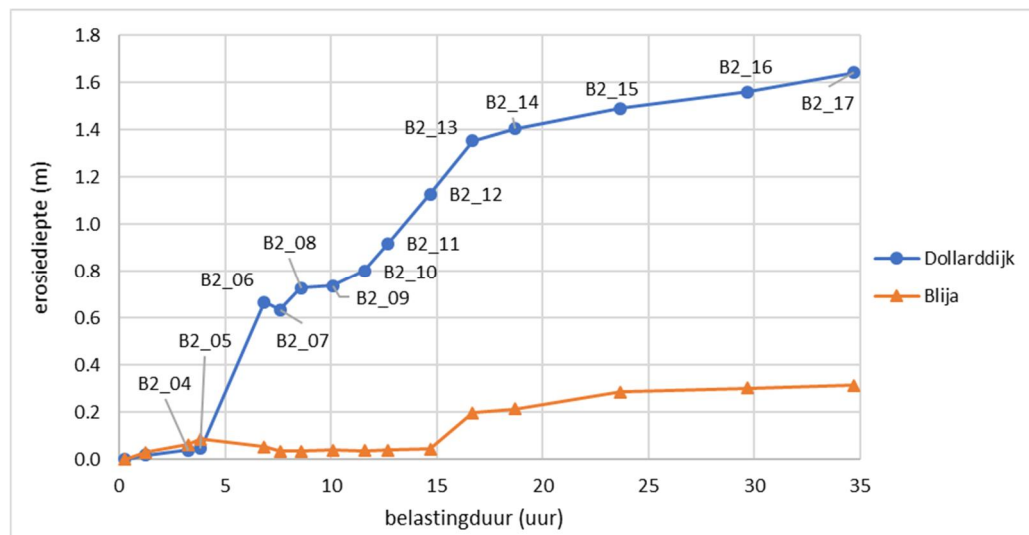
Dit is kenmerkend voor de twee fases waarmee het erosieproces zich voltrekt (Klein Breteler, 2021a), zie Figuur 5.7:

1. Erosie van de toplaag (in dit geval klei met gras) totdat er een kuil is ontstaan en een klif waartegen de golven beuken.
2. Een erosieproces waarbij er een steile klif is die met name onderaan de klif erodeert en het gras ondermijnt.

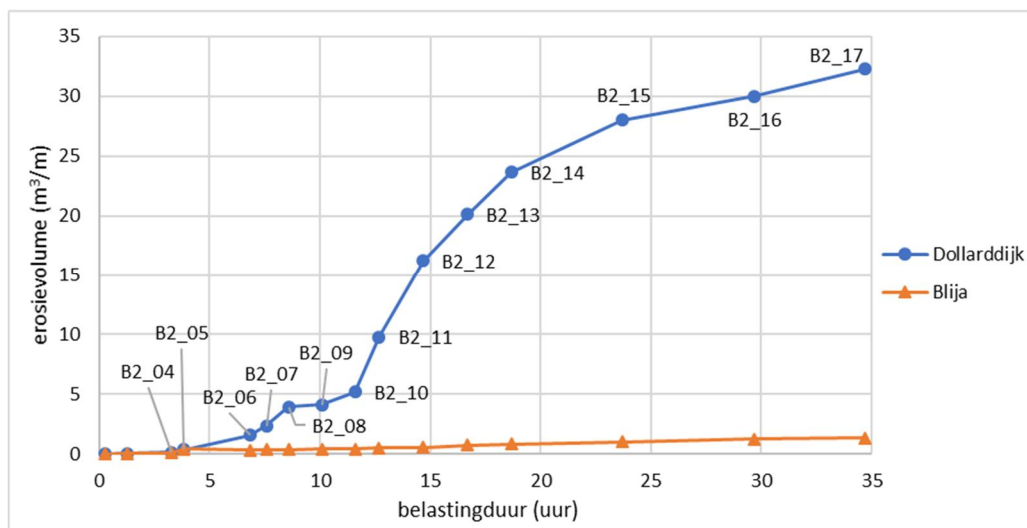
De eerste fase is doorlopen tijdens proef B2_01 t/m B2_06. Na verloop van tijd tijdens proef B2_06 is de tweede fase gestart. Gezien het feit dat de tweede fase veel sneller verloopt dan de eerste, is de verwachting dat de overgang van de eerste naar de tweede fase ongeveer 0,5 à 1 uur voor het einde van proef B2_06 plaatsvond, dus op $t = \text{ca. } 6$ uur (met $t = \text{cumulatieve belastingduur (uur)}$). Op basis van proef B2_07 en B2_08 kan gesteld worden dat in het laatste uur van proef B2_06 de klif ongeveer 1,5 m is opgeschoven door de erosie, wat al ruim de helft is van de totale erosiekuil aan het eind van proef B2_06.



Figuur 5.7 Schematische weergave van het erosieproces



Figuur 5.8 Maximale erosiediepte (loodrecht op het talud) als functie van de cumulatieve proefduur in uren tijdens de tweede proevenserie (proef B2_09 is uitgevoerd met $H_{m0} = 1,0$ m en B2_10 met $H_{m0} = 1,5$ m, terwijl de andere proeven zijn uitgevoerd met $H_{m0} = 2,0$ m)



Figuur 5.9 Erosievolume per strekkende meter dijk als functie van de cumulatieve proefduur in uren tijdens de tweede proevenserie (proef B2_09 is uitgevoerd met $H_{m0} = 1,0$ m en B2_10 met $H_{m0} = 1,5$ m, terwijl de andere proeven zijn uitgevoerd met $H_{m0} = 2,0$ m) (Vanaf proef B2_14 wordt de erosie beïnvloed door het einde van het model en omdat bij $X' = 4$ m het beton onder de klei was bereikt)

proef	H_{m0} (m)	Cumulatieve duur (uur)	Dollarddijk		Groene Dijk bij Blija	
			Erosiediepte (m)	Erosievolume (m³/m)	Erosiediepte (m)	Erosievolume (m³/m)
B2_01	1,95	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
B2_02	2,00	1,25	0,02	0,06	0,03	0,08
B2_04	1,99	3,25	0,04	0,15	0,06	0,10
B2_05	2,02	3,83	0,05	0,39	0,09	0,42
B2_06	1,95	6,83	0,67	1,58	0,05	0,32
B2_07	2,00	7,58	0,64	2,39	0,03	0,39
B2_08	2,00	8,58	0,73	3,97	0,03	0,40
B2_09	1,00	10,08	0,74	4,16	0,04	0,44
B2_10	1,51	11,58	0,80	5,18	0,04	0,43
B2_11	2,03	12,68	0,92	9,77	0,04	0,50
B2_12	2,01	14,68	1,13	16,24	0,04	0,57
B2_13	2,01	16,68	1,35	20,11	0,20	0,75
B2_14	2,04	18,68	1,40	23,64	0,21	0,86
B2_15	2,05	23,68	1,49	28,01	0,29	1,04
B2_16	2,04	29,68	1,56	30,01	0,30	1,24
B2_17	2,04	34,68	1,64	32,26	0,31	1,33

Tabel 5.2 Gemeten erosiediepte (loodrecht op het talud) en erosievolume in de tweede proevenserie

Tijdens proef B2_09, met $H_{m0} = 1,0$ m, is er vrijwel geen erosie opgetreden. Kennelijk is deze golfhoogte zo laag dat het in de buurt van een drempelwaarde van de golfhoogte zit, waaronder geen erosie optreedt. Echter zat de klif hier nog onderwater waardoor deze niet maximaal werd belast door de brekende golven. Tijdens proef B2_10, met $H_{m0} = 1,5$ m, is er wel erosie, maar niet zoveel als tijdens de andere proeven die uitgevoerd zijn met $H_{m0} = 2,0$ m. Bij de proef met de Valgenwegklei was de toename van de erosiediepte bij een golfhoogte van $H_{m0} = 1,6$ m vrijwel gelijk aan die bij $H_{m0} = 2,0$ m. Waarschijnlijk was dit toevallig wat meer dan gemiddeld bij deze golfhoogte, binnen de spreiding die er bij klei-erosie altijd is.

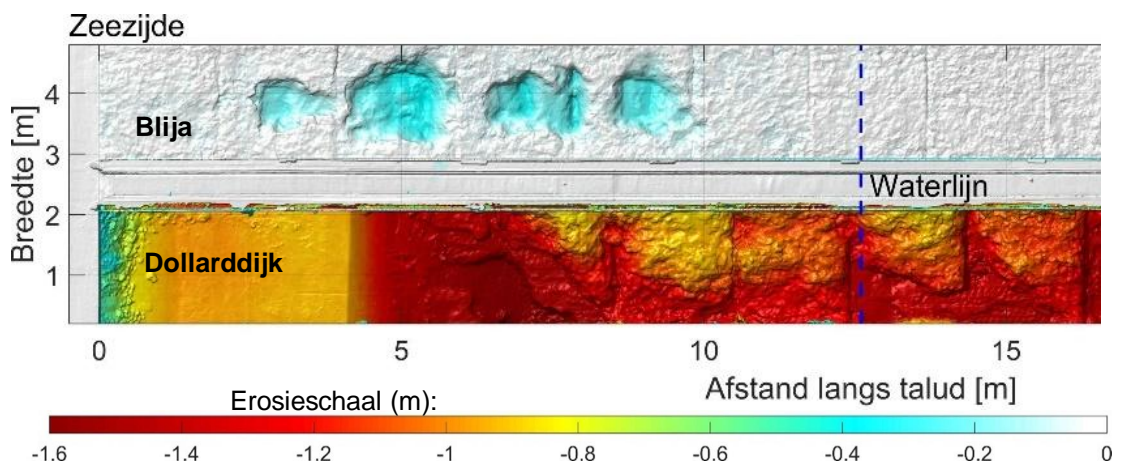
Vanaf proef B2_13 neemt de erosiesnelheid duidelijk af (erosiesnelheid = verandering van erosiediepte en -volume per uur). Op dat moment was de klif aangekomen in de kruin van de dijk en kennelijk is de klif dan zo ver weg van de brekende golven, dat de krachten op de klif minder worden. Aan het begin van proef B2_15 is de klif aan de halzijde aangekomen bij het einde van de klei op de binnenkruinlijn. Vanaf dat moment neemt de erosiesnelheid van het volume af omdat de golven tegen het betonnen uiteinde van het model op de kruin slaan, in plaats van tegen een klif van klei.

Er is een duidelijke afname van de erosiesnelheid qua volume bij de Dollardklei te zien als de klif de kruin heeft bereikt, terwijl dat veel minder het geval was bij de klei van de Valgenweg en de Klutenplas (eerste proevenserie). Het is onduidelijk wat de reden is van dit verschil.

Het proces van het dieper worden van de erosiekuil is niet afhankelijk van het feit dat de golven tegen het betonnen uiteinde het model bij de binnenkruinlijn komen. De diepte-ontwikkeling blijft dan naar verwachting hetzelfde als wanneer de klei ook op het binnentalud aanwezig zou zijn geweest. We zien dan ook een constante (relatief lage) snelheid van het dieper worden van de erosiekuil, zowel voor als na het bereiken van het einde van het model bij de binnenkruinlijn (zie ook de constante snelheid waarmee de erosiediepte zich ontwikkeld vanaf uur 17 in Figuur 5.8).

5.2.4 Erosiediepte en -volume van dijk bij Blija

Gedurende al deze tijd is de erosie in de kleibekleding met gras van Blija nauwelijks toegenomen. Uiteindelijk is 34,7 uur op deze bekleding gegolfd, waarvan 31,7 uur met golven van $H_{m0} = 2$ m. Zoals te zien is in Figuur 5.10 is er wel enige erosie ontstaan, maar voornamelijk rondom de kunstmatige gaten.



Figuur 5.10 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) in de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder) na test B2_17.

Ook in de figuren van de ontwikkeling van de erosiediepte en -volume (Figuur 5.8 en Figuur 5.9) is te zien dat het merendeel van de erosie kunstmatig is gemaakt en nauwelijks is toegenomen door het geweld van de golven.

Dit is des te opmerkelijker omdat in het onderzoek in de Deltagoot naar de erosie van een kleibekleding met gras op het boventalud (Klein Breteler 2021a) klei van dezelfde dijk is gebruikt, terwijl die wel op een gegeven moment vlot erodeerde. Toen was er kennelijk een zwakke plek in de golfaanvalzone die snel kon uitgroeien. Het onderzoek van toen had twee belangrijke verschillen ten opzichte van het onderzoek van nu:

1. de taludhelling was 1:4
2. er was een harde bekleding op het ondertalud aanwezig (onder SWL-0,3 m)

Het is denkbaar dat de samenhang van de kleiblokken toen wat minder was doordat ze gestoken waren na een zeer droog voorjaar. Dat kan de klei wat verzwakt hebben. Tijdens het inbouwen van de kleiblokken was toen geconstateerd dat de randen van de blokken vrij gemakkelijk afbrokkelden. Met de kleiblokken in het huidige onderzoek was er geen sprake van afbrokkelende randen.

6 Analyse

6.1 Brede Groene Dijk (Dollard)

6.1.1 Erosievolume

Door Mourik (2020) is in het verleden een analyse uitgevoerd van alle Deltagootproeven met klei t/m 2015. Dat heeft geresulteerd in formules waarmee de klei-erosie kan worden voorspeld. Deze formules zijn met name geschikt voor de tweede fase van het erosieproces, zie Figuur 5.7. De belangrijkste formule voor het voorspellen van de erosie is:

Als $H_{m0} > 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot \left[16,4 \cdot (\tan \alpha)^2 \right] \cdot \left[\min \left(3,6; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot \left[1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2 \right] \quad (1)$$

Als $H_{m0} \leq 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0$$

Met daarin:

- $\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ($m^3/m/h$)
- c_e = erosiecoëfficiënt (-) (waarde voor klei volgens Mourik (2020): $\mu(c_e) = 0,55$, $V(c_e) = 0,25$) (1/uur)
- $V(c_e)$ = $\sigma(c_e) / \mu(c_e)$ = variatiecoëfficiënt (-)
- V_e = erosievolume per meter dijk (m^3/m)
- H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)
- α = taludhelling van het oorspronkelijke talud ($^\circ$)
- s_{op} = $H_{m0} / (gT_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)
- T_p = golfperiode bij de piek van golfspectrum (s)

De parameter c_e is een coëfficiënt die afhankelijk is van de soort klei.

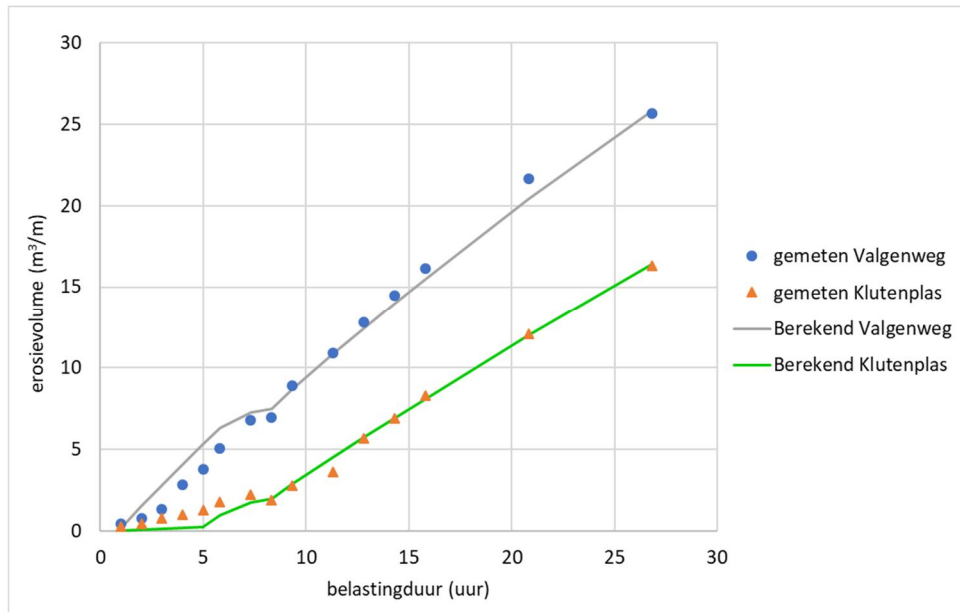
Deze formule is afgeleid voor relatief steile taluds (1:3 tot 1:5) en niet al te grote golven ($H_{m0} < 1,5$ m). Dat maakt dat deze formule eigenlijk niet van toepassing is voor de omstandigheden van de Brede Groene Dijk, maar het wordt wel gebruikt als startpunt voor de analyse.

Afgezien van de taludhelling en golfhoogte zou de formule van toepassing moeten zijn op de erosie van kale klei, zoals in de eerste proevenserie, en de tweede fase van het erosieproces van het grastalud dat in de tweede proevenserie is beproefd.

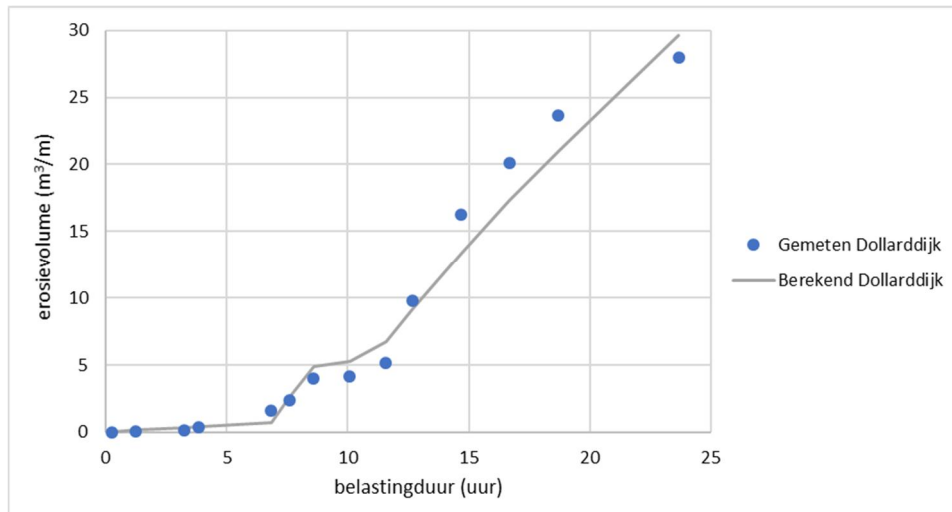
In eerste instantie wordt de formule gebruikt in combinatie met de metingen om de waarde van c_e te bepalen. Daarna wordt gekeken in hoeverre er aanpassingen nodig zijn in de formule gezien het flauwe talud en de hoge golven in het huidige project.

In Figuur 6.1 zijn de gemeten waarden van het erosievolume als functie van de tijd tijdens de eerste proevenserie gegeven. Bovendien is dit nagerekend met bovenstaande formule en een optimale waarde van c_e : de getrokken lijnen in de figuur. Er is in de berekeningen rekening gehouden met het feit dat er eerst wat oppervlakkige erosie optreedt en pas later de erosie dieper gaat en er een klif wordt gevormd. Pas als de erosie goed op gang komt is bovenstaande formule van toepassing. Dat is kennelijk het geval na ongeveer 1 uur golven op de klei van de Valgenweg en na ongeveer 5 uur golven op de klei van de Klutenplas.

Met deze aanpassing sluiten de berekeningen goed aan op de metingen.



Figuur 6.1 Gemeten en berekend erosievolume als functie van de tijd voor de eerste proevenserie (Valgenweg: $c_e = 0,94$; Klutenplas $c_e = 0,65$)



Figuur 6.2 Gemeten en berekend erosievolume als functie van de tijd voor Dollarddijkzijde van de tweede proevenserie ($c_e = 1,8$)

Op dezelfde wijze is de waarde van de erosiecoëfficiënt bepaald voor de Dollarddijk in de tweede proevenserie, zie Figuur 6.2. Hierbij is ingeschat dat de tweede fase van het erosieproces na ongeveer 6 uur golfbelasting is gestart ($t = 6$ uur, tijdens proef B2_06). Dit leidt tot een optimale waarde van de coëfficiënt $c_e = 1,8$. Deze waarde is verrassend hoog. Weliswaar was er sprake van wat minder goede klei, maar deze hoge erosiecoëfficiënt is minder logisch in vergelijking tot de waardes die in het verleden zijn gemeten.

Mogelijk is de invloed van de taludhelling wat overdreven in de formule opgenomen waardoor de voorspelde erosie teveel afneemt bij flauwere taludhelling (afnemende waarde van $\tan\alpha$). In het onderzoek van Mourik (2020) leek er een kwadratische verband te zijn tussen de erosiesnelheid en de taludhelling, maar in het onderzoek van Klein Breteler (2021a) was al geconcludeerd dat deze invloed waarschijnlijk minder is. In de formule van Mourik is de erosiesnelheid op een talud van 1:7 ongeveer eenderde van die op een talud van 1:4. Mogelijk is een lineair verband realistischer. Als gerekend wordt met een lineair verband, dan is de

erosiesnelheid op een talud van 1:7 slechts een factor 1,75 kleiner dan op een talud van 1:4. In dat geval wordt de waarde van de erosiecoëfficiënt $c_e = 1,0$. Maar ook de c_e -waarden voor de klei van de Valgenweg en de Klutenplas veranderen dan. Deze worden dan als volgt:

- Valgenwegklei: $c_e = 0,54$
- Klutenplasklei: $c_e = 0,37$

De formule voor het berekenen van de erosiesnelheid is met een lineair verband voor de taludhelling als volgt:

Als $H_{m0} > 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[\min \left(3,6; \frac{0,0061}{S_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2] \quad (2)$$

Als $H_{m0} \leq 0.4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = 0$$

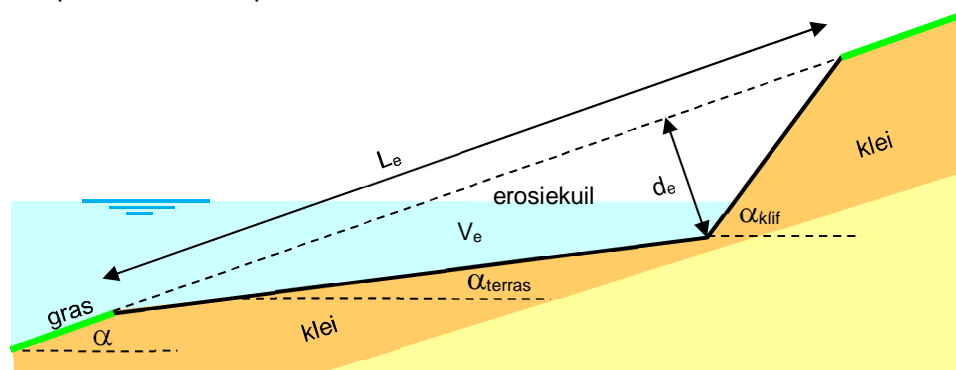
Deze aangepaste formule geeft hetzelfde resultaat als uit Mourik (2020) voor taluds van 1:4. Voor steiler gaat de erosiesnelheid minder snel omhoog en voor flauwere taluds neemt de erosiesnelheid minder snel af. Voorgesteld wordt om dezelfde variatiecoëfficiënt te hanteren als in Mourik (2020): $\sigma/\mu = 0,25$.

Anderzijds is het denkbaar dat de invloed van de golfhoogte bij deze grote golven wat afwijkt. Omdat echter in het onderzoek van Klein Breteler (2021a), waar ook grote golven zijn toegepast, dit niet is gebleken, wordt dit aspect in de formule nu niet aangepast.

Het aanpassen van de formule in combinatie met de aangepaste waarden voor c_e heeft geen invloed op Figuur 6.1 en Figuur 6.2. Deze twee figuren worden exact hetzelfde met de aangepaste formule en aangepaste waarden voor c_e .

6.1.2 Erosiediepte

De erosiediepte (loodrecht op het talud) kan berekend worden uit het erosievolume als de vorm van de erosiekuil bekend is. Door Mourik (2020) is een specifieke vorm met een erosieterras en erosieklijf aangenomen, zie Figuur 6.3. De taludhelling van het erosieterras was destijds geschat op 1:8 en de klif op 1:1.



Figuur 6.3 Schets van het geschematiseerde erosieprofiel met terras en klif.

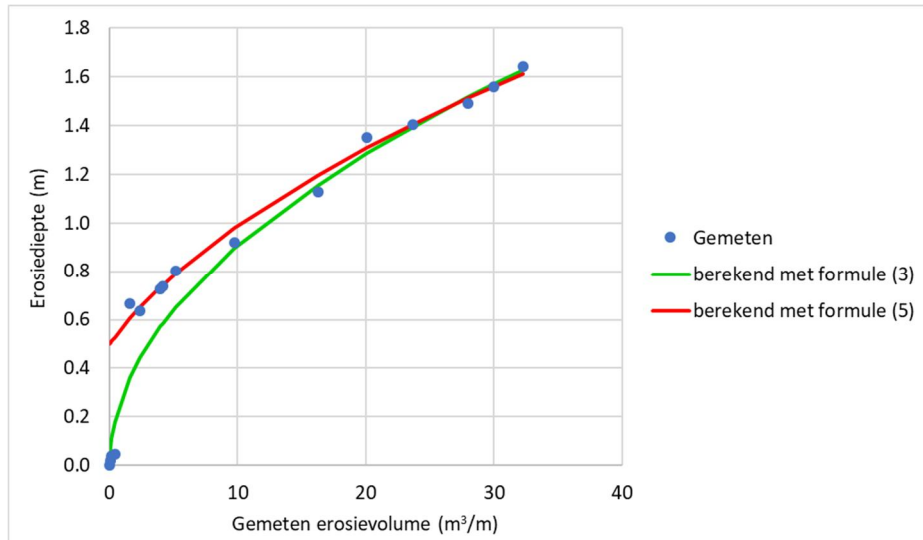
Voor deze vorm van de erosiekuil kan als volgt de erosiediepte bepaald worden uit het erosievolume:

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)}\right)}} \quad (3)$$

Met:

- V_e = erosievolume per strekkende meter dijk (m^3/m)
- d_e = maximale erosiediepte, loodrecht op het talud (m)
- α_{terras} = taludhelling van het erosieterras ($^\circ$)
- α_{klif} = taludhelling van de erosieklif ($^\circ$)
- α = taludhelling dijk ($^\circ$)

In eerste instantie wordt gekeken of deze formule goed aansluit op de metingen met de kleibekleding met gras van de Dollarddijk. Het blijkt dat de berekeningen beter overeenkomen bij dit flauwe talud van 1:7 als de terrashelling 1:10 wordt gekozen en de klifhelling 2:1. Het resultaat is te zien in Figuur 6.4 (groene lijn).



Figuur 6.4 Erosiediepte (loodrecht op het talud) als functie van het erosievolume voor de Dollarddijk

In de figuur valt het op dat de berekeningen voor $t \geq 10$ uur vrij goed aansluiten op de metingen, maar een flinke onderschatting geven voor de eerste 10 uur.

De lengte van het erosiegat (gemeten langs het talud) kan berekend worden met de volgende formule:

$$L_e = \frac{d_e}{\tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})} + \frac{d_e}{\tan(\alpha_{\text{klif}} - \alpha)} \quad (4)$$

Met:

L_e = lengte van het erosiegat (gemeten langs het talud, zie Figuur 6.3) (m)

Na proef B2_12 was de erosiediepte $d_e = 1,13$ m en volgt uit bovenstaande formule een erosielengte $L_e = 28$ m. De gemeten erosielengte was echter slechts 21 m. Er lijkt dus iets niet te kloppen met de aanname ten aanzien van de vorm van de erosiekuil. Het blijkt dat de vorm beter benaderd kan worden door uit te gaan van de schematisatie in Figuur 6.5. Het verschil met Figuur 6.3 is dat het erosieprofiel aan de zeezijde gelijk start met een erosiediepte d_0 .

Met deze schematisatie wordt de formule om de erosiediepte te berekenen als volgt:

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}}) + d_0^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})}{\tan(\alpha_{\text{klif}} - \alpha)}\right)}} \quad (5)$$

Met:

d_0 = erosiediepte aan de zeezijde van de erosiekuil (m)

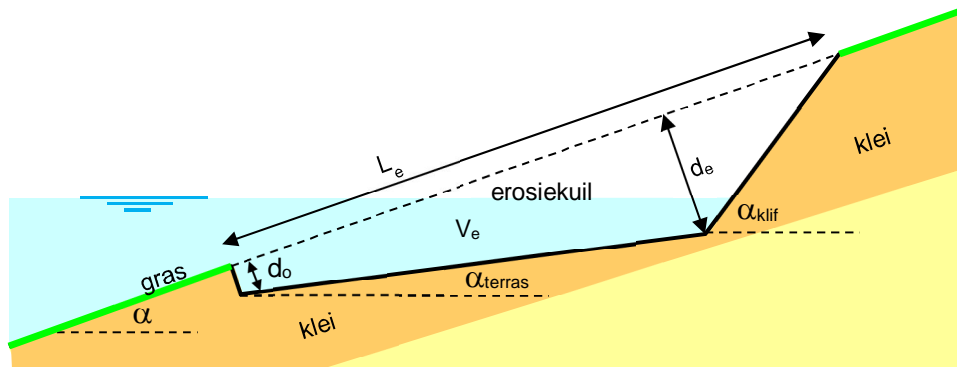
Als gerekend wordt met $d_0 = 0,5$ m, $\tan(\alpha_{\text{terras}}) = 0,105$ en $\tan(\alpha_{\text{klif}}) = 2$ levert dit de rode lijn in Figuur 6.4, die beter past bij de metingen.

De erosielengte L_e kan voor deze schematisatie als volgt berekend worden:

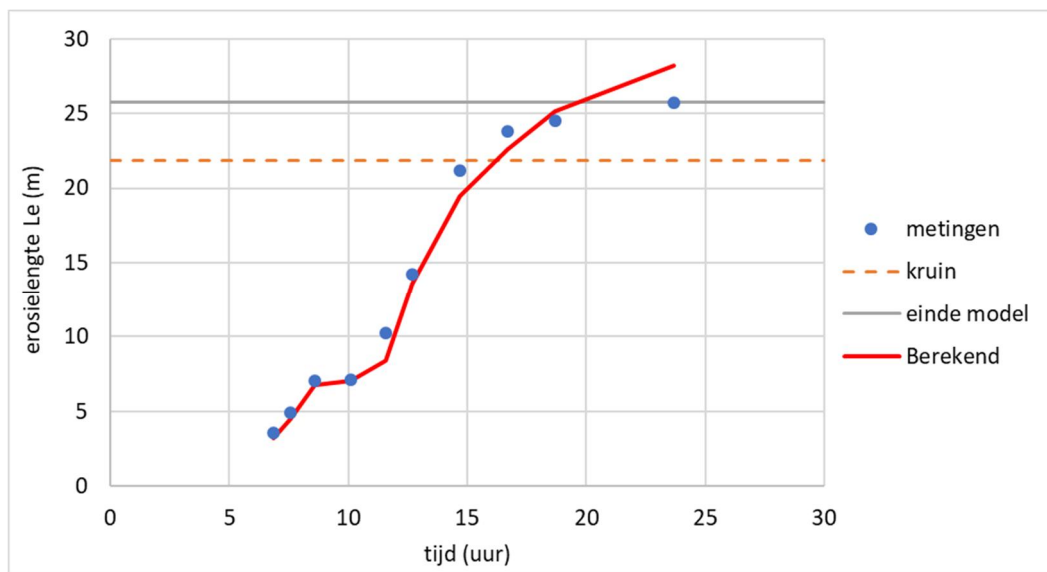
$$L_e = \frac{d_e - d_0}{\tan(\alpha - \alpha_{\text{terras}})} + \frac{d_e}{\tan(\alpha_{\text{klif}} - \alpha)} \quad (6)$$

In Figuur 6.6 is de hiermee berekende erosielengte vergeleken met de gemeten waarde (ter plaatse van de middenraai van de grasstrook). De erosielengte is berekend op basis van de gemeten erosiediepte.

Duidelijk is te zien dat er nu wel een goede overeenkomst is tussen de metingen en berekeningen. Bij het laatste meetpunt komen de berekeningen wat hoger uit doordat de klif toen bij het einde van het model was aangekomen en de erosielengte in de Deltagoot dus niet verder kon toenemen.



Figuur 6.5 Schets van het geschematiseerde erosieprofiel met terras, klif en begin diepte d_0 .



Figuur 6.6 Erosielengte L_e als functie van de tijd (metingen en berekeningen)

Wat verder opvalt is dat het erosieproces bij zo'n flauw talud na verloop van tijd wat minder snel de diepte in gaat, maar wel duidelijk richting de kruin blijft groeien. Dat maakt dat het dikker maken van de kleilaag vanaf een bepaalde dikte geen extra veiligheid meer biedt tegen een doorbraak.

6.1.3 Erosievolume in de eerste fase van erosieproces

Tot nu toe is de aandacht vooral gericht geweest op de tweede fase van het erosieproces, omdat er dan veruit de meeste klei erodeert. Voor de eerste fase van het erosieproces kan

gebruikt gemaakt worden van de formule van Klein Breteler (2015), die ook gebruikt wordt in WBI-2017:

$$d_e = c_d (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha)^{1,5} \cdot t_{belast} \quad (7)$$

Met:

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

c_d = 0,6 als zandgehalte < 70% (1/uur)

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

t_{belast} = belastingduur (uur)

α = taludhelling ($^\circ$)

In het onderzoek van Klein Breteler (2021a) is vastgesteld dat de overgang van de eerste naar de tweede fase van het erosieproces ongeveer plaatsvindt bij een erosiediepte van 0,5 m. Met bovenstaande formule, een golfhoogte van $H_{m0} = 2,0$ m en taludhelling van 1:7, zou dat na ongeveer 10 uur zijn. Tijdens de proeven is vastgesteld dat dit bereikt is na ongeveer 6 uur en daaruit blijkt dat deze formule, die destijds is afgeleid voor kleine golven en een steil talud, wat aanpassing behoeft. Mogelijk dat ook in deze formule de invloed van de taludhelling lineair zou moeten zijn. In dat geval wordt de formule als volgt:

$$d_e = c_d (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha) \cdot t_{belast} \quad (8)$$

Door te rekenen met een $c_d = 0,3$ wordt voor een talud van 1:4 hetzelfde resultaat verkregen. Voor een talud van 1:7 wordt met deze formule na 8 uur een erosiediepte van 0,5 m bereikt, hetgeen iets meer is dan de gemeten 6 uur. Door de waarde van c_d aan te passen naar 0,4 wordt de juiste duur tot het bereiken van 0,5 m erosie met deze formule berekend.

Met de inverse van formule (5) kan tenslotte het erosievolume berekend worden op basis van de erosiediepte:

$$V_e = \frac{d_e^2 - d_o^2}{2 \cdot \tan(\alpha - \alpha_{terrass})} + \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (9)$$

Omdat echter in de eerste fase $d_e < d_o$, vervalt de eerste term:

$$V_e = \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (10)$$

In deze eerste fase kan het zijn dat de vorm van de erosiekuil afwijkt van die in de tweede fase en dat de helling van de klif niet dezelfde waarde heeft, waardoor deze formule minder nauwkeurig is. Maar omdat het erosievolume nog maar klein is, is de fout die hierdoor ontstaat beperkt.

6.1.4 Locatie van de erosie

De proeven geven ook informatie over de locatie van de erosiekuil ten opzichte van de waterlijn, namelijk de diepte d_t , zie Figuur 6.7. Dit is de diepte onder de stilwaterlijn van de onderrand van de erosiekuil. Een formule voor deze diepte is op basis van proeven met relatief steile taluds (1:3 à 1:4) afgeleid door Klein Breteler e.a. (2012):

$$\frac{d_t}{H_{m0}} = \min \left(0,4 \frac{V_e^{0,25}}{H_{m0}^{1,5}} + 0,7 ; 2 \right) \quad (11)$$

Met:

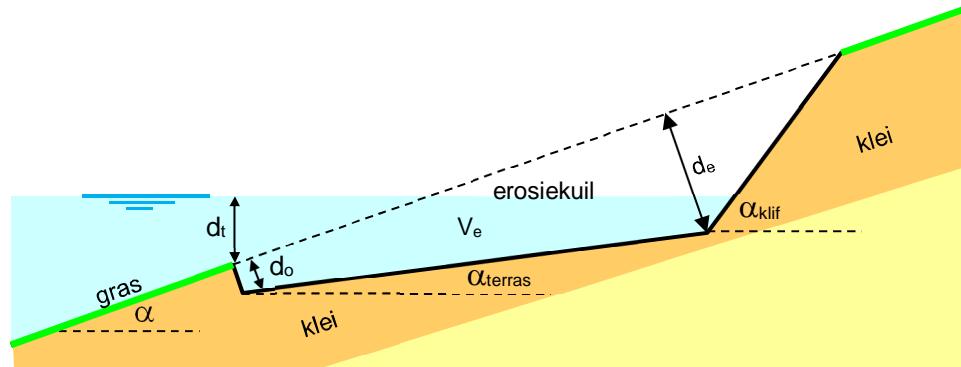
d_t = diepte onder de stilwaterlijn van de onderrand van de erosiekuil (m)

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

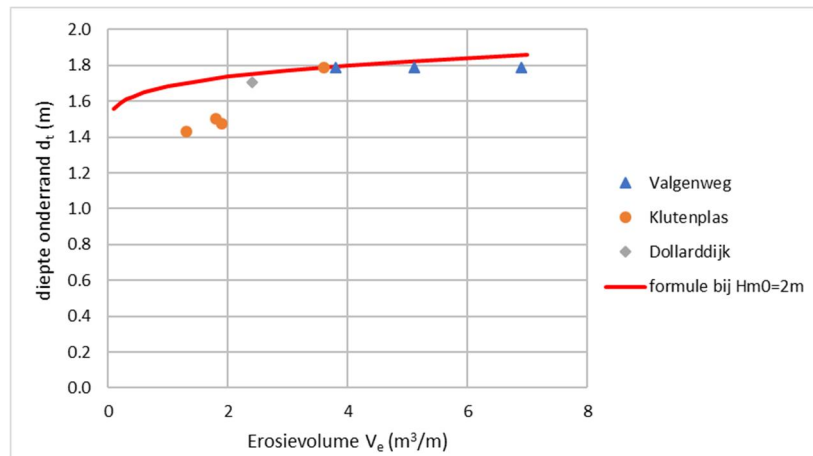
V_e = erosievolume per meter dijk (m^3/m)

In de formule is te zien dat deze diepte een functie is van het erosievolume en de golfhoogte. Naarmate er meer erosie optreedt, gaat de onderrand van de erosiekuil steeds verder omlaag, totdat er een laagste punt is bereikt (als $0,4V_e^{0,25}/H_{m0}^{1,5} = 1,3$).

In Figuur 6.8 is deze formule grafisch weergegeven, samen met de resultaten van de huidige proeven met het talud van 1:7. Duidelijk is te zien dat de onderrand van de erosiekuil volgens deze metingen bij kleine erosievolumina wat minder diep ligt. Deze groeit echter snel richting de rand van de klei in het model op 1,8 m onder de waterlijn en kan dan niet meer dieper. Door een fout bij het ontwerp van het model is het begin van het kleitalud onvoldoende diep onder de waterstand gekozen.



Figuur 6.7 Definitie van de diepte van de het begin van de erosiekuil d_t



Figuur 6.8 Gemeten diepte van de onderrand van de erosiekuil en berekende waarde met formule (11) met $H_{m0} = 2,0$ m

6.2 Groene Dijk bij Blija

De kleibekleding met gras van Blija heeft het uitstekend gehouden in de Deltagoot tijdens de proeven met deze zware golfaanval. Zelfs na het maken van diverse kunstmatige schades kwam de erosie nauwelijks op gang. Omdat ook met een kunstmatig gegraven klif er vrijwel geen erosie optrad, kan gesteld worden dat de erosiecoëfficiënt c_e zeer klein is (ongeveer 0,05 voor formule (2) uit 6.1.1).

Omdat in 2020 ook al eens klei van Blija in de Deltagoot is beproefd (Klein Breteler 2021a), die toen wel erodeerde tijdens de golfaanval, is het niet verstandig om er vanuit te gaan dat voor alle klei van deze Groene Dijk dezelfde kleine erosiesnelheid geldt als in het huidige onderzoek is vastgesteld. Het is denkbaar dat er nu bij toeval relatief erosiebestendige klei is gebruikt in de Deltagoot.

Door Mourik (2020) is destijds een standaardafwijking van 0,14 vastgesteld voor de erosie-coëfficiënt c_e , bij een gemiddelde van 0,55 op basis van Deltagootproeven met ongeroerde monsters. Als we nu dezelfde standaardafwijking hanteren, en aannemen dat de kleibekleding met gras bij toeval een sterkte heeft die door 90% van de dijk wordt onderschreden, dan vinden we de volgende waarden voor c_e :

- verwachtingswaarde: $\mu(c_e) = 0,05 + 0,14 \cdot 1,28 = 0,23$
- standaardafwijking: $\sigma(c_e) = 0,14$

Deze waarden van c_e kunnen gebruikt worden in combinatie met formule (2) voor het berekenen van de faalkans van de kleibekleding met gras. Dit leidt waarschijnlijk tot een conservatieve inschatting van de faalkans, die naar alle waarschijnlijkheid klein genoeg is om de dijk zoals hij nu is goed te keuren.

6.3 Invloed kleikwaliteit

De proefresultaten met klei van de Dollarddijk en de dijk bij Blija laten twee uitersten zien: de kleibekleding met gras van de Dollarddijk erodeerde zeer snel en die van Blija nauwelijks. De klei van de Valgenweg en die van de Klutenplas hebben ook behoorlijke verschillen laten zien, maar minder extreem dan die van de Dollarddijk en Blija.

Om deze verschillen te kunnen duiden, wordt eerst gekeken naar de Atterbergse grenzen (vloei grens en plasticiteitsindex), zandgehalte en lutumgehalte. De range van waarden zijn samengevat in Tabel 6.1. De Atterbergse grenzen en zandgehalte zijn zodanig dat al deze vier kleisoorten van categorie 1 (stevige klei) zijn, zie ook Figuur 3.14. Het lutumgehalte van deze vier kleisoorten is ook voldoende hoog voor een goede erosiebestendigheid.

eigenschap	Valgenweg	Klutenplas	Dollarddijk	Blija
Vloei grens (%)	87 à 99	89 à 92	62 à 80	52 à 62
Plasticiteitsindex (%)	55 à 69	59 à 63	38 à 49	27 à 35
Zandgehalte (%)	29 à 32	8 à 16	5 à 38	5 à 10
Lutumgehalte (%)	38 à 40	44 à 50	30 à 51	44 à 47

Tabel 6.1 Enkele eigenschappen van de klei

In de tabel valt op dat er een enorme spreiding is in het zandgehalte van de klei van de Dollarddijk, maar ook het lutumgehalte had een flinke spreiding. Tijdens het steken van de kleiblokken en het inbouwen ervan was ook al een groot verschil tussen de klei van de Dollarddijk en die van Blija geconstateerd. De klei van Blija had een goede samenhang, waardoor er vrijwel geen kleibrokjes van een verticaal gestoken wand afbrokkelden. Visueel leek er weinig zand in de klei aanwezig te zijn.

De klei van de Dollarddijk was daarentegen redelijk variabel van samenstelling. Bij sommige kleiblokken, zoals het eerste kleiblok met gras waar de erosie is begonnen, was er op het oog relatief veel zand in de klei aanwezig. Er was slechts een vrij matige samenhang in de klei, wat resulteerde in het afbrokkelen van verticaal gestoken kleiwanden.

Ook het zandgehalte van de Valgenweg was vrij hoog, namelijk van dezelfde orde als de zandige blokken van de Dollarddijk. Toch was de samenhang in deze klei beter dan die van de Dollarddijk. Het lijkt alsof niet alleen het zandgehalte, zoals bepaald in een standaard analyse, van belang is, maar ook hoe het zand verdeeld is in de klei. Als klei- en zanddeeltjes goed gemengd zijn en elke zandkorrel in contact is met kleideeltjes, zal de samenhang van het geheel vrij goed zijn, zelfs al is het zandgehalte vrij hoog. Als daarentegen de zandkorrels geclusterd zijn (zie Figuur 6.9), ontstaan er lokaal zwakke plekken in de grond, waardoor

brokken gemakkelijk kunnen loskomen uit het geheel. Dat verschil is ook heel belangrijk tijdens golfaanval, want ook golven kunnen dan brokjes klei eruit slaan.



Figuur 6.9 Plaatselijke plekken met sterk zandige klei in de klei van de Dollarddijk (lichte plekken in de linker foto bevatten veel zand in de klei; zo'n zandige plek is in rechter foto tussen de vingers uitgesmeerd) (naar het oosten toe werd het steeds zandiger)

Het zand in de klei van de Valgenweg was op het oog nauwelijks waarneembaar omdat het volledig verdeeld was over de klei, waardoor elke zandkorrel in contact is met kleideeltjes. Dat gaf een goede samenhang en leverde ook een vrij goed resultaat in de Deltagoot (niet al te grote waarde van c_e).

De klei van de Dollarddijk had niet alleen een hoog zandgehalte, maar plaatselijk was dit ook geclusterd aanwezig waardoor er gemakkelijk brokken vanaf kwamen (zie Figuur 6.9). Vermoedelijk heeft dat geleid tot de relatief grote erosiesnelheid tijdens de golfaanval (en relatief grote waarde van c_e). Ook in het verleden is gestructureerde klei met een zandgehalte zoals dat van de Dollarddijk in de Deltagoot beproefd, maar nog nooit is zo'n grote erosiesnelheid vastgesteld. Het vermoeden is dat dit een gevolg is van het geclusterd aanwezig zijn van zand waardoor de klei gemakkelijk afbrokkelt. Opgemerkt wordt dat de proefkuilen waar de klei nauwkeurig geanalyseerd is op de Dollarddijk aan de westzijde zijn gemaakt, waar de klei aanzienlijk beter van kwaliteit was dan aan de oostzijde. Dit is ook vastgesteld tijdens handboringen op de dijk tijdens het begin van dit onderzoek waar in sommige gevallen de bovenste halve meter heel brokkelig was en uit elkaar viel, terwijl op andere locaties de klei onder het gras een betere samenhang had. Het is denkbaar dat de invloed van de brokkeligheid wat wordt uitvergroot in de Deltagoot, omdat door de brokkeligheid de klei iets minder mooi kan worden ingebouwd en er wellicht extra scheuren zijn ontstaan in de klei. De Deltagootproeven leveren dan dus een conservatief resultaat (veilig).

Vorig jaar is de klei van de dijk bij Blija beproefd op een talud van 1:4 met de kleibekleding en gras boven de waterlijn en was er een harde bekleding onder de waterlijn. Ook bij die klei, die weliswaar iets meer zand bevatte dan de huidige klei van Blija, was geconstateerd dat de samenhang in de klei vrij matig was. Mede door het droge voorjaar en wellicht ook door geclusterd zand brokkelden de verticale wanden van klei gemakkelijk af. De erosiesnelheid was toen aanzienlijk hoger dan in de huidige proeven.

Geconcludeerd wordt dat niet alleen de Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte van belang zijn voor de kwaliteit van de klei, maar dat ook gekeken moet worden naar de samenhang van de kleilaag. Als een verticale wand met hoogte van minstens 50 cm gemakkelijk afbrokkelt (visuele beoordeling), is dat een aanwijzing dat de erosiesnelheid tijdens golfaanval vrij hoog zou kunnen zijn. Dit dient beoordeeld te worden als de klei redelijk vochtig is (bijvoorbeeld in het winterseizoen), want onder die omstandigheden kunnen we zware stormen verwachten.

Ook het organisch stofgehalte en de verdichting kunnen invloed hebben op de samenhang in de klei. De klei moet bij aanleg zo goed mogelijk verdicht worden bij het optimale watergehalte en het organisch stofgehalte moet niet te hoog zijn.

In het verleden is getracht de erosiebestendigheid te relateren aan diverse kenmerken van de klei, zoals de Atterbergse grenzen, mate van gestructureerdheid, lutumgehalte, zandgehalte, organisch stofgehalte en verdichting. Deze relatie is echter bijzonder moeilijk te leggen. Daarom wordt geadviseerd om een meetmethode te ontwikkelen waarmee de samenhang in de kleilaag direct kan worden vastgesteld. Het vermoeden is dat daarmee makkelijker een geschikt criterium kan worden bepaald voor het beoordelen van de kleilaag.

6.4 Resulterende formules

Bovenstaande analyse, met name die van de proeven op de Dollarddijk, heeft geresulteerd in de volgende formules waarmee de erosie van een kleibekleding met gras kan worden berekend:

- Eerste fase van het erosieproces (zolang $d_e < 0,5$ m):

$$d_e = c_d (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha) \cdot t_{belast} \quad (12)$$

$$V_e = \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (13)$$

$$c_d = 0,4$$

- Tweede fase van het erosieproces (als $d_e \geq 0,5$ m):

Als $H_{m0} > 0,4$ m:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[\min \left(3,6 ; \frac{0,0061}{s_{op}^{1,5}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2] \quad (14)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{terras}) + d_0^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \right)}} \quad (15)$$

$$L_e = \frac{d_e - d_0}{\tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{d_e}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (16)$$

$$d_0 = 0,5 \text{ m}$$

$$\tan(\alpha_{terras}) = 0,105$$

$$\tan(\alpha_{klif}) = 2$$

$$\text{Als } H_{m0} \leq 0,4 \text{ m: } \partial V_e / \partial t = 0$$

Met:

c_e = erosiecoëfficiënt (-)

d_e = maximale erosiediepte, loodrecht op het talud (m)

d_0 = erosiediepte aan de zeezijde van de erosiekuil, loodrecht op het talud, zie Figuur 6.5 (m)

H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)

L_e = lengte van het erosiegat (gemeten langs het talud, zie Figuur 6.5) (m)

s_{op} = $H_{m0} / (gT_p^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)

T_p = golfperiode bij de piek van spectrum (s)

$\partial V_e / \partial t$ = erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ($m^3/m/h$)

V_e = erosievolume per strekkende meter dijk (m^3/m)

α = taludhelling dijk ($^\circ$)

α_{klif} = taludhelling van de erosieklif ($^\circ$)

α_{terras} = taludhelling van het erosieterras ($^\circ$)

De erosie kan berekend worden met de volgende erosiecoëfficiënt voor een talud van 1:7 (hoe groter de waarde, des te groter de erosiesnelheid bij golfaanval):

- kleibekleding met gras van de Dollarddijk: $\mu(c_e) = 1,0$
- kleibekleding met gras van de dijk bij Blija: $\mu(c_e) = 0,23$
- ongestructureerde klei van de Valgenweg: $\mu(c_e) = 0,54$
- ongestructureerde klei van de Klutenplas: $\mu(c_e) = 0,37$

Als standaardafwijking kan hetzelfde aangehouden worden als in Mourik (2020): $\sigma(c_e) = 0,14$. Ter vergelijking kan vermeld worden dat Mourik destijds een gemiddelde waarde had gevonden van 0,55 voor de in het verleden beproefde klei.

7 Conclusie en aanbevelingen

7.1 Brede Groene Dijk (Dollard)

In het kader van het Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (onderdeel van het demonstratieproject Brede Groene Dijk) zijn in de Deltagoot twee series proeven uitgevoerd om de erosiesnelheid te meten voor vier kleisoorten op een flauw talud (1:7) bij een significante golfhoogte van 2,0 m. Drie daarvan hadden betrekking op de Brede Groene Dijk:

1. gerijpte baggerslib van de Kleirijperij aan de “Valgenweg”
2. lokaal gewonnen kweldermateriaal uit de “Klutenplas” dat enige tijd in een dijke heeft gelegen
3. gestructureerde klei met gras die in ongeroerde staat van de huidige Dollarddijk bij de Klutenplas is gehaald (waterschap Hunze en Aa's)

Het doel van dit project is om te bepalen hoe er met gerijpte materiaal (het sediment), ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof, een waterveilige dijk te realiseren is. Afhankelijk van de erosiesnelheid van het materiaal is er een dikkere of dunnere kleilaag nodig. Het waterschap zoekt vervolgens in het ontwerp naar de balans tussen wat er nodig is vanuit waterveiligheid en wat de impact is voor de omgeving, duurzaamheid en kosten. Om dit doel te bereiken is een breed onderzoek opgezet, waarvan één van de onderdelen het meten van de erosiesnelheid in de Deltagoot is.

Hiervoor is de Brede Groene Dijk op werkelijke schaal nagebouwd en belast met hoge golven. Het model is opgesplitst in twee helften, gescheiden door een middenwand, zodat twee soorten klei gelijktijdig getest konden worden. Van elke klei is een laag van 1,85 m dikte aangebracht over een lengte van 26 m en een breedte van 2,25 m (eerste proevenserie) of 2,0 m (tweede proevenserie).



Figuur 7.1 Tijdens proef B2_16

De eerste proevenserie is uitgevoerd met klei die in geroerde staat bij een optimaal vochtgehalte in de Deltagoot is aangebracht en zorgvuldig is verdicht tot een proctordichtheid van ongeveer 97%. Deze klei was daardoor ongestructureerd. Tijdens de proeven is geconstateerd dat de erosie zich sneller ontwikkelde in de klei van de Valgenweg dan in de klei van de Klutenplas. Desondanks hield het kleitalud aan beide zijden langer stand dan de duur van een extreme storm op de Dollard, namelijk 17 à 20 uur (zie Bijlage C).

In de loop der jaren raakt klei gestructureerd: er ontwikkelen zich scheuren in de klei door krimpen en zwellen. Om het effect van de structurering en de aanwezigheid van gras op de erosiesnelheid te meten is klei met gras in ongeroerde staat in blokken van $2 \times 2 \text{ m}^2$ van de Dollarddijk gehaald en gebruikt om het dijktaalud op te bouwen voor de tweede proevenserie. In de eerste uren van de golfbelasting was er weinig erosie van het gras, maar toen na ongeveer 6 uur er een flink gat in was geslagen, verliep de erosie beduidend sneller dan met de klei van de Valgenweg.

Wat in alle proeven opviel is dat de erosie minder de diepte in gaat dan gedacht, maar dat de erosiekuil wel vlot doorgroeit naar de kruin. Uiteindelijk faalde de beproefde dijk doordat de kruin was weggeërodeerd. Om dit goed te kunnen vaststellen was er voor gekozen om ook de kruin in het model uit te voeren met een dikke kleibekleding. De erosie van de kruin is in dit geval maatgevend over het doorbreken van de kleilaag als de kleilaag dikker is dan ongeveer 1,9 m (Dollarddijk) of 1,4 m (klei van Valgenweg).

Op basis van de proefresultaten zijn de formules van Mourik (2020) iets aangepast en zijn de waarden van de erosiecoëfficiënt gekwantificeerd:

- Eerste fase van het erosieproces (zolang $d_e < 0,5 \text{ m}$):

$$d_e = c_d (H_{m0} - 0,5) (\tan \alpha) \cdot t_{belast} \quad (17)$$

$$V_e = \frac{d_e^2}{2 \cdot \tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (18)$$

$$c_d = 0,4$$

- Tweede fase van het erosieproces (als $d_e \geq 0,5 \text{ m}$):

Als $H_{m0} > 0,4 \text{ m}$:

$$\frac{\partial V_e}{\partial t} = c_e \cdot \left[1,32 - 0,079 \cdot \frac{V_e}{H_{m0}^2} \right] \cdot [4,1 \cdot \tan \alpha] \cdot \left[\text{m in} \left(3,6 ; \frac{0,0061}{s^{1,5}} \right) \right] \cdot [1,7 \cdot (H_{m0} - 0,4)^2] \quad (19)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2V_e \tan(\alpha - \alpha_{terras}) + d_0^2}{\left(1 + \frac{\tan(\alpha - \alpha_{terras})}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \right)}} \quad (20)$$

$$L_e = \frac{d_e - d_0}{\tan(\alpha - \alpha_{terras})} + \frac{d_e}{\tan(\alpha_{klif} - \alpha)} \quad (21)$$

$$d_0 = 0,5 \text{ m}$$

$$\tan(\alpha_{terras}) = 0,105$$

$$\tan(\alpha_{klif}) = 2$$

Als $H_{m0} \leq 0,4 \text{ m}$: $\partial V_e / \partial t = 0$

Met:

c_e = erosiecoëfficiënt (-)

d_e = maximale erosiediepte, loodrecht op het talud (m)

d_0 = erosiediepte aan de zeezijde van de erosiekuil, loodrecht op het talud, zie Figuur 6.5 (m)

H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)

L_e = lengte van het erosiegat (gemeten langs het talud, zie Figuur 6.5) (m)

S_{op}	= $H_{m0}/(gT_p^2/(2\pi))$ = golfsteilheid gebaseerd op de significante golfhoogte en piekperiode bij de teen van de dijk (-)
T_p	= golfperiode bij de piek van spectrum (s)
$\partial V_e/\partial t$	= erosiesnelheid = toename erosievolume per strekkende meter dijk per uur ($m^3/m/h$)
V_e	= erosievolume per strekkende meter dijk (m^3/m)
α	= taludhelling dijk ($^\circ$)
α_{klif}	= taludhelling van de erosieklif ($^\circ$)
α_{terras}	= taludhelling van het erosieterras ($^\circ$)

De waarde van de erosiecoëfficiënt voor deze drie kleisoorten is voor een talud van 1:7 (hoe groter de waarde, des te groter de erosiesnelheid bij golfaanval):

- ongestructureerde klei van de Valgenweg: $\mu(c_e) = 0,54$
- ongestructureerde klei van de Klutenplas: $\mu(c_e) = 0,37$
- kleibekleding met gras van de Dollarddijk: $\mu(c_e) = 1,0$

Op basis van de proefresultaten kan gesteld worden dat de erosie van de klei van de Valgenweg ongeveer anderhalf maal sneller gaat dan die van de Klutenplas en dat de erosie van de klei van de Dollarddijk ongeveer tweemaal zo snel gaat als die van de Valgenweg. De erosiesnelheid van de Dollarddijk was waarschijnlijk zo groot vanwege de beperkte samenhang in de klei (brokkeligheid), zandlenzen en zandpockets, de aangetroffen poriën in de klei en de schades in het gras. Waarschijnlijk zijn de problemen tijdens de aanleg, toen de klei vrij nat is aangebracht, de oorzaak hiervan.

In werkelijkheid zal de bovenste laag (tot ca 1 à 1,5 m onder het taludoppervlak) gestructureerd zijn en de klei daaronder is nauwelijks/niet gestructureerd. Dat betekent dat de erosiediepte eerst bepaald kan worden met de erosiecoëfficiënt van de gestructureerde klei, totdat de erosiediepte 1 à 1,5 m is geworden. Daarna kan verder gerekend worden met de erosiecoëfficiënt van de ongestructureerde klei om de totale erosiediepte te bepalen. Voor het bepalen van het moment waarop de erosie de kruin bereikt moet alleen gerekend worden met de erosiecoëfficiënt van de gestructureerde klei.

7.2 Groene Dijk bij Blija

Voor de Groene Dijk van het dijkvak Noorderleeg-Blija op het dijktraject Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân geldt dat deze net niet door de periodieke beoordeling in het kader van WBI 2017 komt ten aanzien van het mechanisme "erosie buitentalud". Daarom is besloten de kleibekleding met gras in de Deltagoot te beproeven als vierde kleisoort tijdens de tweede proevenserie. Daartoe zijn blokken klei met gras van $2 \times 2 m^2$ in ongeroerde staat uit de dijk bij Blija gehaald om daarmee het dijktaalud naast die van de Dollarddijk in de Deltagoot op te bouwen.

De kleibekleding met gras van Blija heeft het uitstekend gehouden in de Deltagoot tijdens de proeven met zware golfaanval. Zelfs na het maken van diverse kunstmatige schades kwam de erosie nauwelijks op gang.

Omdat in 2020 ook al eens klei van Blija in de Deltagoot is beproefd (Klein Breteler 2021a), die toen wel erodeerde tijdens de golfaanval, is het niet verstandig om er vanuit te gaan dat voor alle klei van deze Groene Dijk dezelfde kleine erosiesnelheid geldt als in het huidige onderzoek is vastgesteld. Het is denkbaar dat er nu bij toeval relatief erosiebestendige klei is gebruikt in de Deltagoot. Daarom is de aanname gedaan dat de beproefde kleibekleding met gras bij toeval een sterkte heeft die door 90% van de dijk wordt onderschreden. Op basis van deze conservatieve aanname resulteert een erosiecoëfficiënt $\mu(c_e) = 0,23$. Dit betekent dat de gemiddelde erosiesnelheid op deze dijk ruim viermaal zo klein is als die van de Dollarddijk.

7.3 Invloed kleikwaliteit

De Atterbergse grenzen en het zandgehalte zijn zodanig dat al deze vier kleisoorten van categorie 1 (stevige klei) zijn. Het lutumgehalte van deze vier kleisoorten is ook voldoende hoog voor een goede erosiebestendigheid. Het gehalte organische stof en zout is van de Valgenwegklei en Klutenplasklei te hoog.

Wat aan de hand van de gemeten eigenschappen opvalt is dat er een enorme spreiding is in het zandgehalte van de klei van de Dollarddijk, maar ook het lutumgehalte had een flinke spreiding. Verder lijkt het alsof niet alleen het zandgehalte, zoals bepaald in een standaard analyse, van belang is, maar ook hoe het zand verdeeld is in de klei. Als elke zandkorrel in contact is met kleideeltjes, zal de samenhang van het geheel vrij goed zijn, zelfs al is het zandgehalte vrij hoog. Als daarentegen de zandkorrels geclusterd zijn, ontstaan er lokaal zwakke plekken in de grond, waardoor brokken gemakkelijk kunnen loskomen uit het geheel. Dat verschil is ook heel belangrijk tijdens golfaanval, want ook golven kunnen dan brokjes klei eruit slaan.

Geconcludeerd wordt dat niet alleen de Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte van belang zijn voor de kwaliteit van de klei, maar dat ook gekeken moet worden naar de samenhang van de kleilaag. Als een verticale wand met hoogte van minstens 50 cm gemakkelijk afbrokkelt (visuele beoordeling), is dat een aanwijzing dat de erosiesnelheid tijdens golfaanval vrij hoog zou kunnen zijn. Dit dient beoordeeld te worden als de klei redelijk vochtig is (bijvoorbeeld in het winterseizoen), want onder die omstandigheden kunnen we zware stormen verwachten.

In het verleden is getracht de erosiebestendigheid te relateren aan diverse kenmerken van de klei, zoals de Atterbergse grenzen, mate van gestructureerdheid, lutumgehalte, zandgehalte, organisch stofgehalte en verdichting. Deze relatie is echter bijzonder moeilijk te leggen. Daarom wordt geadviseerd om een meetmethode te ontwikkelen waarmee de samenhang in de kleilaag direct kan worden vastgesteld. Het vermoeden is dat daarmee makkelijker een geschikt criterium kan worden bepaald voor het beoordelen van de kleilaag.

Referenties

Essen, H. van (2021). Resultaten erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei. Deltares, conceptmemo 11207091-008-GEO-0001, 27 augustus 2021

Feenstra, S. (2021). Geotechnisch laboratoriumonderzoek: Klei van Klutenplas en Valgenweg. Wiertsema & Partners. referentie 76603-5 R76636.

Hijma, M. (2021). Beschrijving profielkuilen Dollarddijk. Deltares, conceptmemo 11207091-004-GEO-0001, 11 mei 2021

Klein Breteler, M., A. Capel, G.A.M. Kruse, G.C. Mourik en D. Kaste (2012). Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven. SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven. Deltares, rapport 1204200-008, 18 mei 2012

Klein Breteler, M. (2018). Maximale significante golfhoogte op ondiep water. Deltares, memo 11202105-000-GEO-0001, 12 maart 2018

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

Klein Breteler, M. (2021). Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk. Stap 4: Structuurvorming in klei van Kleirijperij na versnelde seizoenen. Deltares. referentie 11205846-002-GEO-0008.

Klein Breteler, M. (2021a), Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Lauwersmeerdijk; Meetverslag Deltagootproeven voor dijktraject Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat Deltares, 11204841-006, 15 januari 2021

Londo, G. (1973). De decimale schaal voor vegetatiekundige opnamen van permanente kwadraten. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Leersum — RIN-mededeling no. 132

Mourik, G.C. (2020). Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack WTI-2017. Deltares. referentie 1209437-017-HYE-0003.

Rijkswaterstaat (2019). Schematiseringshandleiding grasbekleding, WBI 2017. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 28 november 2019

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

Van den Heuvel, M.J.M., Boganen, J., Postma, T. (2020). De Aanleg van een Proefdijk. Verslaglegging van uitvoeringsaspecten en verdichtingsmetingen van een Proefdijk bestaande uit gebiedseigen klei uit de Eems-Dollard t.b.v. Demonstratieproject Brede Groene Dijk van het Waterschap Hunze en Aa's. Boskalis & van Oord.

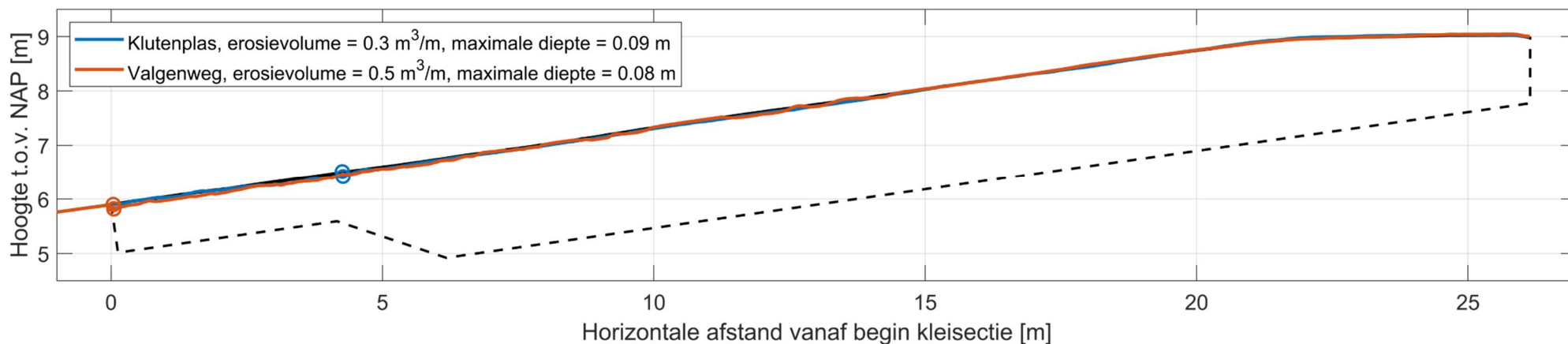
A 3D metingen met laserscanner

In deze bijlage worden voor elke laserscanmeting twee afbeeldingen getoond.

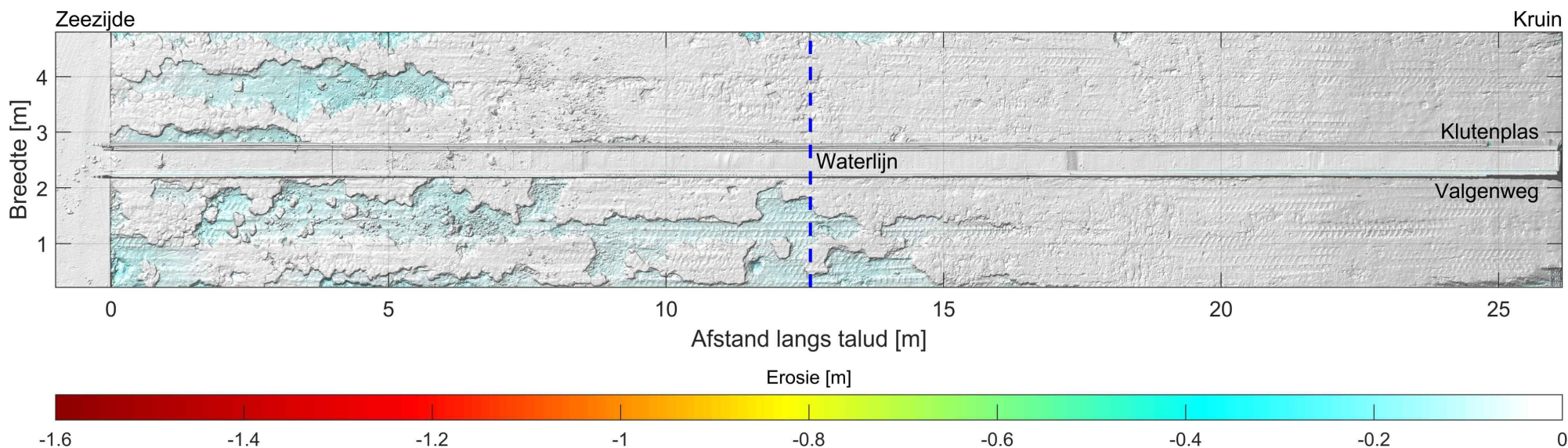
De eerste afbeelding toont voor elke modelsectie een representatieve dwarsdoorsnede. Deze is gemaakt door allereerst de meetpunten te filteren met een voortschrijdend gemiddelde over 10 cm, en vervolgens voor ieder x-coördinaat de mediaan te nemen over een kleibreedte van 1,8 m (loodrecht op de gootas). Door deze methode worden de opgetreden randeffecten langs de gootrand niet meegenomen in de dwarsdoorsnedes. Er is bewust gekozen om niet te werken met de diepst gemeten punten omdat deze vaak erg lokaal zijn en deels worden veroorzaakt door randeffecten langs de goot- en middenwand. Deze zijn daarmee niet representatief voor de klei-erosie. De verticale waarden in de grafiek zijn weergegeven ten opzichte van NAP. De zwart gestippelde lijn geeft het oppervlak van het onder de klei gelegen zandcement.

De tweede afbeelding bevat een bovenaanzicht van de gemeten klei-erosiediepte. Hierin is op de x-as de afstand langs het talud gegeven. De erosiediepte is gemeten loodrecht op het talud van 1:7.

Na Test B1_01

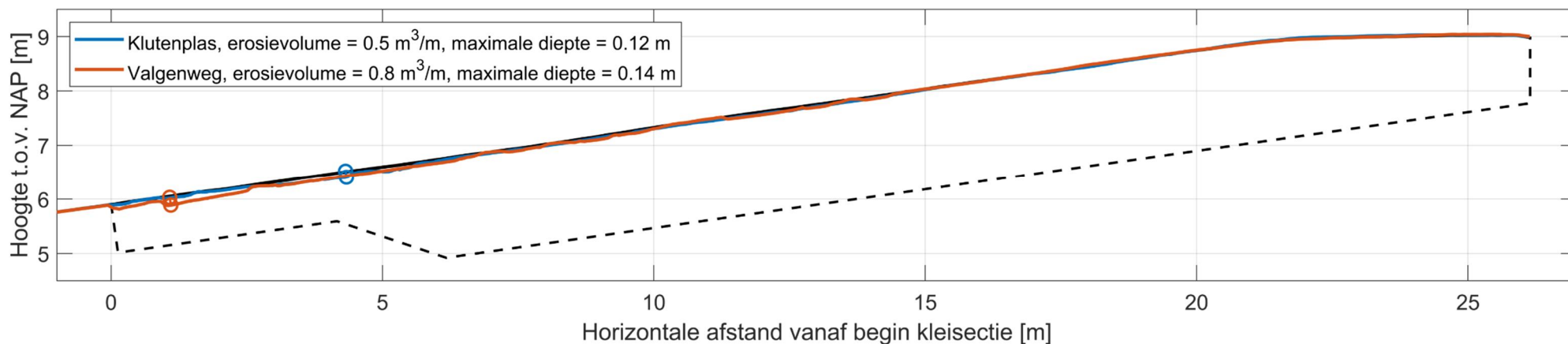


Figuur A.1 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

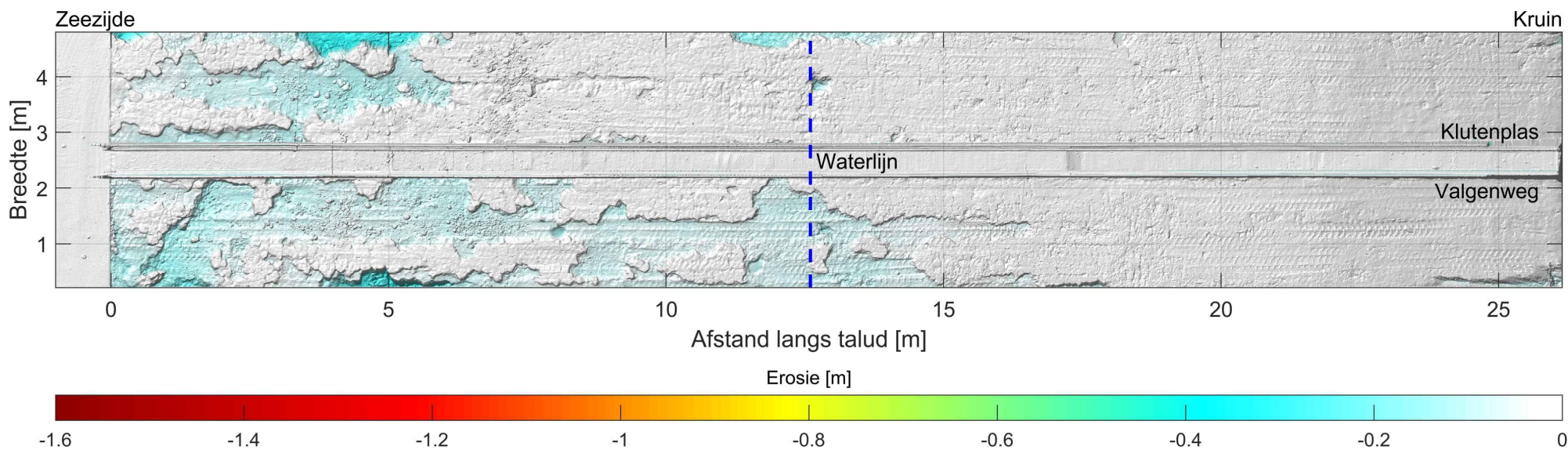


Figuur A.2 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_02

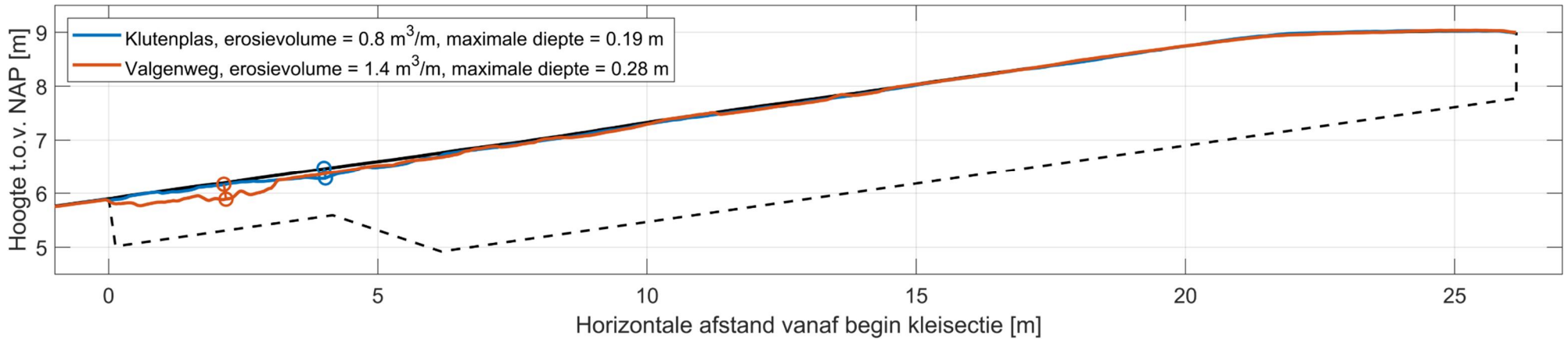


Figuur A.3 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

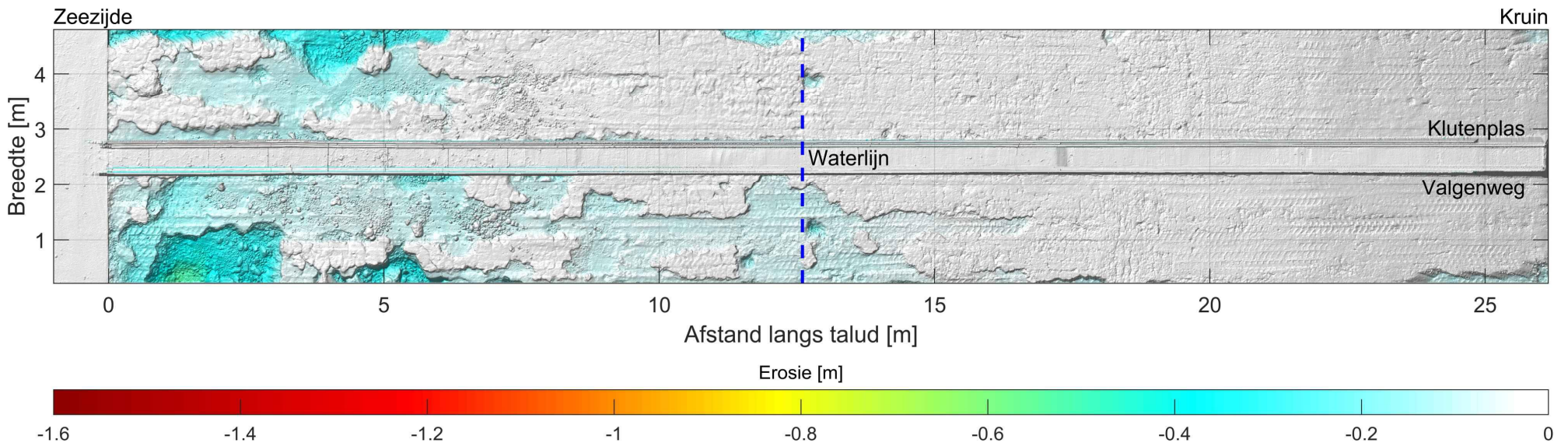


Figuur A.4 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_03

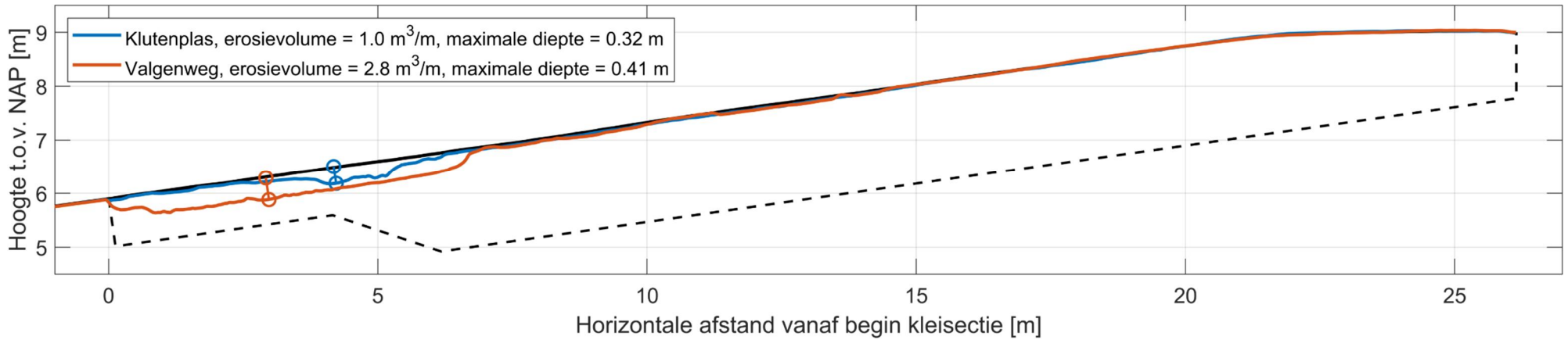


Figuur A.5 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

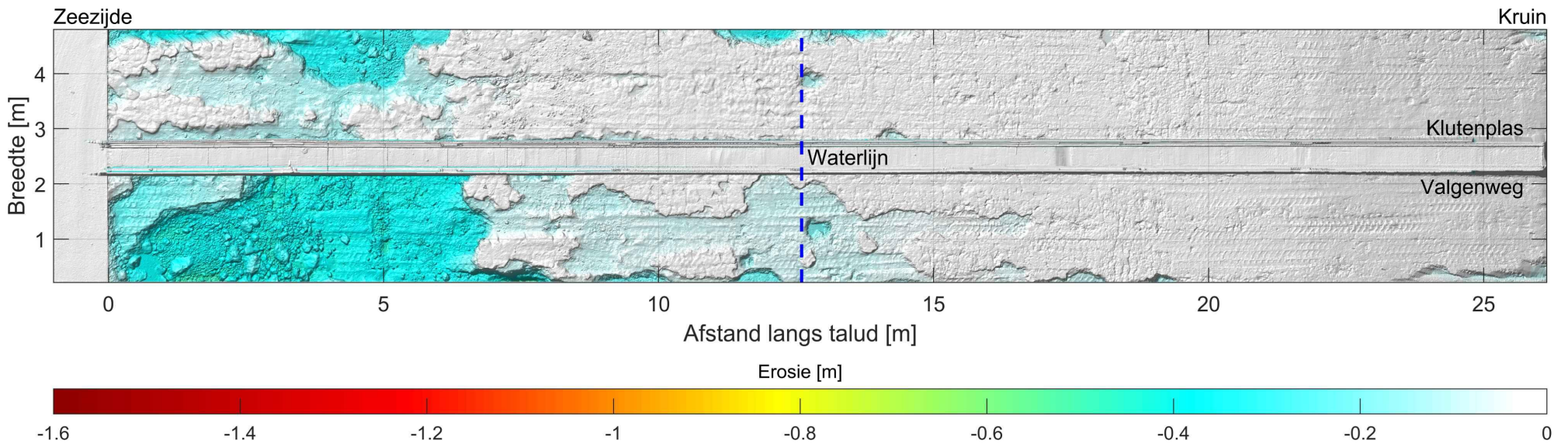


Figuur A.6 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_04

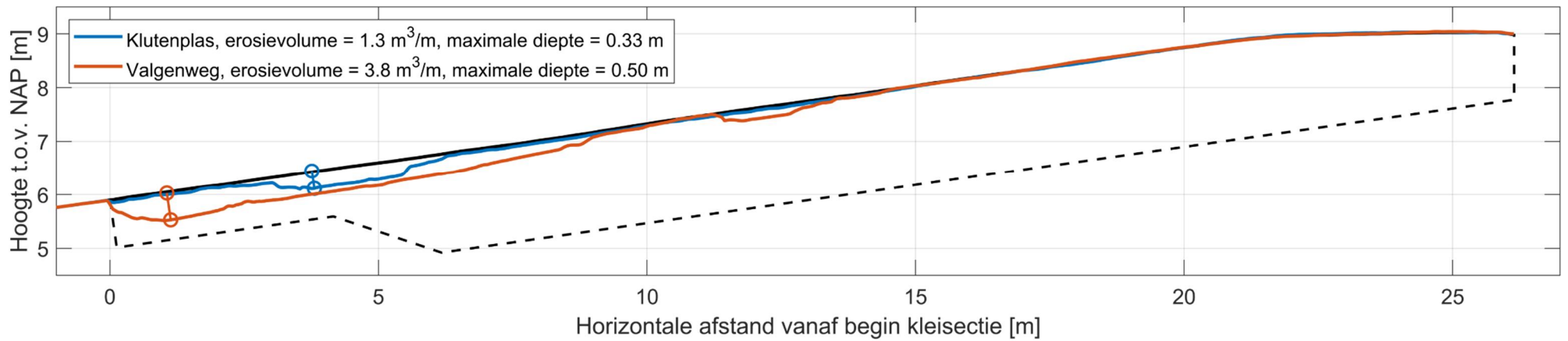


Figuur A.7 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

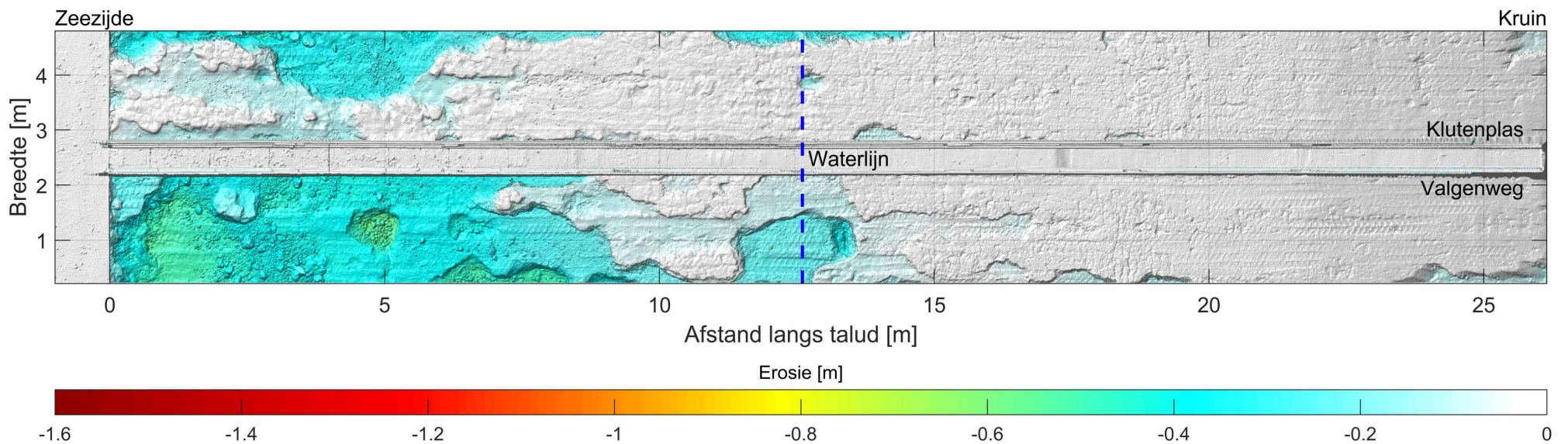


Figuur A.8 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_05

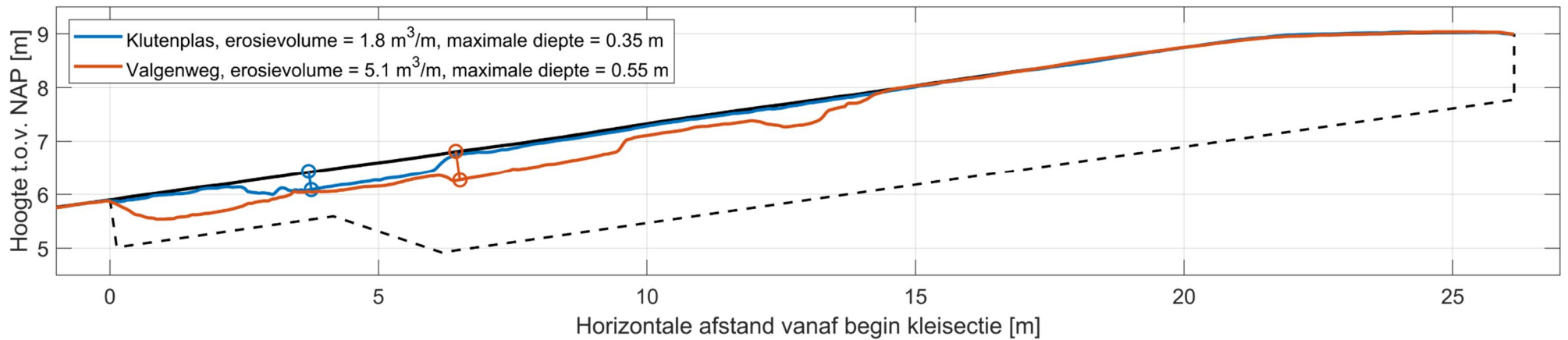


Figuur A.9 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

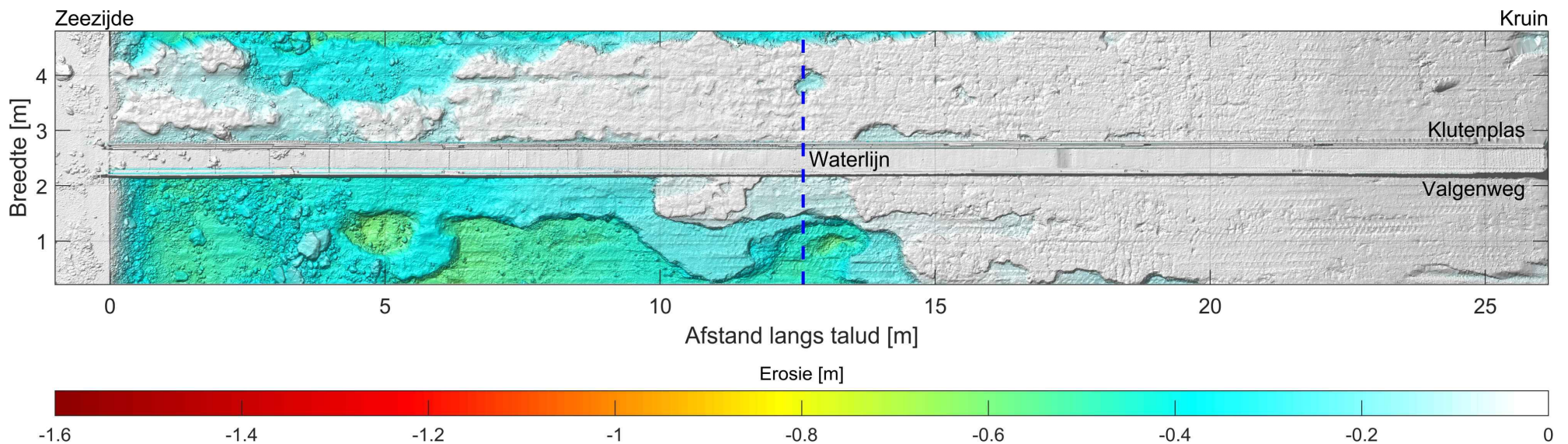


Figuur A.10 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_06

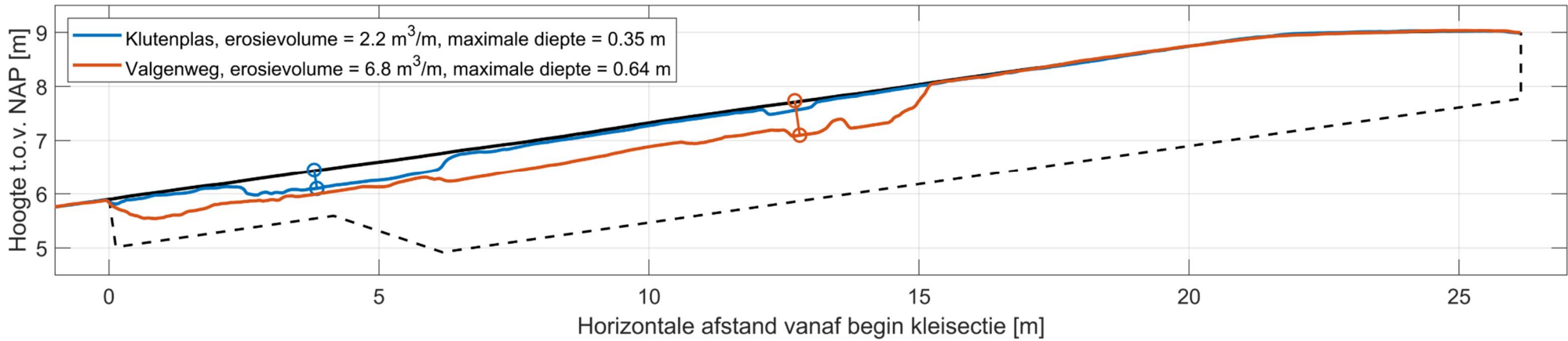


Figuur A.11 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

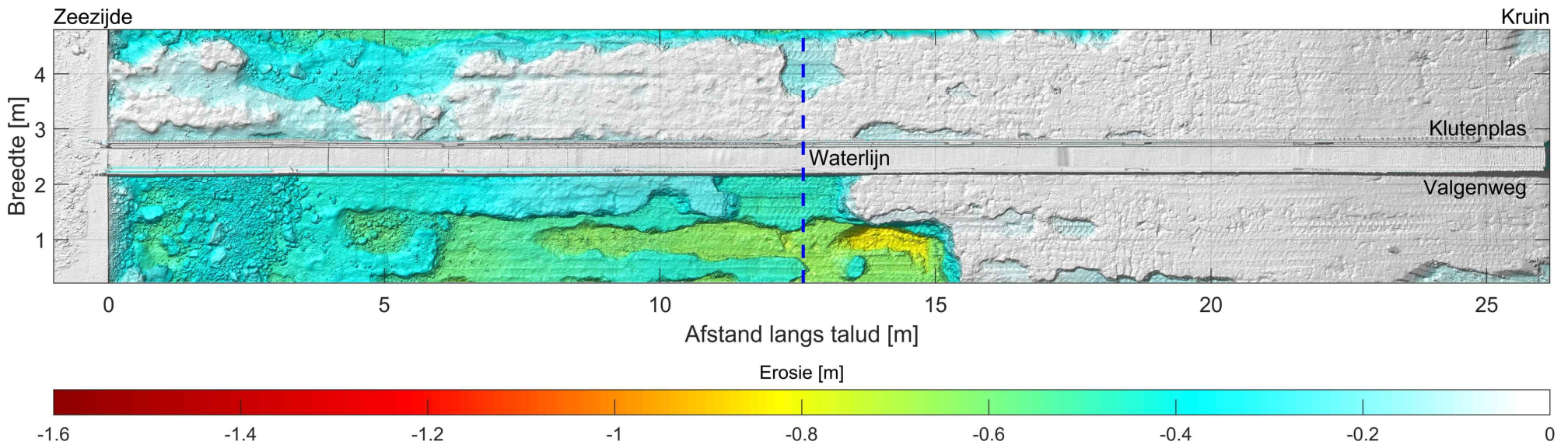


Figuur A.12 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_07

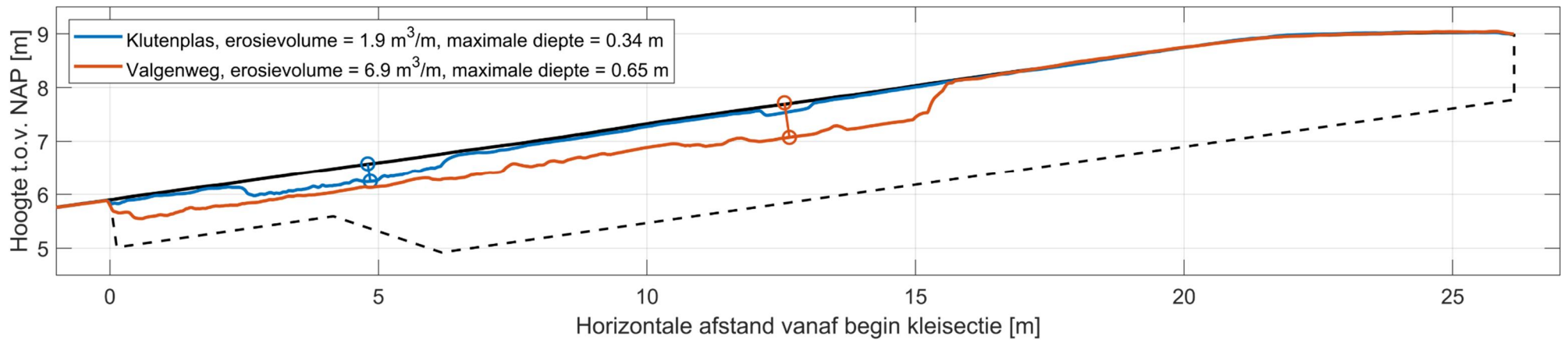


Figuur A.13 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

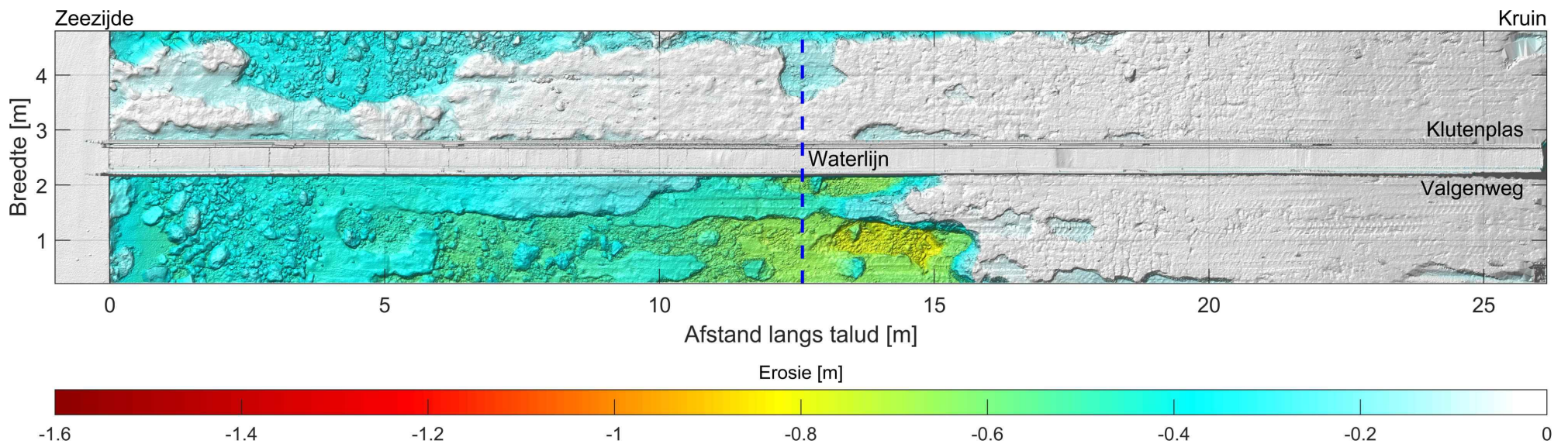


Figuur A.14 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_08

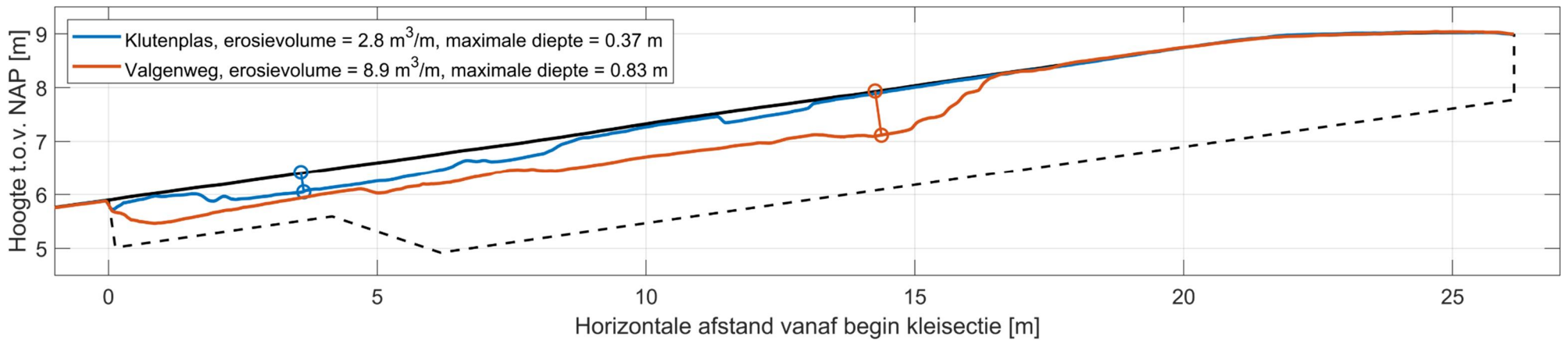


Figuur A.15 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

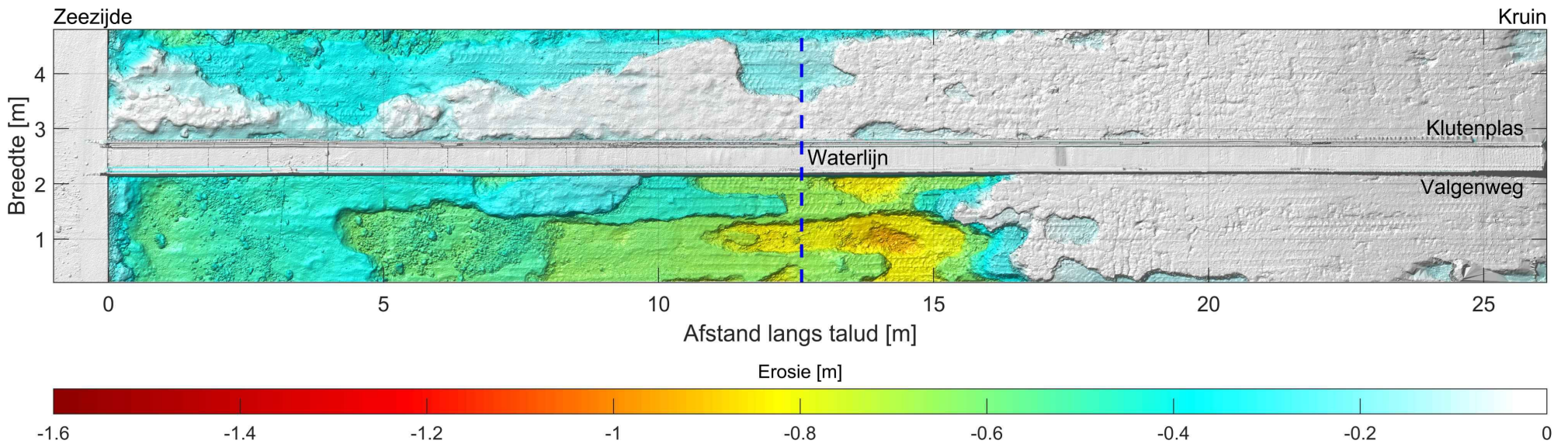


Figuur A.16 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_09

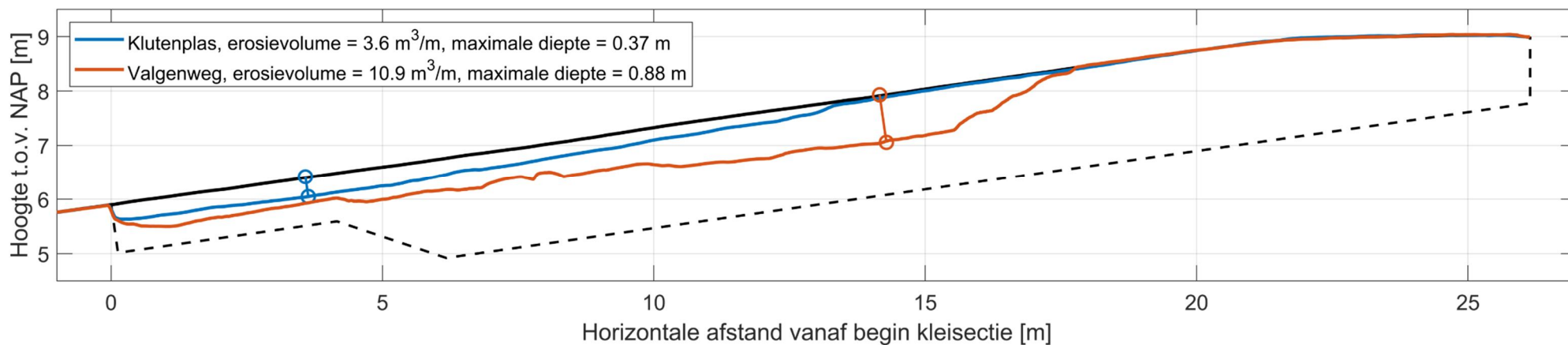


Figuur A.17 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

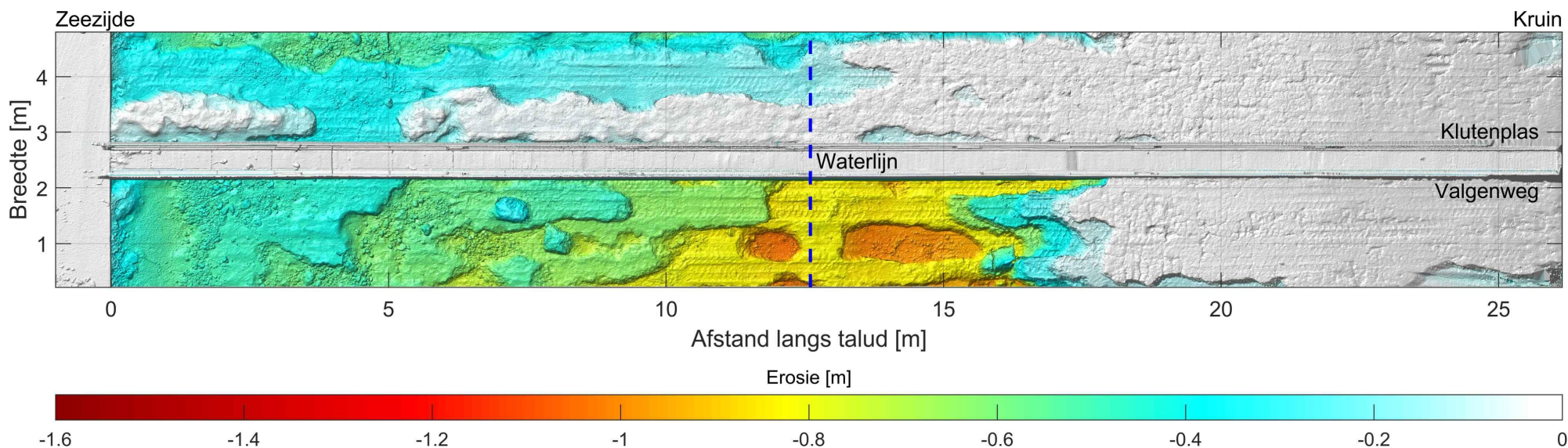


Figuur A.18 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_10

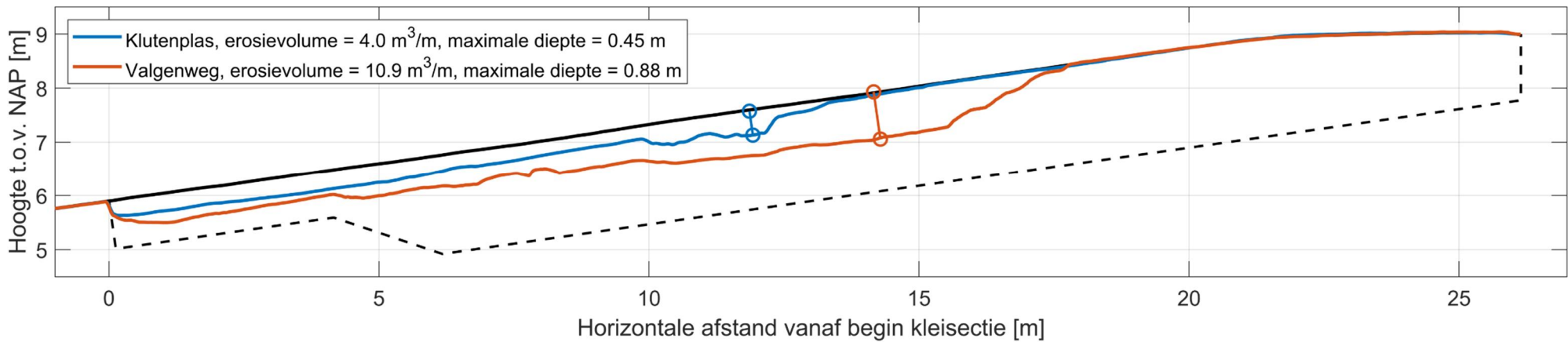


Figuur A.19 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

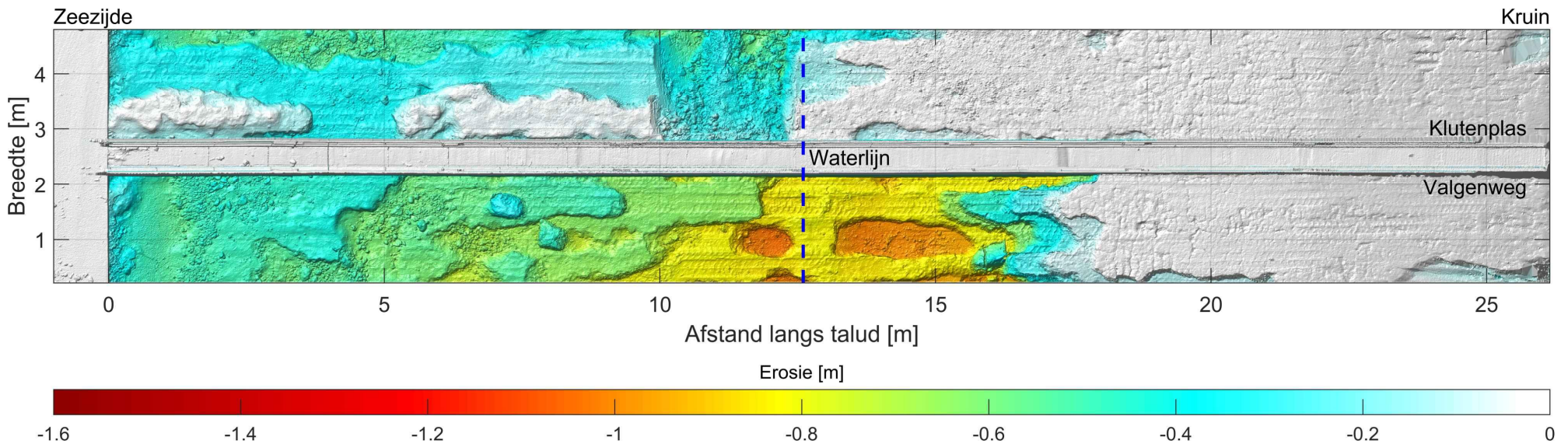


Figuur A.20 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_10, gat gemaakt aan Klutenplas zijde

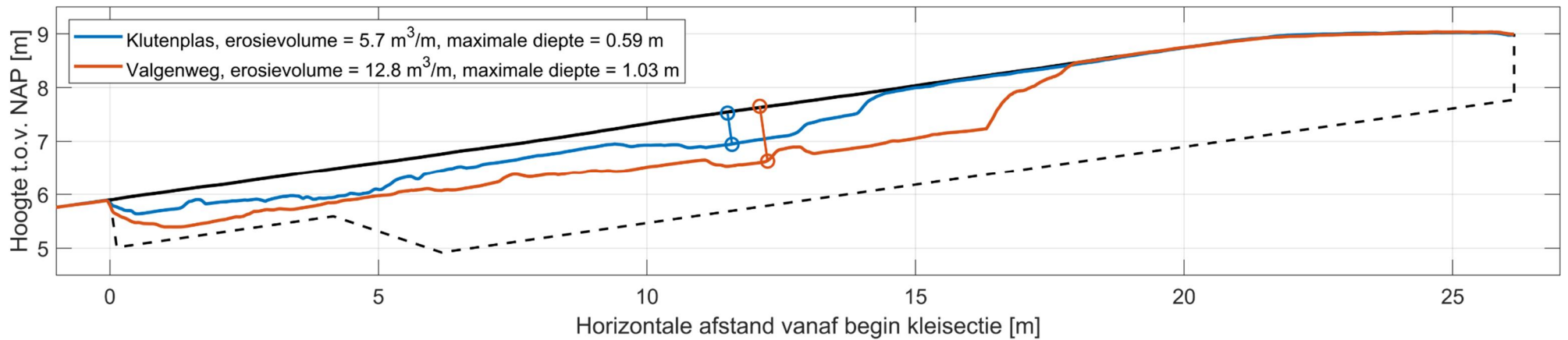


Figuur A.21 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

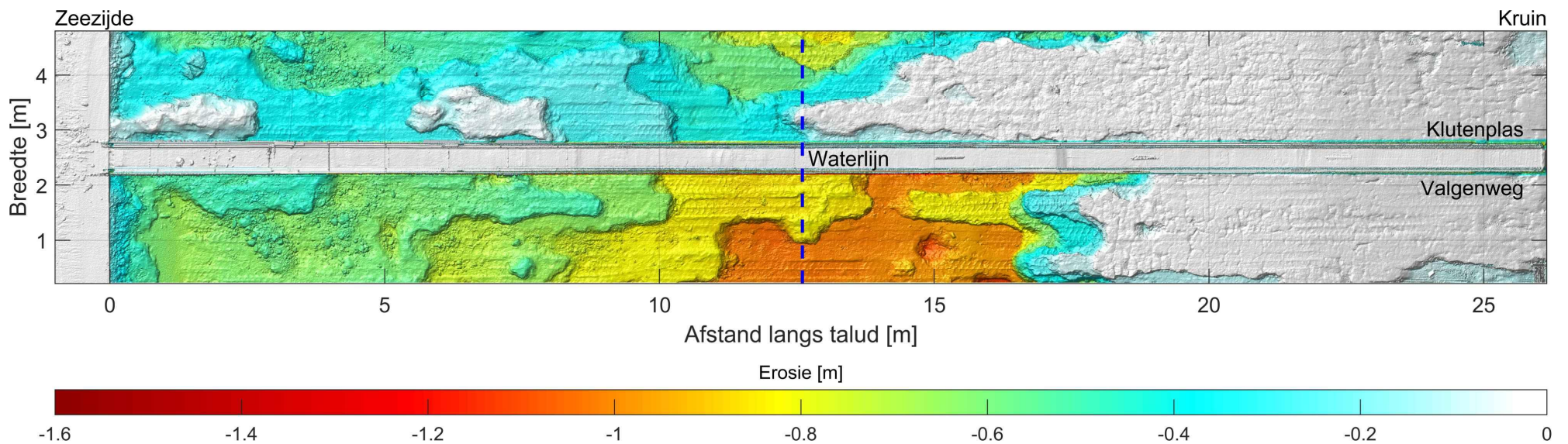


Figuur A.22 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_11

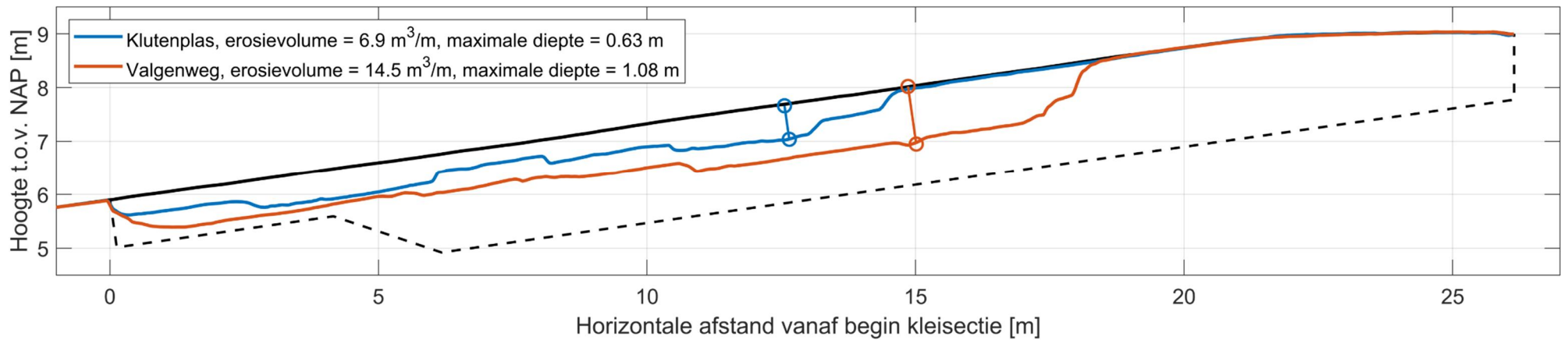


Figuur A.23 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

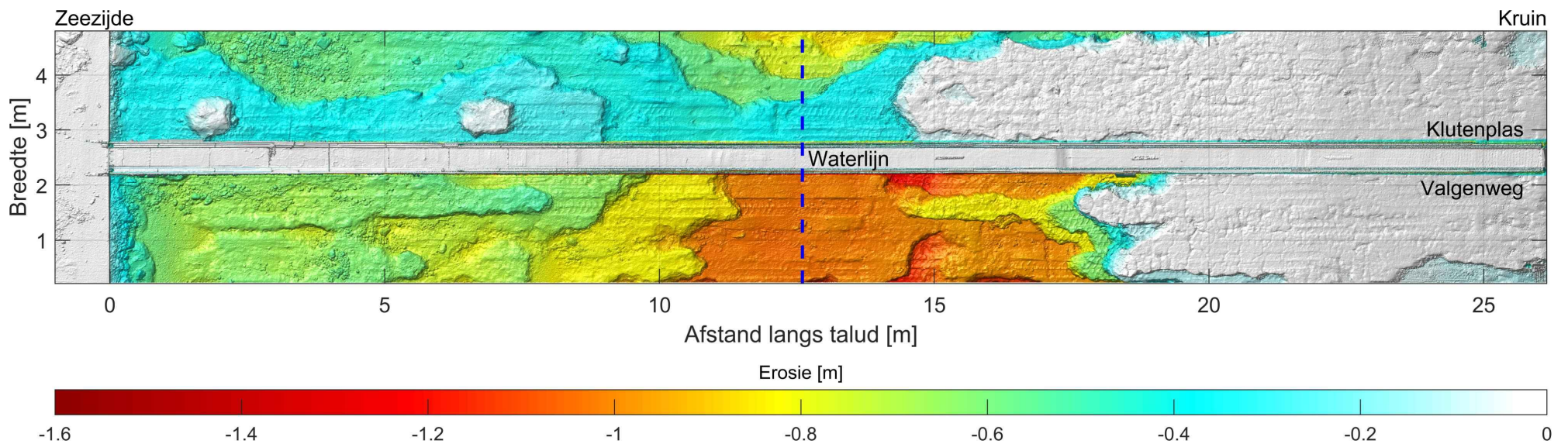


Figuur A.24 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_12

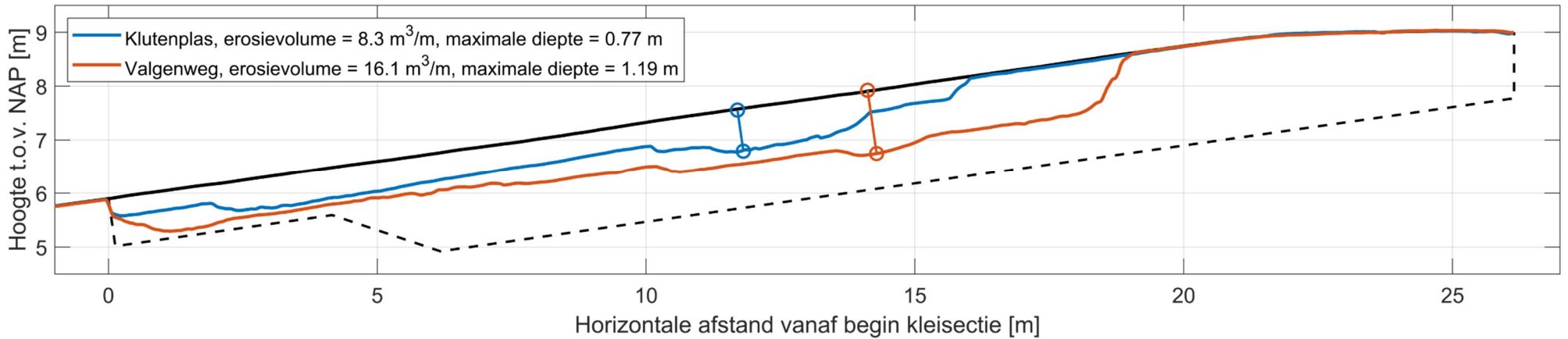


Figuur A.25 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

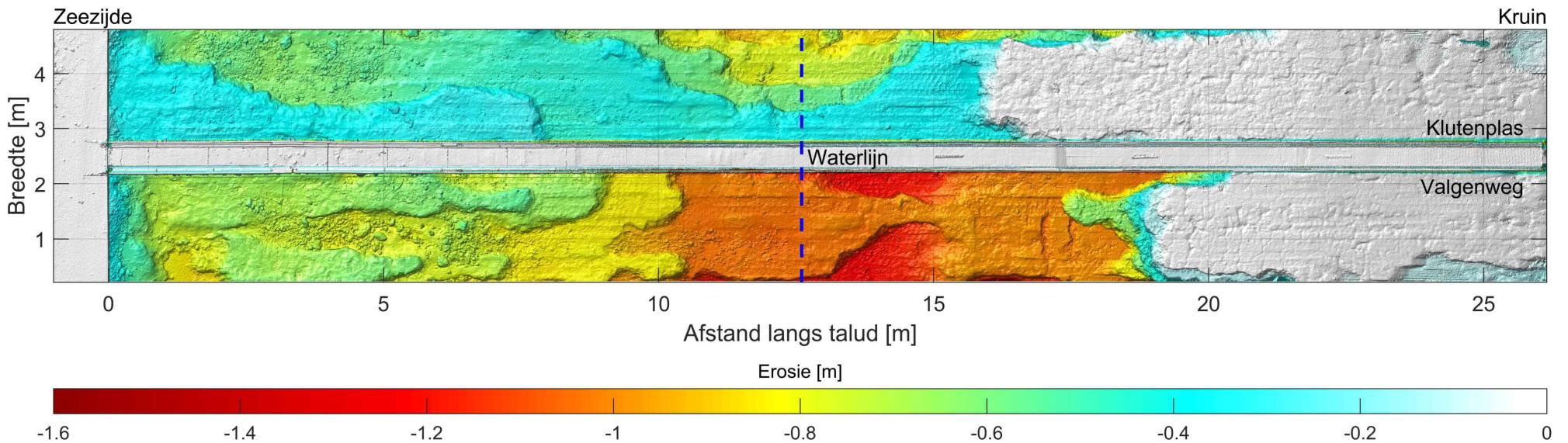


Figuur A.26 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_13

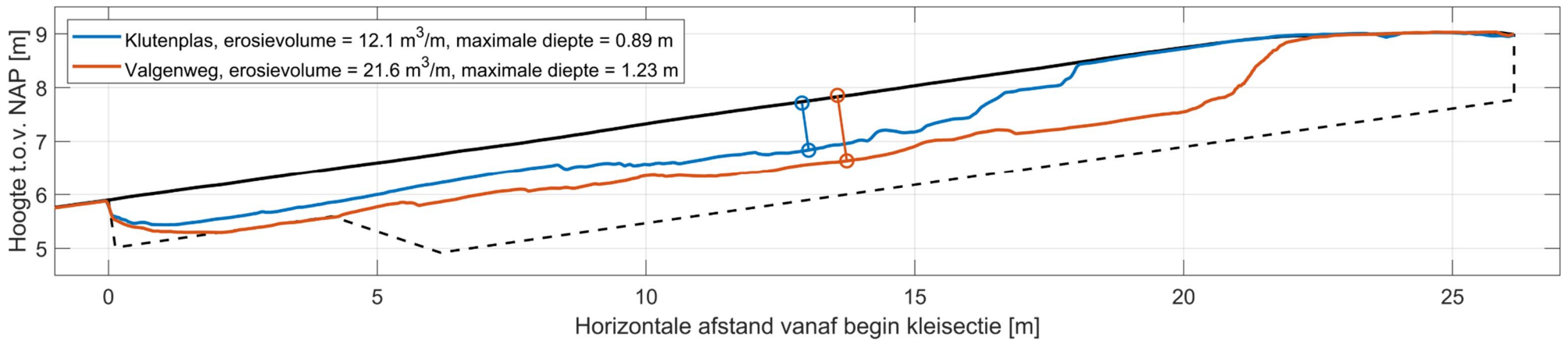


Figuur A.27 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

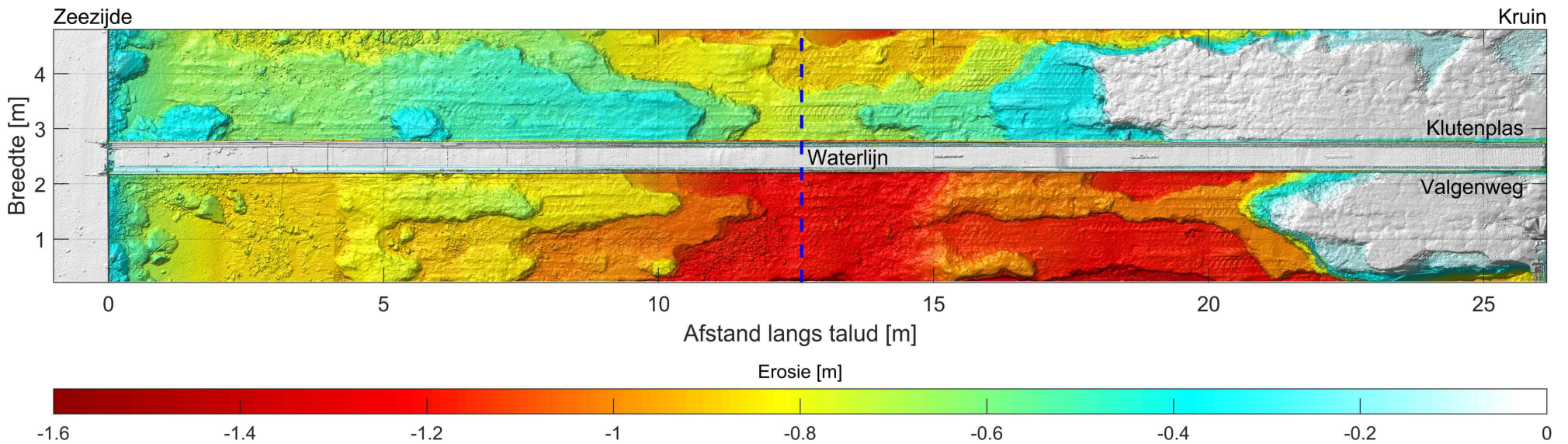


Figuur A.28 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_14

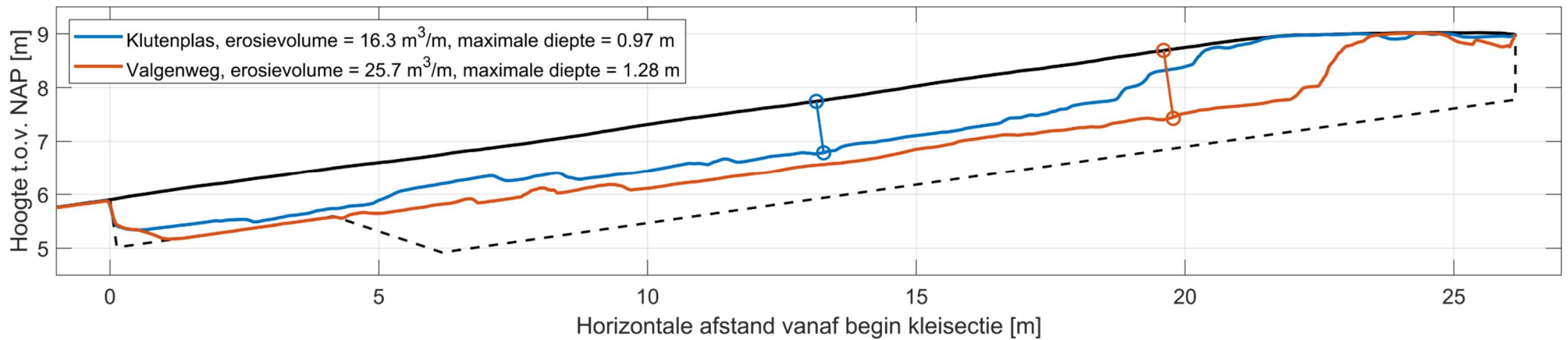


Figuur A.29 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

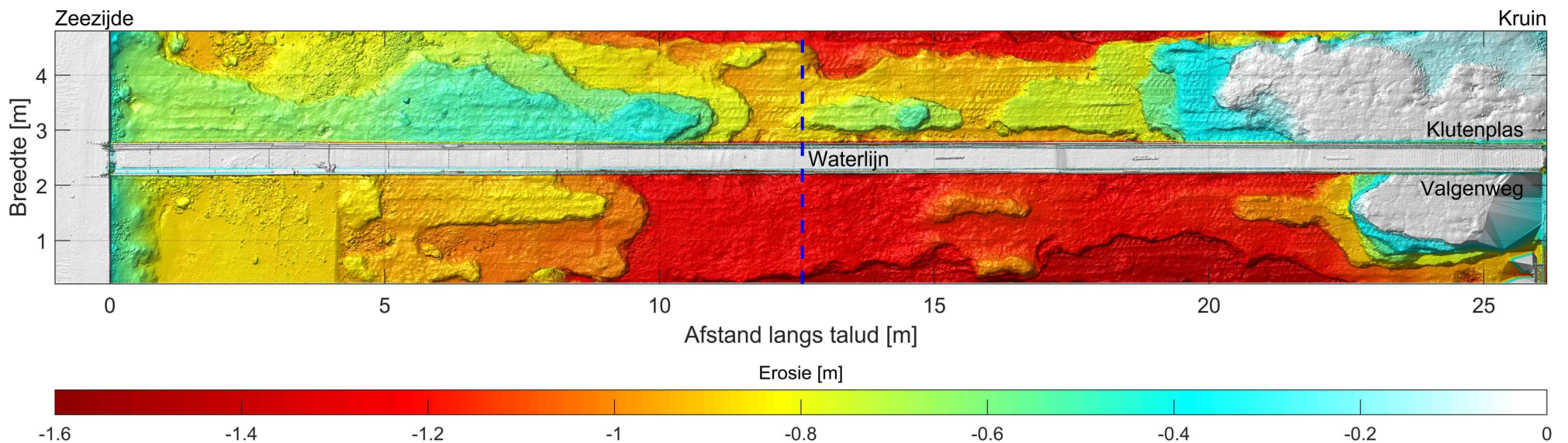


Figuur A.30 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B1_16

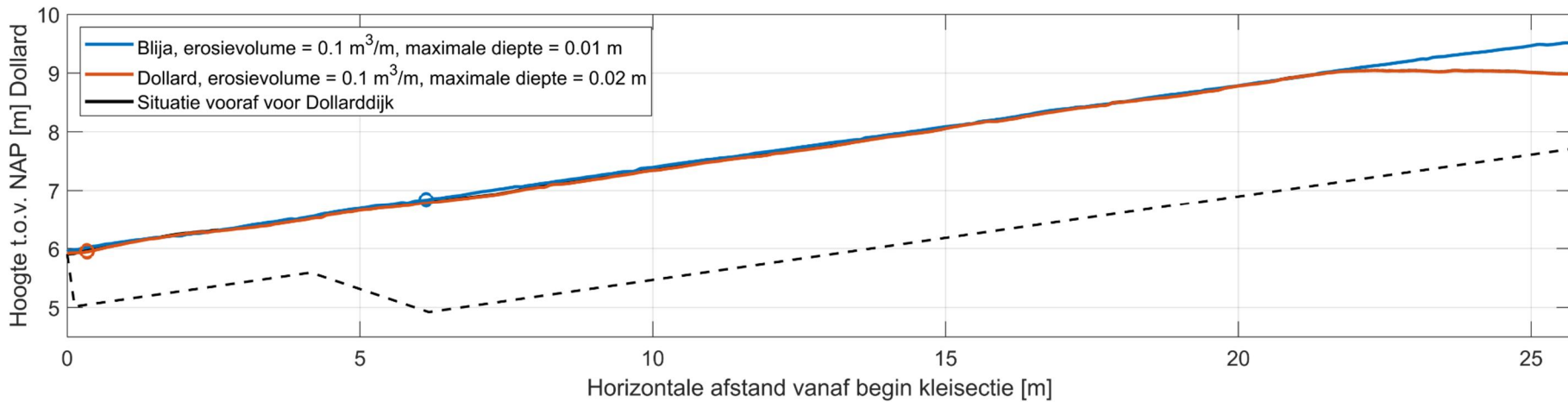


Figuur A.31 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de Klutenplas en Valgenweg. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

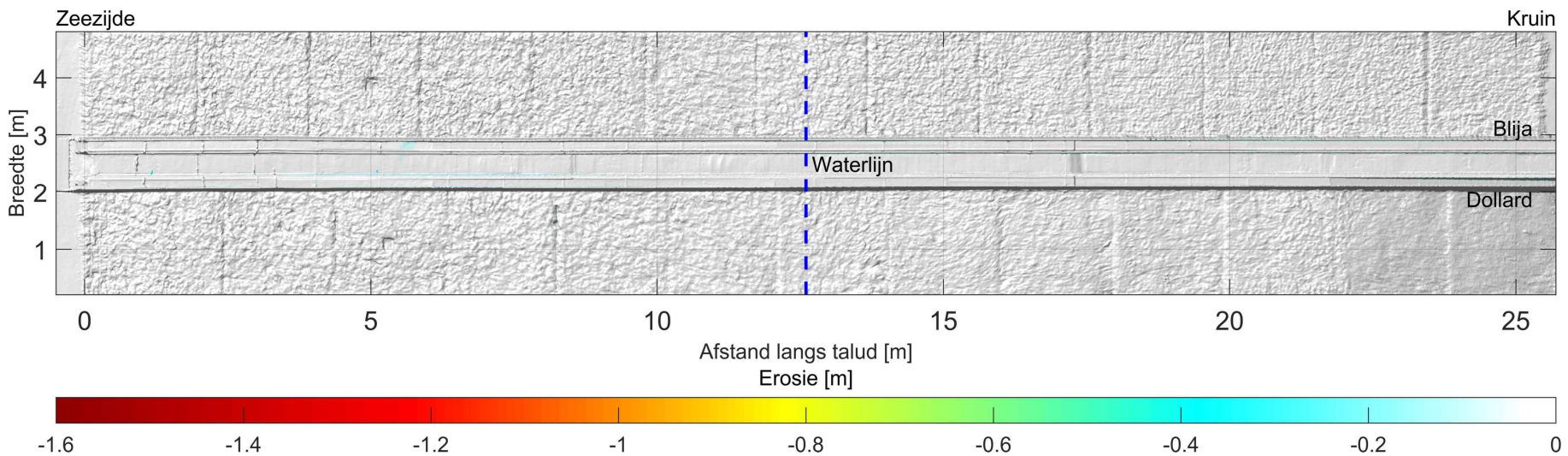


Figuur A.32 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de Klutenplas (boven) en Valgenweg (onder) klei.

Na Test B2_02

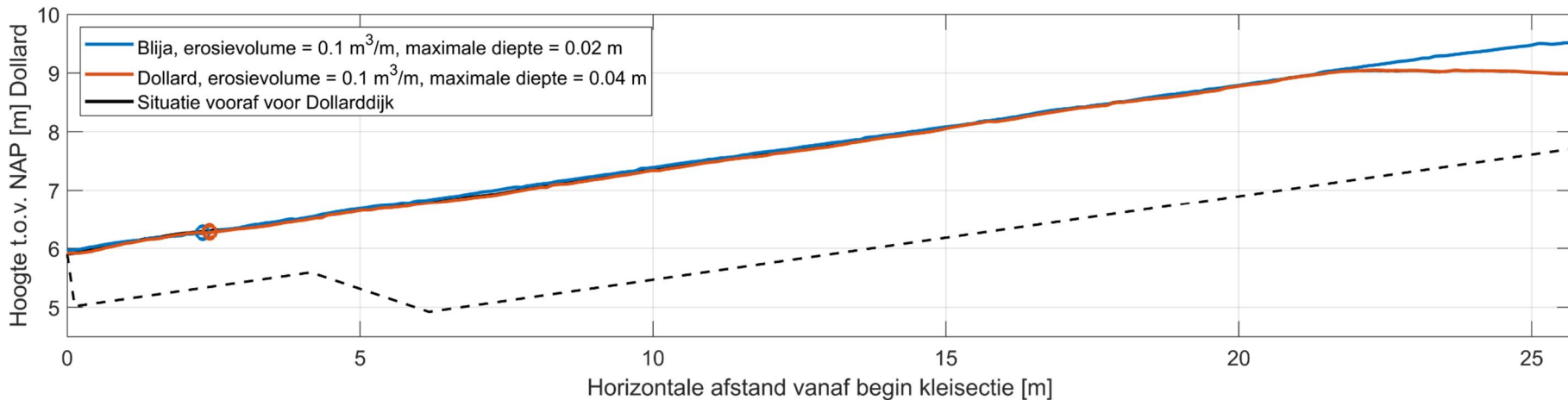


Figuur A.33 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

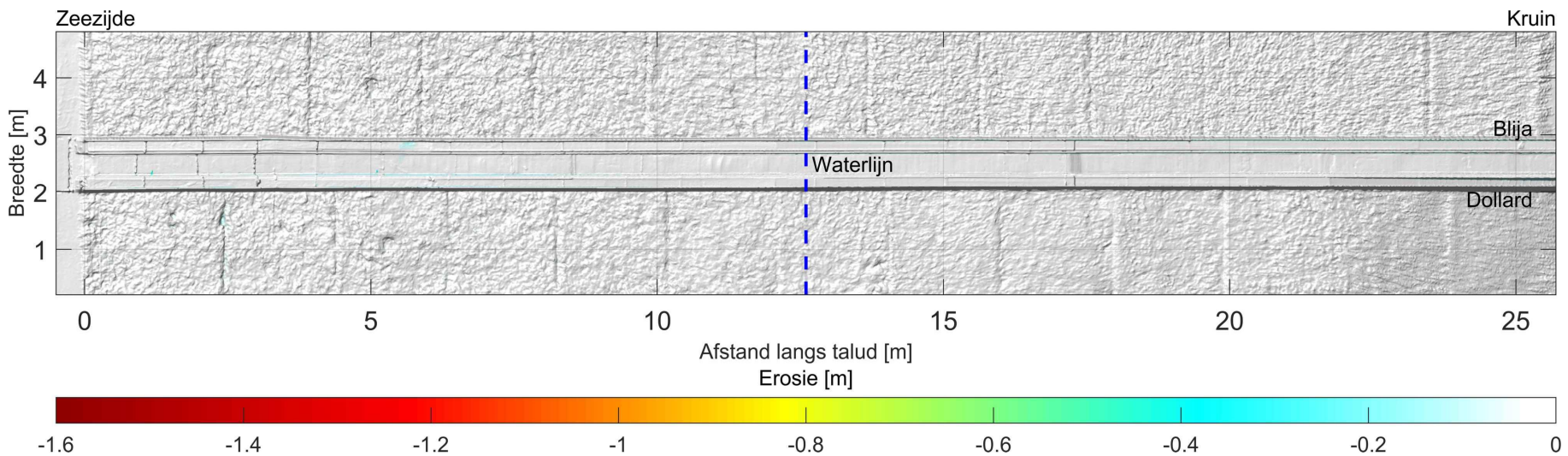


Figuur A.34 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_04

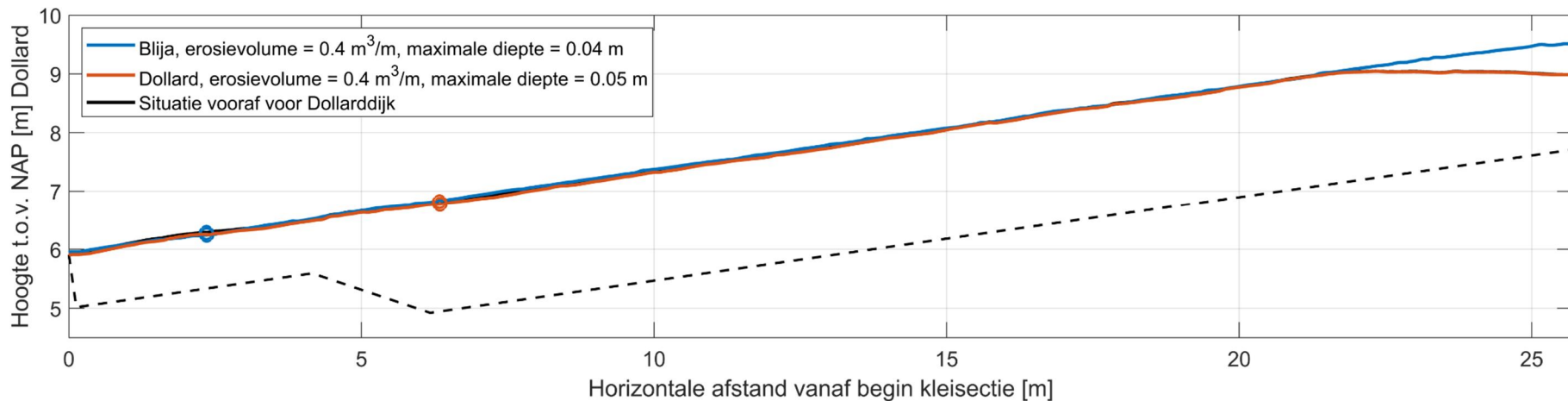


Figuur A.35 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

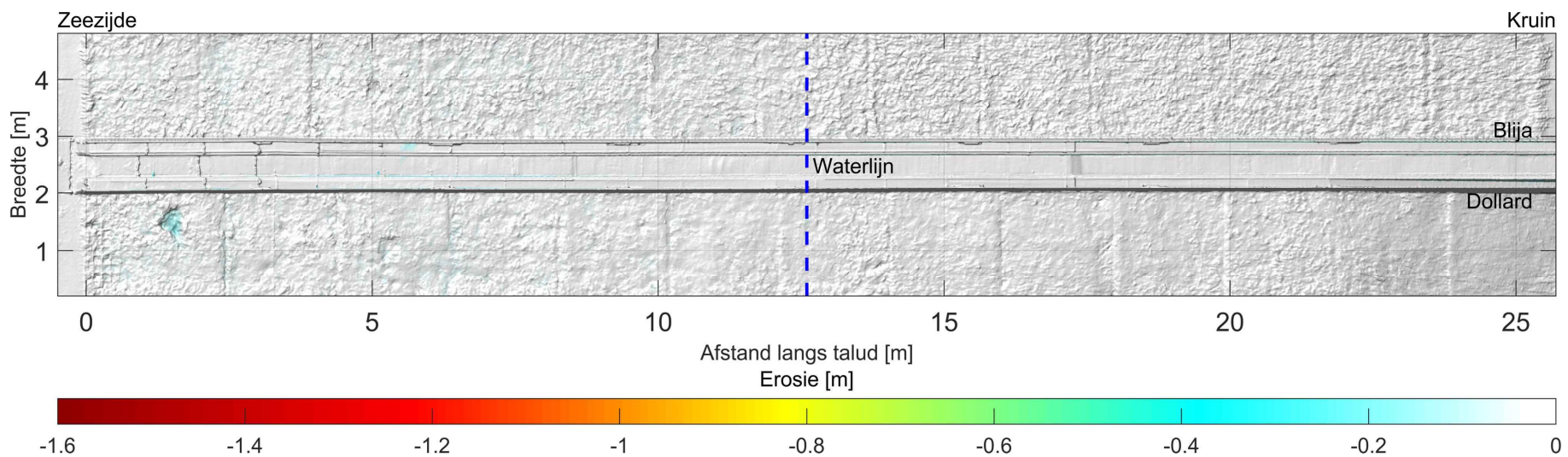


Figuur A.36 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_05

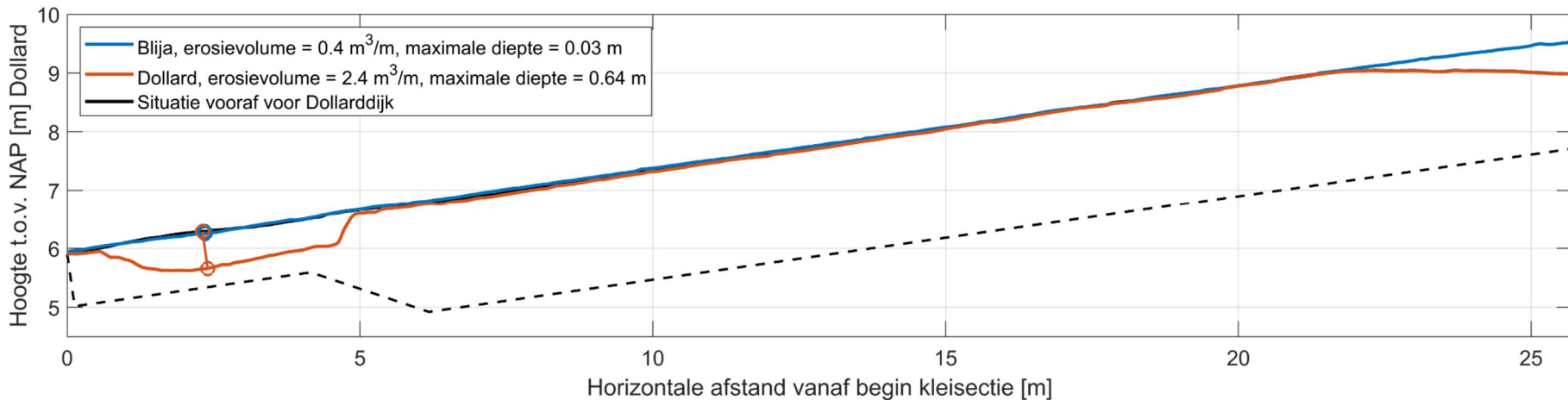


Figuur A.37 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

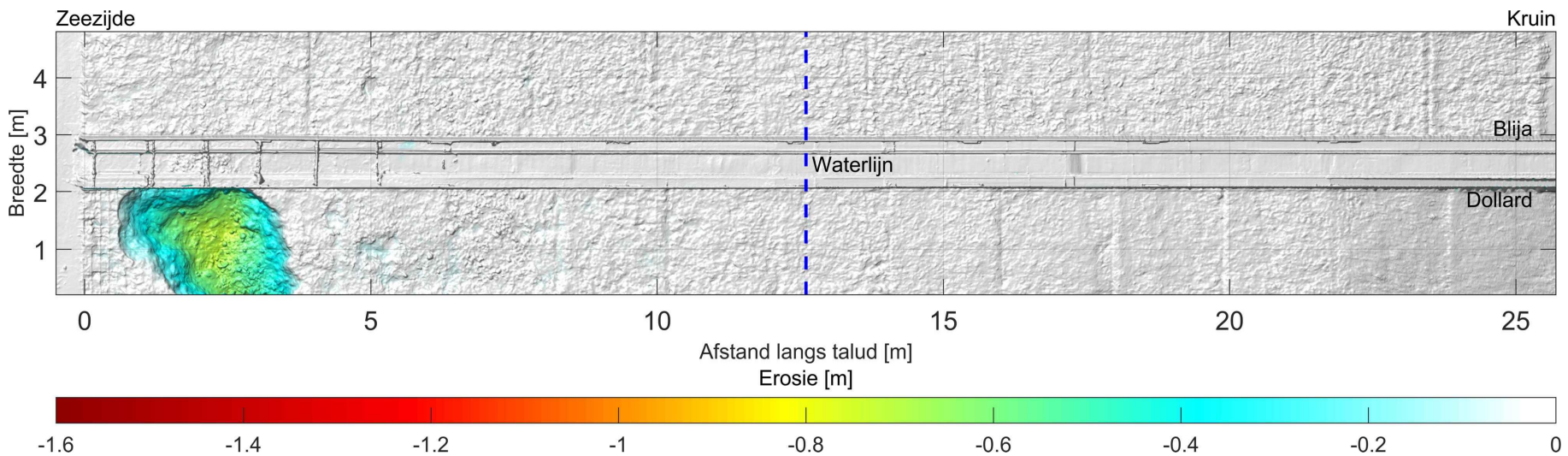


Figuur A.38 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_06

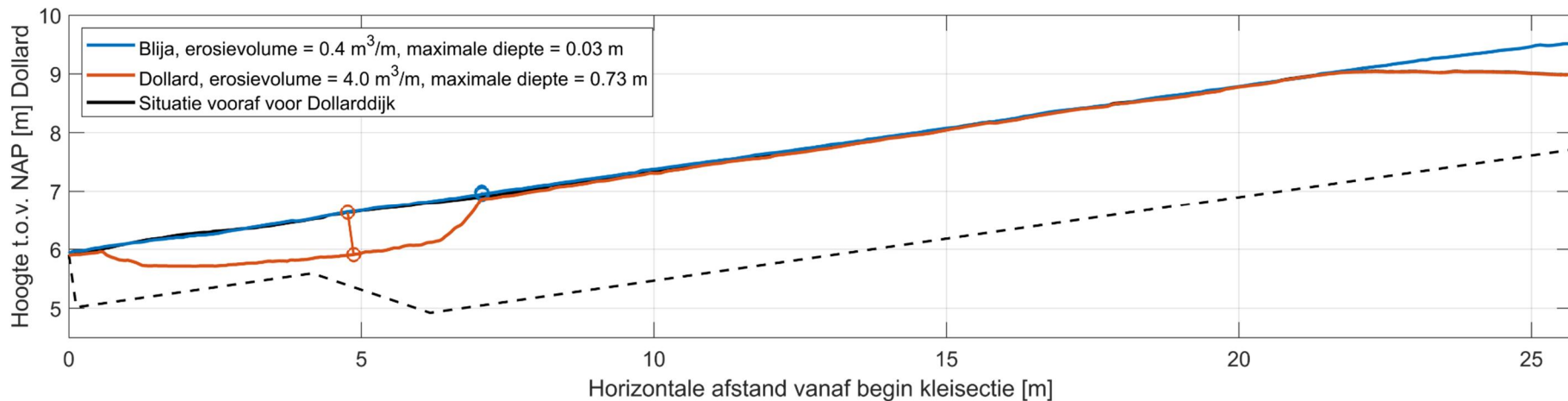


Figuur A.39 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

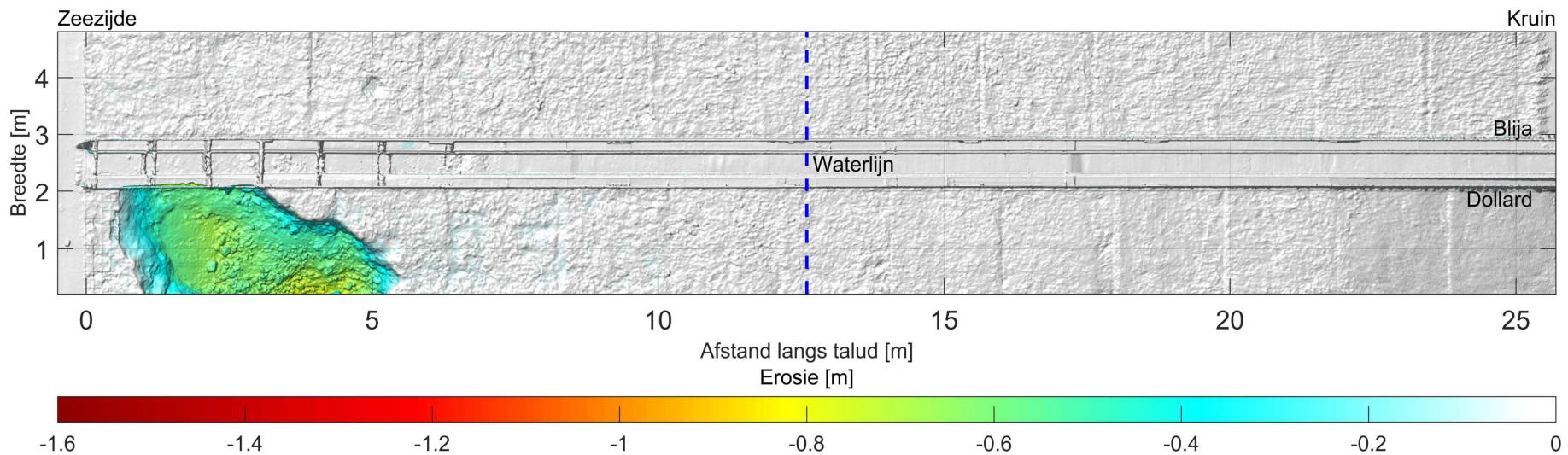


Figuur A.40 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_07

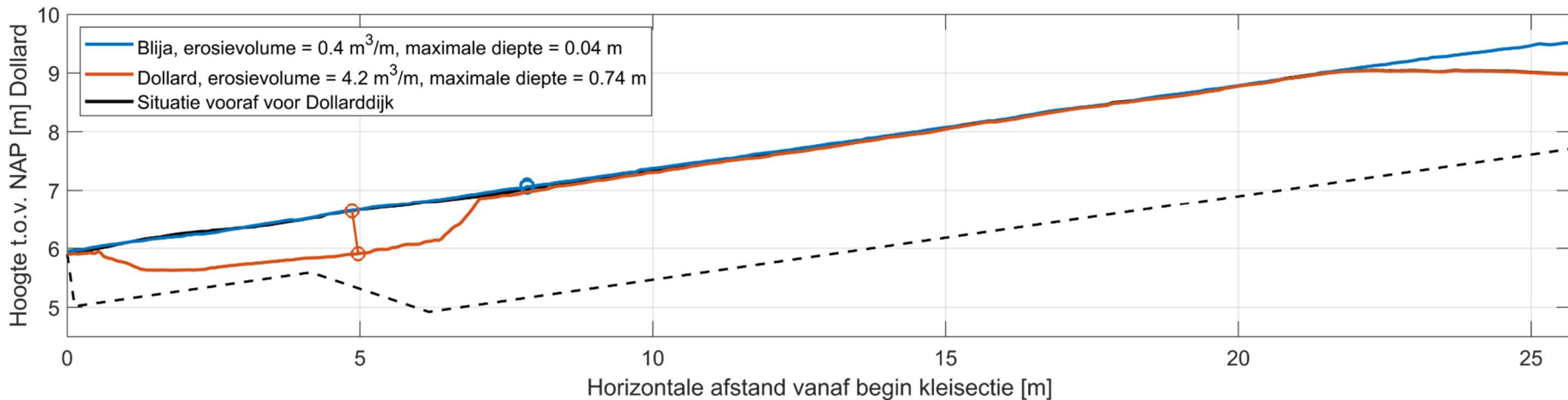


Figuur A.41 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

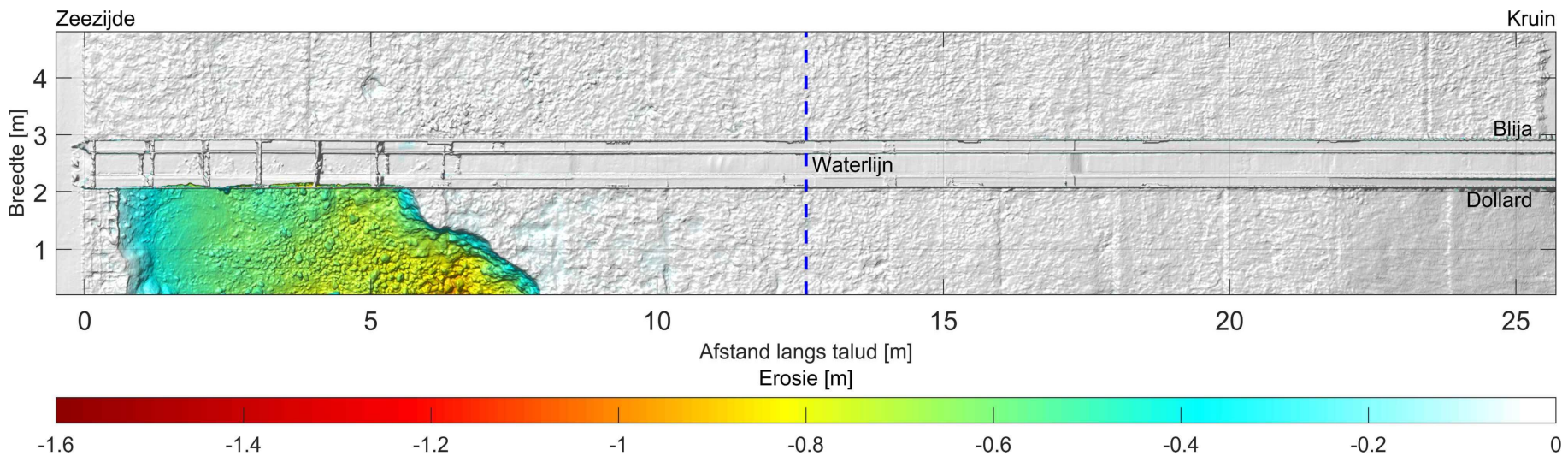


Figuur A.42 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_08

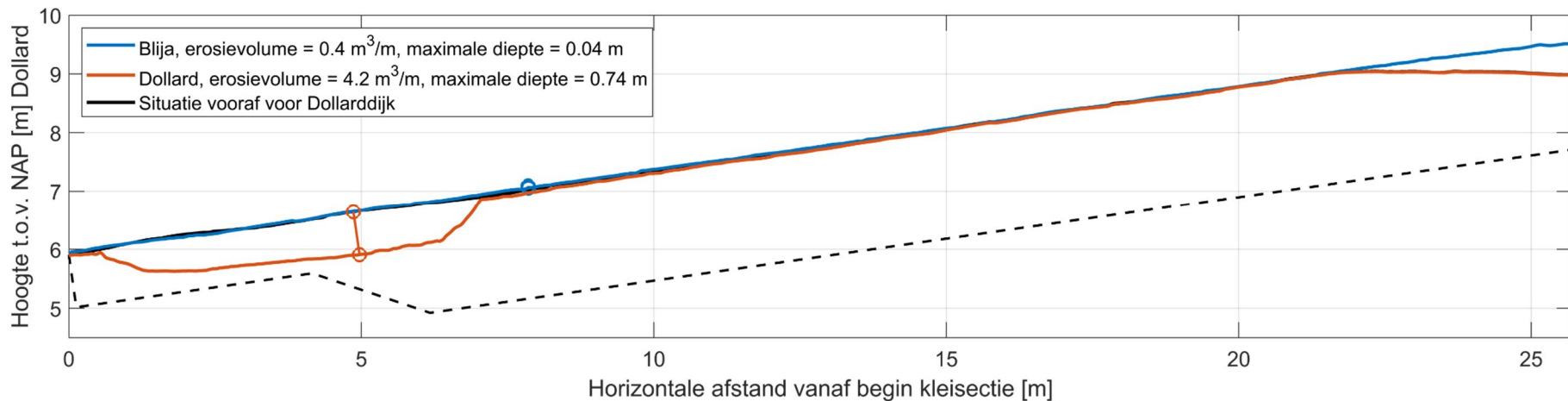


Figuur A.43 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

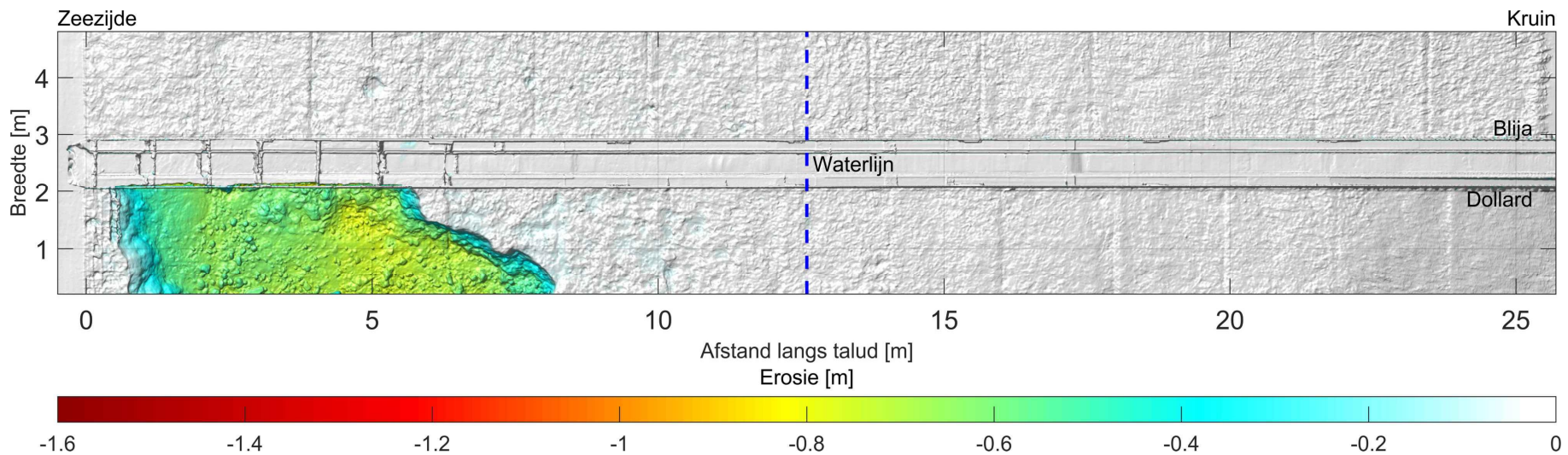


Figuur A.44 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_09

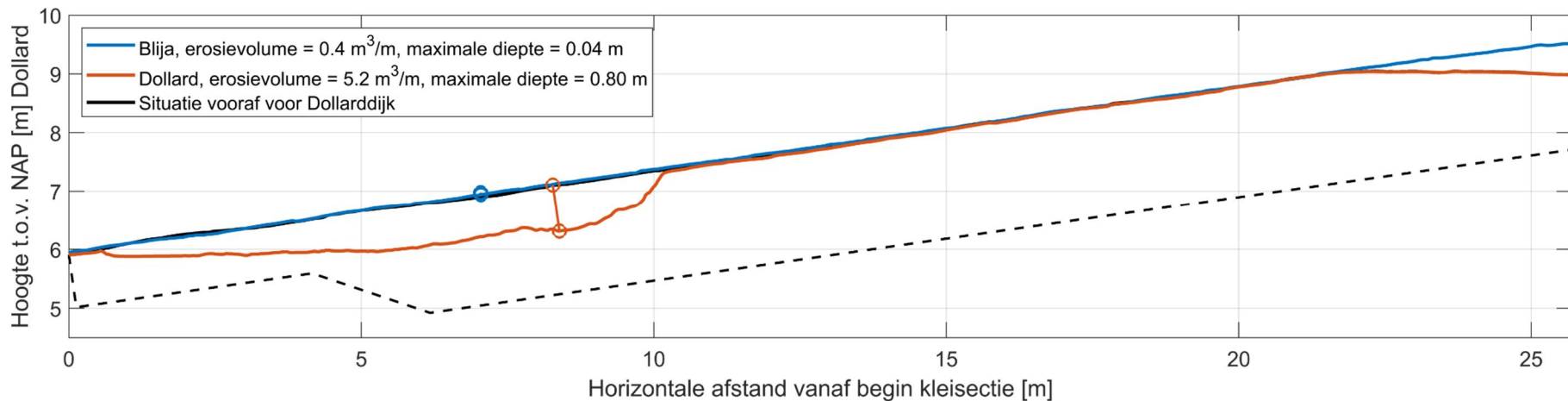


Figuur A.45 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

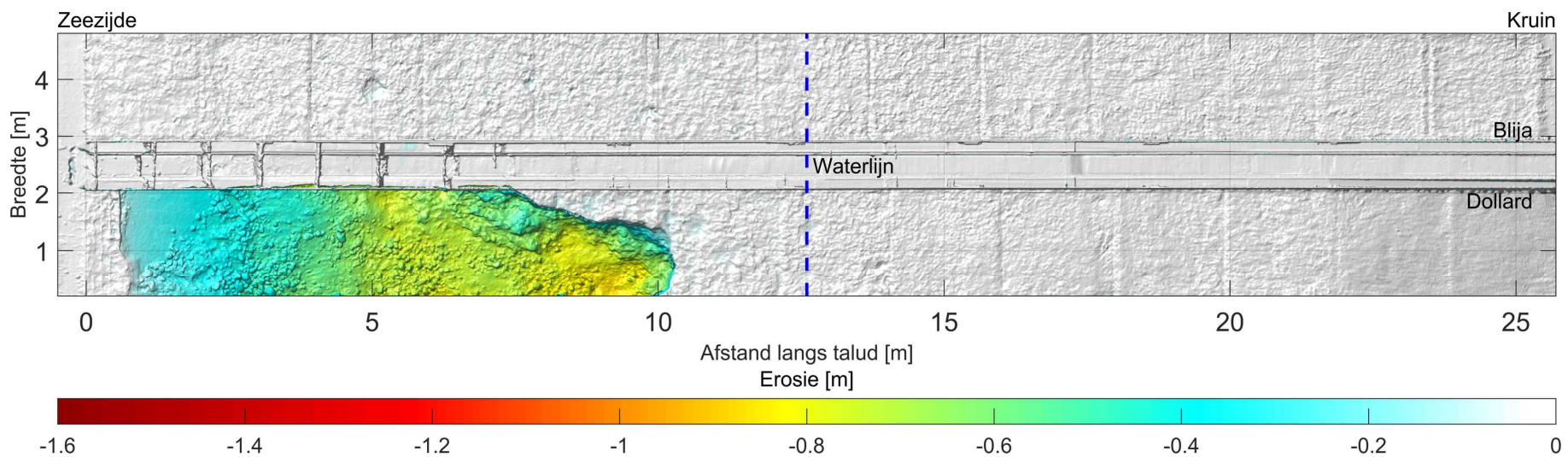


Figuur A.46 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_10

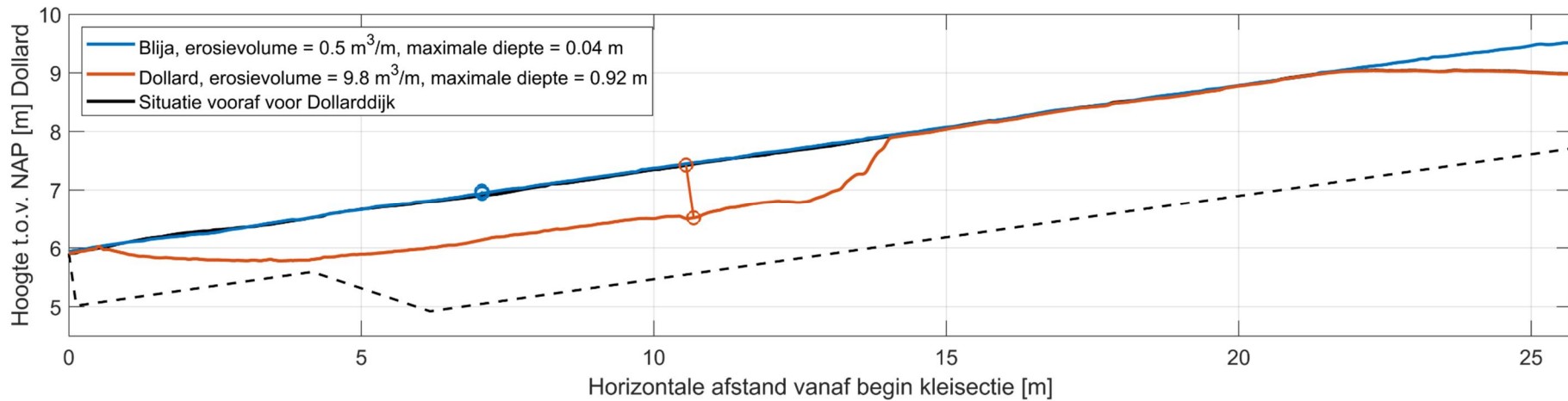


Figuur A.47 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

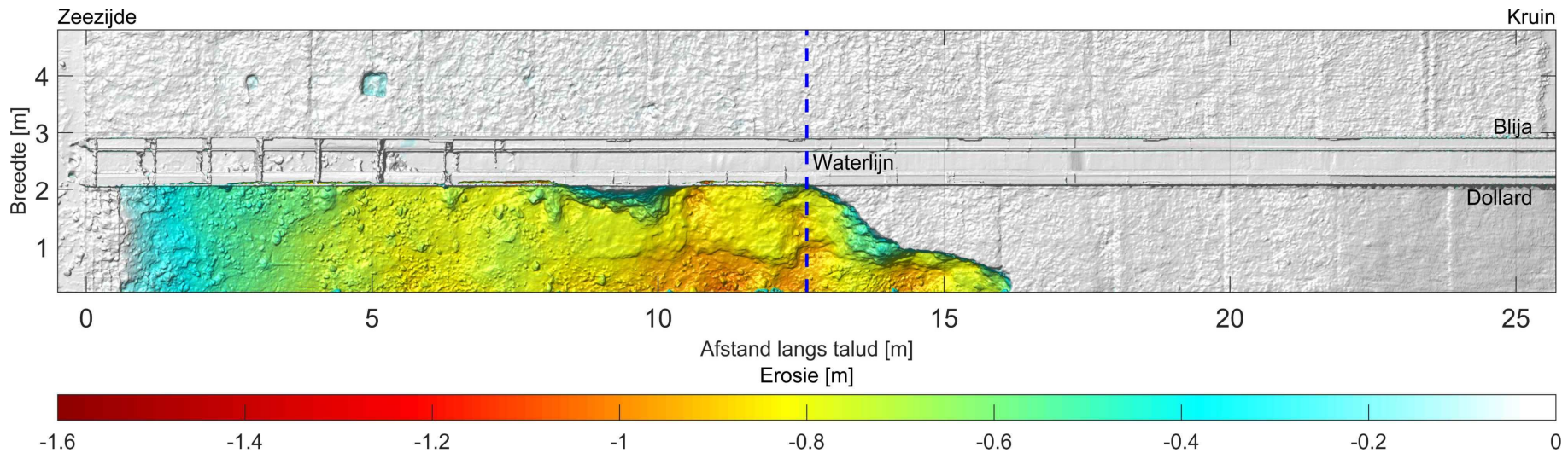


Figuur A.48 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_11

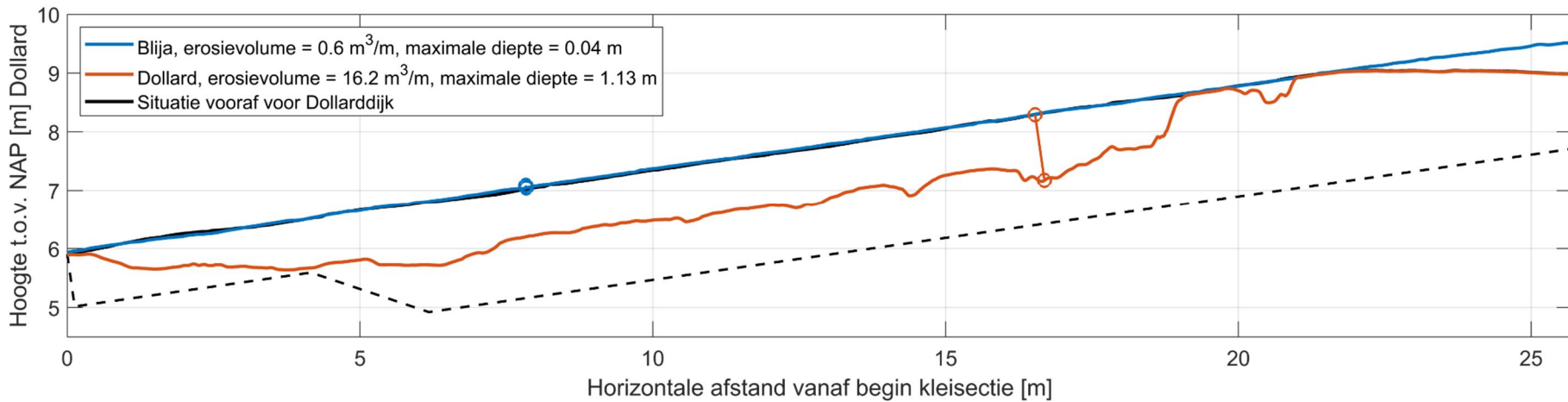


Figuur A.49 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

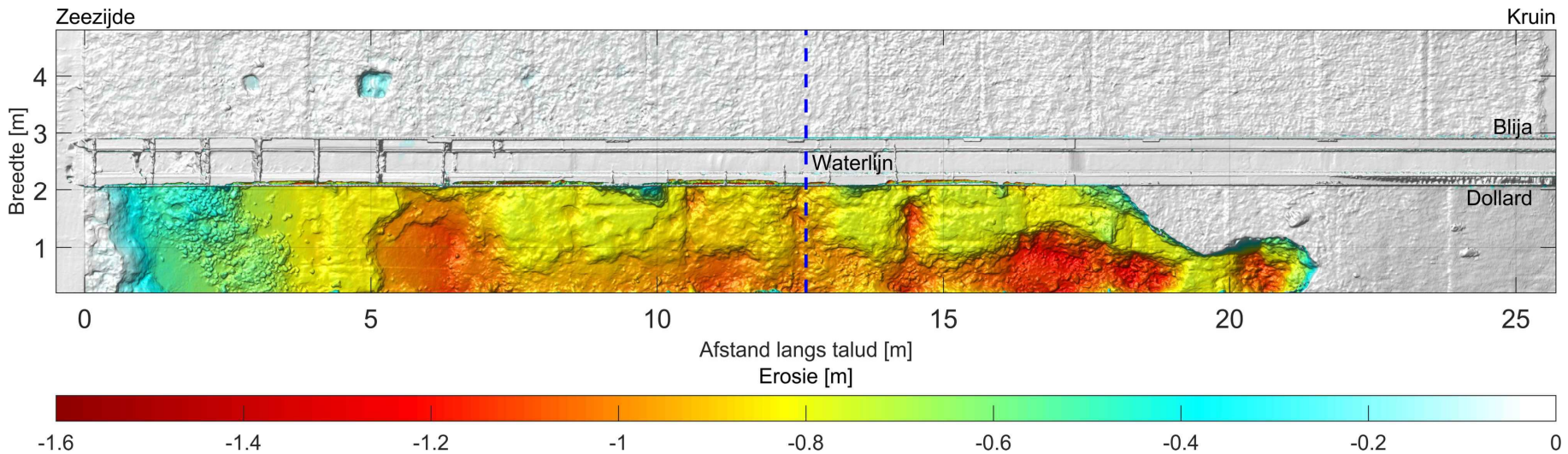


Figuur A.50 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_12

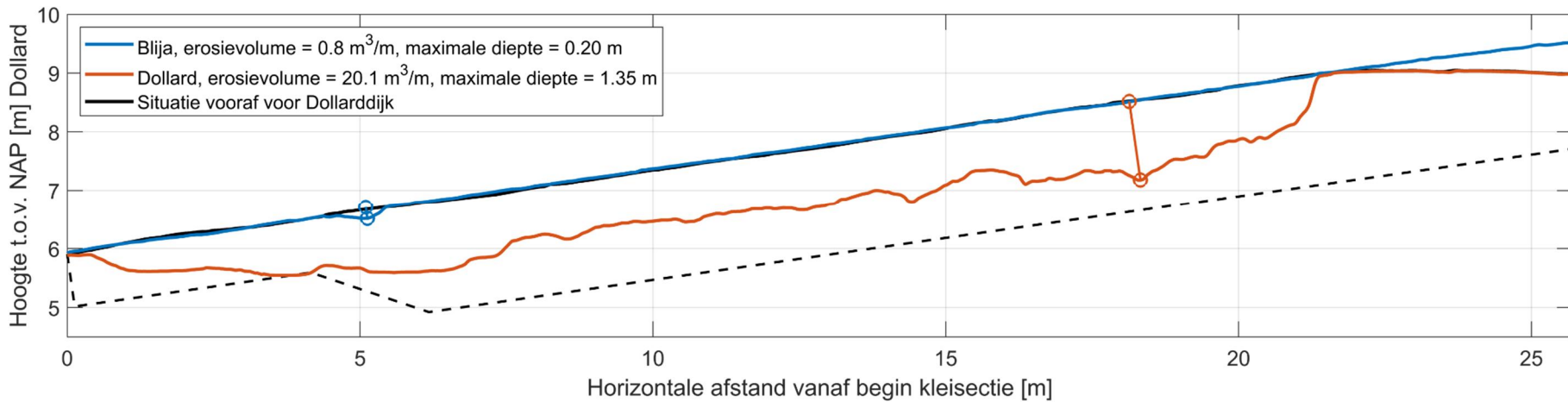


Figuur A.51 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

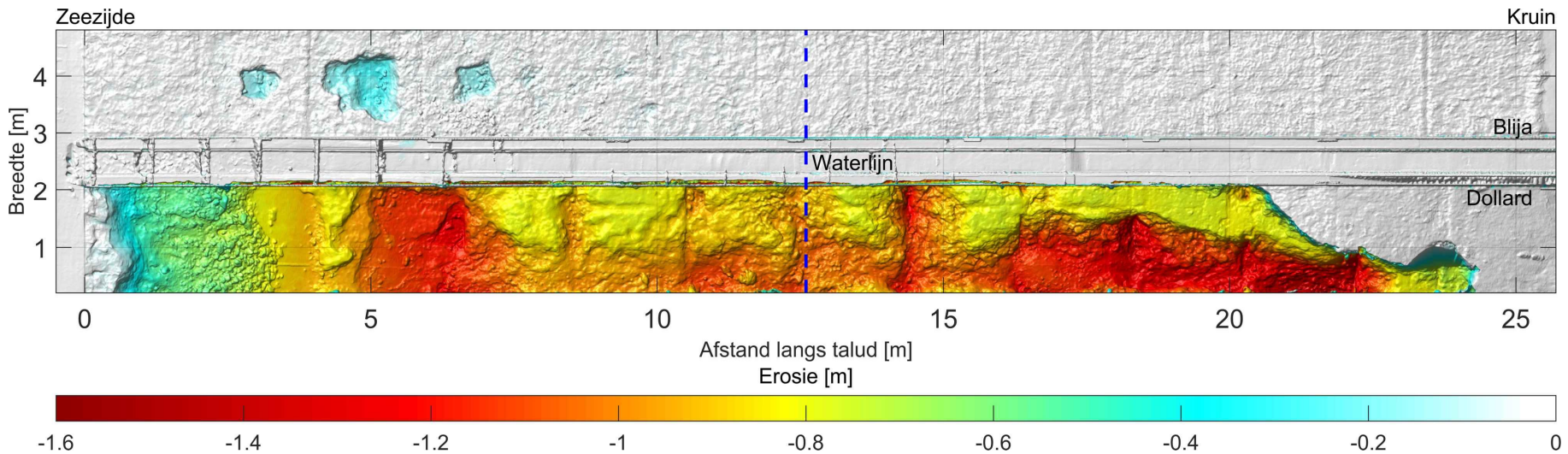


Figuur A.52 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_13

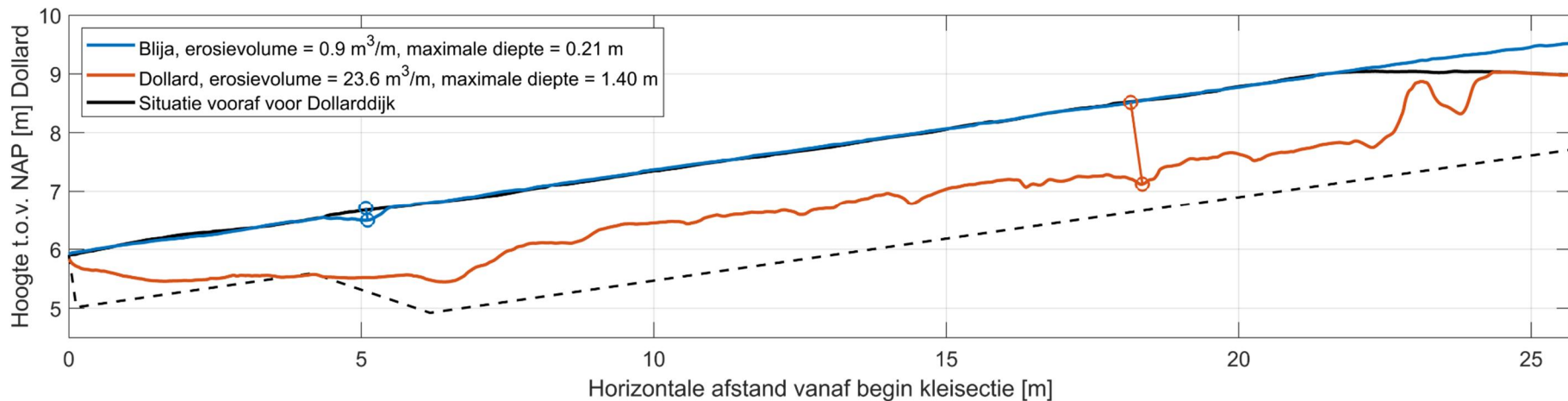


Figuur A.53 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

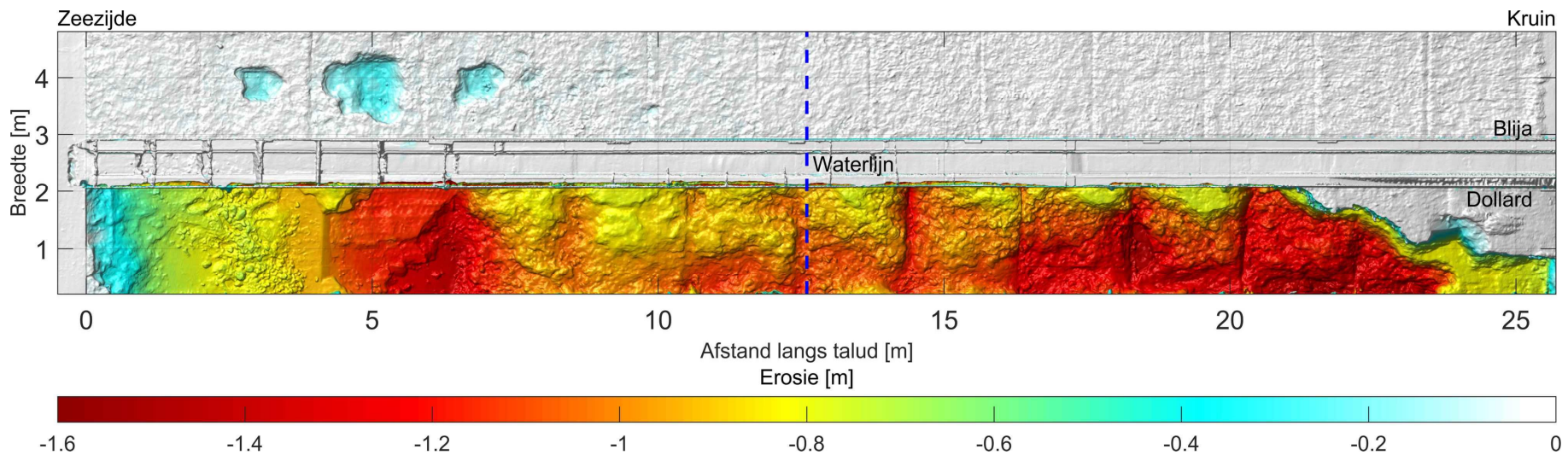


Figuur A.54 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_14

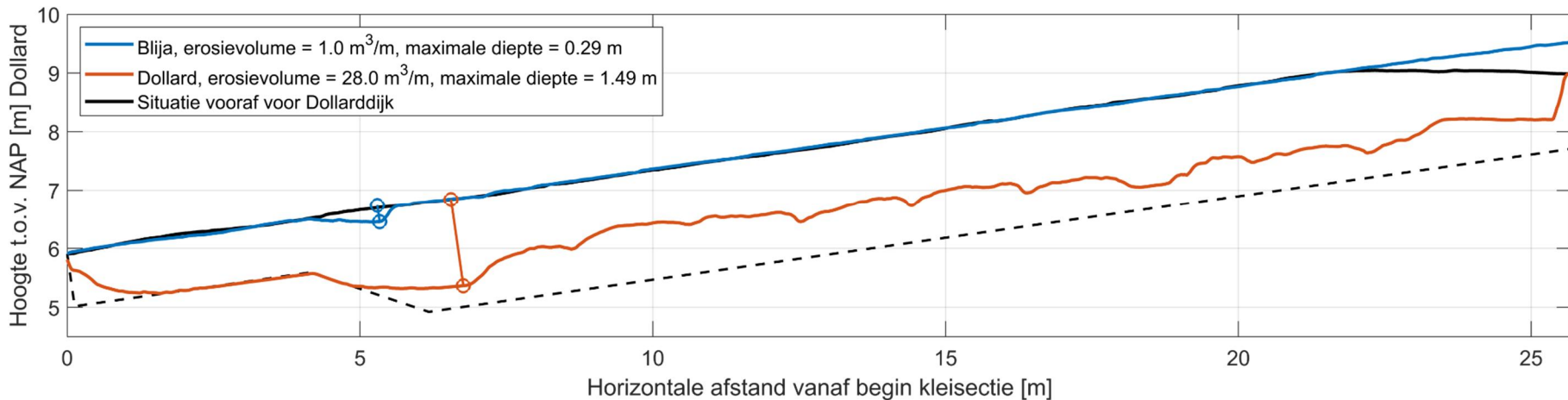


Figuur A.55 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

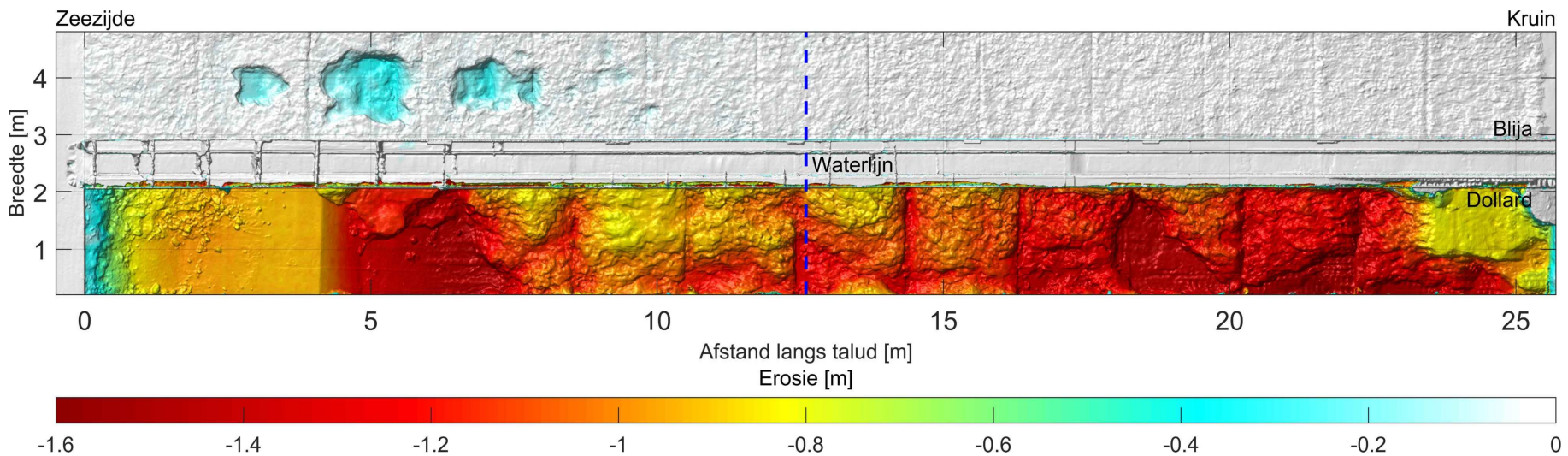


Figuur A.56 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_15

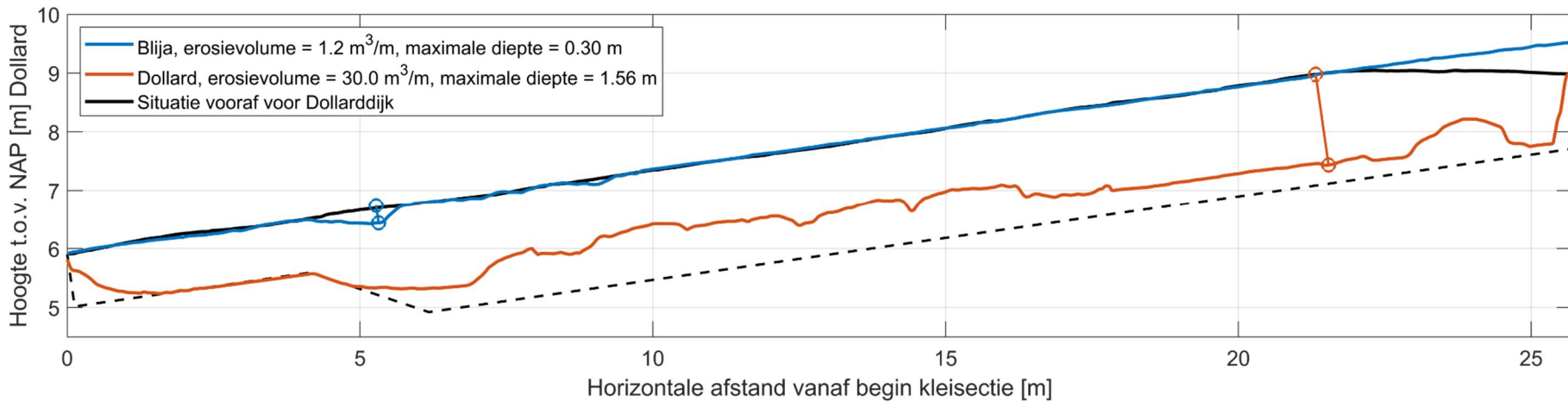


Figuur A.57 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

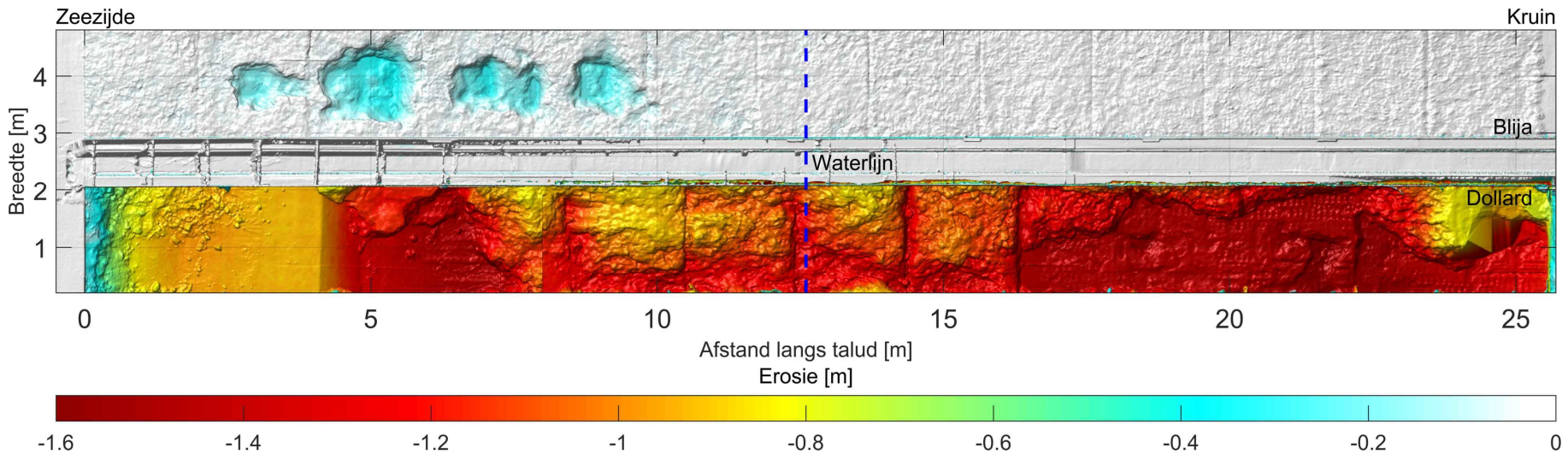


Figuur A.58 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_16

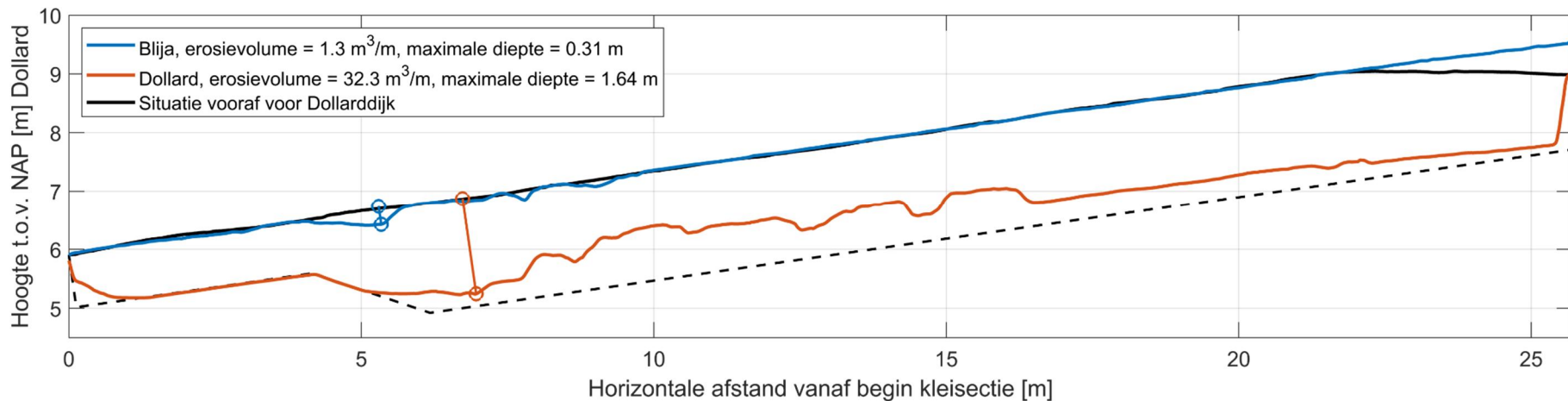


Figuur A.59 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.

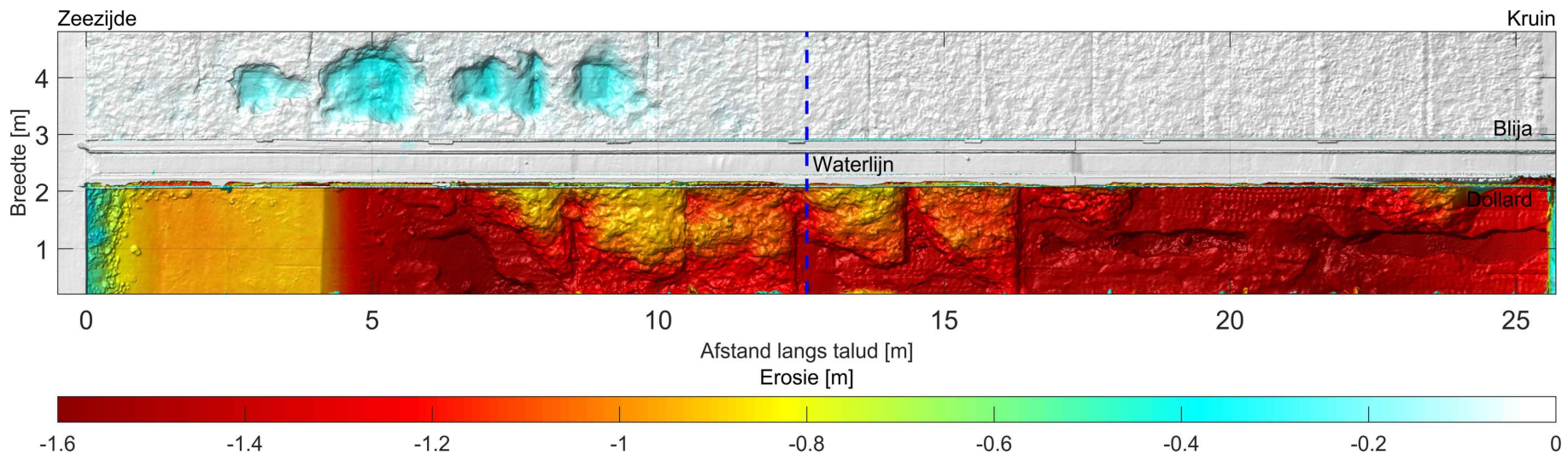


Figuur A.60 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

Na Test B2_17



Figuur A.61 Representatieve mediane dwarsdoorsnede met locatie maximale diepte in de klei van de dijk bij Blija en de Dollarddijk. De legenda geeft het erosievolume en maximale erosiediepte.



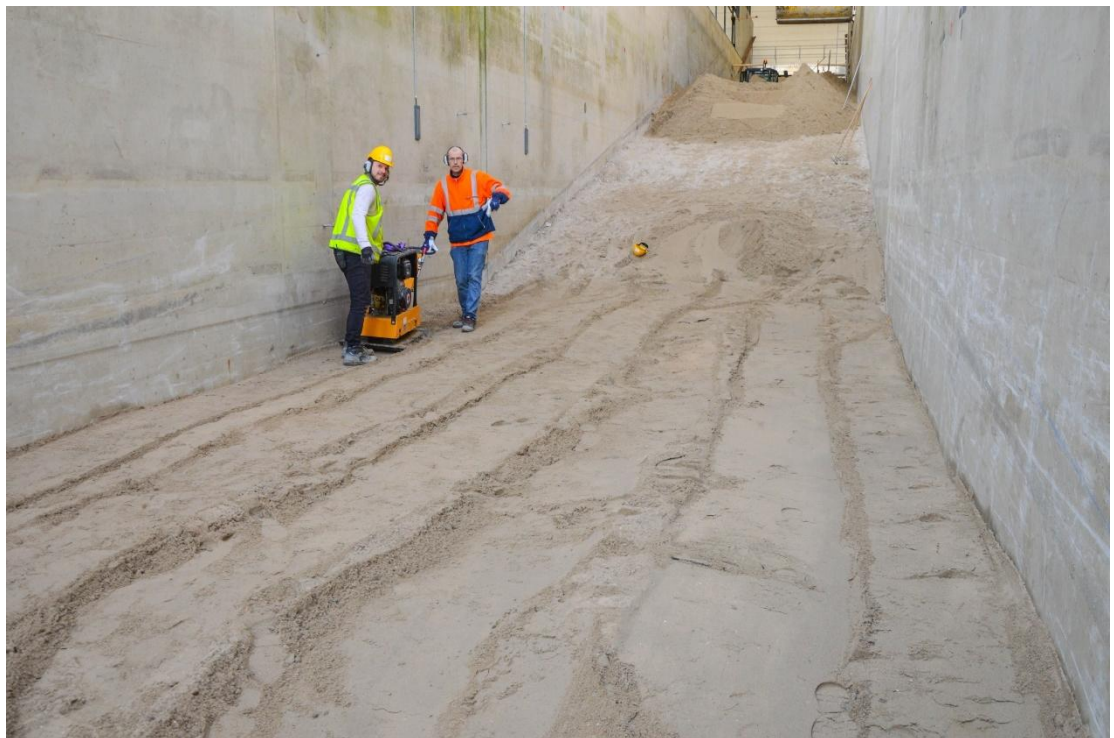
Figuur A.62 Bovenaanzicht met gemeten erosiedieptes (loodrecht op het talud) voor de klei van de dijk bij Blija (boven) en de Dollarddijk (onder).

B Foto's

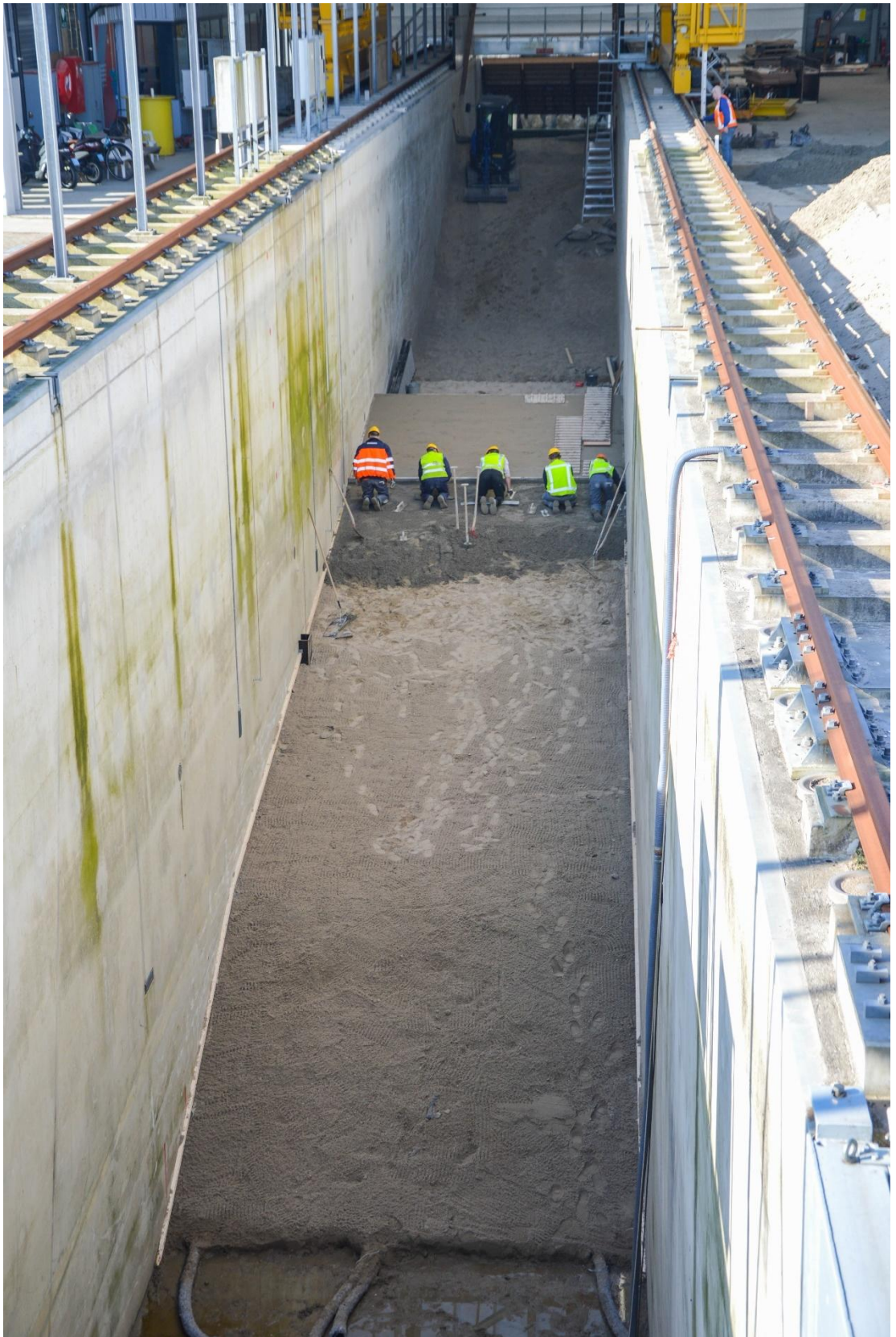
B.1 Opbouw modelopstelling



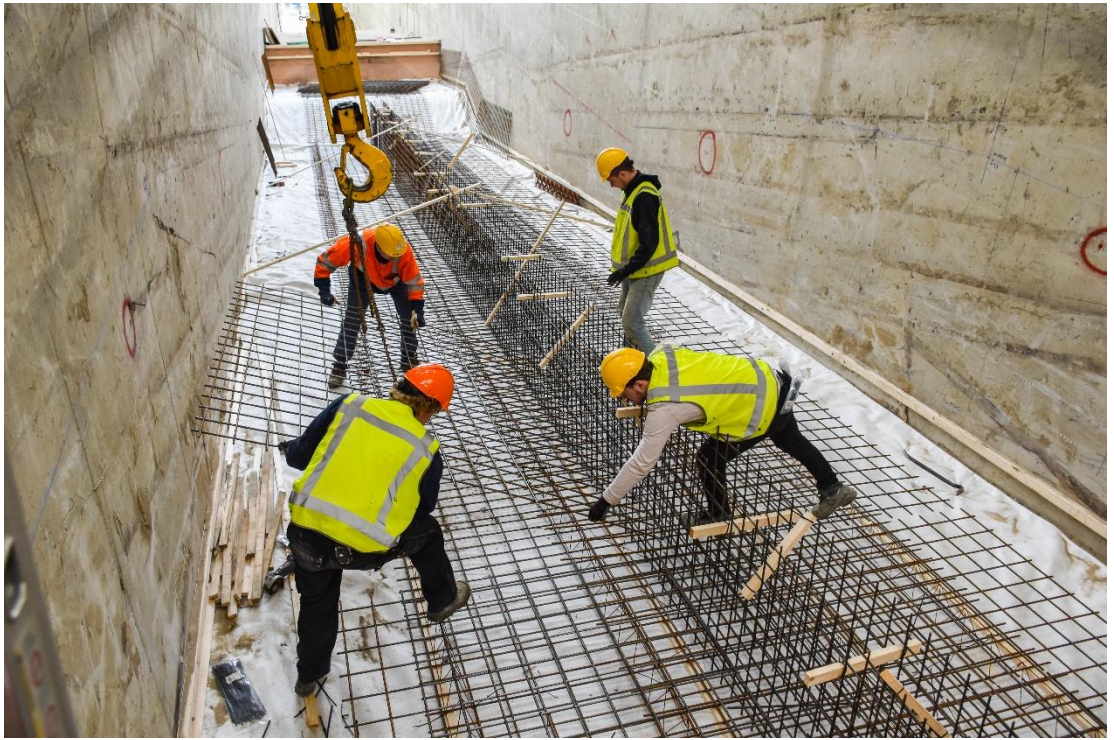
Figuur B.1 De kern van de dijk bestaat uit zand dat is aangebracht met een 50 m lang talud van 1:7.



Figuur B.2 Het zandtalud is in horizontale lagen opgebouwd en verdicht met trilplaat.



Figuur B.3 Het zandtalud is afgedekt met een laag zandcement.



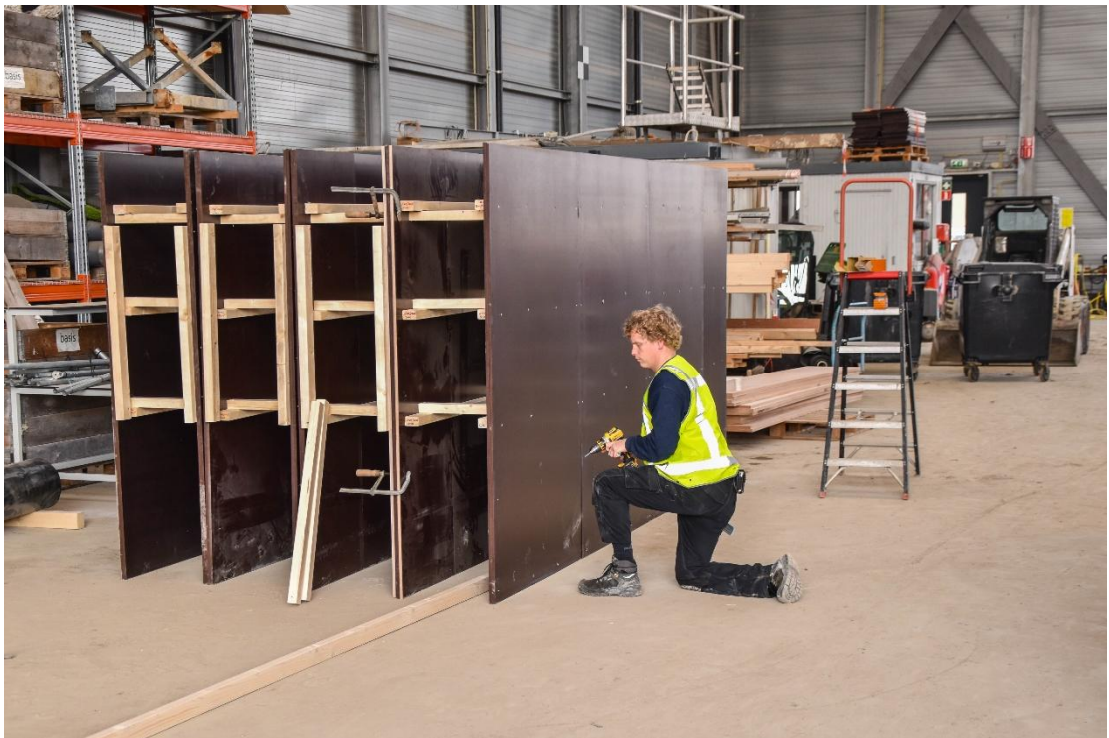
Figuur B.4 Ter plaatse van de meetsectie is een verdiept gedeelte aangelegd waar de klei gaat komen. Op het geotextiel zijn wapeningsnetten geplaatst voor de vloer en de middenwand.



Figuur B.5 Het storten en afwerken van de zandcement vloer van 25 cm dikte.



Figuur B.6 Rond de omhoogstekende wapening is een bekisting gemaakt die is volgestort met zandcement.



Figuur B.7 De middenwand die wordt gebruikt als scheiding tussen de twee kleisoorten, is naast de goot in delen voorbereid. Deze bestaat uit een balkenframe met betonplex platen.



Figuur B.8 De middenwand is in delen geplaatst over het volgestorte onderste deel met wapening.



Figuur B.9 De middenwand wordt gecentreerd met tijdelijke balken aan weerszijden en vervolgens volgstort met zandcement.

B.2 Eerste proevenserie

B.2.1 Opbouwfase



Figuur B.10 De geleverde klei op het Deltagooierrein. De eerste drie ruggen zijn van de Klutenplas. Achteraan de Valgenwegklei. De Klutenplasklei had het juiste vochtgehalte en is na aankomst daarom direct afgedekt.



Figuur B.11 De klei van de Valgenweg had een te hoog vochtgehalte en is daarom gedroogd in een tent. In de tenten zijn meerdere elektrische kachels en ontvochtigers geplaatst.



Figuur B.12 Bij mooi weer zijn de tenten open gezet om droging te bevorderen.



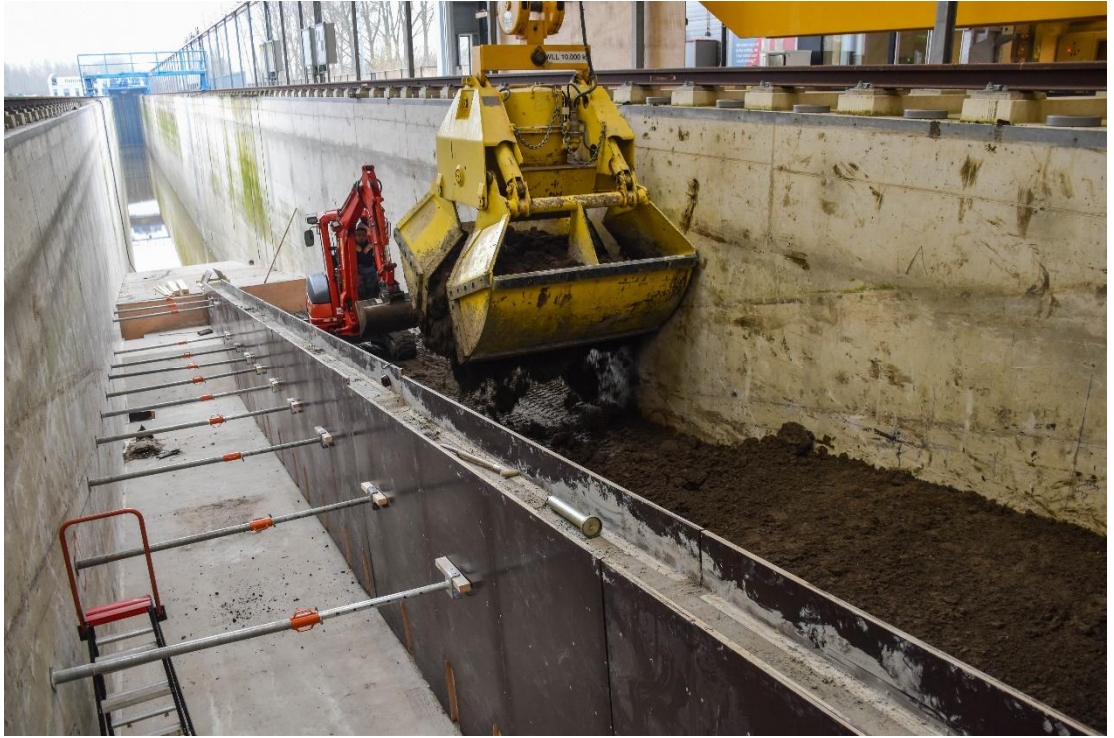
Figuur B.13 De droging in de tenten bleek onvoldoende. Daarom is de Valgenwegklei verplaatst naar een kas in Bleiswijk waar het 7 tot 12 dagen heeft kunnen drogen. Met een speciale machine zijn de ruggen dagelijks omgezet voor een gelijkmatige droging.



Figuur B.14 Als eerste is de Klutenplasklei in lagen aangebracht en verdeeld.



Figuur B.15 De Klutenplasklei is verdicht met een 2,5 tons wals.



Figuur B.16 De klei is aangebracht met de kraan boven de goot en vervolgens verdeeld met een kleinere rupskraan.



Figuur B.17 Nadat de Valgenwegklei voldoende was gedroogd, is deze aan de rechterkant (gezien vanaf het golfschot) aangebracht.



Figuur B.18 De klei aan de Valgenweg kant is grotendeels verdicht met de rupskraan. Dit gaf iets minder verdichting dan met de wals en maakte dat de verdichting beter klopte met de target.



Figuur B.19 Langs de middenwand zijn platen gemonteerd. Deze hebben tot doel om het water van de brekende golven op de linker en rechter taludhelft van elkaar te scheiden.

B.2.2 Proeven

Vooraf



Figuur B.20 Situatie vooraf met links de Klutenplasklei en rechts de Valgenwegklei.



Figuur B.21 Brekende golf tijdens test B1_01.



Figuur B.22 Brekende golf en overslag tijdens test B1_01.



Figuur B.23 Klutenplasklei-erosie na proef B1_01.



Figuur B.24 Valgenwegklei-erosie na proef B1_01.

Proef B1_02



Figuur B.25 Klutenplasklei-erosie na proef B1_02.



Figuur B.26 Valgenwegklei-erosie na proef B1_02.

Proef B1_03



Figuur B.27 Tijdens proef B1_03.



Figuur B.28 Klei-erosie na proef B1_03.



Figuur B.29 Klei-erosie na proef B1_03.

Proef B1_04



Figuur B.30 Klutenplasklei-erosie na proef B1_04.



Figuur B.31 Valgenwegklei-erosie na proef B1_04.



Figuur B.32 Klei-erosie na proef B1_04.



Figuur B.33 Klutenplasklei-erosie na proef B1_05.



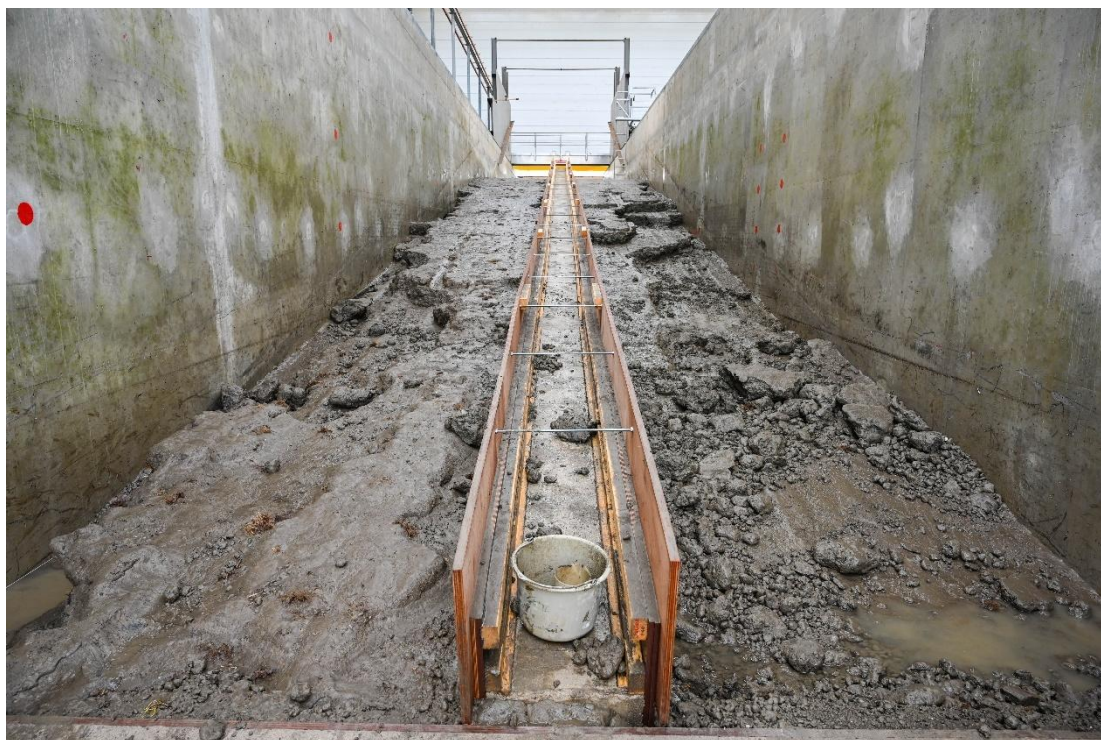
Figuur B.34 Valgenwegklei-erosie na proef B1_05.



Figuur B.35 Klei-erosie na proef B1_05.



Figuur B.36 Opspattende golf tijdens proef B1_06.



Figuur B.37 Klei-erosie na proef B1_06.



Figuur B.38 Klei-erosie na proef B1_06.



Figuur B.39 Klutenplasklei-erosie na proef B1_07.



Figuur B.40 Valgenwegklei-erosie na proef B1_07.



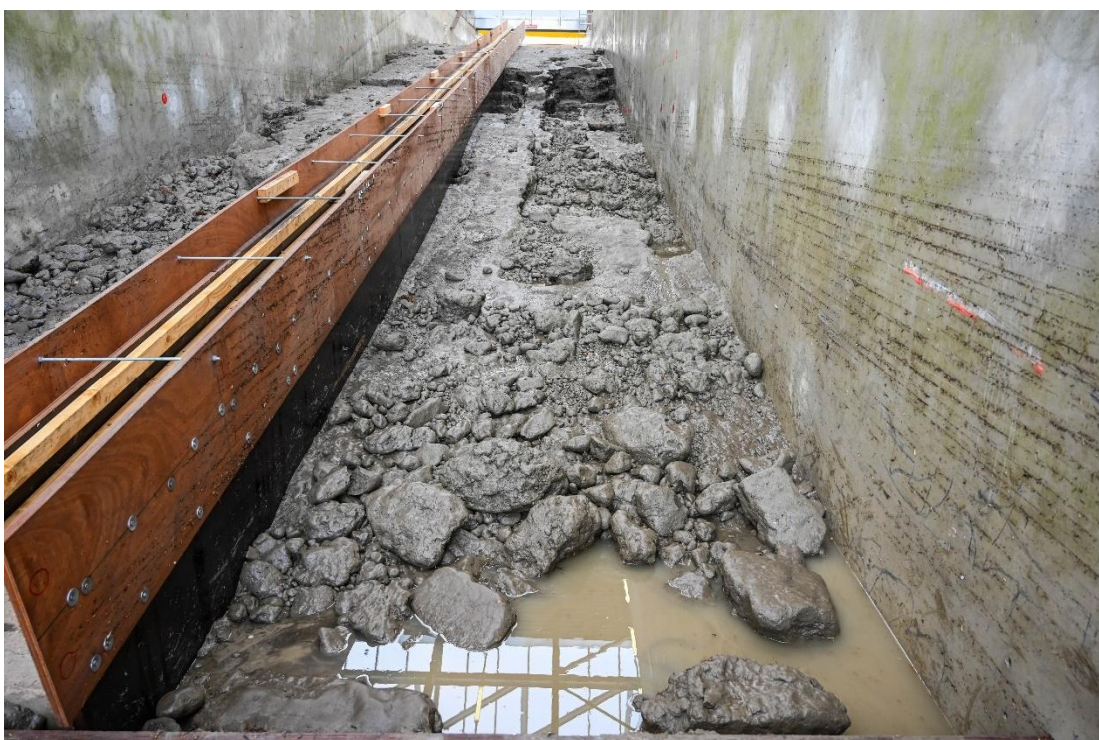
Figuur B.41 Valgenweg klifvorming na proef B1_07 met de aangebrachte kleilagen duidelijk zichtbaar.



Figuur B.42 Klei-erosie na proef B1_07.



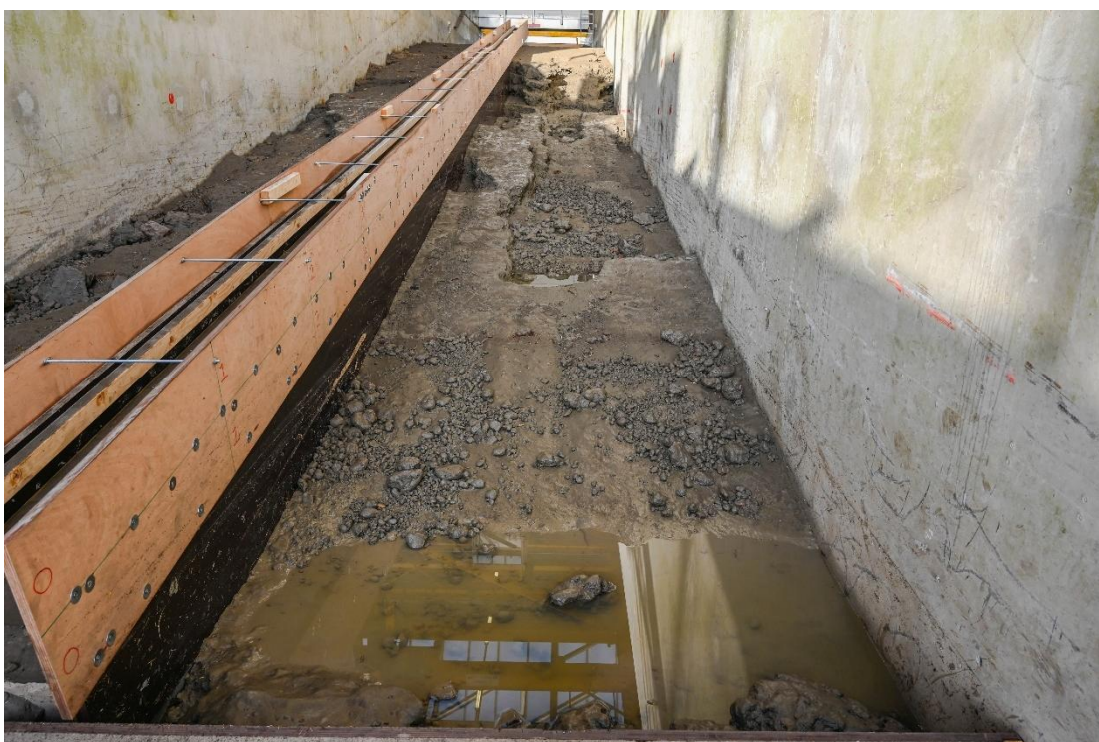
Figuur B.43 Klutenplasklei-erosie na proef B1_08.



Figuur B.44 Valgenwegklei-erosie na proef B1_08.



Figuur B.45 Klutenplasklei-erosie na proef B1_09.



Figuur B.46 Valgenwegklei-erosie na proef B1_09.

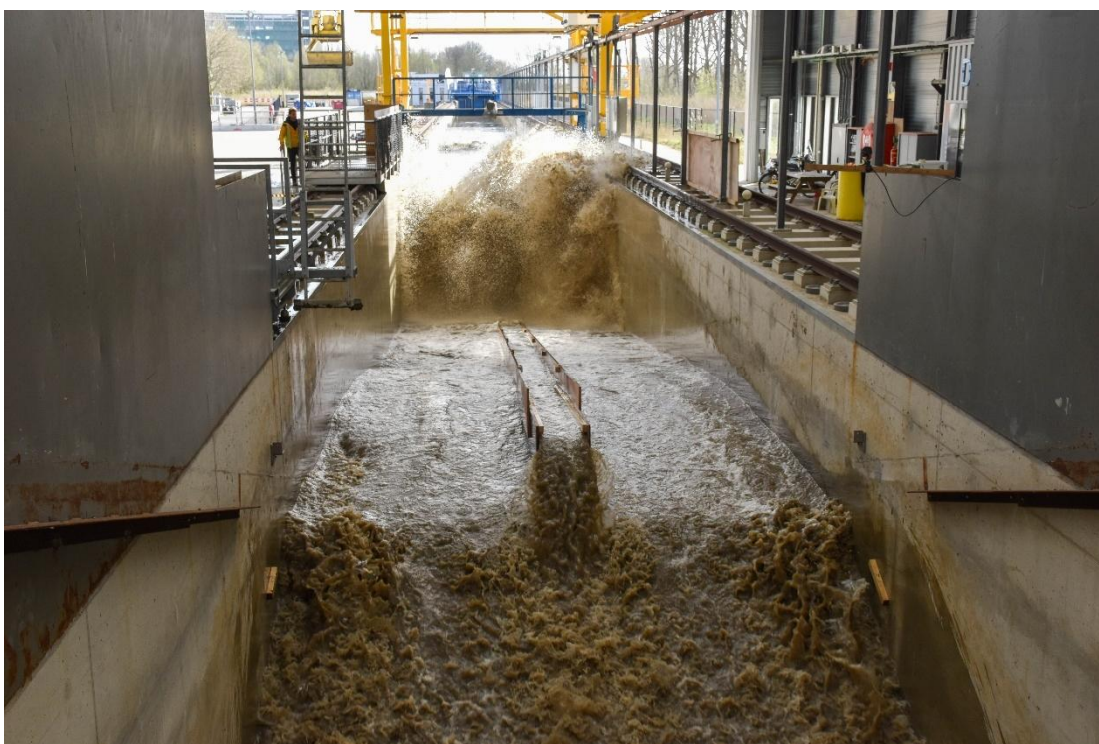


Figuur B.47 Klei-erosie na proef B1_09.

Proef B1_10



Figuur B.48 Tijdens proef B1_10.



Figuur B.49 Tijdens proef B1_10.



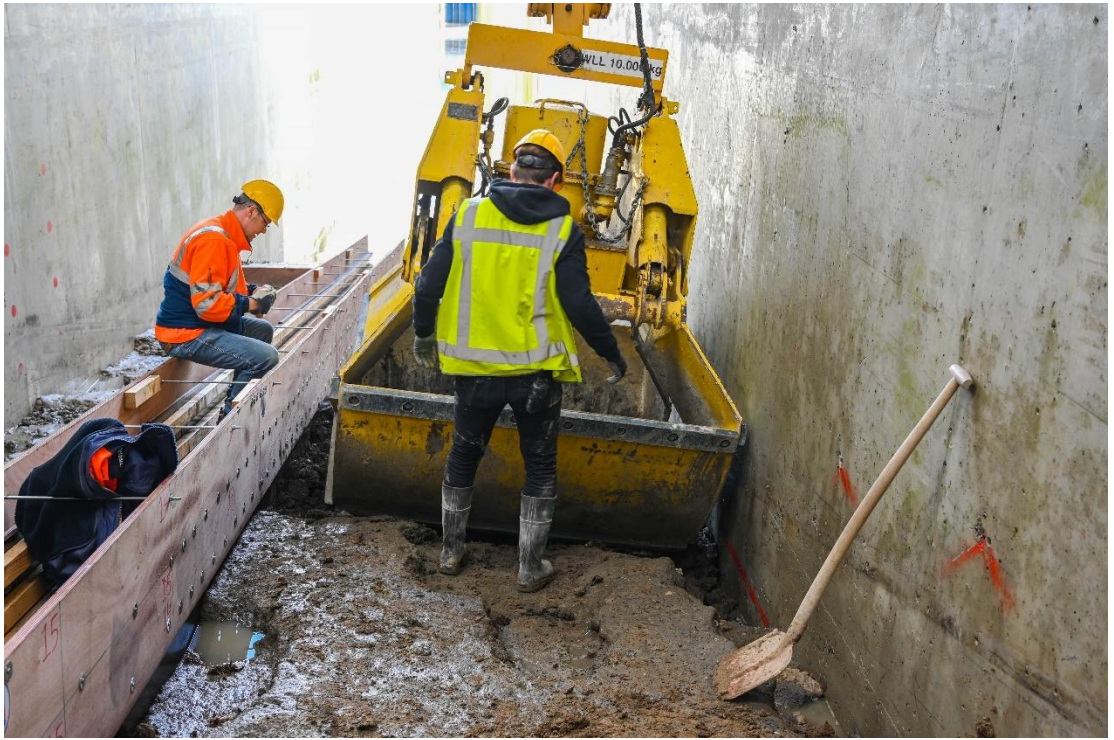
Figuur B.50 Klutenplasklei-erosie na proef B1_10.



Figuur B.51 Valgenwegklei-erosie na proef B1_10.



Figuur B.52 Klei-erosie na proef B1_10.



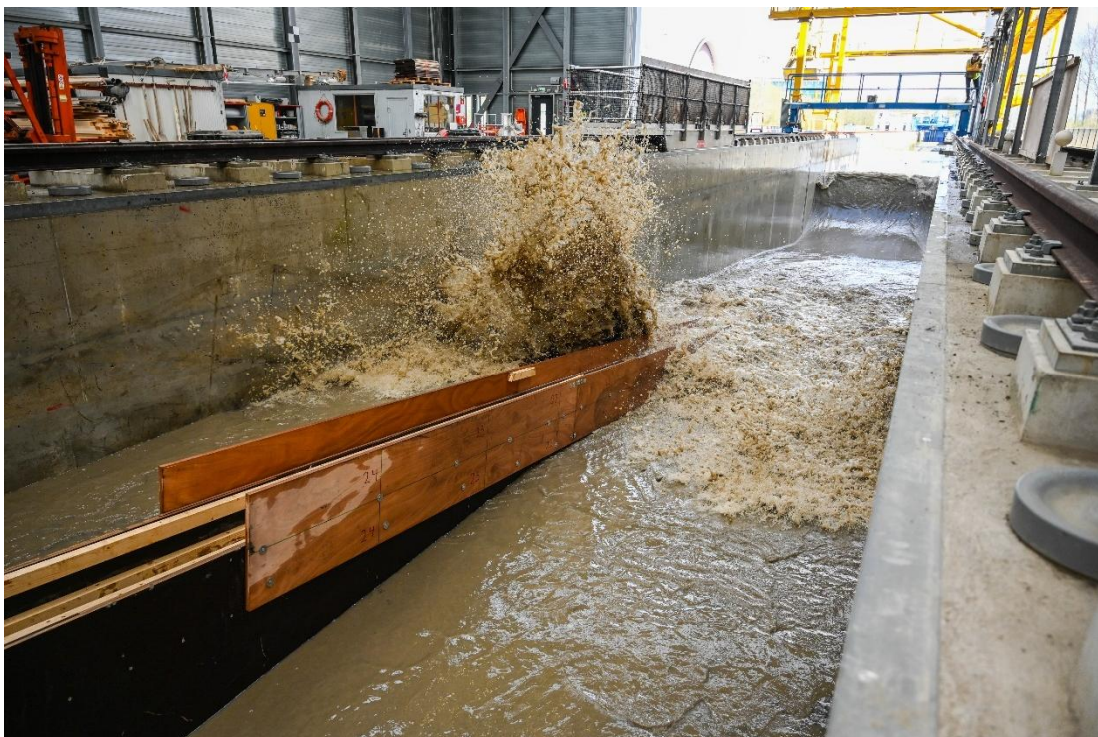
Figuur B.53 Gat gemaakt in de Klutenplasklei om de erosie te versnellen na proef B1_10.



Figuur B.54 Resultaat van het gemaakte gat in de Klutenplasklei.



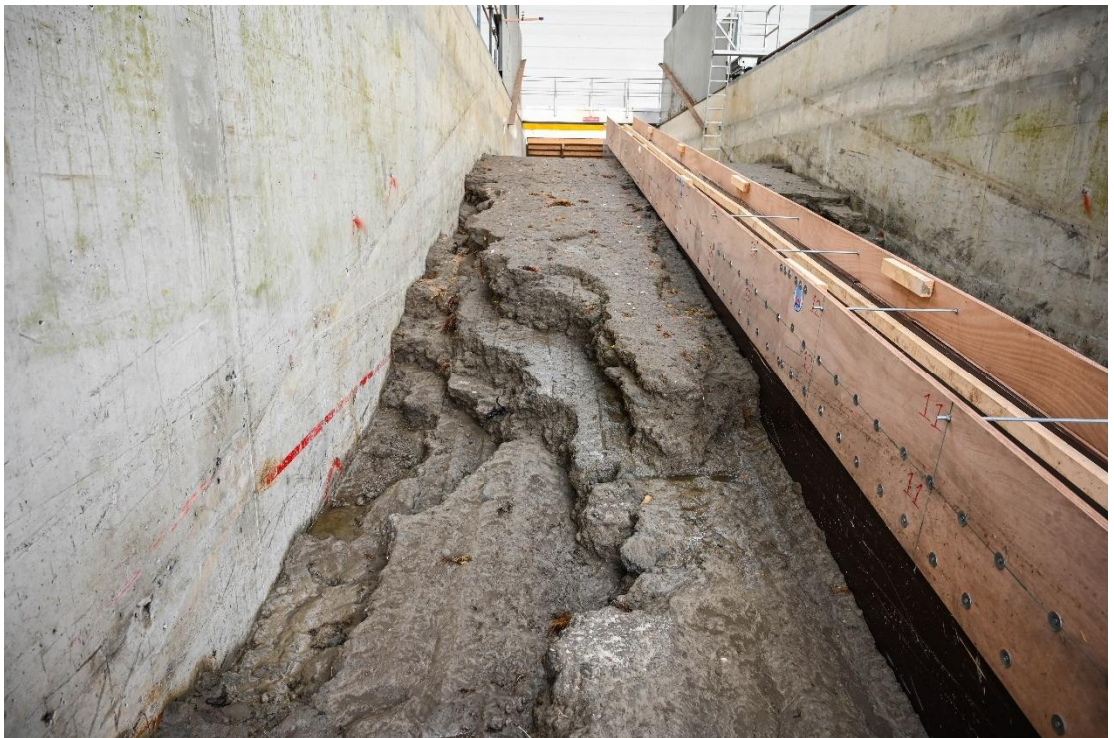
Figuur B.55 Hoog opspattende golf tijdens proef B1_11.



Figuur B.56 Opspattend water tegen de klif in de Valgenwegklei tijdens proef B1_11.



Figuur B.57 Klutenplasklei-erosie na proef B1_11.



Figuur B.58 Verder ontwikkelende klei-erosie na proef B1_11 rond het gemaakte gat in het talud (Klutenplas).



Figuur B.59 Valgenwegklei-erosie na proef B1_11.



Figuur B.60 Klif in de Valgenwegklei na proef B1_11.



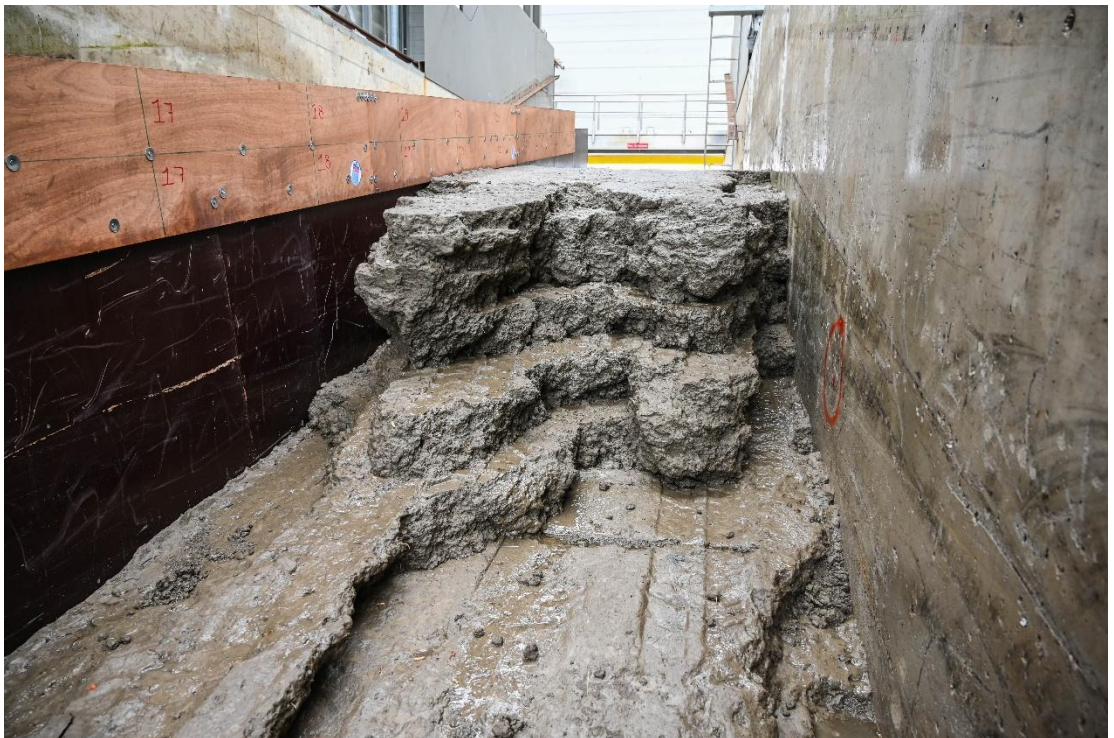
Figuur B.61 Klutenplasklei-erosie na proef B1_12.



Figuur B.62 Klutenplasklei-erosie na proef B1_12.



Figuur B.63 Valgenwegklei-erosie na proef B1_12.



Figuur B.64 Klif in Valgenwegklei na proef B1_12, ongeveer 1 m opgeschoven t.o.v. de vorige proef.



Figuur B.65 Klei-erosie na proef B1_12

Proef B1_13

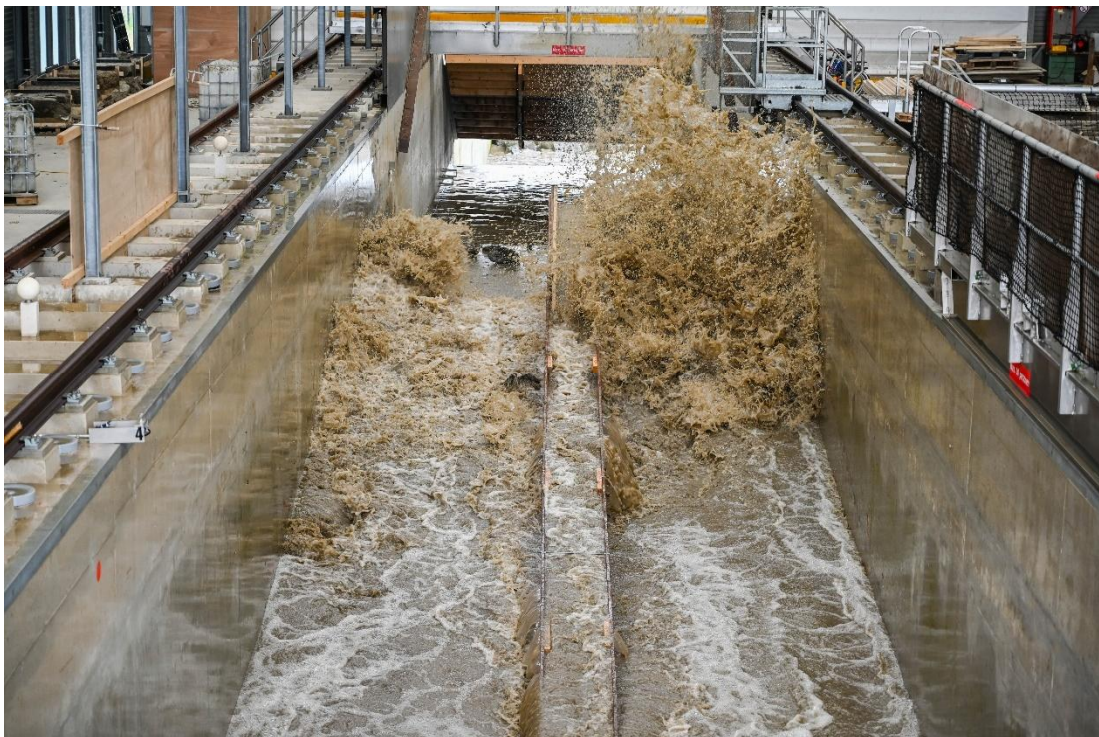


Figuur B.66 Klutenplasklei-erosie na proef B1_13.



Figuur B.67 Valgenwegklei-erosie na proef B1_13.

Proef B1_14



Figuur B.68 Opspattend water tegen de klif in de Valgenwegklei tijdens proef B1_14.



Figuur B.69 Tijdens proef B1_14.



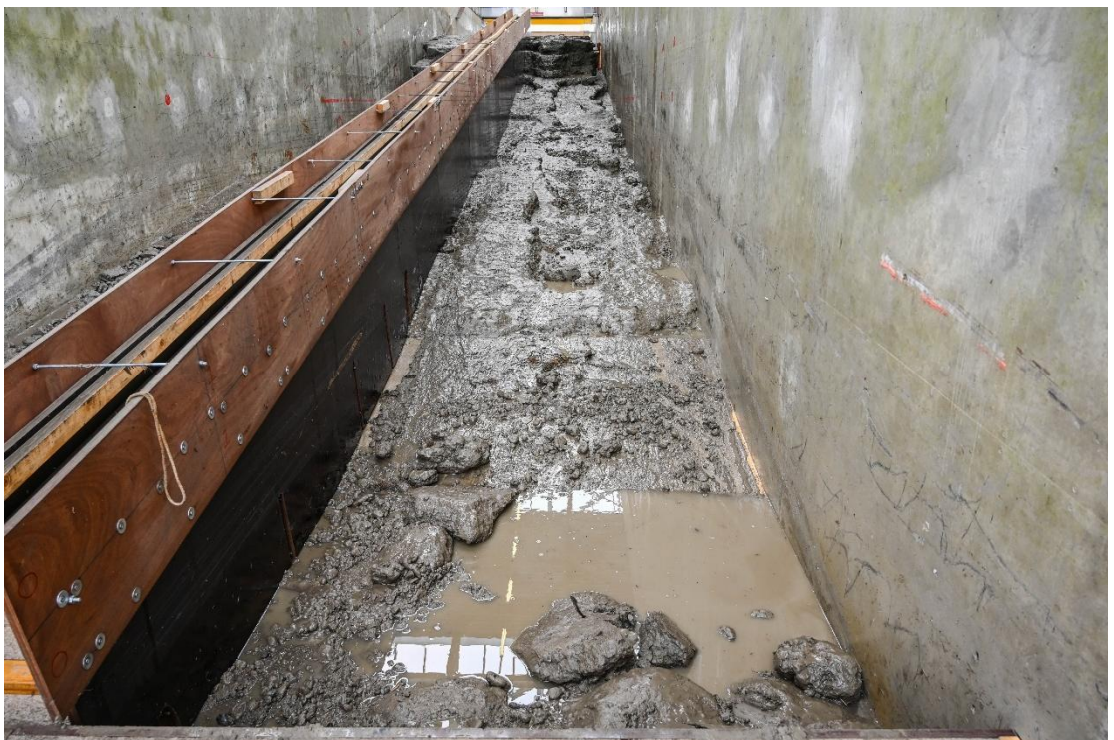
Figuur B.70 Tijdens proef B1_14.



Figuur B.71 Klutenplasklei-erosie na proef B1_14.



Figuur B.72 Klutenplasklei-erosie na proef B1_14.



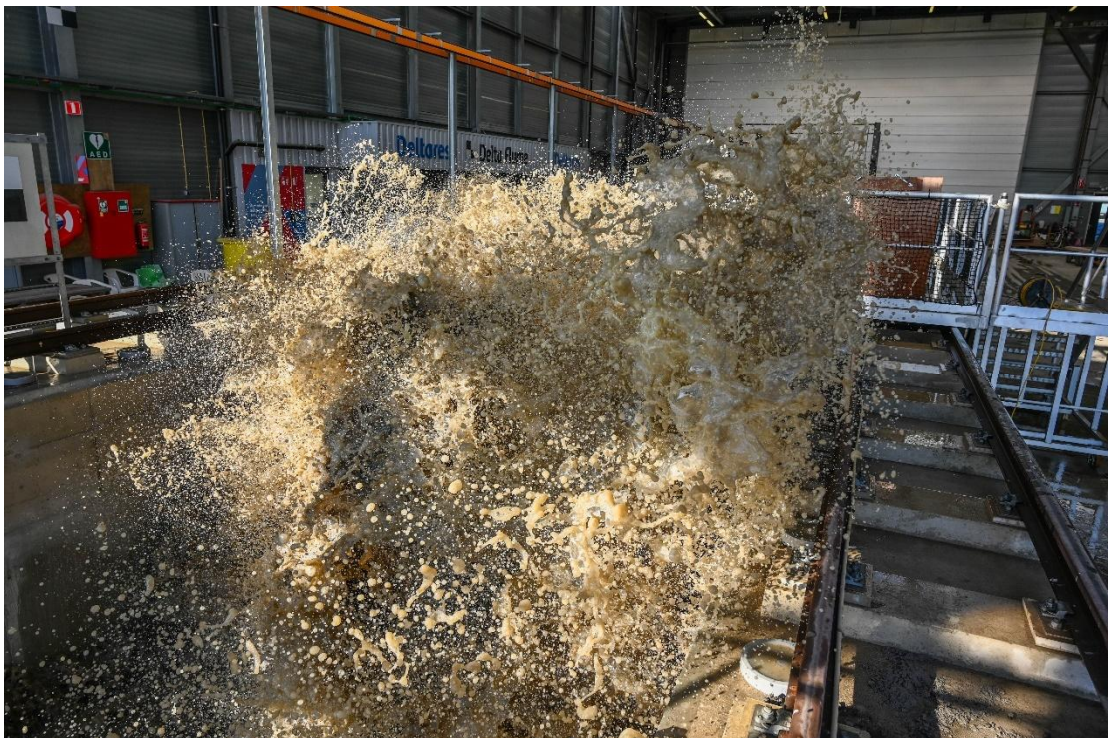
Figuur B.73 Valgenwegklei-erosie na proef B1_14.



Figuur B.74 Klei-erosie na proef B1_14.



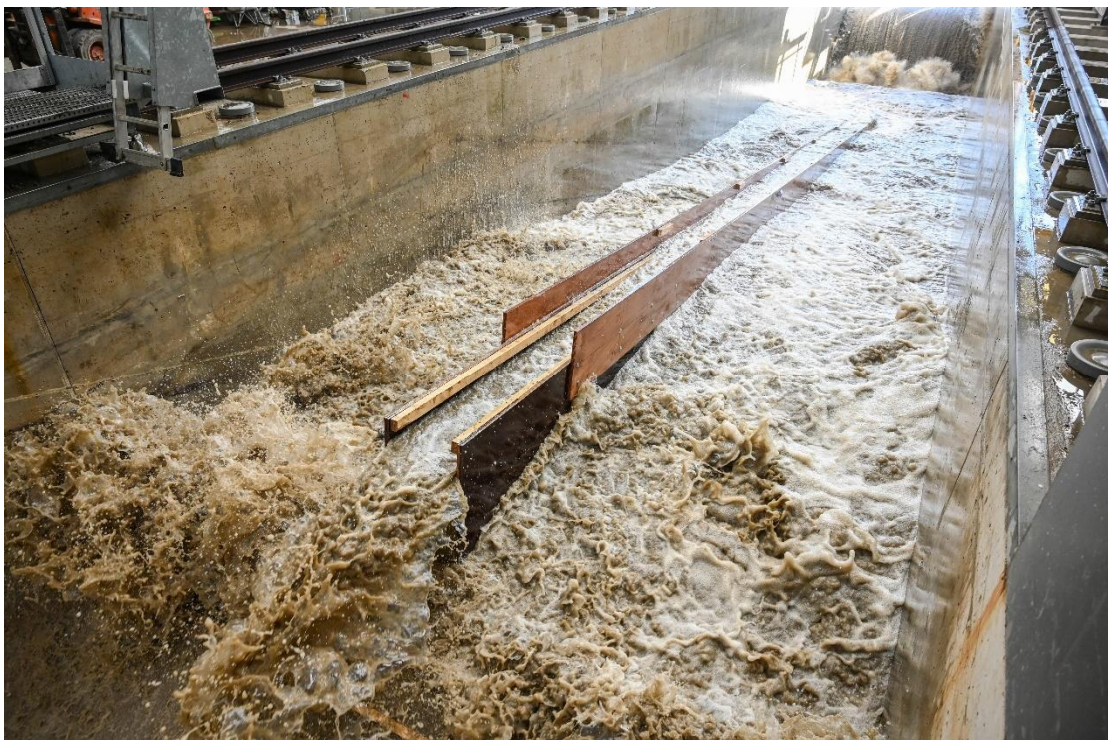
Figuur B.75 Tijdens proef B1_15.



Figuur B.76 Tijdens proef B1_15.

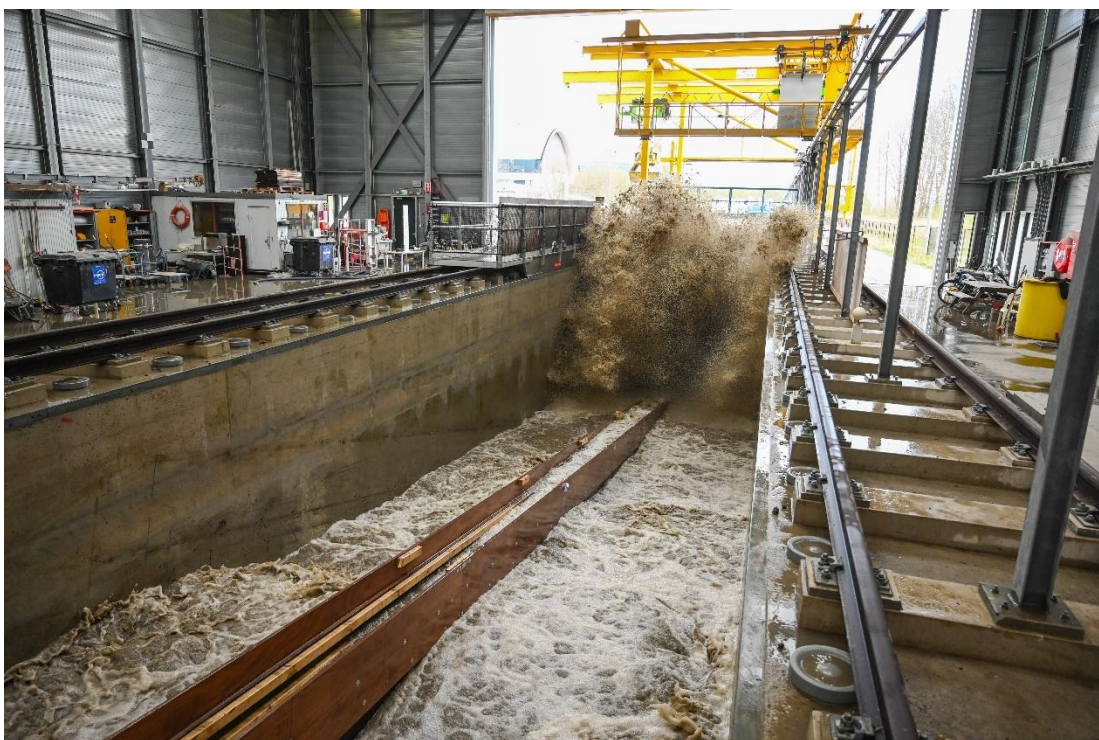


Figuur B.77 Tijdens proef B1_15.



Figuur B.78 Golfverslag tijdens proef B1_15.

Proef B1_16



Figuur B.79 Tijdens proef B1_16.



Figuur B.80 Tijdens proef B1_16.



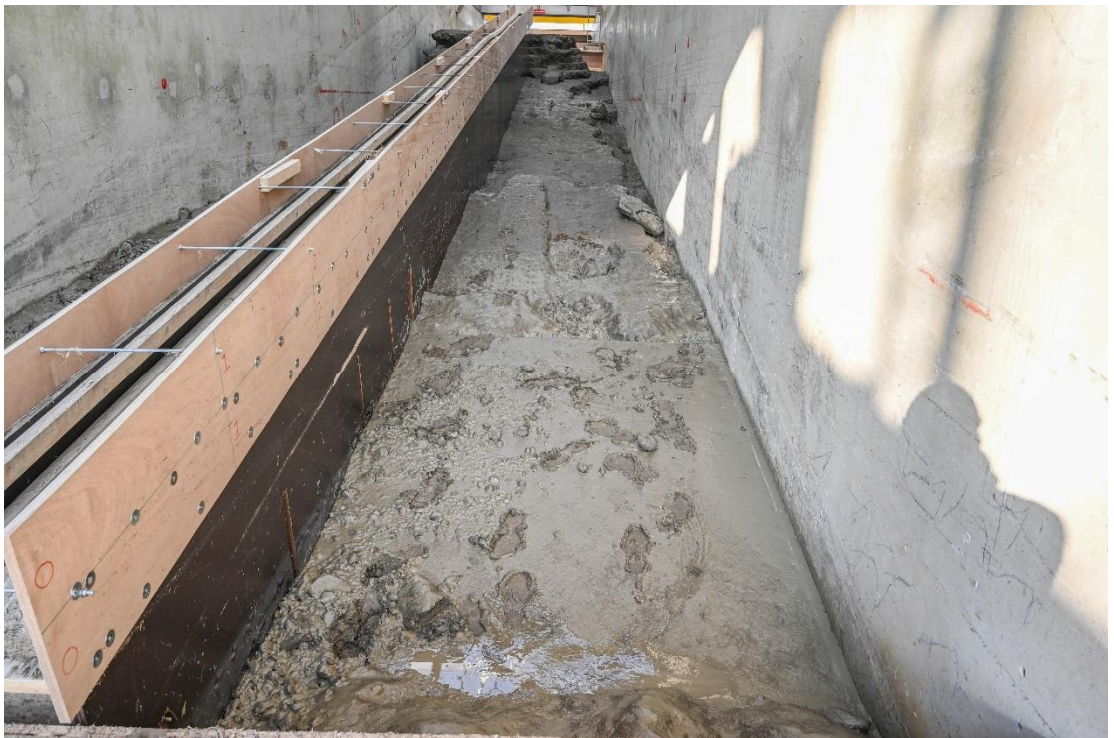
Figuur B.81 Klutenplasklei-erosie na proef B1_16.



Figuur B.82 Klutenplasklei-erosie na proef B1_16.



Figuur B.83 Klei-erosie hoog op het talud na proef B1_16. Kruin van de Valgenweg kant is doorgebroken.



Figuur B.84 Valgenwegklei-erosie na proef B1_16.



Figuur B.85 Klei-erosie na proef B1_16.

B.3 Tweede proevenserie

B.3.1 Steken van de kleiblokken



Figuur B.86 Drukken van de stalen mal in de Dollarddijk.



Figuur B.87 Drukken van stalen mallen in de dijk bij Blija. De grasmat is hier eerst afgegraven waarna de onderblokken gestoken zijn.



Figuur B.88 Gedrukte mallen in de dijk bij Blija voor de bovenblokken met grasmat.



Figuur B.89 Rondom ontgraven van de stalen mallen.



Figuur B.90 Steken van de bodemplaat onder de mal.



Figuur B.91 Laden van de kleiblokken voor transport naar Delft.

B.3.2 Opbouwfase



Figuur B.92 Plaatsen van kleiblok in de Deltagoot.



Figuur B.93 Lierframe met vertraging om de bodemplaet onder de mal uit te trekken.



Figuur B.94 Trekken van een zijwand van de mal.



Figuur B.95 Afgraven van de bovenste 30 cm van de onderblokken uit de Dollarddijk. Hierbovenop zijn de bovenblokken geplaatst.



Figuur B.96 Plaatsen van wapeningsnetten tussen de kleiblokken en de gootwand.



Figuur B.97 Storten van zandcement tussen het kleiblok en de gootwand om het blok naadloos in te bouwen.



Figuur B.98 Plaatsing van het laatste kleiblok van de dijk bij Blija in de Deltagoot.



Figuur B.99 Het gras is tijdens de opbouwfase regelmatig gemaaid en gesproeid om het in een goede conditie te houden.



Figuur B.100 Extra verlichting m.b.v. groeilampen boven het gras om het gras in de hal in goede conditie te houden.

B.3.3 Proeven

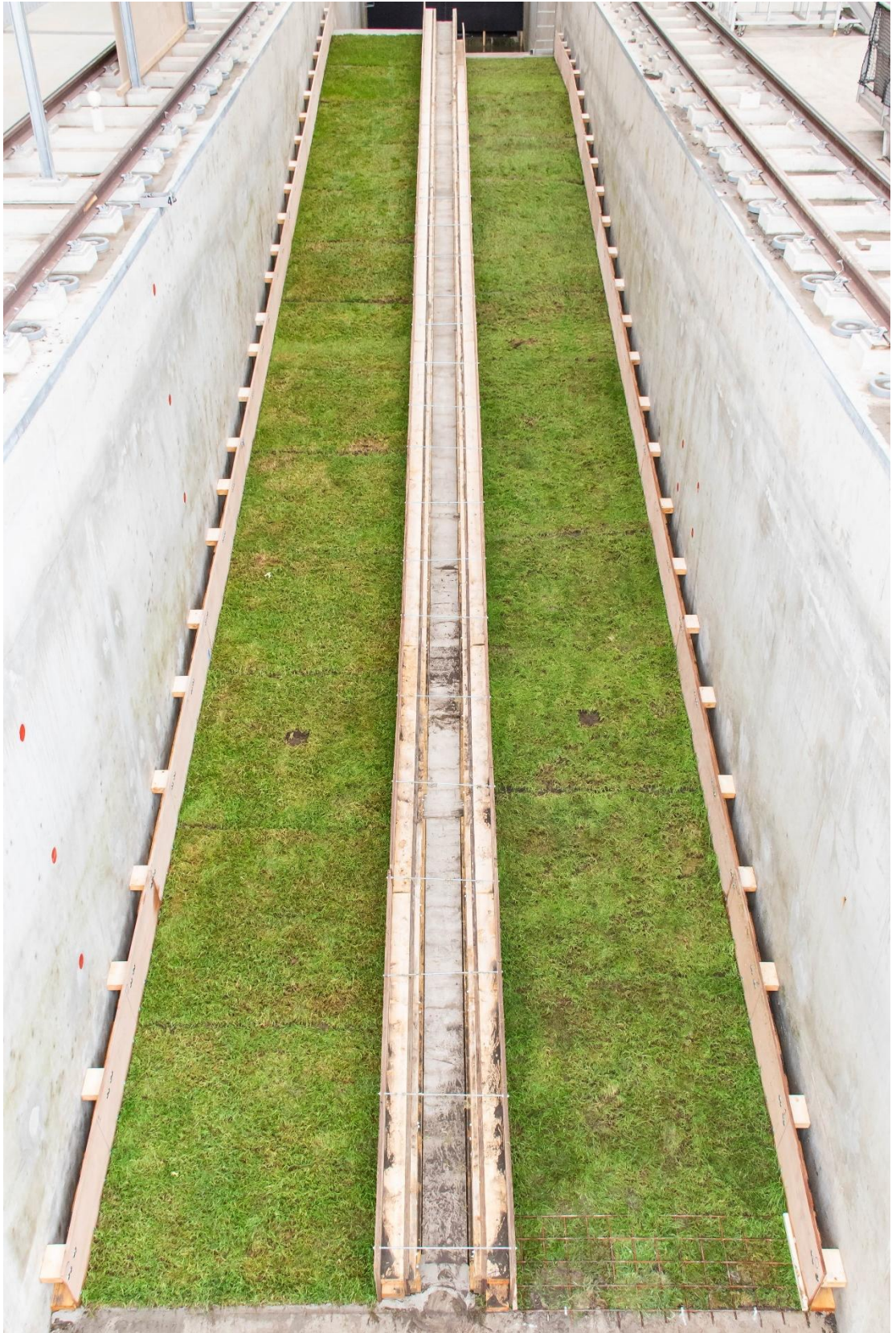
Vooraf



Figuur B.101 Situatie vooraf met links de klei van de dijk bij Blija en rechts de klei van de Dollarddijk.



Figuur B.102 Situatie vooraf met rechts de klei van de dijk bij Blija en links de klei van de Dollarddijk.



Figuur B.103 Situatie na test B2_01. De kleine grasblokjes die ter opvulling zijn geplaatst (rechtsonder) zijn vastgezet met een wapeningsnet om ongewenste modeleffecten te voorkomen. Deze blokjes zijn namelijk klein en daarmee veel zwakker dan de grote kleiblokken.

Proef B2_02



Figuur B.104 Situatie na test B2_02. Nog geen erosie.



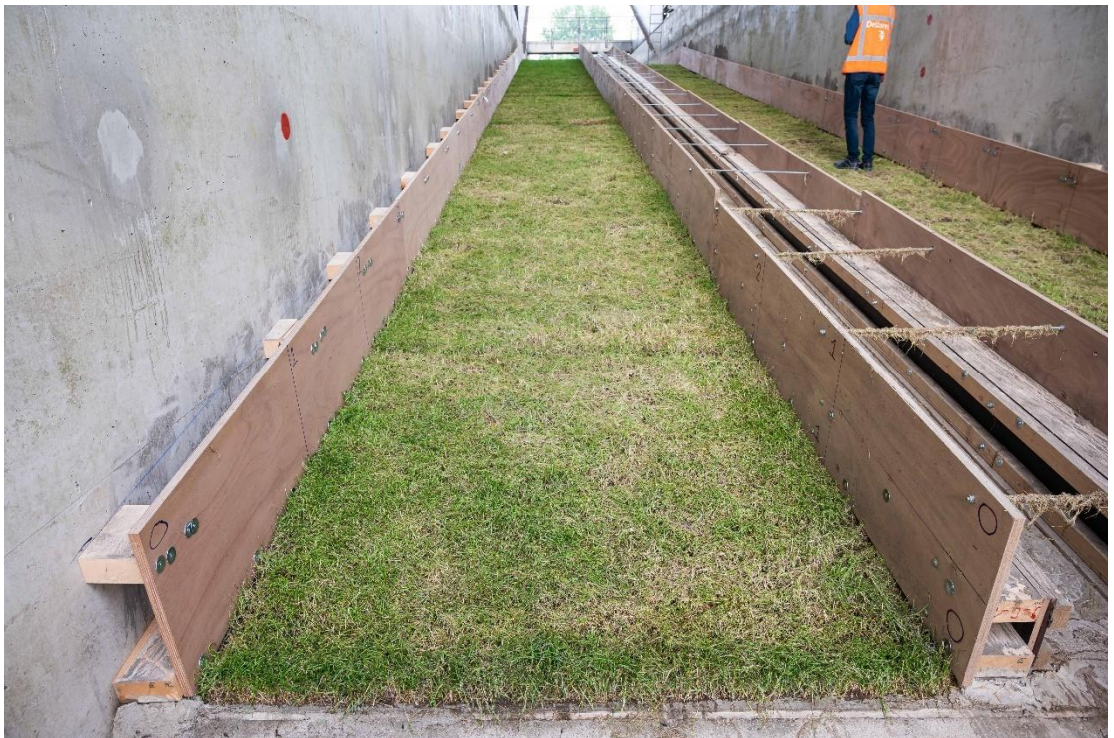
Figuur B.105 Brekende golf tijdens test B2_03



Figuur B.106 Brekende golf tijdens test B2_03



Figuur B.107 Situatie Dollardzijde na test B2_04. Er is een kalere plek te zien in het eerste kleiblok. Onder dit gras zitten de eerste klei-erosiekuiltjes.



Figuur B.108 Situatie Blijzijde, geen erosie.

Proef B2_05



Figuur B.109. Na test B2_05. De kleine erosiekuiltjes aan de Dollardzijde zijn gegroeid tot een gat.



Figuur B.110 Eerste erosie gat aan de Dollardzijde in het eerste kleiblok.



Figuur B.111 Golven tijdens test B2_06.



Figuur B.112 Erosie aan de Dollardzijde na test B2_06. Het kleine erosiegat na de vorige proef is snel gegroeid.



Figuur B.113 Erosiekuil aan de Dollardzijde na proef B2_06. Er is geen erosie aan de Blijzijde.

Proef B2_07



Figuur B.114 Erosie aan de Dollardzijde na proef B2_07. De klif start naar boven toe te groeien.



Figuur B.115 Er is nog geen erosie aan de Blijzijde na proef B2_07.

Proef B2_08



Figuur B.116 Brekende golf tijdens proef B2_08.

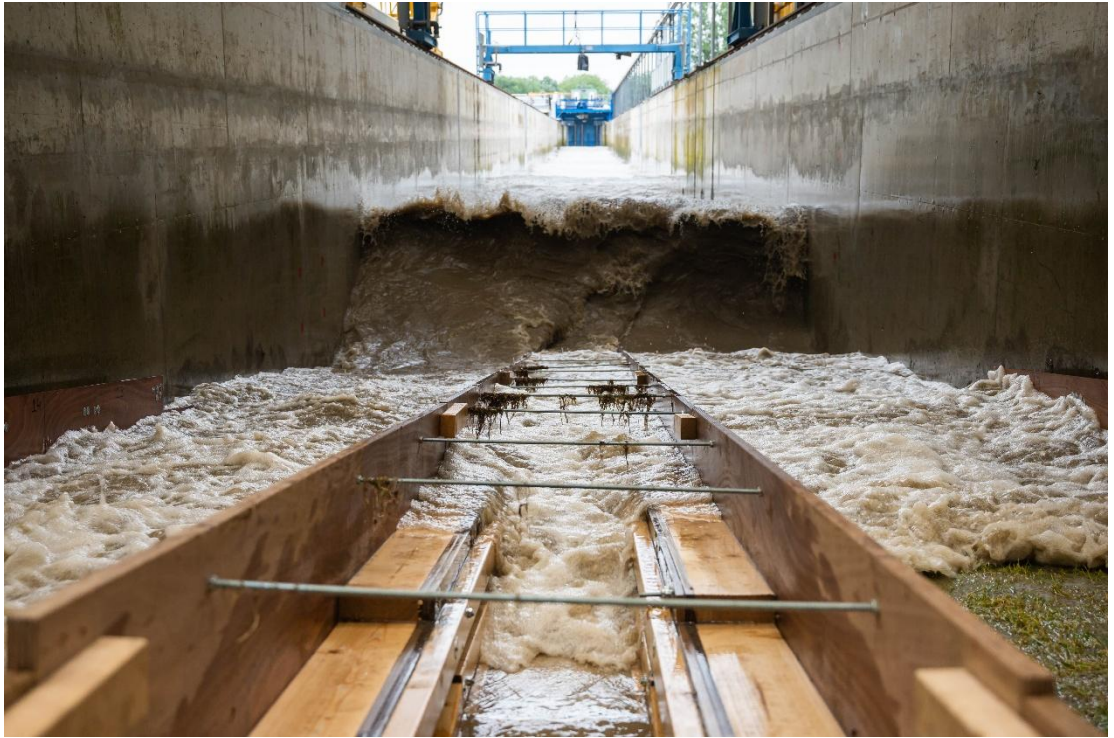


Figuur B.117 Erosie aan de Dollardzijde na proef B2_08. De erosie is verder gegroeid richting de kruin.



Figuur B.118 Erosiekuil aan de Dollardzijde is gegroeid tijdens proef B2_08. Er is geen erosie aan de Blijzijde.

Proef B2_09



Figuur B.119 Brekende golven tijdens proef B2_09. Deze proef had een lagere golfhoogte ($H_{m0} = 1,0$ m).



Figuur B.120 Tijdens proef B2_09 is door de lagere golfhoogte de erosie niet toegenomen.

Proef B2_10



Figuur B.121 Brekende golven tijdens proef B2_10. Deze proef had een lagere golfhoogte ($H_{m0} = 1,5$ m).



Figuur B.122 De erosieklijf is ondanks de lagere golven toch een stuk richting de kruin gegroeid.



Figuur B.123 Erosiekuil aan de Dollardzijde is gegroeid tijdens proef B2_10. Er is geen erosie aan de Blijzijde.

Proef B2_11



Figuur B.124 Brekende golf tijdens proef B2_11. De klif aan de Dollardzijde is gegroeid tot boven de waterlijn.

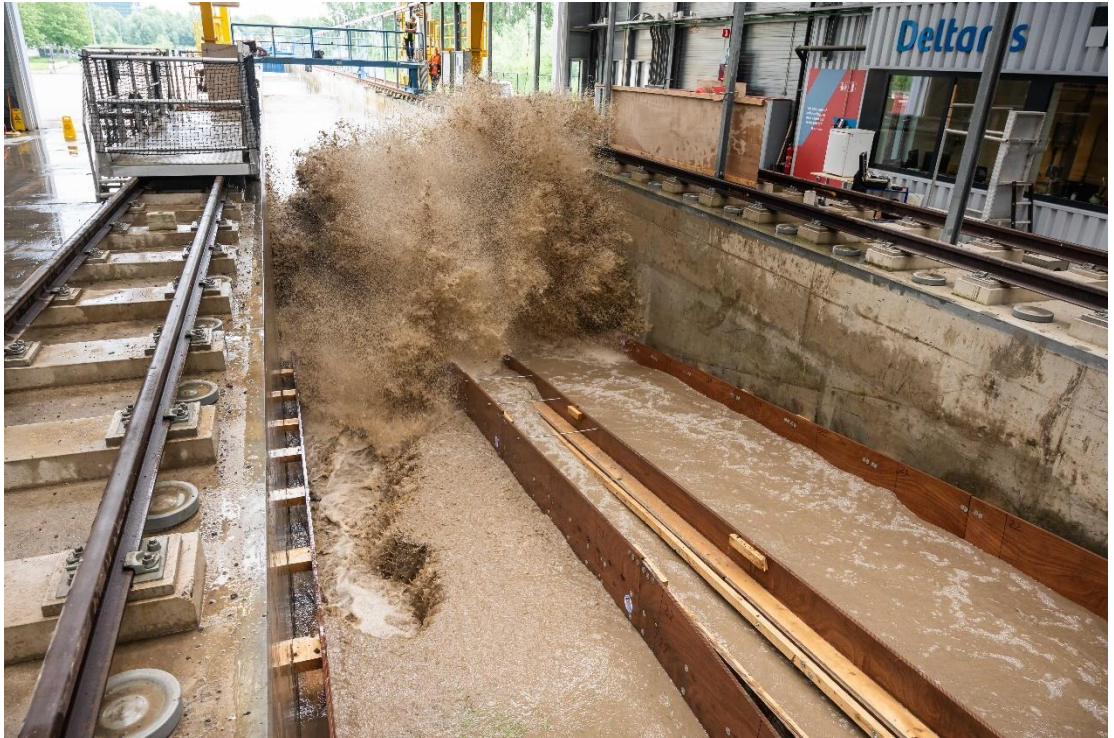


Figuur B.125 Het kunstmatige gat in de Blijaklei is kunstmatig vergroot na proef B2_11.



Figuur B.126 De erosie aan de Dollardzijde is snel omhoog gegroeid. Aan de Blijzijde is geen erosie.

Proef B2_12



Figuur B.127 Brekende golf tijdens proef B2_12. De erosie aan de Dollardzijde heeft bijna de kruin bereikt.



Figuur B.128 De erosieklijf aan de Dollardzijde heeft bijna de kruin bereikt na proef B2_12.



Figuur B.129 De kunstmatige gaten aan de Blijzijde zijn kunstmatig vergroot na proef B2_12. Daarnaast is er een gat bijgemaakt in het vierde kleiblok.



Figuur B.130 Erosie aan de Dollardzijde na proef B2_12.



Figuur B.131 Tijdens proef B2_12 had de erosieklif aan de Dollardzijde bijna de kruin bereikt. Aan de Blijzijde was geen erosie en zijn daarom de kunstmatige gaten vergroot.



Figuur B.132 Brekende golven lopen hoog op tegen het talud en slaan tegen de klif aan de Dollardzijde.



Figuur B.133 De erosie is tijdens proef B2_13 doorgesleed in de kruin aan de Dollardzijde.



Figuur B.134 De kunstmatige gaten aan de Blijzijde zijn iets gegroeid. Aan de Dollardzijde is de erosie een stuk de kruin in gegroeid.



Figuur B.135 Brekende golf en overslag tijdens proef B2_14.



Figuur B.136 Golven tijdens proef B2_14.



Figuur B.137 De kunstmatige gaten aan de Blijzijde zijn na proef B2_14 nauwelijks gegroeid.



Figuur B.138 Zijkant van de blokken uit de Dollarddijk waarbij de brokkelige structuur goed te zien is.



Figuur B.139 Erosie na proef B2_14. Aan de Dollardzijde is de kruin doorgebroken. Aan de Blijzijde is geen erosie.

Proef B2_15



Figuur B.140 Brekende golf bij het golfschot tijdens proef B2_15.



Figuur B.141 Na proef B2_15 is de klei aan de Dollardzijde bijna volledig weg. Alleen een deel van de onderblokken is nog niet weggeslagen.



Figuur B.142 De erosie aan de Blijzijde is nauwelijks toegenomen in test B2_15. Aan de Dollardzijde is de erosie dieper geworden.



Figuur B.143 Brekende golf en overslag tijdens proef B2_16.



Figuur B.144 De kunstmatige gaten aan de Blijzijde zijn nagenoeg hetzelfde gebleven.



Figuur B.145 Brekende golf en overslag tijdens proef B2_17.



Figuur B.146 Opnieuw zijn de kunstmatige gaten aan de Blijzijde nauwelijks gegroeid.



Figuur B.147 Eindsituatie na de laatste proef.

C Belasting in extreme storm

C.1 Dollarddijk

Het verloop van de waterstand en golfhoogte tijdens een extreme storm op de Dollard met topwaterstand van NAP+7,70 m en maximale significante loodrecht invallende golfhoogte van $H_{m0\perp} = 2,3$ m is gegeven in Fig. C-1. In dit verloop is een faseverschil tussen de waterstands-opzet en het getij van 5,5 uur aangehouden met totale stormduur van 45 uur, zoals gebruikelijk op de Waddenzee.

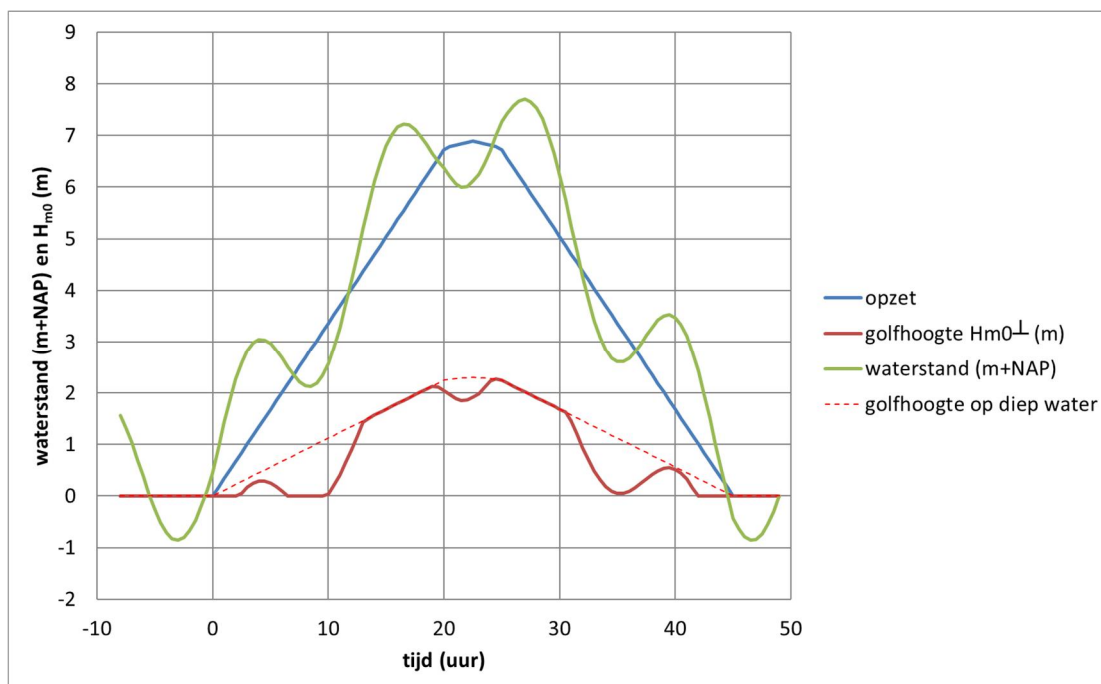


Fig. C-1 Verloop van de waterstand en golfhoogte tijdens een extreme storm

De maximale significante golfhoogte treedt op tijdens de top van de waterstand, maar neemt vervolgens af richting het begin en het einde van de storm, in gelijke mate met de opzet. Verder is de golfhoogte op diep water gecorrigeerd voor de waterstand: op ondiep water is de golfhoogte gelimiteerd door de waterdiepte.

Onder extreme omstandigheden is de richting van de golven zodanig dat ze scheef aankomen bij de dijk. Deze golfinvalshoek is ongeveer 35° à 40° . De proeven in de Deltagoot zijn uitgevoerd met loodrechte golfaanval en de afgeleide formules zijn daarom alleen toepasbaar bij loodrechte golfaanval. De significante golfhoogte bij scheve golfaanval kan omgerekend worden naar een equivalente waarde, die evenveel erosie veroorzaakt als bij loodrechte golfaanval (Klein Breteler en Mourik 2019):

$$\frac{H_{m0\perp}}{H_{m0\beta}} = \max\left(0,35; (\cos \beta)^{0,67}\right) \quad \text{voor } -90^\circ < \beta < 90^\circ \quad (22)$$

$$\frac{H_{m0\perp}}{H_{m0\beta}} = 0 \quad \text{voor } \beta > 90^\circ \text{ of } \beta < -90^\circ \quad (23)$$

Met:

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

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

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

De equivalente significante golfhoogte is bij de Brede Groene Dijk ongeveer 14% lager dan de golfhoogte van de scheef invallende golven. De maximale significante golfhoogte in de figuur ($H_{m0} = 2,3$ m) komt dus overeen met $H_{m0} = 2,6$ m bij scheef invallende golven.

Verder wordt de golfhoogte sterk bepaald door de waterdiepte. Het voorland voor de Brede Groene Dijk ligt op NAP+2,5 m, waardoor de golven breken door de beperkte waterdiepte. Dat reduceert de significante golfhoogte, terwijl de golfperiode gelijk blijft. Hiervoor kan de volgende formule worden gebruikt (Klein Breteler, 2018):

$$H_{m0,max} = 0,53d_m \quad (24)$$

Met:

d_m = maatgevende waterdiepte voor de dijk, namelijk op een halve diepwatergolflengte van de dijk (m)

De invloed van het breken van de golven op het voorland is verwerkt in Fig. C-1. Daardoor is er maar een beperkte duur met hoge golven met significante golfhoogte van ongeveer $H_{m0} = 2,0$ m en treedt de maximale significante golfhoogte van 2,3 m niet op, omdat deze precies samenvalt met laagwater op de top van de storm.

Op grond van deze figuur kan geconcludeerd worden dat een extreme storm op de Dollard overeenkomt met ongeveer 17 à 20 uur golven in de Deltagoot. Dit zijn omstandigheden die maar eens in de 200.000 jaar voorkomen, maar wel zeer relevant zijn voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk. Dat komt omdat dit in het ontwerp punt zit van de probabilistische berekeningen van de sterkte van de dijk. Het betekent ook dat deze omstandigheden niet volledig veilig gekeerd hoeven te worden. De kans op bezwijken van de dijk mag hierbij enkele tientallen procenten zijn, gegeven het optreden van zo'n extreme storm.

C.2 Dijk bij Blija

Op vergelijkbare wijze als bovenstaand is voor de Friese Waddenzeedijk bij Blija de equivalente stormduur berekend.

Omdat deze berekeningen vóór het uitvoeren van de Deltagootproeven zijn uitgevoerd, heeft de gebruikte rekenmethode voor het verloop van de erosiediepte enkele beperkingen. Het is niet gevalideerd voor een flauwere taludhelling dan 1:5 en/of grotere golven dan ca 1,5 m. De resultaten in deze bijlage zijn daardoor indicatief. Vanwege die eerste beperking zijn ook berekeningen met een taludhelling van 1:5 uitgevoerd.

De berekening van de erosiediepte is uitgevoerd voor verschillende belastingen. Er is gewerkt met twee verschillende waterstandsverlopen, namelijk met een faseverschil tussen de piek van de stormopzet en het getij van 5,5 uur en 0 uur.

Daarnaast is het golfhoogteverloop op twee manieren bepaald:

1. Het waterstandsverloop (stormopzet+getij) is als uitgangspunt genomen. Bij elke waterstand is uit de tabel van Hydra-NL de golfhoogte (H_{m0}), golfperiode (T_p) en richting (β) gehaald voor de betreffende waterstand.
2. Eerste is op de top van het waterstandsverloop (trapezium) de golfhoogte, golfperiode en richting bepaald met Hydra-NL. Vervolgens is de golfhoogte op elk moment in de storm evenredig verlaagd met het verloop van de stormopzet. Dit levert een lineair toenemend, en na de top afnemend, verloop van de golfhoogte. De golfperiode is berekend door de golfsteilheid constant te houden. Ook de richting is constant gehouden.

In beide gevallen is vervolgens de golfhoogte gereduceerd als de golven breken op het voorland (met niveau van NAP+1,5 m).

Hieruit volgen vier verschillende belastingsscenario's voor zichtjaar 2073:

- Blija 1: Faseverschil van 5,5 uur, golfhoogte uit tabel van Hydra-NL
- Blija 2: Geen faseverschil, golfhoogte uit tabel van Hydra-NL
- Blija 3: Faseverschil van 5,5 uur, golfhoogte als functie van stormopzet
- Blija 4: Geen faseverschil, golfhoogte als functie van stormopzet

Deze verschillende scenario's zijn weergegeven in Fig. C-2. Hierin geeft de blauwe lijn het waterstandsverloop aan en de rode lijn het golfhoogteverloop. Door het ondiepe voorland is er een beperking in de maximale golfhoogte: te hoge golven zullen breken op het voorland voordat ze de dijk bereiken. Daarom is de golfhoogte gecorrigeerd aan de hand van het waterstandsverloop en de diepte van het voorland (NAP+1,5m). Deze gecorrigeerde golfhoogte, weergegeven met de groene lijn, is gebruikt voor de erosieberekening.

“Blija 2” is het scenario volgens de schematiseringshandleiding voor grasbekledingen van WBI. Hierin is geen faseverschil meegenomen tussen getij en stormopzet wat leidt tot een korte hoge waterstand tijdens de stormpiek. Voor “Blija 1” is dit faseverschil wel meegenomen waardoor gedurende een langere tijdsduur een hoge waterstand optreedt. De golfhoogte is voor dit scenario wat conservatief, omdat het in feite uitgaat van de veronderstelling dat gedurende de volledige stormduur de windsnelheid maximaal is.

Voor “Blija 3” verloopt de golfhoogte evenredig met de stormopzet, wat leidt tot een realistischere duur van de hoge golfbelasting. “Blija 4” is de overgebleven combinatie van waterstands- en golfverloop, maar is minder realistisch.

Voor de erosieberekeningen wordt de meeste waarde gehecht aan scenario's “Blija 2” en “Blija 3”.

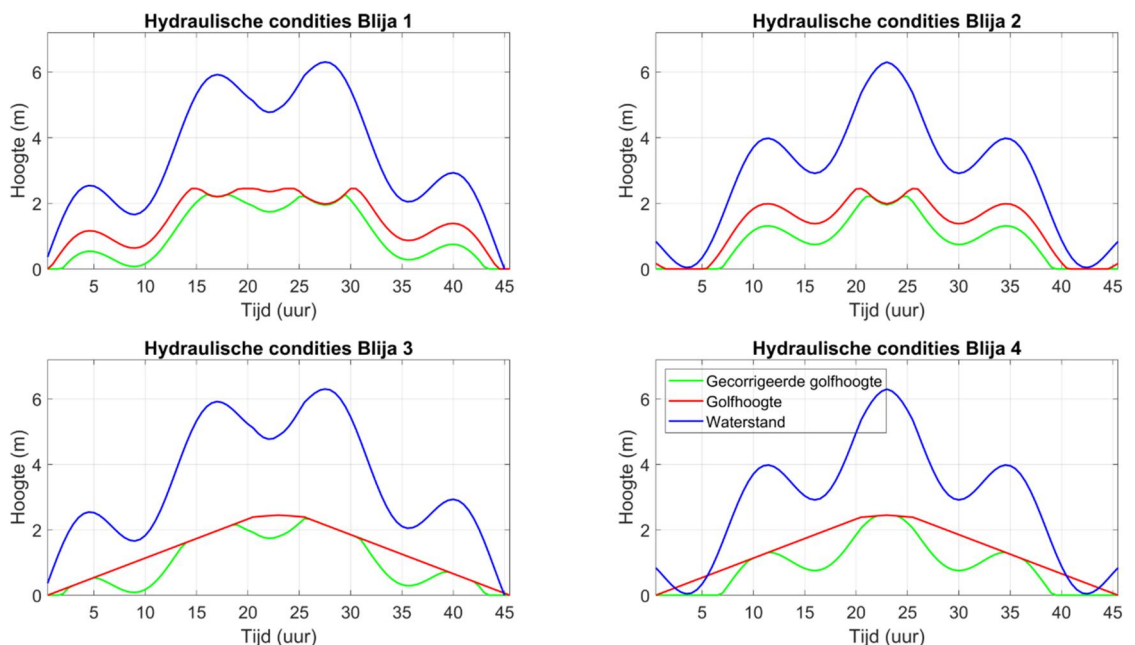


Fig. C-2 Vier verschillende hydraulische scenarios waarvoor de erosiediepte is bepaald

Het berekende verloop van de erosiediepte voor de situatie in de Deltagoot met constante golfhoogte en waterstand is weergegeven in Fig. C-3. Voor deze berekeningen is een golfhoogte van 2,0 m met een piekperiode van 5,4 s genomen bij een waterstand van NAP +6,3 m.

Er zijn tevens berekeningen uitgevoerd met de scenario's Blija 1 t/m Blija 4, met variërende waterstand en golfcondities. Deze hebben respectievelijk een erosiediepte opgeleverd van 0,39, 0,50, 0,64 en 0,80 m. Deze waarden zijn in de figuur weergegeven op de lijn van het verloop van de erosiediepte in de Deltagoot. Zo kan afgelezen worden bij welke belastingsduur in de Deltagoot dezelfde erosiediepte wordt bereikt als in deze belastingscenario's.

Uit de berekeningen blijkt dat een belastingsduur van 4,5 tot 8,7 uur in de Deltagoot een zelfde voorspelde erosiediepte geeft als respectievelijk de scenario's Blija 2 en 3. In de huidige beoordeling zou het dus voldoende zijn als in de Deltagoot de kleilaag met gras ruim 4,5 uur standhoudt. In de toekomst zou het aan te houden belastingscenario kunnen veranderen. Als dit Blija 3 wordt, dan moet de kleilaag met gras ruim 8,7 uur standhouden.

Ter controle is de berekening ook gedaan voor een taludhelling van 1:5, wat binnen de toepassingsgrenzen van het rekenmodel valt. Hieruit volgt voor "Blija 2" een equivalente duur in de Deltagoot van 5,2 uur. Dit is in dezelfde orde grootte als de 4,5 uur voor een talud van 1:7. Wel is logischerwijs de bereikte erosiediepte groter dan voor het 1:7 talud (0,8 m in plaats van 0,4 m).

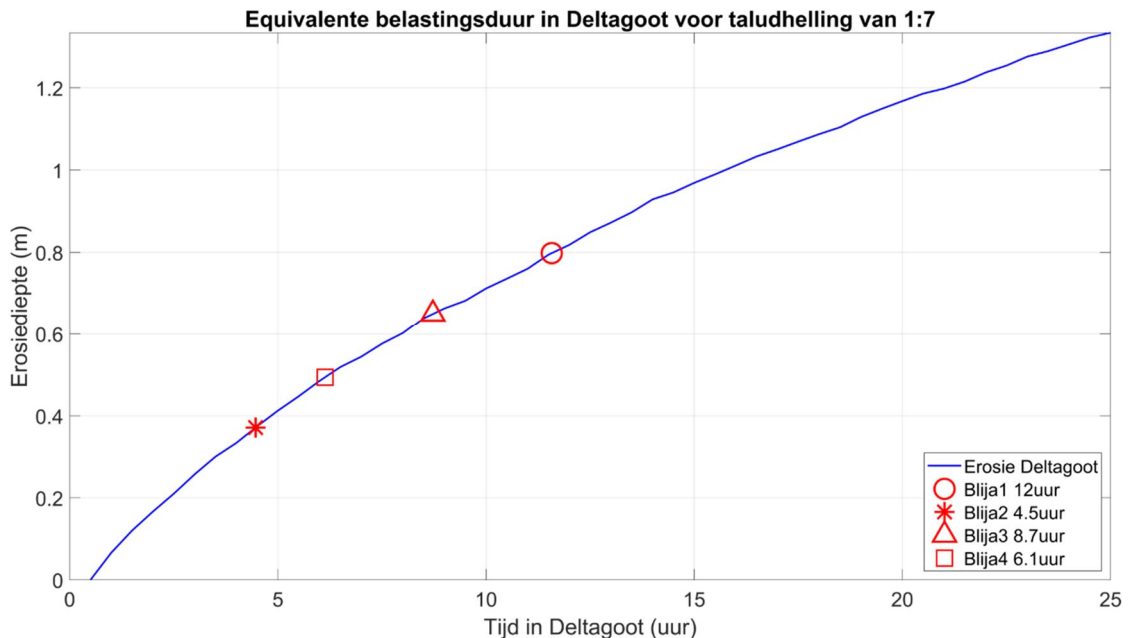


Fig. C-3 Berekende equivalente belastingsduur voor de vier hydraulische belastingcombinaties weergegeven op het berekende erosiediepteverloop voor een constante belasting ($H_{m0} = 2,0$ m, $T_p = 5,4$ s)

D Ervaringen van het beheer van Dollarddijk

Onderstaande tekst is overgenomen van rapport "Project Overstijgende Verkenning – Dijkversterkingen met gebiedseigen grond" van RPS, rapport NL202001269-R20-320 van 2-10-2020 (hoofdstuk 5).

ERVARINGEN VANUIT BEHEER

Naast het geotechnische laboratoriumonderzoek is de ervaring van Waterschap Hunze en Aa's met het beheer en onderhoud van de kleilaag op de zeedijk vanaf moment van aanleg tot heden geïnventariseerd door middel van een interview. Dit interview heeft plaatsgevonden op 23 september 2020 waarbij Jan Wezeman, Henk Bakker, en Henk van Norel aanwezig waren. Op basis van de informatie van dit interview is gezamenlijk getracht een link te leggen tussen de ervaring vanuit beheer en de gemeten geotechnische parameters. De relevante informatie uit het interview is samengevat in dit hoofdstuk. Daarnaast is gebruik gemaakt van informatie uit een aantal brieven uit 1992 en 1993 [Ref. 9] omtrent de scheurvorming en genomen maatregelen om de scheurvorming te herstellen.

Achtergrond

De zeedijk is in de periode van 1976 tot 1989 verbeterd in het kader van de verzwarening van de zeedijk naar deltahogte. De oude kleidijk is half afgegraven en deze klei is binnendijks in een depot geplaatst. Daarna is buitendijks een cunet gegraven en is met de vrijgekomen kwelderklei een perskade aangelegd op de kwelder. Vervolgens is het zandlichaam van de dijk opgespoten tussen de oude kleidijk en de perskade en vervolgens geprofileerd. De klei uit de oude dijk is daarna vanuit het binnendijkse depot op het binnentalud aangebracht en de kwelderklei uit de perskade is op het buitentalud aangebracht. Klei is naar zeggen waarschijnlijk tamelijke nat aangebracht. Er is geen onderzoek beschikbaar van de klei voorafgaande aan de versterking, gedurende de uitvoering of bij oplevering.

Sinds aanleg van de dijk komt scheurvorming voor. Twee soorten scheurvorming zijn geconstateerd, namelijk stervormige scheurvorming en langsscheuren. De oorzaak van de scheurvorming is toentertijd niet eenduidig achterhaald en vastgelegd en is beschreven als een combinatie van verschillende oorzaken, te weten: verschilzettingen, te nat aanbrengen, krimp/kruip, rijpingsproces, hoog organische stofgehalte. Hierbij de stervormige scheurvorming gerelateerd aan te nat aanbrengen, krimp/kruip, rijpingsproces en een hoog organische stofgehalte. De langsscheuren zijn gerelateerd aan de zettingsverschillen. De dijkverbetering is richting de kwelder uitgevoerd. Echter waar de overgang naar de oude kleidijk is, zijn in het verleden grote langsscheuren geconstateerd. Dit is zeer waarschijnlijk veroorzaakt doordat grotere zettingen zijn opgetreden op het gedeelte van de dijk de kwelder dan op het gedeelte waar de oude zeedijk aanwezig is.

Beheer en onderhoud

In de periode na uitvoering van de dijkverbetering zijn veel scheuren in de kleibekleding geconstateerd. Om dit te herstellen is na aanleg intensief beheer en onderhoud uitgevoerd aan de kleibekleding. Het beheer en onderhoud heeft sinds aanleg hoofdzakelijk bestaan uit het bekleien van de zeedijk. Het bekleien is het verspreiden van klei over de dijk door middel van een mestverspreider. Hierdoor ontstaat een dunne laag van fijne, brokkelige klei. De klei wordt vervolgens met een slede in de scheuren geschoven waardoor de scheuren gevuld raken met klei. Naast het bekleien is de kleibekleding in het verleden eveneens hersteld door middel van frezen en opnieuw inzaaien van de toplaag of het handmatig vullen van grote scheuren. Echter beide maatregelen zijn lokaal en in minder mate toegepast dan het bekleien.

De intensiteit van het beheer en onderhoud is sinds de aanleg van de dijkverbetering op te delen in drie periodes. In de eerste periode na uitvoering (circa tot 1993) heeft heel veel scheurvorming plaatsgevonden en is er heel intensief beheer en onderhoud uitgevoerd om de scheuren te herstellen. In de periode daarna (circa tot 2000) is de scheurvorming en de grootte van de scheuren iets afgenomen en daarmee ook de inspanning om de scheuren te herstellen. Na 2000 tot en met heden is een minder of meer een stabiele situatie ontstaan waarbij er een continue beeld is van beperkte, seizoensgebonden scheurvorming. De scheuren ontstaan in droge periodes en sluiten zichzelf in natte periodes. Het bekleien vindt in deze periode

nog steeds plaats maar is meer van cosmetische aard en ter voorkoming van graverijen in de scheurvorming. De benoemde periodes zijn in tabel 5.1 gepresenteerd.

tabel 5.1 Tijdlijn beheer en onderhoud zeedijk

Periode	Toelichting
1976 - 1989	Aanleg/uitvoering dijkverbetering
1989 - 1993	Zeer veel scheurvorming Zeer intensief beheer en onderhoud
1993 - 2000	Veel scheurvorming Intensief beheer en onderhoud
2000 - heden	Minder scheurvorming, continue seizoensafhankelijke scheurvorming Beheer en onderhoud meer van cosmetische aard

In 2018 is de depotdijk aangelegd. De depotdijk is opgebouwd uit dezelfde kwelderklei welke is toegepast bij de vorige dijkverbetering voor de aanleg van een perskade. De klei vanuit de perskade is vervolgens op het buitentalud toegepast als kleibekleding. De afgelopen twee jaar zijn de ervaringen goed met de depotdijk; de depotdijk vertoont nauwelijks scheurvorming.

Een verschil met de zeedijk is dat de kwelderklei in de depotdijk eerst in depot is opgeslagen en daar heeft kunnen drogen en rijpen waarna de depotdijk is opgebouwd met de kwelderklei vanuit het depot. De kwelderklei in de vorige dijkversterking is direct gebruikt voor de aanleg van de perskade. De perskade heeft vermoedelijk weinig kunnen drogen omdat hij is gebruikt als barrière voor het opspuiten van zand tussen de perskade en de oude zeedijk. De (te) natte kwelderklei vanuit de perskade is vervolgens op het buitentalud aangebracht. Het vermoeden is dat door de kwelderklei in het depot te laten drogen een vochtgehalte is ontstaan waarbij bij aanbrengen van de klei in de depotdijk een veel betere verdichting is behaald dan bij de (te) natte kwelderklei op het buitentalud in de dijkverbetering in de jaren 80. De depotdijk is afgelopen twee jaar belast tijdens een storm. Daarbij is enkel wat oppervlakkige erosie opgetreden. Het materiaal wat met de kraan is aangebracht om het talud te profileren is hierbij geërodeerd. De goed verdichte lagen zijn netjes blijven liggen en zijn door de oppervlakkige erosie weer zichtbaar geworden. Dit doet vermoeden dat met name de goede verdichting heeft gezorgd voor de erosiebestendigheid.

Een ander verschil is dat de depotdijk volledige uit kwelderklei is opgebouwd terwijl de zeedijk een kleilaag van kwelderklei heeft welke is gelegen op een zandkern. Waarbij ook de ervaring is dat de kleilaag lang niet overal een dikte van 1 m heeft. De ervaring vanuit beheer met andere in het gebied aanwezige dijken is dat dijken met een kleilaag op een kleikern veel minder gevoelig zijn voor scheurvorming dan dijken met een kleilaag op een zandkern. In het verleden zijn bij de zeedijk ook grote langsscheuren geconstateerd welke vermoedelijk zijn veroorzaakt door zettingsverschillen. De depotdijk is volledig op de kwelder aangebracht daardoor zijn de verschildettingen ook veel minder aanwezig en dragen daarmee ten opzichte van de zeedijk dus ook niet bij aan de scheurvorming.

De ervaringen vanuit beheer en onderhoud zijn in het interview gespiegeld aan de ontwikkelingen van de parameters zoals gepresenteerd in hoofdstuk 4. Zowel de samenstelling (zoutgehalte, zandgehalte, organische stofgehalte en kalkgehalte) als de plasticiteit (uitrolgrens, vloeigrens) van de kwelderklei toegepast in de depotdijk als de zeedijk veranderen voor bepaalde parameters in de tijd. Echter een directe relatie met de scheurvorming op de zeedijk wordt niet gelegd. Het vermoeden is dat de scheurvorming destijds hoofdzakelijk ontstaan is door zettingsverschillen en rijping van de kwelderklei. Dit wordt ondersteunt door de ervaringsverschillen tussen de zeedijk (veel scheurvorming) en depotdijk (nauwelijks scheurvorming).

E Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum

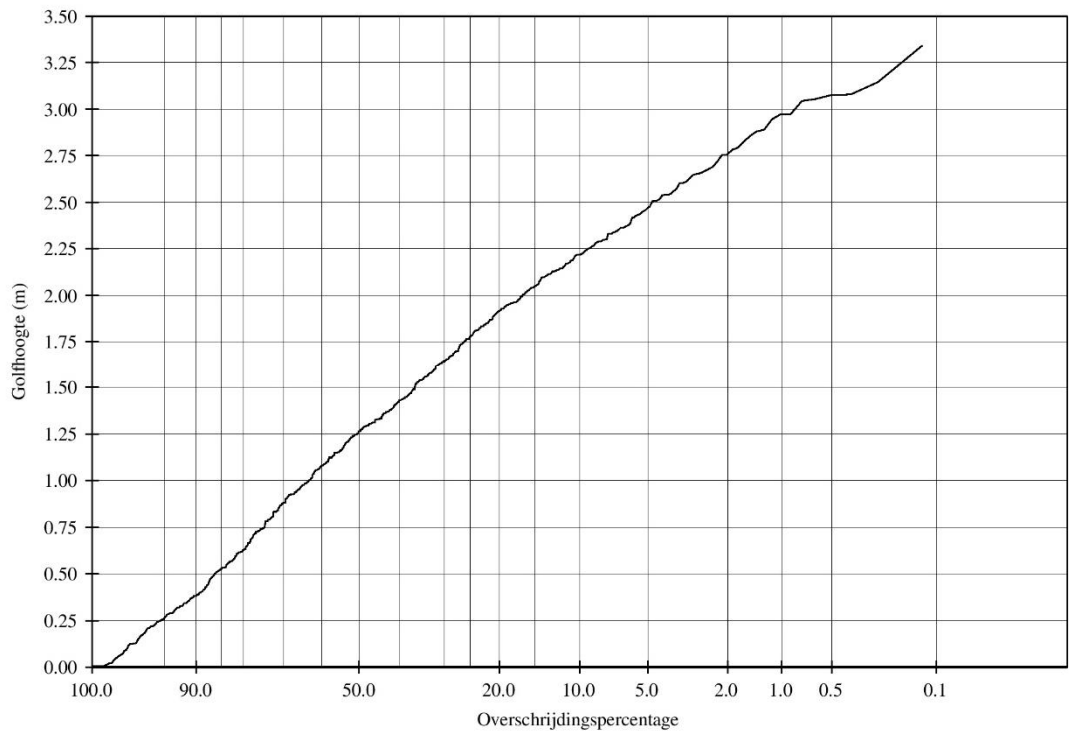


Fig. E-1 Golfhoogte-overschrijdingskromme proef B2-02

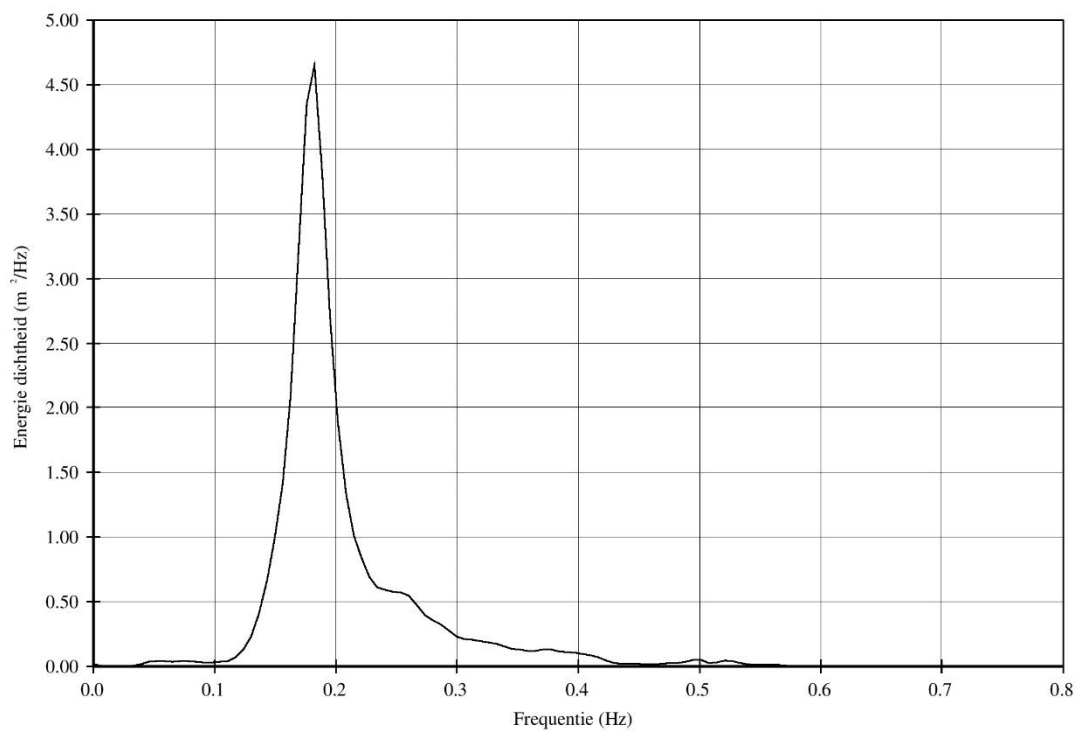


Fig. E-2 Spectrum van proef B2-02



Deltares

www.deltares.nl