



Eindrapport

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD)

Project	Toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen grond voor dijken
Projectleider	Erik Jolink – Waterschap Hunze en Aa's
Datum	06-04-2023
Versie	1.0

Verantwoording

Het eindrapport Onderzoek Geschiktheid Deltaklei is in de periode juli 2022 – maart 2023 opgesteld door:

- Maurits Kampen – Sweco
- Jos van Zuylen – Sweco

Met bijdragen van:

- Bernadette Wichman – Deltares
- Mark Klein Breteler – Deltares
- Harry van Essen – Deltares

De totstandkoming is inhoudelijk / procesmatig begeleid door:

- Henk van Norel – Waterschap Hunze en Aa's
- Marco Veendorp – Waterschap Hunze en Aa's / Arcadis

Naast de hierboven genoemde personen zijn door Sweco interviews afgenomen met: Marcel van den Heuvel (Van Oord Nederland / Kleirijperij), Martin van der Meer (Fugro / POV Dijkverbetering met Gebiedseigen Grond), Ulrich Förster (Deltares), Wouter van der Star (Deltares / Kleirijperij). De interviews zijn als bijlage opgenomen bij dit rapport.

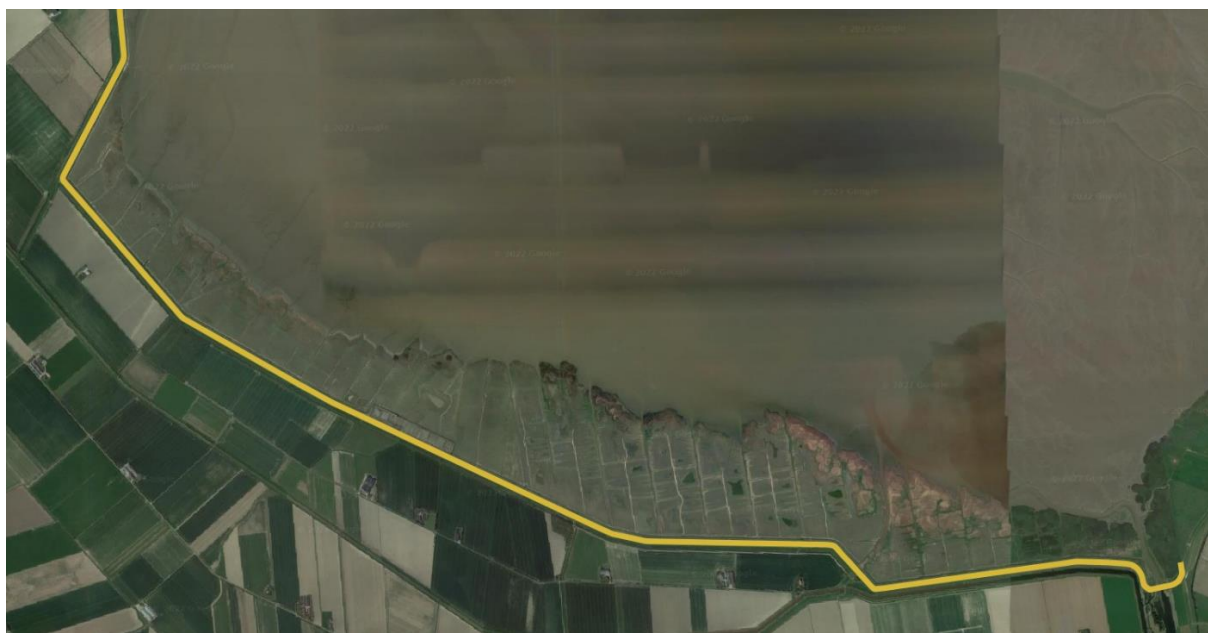
De resultaten zijn tussentijds besproken met en gereviseerd door het expertteam van dit onderzoek. Naast alle hier boven genoemde zijn de volgende personen hierin vaste teamleden: Albert Wiggers (Adviesteam Dijkontwerp), André Zijlstra (Wetterskip Fryslân), Diederik Bijvoet (HWBP), Erik Jolink (waterschap Hunze en Aa's), Jan-Willem Nieuwenhuis (waterschap Noorderzijlvest), Myron van Damme (RWS WVL / BOI).

Tenslotte hebben het IPM team van het waterschap, de uitvoeringsorganisatie van EcoShape (o.a. Arcadis, Boskalis, Van Oord Nederland), het regionale begeleidingsteam van het HWBP en diverse onderzoekers van Deltares een rol gespeeld bij totstandkoming van dit product.

Samenvatting

In het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is onderzocht of het mogelijk is om een dijk te bouwen van lokaal gewonnen klei van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Hiervoor is een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht is hoe slib om te vormen tot klei. In fase 3a van het demonstratieproject (ontwerpfase voor de realisatie) is gebleken dat er extra onderzoek nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. Dit onderzoek is beschreven in voorliggend rapport. In de realisatiefase (fase 3b) van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is 0,75 kilometer dijk aangelegd, die is opgebouwd met gebiedseigen klei van drie verschillende bronnen:

1. Kleirijperij locatie Valgenweg: gerijpte baggerslib uit het havenkanaal van Delfzijl.
2. Kleirijperij locatie Kwelder: gerijpte slib uit polder Breebaart.
3. Depotdijk: klei van de kwelder (Klutenplas).



Figuur S1 – Locatie demonstratieproject Brede Groene Dijk, langs de Dollard ter hoogte van Finsterwolde

Het waterschap Hunze en Aa's heeft samen met haar partners het onderzoeksvorstel opgezet. Dit Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD) is onderverdeeld in tien stappen:

1. Definitiefase en bronnenonderzoek
2. Materiaalonderzoek
 - a. Bestaande dijken
 - b. Aanleg proefdijk
3. Probabilistische berekeningen
 - a. OpenFoam berekeningen
 - b. Probabilistische berekeningen BGD
4. Structuurproeven met bakken klei
5. Evaluatie en tussenrapportage
6. Krimpgrens en erosiemeterproeven
7. Onderzoek diverse parameters

8. Analyse gevolgen afwijkende parameters (mineralogisch onderzoek)
9. Deltagootproeven
10. Eindrapportage

Voorliggend rapport is het eindrapport van dit onderzoek. In dit rapport zijn de onderzoeksstappen samengevat en zijn de opgedane inzichten gebundeld. Tevens bevat het een groene versie van een protocol (handreiking) voor het verantwoord gebruik van afwijkende kleien met betrekking tot ontwerp, uitvoering en beheer. Deze handreiking gaat in op de meerwaarde van de proeven/onderzoeken die in het OGD zijn uitgevoerd. Het eindrapport geeft daarmee ook een handelingsperspectief voor de toepassing van afwijkende kleien in de dijkenbouw in de rest van Nederland.

Na het OGD zijn nog niet alle vragen beantwoord. Dit zijn zowel vragen uit het oorspronkelijke onderzoeksplan als nieuwe vragen die gedurende het onderzoek zijn opgekomen. Dit betreft onder andere de ontwikkeling van structuurvorming van de klei van de BGD op langere termijn en het precieze effect van structuurvorming op erosiebestendigheid. Tevens zijn er nog vragen over het kunnen voorspellen van de erosiebestendigheid van nieuw (nog niet aangebracht) materiaal. Hoe de erosiebestendigheid samenhangt met de geotechnische en mineralogische eigenschappen van verschillende soorten klei is ook nog niet volledig bekend. In het nieuwe Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) bij waterschap Noorderzijlvest zal hier op verder worden gegaan.

Tenslotte vindt in de periode 2022 – 2025 ter plaatse van de aangelegde BGD een driejarig monitoringsprogramma plaats. Deze monitoring na aanleg focust zich op de ontwikkeling van de structuur in de klei, de ontwikkeling van de vegetatie (gras en kruiden) en richt zich tevens op eventuele schadegevallen na optredende stormen. In het laatste jaar van de monitoring vindt uitgebreid profielkuilonderzoek plaats.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	7
1.1	Aanleiding.....	7
1.2	Onderzoeksopzet OGD.....	11
1.3	Leeswijzer.....	14
2	Onderzoeksresultaten.....	15
2.1	Definitiefase en bronnenonderzoek.....	16
2.2	Materiaalonderzoek: bestaande dijken.....	19
2.3	Materiaalonderzoek: Proefdijk.....	25
2.4	Structuurproeven bakken klei.....	33
2.5	Deltagootproeven.....	39
2.6	Probabilistische berekeningen: OpenFOAM.....	48
2.7	Probabilistische berekeningen: berekeningen BGD.....	49
2.8	Krimpgrens en erosiemeterproeven.....	53
2.9	Onderzoek diverse parameters.....	55
2.10	Analyse gevolgen afwijkende parameters.....	57
3	Opgedane inzichten.....	59
3.1	Laag A: BGD.....	59
3.2	Laag B: gehele traject.....	64
3.3	Laag C: HWBP.....	65
3.4	Aangepast erosiemodel.....	65
3.5	Restpunten.....	67
4	Groene versie protocol.....	68
4.1	Ontwerp.....	68
4.2	Uitvoering.....	70
4.3	Beheer.....	71
5	Nawoord.....	72
6	Referenties.....	74

Bijlage A: Samenvatting PvA OGD

Bijlage B: Interviews

Onderliggende rapporten

Aan dit eindrapport liggen de volgende onderzoeksrapporten ten grondslag:

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 en Van Oord, 26 november 2020 (stap 2b).

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Definitie en Bronnenonderzoek. Deltares, 5 oktober 2021 (stap 1).

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk. Deltares, 20 december 2022 (stap 2a en 2b).

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2a: Onderzoek klei bestaande dijk. Deltares, 22 september 2022.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2b: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk. Deltares, 20 december 2022.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 4: Structuurvorming in klei van Kleirijperij na versnelde seizoenen. Deltares, 21 april 2021.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven. Deltares, 5 oktober 2021.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid. Deltares, 10 maart 2022.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras. Deltares, 14 september 2022.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei. Deltares, 15 september 2022.

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei. Deltares, 20 december 2022.

1 Inleiding

In het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is onderzocht of het mogelijk is om een dijk te bouwen van lokaal gewonnen klei van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib. Hiervoor is een koppeling gelegd met de Pilot Kleirijperij waarin onderzocht is hoe slib om te vormen tot klei. Uit het demonstratieproject is gebleken dat er extra onderzoek nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. Voorliggend rapport is het eindrapport van dit onderzoek.

Waterschap Hunze en Aa's (H&A) heeft samen met haar partners het onderzoek opgezet en uitgevoerd onder de noemer Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD) [1]. Het onderzoek is uitgevoerd onder de HWBP Kennis & Innovatie agenda (KIA) [2] en Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI).

Paragraaf 1.1 schetst de context waarbinnen dit onderzoek zich bevindt en gaat in op het demonstratieproject BGD en de Kleirijperij. Paragraaf 1.2 schetst de onderzoeksopzet en het doel van voorliggende rapportage. Paragraaf 1.3 geeft een leeswijzer voor dit document.

1.1 Aanleiding

1.1.1 *Demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD)*

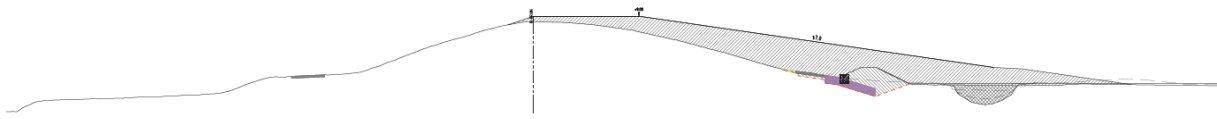
Het demonstratieproject BGD wordt uitgevoerd binnen het dijktraject Kerkhovenspolder-Duitsland (KHDP, normtraject 6-7). Aan de zeezijde grenst de kering aan het Natura 2000-gebied van de Dollard, onderdeel van de Waddenzee. Aan de landzijde grenst de kering aan polders van Noordoost-Groningen. De kwelders aan zeezijde worden beweid en aan de landzijde is het grondgebruik vooral akkerbouw. Er is weinig bebouwing in de directe omgeving van de kering. Figuur 1-1 geeft een dwarsprofiel en Figuur 1-2 geeft het dijktraject Kerkhovenspolder-Duitsland (KHPD = gele lijn) en de locatie van het demonstratieproject BGD weer (witte contour).

Hoofddoel van het demonstratieproject is om via de uitvoering van een pilot inzicht te verkrijgen in de vragen:

- In hoeverre kan een BGD worden gebouwd van lokaal gewonnen klei van de kwelder en klei gemaakt van zout (bagger)slib?
- In hoeverre is hierbij een koppeling met de slibwinning uit het Eems-Dollardsysteem mogelijk?

Dit gebeurt vooruitlopend op de verkenningsfase Dijkversterkingsproject KHPD waarin voor het gehele traject een voorkeursoplossing zal worden vastgesteld. Bij positieve resultaten zal de BGD als een van de mogelijke varianten binnen de verkenning KHPD worden meegenomen.

De BGD bestaat uit een flauw talud met een dikke laag klei met gras. Door de dijk op deze wijze op te bouwen, is geen harde bekleding nodig. De klei die hiervoor nodig is wordt verkregen uit de Kleirijperij en de nabijgelegen kwelder, zie paragraaf 1.1.2.



Figuur 1-1: Dwarsprofiel BGD



Figuur 1-2 Locatie demonstratieproject Brede Groene Dijk

**In vogelvlucht:
een sterke dijk van baggerslib en kwelderklei als wenkend perspectief voor de Dollardkust**



De dijk langs de Dollard in het noordoosten van Groningen moet versterkt worden. Uit de 3e toetsronde (VTV3) in 2010, en bevestigd in de huidige beoordelingsronde 2017 – 2023, blijkt de bekleding van de dijk niet aan de gestelde eisen te voldoen. Traditionele versterking betekent dat de grasbekleding vervangen wordt door asfalt. Waterschap Hunze en Aa's (H&A) wil onderzoeken of dit op een meer natuurlijke manier kan, met een Brede Groene Dijk (BGD). Langs de Duitse Dollardkust ligt ie er al: zo'n brede dijk met een flauw talud, voorzien van een dikke laag klei en begroeid met gras. Hier is men voor hun dijken altijd klei blijven gebruiken, daar waar wij in Nederland op veel plaatsen langs de kust zijn overgestapt op harde steen- of asfaltbekleding. In

het Deltaprogramma Waddengebied is de BGD bestempeld als innovatief dijkconcept. Een innovatieve dijkversterking dus, door terug te grijpen op oude technieken.

Voor het omvormen van de bestaande afgekeurde dijk tot een BGD is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD langs de Dollard 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 vanuit het achterland worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. H&A vroeg zich af of dit anders kon? Er zijn diverse alternatieve kleibronnen in de buurt van de dijk. Waarom gebruiken we die niet? In het demonstratieproject BGD onderzoeken we of dit kan. Samen met andere partijen kijken we naar de mogelijkheden van klei uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurland Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

In het demonstratieproject BGD wordt de zoektocht naar lokaal beschikbare klei gekoppeld aan een oplossing van het probleem van de Eems-Dollard – namelijk de vertroebeling van het estuarium. Door een kleiweg te graven op de kwelder - die na verloop van tijd door natuurlijke aanslibbing weer volledig is gevuld - ontstaat er een "kleimotor". Datzelfde geldt voor klei gemaakt van slib uit de brakwater natuurland Breebaart en baggerslib uit de haven van Delfzijl. De uitkomsten van het demonstratieproject BGD vormen de input voor de Verkenningsfase van de Dijkversterking KHPD. Bij positieve resultaten is de BGD een van de mogelijke alternatieven binnen de verkenning KHPD. Eén van onderzoeksvragen binnen het demonstratieproject BGD heeft betrekking op het werken in Natura 2000-gebied: "Kan klei worden gewonnen en gerijpt binnen het Natura 2000-gebied van de kwelders en kan in Natura 2000-gebied een BGD worden aangelegd? De ervaringen die we hiermee opdoen kan van grote betekenis zijn voor alle waterschappen, voor de ministeries van I&M en EZ en voor Rijkswaterstaat.

In het kader van het Deltaprogramma Waddengebied zijn twee verkennende studies uitgevoerd naar de haalbaarheid van de BGD. Uit indicatieve berekeningen blijkt dat de BGD goedkoper is dan een traditionele dijkversterking met asfalt of steenbekleding. In het rapport "Gevoeligheidsanalyse Innovatieve Dijken Waddengebied is bepaald dat een BGD voor ca. 38 km dijk langs de Waddenkust een kansrijk dijkconcept is. Ook op andere locaties in Nederland (zoals in Zeeland) kan een BGD een interessant alternatief zijn.

1.1.2 Relatie BGD met Kleirijperij

In het demonstratieproject BGD is 750 meter dijk aangelegd, die is opgebouwd met gebiedseigen klei van drie verschillende bronnen:

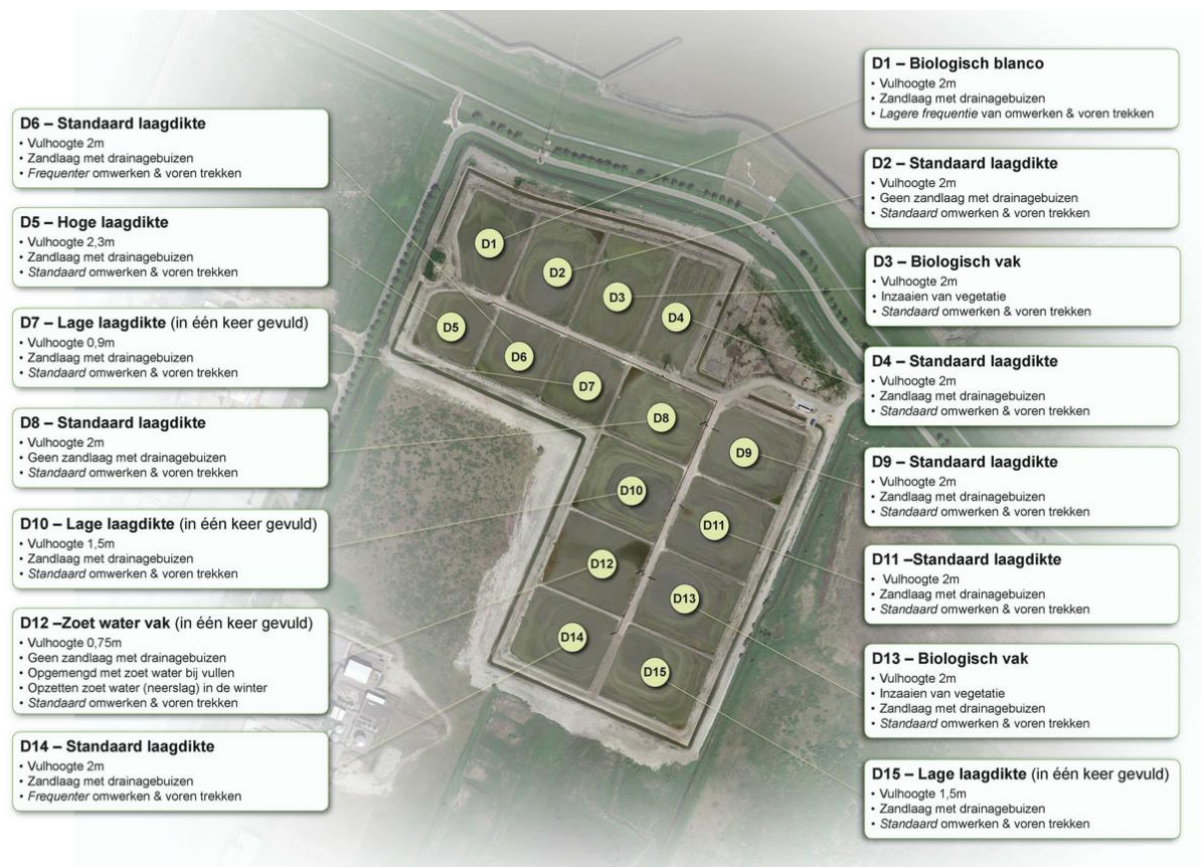
1. Kleirijperij locatie Valgenweg: gerijpte baggerslib uit het havenkanaal van Delfzijl, zie Figuur 1-3
2. Kleirijperij locatie Kwelder: gerijpte slib uit polder Breebaart, zie Figuur 1-4.
3. Depotdijk: klei van de kwelder (Klutenplas), zie ook Figuur 1-4.

De klei afkomstig uit de bronnen 1 en 2 is in de Pilot Kleirijperij omgezet van slib naar klei. In de Pilot Kleirijperij onderzoeken Rijkswaterstaat, de provincie Groningen, Groningen Seaports, waterschap H&A, 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.

Het waterschap heeft bij de totstandkoming van de samenwerkingsovereenkomst met de Kleirijperij een aantal eisen opgesteld ten aanzien van de kwaliteit waaraan de klei moet voldoen die vanuit de Pilot Kleirijperij aan het waterschap wordt geleverd. De eisen zijn afgeleid van het Technisch Rapport Klei voor Dijken (1996) [3]. Het betreft:

1. De gerijpte klei moet minimaal voldoen aan erosieklasse II.
2. De gerijpte klei dient een consistentie-index te hebben van minimaal 0,6.
3. Het zandgehalte (> 63 µm) is maximaal 40%.
4. Minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode.
5. Minder dan 25% gewichtsverlies bij de HCl-behandeling (kalkgehalte).
6. Het zoutgehalte (NaCl g/l bodemvocht) is minder dan 4%.
7. Geen significante bijmenging van puin, grind en dergelijke.
8. Weinig heldere (rode, bruine en gele, soms blauwe) verkleuringen.

De Kleirijperij is in 2018 gestart met het inbrengen van slib in de Kleirijperij depots op het terrein van Groningen Seaports. In het voorjaar van 2020 is het kwelderdepot gevuld met slib uit de polder Breebaart. De afgelopen jaren zijn er in de verschillende depotvakken verschillende methoden van bewerking uitgevoerd om het slib actief om te zetten in klei. Uit de pilot Kleirijperij is gebleken dat het niet mogelijk was de gebiedseigen klei binnen de rijpingsperiode aan de gestelde eisen ten aanzien van zout en organische stof te laten voldoen.



Figuur 1-3 Kleirijperij locatie Valgenweg



Figuur 1-4 Kleirijperij locatie kwelder. Ringdijken van depot gemaakt van klei uit de Klutenplas, verder op de kwelder

1.2 Onderzoekopzet OGD

1.2.1 Doel

Het doel van het onderzoek is de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid daarvan) van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten, aan de hand van het demonstratieproject BGD. Het onderzoek spitst zich toe op de toepasbaarheid van gebiedseigen klei uit drie bronnen waarmee het demonstratieproject BGD gaat worden aangelegd.

De resultaten worden uitgesplitst naar toepasbaarheid voor het demonstratieproject BGD, toepasbaarheid voor de opschaling van het concept BGD voor het dijktraject Kerkhovenpolder-Duitsland en toepasbaarheid elders binnen Nederland.

In het demonstratieproject wordt gewerkt met de empirische erosieformule van Mourik, waarmee bepaald is hoe dik de kleilaag in het ontwerp van de dijk moet worden. In deze formule is op basis van Deltagootproeven uit het verleden de relatie vastgelegd tussen enerzijds de hydraulische randvoorwaarden en geometrie en anderzijds de erosiesnelheid van de klei. Het ontwerp van de BGD wijkt echter af van de eerder beproefde dijken waarop de erosieformule is bepaald: de golfcondities zijn bij de BGD fors zwaarder en het talud is flauwer. Tevens is de invloed van kleieigenschappen destijds nauwelijks onderzocht en wordt in de formule alleen onderscheid gemaakt in klei en keileem.

Voor het demonstratieproject is dit onderzoek opgezet om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de eigenschappen van de gerijpte baggerspecie/het lokaal gewonnen kwelder materiaal en een referentie kleisoort, de erosie op een talud van 1:7 met een golfhoogte van circa 2,5 m – en de manier waarop met een aangepast ontwerp en adequate uitvoering kan worden gekomen tot een waterveilige dijk.

In zijn algemeenheid beoogt het onderzoek meer inzicht te krijgen in het verantwoord gebruik van afwijkende grondsoorten als bouw materiaal voor dijken. Hierdoor komen er grotere grondstromen met gebiedseigen grond beschikbaar voor dijkverbetering. Dit betekent ook een duurzamere en circulaire aanpak: lager gebruik primaire grondstoffen, vermindering van transportbewegingen, een

lager brandstofverbruik, lagere emissies van broeikasgassen, vermindering van de emissie van stikstof en minder overlast voor de lokale omwonenden. Daarmee is het onderzoek ook van waarde voor de POV-Dijkversterking met gebiedseigen grond (POV-DGG). Kortom: het onderzoek kent een groot maatschappelijk belang.

1.2.2 Onderzoeksstappen

1.2.2.1 Onderzoeksvoorstel

Om meer inzicht te verkrijgen in de toepasbaarheid, en dus van 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, heeft waterschap H&A samen met haar partners een onderzoeksvoorstel opgezet. De samenvatting van het plan van aanpak is opgenomen in Bijlage A.

Het Onderzoek Geschiktheid Deltaklei is onderverdeeld in tien stappen:

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

1.2.2.2 Relatie tussen onderzoeksstappen

Bovenstaande volgorde is niet zoals het onderzoek daadwerkelijk is uitgevoerd. Aangezien sommige onderzoeken op elkaar voortbouwen, worden de resultaten in dit rapport in de meest logische (grotendeels chronologische) volgorde behandeld. In Tabel 1-1 zijn de stappen en de volgorde van weergave in dit rapport gepresenteerd.

Stap 1 bestaat uit het verzamelen van kennis en ervaringen uit de literatuur, onderzoeken en projecten. Hier zijn onder andere proeven in voorgesteld die in latere stappen zijn uitgevoerd. In Stap 2a is de kleibekleding op de huidige Dollardijk onderzocht; aangezien dit ook van oorsprong kwelder materiaal is zegt dit mogelijk wat over de toekomstige eigenschappen van de gerijpte kleien. Stap 2b is de aanleg van de proefdijk met kleien uit de Kleirijperij (Valgenweg/Breebaart klei), Klutenplas klei en referentieklei en is gebruikt om de verwerkbaarheid van de materialen te onderzoeken. Tevens zijn profielkuilen gegraven in de proefdijk en is het materiaal met kleinschalige proeven onderzocht. Met de structuurproeven met bakken klei in Stap 4 is gepoogd vooruit te kijken naar de toekomstige eigenschappen van de onderzochte materialen.

Stap 9 omhelst de Deltagootproeven. Om het bereik van de resultaten te vergroten zijn in Stap 3a berekeningen uitgevoerd met OpenFOAM (software voor het oplossen van vergelijkingen voor het simuleren van fysische processen). berekeningen uitgevoerd. Stap 9 en 3b leidden tot nieuwe erosiecoëfficiënten en aangepaste erosieformules van Mourik. Hiermee zijn in Stap 3a probabilistische berekeningen uitgevoerd om de erosie van de kleilaag van de BGD te modelleren.

Voor Stap 5 (evaluatie en tussenrapportage) is een terugkoppeling geweest naar de expertgroep en het HWBP en is geen apart rapport voor opgesteld. Wel heeft dit geleid tot verdere invulling van de onderzoeken in Stap 6, 7 en 8. In Stap 6 en 7 zijn met kleinschalige proeven de kleien nader onderzocht, zowel de kleien uit de Kleirijperij inclusief proefdijk, als andere kleien ter referentie. Deze resultaten kunnen naast de grootschalige erosieproeven in de Deltagoot worden gelegd. In Stap 8 is gekeken naar de mineralogische samenstelling van de kleien om te onderzoeken of dit verband houdt met structuurvorming en erosiebestendigheid.

Stap 10 is het eindrapport en betreft voorliggende rapportage. Met het onderzoek als geheel is onderzocht of met de gerijpte kleien een veilig demonstratieproject BGD kan worden aangelegd en welke veranderingen in eigenschappen we hiervan mogen verwachten in de komende jaren.

Tabel 1-1: Stappenplan en beschouwde volgorde in dit rapport

Stappenplan uit plan van aanpak	Beschouwde volgorde in dit rapport
1. Definitiefase en bronnenonderzoek	1. Definitiefase en bronnenonderzoek
2a. Materiaalonderzoek: op bestaande dijken	2b. Materiaalonderzoek: proefdijk van materiaal uit Kleirijperij
2b. Materiaalonderzoek: proefdijk van materiaal uit Kleirijperij	2a. Materiaalonderzoek: op bestaande dijken
3a. Probabilistische berekeningen: OpenFoam berekeningen	4. Structuurproeven met bakken klei
3b. Probabilistische berekeningen: Probabilistische berekeningen BGD	9. Deltagootproeven
4. Structuurproeven met bakken klei	5. Evaluatie en tussenrapportage
5. Evaluatie en tussenrapportage	3a. Probabilistische berekeningen: OpenFoam berekeningen
6. Krimprens en erosiemeterproeven	3b. Probabilistische berekeningen: Probabilistische berekeningen BGD
7. Onderzoek diverse parameters	6. Krimprens en erosiemeterproeven
8. Analyse gevolgen afwijkende parameters	7. Onderzoek diverse parameters
9. Deltagootproeven	8. Analyse gevolgen afwijkende parameters (mineralogisch onderzoek)
10. Eindrapport	10. Eindrapport (voorliggende rapportage)

1.2.3 Onderzochte kleien

Het OGD richt zich op gebiedseigen klei van drie verschillende bronnen:

- Kleirijperij locatie Valgenweg: gerijpte baggerslib uit het havenkanaal van Delfzijl
- Kleirijperij locatie Kwelder: gerijpte slib uit polder Breebaart
- Depotdijk: klei van de kwelder (Klutenplas)

In het onderzoek van de OGD zijn naast bovenstaande de gerijpte kleien ook nog verschillende andere kleien onderzocht. Hiermee wordt een goed beeld verkregen van het gedrag van kleien van verschillende locaties en verschillende oorsprong:

- Dollarddijk van waterschap H&A
- Dijk bij Blija van Wetterskip Fryslân
- Lauwersmeerdijk van waterschap Noorderzijlvest
- Depotklei Nieuwe Statenzijl van waterschap H&A

1.2.4 Eindrapport Stap 10

1.2.4.1 *Groene versie protocol*

Het onderzoek sluit af met onderhavige eindrapportage (Stap 10). In het rapport worden de onderzoeksstappen samengevat en worden de opgedane inzichten gebundeld. Tevens bevat het een groene versie van een protocol (handreiking) voor het verantwoord gebruik van afwijkende kleien met betrekking tot ontwerp, uitvoering en beheer. Deze handreiking gaat in op de meerwaarde van de proeven/onderzoeken die in het OGD zijn uitgevoerd. Het geeft daarmee een handelingsperspectief voor de toepassing van afwijkende kleien in de dijkenbouw in de rest van Nederland.

Aan het erosierekenmodel is een aanpassing gedaan naar aanleiding van het OGD. De resultaten hiervan zijn toegepast op het ontwerp van de BGD. Andere onderzoeksresultaten zijn ook al zo veel mogelijk toegepast op de BGD.

1.2.4.2 *Generiek protocol*

Bij een bredere toepassing is een meer generiek protocol vereist. Deze optie is in beeld na de monitoringsperiode van de BGD (2022- 2025). Het generieke protocol (handreiking) kan worden opgesteld voor het inrichten van een Kleirijperij tot en met het ontwerpen van een BGD met gerijpte klei.

1.3 Leeswijzer

In dit rapport komen na deze inleiding de volgende onderdelen aan bod:

- Hoofdstuk 2: Dit hoofdstuk beschrijft per onderzoeksstap de resultaten , aan de hand van de volgorde uit Tabel 1-1.
- Hoofdstuk 3: Dit hoofdstuk beschouwt de inzichten uit het OGD onderzoek als geheel. Tevens zijn de proefresultaten van de kleien uit de Kleirijperij gebundeld.
- Hoofdstuk 4: Dit betreft de groene versie van het protocol voor het verantwoord gebruik van afwijkende kleien in het demonstratieproject BGD.
- Hoofdstuk 5 betreft het nawoord en hoofdstuk 6 de referenties.
- Tenslotte geeft bijlage A de samenvatting van het plan van aanpak OGD en bijlage B de verslagen van de interviews.

2 Onderzoeksresultaten

Het doel van het OGD is de toepasbaarheid – en voorspelbaarheid daarvan – van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de verschillende uitgevoerde onderzoeken, volgens de volgorde uit Tabel 1-1. Voor iedere stap zijn onderzoeksvragen opgesteld. Hierbij is onderscheid gemaakt in drie 'lagen':

- Laag A: richt zich op het demonstratieproject BGD
- Laag B: focust zich op opschaling richting het dijktraject Kerkhovenpolder – Duitsland
- Laag C: kijkt naar toepassing binnen het HWBP elders in Nederland

In dit hoofdstuk worden aan de hand van de onderzoeksrapporten alle stappen langsgelopen, waarbij de vooraf opgestelde onderzoeksvraag/hypothese per stap wordt beschreven en vervolgens wordt beschouwd. Hiervoor wordt gekeken welke onderliggende vragen beantwoord zijn, welke extra kennis er is opgedaan, maar ook welke kennisleemtes er nog aanwezig zijn.

Verdere context die niet in de onderzoeksrapporten genoemd wordt, zoals hypothesen of een link naar andere onderzoeksstappen, zijn in dergelijke tekstblokken toegevoegd in de tekst.

2.1 Definitiefase en bronnenonderzoek

Onderzoeksstap *Stap 1*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Definitie en Bronnenonderzoek Deltares, 5 oktober 2021*

2.1.1 Beschrijving onderzoeksstap

Deze stap bestaat uit het verzamelen van kennis en ervaringen uit de literatuur, onderzoeken en projecten. Hierbij is voornamelijk gekeken naar de toepassing van klei met een afwijkend (hoog) zout- en organisch stofgehalte en het lange termijn gedrag hiervan in andere projecten. Tevens is gekeken naar de verschillende methoden om erosie van klei te bepalen en of er een relatie gelegd kan worden tussen de erosiebestendigheid uit een functionele test en de geotechnische classificatie. De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Onderzoeksvragen bij Stap 1

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Welke functionele eisen gelden bij de BGD? Bijvoorbeeld eisen t.a.v. erosiebestendigheid, krimp, taludstabiliteit; bij aanleg de eisen t.a.v. de verwerkbaarheid.	Zijn er dijken gebouwd met vergelijkbare klei als die uit het plan?	Hoe kan de onzekerheid in de erosiecoëfficiënt worden ingeperkt? Zijn er landelijk ervaringen met afwijkende klei in dijken? Welk veld- en labonderzoek geeft voldoende inzicht in relatie tot alle relevante functionele eisen?
Welk veld- en labonderzoek geeft voldoende inzicht in relatie tot de functionele eisen bij de BGD?		

2.1.2 Beantwoorde vragen

2.1.2.1 Laag A

Aangezien het ontwerp van de BGD ten tijde van het onderzoek al in grote lijnen bekend was (uit DO rapport BGD [5]), is gefocust op de aspecten erosiebestendigheid en scheurvorming in het buitentalud. De verwerkbaarheid is met onderzoeksstap 2b (aanleg Proefdijk) nader onderzocht.

Voor wat betreft scheurvorming is de krimpgrens een nuttige parameter. De krimpgrens is het vochtgehalte bij de overgang van halfvaste naar vaste toestand. Bij lagere vochtgehalten krimpt de grond niet verder. De krimpgrens kan bepaald worden met de standaardtest ASTM 4943-18, waarbij natte grond wordt gedroogd tot er geen volumeverlies meer optreedt. Scheurvorming is verder onderzocht in onderzoeksstap 4 (structuurproeven, paragraaf 2.4) en de bepaling van de krimpgrens in onderzoeksstap 6 (paragraaf 2.8).

Voor wat betreft erosiebestendigheid is onderzocht waar een relatie gelegd kan worden tussen de erosiebestendigheid uit een functionele test en de geotechnische classificatie. De volgende testen zijn relevant:

- Roto-erosiemeter proef. De erosiebestendigheidsklassen van deze proef corresponderen goed met het erosiebestendigheidendiagram uit plasticiteitsindex en vloeigrens. Het testen

van afwijkende klei is nog niet eerder uitgevoerd. Roto-erosiemeterproeven op klei uit de Proefdijk is uitgevoerd onder onderzoeksstap 2b (paragraaf 2.3) en op klei uit de Kleirijperij is uitgevoerd onder onderzoeksstap 6 (paragraaf 2.8).

- Torvane proef. Hiermee kan de ongedraineerde schuifsterkte s_u in het veld worden bepaald. In de literatuur wordt dit als invloedrijke parameter voor het optreden van erosie gezien, waarbij klei afschuift nabij een scheur onder invloed van golfklapbelasting. Er wordt aanbevolen verbanden te leggen tussen ongedraineerde schuifsterkte en erosie-proeven. In de proefkuilbeschrijvingen van de bestaande Dollardijk in onderzoeksstap 2a (paragraaf 2.2) en van de Proefdijk in onderzoeksstap 2b (paragraaf 2.3) wordt hier nader op ingegaan.
- Triaxiaalproef. Hiermee kan de ongedraineerde schuifsterkte s_u in het laboratorium worden bepaald, waarbij het gedrag van het materiaal tijdens vervorming beter kan worden gevolgd. In het laboratoriumonderzoek van de Proefdijk van onderzoeksstap 2b (paragraaf 2.3) wordt hier nader op ingegaan.

Welke functionele eisen nodig zijn t.a.v. bijvoorbeeld erosiebestendigheid, krimp en verwerkbaarheid is in het literatuuronderzoek niet gevonden. In latere onderzoekstappen wordt hier nader op ingegaan.

2.1.2.2 Laag B

In het onderzoek zijn meerdere cases gevonden waarin gerijpte klei is toegepast:

- Aanleg Dollarddijk (jaren '80). De bekleding aan de buitenzijde van de dijk is afkomstig van gewonnen kwelderklei. De klei had een hoog organisch stofgehalte en vanwege de herkomst mag ook worden verwacht dat het een hoog zoutgehalte had. De kwelderklei is eerst gebruikt als perskade voor de buitenwaartse versterking met zand, daarna is de klei gebruikt op het buitentalud. Deze handeling heeft midden in een koude winter (vorst) plaatsgevonden. De grasgroei was in het begin vertraagd, na een jaar was het buitentalud nog kale grond. De klei was erg nat bij het aanbrengen, na aanleg is er veel inspanning geweest om (krimp)scheuren te herstellen. Bij metingen in 1993 is was het zoutgehalte van de klei erg laag.
- Dredgedijk project (2012). In het kader van het Europese Interreg project is onderzoek gedaan naar de toepassing van gerijpte brakke en organisch rijke baggerspecie op dijktaaluds. Verschillende typen baggerspecie zijn gedurende verschillende tijdsperioden (2-5 jaar) gerijpt. Bij de rijpingsvelden is een grondconstructie aangelegd met taludbekleding van de gerijpte baggerspecie. Door de natte zomer van 2011 was het materiaal te nat om minstens 90% van de maximale proctordichtheid te halen. Door de daarop volgende droge zomermaanden is veel scheurvorming opgetreden. Op de grondconstructie zijn overloopprouwen uitgevoerd. De erosie is zeer beperkt gebleven. Uitspoeling van zout en afbraak van organisch materiaal op langere termijn zijn niet onderzocht.
- Proefophoging Maasvlakte (1995). In dit project is gekeken naar verwerkbaarheidseigenschappen van één jaar gerijpte klei uit baggerspecie. De aanleg vond plaats onder geschikte weersomstandigheden en is zonder verdere problemen uitgevoerd, hoewel het watergehalte aan de hoge kant was. Resultaten van metingen na 5 jaar zijn niet bekend.
- Emanuelpolderdijk (2013). Hier is overwogen om klei uit de voor de dijk gelegen schor te gebruiken. De klei voldeed aan de normen voor erosiebestendigheidsklasse 1 klei, behalve het te hoge zoutgehalte. Omwille van de planning is deze klei uiteindelijk niet gebruikt.

Uit bovenstaande cases zijn niet direct conclusies of aanbevelingen gekomen die nuttig zijn voor OGD.

2.1.2.3 Laag C

Voor de landelijke ervaringen met afwijkende klei in dijken, zie Laag B. Voor mogelijke veld- en labonderzoeken om inzicht te krijgen in relevante functionele eisen, zie laag A.

Mogelijkheden om de onzekerheid in erosiecoëfficiënt in te perken zijn in de onderzoeksstap niet belicht.

2.1.3 Restpunten

Om de erosie van klei als gevolg van golven te berekenen wordt gebruik gemaakt van de formule van Mourik [4]. Een belangrijke parameter hierin is de erosiecoëfficiënt. De huidige toepassing is niet geschikt voor de afwijkende klei. Mogelijkheden om de onzekerheid in erosiecoëfficiënt in te perken zijn in onderzoeksstap 1 niet onderzocht. Met de Deltagootproeven van Stap 9 (paragraaf 2.5) is voor de verschillende kleisoorten een nieuwe erosiecoëfficiënt afgeleid.

2.2 Materiaalonderzoek: bestaande dijken

Onderzoeksstap *Stap 2a*

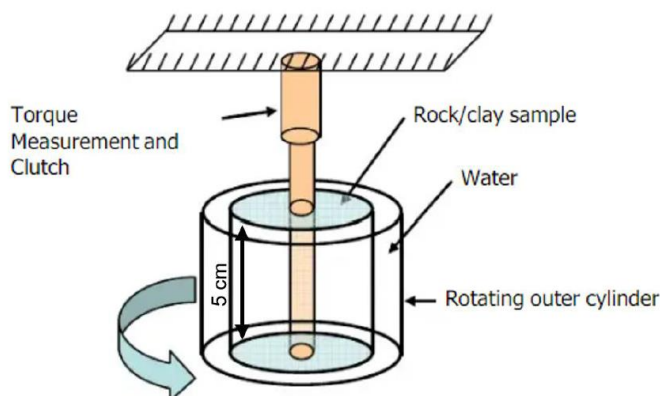
Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk, Deltares 20 december 2022*

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk Deltares, 22 september 2022

2.2.1 Beschrijving onderzoeksstap

Op de Dollarddijk is door middel van drie profielkuilen van circa 1 x 1 x 1 m de huidige dijkbekleding beschreven. Deze klei is lokaal gewonnen kwelderklei die circa 30 jaar geleden is aangebracht. De beschrijving geeft daarmee inzicht in de meerjarige ontwikkeling van dergelijke gebruikte klei. In iedere kuil zijn op een diepte van 0,45 m vier bussen gestoken, waarvan er twee zijn gebruikt om in het laboratorium verdere grondeigenschappen af te leiden en twee om roto-erosiemeterproeven op uit te voeren.

Het apparaat voor de roto-erosiemeterproef bestaat uit een met water gevulde trommel met schoepen die rond een cilindrisch grondmonster van ongeveer 6,6 x 5,0 cm draait. Door het ronddraaien van de trommel stroomt water rond het stilstaande monster, waardoor een erosieve kracht op het monster wordt uitgeoefend (in de Deltagoot treden er overigens stroomsnelheden op die met 5 à 10 m/s aanzienlijk hoger zijn dan die in de roto-erosiemeterproef). De door het stromende water uitgeoefende kracht wordt tijdens de proef constant gemeten en vastgelegd. Deze kracht wordt op basis van het actuele monsteroppervlak omgezet in een schuifspanning. Het toerental (of stroomsnelheid) wordt stapsgewijs opgevoerd totdat een afname van 30% van de massa is opgetreden, wat als bezwijkcriterium wordt aangehouden. De massa-afname van het monster bij erosie wordt gemeten tijdens pauzemomenten waarbij de trommel stilstaat.



Figuur 2-1: Principe roto-erosiemeter [10]

Er zijn zowel standaardproeven als gedetailleerde proeven uitgevoerd, waarbij in de gedetailleerde de geleidelijke erosie voorafgaand aan het bezwijktoerental is onderzocht. Met de proeven kan een indeling worden gemaakt in erosieklassen, op basis van het bezwijktoerental, zie Figuur 2-2.

Uit de gedetailleerde proeven kunnen de in de literatuur meer gangbare erosieparameters worden afgeleid: de kritieke hydraulische schuifspanning τ_c [Pa] en erosiegevoelheidscoëfficiënt k_d [mm/(Pa.s)].

Groep (aantal zoet en zout)	bezwijk toerental	snelheid van schoepen	opmerkingen
a (3)	<100	0.7 m/s	zeer erosiegevoelig
b (5)	100- <600	0.7- 4 m/s	zeer erosiegevoelig
c (2)	600- <900	4 - 6 m/s	erosiegevoelig
d (6)	900- 1150	6 - 8 m/s	matig tot weinig erosiegevoelig
e (16)	>1150	8 m/s	weinig erosiegevoelig

Figuur 2-2: Klasse indeling op basis van bezwijktoerental na 30% gewichtsverlies in roto-erosiemeterproef [Grondmechanica Delft 1988] De schoepen aan de roterende cilinder geven een waterstroming die op 1 mm vanaf het monsteroppervlak 0,14 m/s is bij toerental 100 tpm (toeren per minuut) en 1,6 m/s bij toerental 1200 tpm

Vanuit het OGD onderzoek is het om twee redenen interessant om te kijken hoe de klei op de Dollardijk zich over de tijd heeft ontwikkeld. Ten eerste is de huidige Dollardijk ook gemaakt met klei uit de kwelder. Daarmee zijn lessen bij de aanleg, maar ook metingen op het huidige materiaal interessant, omdat de klei veel kan vertellen over het gedrag van kwelderklei tot circa 40 jaar na aanleg. Ten tweede, in het ontwerp van het demonstratieproject BGD blijft de huidige kleilaag behouden en blijft deze onderdeel uitmaken van de kering.

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-2. De in lichtgrijs gedrukte onderdelen vallen onder onderzoeksstap 2b: materiaalonderzoek met een proefdijk (zie paragraaf 2.2). Ervaringen met een hoger zout- en organische stofgehalte zijn behandeld in onderzoeksstap 1 (zie paragraaf 2.1).

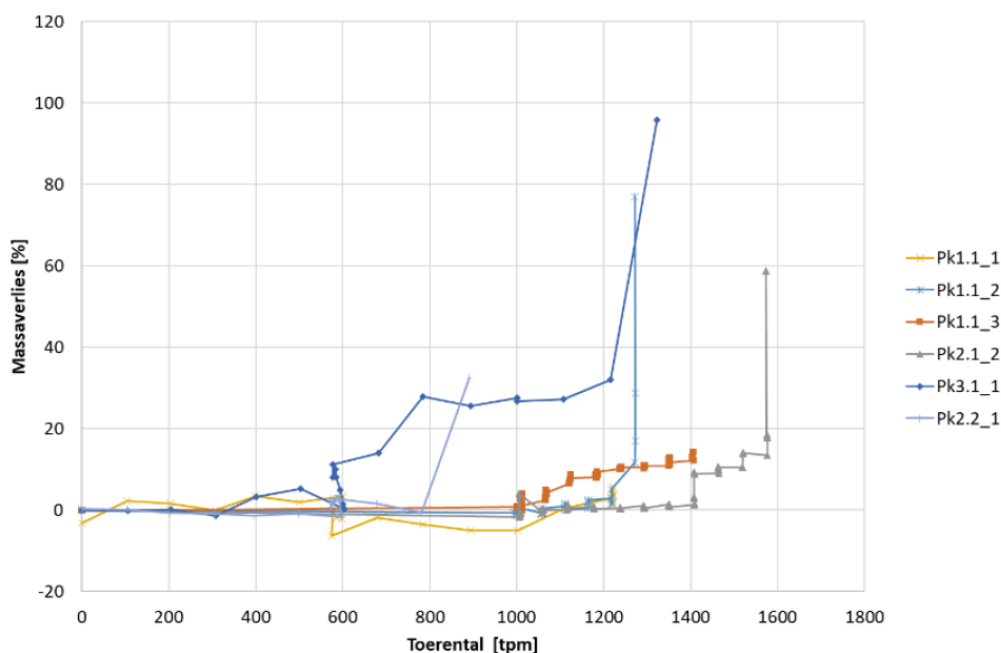
Tabel 2-2 Onderzoeksvragen bij Stap 2

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
<p>Is de klei uit de Kleirijperij afdoende gerijpt om toe te passen?</p> <p>Kunnen we gemakkelijk een proefdijk aanleggen met klei uit de Kleirijperij?</p> <p>Voor welke range aan zoutgehalte en organisch stofgehalte zijn al positieve ervaringen, b.v. bij Projectbureau Zeeweringen?</p> <p>In welke erosiebestendighheidsklasse valt de onderzochte klei?</p>	<p>Wat is het lange termijn gedrag van vergelijkbare klei in dijken langs de Waddenzee?</p> <p>Wat kunnen we leren van ervaringen elders in NL?</p>	<p>Hoe kunnen functionele testen aantonen dat de klei in de vereiste erosie-bestendighheidsklasse valt?</p>

2.2.2 Beantwoorde vragen

2.2.2.1 Laag A

Met de roto-erosiemeterproeven is op kleinschalige manier de erosiebestendigheid van de huidige bekleding op de Dollarddijk onderzocht. Uit de proeven is gebleken dat de eigenschappen aanzienlijk kunnen verschillen, zie Figuur 2-3. Een aantal monsters is als 'weinig erosiegevoelig' geclassificeerd en een aantal monsters als 'erosiegevoelig'. Uit analyse van de boorkernen blijkt dat het zand- en lutumgehalte sterk kan verschillen, wat effect heeft op de erosiegevoeligheid en mogelijk een verklaring is voor de gevonden verschillen. Ook de toestand van de klei tijdens belasten (in termen van vochtgehalte, structuurvorming, belastinggeschiedenis) is van invloed op de erosiegevoeligheid.



Figuur 2-3: Verloop van het massaverlies van de monsters als functie van het toerental

Van de weinig erosiegevoelige klei kon het erosieproces nader worden geanalyseerd. Dit leverde waarden op voor de erodeerbaarheid (erosiegevoeligheidscoëfficiënt) en erosiebestendigheid (kritieke schuifspanning) op. Deze erosieparameters worden afgeleid uit de berekende monsterdiameter en de gemeten schuifweerstand (weerstandskracht tegen de uitgeoefende stromingskracht) in de tijd.

In Stap 2b (paragraaf 2.3) en Stap 6 (paragraaf 2.8) wordt de roto-erosiemeter ook gebruikt op de kleien uit respectievelijk de Proefdijk en Kleirijperij. Van deze kleien kan vervolgens de link worden gelegd naar de erosiebestendigheid die gevonden is in de Deltagoot van stap 9 (paragraaf 2.5).

2.2.2.2 Laag B

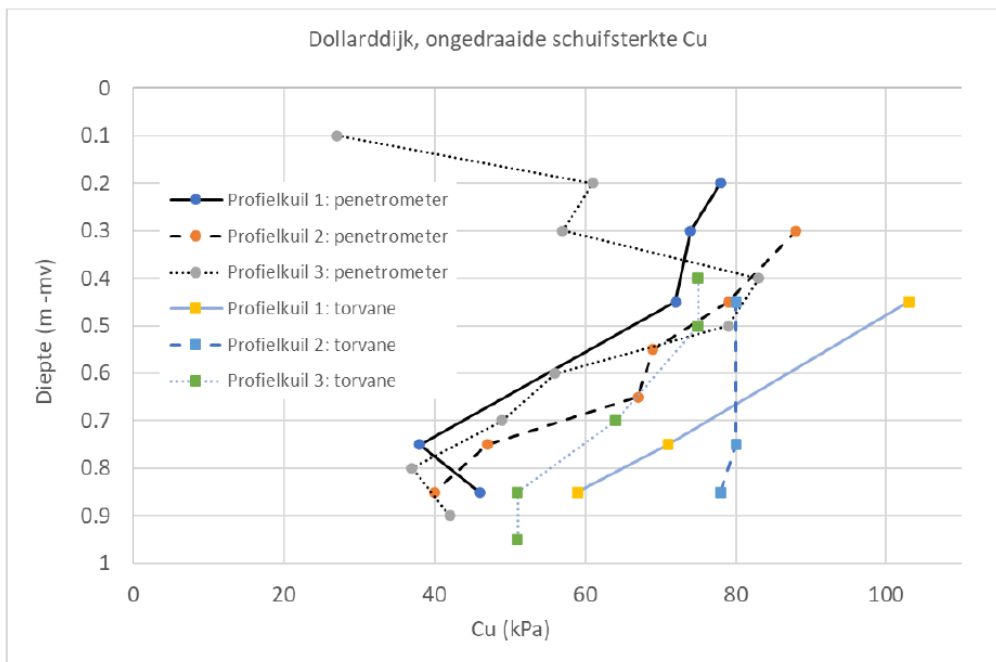
De kleibekleding van de Dollarddijk is in de jaren '80 aangelegd met kwelderklei met een verhoogd zoutgehalte en organisch stofgehalte. Met het profielkuilenonderzoek is onderzocht hoe deze klei nu er bij ligt. Gemiddeld over de drie profielkuilen omvat:

- De bovenste 10 cm de zodelaag, bestaande uit gras met grond met kruimels, bestaande uit een losse fijne structuur.
- Van 10 cm tot circa 35 cm onder maaiveld is de grond een losse fijne structuur, bestaande uit brokjes van 5-30 mm.
- Van circa 30 cm tot circa 60-70 cm onder maaiveld krijgt de klei een dichte grove structuur, met brokken van 30-50mm en 10% poriënruimte.
- Daaronder is de klei massief (nagenoeg geen scheuren) of klei met een dichte structuur van minder dan 5% poriënruimte.



Figuur 2-4: Foto van profielkuil. Bovenin de zodelaag, met daaronder de fijne losse structuur tot circa 0,35 m - mv. Daaronder wordt de structuur grover en steeds dichter. Direct boven het dijkzand is de klei vrijwel massief [11]

Zowel de handvin- als pocket-penetrometingen laten zien dat de ongedraineerde schuifsterkte afneemt met de diepte. Uit de pocket-penetrometingen blijkt dat op 30 cm diepte de ongedraineerde schuifsterkte een factor twee groter is dan onderin de kuilen op 80 cm diepte, zie Figuur 2-5. Dit geeft een indruk van het verloop van de consistentie en structuurvorming in de diepte. De afname in schuifsterkte zal met name veroorzaakt worden door een toenemend vochtgehalte, waardoor het materiaal plastischer wordt.



Figuur 2-5: Indicatieve waarden voor de ongedraineerde schuifsterkte S_u uit de drie profielkuilen met pocket-penetrometer en torvane [11]

2.2.2.3 Laag C

Rotro-erosiemeterproeven zijn ingezet om op kleinschalige manier de erosiebestendigheid te onderzoeken. Er zijn hierin erosiegevoelige lagen gevonden. Dit is in lijn met de resultaten van het Deltagootonderzoek (onderzoeksstap 9) dat op deze kleibekleding is uitgevoerd, zie paragraaf 2.9.

Het is bekend dat de mate van structuurvorming een groot effect heeft op de erosiesnelheid onder golfaanval. Met de huidige (relatief kleine) roto-erosiemeterproef meet je niet het effect van grote structurelementen, omdat de monsters genomen zijn op 0,5 m – mv of dieper, waar de bodemstructuur dichter is. Ook zijn de monsters dusdanig klein dat grote structurelementen het monster niet representatief voor het totale gedrag van de kleilaag maken.

Om een indruk te krijgen van de heterogeniteit wordt geadviseerd om bij volgende proeven op kortere afstand in de bestaande dijkbekleding meerdere proeven uit te voeren. Daarbij wordt het ook geadviseerd om van elk beproefd monster enkele geotechnische bepalingen uit te voeren, zoals plasticiteitsindex en korrelverdeling. Hiermee kunnen mogelijk relaties tussen geotechnische eigenschappen en erosiebestendigheid beter worden vastgesteld.

Over de relatie tussen de roto-erosiemeterproef met andere functionele testen wordt nader ingegaan in onderzoeksstap 2b (onderzoek Proefdijk) en onderzoeksstap 6 (krimpgrens en erosiemeterproeven van klei uit de Kleirijperij), zie paragraaf 2.3 en 2.8.

Met de huidige (relatief kleine) roto-erosiemeterproef meet je niet het effect van grote structurelementen, terwijl heterogeniteit een grote invloed kan hebben op de resultaten. Om het gat te dichten tussen de kleine roto-erosiemeterproef en een Deltagootonderzoek zijn er plannen om een grotere roto-erosiemeter te maken. Hiermee zouden monsters met een diameter van 40 cm en een hoogte van 50 cm of 100 cm beproefd kunnen worden.

2.2.3 Restpunten

Ervaringen elders in Nederland zijn in deze onderzoeksrapportage niet behandeld. Ervaringen met een hoger zout- en organische stofgehalte zijn behandeld in onderzoeksstap 1 (zie paragraaf 2.1).

2.3 Materiaalonderzoek: Proefdijk

Onderzoeksstap *Stap 2b*

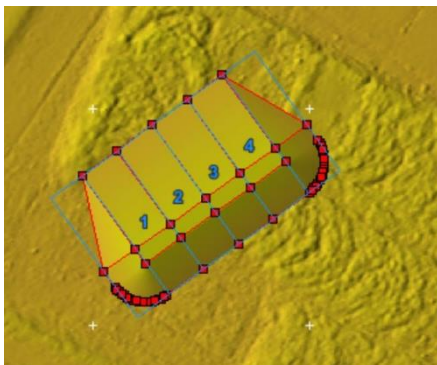
Onderzoeksrapport *De Aanleg van een Proefdijk; Verslaglegging van uitvoeringsaspecten en verdichtingsmetingen van een Proefdijk bestaande uit gebiedseigen klei uit de Eems-Dollard t.b.v. Demonstratieproject Brede Groene Dijk van het waterschap Hunze en Aa's
Boskalis en Van Oord, 26 november 2020*

*Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk;
Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk, Deltares 20 december 2022*

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2b: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk, Deltares 24 oktober 2022

2.3.1 Beschrijving onderzoeksstap

Als onderdeel van het onderzoek is in september 2020 een proefdijk aangelegd, bestaande uit verschillende gebiedseigen materialen: klei uit Kleirijperij Delfzijl (Valgenweg), klei uit Kleirijperij Kwelder, klei uit de Klutenplas en klei uit waterschapsdepot Nieuwe Statenzijl (deze klei is beschikbaar voor reparaties en geldt in de proef als referentiemateriaal). Bij het realiseren van de Proefdijk is gekeken naar de verwerkbaarheid van de materialen en naar de juiste methode van verdichting in combinatie met het ophoogschema.



Segment 1: klei Nieuwe Statenzijl
Segment 2: Kleirijperij Delfzijl (Valgenweg)
Segment 3: Kleirijperij Kwelder
Segment 4: Klutenplas klei

Figuur 2-6: Ontwerp Proefdijk [7]

De Proefdijk bestaat uit vier segmenten van elk van de vier partijen klei. De Proefdijk is opgebouwd met een helling van 1:7 richting noordwesten. Het terrein is voor en na de aanleg van de Proefdijk ingemeten met een drone. Er zijn zakbakens in de kruin van de Proefdijk geplaatst. De zakbakens geven inzicht of eventuele zakking heeft plaatsgevonden in de ondergrond of in de aangebrachte kleilaag van de Proefdijk.

In april 2022 is in elk segment een profielkuil van ruim een meter diep gegraven en is een beschrijving van de kleilaag in de diepte gegeven aan de hand van visuele beschrijving, de pocket penetrometer en de torvane. In de profielkuilen zijn verschillende monsters gestoken voor laboratoriumproeven: roto-erosiemeterproeven, krimpgrensbepaling, triaxiaalproeven, watergehalte en zoutgehalte.

Gedurende het project werd duidelijk dat de Kleirijperij-kleien niet zouden voldoen aan de standaard eisen aan het maximaal zoutgehalte en organische stofgehalte. Omdat er wel vertrouwen was in de toepassing van deze kleien is gesteld dat deze eisen kunnen vervallen, mits in ieder geval is aangetoond dat de klei verwerkbaar en verdichtbaar is. Een consistentie-index tussen de 0,6 en 1,0 is hiervoor aangehouden. De aanleg van de Proefdijk heeft een belangrijke bijdrage gehad in het aantonen van de juistheid van deze gestelde eis.

De heroverweging van de gestelde eisen is richting de Programmadirectie HWBP vastgelegd in de memo 'Heroverweging klei eisen zoals opgenomen in de samenwerkingsovereenkomst (SOK) pilot Kleirijperij' van het IPM-team Brede Groene Dijk in samenwerking met de onderzoekspartners [6].

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-3. De in lichtgrijs gedrukte onderdelen vallen onder onderzoeksstap 2b: materiaalonderzoek van bestaande dijken (zie paragraaf 2.2). Ervaringen met een hoger zout- en organische stofgehalte in andere projecten met gerijpte mariene klei zijn behandeld in onderzoeksstap 1 Laag B (zie paragraaf 2.1).

Tabel 2-3 Onderzoeksvragen bij Stap 2

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
<p>Is de klei uit de Kleirijperij afdoende gerijpt om toe te passen?</p> <p>Kunnen we gemakkelijk een proefdijk aanleggen met klei uit de Kleirijperij?</p> <p>Voor welke range aan zoutgehalte en organisch stofgehalte zijn al positieve ervaringen, b.v. bij Projectbureau Zeeweringen?</p> <p>In welke erosiebestendigheidsklasse valt de onderzochte klei?</p>	<p>Wat is het lange termijn gedrag van vergelijkbare klei in dijken langs de Waddenzee?</p> <p>Wat kunnen we leren van ervaringen elders in NL?</p>	<p>Hoe kunnen functionele testen aantonen dat de klei in de vereiste erosie-bestendigheidsklasse valt?</p>

2.3.2 Beantwoorde vragen

2.3.2.1 Laag A

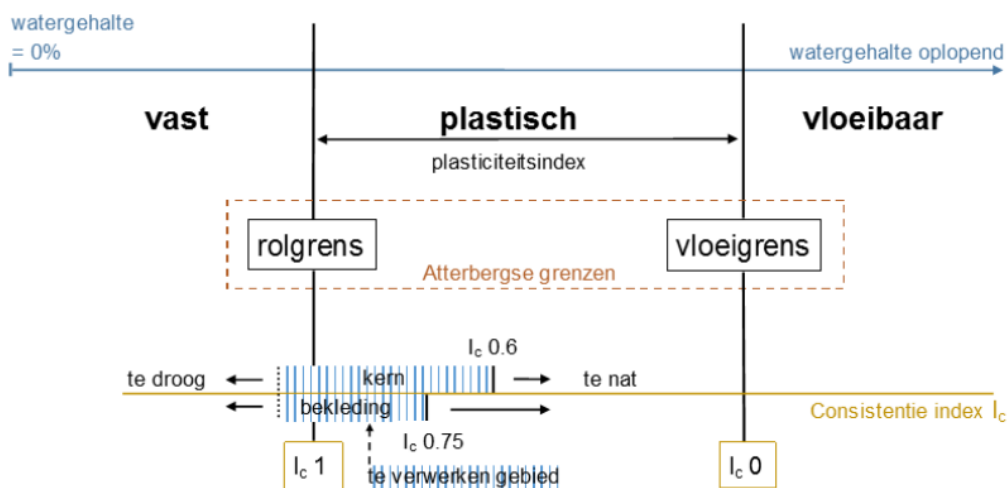
Aanleg proefdijk

Het TR Klei voor Dijken stelt eisen aan de verwerkbaarheid van de klei [3]. Deze zijn gebaseerd op de consistentie-index en hebben als doel om na aanleg te voorkomen dat scheurvorming ontstaat. De consistentie-index (I_c -waarde) geeft aan hoe het actuele vochtgehalte van klei zich verhoudt tot de vloeigrens en de uitrolgrens (samen met de krimpgrens de Atterbergse grenzen genoemd). Bij de

uitrolgrens geldt dat $I_c = 1$ en bij de vloeigrens is $I_c = 0$. Als het vochtgehalte bij aanleg te hoog is, zal na aanleg nog veel water uittreden, wat leidt tot krimp en wellicht tot meer scheurvorming. In het TR Klei voor Dijken wordt een $I_c > 0,6$ voorgeschreven voor materiaal in de kern en $I_c > 0,75$ voor toepassing als bekleding.

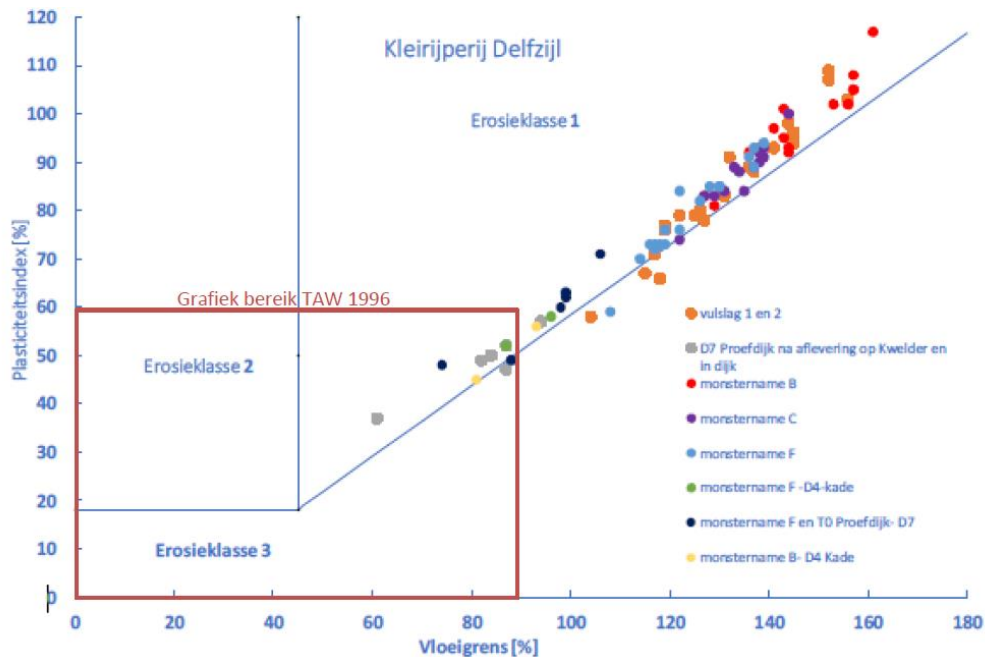
Om de klei met een voldoende hoge dichtheid te kunnen aanleggen, mag het watergehalte van de klei tijdens verwerking niet te hoog zijn. Bij een te hoog watergehalte zal de klei tijdens het compacteren of aantrillen wegpersen omdat het water door de geringe waterdoorlatendheid niet weg kan. De benodigde hogere dichtheid wordt dan niet behaald. Voor deze 'mogelijkheid tot verwerking' is geen eis vastgesteld. Als ook hier gebruik wordt gemaakt van de consistentie-index, zal het watergehalte lager moeten zijn dan het watergehalte behorend bij een I_c -waarde van 0,6.

Naast de verwerkbaarheid in relatie tot het watergehalte kan bij een hoog watergehalte sowieso geen hoge droge dichtheid worden gekregen. Daarnaast hangt de verwerkbaarheid ook samen met de laagdikte en gebruikte apparatuur.



Figuur 2-7: Relatie tussen Atterbergse grenzen, consistentie-index I_c en eisen aan I_c [7]

Of bovenstaande eisen ook gelden voor klei gemaakt van marien slib is niet op voorhand te zeggen. Het TR Klei voor dijken is namelijk opgesteld voor laag organische kleien, die een lagere vloeigrens hebben. Zowel organische stof als zout zorgen ervoor dat de klei een groter water absorberend vermogen heeft. In Figuur 2-8 is de erosiebestendigheidsklasse van de toegepaste kleien opgenomen (op basis van Atterbergse grenzen). Te zien is dat de kleien uit de kleirijperij buiten het bereik van de figuur liggen.



Figuur 2-8: Erosiebestendigheidsklasse uit monstername t.b.v. de Proefdijk [7]

De Proefdijk is laagsgewijs opgebouwd uit lagen van 40 cm die zijn verdicht tot 20 tot 30 cm. De klei is verdicht door met een 25 tons rupskraan versprend over de lagen te klei te rijden. Bij iedere laag is in het midden van de laag een controlemeting uitgevoerd om de verdichting te controleren.

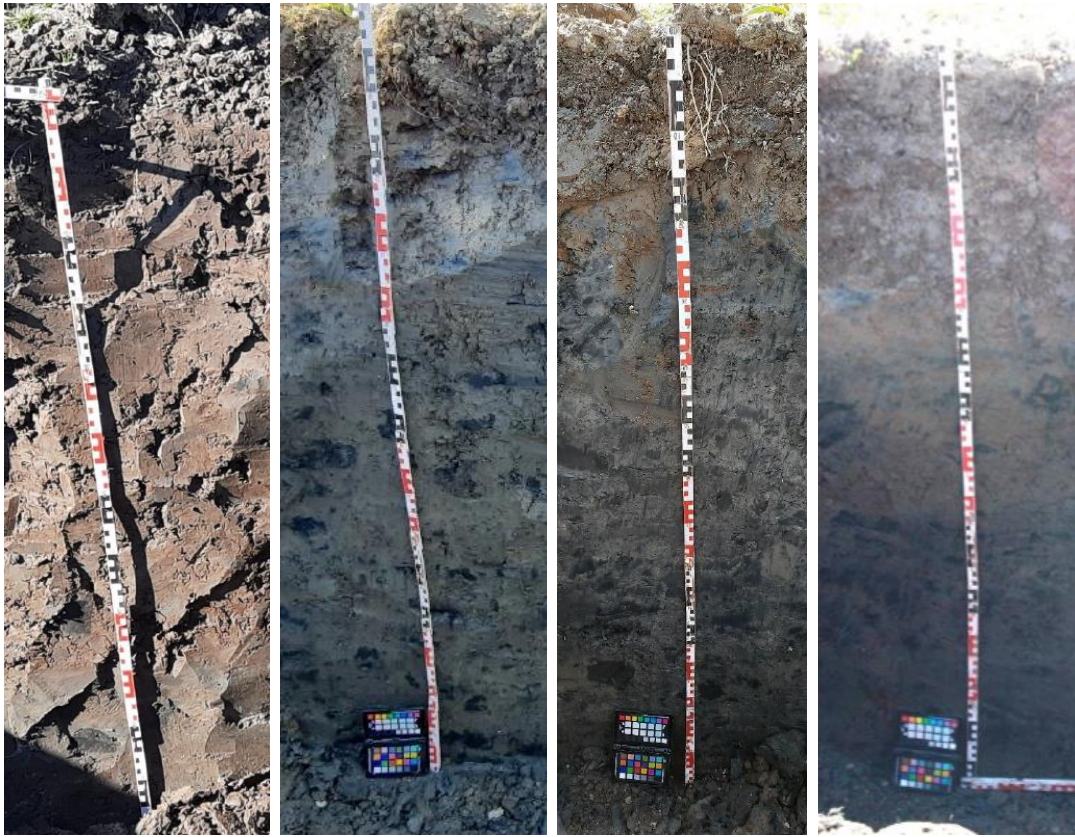
Met betrekking tot de aanleg van de Proefdijk zijn de volgende conclusies getrokken:

- De waarnemingen en metingen tonen aan dat de klei uit beide Kleirijperij depots en de klei uit de Klutenplas verwerkbaar zijn in een dijklichaam. Met een 25 tons rupskraan is een verdichting van meer dan 97% gehaald van de 1-puntsproctor proef.
- In principe zijn de gehanteerde kleien allen goed te verdichten, mits ze het juiste vochtgehalte hebben. Een hoger gehalte aan lutum, organische stof en zout vergroot het water-absorberend vermogen van de klei. Dit leidt tot een vergroting van de kans op toename van het vochtgehalte als de klei met water in aanraking komt, zoals bijvoorbeeld door (hevige) regenbuien.
- Het rijpingsproces van de klei in beide depots van de Kleirijperij is nog niet voltooid (anno november 2020). Er is veel moeite gestoken om het ontwateren van deze twee partijen te versnellen, door middel van omzetten en op ruggen zetten van het materiaal.
- De in het TR Klei voor Dijken voorgeschreven ondergrens van een I_c -waarde van 0,6 is bevestigd door deze Proefdijk. Hoewel de verdichting ook voor de klei onder deze grenswaardes is behaald, gaf de klei met de hogere vochtgehalten insporing van de rupsbanden en terugverend gedrag bij het verdichten. Bij waardes boven een I_c -waarde van 0,6 was dit niet het geval. De bovengrens van de I_c is met de aanleg van de Proefdijk niet bereikt. Wel is aangetoond dat ook hogere I_c -waardes nog steeds goed verdichtbaar en goed verwerkbaar zijn: de maximale behaalde I_c -waardes waren 0,71 voor klei uit het Delfzijldepot (Valgenweg), 0,92 uit het Kwelderdepot en 0,91 voor klei uit de Klutenplas.

Profielkuilen en veldproeven proefdijk

Met het profielkuilenonderzoek is onderzocht hoe de klei van de in 2020 aangelegde proefdijk zich in een kleine 2 jaar heeft ontwikkeld:

- In segment 1 van depotklei Nieuwe Statenzijl (referentiemateriaal) is de klei nog weinig ontwikkeld: er zijn nog weinig bodemstructuren zichtbaar en het materiaal oogt daardoor vrij homogeen onder de wortelzone. Er is een dunne droge korst aanwezig, maar de scheuren reiken slechts enkele centimeters diep. In het gehele profiel komen ijzeroxidevlekken voor, dus de grond is tot 1,2 m al geaereerd geweest (met lucht in aanraking gekomen). In het profiel zijn verder enkele aanleglagen zichtbaar. Deze veroorzaken de afwisseling tussen de verdichte en minder verdichte lagen.
- Van segment 2 met klei uit de Kleirijperij Delfzijl (Valgenwegklei) is direct zichtbaar dat dit heel ander materiaal is dan het referentiemateriaal: de klei is erg donker, bevat nog geen ijzeroxidevlekken en is ook zachter. De klei beneden de zodelaag is slecht gerijpt. Het profiel bevat ook blauwgrijze kleilenzen, wat aangeeft dat de klei nog nauwelijks is blootgesteld aan zuurstof en nog veel ijzersulfide bevat (die de blauwgrijze kleur veroorzaakt). In het profiel zijn geen aanleglagen zichtbaar.
- Segment 3 met klei uit de Kleirijperij Kwelder bevat meer ongerijpte kleilenzen dan segment 2. Daar staat tegenover dat bovenin de grond al beter gerijpt is dan in segment 2, dit blijkt bijvoorbeeld uit het voorkomen van ijzeroxide tot een diepte van 0,5 m. Ook hier is een dunne droge korst aanwezig, maar de scheuren reiken ook hier slechts enkele centimeters diep. In het profiel zijn geen aanleglagen zichtbaar.
- De klei in segment 4 van Klutenplasklei is beter gerijpt dan in segmenten 2 en 3, maar bevat nog steeds blauwgrijze ijzersulfide-vlekken van ongerijpte klei. Rijping heeft waarschijnlijk al voor de aanleg plaatsgevonden. Er is al meer bodemstructuur zichtbaar en de betere rijping komt ook tot uiting in de ijzeroxidevlekken die tot 0,94 m -mv zichtbaar zijn. Ook hier is een dunne droge korst aanwezig, maar de scheuren reiken ook hier slechts enkele centimeters diep. In het profiel zijn de aanleglagen nog zichtbaar en de verdichting is duidelijk minder dan in segmenten 2 en 3.

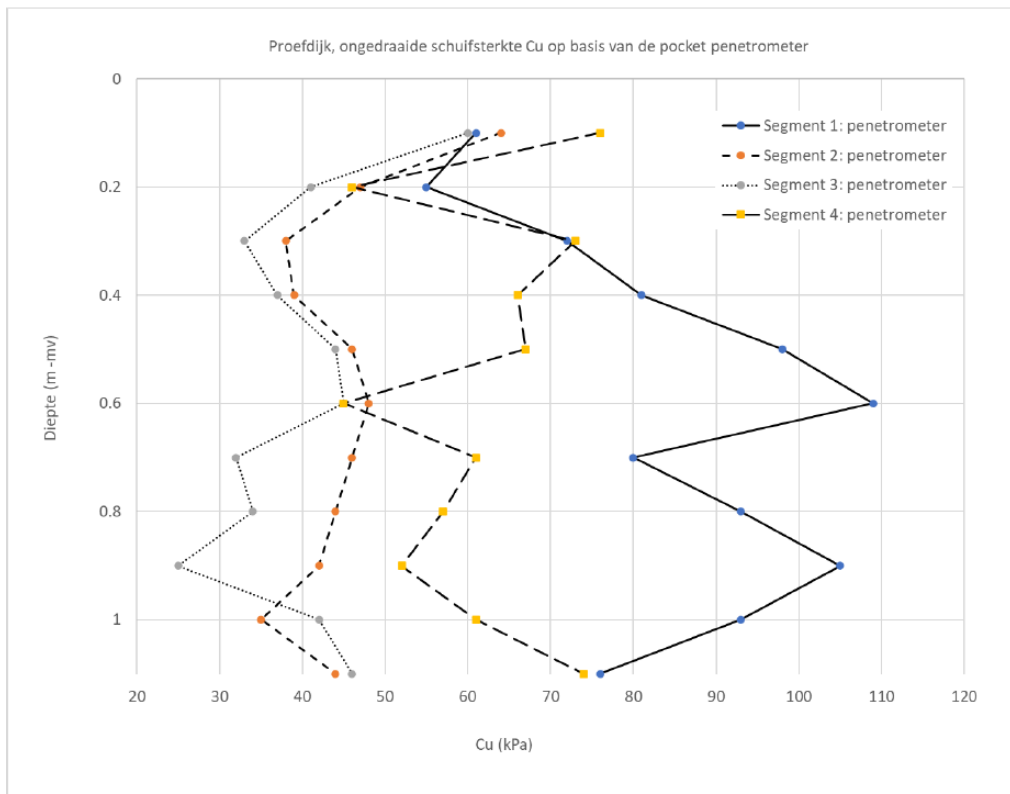


Figuur 2-9: Profielkuilen met van links naar rechts: segment 1 (referentieklei), segment 2 (Kleirijperij Delfzijl), segment 3 (Kleirijperij Kwelder), segment 4 (Klutenplasklei). Op de duimstok verandert de kleur elke 20 cm [11]

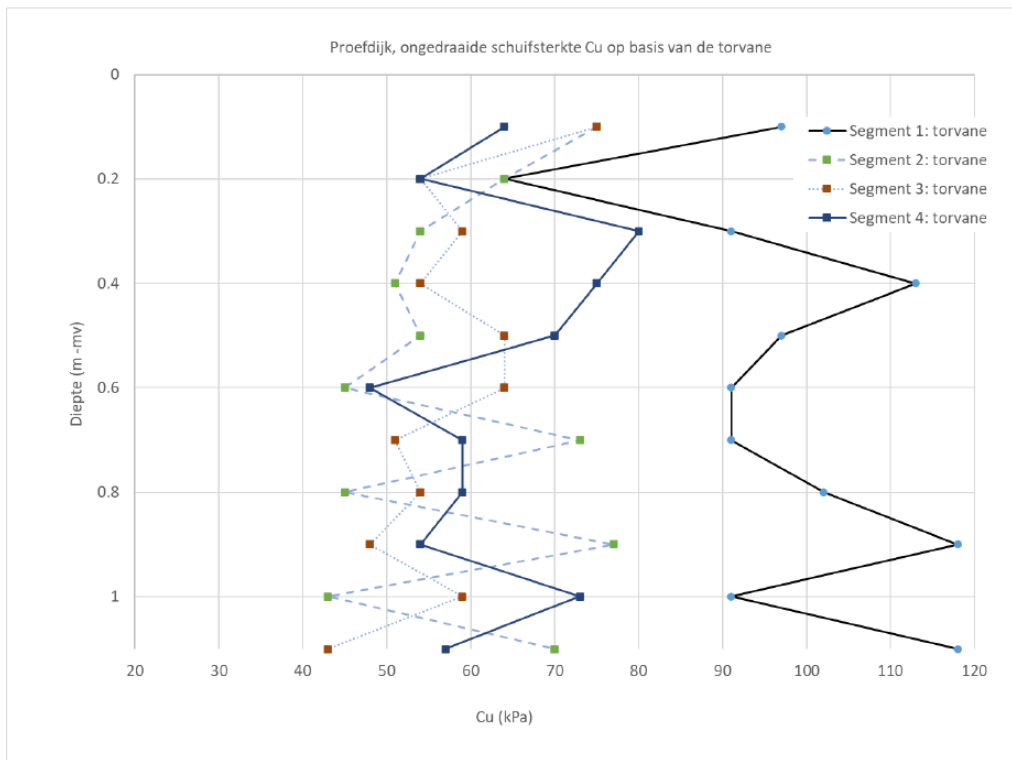
Zowel de handvin- als pocket-penetrometingen laten zien dat de 1 (referentieklei) een duidelijk hogere ongedraineerde schuifsterkte heeft dan de andere 3 segmenten. Segment 4 (Klutenplas) heeft in vergelijking met segmenten 2 (Kleirijperij Delfzijl) en 3 (Kleirijperij Kwelder) hogere s_u -waarden, in overeenstemming met het feit dat deze klei al meer gerijpt was. Op basis van de torvane is de ongedraineerde schuifsterkte voor segmenten 2-4 op diepte vergelijkbaar, op basis van de pocket penetrometer heeft segment 4 ook op diepte een grotere ongedraineerde schuifsterkte. Hier is geen verklaring voor gevonden.

De verhouding in de ongedraineerde schuifsterkte correspondeert met de rijpingsduur van de materialen: segment 3 heeft 1,5 jaar in depot gelegen en is het minst ver. Segment 2 ligt een jaar langer en is dus verder. Segment 4 komt van de kwelder, hier heeft de rijping op de kwelder zelf plaatsgevonden.

Segment 2 laat een opvallende afwisseling zien in s_u op basis van de torvane, zeker op diepte. Hoewel er geen duidelijke aanleglagen zichtbaar waren in het veld, is het aannemelijk dat deze afwisseling wel te maken heeft met de manier van aanleggen en de mate van verdichting.



Figuur 2-10: Ongedraineerde schuifsterkte op basis van de pocket penetrometer [11]



Figuur 2-11: Ongedraineerde schuifsterkte op basis van de torvane [11]

Laboratoriumonderzoek proefdijk

De resultaten van de roto-erosiemeterproeven laten zien dat de drie gerijpte kleien uit de proefdijk een redelijk vergelijkbaar bezwijktoerental hebben. Op basis van het bezwijktoerental vallen alle drie de kleien in de meest erosiebestendige groep. Het materiaal uit segment 3 (Kleirijperij Kwelder) blijkt in deze proef het meest resistent tegen erosie. Ook de resultaten van de bepaling van de krimpgrens en de triaxiaalproeven laten zien dat de verschillen tussen de kleisoorten niet groot zijn.

Het blijkt niet eenvoudig de metingen van de ongedraineerde schuifsterkte te correleren aan de sterktemetingen uit de roto-erosiemeterproeven. Mogelijk hangt dit samen met het verschil in spanningen tijdens het erosieproces en de spanningen die zijn opgelegd bij de triaxiaalproeven. Een andere uitvoeringswijze van de triaxiaalproeven kan hier wellicht meer duidelijkheid in verschaffen. Verder blijken de in-situ metingen (pocket-penetrometer en torvane) significant hogere ongedraineerde schuifsterktes op te leveren dan die zoals bepaald met de triaxiaalproef. Een verklaring voor dit laatste is nog niet gevonden, maar kan samenhangen met uitdroging van de wand van de profielkuilen waarin de metingen uitgevoerd zijn.

Eén van de vragen die bij dit onderzoek speelde was in hoeverre veroudering of rijping van de klei na aanleg van de proefdijk in de resultaten terug te zien is. Hoewel de resultaten van de triaxiaalproeven (op monsters vanaf 0,5 m - mv tot 1 m - mv) aanleiding geven te veronderstellen dat enige mate van veroudering plaats heeft gevonden, blijkt uit de verschillen in de roto-erosiemeterproeven met monsters van verschillende diepte (vanaf 0,5 m – mv tot 1,5 - mv) dat er in de diepte geen patroon is te onderscheiden. Na de rijping in het depot is er hoogstwaarschijnlijk tot het moment van bemonstering geen verdere rijping dieper in de proefdijk opgetreden. Dit volgt ook uit de profielkuilinspecties, waarbij is geconstateerd dat de bodemvorming nog steeds ondiep was.

2.3.2.2 Laag B

Niet van toepassing.

2.3.2.3 Laag C

Zie paragraaf 2.2.2.3 (onderzoek Dollarddijk) over de toepassing van de roto-erosiemeterproef.

2.3.3 Restpunten

Niet van toepassing.

2.4 Structuurproeven bakken klei

Onderzoeksstap *Stap 4*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 4: Structuurvorming in klei van Kleirijperij na versnelde seizoenen.
Deltares, 21 april 2021*

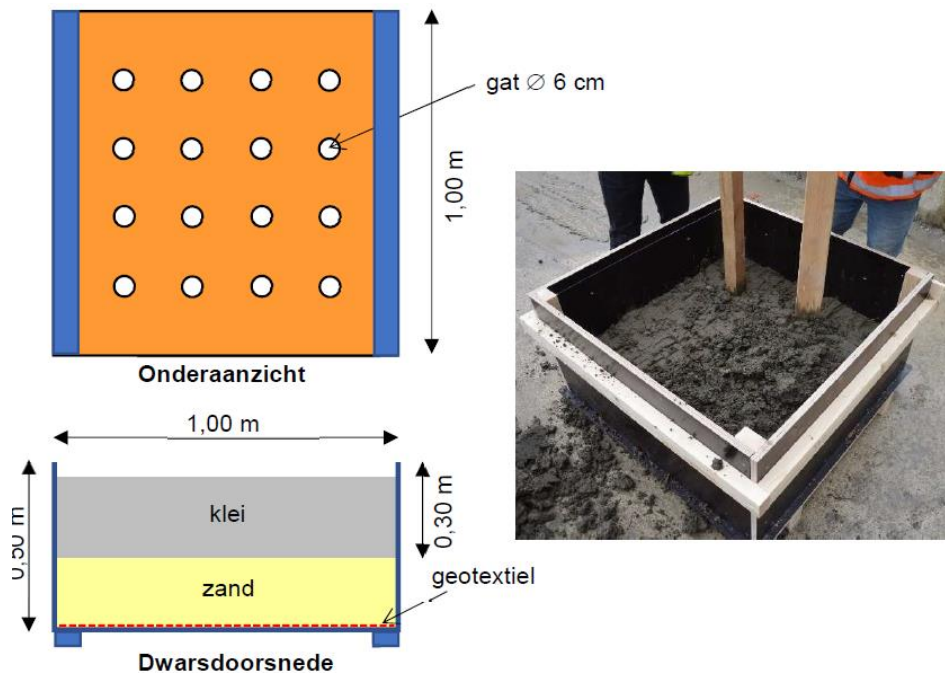
*Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei
Deltares, 20 december 2022*

2.4.1 Beschrijving onderzoeksstap

In deze stap is onderzoek gedaan naar de structuurvorming van klei van diverse bronnen. Met structuurvorming wordt bedoeld het proces waarbij de klei structurelementen als aggregaten en scheuren gaat ontwikkelen ten gevolge van biologische en chemische processen onder invloed van de intrede van zuurstof. In veel gevallen gaat dit ook gepaard met het zwellen en krimpen van de klei. Het onderzoek is uitgevoerd met een nog niet eerder toegepaste methode.

Deze proef is bedoeld om versneld gestructureerdheid van de verschillende kleien op te wekken, waarmee circa 5 jaar aan structuurontwikkeling door verschillende seizoenen wordt nagebootst. Dit geeft een beeld van de te verwachte structuurvorming in de nabije toekomst van de toe te passen kleien in het demonstratieproject. Biologische en chemische processen kunnen hier niet mee worden nagebootst.

De klei is in bakken van 1 x 1 m verdicht aangebracht op een laagje zand. Vervolgens is de klei in 3 maanden versneld onderworpen aan de invloed van seizoenen door middel van nat sproeien, blootstelling aan relatief lage en hoge temperaturen. Gedurende de versnelde blootstelling aan de seizoenen zijn foto's gemaakt van het kleioppervlak. Hierna zijn de bakken opengemaakt om ook de zijkanten te kunnen inspecteren. De scheuren (breedte en diepte) zijn gemeten.



Figuur 2-12: Schematische weergave bakken (links) en foto van verdichten van de klei (rechts) [13]

De volgende kleien zijn onderzocht, waarvan de eerste drie de bronnen voor de BGD zijn en de laatste drie klei betreft die normaal op dijken wordt toegepast en als referentie dienen:

- Gerijpt baggerslib uit Kleirijperij Valgenweg vak 7, geen erosieklasse (klasse 3);
- Kwelderklei, afkomstig van aanleg Klutenplas (gewonnen uit de ringdijk van de Kleirijperij kwelder), geen erosieklasse (klasse 3);
- Gerijpte klei uit slibvangst Breebaart uit Kleirijperij kwelder, geen erosieklasse (klasse 3);
- Klei uit depot Nieuwe Statenzijl, erosieklasse 1;
- De Friese dijk bij Blija, materiaal van Deltagootproef 2020, erosieklasse 1;
- De oostelijke Lauwersmeerdijk, materiaal van Deltagootproef 2020, geen erosieklasse (klasse 3).

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-4.

Tabel 2-4 Onderzoeksvragen bij Stap 4

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Hoe sterk gestructureerd raken de verschillende kleisoorten van de bronnen voor de BGD in vergelijking tot een 'standaard klei'? Is klei uit de Kleirijperij gevoeliger voor structuurvorming?	Wat is het te verwachten effect van structuurvorming op de erosiecoëfficiënt voor de BGD?	Hoe kunnen de proeven met de bakken klei worden ingezet voor onderzoek aan structuurvorming van diverse type afwijkende klei? Wat is het effect van structuurvorming op de erosiecoëfficiënt van diverse type klei in de POV DGG?

In het rapport van april 2021 is de structuurvorming van de klei in de bakken beschreven. In het rapport van december 2022 wordt opnieuw ingegaan op de mate van structurering. Sinds de vorige rapportage is namelijk meer kennis vergaard over het vastleggen van structuurvorming. De resultaten van beide manieren van beschrijven worden in de volgende paragraaf apart behandeld.

2.4.2 Beantwoorde vragen

2.4.2.1 Laag A

Methode april 2021

In het onderzoeksrapport van april 2021 is de volgende mate van structurering van de klei gerapporteerd:

1. Valgenweg D7 (baggerslib haven Delfzijl): sterke structurering;
2. Klutenplas (kwelder klei): sterke structurering;
3. Kwelderdepot (slib Polder Breebaart): sterke structurering;
4. Nieuwe Statenzijl: beperkte structurering;
5. Blija: sterke structurering;
6. Lauwersmeerdijk: nauwelijks structurering.

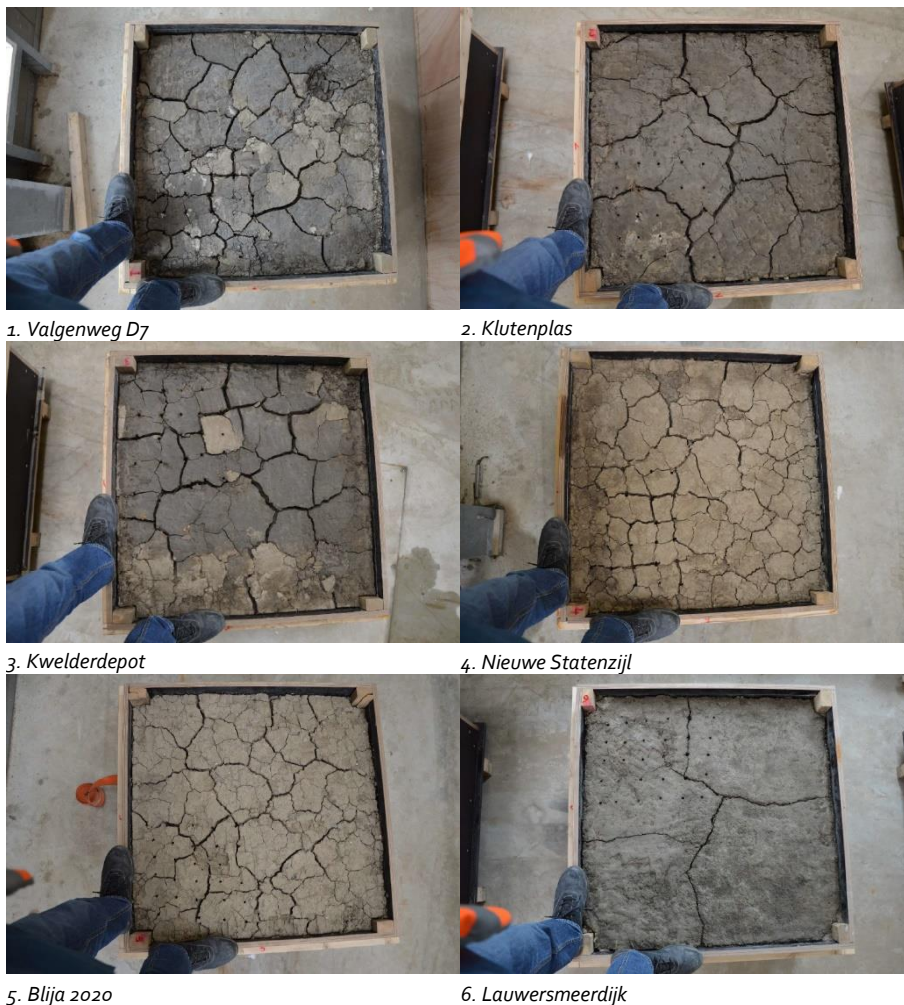
De kleien uit de Kleirijperij voor de BGD zijn na de proef sterk gestructureerd, waarbij klei uit het kwelderdepot (slib uit Polder Breebaart) met 15 cm de diepste scheuren had. Klei van depot Valgenweg en de Klutenplas hebben scheuren gekregen tot zo'n 9 cm diep en 1,8 cm breed. De kleien afkomstig van de Kleirijperij hebben een veel hoger vochtgehalte en konden minder verdicht worden. Waarschijnlijk komt dat door het grote gehalte aan organische stof. De klei van Blija, oorspronkelijk ook kweldermateriaal, vertoont eveneens sterke structurering. De klei van de Lauwersmeerdijk bevatte slechts smalle scheuren. Deze klei heeft een veel lager lutumgehalte en/of veel hoger zandgehalte, waardoor de klei minder krimpt en zwelt. De klei van Nieuwe Statenzijl had flinke scheuren, maar deze gingen minder diep (2-4 cm) in vergelijking tot kleisoorten 1 tot 3 en 5.

Methode december 2022

In het rapport van december 2022 wordt met de vergaarde kennis opnieuw ingegaan op de mate van structurering. In het vorige rapport is onder structuurvorming vooral de hoeveelheid en de vorm van de scheuren bedoeld. In het nieuwe rapport wordt de structurering vastgelegd op een schaal van 1 tot 10, waarbij 10 een sterk gestructureerde situatie beschrijft. Dit gebeurt op basis van het Deltares protocol dat gebruikt is voor de beschrijving van de profielkuilen (zie Stap 2a in paragraaf 2.2), waarbij onder andere gelet wordt op de grootte van de bodemaggregaten en de hoeveelheid poriënruimte. De herindeling heeft plaatsgevonden op basis van de foto's van de bakkenproef en de eerder gemeten scheurdiepte:

1. Valgenweg D7 (baggerslib haven Delfzijl): structurering schaal 6
2. Klutenplas (kwelder klei): structurering schaal 5
3. Kwelderdepot (slib Polder Breebaart): structurering schaal 8
4. Nieuwe Statenzijl: structurering schaal 3
5. Blija: structurering schaal 5
6. Lauwersmeerdijk: structurering schaal 6

In vergelijking met de eerder uitgevoerde beoordeling van de structuurvorming valt op dat de toegenomen kennis vooral tot meer onderscheid tussen de kleisoorten heeft geleid met betrekking tot de in eerste instantie als sterk beoordeelde structurering. De Nieuwe Statenzijlklei heeft in beide gevallen een beperkte structurering als beoordeling gekregen. Voor de beoordeling van de Lauwersmeerdijkklei en Blija klei geldt dat deze klei zeer nat was bij de start. Dit heeft consequenties voor de mate van geconstateerde gestructureerdheid. Het is zeer aannemelijk dat er beduidend minder structuurvorming zou zijn opgetreden, als de klei een met de overige kleisoorten vergelijkbare consistentie-index had gehad. Geadviseerd wordt om bij vervolgonderzoek de consistentie-index te meten en alle materialen met gelijke begincondities aan te leggen, zie ook Laag C in paragraaf 2.4.2.3.



Figuur 2-13: Eindsituatie bakken klei na versnelde blootstelling seizoenen [13]

2.4.2.2 Laag B

De klei van de Lauwersmeerdijk en de klei van de dijk bij Blija zijn in 2020 in de Deltagoot beproefd als kleibekleding met gras op het boventalud van een zeedijk (golfoploopzone). Hierbij liet de klei van de Lauwersmeerdijk minder erosie zien dan die van Blija. Dit verschil in erosiesnelheid was niet verwacht, omdat de klei van Blija geclassificeerd kan worden als erosiebestendigheidsklasse 1 klei en die van de Lauwersmeerdijk als erosiebestendigheidsklasse 3 klei (op basis van vloeigrens en plasticiteitsindex), volgens de indeling van het TR Klei voor dijken [3].

De structuurvorming van de klei van Blija is (met beide beschrijvingsmethodes) vergelijkbaar met die van de kleien uit de Kleirijperij. Daarom is de verwachting dat de Deltagootproef van Blija een indruk kan geven van de erosiesnelheid van klei uit de Kleirijperij, nadat dit jaren in de dijk heeft gezeten.

Wat de structuurvorming precies voor effect heeft op de erosiecoëfficiënt is in deze onderzoeksstap niet onderzocht. Aan de hand van de Deltagootproeven (Stap 9) kan ook de data van de beproefde kleien worden toegevoegd. Een mogelijk verband tussen de structuurvorming en mineralogische samenstelling van de kleien wordt belicht in Stap 8.

2.4.2.3 Laag C

De volgende aanvullende opmerkingen met betrekking tot de voorbehandeling van de klei zijn naderhand in het rapport van december 2022 gemaakt:

- Het watergehalte is dusdanig aangepast dat de klei niet te droog was, maar er is niet specifiek op de consistentie-index gestuurd, wat resulteerde in te natte klei en onderlinge verschillen in de lc.
- Verder is de klei van de dijken onvoldoende gemengd om veroudering geheel te verwijderen. Keuze is om zo dicht mogelijk bij de uitvoeringspraktijk in de buurt te blijven, waar het goed mengen lastig is. Dit leidt tot de conclusie dat de historie en dus de eventuele mate van rijping en structuurvorming hoogstwaarschijnlijk deels, maar niet helemaal verloren is gegaan. De beginconditie van de verschillende kleisoorten is daardoor niet gelijk, hetgeen de interpretatie van de verschillen complexer maakt. De historie van klei verdwijnt ofwel door het intensief mengen van de klei tot een pasta of de klei belasten met een spanning die ruim hoger is dan in het verleden op de klei heeft gerust (de grensspanning).

Bij vervolgexperimenten inzake structuurvorming in dijkklei (zoals de bakkentest) wordt daarom geadviseerd goed te letten op goed vergelijkbare begincondities van de verschillende kleisoorten, zoals:

- Consistentie-index, deze moet onderling vergelijkbaar zijn;
- Mate van verdichting, deze moet onderling vergelijkbaar zijn;
- Gelijkaardige 'state' van de klei, ofwel voorgeschiedenis. De enige mogelijkheid om een vergelijkbare beginsituatie te verkrijgen is het vooraf intensief mengen van de kleimonsters;
- Gelijkaardige omstandigheden, bijvoorbeeld een vergelijkbaar bevochtigingsproces.

Naast deze voorbereidende werkzaamheden, kan ook een aantal suggesties worden gedaan met betrekking tot de uitvoering van de bakkentest:

- Grotere hoogte van de kleilagen (bijvoorbeeld een halve meter), zodat de hele zone die onderhevig is aan structuurvorming wordt beschouwd. De totale test zal hierdoor langer duren.
- De installatie van tensiometers en TDR's (time domain reflectometry) op verschillende niveaus om de ontwikkeling in zuigspanning en vochthuishouding te volgen. Ook hiervoor is het beter dikkere kleilagen te onderzoeken.
- Het vaststellen van de mate van structuurvorming door middel van het opgestelde protocol voor veldonderzoek in profielkuilen

Bij de proefdijk is gezien dat de structuurvorming aanzienlijk minder is dan in de bakken. Mogelijk heeft de dikke kleilaag een vocht naleverend vermogen en daarmee bufferend effect op de structuurvorming. Ook de drainerende onderlaag in de bakken is in de proefdijk niet aanwezig. Als onderdeel van het demonstratieproject wordt de ontwikkeling van de kleilaag van de BGD de komende 3 jaar gemonitord.

2.4.3 Restpunten

Op basis van de structuurvorming en de Deltagootproeven op de klei van Blija en de Lauwersmeerdijk is gebleken dat de structuurvorming een belangrijke indicatie voor de erosiebestendigheid is. Wat de structuurvorming precies voor effect heeft op de erosiecoëfficiënt is in deze onderzoeksstap niet onderzocht.

Het onderzoek is gericht op de structuurvorming van klei en het beschouwen van de verschillen in reeds toegepaste kleien en de gerijpte kleien. De proeven betreffen een dunne kleilaag met korte (intense) wisseling van omstandigheden. Hierdoor is de structuurvorming aan het oppervlak groot, maar voor diepe scheuren is het gelimiteerd tot de dikte van de proefopzet (geen scheuren tot het zand waargenomen). In de proeven is geen vegetatie meegenomen, terwijl deze in de praktijk aanwezig en ook van invloed kunnen zijn op de scheurvorming.

2.5 Deltagootproeven

Onderzoeksstap Stap 9

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven. Deltares, 5 oktober 2021*

2.5.1 Beschrijving onderzoeksstap

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 kon worden voorspeld:

Als $H_{m0} > 0.4$ m:

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

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

T_p = golfperiode bij de piek van golfspectrum (s)

Het rekenmodel voor erosie van klei uit 2020 bevat een erosiecoëfficiënt (c_e) die niet zonder grootschalige proeven kan worden bepaald voor afwijkende klei. Ook het rekenmodel zelf was niet geschikt voor taluds flauwer dan 1:5 en voor golven groter dan 1,5 m. In de Deltagoot zijn twee series proeven uitgevoerd, waarmee de erosiesnelheid is gemeten van vier kleisoorten. De proeven leveren de informatie om het rekenmodel te verbeteren, gericht op grotere golven en een flauwer talud. De proevenseries waren als volgt:

- Eerste proevenserie (gestort en verdicht):
 - Lokaal gewonnen kweldermateriaal uit de "Klutenplas", zonder gras;
 - Gerijpte baggerslib van de Kleirijperij aan de "Valgenweg", zonder gras.
- Tweede proevenserie (aangebracht in ongeroerde blokken van 2×2 m²):
 - Gestructureerde klei in ongeroerde staat van de Dollarddijk, inclusief gras;
 - Gestructureerde klei in ongeroerde staat van de dijk bij Blija, inclusief gras.

Voor de proeven is het ontwerp voor de BGD op werkelijke schaal nagebouwd in de Deltagoot. Voor de eerste proevenserie heeft de klei uit de Valgenweg eerst moeten drogen om het juiste watergehalte te bereiken om te kunnen verdichten. Vervolgens is de klei (Klutenplas en Valgenweg) in lagen parallel aan het dijkprofiel in de Deltagoot aangebracht en verdicht, zoals weergegeven in Figuur 2-14. In deze proevenserie is de klei niet bedekt met een graszode.

Voor de tweede proevenserie zijn blokken gestoken in de bovenzijde van het buitentalud van de huidige Dollardijk ter plaatse van het demonstratieproject BGD en van de dijk bij Blija. Voor het steken zijn mallen van 2x2 m gebruikt, die met een kraan in de dijk zijn gedrukt, zoals weergegeven in Figuur 2-15. Na weggraven rondom de mal is een bodemplaats onder de mal geschoven, waarna de kleibekleding als blok kon worden vervoerd. Om in de Deltagoot de juiste kleidikte te krijgen (de huidige dikte van de kleilaag is 0,8 - 1,0 m) is eerst een laag met blokken klei aangebracht waarvan de toplaag met gras is verwijderd. Vervolgens zijn daar de blokken op geplaatst, zoals weergegeven in Figuur 2-16. Om op de juiste hoogte te komen is onder de kleiblokken nog een laagje geroerde klei aangebracht. Met zandcement zijn de spleten tussen kleiblokken en zijwanden van de Deltagoot opgevuld.



Aanbrengen van de Klutenplasklei



Verspreiden van de klei



Verdichten van de klei met wals



Verdichten van de klei met rupskraan

Figuur 2-14: Aanbrengen van de eerste proevenserie [15]



Drukken van de mal



Drukken van de mal



Weggraven rondom de mal



Eronder schuiven van de bodemplaat

Figuur 2-15: Steken van kleiblokken op de Dollardijk [15]



Trekken van de bodemplaat



Opgebouwde Deltagoot (onderste deel met wapeningsnet ter stabilisatie)

Figuur 2-16: Opbouwen van de Deltagoot met kleiblokken [15]

De eerste proevenserie bestond uit een constante waterstand, met een golfhoogte van 2 m of lager. De eerste proeven van de serie hadden een duur van ongeveer 1 uur, naarmate de erosie vorderde is de proefduur verlengd naar maximaal 5 uur. In totaal is 26,8 uur getest met een golfhoogte van 2 m en 2,5 uur met een lagere golfhoogte. Na elke proef is de waterstand verlaagd om het erosieprofiel met een laserscanner in te meten. Het gehele proevenprogramma heeft in totaal 9 dagen in beslag genomen.

De erosie aan Valgenweg zijde voltrok zich sneller dan aan de Klutenplaszijde. Na 11 uur is aan de Klutenplas zijde een kunstmatig gat gemaakt, om te voorkomen dat de proef te weinig informatie zou opleveren. Voor de Valgenwegklei heeft het 21 uur geduurd voordat de erosie de kruin van de dijk bereikte. Na 27 uur was er sprake van kruinverlaging en kon de dijk als gefaald worden beschouwd. Dit is langer dan de belastingduur tijdens extreme omstandigheden op de Dollard, wat zo'n 17 à 20 uur bedraagt. De erosie aan de zijde met Klutenplasklei was toen nog niet bij de kruin uitgekomen.

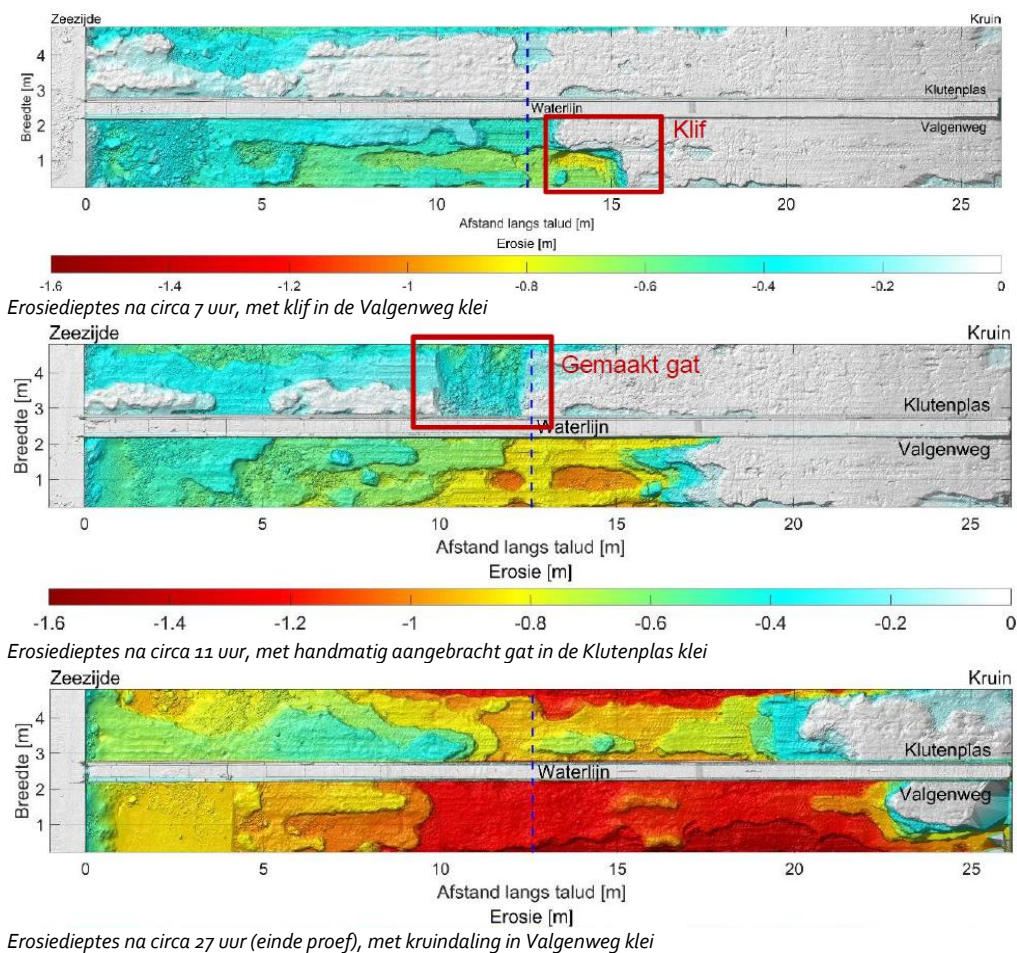


Golfbelasting



Klei erosie na 4 uur

Figuur 2-17: Deltagootproeven eerste serie: in de goot Klutenplas klei (links) en Valgenweg klei (rechts) [15]



Figuur 2-18: Gemeten erosiedieptes Klutenplas en Valgenweg klei met laserscanner [15]

Bij de start van de tweede proevenserie is eerst een kleine kunstmatige schade aangebracht in beide grasbekledingen, door achterblijvende erosie aan de Blija zijde zijn later nogmaals verzwakkingen in de grasbekleding aangebracht. De tweede proevenserie bestond ook uit een constante waterstand, met een golfhoogte van 2 m of lager. In totaal is 34,7 uur getest.

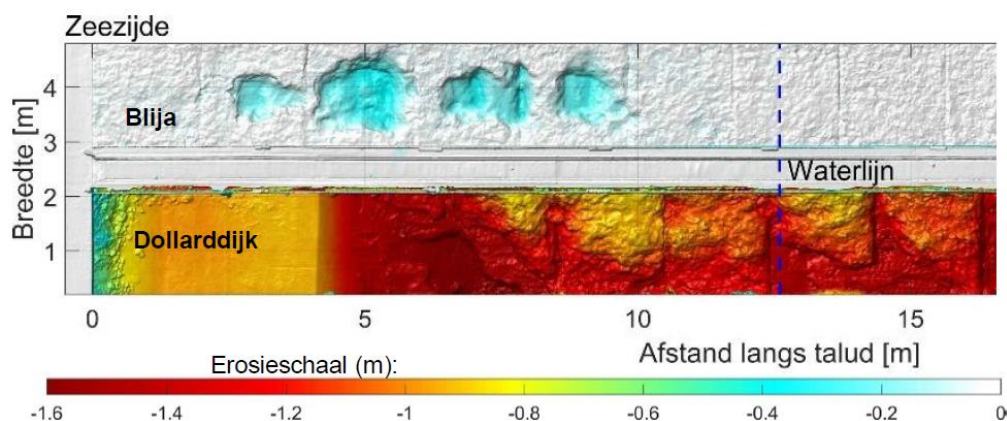
Aan de Dollardijkzijde is 3 uur na de kunstmatige verzwakkingen van de grasbekleding een erosiekuil met klif ontstaan die zich heeft verplaatst richting de kruin. Uiteindelijk is na 19 uur de 4 m brede kruin van de Dollardijk doorgebroken. Uiteindelijk is de zijde van Blija gedurende de belasting van 32 uur met golven van 2 m hoog nauwelijks geërodeerd, ook niet na het aanbrengen van een grote kunstmatige schade.



Erosiekuil aan Dollardzijde na 12 uur

Eindsituatie na laatste proef, inclusief kunstmatige verzwakkingen Blija

Figuur 2-19: Deltagootproeven tweede serie: Blija bekleding (links) en Dollardijk (rechts) [15]



Figuur 2-20: Gemeten erosiedieptes Blija en Dollardijk kleiblokken met laserscanner [15]

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-5.

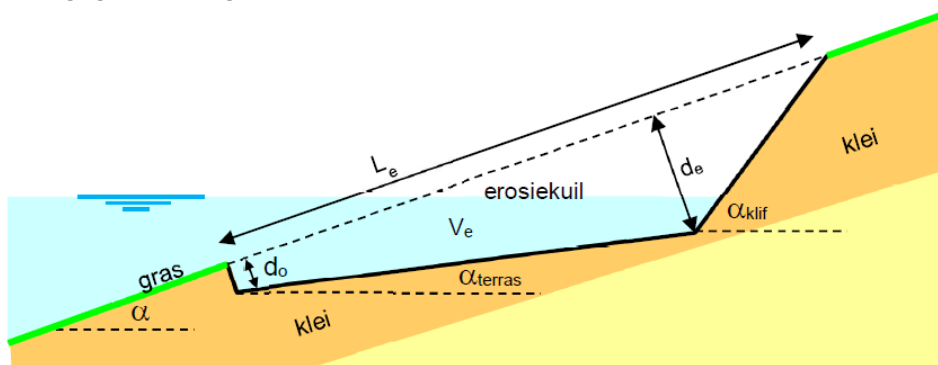
Tabel 2-5 Onderzoeksvragen bij Stap 9

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Voor een selectie van afwijkende klei uit de BGD kan daadwerkelijk getest worden of de verwachte erosie optreedt (o.a. vorm en locatie erosiekuil). De proef in de Deltagoot geeft de kwantitatieve informatie over de erosiebestendigheid bij golfaanval. Het levert de erosiecoëfficiënt (incl. nauwkeurigheid) die nodig is om de faalkans van de dijkbekleding te berekenen.		Zijn de erosiebestendigheidsklassen van diverse soorten klei te koppelen aan de resultaten uit de Deltagootproeven? Hoe kan de erosiecoëfficiënt specifieker worden gemaakt, d.w.z. met onderscheid naar type klei?

2.5.2 Beantwoorde vragen

2.5.2.1 Laag A

In alle proeven is de erosie minder diep gegaan dan vooraf gedacht, waarbij de erosiekuil echter wel snel is doorgegroeid naar de kruin. Het eroderen van de kruin is met de kleidiktes in de proeven uiteindelijk het moment van falen geweest. Een schematische weergave van het erosieprofiel is weergegeven in Figuur 2-21.



Figuur 2-21: Geschematiseerde erosieprofiel met terras, klif en begindiepte [15]

Voorafgaand aan de proeven bestonden twee verschillende hypothesen voor het doorgroeien van de erosiekuil:

- De kuil erodeert na initiatie op dezelfde wijze als bij eerdere onderzoeken in het verleden is gezien. De kuil wordt steeds groter en dieper, waarbij de dijk uiteindelijk faalt op de dikte van de kleilaag
- Het terras van de kuil gaat werken als berm tegen golfafslag, wat er toe leidt dat de groei in diepte afneemt. De klif erodeert verder, totdat deze de kruin bereikt en uiteindelijk de dijk faalt op eroderen van de kruin.

De tweede hypothese is het beeld dat uiteindelijk in de proeven gezien is.

Op basis van de resultaten van de Deltagootproeven zijn de formules van Mourik aangepast. Hierbij wordt het erosieproces beschreven in twee fasen: tijdens de eerste fase neemt vooral de erosiediepte toe, maar is het erosievolume nog beperkt. Tijdens de tweede fase neemt het erosievolume snel toe en wordt de erosiekuil nog maar langzaam dieper. Dit wordt gemodelleerd met de volgende formules:

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

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

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

$$c_d = 0,4$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Als $H_{m0} \leq 0,4$ 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

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} = $H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$ = 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 ($^\circ$)

Tevens zijn de waarden van de erosiecoëfficiënt voor de verschillende bekledingen en een talud van 1:7 gekwantificeerd:

- 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 dijk bij Blija: $\mu(c_e) = 0,23$

Voor bovenstaande erosiecoëfficiënten geldt dat hoe groter de waarde, des te groter de erosiesnelheid bij golfaanval is. Als standaardafwijking kan nog hetzelfde aangehouden worden als voorheen: $\sigma(c_e) = 0,14$. Voor de eerdere formule van Mourik was een waarde van $\mu(c_e) = 0,55$ gevonden voor de destijds beproefde klei [4].

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. De erosiesnelheid van de Dollarddijk was groot. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de beperkte samenhang van de klei (brokkelig en poriën) en de aanwezigheid van zandlenzen, zie ook Laag C. Waarschijnlijk zijn de problemen tijdens de aanleg, toen de klei vrij nat is aangebracht en zand is bijgemengd, de oorzaak hiervan.

2.5.2.2 Laag B

Niet van toepassing.

2.5.2.3 Laag C

De vier beproefde opstellingen laten behoorlijke verschillen in erosiesnelheid zien. Van alle vier de kleisoorten zijn de Atterbergse grenzen en zandgehalte dusdanig dat ze als erosiebestendigheidsklasse 1 klei ingedeeld kunnen worden, afgezien van het gehalte aan organische stof en zoutgehalte van de klei van de Kleirijperij klei (voldoet niet aan de eisen voor erosiebestendige klei uit het TR Klei voor Dijken [3]).

Het zand- en lutumgehalte van de klei van de Dollarddijk vertonen een grote spreiding over de monsters. Ook op het oog is de klei van de Dollarddijk matig van samenhang, waarbij de klei- en zanddeeltjes niet goed zijn gemengd. Het zandgehalte van de Valgenweg is ongeveer even hoog, maar hierin nauwelijks waarneembaar, omdat het zand volledig was verdeeld over de klei. Door het geclusterd aanwezig zijn van zand in de klei van de Dollarddijk, kwamen er in de Deltagoot waarschijnlijk gemakkelijk brokken los. Het afbrokkelen van de verticaal gestoken kleiblokken was hier al een voorbode van. Ook de op het oog matige verdichting van de klei zal een negatief effect op de erosiebestendigheid hebben.

Hieruit wordt bevestigd dat niet alleen de Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte bepalend zijn voor de erosiebestendigheid van de klei. Ook de samenhang van de kleilaag en de homogeniteit is van belang. Verder is de verdichting bij de aanleg van invloed. Visuele beoordeling van eventueel afbrokkelen van een verticale wand van minstens 50 cm zou een aanwijzing kunnen zijn voor een hoge erosiesnelheid tijdens golfaanval.

Aangezien de samenhang van de kleilaag zo belangrijk lijkt te zijn, is het van belang dat de kleilagen in de Deltagoot zo realistisch mogelijk worden weergegeven, vergelijkbaar met de werkelijke condities op de dijk. De kleilagen in de Deltagoot zijn parallel aan het onderliggende talud verdicht, op de BGD zijn de lagen onder een helling aangebracht en verdicht (met de taludhelling mee). De kleien uit de Kleirijperij hadden (na drogen) een geschikte consistentie-index van circa 0,70. Doordat het verse aangelegde klei is, heeft echter nog geen structuurvorming opgetreden.

De kleiblokken van de dijk bij Blija en de Dollardijk zijn in goede condities gestoken (voorjaar). Wel is belangrijk te beseffen dat niet alle blokken hetzelfde zijn, zeker bij de blokken van Dollardijk. Een slecht (weinig erosiebestendig) kleiblok ter hoogte van de hoogste belasting kan een onderschatting geven van de erosiebestendigheid.

2.5.3 Restpunten

In het verleden is geprobeerd de erosiebestendigheid direct te relateren aan kenmerken als Atterbergse grenzen, lutumgehalte, zandgehalte, organische stofgehalte, gestructureerdheid en verdichting. Dergelijke relaties zijn echter moeilijk te leggen. Ook in de evaluatie van de uitgevoerde OGD onderzoeken in Hoofdstukken 3 en 4 wordt hier naar gekeken.

Als alternatief wordt geadviseerd een meetmethode te ontwikkelen waarmee de samenhang van een kleilaag direct kan worden vastgesteld. Daarmee kan hopelijk een geschikt criterium worden gevonden om met een kleinschalige beproeving de erosiebestendigheid van de kleilaag te beoordelen. Visuele beoordeling van afbrokkelen van een verticale wand zou een criterium kunnen zijn.

Halverwege het OGD onderzoek zijn de uitgevoerde stappen geëvalueerd en is vooruitgeblekt naar nog uit te voeren onderzoeken (Stap 5). Aan de hand van voorgaande onderzoeken is een nadere invulling gegeven aan de resterende proeven (Stap 6 tot 8).

In het nieuwe Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) bij Noorderzijlvest wordt een nadere uitwerking van de kleinschalige proeven onderzocht.

2.6 Probabilistische berekeningen: OpenFOAM

Onderzoeksstap *Stap 3a*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid
Deltares, 10 maart 2022*

2.6.1 Beschrijving onderzoeksstap

In de Deltagoot is een beperkt aantal proeven uitgevoerd (Stap 9). Met OpenFOAM is de invloed berekend van de waterstand en de golfhoogte op de grootte van de erosiesnelheid. Op basis daarvan kan de erosieformule voor klei een breder toepassingsgebied gegeven worden.

Met het numerieke rekenmodel OpenFOAM is het toepassingsbereik van de proefresultaten van de Deltagoot verbreed. Uit de analyse van de berekeningen met OpenFOAM blijkt dat de aangepaste formule van Mourik goed aansluit op de huidige OpenFOAM berekeningen en derhalve gebruikt kan worden voor het ontwerp van de Brede Groene Dijk. De aangepaste formules zijn opgenomen in paragraaf 2.5.2 (Deltagootproeven, onderzoeksstap 9).

De onderzoeksvragen en resultaten worden samen met het tweede deel van Stap 3 (probabilistische berekeningen) beschouwd in paragraaf 2.7.

2.7 Probabilistische berekeningen: berekeningen BGD

Onderzoeksstap *Stap 3b*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras
Deltares, 14 september 2022*

2.7.1 Beschrijving onderzoeksstap

Het erosieproces zoals waargenomen in de Deltagoot is geïmplementeerd in de researchtool van Deltares voor het maken van probabilistische berekeningen aan de kleibekleding van de BGD. De researchtool maakt gebruik van een Monte Carlo simulatie. Combinaties van stormpiek-condities uit Hydra-Ring (WBI 2017 plus zeespiegelstijging) en sterkte van de dijk zijn gebruikt om de relatie tussen erosiediepte en kans van voorkomen te bepalen. Deze kans kan rechtstreeks vergeleken worden met de norm van de dijk ten aanzien van dit mechanisme.

Er is gerekend met een erosiecoëfficiënt voor het erosieproces die is gekozen op basis van de erosiesnelheid van de Dollarddijk en de Valgenwegklei in de Deltagoot. Van de Dollarddijk is bekend dat de klei onvoldoende verdicht is waardoor de erosiesnelheid groter zal zijn dan gemiddeld. De klei van de Valgenweg was in geroerde toestand aangebracht in de Deltagoot waardoor de erosiesnelheid kleiner zal zijn dan gemiddeld. Op basis hiervan is aangenomen dat de erosiesnelheid van de Dollarddijk een modelonzekerheid heeft van 1,25, verder is aangenomen dat de Valgenwegklei een modelonzekerheid heeft van 0,75. Dit leidt tot de keuze van 0,8 voor de erosiecoëfficiënt.

Voor het DO van de BGD is de erosiecoëfficiënt gekozen op basis van expert judgement. Door zes experts is individueel en blind van elkaar een erosiecoëfficiënt voorgesteld, op basis van de resultaten uit de Deltagootproeven. Op basis van deze methode is ook een erosiecoëfficiënt van 0,8 gekozen om de semi-probabilistische ontwerpberekeningen mee uit te voeren.

Als er een storm heeft plaatsgevonden die erosie heeft veroorzaakt is het denkbaar dat er in hetzelfde stormseizoen (winterhalfjaar) nog een zware storm kan optreden, waarbij tussentijdse reparatie niet altijd mogelijk is. Daarom zijn er ook berekeningen uitgevoerd van de totale erosie ten gevolge van alle opeenvolgende stormen gedurende winterhalfjaren.

De berekeningen geven als resultaat de erosiediepte als functie van de terugkeertijd. De erosiediepte met een overschrijdingskans ter grootte van de faalkanseis geeft de minimaal benodigde dikte van de kleilaag met gras.

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-6.

Tabel 2-6 Onderzoeksvragen bij Stap 3

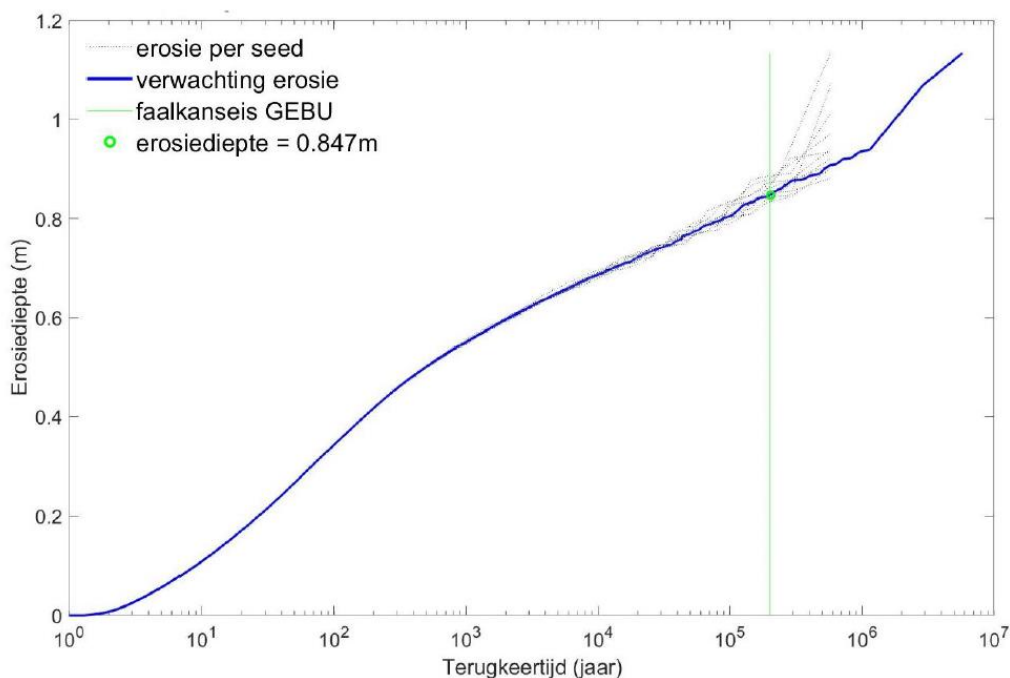
Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Verkennde berekeningen geven aan hoe erosiebestendig de klei moet zijn, gegeven de diverse ontwerpvarianten van de BGD, waarmee duidelijk wordt of er hoge eisen aan de klei moet worden gesteld, of dat vrijwel alle klei geschikt zal zijn.	Welk ontwerp voor de BGD is optimaal, gezien de materiaalkeuze?	Welke dijkontwerpen laten toe dat er een minder erosiebestendige klei kan worden gebruikt?

2.7.2 Beantwoorde vragen

2.7.2.1 Laag A

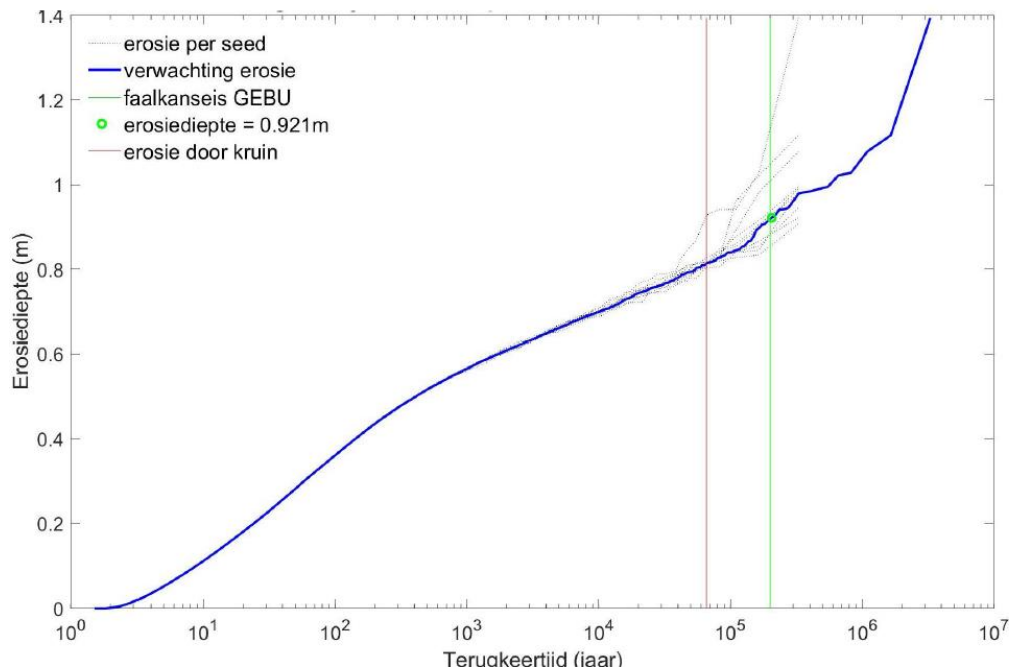
De vraag in Laag A is als volgt gesteld: Hoe erosiebestendig de klei moet zijn, om te voldoen met het huidige ontwerp van de BGD? Uiteindelijk is gekeken naar de erosiebestendigheid van de klei uit de Deltagootproeven en of het ontwerp van de BGD hiermee voldoet. Oftewel: voldoet het ontwerp (dat met semi-probabilistische berekeningen is afgeleid) ook op basis van probabilistische berekeningen.

De berekende erosiediepte bij de faalkanseis voor het faalmechanisme GEBU (Grasbekleding erosie buitentalud) van 1/200.000 jaar bedraagt 0,85 m voor afzonderlijke stormen. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 2-22. De dunne stippellijnen geven de erosiediepte voor verschillende sterktes van de kleilaag. Deze resultaten tezamen geven de verwachting van de erosiediepte, zoals weergegeven met de blauwe lijn.



Figuur 2-22: Erosiediepte ten gevolge van afzonderlijke stormen als functie van de terugkeertijd [17]

De berekende erosiediepte in een winterhalfjaar is weergegeven in Figuur 2-23. Dit betreft de cumulatieve erosie van de stormen in een winterhalfjaar. De berekende erosiediepte bij de faalkanseis voor GEBU van 1/200.000 jaar bedraagt 0,92 m. Circa 8 cm dieper dan voor een afzonderlijke storm dus.



Figuur 2-23: Erosiediepte ten gevolge van alle stormen gedurende een stormseizoen (winterhalfjaar) als functie van de terugkeertijd [17]

Bij een terugkeertijd van 60.000 jaar bereikt de erosie de kruin. Vanaf dat moment zijn de huidige erosieformules mogelijk niet goed toepasbaar meer (minder nauwkeurig), aangezien het erosievolume over een kleinere hoogte wordt verdeeld en dus sneller de diepte in groeit. Vanaf het moment dat het terras van het erosieprofiel de kruin snijdt zal het erosieproces met de huidige erosieformules echter stagneren bij gelijkblijvende condities (bij lagere waterstanden groeit de erosie wel verder). Of dit in werkelijkheid ook het geval zal zijn is niet bekend.

De berekeningen geven een kleinere erosiediepte dan waargenomen in de Deltagoot. Dit komt doordat in de Deltagoot de dijk is belast met constante stormpiek-condities gedurende ruim 30 uur. Bij de probabilistische berekeningen is gerekend met een realistisch verloop van de waterstand en golfcondities gedurende een storm van 45 uur. Hierdoor is de dijk in de berekeningen aanzienlijk korter met stormpiek-condities belast.

De berekende erosiedieptes zijn aanzienlijk kleiner dan waar in het ontwerp van de BGD rekening mee is gehouden. Het ontwerp van het demonstratieproject voldoet daarmee. Het is daarom ook niet nodig geweest om de faalmechanismen GEBU en GEKB samen te beschouwen met gecombineerde faalkanseis.

Dat de berekende erosiedieptes kleiner zijn dan waar de BGD op is ontworpen, komt doordat in het ontwerp rekening is gehouden met extra omstandigheden die effect kunnen hebben op de erosiebestendigheid, zie Laag B.

2.7.2.2 Laag B

In het onderzoeksrapport is niet ingegaan op het optimale ontwerp voor de BGD, maar is het huidige ontwerp getoetst. De berekende erosiedieptes zijn aanzienlijk kleiner dan waar in het ontwerp van de BGD rekening mee is gehouden. De ontwerpoverwegingen van de BGD, zoals variatie in taludhelling en kruinbreedte, zijn beschreven in het DO rapport BGD [5].

Binnen deze onderzoeksstap is gekeken naar de probabilistische beschouwing van het ontwerp van de kleibekleding. Oftewel, wat is er nodig om een storm (en in dit geval de combinatie met een tweede storm) te weerstaan. In de aanleg van een dijk dient ook rekening te worden gehouden met extra omstandigheden die veel effect kunnen hebben op de erosiebestendigheid en effectieve laagdikte: graverij, extreme gestructureerdheid, ontstaan van gevolgschade/structuurvorming na een storm, et cetera. In het DO van de BGD is hier extra marge voor aangehouden.

2.7.2.3 Laag C

Zie laag B en onderstaand tekstvak.

Het ontwerp van de BGD is niet gebaseerd op de probabilistische berekeningen van Deltares, maar op semi-probabilistische erosieberekeningen van Sweco. Door Sweco is aanvankelijk een erosiediepte van 1,7 m berekend, aan de hand van de Deltagootproeven is dit aangescherpt naar 1,54 m. Omwille van robuustheid tegen bijvoorbeeld graverij en het gegeven dat er nog onzekerheid zit in de rekenmethodiek, is de kleilaag van het demonstratieproject BGD nu minimaal 2,5 m dik geworden (inclusief onderliggende huidige kleilaag). De verschillen in erosiediepte tussen de berekeningen van Deltares en Sweco worden onder andere door de volgende keuzes veroorzaakt:

- Het uitvoeren van trekkingen verlaagt de belasting aanzienlijk, omdat er hierbij een probabilistische koppeling zit tussen waterstand en golfhoogte. Bij het ontwerp van de BGD zijn waterstand en golfhoogte afzonderlijk bepaald.
- Bij de berekeningen van Deltares is er voor gekozen de golfhoogte te beperken tot 0,53 maal de waterdiepte. Dit is niet toegepast in de berekeningen van Sweco, op aanraden van specialisten op het gebied van hydraulische randvoorwaarden.

De ontwerpkeuzes en de overwegingen daarbij zijn nader beschreven in het Ontwerprapport Brede Groene Dijk [5]

2.7.3 Restpunten

Niet van toepassing.

2.8 Krimprens en erosiemeterproeven

Onderzoeksstap Stap 6

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei Deltares, 15 september 2022*

2.8.1 Beschrijving onderzoeksstap

Vanwege hoge kosten van Deltagootonderzoek is het gewenst ook met kleinschalige proeven de erodeerbaarheid van klei te kunnen onderzoeken. Hiervoor is de roto-erosiemeter gebruikt, welke in het verleden is ingezet om de erosiebestendigheid van reguliere dijkklei onder stromingsbelasting te bepalen. Zie voor een toelichting van de roto-erosiemeterproef Stap 2a in paragraaf 2.2.

De erosiemetingen zijn uitgevoerd op Valgenweg- en Klutenplas klei, op geschikt materiaal dat is overgebleven van de Deltagootproeven. De resultaten zijn gebruikt om erosieparameters af te leiden voor deze twee kleien. Tevens is de krimpgrens van het materiaal bepaald.

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-7. In het onderzoeksrapport zijn Stap 6 en 7 samengevoegd, in voorliggend rapport zijn de stappen (vanwege aparte vragen) losstaand verwerkt. Laag C is beantwoord bij Stap 7.

Tabel 2-7 Onderzoeksvragen bij Stap 6

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Welke krimp en erosiebestendigheid hebben de diverse type klei?	Op welke momenten doen we erosieproeven als deel van de beoogde monitoring van de BGD?	Welke eigenschappen van de klei bepalen de erosiebestendigheid? En hoe veranderen deze in de tijd?

2.8.2 Beantwoorde vragen

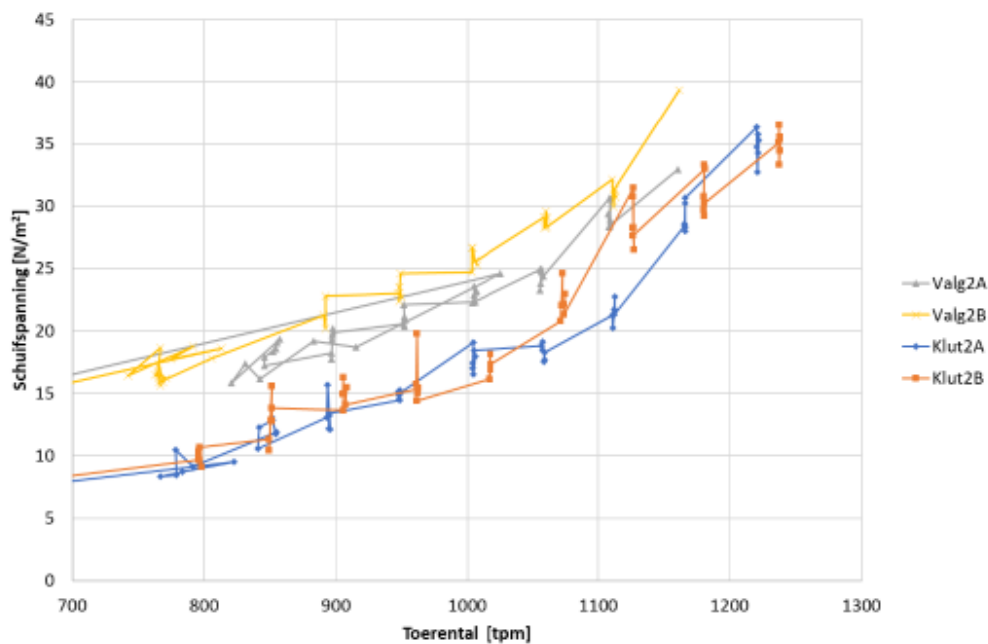
2.8.2.1 Laag A

De krimpgrens geeft het watergehalte aan waar bij verdere afname dit niet gepaard gaat met een direct aan het watergehalte gecorreleerde volumevermindering, maar met scheuren. De krimpgrens van de Klutenplasklei en Valgenwegklei zijn in duplo (proef en controleproef) uitgevoerd. De Klutenplasklei heeft een krimpgrens van 23% (24%) en de Valgenwegklei van 15% (16%). Dit betekent dat de Klutenplasklei eerder scheuren zal gaan vertonen bij uitdroging dan de Valgenwegklei. Dit zal ook gevolgen hebben voor de snelheid van rijping: doordat de Klutenplasklei eerder scheuren zal vertonen zal zuurstof sneller dieper in het profiel doordringen, met snellere veroudering tot gevolg. In verband hiermee moet opgemerkt worden dat rijping ook eerder op kan treden via luchtintrede via de poriën.

Voor de roto-erosiemeterproeven is de krimpgrens niet van belang, aangezien klei is gebruikt die vers in de Deltagoot is aangebracht en onvoldoende lang in contact met zuurstof is geweest om een bodemstructuur te ontwikkelen. Bovendien is de klei niet gedroogd tot voorbij de krimpgrens. In de roto-erosiemeterproeven vertoont de Klutenplasklei een hogere weerstand tegen erosie dan de Valgenwegklei. De Valgenwegklei begint te eroderen bij een toerental tussen de 800 tpm en 1000

tpm en bezwijkt bij één stap van 100 tpm later. De Klutenplasklei begint te eroderen bij een toerental tussen de 1000 tpm en hoger dan 1200 tpm en bezwijkt bij één stap van 100 tpm later. De Klutenplasklei kan daarmee worden ingedeeld als 'weinig erosiegevoelig', de Valgenwegklei als 'matig tot weinig erosiegevoelig'.

Het verschil in erosiegevoeligheid is ook terug te zien in het verloop van de schuifspanning. De Valgenkleimonsters laten een hogere schuifspanning zien dan de Klutenplaskleimonsters. Dit houdt in dat het water bij de Valgenwegklei een grotere wrijvingskracht uitoefent op de monsters, wat samenhangt met een onregelmatig oppervlak waardoor er sneller blokjes klei loslaten.



Figuur 2-24: Verloop van de schuifspanning tegen toerental [18]

2.8.2.2 Laag B

In de onderzoeksstap is niet behandeld op welke momenten erosieproeven als deel van de beoogde monitoring van de BGD gedaan kunnen worden. Roto-erosiemeterproeven of andere kleinschalige erosieproeven zijn niet in de raming van de monitoring van de BGD na aanleg opgenomen.

2.8.2.3 Laag C

Zie Laag C in Stap 7, paragraaf 2.9.

2.8.3 Restpunten

Op welke momenten erosieproeven als deel van de beoogde monitoring van de BGD gedaan kunnen worden is in de betreffende onderzoeksrapportage niet behandeld.

2.9 Onderzoek diverse parameters

Onderzoeksstap *Stap 7*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei Deltares, 15 september 2022*

2.9.1 Beschrijving onderzoeksstap

De roto-erosiemeter is gebruikt om met een meer kleinschalige proef de erosieparameters af te leiden voor de Valgenweg- en Klutenplasklei. Zie voor een toelichting van de roto-erosiemeterproef Stap 2a in paragraaf 2.2.

De vooraf gestelde vragen zijn weergegeven in Tabel 2-8. In het onderzoeksrapport zijn Stap 6 en 7 samengevoegd, in voorliggend rapport zijn de stappen (vanwege aparte vragen) losstaand verwerkt.

Tabel 2-8 Onderzoeksvragen bij Stap 7

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
Hoe verhoudt het resultaat uit stap 6 zich tot de standaard eigenschappen (stap 7)?	Zijn er in de praktijk aanvullende bepalingen nodig? Bijvoorbeeld roto-erosiemeter proeven.	Welke eigenschappen van de klei bepalen de erosiebestendigheid? En hoe veranderen deze in de tijd?

2.9.2 Beantwoorde vragen

2.9.2.1 Laag A

De Klutenplasklei bleek een lagere schuifspanning te ontwikkelen dan de Valgenwegklei bij een gegeven stroomsnelheid in de roto-erosiemeter. Dit is een aanwijzing voor de geringere erosiegevoeligheid van de Klutenplasklei. Dit is terug te zien in het bezwijktoerental, maar opvallend genoeg niet in de afgeleide erosieparameters (kritieke hydraulische schuifspanning en erosiegevoelheidscoëfficiënt). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de kritieke hydraulische schuifspanning het begin van het erosieproces markeert en geen duidelijke relatie heeft met het bezwijktoerental.

2.9.2.2 Laag B

In de onderzoeksstap is niet behandeld of aanvullende proeven nodig zijn als onderdeel van de beoogde monitoring van de BGD.

2.9.2.3 Laag C

Er zijn een aantal eigenschappen die effect zouden kunnen hebben op de erosiebestendigheid. De eerste is het zandgehalte. Het zandgehalte in de voor de roto-erosieproeven gebruikte kleibrokken verschilde echter nauwelijks (10,7% tot 12%). Uit de korrelverdelingen van de gebruikte kleibrokken blijkt dat het zandgehalte in de Valgenwegklei sterk kan variëren. De zandgehaltenes van de kleimonsters in de roto-erosiemeterproef hoeven dus niet representatief te zijn geweest voor de Valgenwegklei die in de Deltagoot is geweest.

De verschillen in bezwijktoerental zouden kunnen samenhangen met de consistentie-index. De consistentie-index van de Valgenwegkleimonsters is lager (gemiddeld 0,64) dan die van de Klutenplaskleimonsters (gemiddeld 0,71). Een hogere consistentie-index betekent taaiër gedrag en daarmee in principe een grotere erosieweerstand.

In de Deltagootproeven was de erodeerbaarheid van de Valgenwegklei groter dan die van de Klutenplasklei, mogelijk is er een verband met de verschillen die ook in de roto-erosiemeterproef gevonden zijn. Al was de relatie van erosiebestendigheid met de consistentie-index in de Deltagoot niet te zien, omdat beide kleisoorten daar vergelijkbare consistentie-index hadden.

In hoeverre het verschil in erosiebestendigheid samenhangt met geotechnische verschillen tussen de kleisoorten is nog niet geheel duidelijk. Mogelijk ligt er een relatie met de eigenschappen van de kleimineralen (zoals mineralogische samenstelling, het totaal specifiek oppervlak en de uitwisselbare kationen). Deze eigenschappen en mogelijke verbanden zijn daarom nader onderzocht in Stap 8, paragraaf 2.10

2.9.3 Restpunten

Zie bovenstaand tekstvak. In deze onderzoeksstap is niet behandeld welke proeven nodig zijn als onderdeel van de beoogde monitoring van de BGD.

2.10 Analyse gevolgen afwijkende parameters

Onderzoeksstap *Stap 8*

Onderzoeksrapport *Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Onderzoek structuurvorming bakkenklei Deltares, 26 oktober 2022*

2.10.1 Beschrijving onderzoeksstap

In de oorspronkelijke insteek van deze onderzoeksstap gaat deze stap in op de tijdsaspecten (lange termijn gedrag van afwijkende klei) en de monitoring hierop van de BGD. De vooraf gestelde vragen in Laag B en C zijn weergegeven in Tabel 2-9.

Tabel 2-9 Onderzoeksvragen bij Stap 8

Welke vraag wordt beantwoord? Welke onzekerheid nemen we weg?		
Laag A (BGD)	Laag B (gehele traject)	Laag C (HWBP)
<i>Verklaring voor structuurvorming middels mineralogisch onderzoek</i>	Lange termijngedrag van afwijkende klei monitoren voor proefvakken, en op diverse tijdstippen de erosiebestendigheid bepalen. Dit perkt de onzekerheid in erosiecoëfficiënt voor de diverse soorten klei.	Is de aanpak zoals beproefd bij de BGD ook landelijk toepasbaar? En in hoeverre is hierbij Deltagoet-onderzoek vereist?

Gedurende het onderzoek is deze stap nader ingevuld door ook de invloed van de mineralogische samenstelling van de kleien te onderzoeken. Hiervoor zijn de 6 kleimonsters die eerder in de structuurproef in de bakken (zie paragraaf 2.4) zijn gebruikt nader onderzocht, om een verklaring te vinden voor de verschillen in structuurvorming. Deze analyse wordt onder laag A beantwoord in de volgende paragraaf.

2.10.2 Beantwoorde vragen

2.10.2.1 Laag A

De kleimonsters verschillen met name in de verhouding kwarts- en kleimineralen, de overige mineralen verschillen niet substantieel tussen de monsters. Een groot deel van het verschil in gedrag tussen kleimonsters hangt samen met het type kleimineralen die in de kleifractie aanwezig zijn. Er zijn actieve kleimineralen en minder actieve kleimineralen. Beide typen zijn aanwezig in de onderzochte kleimonsters en in duidelijk verschillende percentages. De verwachting is dat deze verschillen tot uiting komen in het gedrag van de klei zoals dat met bijvoorbeeld de vaststelling van de plasticiteitsgrenzen wordt bepaald. Uit vergelijking van deze eigenschappen met de mineralogische samenstelling van de kleifractie is een zwak verband geconstateerd tussen het gehalte actieve kleimineralen aan één kant en de plasticiteitsgrenzen en activiteit aan de andere.

In de lutumfractie zijn significante verschillen gevonden met betrekking tot het relatieve aandeel van de reactieve kleimineralen en de eigenschappen daarvan, uitgedrukt in het specifiek oppervlak, de kation uitwisselingscapaciteit (CEC) en de typen geadsorbeerde kationen. Deze eigenschappen van de kleimineralen zijn medebepalend voor de eigenschappen van de klei en geven derhalve mede inzicht in de reactiviteit van de kleimineralen. Bij vrijwel alle kleimonsters bestaan de geadsorbeerde

kationen voor het overgrote deel uit calciumionen. Deze tweewaardige kationen beperken de gevoeligheid voor krimp en zwel, waardoor het effect van de mineralogie minder tot uiting komt. Uit de resultaten van de bepalingen blijkt de krimpgrens voor de meeste onderzochte kleisoorten een vergelijkbare waarde te hebben, zo tussen 20% en 25%. Twee kleisoorten (Kleirijperij Delfzijl Valgenweg en Nieuwe Statenzijl) hebben een afwijkend lage krimpgrens van 14% tot 16%.

Eén van de doelstellingen van dit onderzoek is te trachten een relatie te leggen tussen de verschillen in structuurvorming van onderzochte kleisoorten uit de bakkenproef. Onder meer om een betere vergelijking te kunnen maken is een heranalyse van de structuurvorming uitgevoerd (zie paragraaf 2.4). Echter, ook op basis van deze heranalyse zijn geen duidelijk verbanden gevonden tussen de resultaten van de verschillende laboratoriumbepalingen en de mate van structuurvorming, inclusief de krimpgrens en de mineralogie. Een mogelijke oorzaak hiervoor kan zijn dat de begincondities van de verschillende kleisoorten bij de structuurvorming niet goed vergelijkbaar waren. Dit heeft vooral te maken met de wijze waarop de voorbehandeling is uitgevoerd: hierdoor is het waarschijnlijk dat bijvoorbeeld de historie qua veroudering, door het vooraf niet intensief mengen, niet volledig is geëlimineerd, iets dat wel nodig is voor het kunnen maken van een goede vergelijking. In paragraaf 2.4 zijn aanbevelingen opgenomen voor volgende vergelijkbare proeven.

2.10.2.2 Laag B

De BGD wordt komende 3 jaar gemonitord.

2.10.2.3 Laag C

Zie Hoofdstuk 3 Opgedane inzichten en Hoofdstuk 4 Groene versie protocol.

2.10.3 Restpunten

Zie tekstvak.

Eén van de doelen van het OGD was te onderzoeken of de erosieparameter te linken is aan meetbare kleiparameters. In de praktijk is dit nog niet zo eenvoudig gebleken. Het is lastig gebleken de erosieparameter af te leiden uit andere kleiparameters. Om dit verder te onderzoeken is het nieuwe Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) bij Noorderzijlvest opgestart. Het OEK is een vervolg op het OGD. Hierin worden 12 – 15 kleinschalige methoden gebruikt en toegepast op de in dit rapport genoemde kleien.

3 Opgedane inzichten

Het doel van het OGD is de toepasbaarheid – en voorspelbaarheid daarvan – van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. In eerste instantie met het doel te onderzoeken of een waterveilige dijk kan worden aangelegd met het demonstratieproject BGD (Laag A). Voor een eventuele opschaling van dit type dijk naar het hele traject Kerkhovenpolder-Duitsland (Laag B) is meer klei nodig, die uit meerdere batches van bijvoorbeeld de Kleirijperij zou moeten komen. In de onderzoeken is daarom ook gekeken naar wat nodig is om op te schalen. Een groot deel van de opgedane kennis over de toepasbaarheid van afwijkend materiaal is ook bruikbaar voor andere HWBP projecten in Nederland (Laag C).

Naast de toepasbaarheid van afwijkend materiaal is gekeken naar het erosiemodel van Mourik voor kleitaluds. Het huidige model is alleen geschikt voor golven kleiner dan 1,5 m en taluds steiler dan 1:5. De BGD valt hiermee buiten het toepassingsbereik. Met het onderzoek is [het bereik van het erosiemodel vergroot](#), wat voor alle Lagen A, B en C (en in het algemeen voor erosieberekeningen) van meerwaarde is.

In de volgende paragrafen wordt per onderzoekslaag ingegaan op de opgedane inzichten. Daarna komen achtereenvolgens het nieuwe erosiemodel en de restpunten van dit onderzoek aan bod. Voor de invulling van dit hoofdstuk is (naast de afzonderlijke onderzoeksrapporten) gebruik gemaakt van interviews met de in de Verantwoording (bladzijde 2) genoemde betrokkenen.

3.1 Laag A: BGD

De opgedane inzichten voor de BGD zelf betreffen voornamelijk de bevindingen over de erosiebestendigheid en verwerkbaarheid van de verschillende onderzochte kleibronnen. De inzichten per kleisoort (klei uit de Kleirijperij locatie Valgenweg, klei uit de Kleirijperij locatie Kwelder en de klei uit de Klutenplas) worden op de volgende bladzijden behandeld.

Met de Proefdijk is aangetoond dat [alle gehanteerde kleien goed verwerkbaar](#) zijn, mits ze het juiste vochtgehalte hebben. De in het TR Klei voor Dijken [3] voorgeschreven ondergrens van een Ic-waarde van 0,6 is hiermee bevestigd. Overigens was het (mede doordat de klei afwijkt) lastig om deze consistentie-index te bereiken en is de klei meermaals omgezet en op ruggen gezet om het materiaal te drogen.

De structuurproef met bakken klei laat zien dat een [sterke toekomstige structurering kan ontstaan](#) bij de gerijpte kleien. Mogelijk speelt wel de beperkte laagdikte van de klei en de drainage aan de onderzijde van de bakken een rol bij de structuurproef. Ook de deels ongelijke begincondities van de kleien maakt het onderling vergelijken lastig. Bij de Proefdijk is een stuk minder structuurvorming opgetreden gedurende de twee jaar dat deze aanwezig was op de kwelder. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het waterbufferend vermogen van een dikkere kleilaag, de aanwezigheid van vegetatie en andere klimaatomstandigheden, waardoor het uitdrogingsproces anders is.

In de Deltagoot is de Valgenwegklei en de Klutenplasklei getest. De klei uit het kwelderdepot (van slib uit polder Breebaart) is niet in de Deltagoot beproefd. In de Deltagoot is vers aangelegde klei verdicht en beproefd, waarbij structuurvorming zich nog niet heeft kunnen ontwikkelen. De erosie van Valgenwegklei voltrok zich sneller dan de Klutenplasklei. Met klei van de Dollardijk en de dijk bij Blija is kwelderklei getest die al decennia op de dijk heeft gelegen, ongeroerd en inclusief vegetatie.

Mede met de resultaten van de in de [Deltagoot](#) opgetreden erosie van de Valgenwegklei en Dollardijk klei (die in het ontwerp van de BGD is blijven liggen) is het [ontwerp van de BGD bepaald](#).

De Valgenwegklei en Klutenplasklei zijn ook op kleine schaal beproefd met [de roto-erosiemeter](#). Hoewel dit een andere type proef is (gebaseerd op stroomsnelheid) werd ook hiermee bevonden dat de Klutenplasklei een grotere erosiebestendigheid heeft dan de Valgenwegklei. Mogelijk zit hier een verband met de bevindingen uit de Deltagootproeven, waar de klei is beproefd met golfklappen. Gezien het verschil in erosieproces tijdens golfklappen en tijdens een roto-erosieproef (het afbreken van brokken versus het eroderen onder stroming) kan het zijn dat met de roto-erosiemeterproeven een ander erosieproces wordt beschouwd dat wel een gelijk beeld geeft als de Deltagoot. In de roto-erosieproeven wordt structuurvorming niet meegenomen.

In hoeverre het verschil in erosiebestendigheid samenhangt met geotechnische verschillen tussen de kleisoorten is nog niet geheel duidelijk. Met onderzoek naar de mineralogische samenstelling van de verschillende kleien is een verklaring geprobeerd te zoeken voor de verschillen in structuurvorming in de structuurproef met bakken klei. De kleimonsters verschillen met name in de verhouding [kwarts- en kleimineralen](#), de overige mineralen zijn redelijk vergelijkbaar. Naast het verschil in samenstelling, wordt een groot deel van het verschil in gedrag veroorzaakt door het type kleimineralen die in de kleifractie aanwezig zijn, waarvan het reactieve gedrag samenhangt met het type zouten in de klei. Er zijn actieve kleimineralen en minder actieve kleimineralen. Er is een zwak verband geconstateerd tussen het gehalte actieve kleimineralen en de plasticiteitsgrenzen. Er zijn echter geen duidelijke verbanden gevonden tussen de resultaten van de verschillende laboratoriumbepalingen en de mate van structuurvorming. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat de begincondities van de verschillende kleisoorten in de structuurproef met bakken klei niet goed vergelijkbaar waren. Wel is op basis van de mineralogische eigenschappen het verschil in brokkeligheid tussen de twee Blija kleien geduid.

Het is lastig gebleken de erosieparameter af te leiden uit andere kleiparameters en er zijn geen duidelijke verbanden gevonden met de voorspelbaarheid van de klei. Om dit verder te onderzoeken is het nieuwe [Onderzoek Erodeerbaarheid Klei \(OEK\)](#) bij Noorderzijlvest opgestart, zie ook Laag B in paragraaf 3.2.

Valgenwegklei

De Pilot Kleirijperij¹ is in 2018 gestart met het inbrengen van slib uit de haven van Delfzijl in de Kleirijperij depots op het terrein van Groningen Seaports, langs de Valgenweg. Het depot is ingericht met een drainerende zandlaag onderin in het merendeel van de vakken. De afgelopen jaren zijn er in de verschillende depotvakken verschillende methoden van bewerking uitgevoerd om het slib actief om te zetten in klei, uiteindelijk is de initiële laagdikte (hoeveelheid droge stof per m²) het meest van belang bevonden. De bevindingen van deze klei zijn weergegeven in onderstaand overzicht.

¹ In de Pilot Kleirijperij onderzoeken Rijkswaterstaat, de provincie Groningen, Groningen Seaports, waterschap H&A, 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.

Onderdeel	Inzicht
Proefdijk (2020)	<p>De waarnemingen en metingen tonen aan dat de klei uit beide Kleirijperij depots verwerkbaar zijn in een dijklichaam. Met een 25 tons rupskraan is een verdichting van meer dan 97% van de 1-puntsproctorproef gehaald bij een aangebrachte laagdikte van ongeveer 40 cm (los gestort). In principe zijn de gehanteerde kleien allen goed te verdichten, mits ze het juiste vochtgehalte hebben.</p> <p>Bij droge omstandigheden en het gebruik van de toplaag van de gerijpte klei uit de depots zijn de juiste condities behaald om de klei te kunnen verwerken. In de Proefdijk is vervolgens weinig structuurvorming opgetreden.</p>
Structuurproeven bakken klei (2021)	<p>Klei van depot Valgenweg heeft scheuren gekregen tot zo'n 9 cm diep en 1,8 cm breed, vergelijkbaar met klei uit de Klutenplas. De referentiekleien (klei van de Lauwersmeerdijk en klei uit het depot bij Nieuwe Statenzijl) vertoonden kleinere scheuren: respectievelijk smaller en minder diep.</p> <p>De kleien afkomstig van de Kleirijperij hadden een hoger vochtgehalte dan de referentiekleien en konden minder verdicht worden. Waarschijnlijk komt dat door het hoge gehalte aan organische stof.</p>
Onderdeel	Inzicht
Deltagootproef (2021)	<p>Voor de eerste proevenserie heeft de klei uit de Valgenweg eerst moeten drogen om het juiste watergehalte te bereiken om te kunnen verdichten (het transport heeft vlak na sneeuw/vorst plaatsgevonden).</p> <p>De erosie van de Valgenwegklei voltrok zich sneller dan de Klutenplasklei. Voor de Valgenwegklei heeft het 21 uur geduurd voordat de erosie de kruin van de dijk bereikte. Na 27 uur was er sprake van kruinverlaging en kon de dijk als gefaald worden beschouwd. Dit is langer dan de belastingduur tijdens extreme omstandigheden op de Dollard, wat zo'n 17 à 20 uur bedraagt.</p> <p>De afgeleide erosiecoëfficiënt voor ongestructureerde klei van de Valgenweg is $\mu(c_e) = 0,54$. 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.</p> <p>De Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte zijn dusdanig dat de Valgenwegklei als erosiebestendigheidsklasse 1 klei ingedeeld kan worden. Op organische stof en zoutgehalte wordt niet voldaan aan de eisen voor erosiebestendige klei uit het TR Klei voor Dijken.</p>
Roto-erosiemeter (2022)	<p>De Valgenwegklei is beproefd met de roto-erosiemeter met materiaal uit de Deltagoot en uit de Proefdijk.</p> <p>Met materiaal uit de Deltagoot begon de Valgenwegklei in de proef te eroderen bij een toerental tussen de 800 tpm en 1.000 tpm en is deze bezweken bij één stap van 100 tpm later. De Valgenwegklei uit de Deltagoot kan daarmee worden ingedeeld als 'matig tot weinig erosiegevoelig'. De erodeerbaarheid zoals gemeten met de roto-erosiemeterproeven lijken in lijn met het beeld uit de Deltagoot: ook daar erodeerde de Valgenwegklei sneller dan de Klutenplasklei.</p> <p>Met materiaal uit de Proefdijk begon de Valgenwegklei te eroderen bij een toerental tussen de 1.000 en 1.100 tpm en is deze bezweken bij 1.200 tpm. De Valgenwegklei uit de Proefdijk kan daarmee worden ingedeeld als 'weinig erosiegevoelig'.</p>
Geotechnische classificatie (2022)	<p>De geotechnische parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Valgenwegklei bedragen het volgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lutumgehalte van 43% en zandgehalte van 24% - Organisch stofgehalte van 5,1% en zoutgehalte van 6,6 g/l - Uitrolgrens van 32% en vloeigrens van 79% - Krimprens van 16%

Mineralogie	De parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Valgenweg klei bedragen het volgende: - De voornaamste mineralen zijn het inerte kwarts en klei - Activiteit (quotient van plasticiteitsindex en grootte van de lutumfractie) is 1,10
-------------	---

Kwelderdepot

In het voorjaar van 2020 is het kwelderdepot gevuld met slib uit de polder Breebaart, dus twee jaar later dan het Valgenwegdepot. In tegenstelling tot het Valgenwegdepot had dit depot geen drainerende onderlaag en lag het depot iets verdiept op de kwelder, wat er toe heeft geleid dat het onderste gedeelte van de klei vrijwel altijd in het water heeft gestaan. De bevindingen van deze klei zijn weergegeven in onderstaand overzicht.

Onderdeel	Inzicht
Proefdijk (2020)	De waarnemingen en metingen tonen aan dat de klei uit beide Kleirijperij depots verwerkbaar zijn in een dijklichaam. Met een 25 tons rupskraan is een verdichting van meer dan 97% van de 1-puntsproctorproef gehaald bij een aangebrachte laagdikte van ongeveer 40 cm. In principe zijn de gehanteerde kleien allen goed te verdichten, mits ze het juiste vochtgehalte hebben.
Bakkenproef (2021)	De klei uit het kwelderdepot had met 15 cm de diepste scheuren van de gerijpte kleien. De kleien afkomstig van de Kleirijperij hadden een hoger vochtgehalte dan de standaard dijkklei en konden minder verdicht worden. Waarschijnlijk komt dat door het grote gehalte aan organische stof.
Deltagootproef (2021)	De klei uit het kwelderdepot is niet getest in de Deltagoot.
Roto-erosiemeter (2022)	De klei uit het kwelderdepot is alleen beproefd met de roto-erosiemeter met materiaal uit de Proefdijk. Met materiaal uit de Proefdijk begon de klei uit het kwelderdepot te eroderen bij een toerental van 900 tpm en is deze bezweken bij 1.200 tpm. De klei uit het kwelderdepot kan daarmee worden ingedeeld als 'weinig erosiegevoelig'.
Geotechnische classificatie (2022)	De geotechnische parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Kwelderdepot klei bedragen het volgende: - Lutumgehalte van 39% en zandgehalte van 16% - Organisch stofgehalte van 4,2% en zoutgehalte van 54 g/l - Uitrolgrens van 34% en vloeigrens van 67% - Krimprens van 21%
Mineralogie	De parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Kwelderdepot klei bedragen het volgende: - De voornaamste mineralen zijn het inerte kwarts en klei - Activiteit (quotient van plasticiteitsindex en grootte van de lutumfractie) is 0,80

Klutenplasklei

Met de klei van de kwelder uit de Klutenplas zijn de ringdijken van het kwelderdepot gemaakt. De klei uit de Klutenplas is slib dat op de kwelder natuurlijk en over langere tijd is afgezet en gerijpt.

Onderdeel	Inzicht
Proefdijk (2020)	De waarnemingen en metingen tonen aan dat de klei uit de Klutenplas verwerkbaar is in een dijklichaam. Met een 25 tons rupskraan is een verdichting van meer dan 97% van de 1-puntsproctorproef gehaald bij een aangebrachte laagdikte van ongeveer 40 cm. In principe zijn de gehanteerde kleien allen goed te verdichten, mits ze het juiste vochtgehalte hebben.
Bakkenproef (2021)	<p>Klei van de Klutenplas heeft scheuren gekregen tot zo'n 9 cm diep en 1,8 cm breed, vergelijkbaar met klei uit het Valgenwegdepot. De referentiekleien (klei van de Lauwersmeerdijk en klei uit het depot bij Nieuwe Statenzijl) hadden kleinere scheuren: respectievelijk smaller en minder diep.</p> <p>De kleien afkomstig van de Kleirijperij hadden een hoger vochtgehalte dan de standaard dijkklei en konden minder verdicht worden. Waarschijnlijk komt dat door het grote gehalte aan organische stof.</p>
Deltagootproef (2021)	<p>De erosie van Klutenplasklei voltrok zich minder snel dan de Valgenwegklei. Na 11 uur is aan de Klutenplas zijde een kunstmatig gat gemaakt, om te voorkomen dat de proef te weinig informatie zou opleveren. Aan de Valgenweg zijde was na 27 uur sprake van kruinverlaging en kon de dijk als gefaald worden beschouwd. De erosie aan de zijde met Klutenplasklei was toen nog niet bij de kruin uitgekomen.</p> <p>De afgeleide erosiecoëfficiënt voor ongestructureerde klei van de Klutenplas is $\mu(c_e) = 0,37$. Op basis van de proefresultaten kan gesteld worden dat de erosie van de klei van de Klutenplas ongeveer anderhalf maal minder snel gaat dan die van de Valgenweg.</p> <p>De Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte zijn dusdanig dat de Klutenplasklei als erosiebestendigheidsklasse 1 klei ingedeeld kan worden, op organische stof en zoutgehalte wordt niet voldaan aan de eisen voor erosiebestendige klei uit het TR Klei voor Dijken.</p>
Roto-erosiemeter (2022)	<p>De Klutenplasklei is beproefd met de roto-erosiemeter met materiaal uit de Deltagoot en uit de Proefdijk.</p> <p>Met materiaal uit de Deltagoot begon de Klutenplasklei te eroderen bij een toerental tussen de 1.100 tpm en hoger dan 1.200 tpm en bezwijkt bij één stap van 100 tpm later. De Klutenplasklei kan daarmee worden ingedeeld als 'weinig erosiegevoelig'. De erodeerbaarheid zoals gemeten met de roto-erosiemeterproeven lijken in lijn met het beeld uit de Deltagoot: ook daar erodeerde de Klutenplasklei minder snel dan de Valgenwegklei.</p> <p>Met materiaal uit de Proefdijk begon de Klutenplasklei te eroderen bij een toerental van 600 tpm en is deze bezweken bij 1.050 tot 1.200 tpm. De Valgenwegklei uit de Proefdijk kan daarmee worden ingedeeld als 'weinig erosiegevoelig'.</p>
Geotechnische classificatie (2022)	<p>De geotechnische parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Klutenplasklei bedragen het volgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lutumgehalte van 45% en zandgehalte van 9% - Organisch stofgehalte van 5% en zoutgehalte van 8 g/l - Uitrolgrens van 33% en vloeigrens van 82% - Krimprens van 24%
Mineralogie	<p>De parameters van de in het mineralogisch onderzoek onderzochte Klutenplasklei bedragen het volgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> - De voornaamste mineralen zijn het inerte kwarts en klei - Activiteit (quotient van plasticiteitsindex en grootte van de lutumfractie) is 1,10

3.2 Laag B: gehele traject

Veel van de opgedane kennis voor de BGD is ook bruikbaar voor een eventuele opschaling van het concept over het hele traject Kerkhovenpolder-Duitsland. Hier is echter veel meer klei voor nodig dan voor de BGD nodig was en in één keer vanuit de Kleijrijperijdepots kon worden aangeleverd. Eén van de doelen van het OGD was om tot relatief eenvoudige proeven te komen waarmee het erosiegedrag van gerijpte klei beter kan worden voorspeld, zonder dat hier elke keer een Deltagootproef voor nodig is. In de praktijk is dit nog niet zo eenvoudig gebleken en laat het gedrag van klei zich lastig voorspellen. Het is lastig gebleken de erosieparameter af te leiden uit andere kleiparameters, waar dichtheid, rijping en kleiconditie tijdens belasten vaak niet in zijn opgenomen. Ook waar dit wel nader onderzocht is, zijn geen duidelijke verbanden gevonden met de voorspelbaarheid van de klei. Om dit verder te onderzoeken is het nieuwe [Onderzoek Erodeerbaarheid Klei \(OEK\)](#) bij Noorderzijlvest opgestart. In het OEK wordt voortgegaan op de resultaten van het OGD. Hierin worden 12 – 15 eenvoudige beproevingsmethoden gebruikt en toegepast op de in dit rapport genoemde kleien.

Desondanks geven de in het kader van het OGD uitgevoerde onderzoeken al een aantal aanknopingspunten:

- De kleien afkomstig van de Kleirijperij vertoonden ten tijde van de proeven een [hoog organisch stofgehalte](#). Bij zwel en krimp van de klei zorgen de scheuren ervoor dat zuurstof dieper in de klei kan doordringen. Het organisch materiaal komt in contact met zuurstof, waardoor de klei zal rijpen. Het materiaalverlies als gevolg van deze rijping zorgt voor meer open poriën en een lagere erosiebestendigheid.
- De [uitvoering van de dijkversterking](#) en de toestand van de klei ten tijde van golfaanval is minstens zo [belangrijk](#) als de kwaliteit van de klei. In de Deltagootproeven bleek bestaand dijkmateriaal met een betere samenhang een hogere erosiebestendigheid te hebben. De samenhang van de kleiblokken tijdens transport was hier al een indicatie voor. Daarnaast zijn in de Deltagoot erosiepatronen waargenomen, zowel ruimtelijk als in de tijd, die niet direct te verklaren zijn. Dit heeft waarschijnlijk te maken met onregelmatigheden, veroorzaakt door de aanleghistorie en de actuele toestand van de klei.
- Met de aanleg van de Proefdijk en de BGD is bevestigd dat met de eisen aan consistentie-index (onder- en bovengrens) uit het TR Klei voor dijken [3] ook de afwijkende klei [goed verwerkbaar](#) is. Bij het [juiste vochtgehalte](#) zal de klei [beter](#) kunnen worden [verdicht](#) en treedt minder scheurvorming op.
- De erosiebestendigheid uit de Deltagootproeven lijkt in [verband](#) te zijn met de erosiebestendigheid uit de kleinschalige roto-erosiemeterproef. In de roto-erosiemeterproef zit hier tevens een verband met de gemeten schuifspanning. De Valgenwegkleimonsters laten een hogere schuifspanning bij een bepaalde mate van erosie zien dan de Klutenplaskleimonsters. Dit houdt in dat het water in de roto-erosiemeterproef bij de Valgenwegklei een grotere wrijvingskracht bij een gegeven stroomsnelheid uitoefent op de monsters, wat samenhangt met een onregelmatig oppervlak waardoor er sneller blokjes klei loslaten.

3.3 Laag C: HWBP

Het OGD heeft aangetoond dat met **afwijkende kleien** ook een **waterveilige dijk** kan worden gebouwd. Dit betreft zowel het bouwen zelf als de erosiebestendigheid van de klei in dit ontwerp. Zeker in combinatie met een flauw buitentalud zoals de BGD is een dijk te realiseren waar erosie door golfklappen beperkt is. Dit laat zien dat ontwerpen zoals de BGD een technisch goed alternatief zijn voor een traditionele versterking met harde bekleding zoals zetsteen of asfalt.

Zowel het rijpen van slib tot dijkklei als het realiseren van een (brede) groene dijk met afwijkende kleien zijn concepten die **breder** in Nederland **toepasbaar** zijn. Hierdoor komen er grotere grondstromen met gebiedseigen grond beschikbaar voor dijkverbetering. Dit vraagt een omslag in ontwerpen: er wordt geen klei gezocht bij een eerder opgesteld ontwerp, maar het ontwerp wordt afgestemd op basis van grond / klei die dichtbij beschikbaar is. Van normgestuurd naar grondgestuurd ontwerpen, gebruikmakend van gebiedseigen grond! Bij nieuw in te winnen materiaal vraagt dit dat de benodigde volumes klei op tijd bekend moeten zijn, zeker als het materiaal nog moet rijpen.

Het verwerken van de gerijpte kleien vergt bij de uitvoering wel extra aandacht. Voor het halen van de juiste verdichting en verkitting van de klei is de **consistentie-index** (vochtgehalte) van groot belang (tussen 0,6 en 1,0). Het hogere zoutgehalte zorgt ervoor dat vocht makkelijker wordt vastgehouden, waardoor het langer duurt voordat het geschikte vochtgehalte is behaald. Dit vochtgehalte heeft ook tot gevolg dat de rijping (oxidatie) minder snel verloopt. In de uitvoering is door onder andere het op ruggen leggen van de klei en het gebruiken van de toplaag van deze ruggen een hogere consistentie-index verkregen.

De uitvoering van de BGD was tijdens een relatief droge zomer (2022, met weinig neerslag), waardoor de omstandigheden gunstig waren. In het plan van de uitvoering was rekening gehouden met een langere aanlegperiode, omdat als gevolg van de klei-eigenschappen de kans op een te lage consistentie bij neerslag groter is. Door de gunstige omstandigheden is dit nu niet nodig geweest, maar dit is wel een risico van bij het gebruik van materiaal met deze eigenschappen.

In het OGD zijn relevante proeven uitgedacht en uitgevoerd die meer vertrouwen geven in het toepassen van gerijpte mariene klei. Door in andere onderzoeken ook naar andere kleibronnen te kijken kan het inzicht voor landelijke toepassing nog verder worden vergroot.

3.4 Aangepast erosiemodel

Het bestaande erosiemodel van Mourik [4] was niet gevalideerd voor het ontwerp van de BGD, omdat het model niet gekalibreerd was voor taluds flauwer dan 1:5 en voor golven groter dan 1,5 m. Ook was er geen erosiecoëfficiënt beschikbaar voor afwijkende klei zoals uit de Kleirijperij. Met proeven in de Deltagoot en daaropvolgende probabilistische analyses is het toepassingsbereik van het erosiemodel vergroot en is een erosiecoëfficiënt afgeleid voor de geteste kleien. Wel is het van belang te beseffen dat een beperkt aantal proeven is uitgevoerd.

De Deltagootproeven bevestigen de hypothese dat bij de gehanteerde kleidiktes de kans op falen door erosie van de kruin groter is dan falen van (de dikte van) de kleilaag op het talud. Het eroderen van de kruin is met de kleidiktes in de proeven uiteindelijk het moment van falen geweest. Op basis van de resultaten van de Deltagootproeven zijn de **formules van Mourik aangepast**. Hierbij wordt het erosieproces beschreven in twee fasen: tijdens de eerste fase neemt vooral de

erosiediepte toe, maar is het erosievolume nog beperkt. Tijdens de tweede fase neemt het erosievolume toe en wordt de erosiekuil nog maar langzaam dieper. Dit wordt gemodelleerd met de volgende formules:

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

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

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

$$c_d = 0,4$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Als $H_{m0} \leq 0,4$ 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

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} = $H_{m0} / (g T_p^2 / (2\pi))$ = 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 vier beproefde opstellingen in de Deltagoot (Valgenwegklei, Klutenplasklei, dijkbekleding Blija en dijkbekleding Dollardijk) laten behoorlijke verschillen in erosiesnelheid zien, terwijl alle kleisoorten op basis van Atterbergse grenzen, lutumgehalte en zandgehalte als erosieklasse 1 klei kunnen worden bestempeld (op organische stof en zoutgehalte wordt niet voldaan aan de eisen). Waarschijnlijk door het geclusterd aanwezig zijn van zand in de klei en een grotere porositeit van de Dollardijk, kwamen er in de Deltagoot gemakkelijk brokken klei los. Het afbrokkelen van de verticaal gestoken kleiblokken was hier al een voorbode van. Hiermee lijkt bevestigd dat niet alleen de geotechnische parameters, maar ook de samenhang van de kleilaag van belang is voor de erosiebestendigheid. Waarbij de samenhang enerzijds beïnvloed wordt door de homogeniteit van het materiaal, maar anderzijds speelt ook de verdichting bij aanleg, de structuurvorming na aanleg en de conditie van de klei (onder andere het vochtgehalte) een rol.

3.5 Restpunten

Na het OGD zijn nog niet alle vragen beantwoord. Dit betreft zowel vragen uit het oorspronkelijke onderzoeksplan als nieuwe vragen die gedurende het onderzoek zijn opgekomen.

- *Kan het ontwerp van de BGD geoptimaliseerd worden, zodat voor de opschaling minder klei nodig is en toch een waterveilige dijk wordt verkregen?* Enkele optimalisaties naar aanleiding van het OGD zijn al in beeld maar zijn vanwege de planning en vastgelegde ontwerpkeuzes van het demonstratieproject niet meer doorgevoerd, zoals: het volledig probabilistisch rekenen, het meenemen van de golfhoogtebeperking agv de diepte, het wel of niet laten liggen van de huidige kleilaag en het vergraven van zand in de kern om minder klei nodig te hebben. In de uitwerking van de opschaling wordt dit nader onderzocht.
- *Hoe ontwikkelt het zoutgehalte en organische stofgehalte van gerijpte klei op langere termijn (zoals de aangebrachte klei op de BGD) en wat betekent dit voor de kwaliteit van de kleilaag en de erosiebestendigheid?* In de komende 3 jaar wordt de BGD gemonitord en hopen we hier antwoorden op te krijgen.
- *Hoe ontwikkelt de structuurvorming zich op langere termijn, hoe is dit op voorhand te voorspellen en welke rol spelen bodemkundige processen daarin?* Dit betreft zowel de hoeveelheid en grootte van scheuren als de diepte tot waar structuurvorming plaatsvindt. In de komende 3 jaar wordt de BGD gemonitord en zal ook de eerste structuurvorming zichtbaar worden. Op de BGD zijn twee verschillende grasmengsels toegepast: een grasmengsel aangepast op zoute omstandigheden en hetzelfde mengsel met toevoeging van kruiden.
- *Wat is het precieze effect van structuurvorming op erosiebestendigheid? Welke structuurvorming is toelaatbaar en welke structuurvorming is negatief; hoe verhoudt het verschil in structuurvorming in de diepte van de kleilaag zich tot de erosiebestendigheid van de totale laag? Kan je dit beïnvloeden?*
- *Wat zijn de consequenties van het toepassen van klei met een hoog organisch stof- en zoutgehalte op het beheer? Kan er zich een goede kruidenrijke vegetatie ontwikkelen?* Deze vragen worden beantwoord in het onderzoek monitoring na aanleg (2022 – 2025)
- *Hoe is de toekomstige erosiebestendigheid te voorspellen op nieuw materiaal, dat nog niet op een dijk ligt?* Dit betreft in een vroeg stadium het al kunnen voorspellen van baggermateriaal en in een later stadium de gerijpte klei die nog niet op een dijk is verwerkt.
- *Hoe hangt de erosiebestendigheid samen met geotechnische en mineralogische eigenschappen en welke eigenschappen zijn daarbij het meest bepalend?* In het nieuwe Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) zal hier op verder worden gegaan.

4 Groene versie protocol

Dit hoofdstuk betreft het sluitstuk van Stap 10 van het OGD: een handreiking voor het gebruik van afwijkende kleien met betrekking tot ontwerp, uitvoering en beheer. De handreiking is opgesteld op basis van de uitkomsten en inzichten van het OGD, die specifiek in het kader van de BGD is uitgevoerd. Met de uitgevoerde onderzoeken is voldoende zekerheid opgebouwd dat de BGD (het demonstratieproject) een veilige dijk is. Desondanks zijn er nog veel openstaande vragen en zijn er gedurende het onderzoek nieuwe vragen bijgekomen. Een deel hiervan heeft in vervolgonderzoek al een plek gekregen. Daardoor is het een feit dat deze handreiking op voorhand niet compleet is, echter wel richting geeft in de toepassing van afwijkende kleien.

Deze handreiking gaat in op de meerwaarde van de proeven/onderzoeken die in het OGD zijn uitgevoerd, met betrekking tot ontwerp, uitvoering en beheer. Het geeft daarmee een handelingsperspectief voor de toepassing van afwijkende kleien in de dijkenbouw in de rest van Nederland. Tevens zijn hierbij aandachtspunten geplaatst om de uitkomsten op waarde te schatten.

4.1 Ontwerp

Het ontwerp van de BGD is enerzijds bepaald aan de hand van de onderzoeken vanuit het OGD, anderzijds door aspecten als impact op de omgeving. Alle afwegingen voor het definitief ontwerp van de BGD zijn opgenomen in het betreffende ontwerprapport [5]. Uiteindelijk is een BGD aangelegd die op basis van de onderzoeken uit het OGD als waterveilige dijk wordt gezien. In onderstaand overzicht worden specifiek de proeven gegeven die van toegevoegde waarde zijn (geweest) voor het gebruik van afwijkende kleisoorten in het ontwerp.

Onderdeel	Meerwaarde	Aandachtspunten
Bakkenproef 	<p>Structuurvorming en samenhang is een belangrijke indicator gebleken voor de erosiebestendigheid. Met de structuurproef op klei in bakken kan versneld gestructureerdheid worden opgewekt. Dit geeft een beeld van de te verwachten structuurvorming (en zwel en krimpgedrag) van afwijkende kleien in vergelijking tot referentiemateriaal.</p> <p>Het onderzoeken van ontwikkeling in de tijd is iets wat in de GWW sector nog maar weinig voorkomt. Door vooraf de verwachte gestructureerdheid in beeld te brengen kan vroegtijdig bij ontwerp, aanleg en beheer gestuurd worden op het beperken van de negatieve effecten.</p>	<p>De dikte van de lagen lijkt van invloed te zijn op de structuurvorming. Hetzelfde materiaal op bijvoorbeeld de Proefdijk had minder structuurvorming, mogelijk door het vocht naleverend vermogen van een dikke kleilaag. Het is belangrijk om bij de resultaten uit de bakken alert te zijn op het realiteitsgehalte.</p> <p>Verschillen in veroudering van de kleien kunnen andere resultaten opleveren. Vooraf moet goed nagedacht worden over de begincondities van de kleien. Wat de structuurvorming precies voor effect heeft op de erosiebestendigheid moet nog verder worden onderzocht.</p>

<p>Deltagoot</p> 	<p>In de Deltagoot kan de erosiebestendigheid van de afwijkende klei en het bijbehorende ontwerp getest worden met realistische golfbelasting (golfklappen). Vanwege de schaalgrootte is dit tot dusver de meest nauwkeurige inschatting van de weerstand tegen erosie.</p>	<p>Met de Deltagoot wordt bij nieuw toe te passen klei vers en niet-gestructureerd materiaal getest. De erosiebestendigheid komt daarom waarschijnlijk niet direct overeen met een kleilaag die al langere tijd op een dijk heeft gelegen.</p> <p>Gebruik van de Deltagoot is een relatief duur onderzoek, waardoor waarschijnlijk één proef per materiaal zal worden uitgevoerd. Dit resulteert in een beperkte dataset.</p>
<p>Eenvoudige beproevingsmethodes (roto-erosiemeter)</p> 	<p>Eenvoudige beproevingsmethodes zoals de roto-erosiemeter test geven inzicht in de erosiebestendigheid, die bovendien in lijn lijkt te zijn met de resultaten uit de Deltagootproef.</p>	<p>De roto-erosiemeterproef geeft de weerstand tegen waterstroming en test daarmee een ander fenomeen dan de erosie door golfklappen: de proef heeft een andere belasting en ook het type erosie is geheel niet gelijk. Het is de vraag of dergelijke kleinschalige proeven grootschalige processen wel goed in beeld brengen. Daarom liggen er plannen om een groter roto-erosiemeter apparaat te ontwikkelen.</p> <p>In het vervolg Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) wordt meer ingegaan op de toepasbaarheid van eenvoudige beproevingsmethodes voor het inschatten van de erosiebestendigheid.</p>
<p>Mineralogisch onderzoek</p> 	<p>De lutumfractie en de mineralogische samenstelling van het monster zijn medebepalend voor de eigenschappen van de klei. Op basis van de samenstelling kan mogelijk een verband worden gevonden met de te verwachten structuurvorming.</p>	<p>In het OGD is geen duidelijk verband gevonden tussen de mineralogische bepalingen en de mate van structuurvorming in de proef met bakken klei, mogelijk door verschillende beginsituaties van de klei. Intensieve menging is nodig om sprake te laten zijn van maagdelijk gedrag.</p> <p>De monstergrootte is klein en daarmee kan heterogeniteit het resultaat beïnvloeden.</p>



4.2 Uitvoering

De stelling luidt: 'Met goede klei kan een slechte dijk worden aangelegd en andersom: met 'slechte' klei een goede dijk'. De uitvoering van het werk is namelijk van groot belang. In onderstaand overzicht zijn aanknopingspunten gegeven voor het onderzoeken van de verwerkbaarheid van afwijkende kleien.

Onderdeel	Meerwaarde	Aandachtspunten
Proefdijk 	<p>De aanleg van een proefdijk(je) geeft inzicht in de verwerkbaarheid van het afwijkende materiaal tijdens de uitvoering en de juiste methode van verdichting. Afhankelijk van de levensduur van de proefdijk geeft het ook gedeeltelijk inzicht in de structuurvorming onder verschillende seizoenen en weersomstandigheden. Beide zijn belangrijke inzichten voorafgaand aan de daadwerkelijke dijkversterking.</p>	<p>Om in het ontwerp en de uitvoering wat met de inzichten van een proefdijk te kunnen doen, moet vroegtijdig een proefdijk worden aangelegd. De start van de planuitwerkingsfase zou hiervoor geschikt kunnen zijn.</p> <p>De uitvoering van een proefdijk(je) geeft met name inzicht in de verwerkbaarheid van het materiaal. Alternatieve proeven kunnen mogelijk hetzelfde inzicht geven. Een meerwaarde van een proefdijk is dat deze na aanleg kan worden gemonitord, zodat beheersmaatregelen op de inzichten kunnen worden afgestemd.</p>
Verdichting en consistentie-index 	<p>Met afwijkende klei kan een sterke dijk worden gerealiseerd, mits deze goed wordt aangelegd. De verdichting speelt hier een belangrijke rol in. Bij een te hoog watergehalte zal de klei tijdens het compacteren of aanrillen wegpersen en wordt geen hoge dichtheid behaald. Tevens zal dan na aanleg nog veel water uittreden, wat leidt tot krimp en scheurvorming. Bij het optimale vochtgehalte uit de proctorproef is de te behalen verdichting maximaal. De eis aan consistentie-index van minimaal 0,6 in de kern en 0,75 in de dijkbekleding (uit het TR Klei voor dijken [3]) is een belangrijke graadmeter voor het goed kunnen verwerken en verdichten. Als bovengrens wordt een consistentie-index van 1,0 aanbevolen.</p>	<p>Naast de conditie van het materiaal is ook de laagdikte tijdens verdichten van belang. Bij het aanbrengen van te dikke lagen (> 40 – 50 cm, los gestort) kan de laag niet over de volledige dikte worden verdicht. Bij controle op behaalde verdichting is tevens de locatie van het monster van invloed: onderin de laag zal relatief de minste verdichting zijn behaald.</p>

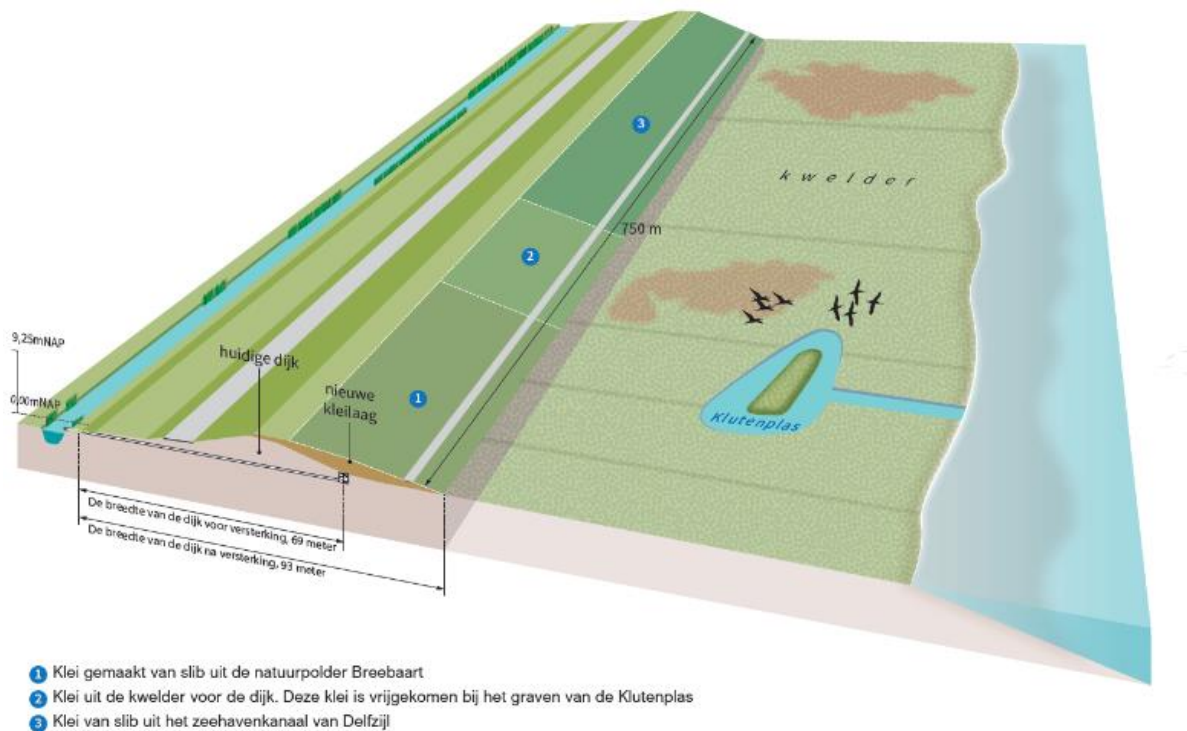
4.3 Beheer

Het OGD is niet toegespitst op monitoring, maar op het inwinnen van informatie voor het ontwerp van de BGD. Na aanleg zal de BGD nog drie jaar worden gemonitord. In het monitoringsplan zijn de inzichten uit het OGD meegenomen. In onderstaand overzicht is een aantal aanknopingspunten weergegeven ten aanzien van de beheerfase en monitoring van dijken met afwijkende klei.

Onderdeel	Meerwaarde	Aandachtspunten
Profielkuilen 	Met het graven van profielkuilen kan de ontwikkeling van de afwijkende klei in de tijd worden bijgehouden. Scheurvorming, bodemvorming en doorworteling kan hiermee in kaart worden gebracht en worden beschreven middels het door Deltares opgestelde protocol [11].	Bij voorkeur wordt langere tijd gemonitord (+10 jaar), aangezien afwijkende klei (in dit geval zoute en hoog organische klei) zich over langere tijd kan blijven ontwikkelen
Kleinschalige proeven (penetrometer en hand torvane) 	In de profielkuilen kunnen eenvoudige beproevingsmethodes worden uitgevoerd, zoals het meten van de weerstand tegen indrukken met een penetrometer en het meten van de schuifsterkte met de hand torvane. De resultaten kunnen dienen als indicatie en zijn geschikt voor het opsporen van heterogeniteits- en dichtheidsverschillen. Het is belangrijk rekening te houden met het uitdrogen van de wand en dus direct na ontgraven de proeven uit te voeren.	Het verband tussen eenvoudige beproevingsmethodes als de penetrometer en hand torvane met de erosiebestendigheid is nog niet volledig onderzocht. In het vervolg Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK) wordt meer ingegaan op de toepasbaarheid van dergelijke proeven voor het inschatten van de erosiebestendigheid.

5 Nawoord

Tien jaar geleden is binnen het Deltaprogramma Waddengebied gestart met een onderzoek naar innovatieve dijkconcepten die de verbinding leggen tussen waterveiligheid en het werelderfgoed Waddenzee. Sindsdien is met grote vastberadenheid gewerkt aan het concept Brede Groene Dijk (BGD) in combinatie met hergebruik van het slib uit de Eems-Dollard. De toepassing van slib als bouwstof uit de Eems-Dollard is een wereldprimeur. Het project heeft eind 2022 de prijs gewonnen voor het meest aansprekende project als het gaat om effectieve, innovatieve en kansrijke uitvoering van het nationaal Deltaprogramma.



Figuur 5-1: Schets van Brede Groene Dijk

Aanleiding

De 15 kilometer lange dijk van Kerkhovenpolder naar Duitsland moet versterkt worden. Uit de laatste toetsronde blijkt dat de bekleding van de dijk niet aan de gestelde eisen voldoet. Traditionele versterking betekent dat de grasbekleding vervangen wordt door asphalt. Waterschap H&A kiest voor een meer natuurlijke dijk die mooi in het landschap past. De dijk wordt breder, met een flauw talud, voorzien van een dikke laag klei, begroeid met een kruidenrijk grasmengsel ter bevordering van de biodiversiteit. Het flauwe talud vangt de golfklappen op, de klei komt van dichtbij.

Om van de bestaande afgekeurde dijk een BGD te maken, is veel klei nodig: ruim 2 miljoen m³. In het demonstratieproject BGD (750 meter) is de zoektocht naar lokaal beschikbare klei gekoppeld aan een oplossing van het probleem van de Eems-Dollard, namelijk de vertroebeling van het estuarium door slib. In de pilot Kleirijperij heeft EcoShape slib uit de nabijgelegen brakwater-natuarpolder Breebaart en baggerslib uit de haven van Delfzijl in slechts drie jaar gerijpt tot stevige dijkklei, een proces dat in de natuur tientallen jaren duurt. Het doel van het demonstratieproject is om te onderzoeken op welke wijze met deze klei een veilige BGD kan worden gebouwd. De gerijpte klei voldoet namelijk niet aan de eisen die aan dijkklei worden gesteld: het zout- en organisch

stofgehalte is te hoog. Om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid daarvan) van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie te vergroten is het onderhavige OGD-onderzoek uitgevoerd.

Geleerde lessen

Lokaal beschikbare grond, die (net) niet voldoet aan de strenge eisen die aan dijkenklei worden gesteld, wordt in Nederland nauwelijks toegepast. In de dagelijkse praktijk maken we een ontwerp, gebaseerd op klei die aan de norm voldoet. In lijn met de aanbevelingen van het HWBP-innovatieproject Dijkversterking met Gebiedseigen Grond draaien wij dit [ontwerpproces](#) om. Na vaststelling van de sterkteparameters van lokaal beschikbare klei ontwerpen we de dijk zodanig dat deze voldoet aan de veiligheidsnorm. Hiermee leggen we de basis voor nieuwe ontwerpmethoden voor dijken. Hoofdvariabelen in het ontwerp zijn de dikte van de kleilaag en de taludhelling van de dijk. Zo bevorderen we de toepassing van [gebiedseigen grond](#). Dit vermindert de overlast voor de omgeving door minder transport en levert milieuwinst op door vermindering van CO₂-uitstoot en is in lijn met het uitgangspunt Water en Bodem sturend.

Een [zorgvuldige realisatie](#) is erg belangrijk. De klei dient bij aanbrengen het [juiste vochtgehalte](#) (niet te droog en niet te nat) te bevatten en goed te worden [verdicht in dunne lagen](#) (0,25 m). Deze verdichting bepaalt in hoge mate de erosiebestendigheid van de klei. Een slecht verdichte kleilaag gaat namelijk veel scheuren vertonen. Een goede monitoring gedurende de realisatie is hiervoor een must. Tenslotte is een BGD uitermate klimaat-adaptief doordat deze eenvoudig met extra klei uit te breiden is, zodra verdere zeespiegelstijging dat vereist.

Tenslotte

Het waterschap H&A is trots op de resultaten van het onderzoek. De resultaten brengen het gebruik van gebiedseigen grond binnen dijkversterkingsprojecten weer een stapje dichtbij. Het waterschap dankt al haar partners die dit onderzoek mogelijk hebben gemaakt.

6 Referenties

- [1] Plan van aanpak Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen bouw materiaal voor dijken. Waterschap Hunze en Aa's, 5 januari 2021.
- [2] HWBP Aanmeldformulier Kennis en Innovatie: Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie. Waterschap Hunze en Aa's, 16 juli 2020.
- [3] Technisch rapport klei voor dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), mei 1996.
- [4] Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack. Deltares, G.C. Mourik, januari 2015.
- [5] Ontwerprapport Brede Groene Dijk, Uitwerking DO NL21-648800269-2801. Sweco Nederland, 16-08-2021
- [6] Memo Heroverweging klei eisen zoals opgenomen in de samenwerkingsovereenkomst (SOK) pilot Kleirijperij. IPM team Brede Groene Dijk i.s.m. Projectgroep Kleirijperij, EcoShape, POV-DGG en Deltares, 16 oktober 2020.
- [7] 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 en Van Oord, 26 november 2020.

Onderzoeksrapporten Deltares

- [8] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Definitie en Bronnenonderzoek. Deltares, 5 oktober 2021.
- [9] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk. Deltares 19 oktober 2022.
- [10] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk. Deltares, 22 september 2022.
- [11] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk. Deltares 20 december 2022.
- [12] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 2b: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk. Deltares 20 december 2022.
- [13] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 4: Structuurvorming in klei van Kleirijperij na versnelde seizoenen. Deltares, 21 april 2021.
- [14] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei. Deltares, 20 december 2022.
- [15] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven. Deltares, 5 oktober 2021.
- [16] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: OpenFOAM berekeningen voor invloed van waterstand en golfhoogte op erosiesnelheid. Deltares, 10 maart 2022.
- [17] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 3: Probabilistische berekeningen van de faalkans van de kleibekleding met gras. Deltares, 14 september 2022.
- [18] Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei. Deltares, 15 september 2022.

Bijlage A: Samenvatting PvA OGD

SAMENVATTING PvA november 2020	PvA Onderzoek toepasbaarheid en voorspelbaarheid lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie
Indiener	<p>Waterschap Hunze en Aa's (H&A).</p> <p>Waterschap H&A werkt hierin samen met de pilot Kleirijperij², en de EcoShape partners Deltares, van Oord en Boskalis.</p>
Thema (HWBP K&I agenda)	<p>Strategie en aanpak projecten</p>
Doel van het project	<p>Het doel van het voorstel is de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid daarvan) van lokaal gewonnen kwelder materiaal en gerijpte baggerspecie in het algemeen te vergroten.</p> <p>Het onderzoek bevat een specifieke praktijk casus waarbij het gaat om de toepasbaarheid van gebiedseigen klei uit drie bronnen waarmee het demonstratieproject de Brede Groene Dijk (BGD) gaat worden aangelegd. Uit de pilot Kleirijperij blijkt dat de gebiedseigen klei niet voldoet aan de gestelde eisen t.a.v. zout en organische stof.</p> <p>Uit het demonstratieproject blijkt dat de waarde van een erosieparameter van afwijkende kleien niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters. Ook is het toegepaste erosiemodel niet geschikt voor golven hoger dan 1,5 m. en taluds, flauwer dan 1:5.</p> <p>Dit onderzoeksvoorstel is opgezet om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de eigenschappen van de gerijpte baggerspecie/ het lokaal gewonnen kwelder materiaal en een referentie kleisoort, de erosie op een talud van 1:7 met een golfhoogte van 2,5 m – en de manier waarop met een aangepast ontwerp, adequate uitvoering en een afgestemd beheer kan worden gekomen tot een waterveilige dijk.</p>
Aanpak & Resultaat	<p>Het Onderzoeksvoorstel bestaat uit tien stappen. Het betreft:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Definitiefase en bronnenonderzoek 2. Materiaalonderzoek <ol style="list-style-type: none"> a. Bestaande dijken b. Aanleg proefdijk 3. Probabilistische berekeningen 4. Structuurproeven met bakken klei 5. Evaluatie en tussenrapportage

² In de Pilot Kleirijperij onderzoeken Rijkswaterstaat, de provincie Groningen, Groningen Seaports, waterschap H&A, 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.

	<ol style="list-style-type: none"> 6. Krimpgrens en erosiemeterproeven 7. Onderzoek diverse parameters 8. Analyse gevolgen afwijkende parameters 9. Deltagootproeven 10. Eindrapportage
<p>Organisatie</p>	<p>Het waterschap H&A is trekker van het onderzoek, de projectgroep Kleirijperij is haar partner, Deltares, van Oord en Boskalis ondersteunen en voeren het onderzoek uit. Daarnaast vindt advisering plaats vanuit de POV DGG, het HWBP, Adviesteam Dijkontwerp (AD) en het team Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI).</p> <p>De totale kosten van het onderzoek zijn geraamd op € 2,787 miljoen inclusief BTW. De kosten worden gedekt door bijdragen van het HWBP, waterschap H&A, de provincie Groningen (projectgroep Kleirijperij), Boskalis en Van Oord en het Topconsortium Kennis en Innovatie (TKI) Deltatechnologie. Voor de bijdragen van het HWBP en TKI Deltatechnologie zijn hiertoe verzoeken gedaan door respectievelijk het waterschap H&A en Deltares. Totale bijdrage derden bedraagt naar verwachting € 0,36 miljoen exclusief / € 0,435 inclusief omzetbelasting. Aanvraag bij HWBP betreft € 2,35 miljoen.</p> <p>Het onderzoeksproject loopt van 1 juli 2020 tot en met 1 oktober 2022.</p>
<p>Kennisstrategie</p>	<p>Het waterschap H&A en haar partners gaan de opgedane kennis delen binnen het waterveiligheid netwerk van Nederland. De bedoeling is dat deze kennis en ervaring ook binnen andere projecten toegepast kunnen worden.</p>

Rendement

Het onderzoek beoogt meer inzicht te krijgen in het verantwoord gebruik van afwijkende grondsoorten als bouw materiaal voor dijken. Hierdoor komen er grotere grondstromen met gebiedseigen grond beschikbaar voor dijkverbetering. Dit betekent ook een duurzamere en circulaire aanpak: lager gebruik primaire grondstoffen, vermindering van transportbewegingen, een lager brandstofverbruik, lagere emissies van broeikasgassen, vermindering van de emissie van stikstof en minder overlast voor de lokale omwonenden. Kortom het onderzoek heeft een groot maatschappelijk belang.

De Deltagootproef uit dit onderzoeksplan geeft inzicht in de erosie van gras op kleitaluds in de golfoploop- en golfklapzone met een helling van 1:7 en een golfhoogte van 2,5 meter. Onze inschatting is dat het onderzoek kan leiden tot een besparing in kleidikte van 0,5 – 1,0 meter en daarmee een kostenbesparing van € 0,5 – 1,0 miljoen per kilometer dijkverbetering. Alleen al voor het dijkverbeteringstraject Kerkhovenpolder – Duitsland geeft dit een besparing van € 6 – 12 miljoen. Voor het gehele HWBP zou een brede groene dijk misschien wel voor 10 - 20% van de zeedijken in NL een optie kunnen zijn. Bij een besparing van 1 miljoen per kilometer dijkverbetering en een opgave van (bijvoorbeeld) 250 kilometer dijk komen we op een totale (extra) besparing van 25 - 50 miljoen voor het gehele HWBP.

Bijlage B: Interviews