

MANAGEMENTSAMENVATTING

Voor het ontwerpen en beoordelen van dijken in Nederland is er behoefte aan kennis over de erosiesnelheid van klei. De thans beschikbare kennis laat reeds zien dat de bijdrage van de kleilaag aan de waterveiligheid van een dijk belangrijk is.

Klei wordt op zeedijken en rivierdijken toegepast op zowel het binnentalud als het buitentalud. In de meeste gevallen is golfaanval de belangrijkste reden van de erosie van de klei, maar soms kan ook stroming hieraan bijdragen. Naast klei wordt er soms ook andere min of meer cohesieve grond of keileem toegepast.

De faalkans ten aanzien van het mechanisme “erosie van het buitentalud” door golfaanval, zoals deze beoordeeld moet worden volgens de Waterwet, wordt voor een belangrijk deel bepaald door de erosiesnelheid van de klei in de dijk. In veel dijken betreft dit de kleilaag als schil over de zandkern van de dijk, inclusief de bijdrage van het eventuele gras, steenzetting of asfalt daarop, maar in een aantal gevallen is ook een deel van de dijk kern van klei. Deze klei uit de kern is anders verouderd (minder gestructureerd) en meer gecompacteerd dan die uit de kleilaag aan het oppervlak, en heeft daardoor andere erosie-eigenschappen (kleinere erodeerbaarheid). De aanwezigheid van de oppervlakkige klei (dek-)laag en kleikern beperken de faalkans betreffende het mechanisme “erosie van het buitentalud” bij golfaanval.

De vaststelling van de faalkans door erosie van de klei in de dijk vindt plaats in de Deltagoot. Het profiel van de dijk wordt met de klei in ongestoorde monsters in de Deltagoot opgebouwd, en belast met golven. Dat is kostbaar en beschadigt de dijk aanzienlijk. In dit onderzoek wordt een strategie ontwikkeld om met kleinschaliger erosieproeven voldoende gegevens te verzamelen over de erosiesnelheid van kleimateriaal van willekeurige samenstelling. Door de verkregen meetwaarden te relateren aan de uitkomsten van de (eerdere) Deltagootproeven van hetzelfde kleimateriaal kan het toepassingsbereik van het erosiemodel dat is ontwikkeld voor de Deltagootproeven worden vergroot. De meetwaarden van de kleinschaliger proeven kunnen dan als input worden genomen in de erosieformule. Met Open Foam berekeningen wordt het bereik m.b.t. de hydraulische belasting (invloed waterstand en golven) uitgebreid. Zo kan van een brede range van dijken-met-kleilaag de bijdrage van de klei aan de sterkte van de dijk gekwantificeerd worden.

Het maakt het mogelijk om een grotere faalkans van de toplaag van de bekleding van een dijk te accepteren, waardoor bestaande steenzettingen of asfaltbekledingen toch goedgekeurd kunnen worden, of zelfs gras voldoende is. In veel zeedijken in Groningen, Friesland, Zeeland en Brabant is het oude kleiprofiel van de vroegere dijk nog aanwezig. Deze kwantificering geeft de mogelijkheid om bij dijkverbeteringsprojecten aanzienlijke besparingen te bereiken voor dit relatief dure onderdeel van de dijk.

1 Probleemstelling

Voor het ontwerpen en beoordelen van dijken in Nederland is er behoefte aan kennis over de erosie-eigenschappen van klei. De thans beschikbare kennis laat reeds zien dat de bijdrage van de kleilaag aan de waterveiligheid van een dijk belangrijk is, maar de onzekerheden en beperkingen in de toepasbaarheid van de kennis op de diverse kleisoorten is een probleem. De reststerkte, die overblijft in de kering na het falen van gras- of steen- en asfaltbekleding is nog onbekend.

Klei wordt op zeedijken en rivierdijken toegepast op zowel het binnentalud als het buitentalud en soms ook in de kern van de dijk. Om de bijdrage van de klei aan de waterveiligheid te kunnen kwantificeren, is kennis nodig over de erosiesnelheid, die afhankelijk is van de klei-eigenschappen. In de meeste gevallen, vanuit zee, is golfaanval de belangrijkste reden van de erosie van de klei, maar soms kan ook stroming hieraan bijdragen – vooral in de rivieren. Naast klei wordt er soms ook andere min of meer cohesieve grond of keileem toegepast.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen:

- Erosiebestendigheid: de hydraulische belasting tot waar er geen noemenswaardige erosie van de klei optreedt.
- Erodeerbaarheid: de snelheid waarmee de klei erodeert zodra de hydraulische belasting groter is dan de erosiebestendigheid.

Beide eigenschappen zijn afhankelijk van de kwaliteit van de klei. In het huidige onderzoek wordt de aandacht gefocust op erodeerbaarheid als functie van de hydraulische belasting. Daarbij komt tevens erosiebestendigheid aan de orde: hydraulische belasting waarbij de erosiesnelheid gering is.

2 Innovatie-onderzoek Noorderzijlvest

De doelstellingen, en daarmee de afbakening, van het voorgestelde onderzoek zijn:

1. Een generieke methode ontwikkelen en valideren zodat de bijdrage aan de waterveiligheid van een brede range kleimateriaal - gestructureerd en ongestructureerd - met voldoende betrouwbaarheid kan worden berekend, en het opstellen van het erosieprofiel van de kering, zodat dit benut kan worden voor beoordeling en ontwerp m.b.t. de faalmechanismes GEBU en ZST. Dit betreft een o.a. een forse uitbreiding van het bestaande erosiemodel.
2. Een aanzet geven voor de ontwikkeling van een onderzoeksprotocol t.b.v. het vaststellen van de erosiebestendigheid en de erodeerbaarheid (als onderdeel van de analyse GEBU en ZST) die met minimale verstoring van het dijklichaam een voldoende betrouwbare karakterisering van de kwaliteit van de klei oplevert.
3. Het bepalen van de erodeerbaarheid van klei uit de kern van een dijk ter versterking van de classificatiemethode van klei en voor het kunnen benutten van de bijdrage van de kleikern aan de waterveiligheid.

Het onderzoeksplan is tot stand gekomen met input uit tussentijdse overleggen van het coördinatieteam K&I-programma HWBP, en het begeleidingsteam. Daarnaast worden marktpartijen benaderd om onderdelen van het onderzoek uitvoeren.

2.1 Overkoepelende methodiek

Het onderzoek is exploratief. Dat betekent dat het is opgedeeld in stappen die grotendeels achtereenvolgens, en soms in gedeeltes tegelijkertijd worden uitgevoerd. Op basis van de resultaten van voorafgaande stappen wordt door de Programmadirectie (PD) HWBP een go/no-go beslissing genomen m.b.t. de uitvoering van de volgende stappen. Dat kan betrekking hebben op de inhoud en omvang, en ook op de timing. Indien het op het laatste betrekking heeft, kan het betekenen dat deze stap niet meer in dit onderzoek uitgevoerd gaat worden, maar in een ander onderzoek.

Er zijn drie innovatie niveaus onderscheiden waarop dit onderzoek uitgevoerd kan worden. De besluitvorming door de PD HWBP over het gewenste niveau vindt plaats in de go/no-go beslissingen. De drie niveaus zijn:

1. Basisniveau: het onderzoek van reeds in de Deltagoot beproefde kleisoorten van andere locaties met kleinschaliger proeven van erosiebestendigheid en/of erodeerbaarheid om het onderscheidingsvermogen van de kleinschalige proeven vast te stellen, inzicht in het erosieprofiel te verkrijgen en om de relatie van de gemeten waarden te relateren aan de erosiecoëfficiënt die eerder in de Deltagoot was vastgesteld.

2. Basisniveau + eerste aanvulling: uitbreiding van de kleinschalige erosieproeven en de bepaling van de erosiecoëfficiënt in de Deltagoot met weinig gestructureerd en gecompacteerd kleimateriaal uit de kern van de Dubbele Dijk. Dit geeft kwantitatief inzicht in de veroudering van klei. Tevens worden Open Foam berekeningen uitgevoerd om het toepassingsbereik van de resultaten te verbreden;

3. Basisniveau met twee aanvullingen: als hierboven, en bovendien de toepassing van de resultaten op een nieuwe locatie elders in Nederland, teneinde de instrumenten die het resultaat zijn uit 2. te valideren op generieke toepasbaarheid.

Go/no-go besluiten worden genomen door de programmadirectie van het HWBP (PD). Een besluit binnen de kaders van de subsidie wordt genomen door de teamleider Kennis en Innovatie van de PD. Een besluit buiten de kaders wordt genomen door het MT van de PD. Door het begeleidingsteam nauw te betrekken bij de ontwikkelingen tijdens elke stap, kan het Go / no go besluit op tijd genomen worden.

2.2 Onderzoeksstappen

De volgende onderzoeksstappen worden voorgesteld:

0. Evalueren van kennis uit erosie-onderzoeken en andere, bodem-materiaal karakteriserende, onderzoeken (zoals bv. veroudering) zodat inzicht in het erosieprofiel ontstaat en het opstellen van het onderzoeksplan van de kleinschalige erodeerbaarheid- en/of erosiebestendigheidspoeven op de eerder in de Deltagoot beproefde kleisoorten aangevuld met profielanalyses.
1. Uitvoering van het onderzoeksplan van stap 0: testen van beproevingsmethodes op klei met bekende erosiecoëfficiënt en vaststellen van de invloed van variatie in erodeerbaarheid als functie van de diepte (erodeerbaarheidsprofiel).
2. Uitbreiding van het bereik van de metingen naar ongestructureerde, gecompacteerd klei uit de kleikern van de Dubbele Dijk, zodat zicht ontstaat op het effect van veroudering van de klei
3. Verbetering van de erosieformules en update software.
4. Voorstellen voor onderzoeksstrategieën erodeerbaarheid voor toetsing en ontwerp van keringen
5. Validatie van de ontwikkelde instrumenten in een dijkverbeteringsproject op andere locatie, waar ook veelal kleikernen in de keringen liggen.

Stap 0 en stap 1 richten zich op de kennisontwikkeling betreffende de kleikwaliteit (meting en karakterisering van de erosiebestendigheid/erodeerbaarheid met verscheidene meetmethodes). Gezocht wordt naar (een combinatie van) kleinschalige beproevingsmethodes waarvan de meetwaarden gekalibreerd kunnen worden met de resultaten van eerdere beproeving van het kleimateriaal in de Deltagoot. En waarbij de dijk niet grootschalig beschadigd wordt, maar tóch een erosieprofiel gemaakt kan worden. In stap 0 wordt de meetstrategie opgezet. Stap 2 richt zich op het meten van de erosiesnelheid van de ongestructureerde klei uit de kern van de dijk. De nu bereikbare klei wordt beproefd met de gekozen kleinschalige beproevingsmethodes en in de Deltagoot. Dat laatste is nodig om de werkelijke erodeerbaarheid te kwantificeren, zodat het vergeleken kan worden met de resultaten van de eenvoudige beproevingsmethodes. Ook wordt de 3D Geoscan in het afgegraven profiel uitgevoerd. Stappen 3 en 4 betreffen de ontwikkeling van praktisch bruikbare instrumenten voor ontwerp en beoordeling. Ook wordt onderzocht hoe met de ruimtelijke variatie (inhomogeniteit in de diepte en langs de dijk) van dijkmateriaal omgegaan moet worden. Tijdens het onderzoek in stap 1 en 2 kan de ruimtelijke variatie bepaald worden door vele monsters te analyseren en/of met de Borehole Erosion Test (BET), maar voor de praktijk zal een slim protocol worden opgesteld. Stap 5 is de validatie van de ontwikkelde instrumenten op een locatie elders.

Voor elke stap wordt een Deelplan vooraf opgesteld, gebruik makend van de kennis die in de voorgaande stap verworven is en de resultaten van het overleg met de expertgroep met inbreng van Kennis voor Keringen, Adviesteam Dijkontwerp en HWBP-techniek. Zo worden alle betrokkenen meegenomen in de ontwikkelingen tijdens de uitvoering van een onderzoekstap. Dit wordt in een voortgangsnotitie vastgelegd en voorgelegd aan het Begeleidingsteam (BGT) van het HWBP. Dat is de basis van een go/no-go besluit van het BGT en de programmadirectie (PD van HWBP) over de uitvoering van de volgende stap. De stappen en de inhoud van de go/no-go besluiten worden onderstaand nader toegelicht.

2.2.1 Stap 0: Evalueren van kennis uit erosie-onderzoeken en opstellen van onderzoeksplan van de kleinschalige erodeerbaarheidsproeven op de eerder in de Deltagoot beproefde kleisoorten

Het doel van stap 0 en 1 is om de kennis van het reeds uitgevoerde onderzoek en literatuur zoveel mogelijk te benutten om beproevingsmethoden te selecteren waarmee de erodeerbaarheid van klei bij golfaanval kan worden gekarakteriseerd. Dit is de eerste stap op weg naar een methode om klei van dijken in categorieën in te delen (of een waarde toe te kennen aan de erodeerbaarheid) op basis van eenvoudige beproevingsmethodes. In stap 0 wordt hiervoor een plan uitgewerkt, terwijl in stap 1 de verschillende geselecteerde beproevingsmethodes worden uitgetest op klei waarvan de erodeerbaarheid bekend is (omdat reeds de erosiecoëfficiënt in de Deltagoot is bepaald).

Hierbij wordt voortgewerkt met de resultaten van het onlangs uitgevoerde onderzoek rondom de Brede Groene Dijk (Onderzoek Geschiktheid Deltaklei), dat getrokken wordt door het waterschap Hunze & Aa's. Verder wordt gebruik gemaakt van de (inter)nationale literatuur en de in het verleden uitgevoerde Deltagootproeven, zoals de resultaten van het onderzoek naar de erosie van kleibekledingen met gras op het boventalud van Waddenzeedijken, getrokken door het Waterschap Noorderzijlvest en Wetterskyp Fryslân, en het onderzoek in het kader van Kennis voor Keringen.

In stap 0 gaat het om het vinden van een balans tussen het vermogen van een test om de erodeerbaarheid vast te stellen, de gelaagde opbouw van de kering kunnen weergeven die verschillende erodeerbaarheid hebben (opstellen van het erosieprofiel), het gemak waarmee de test kan worden uitgevoerd (kosten, doorlooptijd) en de mate waarin de dijk voor het doen van de test wordt aangetast. Als daarbij ook inzicht verkregen wordt in de variatie in erodeerbaarheid van de klei in de dijk (ruimtelijke variatie), dan is dat een pré. Ook wordt gekeken naar de noodzakelijkheid van de inzet van de Borehole Erosion Test, een in de VS ontwikkelde bijzondere veldtest en inmiddels in Nederland toepasbaar gemaakt. Met deze test kan de relatieve erodeerbaarheid als functie van de diepte (erodeerbaarheidsprofiel) van de dijk in-situ gemeten worden. De differentiatie van de erodeerbaarheid van de materiaallagen waaruit de dijk is opgebouwd wordt daarin vastgesteld, maar de absolute waarde moet nog wel bepaald worden met een andere methode (Deltagootproef).

Óf en zo ja, wáár ongestructureerde klei zich in de kern bevindt wordt met de BET waargenomen. In potentie biedt het zicht op erodeerbaarheidskarakteristieken vanaf ca. 1,5 m onder maaiveld en lager, die door geen van de andere kleinschalige beproevingen gemeten kan worden, De gebruikelijke sondering wordt hierbij als vóóronderzoek op locatie uitgevoerd

Als ingeschat wordt dat de huidige beproevingsmethodes onvoldoende gaan zijn, wordt alvast een plan gemaakt voor het ontwikkelen van nieuwe methodes (volledig nieuw, of variant van bestaande methode).

Verder wordt een voorlopig plan opgesteld over hoe om te gaan met inhomogeniteiten in de klei, zoals zones met slechte klei, zandlenzen en zandpockets. Pas in stap 2 komt er concrete informatie beschikbaar over veroudering en de erodeerbaarheid van ongestructureerde (minder verouderde) klei.

Verwacht resultaat:

- Concrete shortlist met meest kansrijke beproevingsmethodes om de erodeerbaarheid van klei te bepalen.
- Plan om de geselecteerde beproevingsmethodes uit te voeren met klei waarvan de erodeerbaarheid reeds bepaald is door middel van Deltagootproeven en om het erodeerbaarheidsprofiel te bepalen.

- Plan om de geselecteerde beproevingsmethodes te gaan toepassen op kleimateriaal van de locatie Dubbele Dijk.
- Voorlopig plan voor het ontwikkelen van een nieuwe beproevingsmethode, als ingeschat wordt dat de bestaande methodes gaan tekortschieten.
- Vaststelling van kennisleemtes op dit gebied.

Stap 0 wordt afgesloten met een go / no go beslissing over stap 1 op basis van de uitgewerkte plannen voor deze stap.

2.2.2 Stap 1: Uitvoering van het onderzoeksplan: testen van beproevingsmethodes op klei met bekende erodeerbaarheid

In stap 1 wordt het plan uitgevoerd dat opgesteld is in stap 0.

Het gaat concreet om de relatie tussen eenvoudig te meten eigenschappen van de klei en de werkelijke erosiesnelheid bij golfaanval van de klei. Hiervoor moeten eenvoudige bestaande beproevingsmethodes worden geselecteerd of nieuwe ontwikkeld als blijkt dat de bestaande tekort schieten. Begonnen wordt met de eenvoudigste methodes, die - in het basis-innovatieniveau - toegepast worden op de kleisoorten die in het verleden al beproefd zijn in de Deltagoot en waarvoor de erodeerbaarheid kwantitatief is vastgesteld (erosiecoëfficiënt).

Op elke klei waarvan de erodeerbaarheid bekend is door de uitgevoerde Deltagootproeven, worden de eenvoudige beproevingsmethodes toegepast en gezocht naar de relatie tussen de uitkomst van de proefjes en de werkelijke erodeerbaarheid bij belasting met golfklappen. Het doel is om met de vastgestelde relatie in de toekomst de erodeerbaarheid te voorspellen aan de hand van de resultaten met de eenvoudige beproevingen. Dit levert de gewenste kwalificatie van klei, zodat voor elke gewenste klei voorspeld kan worden wat de erosiesnelheid zal zijn onder extreme golfklapomstandigheden op een dijk. Als uitsluitend het innovatieniveau 'basis' wordt uitgevoerd, zal deze relatie alleen geschikt zijn voor kleilagen (klei in de buurt van het dijkoppervlak), omdat alleen die klei tot nu toe is beproefd in de Deltagoot. Klei uit de kern van de dijk of klei die wat dieper in de dijk ligt, valt daarbinnen als gekozen wordt voor een ander innovatieniveau.



Figuur 1 Bepaling Atterbergse grenzen (foto: Wiertsema)

Indien gekozen wordt voor het innovatieniveau 'basis met aanvulling', dan worden deze methodes ook toegepast op de klei uit de kern van de Dubbele Dijk, waarvoor Deltagootproeven in die aanvulling zijn opgenomen. Dat materiaal is een zeer welkome aanvulling op de in het verleden beproefde klei, omdat deze weinig gestructureerd is en in de loop der jaren flink is gecompacteerd. Deze wijkt qua erodeerbaarheid daardoor waarschijnlijk flink af van de in het verleden reeds beproefde kleisoorten, terwijl het wel in vele dijken in Nederland voorkomt. Dit levert daardoor samen met de reeds beproefde kleisoorten een aanzienlijke verbreding van de range van kleikwaliteiten. Dat maakt het identificeren van de relatie met de uitkomsten van de eenvoudige beproevingsmethodes aanzienlijk sterker.

Als de correlatie met de werkelijke erosiesnelheid onvoldoende is, wordt verder gegaan met gecompliceerdere methodes volgens het plan uit stap 0. Waarschijnlijk zullen er uiteindelijk meerdere klei-eigenschappen bepaald moeten worden om de klei, inclusief de mate van heterogeniteit, te karakteriseren.

Hoewel de keuze voor het innovatieniveau 'basis met eerste aanvulling' méér inspanningen vergt, wordt vanuit de POV-DGG hierop aangedrongen. De uitbouw naar een bredere set referentie-kleisoorten verruimt de mogelijkheid van grondgestuurd ontwerpen aanzienlijk. Bovendien kunnen de inzichten over de resultaten van de beproevingsmethodes van een bredere set referentie-kleisoorten op termijn ook uitstekend worden gecombineerd met het lopende onderzoek naar de schuifsterkte in de onverzadigde zone.

Door de geselecteerde beproevingsmethodes toe te passen op klei waarvan de erodeerbaarheid bij golfaanval bekend is op basis van Deltagootproeven, kan gedurende de uitvoering van stap 1 een nadere keuze gemaakt worden over welke beproevingsmethodes het beste zijn.

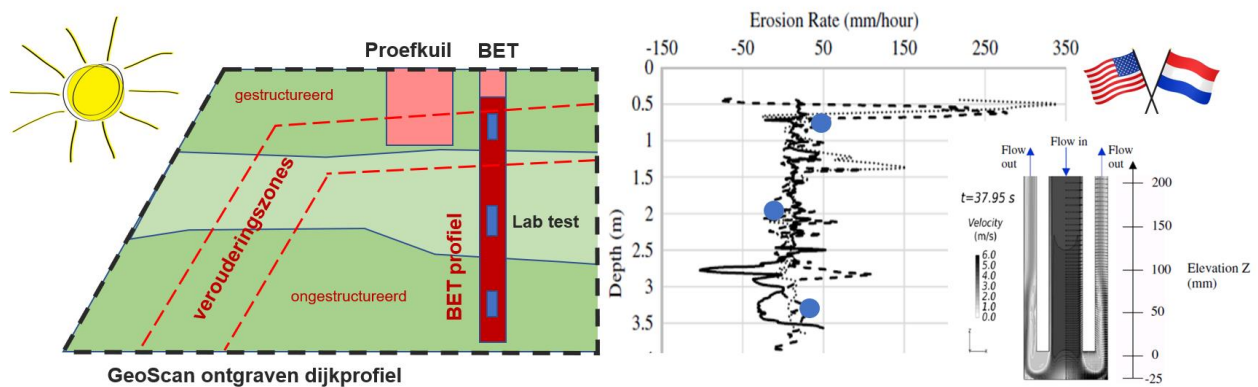


Figuur 2 Roto-erosiometer van Deltares (meting erosiebestendigheid in stroming)

Gestart wordt met de meest veelbelovende beproevingsmethodes, maar waarschijnlijk is er een tweede (en derde) ronde nodig als blijkt dat sommige methodes tekortschieten.

Ook worden in stap 1 de proeven uitgevoerd waarmee bepaald kan worden hoe de verschillende lagen van verschillende erodeerbaarheid in het profiel aanwezig zijn. Dit is een combinatie van boringen en sonderingen, profielkuil-analyse (met visuele, chemische, tactuele en scanner waarnemingen). Ook de Borehole Erosion Test (BET) zou hiertoe kunnen behoren. Het erodeerbaarheidsprofiel kan alleen met specifieke methodes wordt geïnventariseerd, voor zover eerst de goede correlatie van de betreffende methode met de werkelijke erodeerbaarheid (Deltagoot) is aangetoond.

De actuele in-situ erosiesterkte (erosiebestendigheid en/of erodeerbaarheid) opbouw van de deklaag en kleikern wordt onderzocht met proefkuilen en mogelijk met de Borehole Erosion Test. De resultaten van de BET worden steekproefsgewijze op enkele diepten vergeleken met laboratoriumtesten op grondmonsters, bij voorkeur uit hetzelfde boorgat. Het BET-erodeerbaarheidsprofiel levert het benodigde inzicht in de variabiliteit over de onderzochte diepte. De gevonden erosiezonering kan naderhand vergeleken met de zonering van het gehele dwarsprofiel met de GeoScan, uitgevoerd na volledige afgraving van het profiel, zie figuur 3. De deklaag tot ca 1,5m diepte wordt verkend met proefkuilen, met eenzelfde aanpak als bij de grote GeoScan na afgraving. Voordat de BET ingezet gaat worden, wordt op basis van een onderbouwing eerst een beslissing genomen of dit inderdaad de beste methode is. Dit start al in stap 0. Het is bijvoorbeeld nog niet gezegd dat het nodig is om een continu inzicht te hebben in de erodeerbaarheid in de diepte, want wellicht is een stapsgewijs inzicht ook voldoende.



Figuur 3 Vaststellen erodeerbaarheidsprofiel dijk kern met bijzondere veldtesten: proefkuil, BET en GeoScan

Er wordt ook een protocol opgesteld voor het omgaan met inhomogeniteiten in de klei (zones met slechte klei, zandlenzen en zandpockets), zie ook stap 4. De variaties in de erodeerbaarheid zijn namelijk ook van belang bij het beoordelen van de dijk.

Tijdens de uitvoering van stap 1 wordt op basis van de voorlopige resultaten een go / no go beslissing genomen over stap 2 (Deltagootproef, 3D Geoscan en kleine beproevingsmetingen op de klei uit de kern van de Dubbele Dijk). Gezien het feit dat er hiervoor een unieke kans voordoet in het voorjaar van 2023 en voorbereidingstijd benodigd is, wordt aanbevolen deze go / no go beslissing in het najaar van 2022 te nemen.

Aan het eind van stap 1 wordt een go / no go beslissing genomen over stap 4 op basis van de behaalde resultaten.

Verwacht resultaat:

- Innovatieniveau 'basis': Voorlopige selectie van beproevingsmethodes waarmee de erodeerbaarheid van klei uit de kleilaag van dijken (tot ca 1 m onder dijkoppervlak) kan worden voorspeld en het erosieprofiel worden waargenomen, met een aanbeveling hoe dit in de praktijk kan worden ingezet om de erodeerbaarheid van klei op en in een bestaande dijk en klei in een depot (voor ontwerpdoeleinden) te beoordelen.
- Innovatieniveau 'basis+aanvulling': Zelfde als innovatieniveau 'basis', maar met een meer definitieve selectie omdat er een beduidend bredere range aan kleisoorten in het onderzoek betrokken wordt. Bovendien kan het ook toegepast worden voor dieper dan 1 m in de dijk gelegen klei en de kleikern.
- Inzicht in de ruimtelijke variatie van de erodeerbaarheid van klei.
- Aangepaste plan hoe om te gaan met inhomogeniteiten in de klei.

2.2.3 Stap 2: Uitbreiding van het bereik van de metingen naar ongestructureerde, gecompacteerd klei uit de kleikern van de Dubbele Dijk

Het is te verwachten dat klei in een kleikern weinig gestructureerd is en bovendien flink gecompacteerd is door de bovenbelasting. Dat maakt dat de klei vermoedelijk een lage erodeerbaarheid heeft bij golfaanval. Daarom kan deze klei een belangrijke bijdrage geven aan de waterveiligheid van de dijk, waardoor de dijkbekleding een kleinere rol kan vervullen (minder zwaar kan worden uitgevoerd). Bovendien wordt door het meenemen van deze klei in het onderzoek de range van kleisoorten aanzienlijk breder. Daardoor kan een veel betrouwbaarder resultaat van stap 1 bereikt worden, dat tevens toepasbaar is op klei die dieper ligt dan 1 m onder het dijkoppervlak. De reeds beschikbare resultaten van Deltagootproeven heeft als manco dat het oudere onderzoek matig gedocumenteerd is en de recente onderzoeken hele specifieke modelopstellingen hebben, met alleen klei op het boventalud (Lauwersmeerdijk, Holwerd en Blija, 2020) of een zeer flauw talud (Valgenweg, Klutenplas, Dollarddijk en Blija, 2021 met een talud van 1:7). Dat beïnvloedt de vergelijkbaarheid van de verschillende beproefde kleisoorten.

De erodeerbaarheid van de kleikern van een dijk is nog nooit goed bepaald. De beste methode daarvoor is het steken van klei uit de kleikern en deze te transporteren naar de Deltagoot en daar te beproeven, zodat

ook van deze klei de werkelijke erodeerbaarheid kan worden gemeten en vergeleken kan worden met de eenvoudige beproevingsmethodes. De gemeten waarden van erodeerbaarheidskarakteristieken vormen directe input voor het erosiemodel. De in de Deltagoot gemeten waarden van de erosiesnelheid wordt uitgebreid met behulp van numerieke berekeningen met OpenFoam, zodat het ook bij afwijkende geometrie en golfcondities de erosiesnelheid berekend kan worden.

Het feit dat voor de grootschalige proeven de dijk vrijwel geheel moet worden afgegraven, maakt dat het winnen van deze klei voor Deltagootproeven zelden mogelijk is. In het voorjaar van 2023 doet zich echter een unieke gelegenheid voor bij de dubbele dijk van het Waterschap Noorderzijlvest.



Figuur 4 Deltagoot van Deltares

Tevens wordt deze gelegenheid benut voor de uitvoering van de 3D Geoscan, en het updaten van het meetprotocol dat is dóórontwikkeld bij de metingen van de afgegraven kering bij Delfzijl in 2019 (Protocol geotechnisch profileren van dijken, ws Noorderzijlvest/POV-DGG, 2020). Met deze waarnemingen vindt opname plaats van de lagen waaruit de kering is opgebouwd, en kan een 3D-model worden gemaakt. Dit is, in combinatie met waarnemingen over de laagsamenstelling en de erodeerbaarheid van elke laag, input voor de schematisering van de kering.

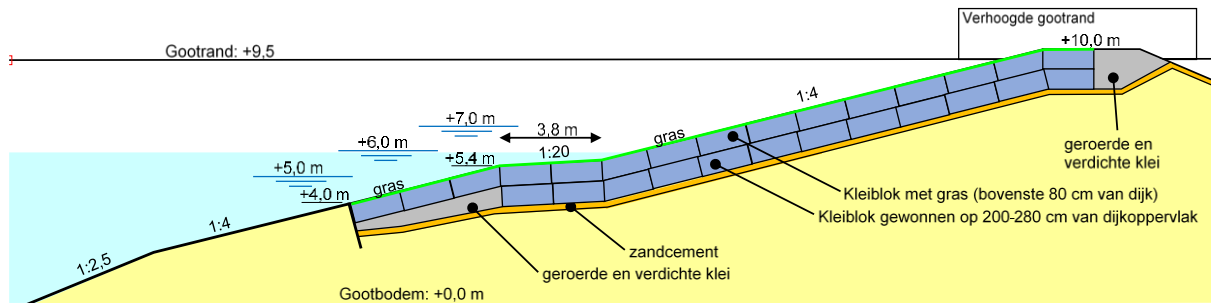
Het meten van de erodeerbaarheid van deze bijzondere klei in de Deltagoot is een belangrijke schakel in de ontwikkeling van kennis omtrent de erosie van klei en de karakterisering hiervan. Het vormt een belangrijk ijkpunt voor het bepalen van de relatie tussen de resultaten van de eenvoudige beproevingsmethodes (stap 1) en de daadwerkelijk aanwezige erodeerbaarheid. Daarom moet niet alleen de erodeerbaarheid in de Deltagoot worden vastgesteld, maar moeten ook de geselecteerde beproevingsmethodes (uit stap 1) op deze klei worden toegepast. Dit laatste kan zowel vóór en ná de geplande Deltagootproeven worden uitgevoerd.

Voorgesteld wordt om de proeven in de Deltagoot en de ondersteunende berekeningen met OpenFoam zo op te zetten dat zoveel mogelijk informatie verkregen wordt over de erodeerbaarheid van de kleikern, de kleibekleding met gras in de zone tussen 0-80 cm onder het taludoppervlak en de invloed van de variatie van de waterstand op de ontwikkeling van het erosieprofiel. De voorgestelde modelopstelling in de Deltagoot is geschetst in onderstaande figuur 5. In deze modelopstelling zijn twee lagen klei aangebracht, namelijk een bovenste laag uit de bovenlaag van de dijk en daaronder klei uit de kleikern. Er wordt niet gekozen voor twee lagen klei uit de kleikern, omdat op deze wijze een meer natuurlijk erosieproces kan worden gemeten, want ook in werkelijkheid zal er altijd gestructureerde klei op ongestructureerde klei liggen. Met een geschikt proevenprogramma kunnen de volgende doelen bereikt worden:

1. Erosiesnelheid meten van de kleikern (ongestructureerde en gecompacteerd klei) en die van gestructureerde klei uit de bovenste 80 cm van de dijk.
2. Erosiesnelheid van gestructureerde klei meten bij kleine golfhoogte, om daarmee de drempelwaarde van de golfhoogte te bepalen. Tevens kunnen we de formules (Mourik 2020 en Klein Breteler 2022, die nog samengevoegd gaan worden en aangepast aan de hand van BGD-onderzoek) checken bij een relatief lage overgang en kleine golven.

3. Invloed van waterstandsvariatie meten op de vorm van de erosiekuil en de erosiesnelheid

Doelstelling 1 betreft het hoofddoel van de proeven. Doelstelling 2 sluit aan op de beperkte kennis van de invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid. Het doel is om de formule voor de erosiesnelheid te verbeteren ten aanzien van de invloed van de golfhoogte. De derde doelstelling sluit aan op de kennisleemten ten aanzien van de invloed van de variërende waterstand tijdens een extreme storm (door de stormopzet en het getij). De huidige rekenmethode is nog nooit experimenteel bevestigd en het is daardoor onzeker of deze correct is.



Figuur 5 Modelopstelling met twee verschillende mate van gestructureerde klei (gestructureerd, en weinig gestructureerd uit de kern)

Verder wordt voorgesteld om met OpenFoam berekeningen het toepassingsbereik van deze proeven te verbreden. Door deze berekeningen wat breder op te zetten dan in het verleden is uitgevoerd, kan het ook gebruikt worden om een relatie te leggen tussen de verdeling in golfhoogtes en verdeling in piekspanningen en schuifspanningen enerzijds en de erosiesnelheid anderzijds. Dit draagt bij aan het fundamentele begrip over de erosie. Opgemerkt wordt dat met OpenFoam er geen erosie wordt berekend, maar uitsluitend een hydraulische belasting bij een gegeven erosieprofiel.

Voor toekomstig onderzoek wordt een overzichtelijke dataset vastgelegd.

De verwachte resultaten zijn:

- Kwantificering erodeerbaarheid van de kleikern, zodat de bijdrage aan de waterveiligheid van de kleikern kan worden benut.
- Meer definitieve selectie van beproevingsmethodes voor het kwalificeren van de klei (omdat er een bedeutend bredere range aan kleisoorten in het onderzoek betrokken wordt). Bovendien kan het ook toegepast worden voor dieper dan 1 m in de dijk gelegen klei en de kleikern.
- Kennis over de gelaagde-opbouw en de inhomogeniteiten van de doorsnede van de kering met de 3D Geoscan, en de relatering aan de sonderings- en borehole erosion test waarnemingen
- Kwantitatief inzicht in het effect van de veroudering van de klei op de erodeerbaarheid
- Interpretatie van de invloed van veroudering en compactie door eigen gewicht, het ontbreken van (bodem-)structuurvorming e.d. op het erodeerbaarheidsprofiel van de kleikern
- Kwantificering van de invloed van de golfhoogte op de erosiesnelheid
- Verificatie van invloed van de variatie van de waterstand op de ontwikkeling van het erosieprofiel
- Inzicht in de piekspanningen en schuifspanningen in relatie tot de erosiesnelheid op basis van OpenFoam berekeningen
- Overzichtelijke dataset van alle resultaten die gedeeld kan worden met universiteiten
- Uitgewerkt plan voor stap 5 ter voorbereiding van de go / no go beslissing van stap 5

Aan het eind van stap 2 wordt een go / no go beslissing genomen over stap 3 en 5 op basis van de behaalde resultaten. Daarom wordt aan het eind van stap 2 een plan gemaakt voor stap 5.

2.2.4 Stap 3: Verbetering van de erosieformules en update software

Voor het innovatieniveau 'basis+aanvulling' is met het totaal van de resultaten van de stappen 0-2 de benodigde input beschikbaar om de erosieformules te verbeteren en het toepassingsbereik te vergroten. Er wordt hier voortgewerkt op de resultaten van het onderzoek voor de Brede Groene Dijk, die al input heeft geleverd over de erosie bij grote golven en flauwe taluds. De erosieformules gaan in deze stap worden verbeterd ten aanzien van de invloed van de golfhoogte en de invloed van een variërende waterstand tijdens de extreme storm. Daarmee komt een generiek instrument in beeld waarmee een grote range van keringen op erodeerbaarheid kan worden doorgerekend.

Dit zal ook toepasbaar zijn voor dieper in de dijk gelegen klei en de kleikern. Juist die klei heeft, naar verwachting, een lage erodeerbaarheid en zal dus aanzienlijk bijdragen aan de waterveiligheid van de dijk.

De formules zullen aangevuld worden met een modelcoëfficiënt die de onzekerheid weergeeft, zodat het bruikbaar wordt voor toepassing in probabilistische berekeningen.

Ook worden de mogelijkheden benut om in de erosiemodellering de 3D-Geoscan en de BET-resultaten te benutten.

Tenslotte worden de formules gebruikt om de reeds ontwikkelde software voor erosie van zeedijken (GEBU faalkanstool) uit te breiden en te verbeteren. Dit betekent dat het mogelijk wordt gemaakt om te rekenen met een kleikern met specifieke klei-eigenschappen en dat de invloed van de golfhoogte en variërende waterstand beter wordt opgenomen in de software.

De verwachte resultaten zijn:

- Nieuwe erosieformules met handleiding voor gebruik in probabilistische berekeningen
- Nieuwe versie van de GEBU faalkanstool (software)

2.2.5 Stap 4: Opstellen onderzoeksprotocol voor kwalificatie van klei ten aanzien van erodeerbaarheid voor toetsing en ontwerp

De resultaten van 1-3 geeft de input voor het opstellen van het te volgen onderzoeksprotocol waarmee de klei kan worden gekwalificeerd ten aanzien van erodeerbaarheid. Daarbij is oog voor de balans tussen benodigde informatie en verstoring van profiel van de kering, de kosten en de doorlooptijd.

Voor het innovatieniveau 'basis' zal zich dit beperken tot klei tot maximaal 1 m onder het taludoppervlak en zal de onzekerheid beduidend groter zijn dan wanneer gekozen is voor innovatieniveau 'basis+aanvulling'. In dat laatste geval zal het protocol voor een bredere range aan klei toepasbaar zijn, inclusief klei op grotere diepte dan 1 m en de kleikern.

Ook wordt onderzocht hoe met de ruimtelijke variatie (inhomogeniteit in de diepte en langs de dijk) van dijkmateriaal omgegaan moet worden. Tijdens het onderzoek in stap 1 en 2 kan de ruimtelijke variatie bepaald worden door vele monsters te analyseren en/of met de Borehole Erosion Test (BET), maar voor de praktijk zal een slim protocol worden opgesteld.

De verwachte resultaten zijn:

- Protocol voor kwalificatie van klei (beoordeling klei in bestaande dijk en klei in depot in kader van ontwerp), met oog voor de ruimtelijke variatie.

2.2.6 Stap 5: Validatie van de ontwikkelde instrumenten in een dijkverbeteringsproject op andere locatie

Als gekozen wordt voor het innovatieniveau 'basis + 2 aanvullingen' is er ruimte voor een extra Deltagootproef ter verificatie van de resultaten uit stap 1 t/m 4. Voor een geschikte en relevante locatie, bij voorkeur bij een relevant dijkversterkingsproject dat hier baat bij kan hebben, wordt de klei gekwalificeerd volgens het protocol uit stap 4 en vervolgens wordt de erodeerbaarheid gekwantificeerd met behulp van de

formules uit stap 3. Hiervoor worden probabilistische berekeningen uitgevoerd, resulterend in de faalkans van de kleibekleding en kleikern van de dijk.

Met de Deltagootproeven wordt vervolgens vastgesteld of de voorspelde erosiesnelheid klopt met de werkelijkheid. Op basis van de resultaten kan eventueel het protocol en/of de formules nog wat bijgesteld worden.

Gedurende de uitvoering van de voorgaande stappen heeft kennisdeling en netwerkopbouw plaatsgevonden met de waterschappen, RWS en andere professionele organisaties. Daaruit ontstaan contacten waarbij de geschiktheid van toepassing in andere dijkversterkingsprojecten vastgesteld wordt. Deze leveren de input om stap 5 vorm te geven. Tijdens de uitvoering van de stappen 3 en 4 kunnen deze voorbereidingen plaatsvinden.

De inhoud en de uitvoeringsplanning van stap 5 is afhankelijk van de programmering in het HWBP. Het is niet nodig om te wachten op volledige afronding van de onderzoeksstappen 3 en 4. Wel is het van belang om tijdig te besluiten of de onderzoeksstap 5 behoort tot dit onderzoek, of dat het in een vervolg, als nieuw project wordt uitgevoerd.

De verwachte resultaten zijn:

- Verificatie op toepasbaarheid, en eventueel benodigde bijstelling van het protocol voor kwalificatie van klei en de formules voor het voorspellen van de erosiesnelheid (erodeerbaarheid) op een dijkverbeteringslocatie binnen het HWBP programma.
- Faalkans van de kleibekleding en dijk kern die kan leiden tot de conclusie dat de bekleding van de betreffende dijk niet gerenoveerd hoeft te worden, zodat bespaard wordt op de projectuitvoeringskosten.

2.3 Planning

De projectuitvoering van de stappen 0-4 is voorzien van 1 mei 2022 – 15 december 2024. Een randvoorwaarde voor de besluiten over de uitvoering van grootschalige proeven bij de Dubbele Dijk langs de Eems, is de bouwplanning van de getijdenduiker in de buitenliggende kering (kering aan de zeezijde van het binnengebied). De start daarvan is het aanbrengen van de bouwkuip, die is voorzien in april 2023. Vóór die tijd moeten bemonstering, profielbeschrijving, geoscan en eventuele andere proeven voorbereid en deels afgerond zijn ter plekke. Uitvoering van de geoscan en afgraving van de dijk voor het nemen van de volumieuze monsters voor de Deltagoot kunnen plaatsvinden als de bouwkuip gereed is.

Een optie is, om de ontwikkelde instrumenten van stap 3 en 4 te valideren op een andere locatie waar een dijkverbeteringsproject in de verkenningsfase verkeert. In dat geval zou de projectduur daarmee verlengd worden. Een andere optie is, om de validatie onder te brengen in een zelfstandig project, of aan het verbeteringsproject toe te voegen. In de planning betreft dat stap 5. Zie hieronder.

Het onderzoek wordt zodanig opgezet dat er regelmatig (zoals jaarlijks) kennis wordt afgetapt die gebruikt kan worden voor lopende dijkversterkingen. Zo zullen reeds tijdens de looptijd van dit meerjarig onderzoeksprogramma belangrijke besparingen gerealiseerd kunnen worden. Afgelopen twee jaar heeft deze aanpak goed gewerkt met het onderzoek naar klei-erosie voor de dijken Koehool-Lauwersmeer, Lauwersmeerdijk en Brede Groene Dijk langs de Dollard. Een dergelijke aanpak draagt vanaf de aanvang van de onderzoeken bij aan één van de doelstellingen van HWBP: goedkopere dijkversterkingsprojecten die sneller kunnen worden aangelegd, beter in de omgeving kunnen worden ingepast en toch voldoende veiligheid bieden.

De planning van de onderzoeksstappen is als volgt. In elke stap van Uitvoering worden kennisbijeenkomsten voor de waterveiligheidsgemeenschap georganiseerd. Ook is er nauw overleg met WvL/Mini&W m.b.t. de instrument-ontwikkeling en BOI-trajecten.

jaar	datum	activiteit
2022		beschikkingen/contracten

	1-5-'22 – 31-5-'22	<i>Uitvoering stap 0: Evalueren van kennis uit erosie-onderzoeken en opstellen van onderzoeksplan van de kleinschalige erodeerbaarheidsproeven op de eerder in de Deltagoot beproefde kleisoorten en onderzoek erosieprofiel</i>
		Go / no go stap 1
	1-6-'22 – 1-6-'23	<i>Uitvoering stap 1: Uitvoering van het onderzoeksplan: testen van beproevingsmethodes op klei met bekende erodeerbaarheid en ter vaststelling erosieprofiel</i>
	1-12-'22	Go / no go stap 2
2023	1-6-'23	Go / no go stap 4
	1-2-'23 – 31-10-'23	<i>Uitvoering stap 2: Uitbreiding van het bereik van de metingen naar ongestructureerde, gecompacteerd klei uit de kleikern van de Dubbele Dijk</i>
	1-6-'23	Go / no go stap 3
	1-10-'23	Go / no go stap 5
	1-10-'23 – 1-6-'24	<i>Uitvoering stap 3: Uitbreiding van het toepassingsbereik van de erosieformules met eenvoudig te meten parameters</i>
	1-6-'23 – 31-12-'23	<i>Uitvoering stap 4: Opstellen onderzoeksprotocol voor kwalificatie van klei ten aanzien van erodeerbaarheid voor toetsing en ontwerp</i>
2024	1-1-'24 – 1-9-'24	<i>Uitvoering stap 5: Validatie van de ontwikkelde instrumenten in een dijkverbeteringsproject op andere locatie</i>

2.4 Organisatie, kennisdeling en kwaliteit

De kennis wordt beschikbaar gesteld voor Nederland door middel van handreikingen en handleidingen voor het karakteriseren met veld- en lab-proeven van de erodeerbaarheid van een kering. Waarschijnlijk is het ook mogelijk om gebruikersvriendelijke software te maken voor toetsen/ontwerpen op maat, waarmee iedereen die kennis heeft van probabilistische berekeningen de faalkans van de ontworpen dijk met kleikern kan berekenen.

Expertgroep

Bij de project startup en tijdens de projectuitvoering zal de voortgang doorgesproken worden met de leden van de ingestelde expertgroep. Het doel is, om de tussenresultaten en deelproducten van elke stap gezamenlijk door te nemen en de methodische aanpak en de kennisvorming te bespreken. Dat kan leiden tot aanpassingen van strategie en tot nadere duiding van de deelresultaten en – alvast vooruitkijkend – de betekenis van de eindresultaten. Met de expertgroep wordt ook de inhoud van de notities besproken die voor elke go/no-go beslissing worden voorgelegd aan het Begeleidingsteam van HWBP.

De experts zijn allen in het kennisveld werkzaam als specialist waarin dit onderzoek zich afspeelt. Zij verbinden dit onderzoek met andere kennis- en dijkversterkingsprogramma's, zodat uitwisseling en wederzijdse opname van kennis en resultaten plaatsvindt. Dit is de belangrijkste voorziening voor de kwaliteitsbewaking van het onderzoek. Uiteraard vervullen de activiteiten van Kennisdeling hierin een aanvullende rol.