

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk

Auteur(s)

Harry van Essen

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk

Opdrachtgever	Samenwerkingsproject onder TKI Deltatechnologie in samenwerking met Waterschap Hunze en Aa's, Van Oord, Boskalis, Provincie Groningen en Deltares
Contactpersoon	Erik Jolink, Henk van Norel en Marco Veendorp (Waterschap Hunze & Aa's) Ulrich Förster en Luca Sittoni (Deltares)
Referenties	Projectbeschrijving TKI Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (TKI-OGD) 20210630
Trefwoorden	Brede groene dijk, klei, erosie, roto-erosie, kleibekleding





Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-09-2022
Projectnummer	11207091-004
Document ID	11207091-004-GEO-0006
Pagina's	33
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Harry van Essen	

Onderstaande tabel is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Harry van Essen 	Bernadette Wichman  Ulrich Förster 	Goaitske de Vries 

Samenvatting

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

Uit de voorbereidingen van het demonstratieproject blijkt dat extra onderzoek in Nederland nodig is om de toepasbaarheid (en voorspelbaarheid van de uiteindelijke functionele eigenschappen) van lokaal gewonnen kweldermateriaal en gerijpte baggerspecie te vergroten. De verwachting is dat een aantal van deze eigenschappen verbeteren in de loop van de tijd. Bij de start van een rijpingsproces is er inzicht gewenst of er een geschikt bouw materiaal van te maken is. Met name het hoge zoutgehalte en organisch stof gehalte maken dat deze klei niet voldoet aan de gestelde eisen.

De Dollarddijk is meer dan 30 jaren geleden gebouwd met kwelderklei met een verhoogd zoutgehalte en organisch stof gehalte. Tevens is deze klei destijds te nat aangebracht. Een belangrijk aspect is ook dat destijds zand is bijgemengd bij de klei. Dit zand is niet homogeen verdeeld in de klei. Dit kan grote verschillen in erosiebestendigheid geven, met name tussen de monsters.

Deze gerijpte afwijkende kwelderklei is onderzocht om inzicht te krijgen in de erodeerbaarheid. De erodeerbaarheid van deze klei onder golfaanval is een belangrijke functionele eigenschap. Dit is onderzocht met behulp van onderzoek in de Deltagoot. Het is gewenst om ook met behulp van kleinschalige proeven de erodeerbaarheid van de klei te onderzoeken. Dit kan met behulp van de roto-erosiemeter, welke in het verleden ingezet is bij het bepalen van de erosiebestendigheid van reguliere dijkenklei onder stromingsbelasting. Er kan dan een vergelijking worden gemaakt met de resultaten uit de Deltagootproeven, om aan te tonen of deze kleinschalige proeven ook zinvol zijn bij het voorspellen van het erosiegedrag onder golfaanval, wat wezenlijk anders is dan puur een stromingsbelasting. Er zijn 3 profielkuilen onderzocht, ongeveer 50 meter ten westen van waar de Deltagootklei is gestoken. Er zijn profielkuilbeschrijvingen gemaakt volgens het Deltares protocol dat is opgenomen in [Deltares 2022a]. Op basis van deze profielkuilinspecties zijn de monsternamen dieptes vastgesteld, en kan inzicht worden verkregen in de heterogeniteit, ook op kleinere schaal. Monsternamediepte en heterogeniteit kunnen weer leiden tot verschillen in erosiebestendigheid.

Het doel is dit aspect mee te nemen in de interpretatie van de roto-erosiemeterproeven.

Het doel van onderhavige roto-erosiemeterproeven is om voor deze afwijkende Dollarddijk klei de erosiebestendigheid te bepalen, waarbij gebruik wordt gemaakt van de klassen uit eerder onderzoek aan reguliere klei. Tevens is het doel te onderzoeken hoe deze erosiebestendigheid ruimtelijk varieert, waarbij profielkuilonderzoek en geotechnische bepalingen op gestoken monsters zijn gebruikt. De erodeerbaarheid kan niet voor alle gevallen worden bepaald, aangezien de erosie soms te snel verloopt en er dan te weinig meetpunten zijn. Tevens kan het effect van structuurvorming maar beperkt worden gemeten, omdat de monsters relatief klein zijn.

In het kader van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) zijn binnen het Onderzoek Geschiktheid Deltaklei erosieproeven uitgevoerd op monsters gestoken uit de Dollarddijk. Er zijn in april 2021 drie profielkuilen in de dijk gegraven van waaruit bussen met een kraan zijn gestoken. Er is een beschrijving van de bodemopbouw gemaakt in deze kuilen en er zijn enkele eenvoudige veldproeven uitgevoerd (pocketpenetrometer- en torvane metingen).

Op monsters uit deze bussen zijn roto-erosieproeven uitgevoerd. In eerste instantie zijn standaard proeven uitgevoerd waarbij is vastgesteld bij welk toerental (of stroomsnelheid) het materiaal uit een profielkuil ongeveer ging eroderen. Ook is in deze proeven het bezwijktoerental bij 30% of meer massaverlies vastgesteld, het standaard stopcriterium voor alle roto-erosieproeven. In de tweede serie proeven zijn meer gedetailleerde proeven uitgevoerd, waarbij werd gestart met een toerental dat lager is dan dat, waarbij in de eerste serie proeven, erosie begon op te treden. Vervolgens is in kleine stapjes het toerental verhoogd en is bij ieder toerental de erosiesnelheid langduriger gemeten. Indien de resultaten dit toelieten, zijn de, in de internationale literatuur gangbare, erosieparameters afgeleid.

De eigenschappen van de klei in de profielkuilen op de Dollarddijk kunnen aanzienlijk verschillen, zoals blijkt uit profielkuilonderzoek. Uit de roto-erosiemeterproeven volgt dit ook, d.w.z. de klei is een aantal keren erosiegevoelig en een aantal keren weinig erosiegevoelig. Er is duidelijk verschil in bezwijktoerental tussen de monsters uit de drie profielkuilen.

Deze klasse-aanduiding die gebaseerd is op het bezwijktoerental bij 30% of meer massaverlies kan vergeleken worden met historische gegevens, waarbij gebruik kan worden gemaakt van het plasticiteitsdiagram.

Voor de weinig erosiegevoelige klei kon het erosieproces, voor zover dat geleidelijk verliep, nader worden geanalyseerd. Dit leverde waarden voor de erodeerbaarheid (erosiegevoelheidscoëfficiënt) en erosiebestendigheid (kritieke schuifspanning) op. De resultaten laten een vergelijkbaar erosiepatroon van de beproefde monsters zien. Vanaf een stroomsnelheid van 1,3 tot 1,6 m/s begint erosie op te treden. Twee monsters wijken hiervan af. Bij één monster start de erosie al bij 0,8 m/s maar het bezwijken treedt pas veel later op, vergelijkbaar met de overige monsters. Slechts één monster wijkt echt af met een vroeg beginnende erosie en een vrijwel instantaan bezwijken. Dit gedrag lijkt te correleren met een lagere volumieke massa van dit monster. Hoewel uit analyse van de boorkernen volgt dat het zandgehalte sterk kan variëren, is een beïnvloeding hierdoor van het erosieproces van het genoemde monster niet waarschijnlijk. Een hoog zandgehalte is namelijk juist gecorreleerd aan een hogere volumieke massa.

Grosso modo, geven de resultaten uit de roto-erosieproeven aan dat er erosiegevoelige lagen in de Dollarddijkklei aanwezig zijn, wat bevestigd wordt door het profielkuilonderzoek. De erodeerbaarheid van deze klei in het Deltagootonderzoek was ook groot vergeleken met die van andere kleisoorten.

Gezien de grote variatie die aangetroffen kan worden in eigenschappen van de klei van een kleibekleding, wordt het geadviseerd om van elk in de roto-erosieopstelling getest monster, enkele standaard geotechnische bepalingen uit te voeren, zodat mogelijke correlaties tussen beide beter vastgesteld kunnen worden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.2	Doelstelling	9
2	Omschrijving werkzaamheden	10
3	Resultaten	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Classificatie	13
3.3	Roto-erosieproeven	15
4	Analyse	17
4.1	Beschouwing bezwijktoerentallen roto-erosiemeterproeven	17
4.2	Erosieparameters bij geleidelijke erosie	18
4.2.1	Inleiding	18
4.2.2	Parameters	20
4.3	Verdere analyse erosieproces	23
5	Conclusie	25
	Referenties	27
	Bijlagen	28
A	Geotechnische eigenschappen	29
B	Foto's beproefde monsters	30

1 Inleiding

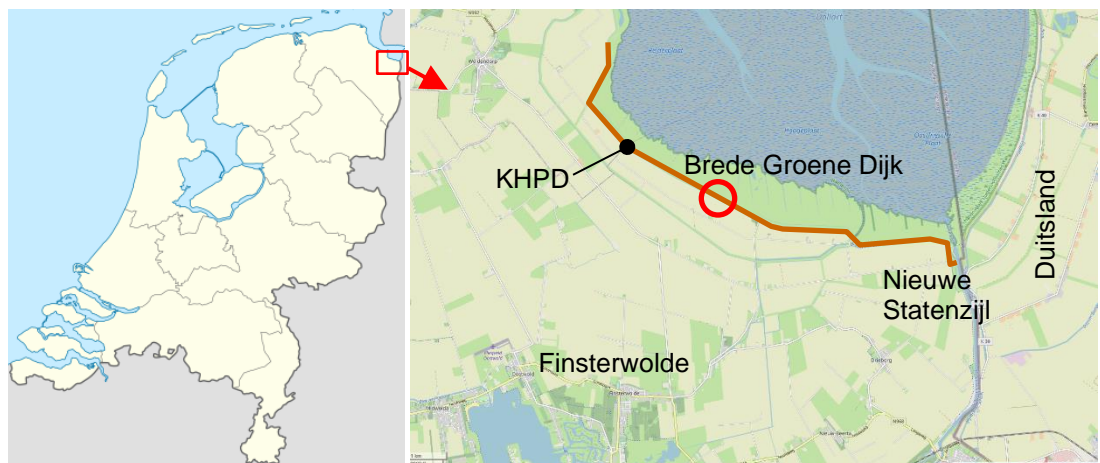
1.1 Achtergrond

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

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

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

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



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

1.1.1 Aanleiding project

Voor het omvormen van de bestaande, afgekeurde dijk tot een Brede Groene Dijk is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD, traject KHPD, zie Figuur 1.1, 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 ook vanuit het achterland worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. Waterschap Hunze en Aa's vroeg zich af of dit anders kon. Er zijn diverse alternatieve kleibronnen in de buurt van de dijk die ook gebruikt kunnen worden. In het demonstratieproject BGD wordt onderzocht of dit kan. Samen met andere partijen wordt onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van om hiervoor klei te gebruiken afkomstig uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurpolder Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

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

1.1.2 Doel van het project

Het doel van dit project is te onderzoeken of, en daarmee vertrouwen op te bouwen dat, het gerijpte materiaal (het sediment) geschikt is om een waterveilige dijk mee te realiseren, ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof.

Met name het toetsen van verwerkbaarheid en erosiebestendigheid van de gerijpte klei in het veld (proefdijk) en in het laboratorium is hierbij van belang. Bovendien zal een antwoord worden gegeven op de vraag op welke wijze het materiaal verantwoord kan worden toegepast. Voor het demonstratieproject BGD zal gekeken worden wat het effect is van een flauwe taludhelling van 1 op 7 in combinatie met relatief hoge golven op de erosiesnelheid van de klei. Dit effect is nooit eerder op deze schaal getest en valt momenteel niet binnen het toepassingsgebied van het huidige rekenmodel voor klei-erosie. Het gevolg hiervan is dat er mogelijk te conservatieve aannames worden gedaan voor de dikte van de kleilaag. Daarnaast blijkt uit het demonstratieproject Brede Groene Dijk dat de waarde van een erosiecoëfficiënt van afwijkende kleien niet kan worden bepaald aan de hand van standaard kleiparameters.

1.1.3 Fasering onderzoek

Voor het verwerven van meer inzicht in de toepasbaarheid, en dus inzicht in de functionele eigenschappen, van de huidige Kleirijperij klei – en de manier waarop met een aangepast ontwerp adequate uitvoering en een afgestemd beheer kan worden gekomen tot een waterveilige dijk, is het onderzoeksplan onderverdeeld in 10 stappen:

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

De roto-erosieproeven die in deze rapportage worden gerapporteerd vallen onder stap 2a: Materiaalonderzoek bestaande dijken.

Uiteindelijk zullen de onderzoeksresultaten in een eindrapportage worden samengevat.

1.2 Doelstelling

De Dollarddijk is meer dan 30 jaren geleden gebouwd met kwelderklei met een verhoogd zoutgehalte en verhoogd gehalte aan organisch stof. Tevens is deze klei destijds te nat aangebracht. Een belangrijk aspect is ook dat destijds zand is bijgemengd bij de klei. Dit zand is vanzelfsprekend¹ niet homogeen verdeeld in de klei, wat tot grote verschillen in erosiebestendigheid kan leiden, met name tussen de genomen monsters.

Deze gerijpte afwijkende kwelderklei is onderzocht om inzicht te krijgen in de erodeerbaarheid. De erodeerbaarheid van deze klei onder golfaanval is een belangrijke functionele eigenschap. Dit is onderzocht met behulp van onderzoek in de Deltagoot. Het is gewenst om ook met behulp van kleinschalige proeven de erodeerbaarheid van de klei te onderzoeken. Dit kan met behulp van de roto-erosiemeter, welke in het verleden ingezet is bij het bepalen van de erosiebestendigheidscriteria van reguliere dijkenglei onder stromingsbelasting [Grondmechanica Delft 1988]. Er kan dan een vergelijking worden gemaakt met de resultaten uit de Deltagootproeven, om aan te tonen of deze kleinschalige proeven ook zinvol zijn bij het voorspellen van het erosiegedrag onder golfaanval, wat wezenlijk anders is dan puur een stromingsbelasting.

De tot nu toe in de roto-erosiemeter gehanteerde toerentallen geven stroomsnelheden die lager zijn dan de veel voorkomende stroomsnelheden bij substantiële golfaanval in de Deltagoot, zie de toelichting bij Tabel 1.1. Toekomstig onderzoek moet aangeven voor welke soorten klei de inzet van roto-erosiemeterproeven zinvol is en of de capaciteiten qua stroomsnelheid van het toestel kunnen worden uitgebreid.

Er zijn 3 profielkuilen onderzocht, ongeveer 50 meter ten westen van waar de Deltagootklei is gestoken. Er zijn profielkuilbeschrijvingen gemaakt volgens het Deltares protocol dat is opgenomen in [Deltares 2022b]. Tevens zijn er enkele eenvoudige veldproeven uitgevoerd (pocketpenetrometer- en torvanemetingen). Op basis van deze profielkuilinspecties zijn de monsternamedieptes vastgesteld, en kan inzicht worden verkregen in de heterogeniteit, ook op kleinere schaal, wat weer kan leiden tot verschillen in erosiebestendigheid. Het doel is dit mee te nemen in de interpretatie van de roto-erosiemeterproeven.

Het doel van onderhavige roto-erosiemeterproeven is om voor deze afwijkende Dollarddijk klei de erosiebestendigheid te bepalen, waarbij gebruik wordt gemaakt van de klassen uit onderstaande tabel. Er zijn historische data beschikbaar waar een vergelijking mee gemaakt zal worden. Dit kan met behulp van het plasticiteitsdiagram. Tevens is het doel te onderzoeken hoe de erosiebestendigheid ruimtelijk varieert, waarvoor profielkuilonderzoek en geotechnische bepalingen op monsters zijn toegepast. De erodeerbaarheid kan niet voor alle gevallen worden bepaald, aangezien de erosie soms te snel verloopt en er dan te weinig meetpunten beschikbaar zijn. Tevens kan het effect van structuurvorming maar beperkt worden gemeten, omdat de monsters relatief klein zijn.

In Tabel 1.1 is de klasse indeling op basis van een gewichtsverlies van 30% bij de roto-erosiemeterproef gegeven. De schoepen aan de roterende cilinder rond het monster geven een waterstroming die op 1 mm vanaf het monsteroppervlak 0.13 m/s is bij een toerental van 100 tpm (toeren per minuut) en 1.6 m/s bij een toerental van 1200 tpm.

¹ Het mengen van klei met een andere grondsoort kan eigenlijk alleen goed onder laboratoriumcondities. In de praktijk blijkt na het mengen altijd sprake te zijn van brokken of stukken van de verschillende grondsoorten.

Tabel 1.1 Klasse indeling op basis van bezwijktoerental na 30% gewichtsverlies in roto-erosiemeter proef [Grondmechanica Delft 1988].

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

Een bekend gegeven is dat de mate van structuurvorming een groot effect heeft op de erosiesnelheid onder golfaanval [Deltares 2022a].

Er zit wel wat (beginnende) structuurvorming in de roto-erosiemetermonsters, echter dit is zeer beperkt, zoals gebleken is uit de beschrijving van de profielkuilen [Deltares 2022b].

Met de roto-erosiemeter meten we dus eigenlijk niet het effect van de bodemstructuur, in ieder geval niet het effect van grote structurelementen. We nemen de monsters meestal op 0,5 m - maaiveld of nog dieper, waar de bodemstructuur meestal wat minder ontwikkeld en ook fijner is.

2 Omschrijving werkzaamheden

In april 2021 zijn drie profielkuilen gegraven in de Dollarddijk die zijn beschreven in [Deltares 2022b] en van waaruit bussen zijn gestoken, onder meer ten behoeve van de roto-erosieproeven.

De kuilen hebben de volgende coördinaten.

Tabel 2.1 RD-coördinaten van de proefkuilen.

Profielsleuf-	RD coördinaten (m)			
	Nummer	x	Y	z
	1	270088.6	585681.8	6.737
	2	270079.5	585686.1	6.717
	3	270070.6	585690.5	6.775

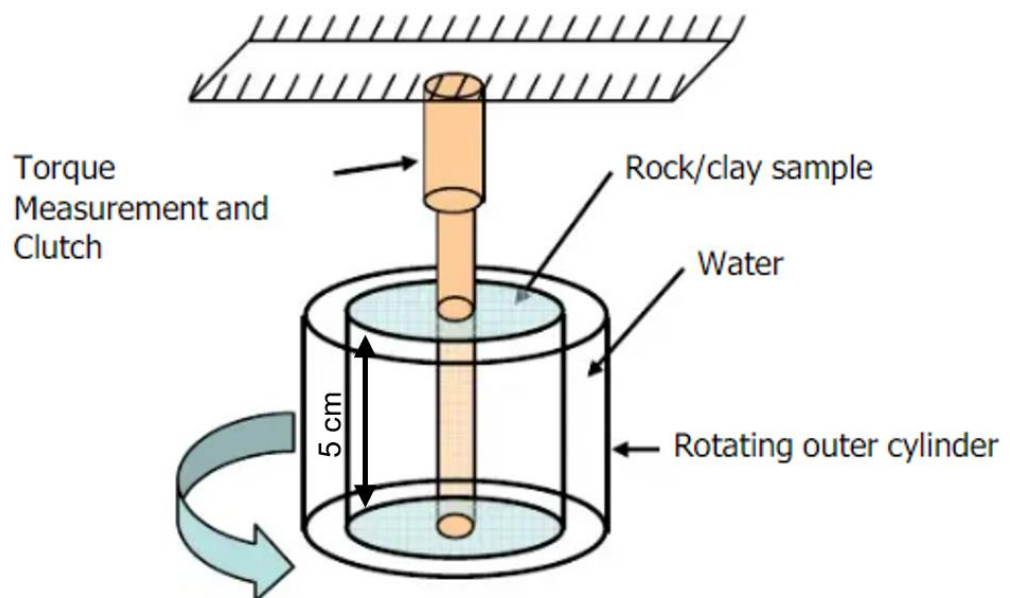
De bussen met een diameter van 10 cm en een lengte van 45 cm zijn vanaf een diepte van 45 cm – maaiveld verticaal weggedrukt met behulp de bak van een hydraulische kraan (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Wegdrukken van een steekbus.

Per profielkuil zijn 4 bussen op minder dan 1 meter afstand van elkaar gestoken, waarvan er twee (bus 1 en 2) zijn gebruikt voor de erosieproeven. De derde en vierde bus zijn gebruikt voor geotechnische classificatieproeven.

De erosieproeven zijn uitgevoerd in de zogenaamde roto-erosiemeter, zie Figuur 2.2. Dit apparaat bestaat uit een met water gevulde trommel met schoepen die rond een cilindrisch monster draait. Het monster heeft een diameter van ongeveer 0,066 m en een hoogte van ongeveer 0,05 m. Door het ronddraaien van de trommel stroomt het water rond het monster, waarmee een erosieve kracht op het monster wordt uitgeoefend. Deze kracht, omgerekend in schuifspanning, wordt gedurende de proef constant gemeten. De massa van het monster wordt tijdens vooraf in te stellen pauzemomenten, waarbij de trommel tijdelijk stilstaat, gemeten door het automatisch onder water optillen en wegen van het monster. Door middel van een krachtsensor wordt de massa onder water gemeten. De massa-afname wordt bepaald door het verschil in massa ten opzichte van de massa aan het begin van de proef.



Figuur 2.2 Werkingsprincipe van de roto-erosiemeter [Briaud et al. 2019].

Er zijn verschillende typen roto-erosieproeven uitgevoerd, te weten de standaard en gedetailleerde procedure. Bij de standaardprocedure [Grondmechanica Delft 1988] is de proef als volgt opgebouwd:

- Verhoging van het toerental elke 10 minuten met 100 tpm tot 600 tpm en bij elke verhoging van het toerental een meting van massa en torsie. 1 "tpm" betekent: 1 toer of omwenteling per minuut, d.w.z. 1x een 360°-rotatie per minuut.
- Gedurende een uur een toerental van 600 tpm met elke 10 minuten een meting van de massa en torsie.
- Verhoging van toerental elke 10 minuten met 100 tpm tot 1200 tpm.
- Gedurende een uur een toerental van 1200 tpm met elke 10 minuten een meting van de massa en torsie. De proef wordt eerder gestopt indien een afname van 30% van de totale massa is opgetreden.

Daarnaast is de gedetailleerde procedure toegepast, waarbij een proef als volgt is opgebouwd:

- Start met een toerental dat minstens 100 tpm voor het toerental ligt waarbij bij de standaardprocedure erosie is opgetreden.
- Dit toerental wordt een uur vastgehouden waarbij elke 10 minuten een meting van de massa en torsie wordt uitgevoerd.
- Verhoging van het toerental met telkens 50 tpm, waarbij dit toerental gedurende een uur wordt vastgehouden en elke 10 minuten een meting van de massa en torsie wordt uitgevoerd.
- De proef wordt gestopt bij een toerental van 1600 tpm of eerder als een afname van de totale massa van 30% is opgetreden.

Opgemerkt wordt dat de daadwerkelijk gerealiseerde toerentallen wat kunnen afwijken, zoals is te zien in de figuren met de resultaten van de metingen.

De preparatietechniek van de monsters is als volgt: eerst worden de diameter op ongeveer 0,066 m en de hoogte op 0,05 m gebracht, waarna het getrimde monster zijdelings met een mal wordt ondersteund. Dit ondersteunde monster wordt vervolgens onder een boorkolom geplaatst ten behoeve van het gecontroleerd kunnen boren van het centrale gat in het monster zonder dat het monster uiteen wordt gedrukt.

De monsters zijn volgens de volgende procedure getest (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Gevolgde testprocedure van de proeven.

Monster	Testprocedure
PK1.1_1	Standaard
PK1.1_2	Gedetailleerd
PK1.1_3	Gedetailleerd
PK2.1_2	Gedetailleerd
PK2.2_1	Standaard
PK3.1_1	Standaard

De aanduiding van de monsters zijn als volgt: PK1.2_3: profielkuil1, bus 2, monster 3.

3 Resultaten

3.1 Inleiding

In de volgende paragrafen worden de resultaten van het onderzoek zoals beschreven in hoofdstuk 2 gepresenteerd. Naast deze resultaten is ook een beschrijving van de profielkuilen uitgevoerd [Deltares 2022b] (in voorbereiding ten tijde van het gereedkomen van dit rapport).

3.2 Classificatie

In Tabel 3.1 zijn het watergehalte en volumieke massa van de geteste monsters weergegeven. Tevens is de consistentie index gegeven, waarbij gebruik is gemaakt van de gemiddelde vloeigrens en uitrolgrens uit de bussen 3 en 4 per kuil.

Tabel 3.1 Gegevens geteste monsters.

Monster	Diepte [m – MV]	Beschrijving	Volumieke massa [kg/m ³]		Watergehalte [%]	Consistentie index []
			nat	droog		
PK1.1_1	0.70-0.75	Klei, matig siltig, zwak humeus, grijs	1690	1120	50,9	0,55
PK1.1_2	0.75-0.80	Klei, zwak siltig, zwak humeus, grijs	1760	1250	40,4	0,82
PK1.1_3	0.85-0.90	Klei, zwak siltig, matig humeus, grijs	1730	1230	40,5	0,82
PK2.1_2	0.73-0.83	Klei, zwak siltig, zwak humeus, grijs	1730	1210	42,5	0,73
PK2.2_1	0.83-0.90	Klei, matig siltig, zwak humeus, grijs	1720	1200	43,5	0,71
PK3.1_1	0.75-0.80	Klei, matig siltig, zwak humeus, grijs	1490	1070	38,6	0,94

Bij deze monstereigenschappen valt de lage volumieke massa van monster Pk3.1_1 op. Meestal duidt dit op een hoger organisch stofgehalte, wat dan meestal weer gepaard gaat met een hoger watergehalte, waar in dit geval nu juist geen sprake is. De lage droge volumieke massa is mogelijk nog een erfenis van de aanlegperikelen, waarbij de klei niet altijd goed was te verdichten omdat deze te nat was. Mogelijk is er ook een relatie met structuurvorming in dit monster. De hogere waarden van het watergehalte kunnen samenhangen met een hoger percentage lutum en een hoger percentage organisch stof, aangezien deze grote invloed hebben op het vochtvasthoudend vermogen. Echter, dit blijkt niet uit de visuele beschrijving: alle monsters zijn als matig tot sterk siltige kleimonsters en zwak humeuze monsters beschreven.

De precieze eigenschappen, behoudens die in Tabel 3.1 vermelde eigenschappen, van de in de roto-erosiemeter beproefde monsters zijn niet bekend, omdat deze eigenschappen op monsters vlakbij zijn bepaald en het gebleken is dat de samenstelling en daarmee de eigenschappen sterk kunnen variëren op kortere afstand.

Foto's van de monsters zijn in hoofdstuk 4 weergegeven. Hier zijn geen bijzonderheden waarneembaar die een verklaring kunnen geven voor de relatief lage volumieke massa van monster PK3.1_1. Bij het selecteren van het monster zijn ook geen bijzonderheden waargenomen. De selectie van een geschikt monster wordt gedaan op basis van representativiteit en de afwezigheid van scheuren of andere beschadigingen die invloed zouden kunnen hebben op het resultaat.

Wat hierbij moet worden opgemerkt is dat de monsterbussen regelmatig niet geheel gevuld waren. Er is dus minder gestoken dan op basis van de steekdiepte zou kunnen worden verwacht. Dit zogenaamde steekverlies wordt vaker geconstateerd bij het gebruik van steekbussen. Dit is ook de reden dat voor dit onderzoek gekozen is voor steekbussen met een diameter van 10 cm in plaats van de gebruikelijk 6.6 cm. Echter ook bij bussen van 10 cm blijkt dat deze niet geheel worden gevuld. Het is dus aannemelijk dat er in enige mate verdichting van het materiaal in de bussen is opgetreden. In hoeverre hierdoor zichtbare structuren zijn dichtgedrukt is onduidelijk. Het is derhalve te overwegen om te onderzoeken of andere steektechnieken voor minder verstoring zorgen. Het graven van proefkuilen biedt in ieder geval de mogelijkheid om vrijwel onverstoord materiaal op enige diepte met nog grotere steekringen te bemonsteren, maar dit zal zeker niet op alle locaties mogelijk zijn.

Tabel 3.2 geeft een beschrijving van de grondmonsters uit bussen 3 en 4 uit de 3 profielkuilen volgens identificatie NEN-EN-ISO 14688; beschrijfkwaliteit B2. Het eerste volgnummer duidt de profielkuil aan, het tweede de 45 cm monsterbussen (Ø10 cm).

Tabel 3.2 Identificatie grondmonsters.

Monster	Identificatie 14688
Zakje 1-3	Cl, grijs, or1, ca3
Zakje 1-4	Cl, grijs, or1, ca3
Zakje 2-3	Cl, grijs, or1, ca3
Zakje 2-4	Cl, grijs, or1, ca3
Zakje 3-3	Cl, grijs, or1, ca3
Zakje 3-4	Cl, grijs, or1, ca3

De grondeigenschappen zijn gegeven in Bijlage A en in Tabel 3.3.

Tabel 3.3. overzicht van de geotechnische eigenschappen van monsterbussen 3 en 4 uit de profielkuilen.

Naam	<2 µm	>63 µm	L _L	P _L	P _I	org stof (H ₂ O ₂)	kalk (HCl)	zout	w	I _c
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/l]	[%]	[]
M0013x1	50,3	8,0	74,8	34,0	40,8	1,2	10,9	< 0,1	37,31	0,9
M0014x1	41,0	21,2	70,7	32,7	38,0	2,8	11,7	< 0,1	44,06	0,7
M0023x1	45,8	15,8	76,3	30,8	45,6	1,6	11,5	< 0,1	48,55	0,6
M0024x1	50,8	7,4	78,2	29,2	49,1	1,4	11,2	0,2	40,87	0,8
M0033x1	46,5	12,7	100,3	35,8	64,5	4,9	11,2	0,2	51,77	0,8
M0034x1	53,2	4,4	75,9	34,8	41,1	1,5	9,4	< 0,1	45,16	0,7

Waarin:

L_L : Vloeigrens.

P_L : Uitrolgrens.

P_I : Plasticiteitsindex.

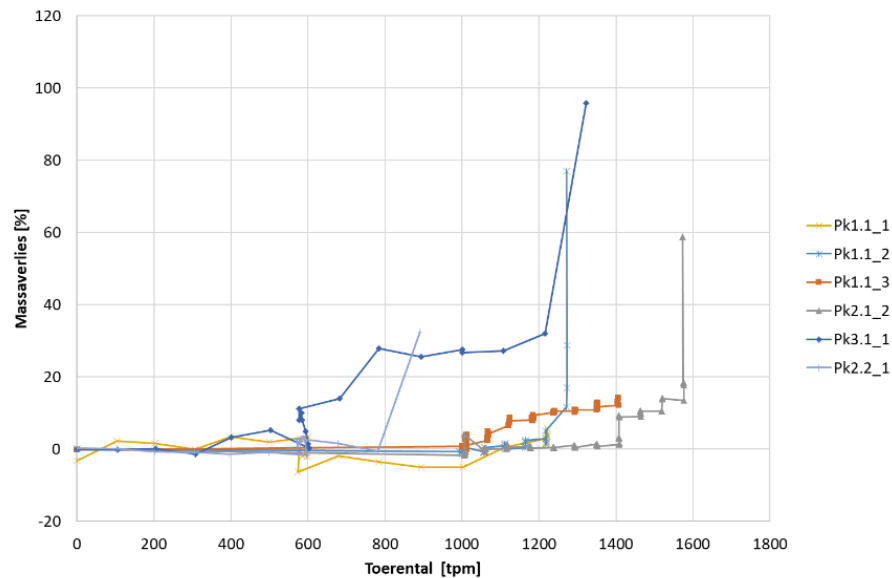
w : Watergehalte.

I_c : Consistentie index.

Te zien is dat met name de zandfractie per profielkuil en monsterbus flink kan verschillen. Het organisch stofgehalte is vaak laag, dat wil zeggen lager dan 2%. De maximum waarde van 4,9% is ook relatief laag aangezien deze klei destijds afkomstig was van de kwelder. Het zoutgehalte is laag, wat ook eerder door het waterschap is gemeten [Grondmechanica Delft 1993].

3.3 Roto-erosieproeven

Het procentuele verloop van het gemeten verlies van massa van de monsters tijdens de erosieproeven onder water is in Figuur 3.1 weergegeven:



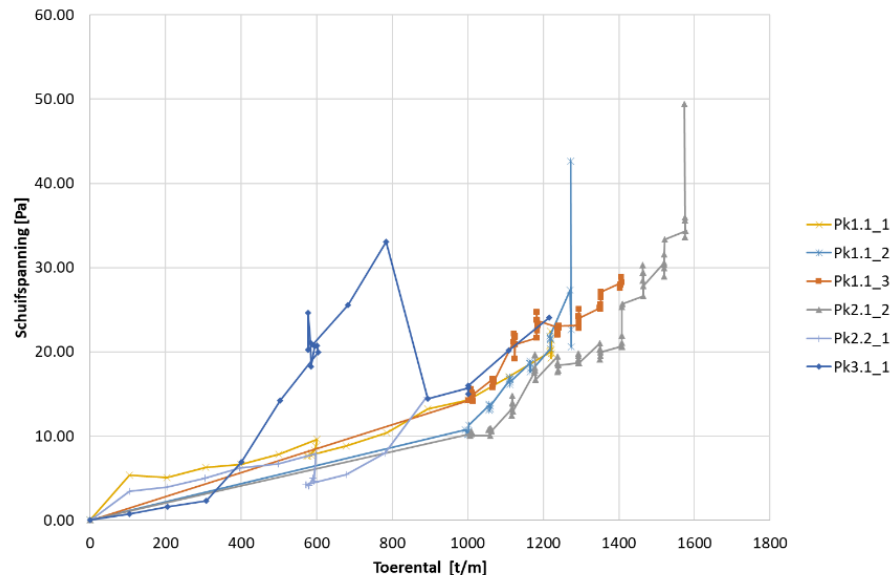
Figuur 3.1 Verloop van het massaverlies van de monsters als functie van het toerental.

Op basis van de in Figuur 3.1 weergegeven resultaten van de metingen van het massaverlies van de monsters, kan gesteld worden dat de geleidelijke erosie vanaf een toerental van ongeveer 1000 tpm start, uitgezonderd monsters Pk3.1_1 en PK2.2_1 die al bij een lager toerental beginnen met eroderen.

Verder volgt uit deze figuur dat monster Pk1.1_2 bezwijkt (d.w.z. 30% of meer massaverlies) bij een toerental van 1250 tpm en de monsters Pk1.1_3 en Pk2.1_2 bezwijken bij een toerental > 1400 tpm. Volgens Tabel 1.1 zijn alle drie de monsters weinig erosiegevoelig. De monsters Pk3.1_1 en Pk2.2_1 bezwijken bij toerentalen van 800 tpm respectievelijk 850 tpm, wat volgens Tabel 1.1 als erosiegevoelig wordt aangemerkt. Monster Pk3.1_1 erodeert al substantieel bij een toerental van 600 tpm.

Het bezwijktoerental is hetgeen waarbij er meer dan 30% massaverlies is opgetreden. In het verleden zijn de grafieken met massaverlies als functie van het toerental wat creatief afgelezen. Bij de standaardproeven wordt niet altijd lang genoeg gemeten wat er bij een bepaald toerental gebeurt. Vandaar dat we de meer gedetailleerde proeven zijn gaan uitvoeren. Dat proefresultaten tussen de standaardproef en de gedetailleerde proef verschillen kan ook aan de aard van de monsters liggen, want er zijn steeds nieuwe monsters ingezet. Het materiaal is namelijk sterk heterogeen.

Het verloop van de door het water uitgeoefende schuifspanning op het monster als functie van het toerental is in Figuur 3.2 weergegeven.



Figuur 3.2 Verloop van de schuifspanning van de monsters als functie van het toerental.

Bij de resultaten valt op dat de monsters een redelijk gelijkwaardig gedrag laten zien, afgezien van de monster PK3.1_1 en, in mindere mate, monster PK1.1_2, hoewel dit monster uit dezelfde monsterbus komt als PK1.1_1 en PK1.1_3.

De oorzaak van het inzakken van de schuifspanning van monster Pk3.1_1 is niet duidelijk, maar dit gebeurt gelijktijdig met het tijdelijk stoppen van de massa afname van het monster. Mogelijk dat er een deel van het monster is weggeërodeerd bij dat toerental wat de sterke toename van de schuifspanning veroorzaakte.

In Bijlage B zijn de monsters voor en na de proef weergegeven, indien mogelijk²:

Aan de foto's is duidelijk te zien dat de erosie vrijwel altijd niet uniform over de omtrek van het monster verdeeld is en dat bovendien de erosie vaak aangrijpt bij de randen van het monster. Dat laatste is ook wel logisch gezien het feit dat daar de stroming het meest turbulent zal zijn. Gezien het feit dat er duidelijk ruwe stukken te zien zijn, is aanleiding om aan te nemen dat de erosie broksgewijs plaatsvindt. Dit zou impliceren dat er een begin van structuurvorming te zien kan zijn. Anderszijds zijn altijd iets sterkere en zwakkere zones in een monster aanwezig; het bezwijken zal via de zwakkere zones verlopen wat ook broksgewijs kan verlopen. Een zandinsluiting kan bijvoorbeeld zo'n zwaktezone zijn. Hoewel uit dit erosief gedrag een aanwijzing van het erosieproces is af te leiden, kan hieruit niet het verloop van het erosieproces afgeleid worden. Ook het feit dat van veel monsters vrijwel niets meer over is maakt het lastig om een algeheel beeld van het erosieproces te krijgen.

Aan de hand van de foto's is geen aanleiding gevonden voor structuurvorming in de monsters, hetgeen ook overeenkomt met de waarnemingen in de profielkuilen. Echter, gezien het feit dat er hoogstwaarschijnlijk sprake is geweest van compressie tijdens het steekproces (zie paragraaf 3.2), is het de vraag of structuurvorming in de foto's te zien zou zijn geweest.

² Na de proef was het niet altijd mogelijk een intact monster uit het erosietoestel te verwijderen

4 Analyse

4.1 Beschouwing bezwijktoerentallen roto-erosiemeterproeven

Zowel de standaard als de gedetailleerde proeven zijn bruikbaar gebleken om een indeling te maken in de erosieklassen op basis van bezwijktoerental. De gedetailleerde proeven geven een nauwkeuriger inzicht in de erosie bij toerentallen rond het bezwijktoerental. Er is een flinke spreiding in bezwijktoerentallen tussen de verschillende monsters gevonden. Uit profielkuilinspecties volgt dat de eigenschappen op korte afstand sterk kunnen verschillen, dus ook in de 45 cm lange monsterbussen en ook tussen de monsterbussen onderling. Verder is de bodemopbouw in de 3 kuilen wat verschillend, ook op de diepte van monsternamen. Uit de profielkuilbeschrijvingen volgt de volgende opbouw over een diepte 0,5-0,9 m - MV, zie Tabel 4.1. In [Deltares 2022b] is de volledige profielbeschrijving opgenomen.

Tabel 4.1 Opbouw in profielkuilen over range monsternamen.

Profielkuil	Opbouw over diepte 0,5-0,9 m – MV
PK1	Klei, uiterst siltig, bruingrijs, kalkrijk
PK2	Klei, zwak zandig/uiterst siltig, bruingrijs, kalkrijk. Rond 0,50 m - MV blauwgrijze horizontale klei-insluitingen
PK3	Klei, uiterst siltig, bruingrijs, kalkrijk, rond 0,50 - MV enkele zandinsluitingen

De 3 monsters uit PK1, bus 1 laten alle een goede erosiebestendigheid zien, d.w.z. klasse “weinig erosiegevoelig” uit Tabel 1.1. Dit is mogelijk te verklaren door dat in deze profielkuil geen insluitingen met afwijkende eigenschappen zijn geconstateerd, dus de klei lijkt redelijk homogeen met kenmerken die overeen komen met die uit Tabel 3.2, zijnde: Klei, zwak humeus, kalkrijk.

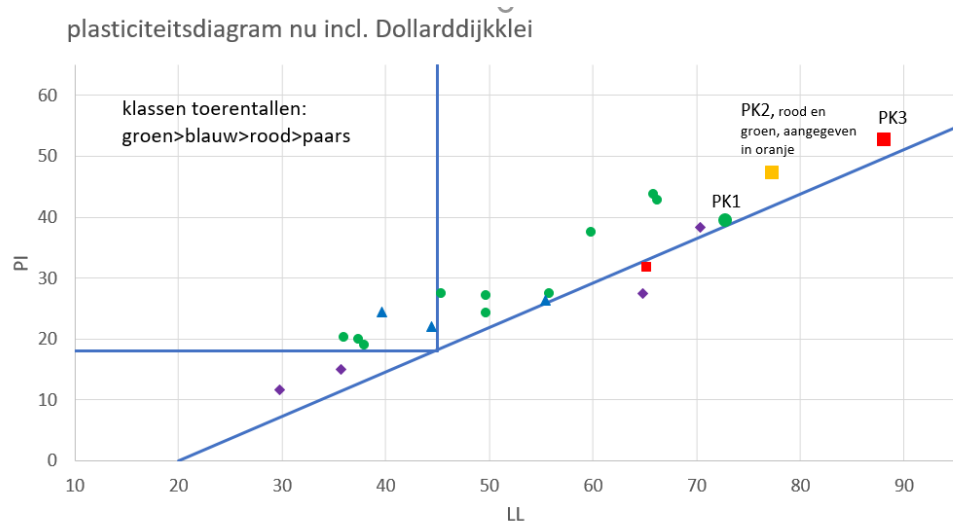
De 2 monsters uit PK2 zijn genomen uit twee verschillende bussen, waarbij het monster uit bus 1 “weinig erosiegevoelig” is met bezwijktoerental > 1400 tpm en die uit bus 2 “erosiegevoelig” is met een bezwijktoerental van 850 tpm. In PK2 zijn blauwgrijze klei-insluitingen gezien rond de 0,5 m, en er wordt melding gemaakt van “zwak zandig”. Hoewel er in de foto’s van de monsters (Bijlage B) geen aanleiding voor is gevonden, is het mogelijk dat de blauwe klei-insluitingen de oorzaak voor de verschillen is.

Monster Pk3.1_1 erodeert al substantieel bij een toerental van 600. Dit kan debet zijn aan het relatief lage volumegewicht, maar ook aan een mogelijk plaatselijk hoog zandgehalte. Immers in PK3 zijn er rond 0,5 m - MV enkele zandinsluitingen waargenomen. Dit is echter weer in tegenspraak met de lage volumieke massa, immers, een hoger zandgehalte gaat in de regel gepaard met een hogere volumieke massa.

In Figuur 4.1, welke is ontleend aan [Grondmechanica Delft 1988], is te zien wat de erosiebestendigheid is van diverse kleisoorten, volgens de indeling uit Tabel 1.1. Indien de P_i , L_L combinatie in de zone rechtsboven ligt, is aan twee van de eisen voor klasse-1-klei voldaan. Uit [Grondmechanica Delft 1988] volgt dat klasse-1-klei meestal een goede erosiebestendigheid heeft (groene bolletjes in de figuur). Een deel van deze klei had een verhoogd zoutgehalte of een hoog zandgehalte en dan bleek de erosiebestendigheid minder goed. De schralere klei ligt in het diagram vaak links onder.

Een vergelijking van de erosieklassen voor de Dollarddijkklei met die uit historische gegevens in het plasticiteitsdiagram is lastig, omdat voor de 3 kuilen de geotechnische classificatie op twee andere monsterbussen is uitgevoerd (volgnummer 3 en 4). De eigenschappen van de Dollarddijkklei in Tabel 3.3 duiden op een klasse-1-klei. Deze klei is toegevoegd aan Figuur 4.1, dit geeft eerste indruk. Hierbij zijn voor de vloeigrens (L_L) en de plasticiteitsindex (P_i) gemiddelde waarden gebruikt. Het kan zijn dat als de eigenschappen van de in de roto-erosiemeter beproefde monsters (uit bussen met volgnummers 1 of 2) bekend waren geweest, dat dan de ligging van de punten voor PK2 en PK3 in Figuur 4.1 meer richting de

zone linksonder was geweest, i.v.m. het mogelijk hoge zandgehalte. Er zijn echter geen aanwijzingen om te veronderstellen dat de eigenschappen tussen de verschillende bussen uit een profielkuil op een bepaald niveau significant van elkaar verschiden, hoewel er altijd sprake kan zijn van een zeker verschil tussen verschillende monsters uit eenzelfde laag. Aanbevolen wordt om de monsters uit de steekbussen meer in detail te beschrijven en aandacht te besteden aan structuur en gelaagdheid en de geotechnische bepalingen op monsters aangrenzend van de roto-erosieproeven uit te voeren.



Figuur 4.1 Indeling historische gegevens met bezwijktoerentallen roto-erosiemeterproef, met toegevoegd de nieuwe metingen op Dollarddijkklei [Grondmechanica Delft 1988].

4.2 Erosieparameters bij geleidelijke erosie

4.2.1 Inleiding

Om een vergelijking te maken met bevindingen uit de literatuur is een nadere analyse uitgevoerd in termen van de gangbare erosieparameters erosiegevoelheidscoëfficiënt (Hanson erosion coefficient) k_d [mm/(Pa·s)] en de kritieke schuifspanning (critical shear stress) τ_c [Pa]. Het blijkt dat alleen de gedetailleerde proeven, die een geleidelijke erosie laten zien, hiervoor bruikbaar zijn.

De erosieparameters worden afgeleid uit de berekende monsterdiameter en de gemeten schuifweerstand (weerstandskracht [N] tegen de uitgeoefende stromingskracht) in de tijd. De monsterdiameter in de tijd wordt berekend op basis van de initiële diameter en de afname van de ondergedompelde massa van het monster, onder de aanname dat de erosie gelijkmatig over het monsteroppervlak optreedt. De kritische schuifspanning wordt bepaald uit de berekende schuifspanning op het tijdstip waarop de erosie begint. De schuifspanning in de tijd volgt uit het quotiënt van de gemeten schuifweerstand en het (berekende) momentane oppervlak van het monster. Dit oppervlak volgt uit de afname van de monstermassa, onder de aanname dat de erosie gelijkmatig over het monsteroppervlak optreedt.

De erosierelatie luidt als volgt (formule 4.1):

$$\varepsilon = k_d(\tau - \tau_c) \quad (4.1)$$

Met:

ε : Volume geërodeerd materiaal per oppervlakte-eenheid en tijdseenheid [mm/s] (Hanson erosion rate).

τ : Hydraulische schuifspanning [Pa].

τ_c : Kritieke schuifspanning (critical shear stress) [Pa].

k_d : Erosiegevoelheidscoëfficiënt (Hanson erosion coefficient) [mm/(Pa·s)].

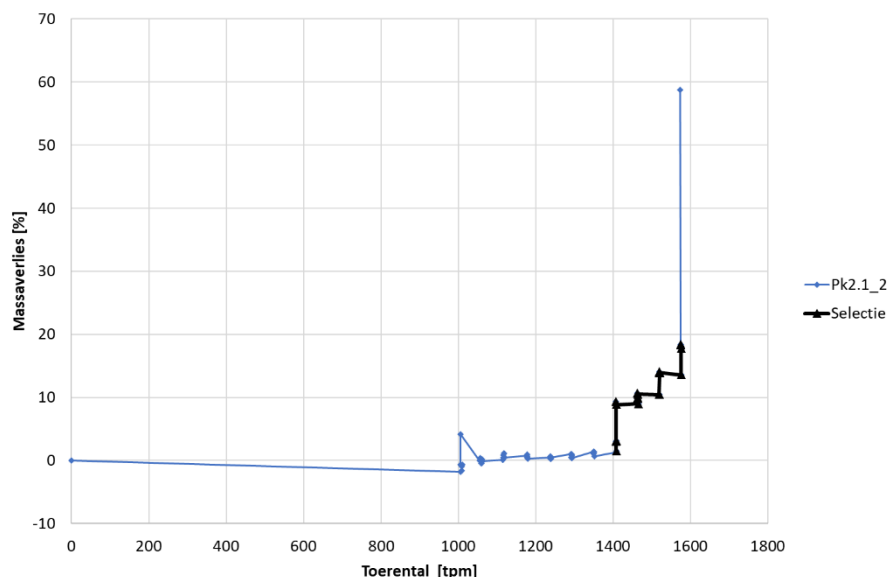
De hierboven beschreven parameters zijn specifiek voor de gedetailleerde roto-erosiemeterproef die in dit document is beschreven. De parameterwaarden die volgen uit andersoortige erosieproeven dan de gedetailleerde roto-erosiemeterproef kunnen aanzienlijk verschillen. [Briaud et al. 2019] laat zien dat er flinke verschillen kunnen optreden tussen de diverse proeven, omdat de monstergrootte en de wijze van belasten zeer verschillend kunnen zijn. Er is nog weinig ervaring opgedaan met de analyse van de meetgegevens uit de in dit rapport vermelde gedetailleerde roto-erosiemeterproeven. Wel kan een vergelijking worden gemaakt met historische gegevens voor Nederlandse dijken, en wel op basis van de bezwijktoerentallen uit zowel de standaard als de gedetailleerde proeven, zie paragraaf 4.1.

De stroomsnelheid van het water wordt berekend aan de hand van het toerental en is gebaseerd op de stroomsnelheid op een afstand van 1 mm van het oppervlak van het monster. De omrekening is: $v \text{ [m/s]} = 0,0013 \text{ [m/s/tpm]} * \text{toerental [tpm]}$. Merk op dat bij deze berekening geen rekening is gehouden met de afname van de gemiddelde diameter van het monster.

In de berekeningen is er vanuit gegaan dat de erosie homogeen verdeeld over het oppervlakte van het monster plaatsvindt. Uit de foto's blijkt dat dit hoogstwaarschijnlijk in de meeste gevallen niet geheel overeenkomt met de werkelijkheid.

Het toenemen van de schuifspanning is gerelateerd aan het losraken van kluitjes uit het oppervlak van het monster. Hoe onregelmatiger het oppervlak van het monster door het loslaten kluitjes wordt, hoe hoger de schuifspanning wordt. Uit het verloop van de schuifspanning in de tijd kan niet direct afgeleid worden of een bepaalde schuifspanningstoename gerelateerd is aan het losraken van een enkel groot brok of dat er sprake is van het losraken van meerdere kleine brokjes. Als er meerdere kleine brokjes losraken, dan is de eerder genoemde aanname dat de erosie gelijkmatig over het oppervlak plaatsvindt meer legitiem. De erosie treedt dus broksgewijs op en is meestal niet uniform, wat betekent dat de te verkrijgen erosieparameters benaderingen zijn.

Als voorbeeld voor de geselecteerde punten die voor de analyse gebruikt zijn, is in Figuur 4.2 het resultaat van de proef PK2.1_2 afgebeeld met de punten die gebruikt zijn voor de bepaling van de parameters.



Figuur 4.2 Voorbeeld van de gebruikte meetpunten voor de analyse van proef PK2.1_2.

Deze selectie is altijd in enige mate arbitrair, waarbij de gevolgde redenering luidt dat bij de meetpunten in de tijd tot de getoonde selectie er wel erosie heeft plaatsgevonden, maar er daarna geen verdere stijging plaatsvond. De vroege erosie betreft waarschijnlijk het loskomen van een enkel stukje op het monsteroppervlak dat waarschijnlijk door het trimmen al enigszins los was gaat zitten.

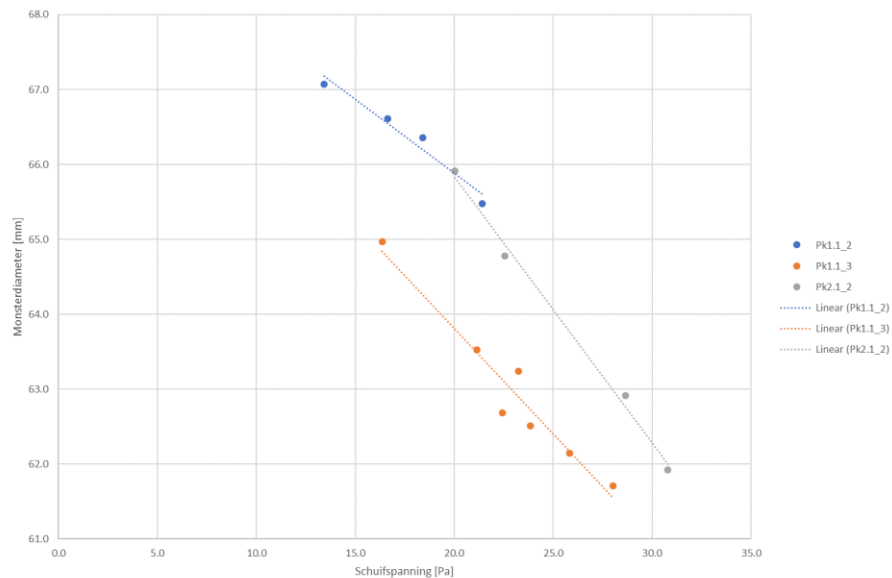
Verder is er sprake van meetfouten. Uit de data blijkt dat de gemeten massa en gemeten schuifweerstand variëren in de tijd, met zelfs soms toenames van de massa (wat zou betekenen dat er negatieve erosie op zou treden tussen deze punten). Het is daarom aannemelijk dat er een onnauwkeurigheid in de meting zit.

In het voor de analyse van de erosieparameters gebruikte meetbereik is sprake van een geleidelijk verlopende erosie.

4.2.2 Parameters

In de bepaling van de erosieparameters worden alleen de gedetailleerde proeven gebruikt te weten PK1.1_2, PK1.1_3 en PK2.1_2. Doordat in deze proeven per toerental meerdere metingen van massa en schuifspanning worden uitgevoerd, worden meetfouten uitgemiddeld en kan de consistentie van de meetdata beter worden beoordeeld: doordat het resultaat per toerental bij de lange procedure het resultaat is van meer metingen dan bij de standaard procedure is het resultaat minder gevoelig voor toevallige meetfouten en onregelmatigheden in massaverlies.

In Figuur 4.3 is de uit de massa-afname berekende monsterdiameterweergegeven als functie van de gemiddelde schuifspanning per toerental. Per monster is een lineaire fit door de meetpunten getrokken. De begindiameter is hierbij niet als 0-punt meegenomen, daar deze de fit soms verstoort. De begindiameter is namelijk zo goed als gelijk aan de diameter aan het begin van de erosie, maar dan in combinatie met een schuifspanning van 0 Pa. De variatie van de meetpunten ten opzichte van de regressielijn zou samen kunnen hangen met een schoksgewijs verloop van de erosie, dat wil zeggen dat brokjes klei loslaten en er geen sprake is een geleidelijke slijtende erosie.



Figuur 4.3 Verband tussen monsterdiameter en schuifspanning.

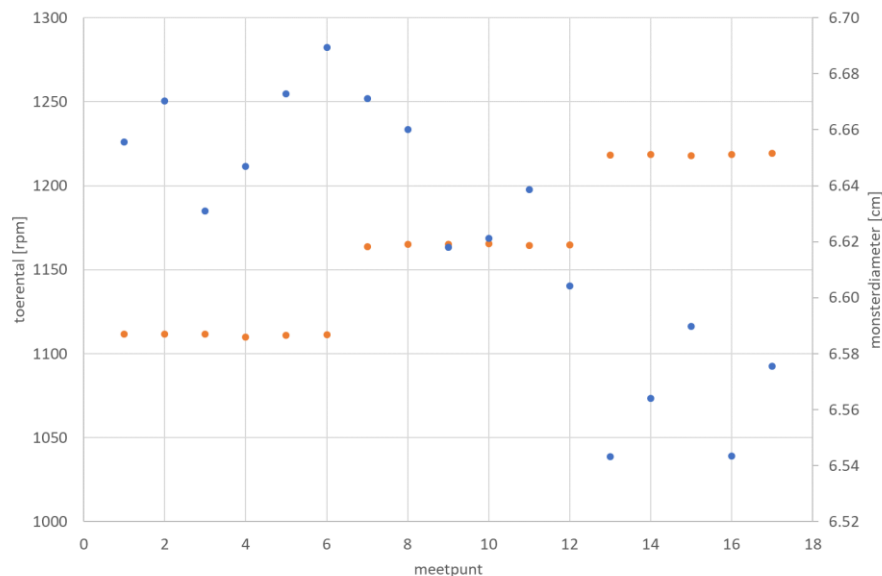
De waarden voor de regressieparameters van de lijnen uit Figuur 4.3 zijn gegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Regressieparameters.

Monster	Constante	r.c.
Pk1.1_2	-67.64	-7E-4
Pk1.1_3	-64.62	-1E-4
Pk2.1_2	-68.37	-9E-5

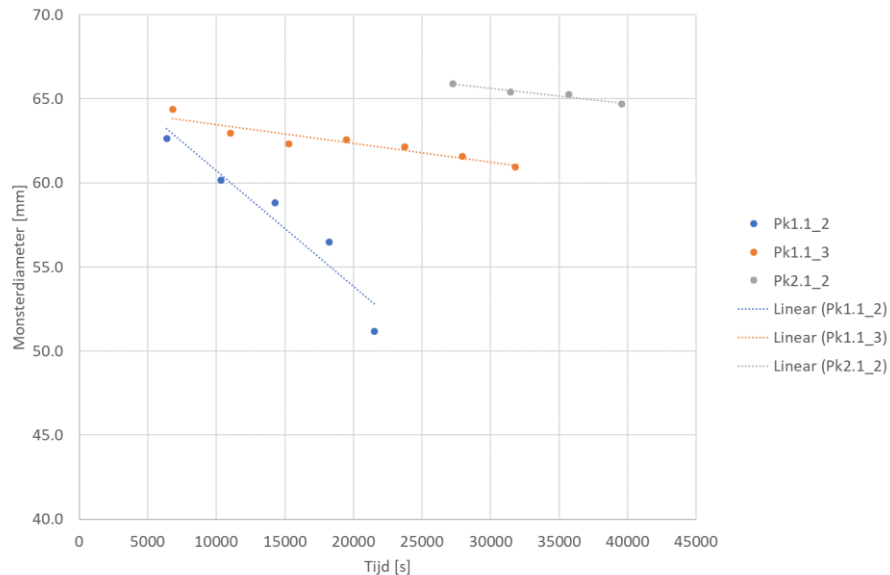
In Figuur 4.3 valt op dat de richtingscoëfficiënt van de regressielijnen van de monsters Pk1.1_3 en 2.1_2 elkaar niet veel ontlopen en dat de helling van Pk1.1_2 iets minder steil loopt.

Uitgaande van deze regressielijnen zijn gemiddelde monsterdiameters bij de gemiddelde schuifspanning per toerental berekend binnen het eerder aangegeven toerentalbereik waarin significante erosie plaatsvindt. Hieruit volgt de dikte van de geërodeerde laag, uitgaande van een homogene verdeling van de erosie over het oppervlak. Bij de berekening van de erosieparameters zijn, zoals eerder aangegeven, gemiddelde waarden van de schuifspanning en de monsterdiameter gebruikt. Dit is gedaan omdat de afzonderlijke metingen zoveel variatie vertoonden, dat hier geen betrouwbaar beeld uit kon worden verkregen. Als voorbeeld is in Figuur 4.24 per toerental het zestal meetpunten met de berekende monsterdiameter weergegeven. Hieruit blijkt dat per toerental vaak geen duidelijke relatie tussen de zes meetpunten is te vinden en dat deze dus ongeschikt zijn voor het afleiden van erosieparameters.



Figuur 4.4 Berekende monsterdiameters per meetpunt bij een reeks toerentallen (Pk1.1_2).

Figuur 4.5 toont dezelfde berekende diameter tegen de proefduur bij de in de tijd opeenvolgende toerentallen. De regressielijnen in deze figuur zijn niet in de analyse gebruikt, maar zijn getrokken om het algemene beeld per monster weer te geven.



Figuur 4.5 Verband tussen monsterdiameter en beproevingstijd bij opeenvolgende toerentallen.

In Figuur 4.5 valt op dat de richtingscoëfficiënt van de regressielijnen van de monsters Pk1.1_3 en 2.1_2 elkaar niet veel ontlopen en dat de helling van Pk1.1_2 duidelijk steiler loopt.

Daar nu ε , τ en τ_c en de tijd tussen de toerentalstappen bekend zijn, kan per toerental k_d worden berekend. De gepresenteerde k_d is het gemiddelde over het geïnterpreteerde toerentalbereik.

In Tabel 4.2 zijn de berekende erosieparameters weergegeven.

Tabel 4.2 Berekende erosieparameters.

Monster	τ_c	k_d	Standaard deviatie k_d	Bereik toerental zoals gebruikt in analyse
	Pa	mm/(Pa·s)	mm/(Pa·s)	
Pk1.1_2	13.4	5.6E-05	2.9E-05	1050-1300
Pk1.1_3	14.7	2.4E-06	2.1E-06	1000-1400
Pk2.1_2	18.4	4.1E-06	1.9E-06	1200-1600

Merk op dat de waarden voor ε en k_d de gemiddelde waarden zijn over het bereik in toerentallen tussen waar de geleidelijke erosie begon en deze leidde tot bezwijken van het monster (massaverlies gelijk of groter dan 30%).

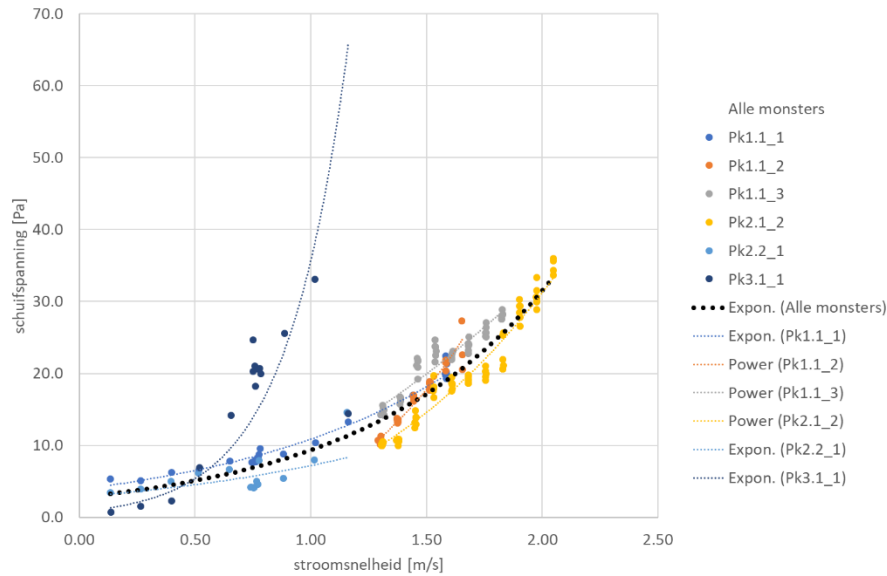
Uit Tabel 4.2 blijken de verschillen tussen de monsters Pk1.1_3 en Pk2.1_2 met betrekking tot de erosiegevoeligheidsparameter k_d niet groot te zijn en dat monster Pk1.1_2 een significant hogere erosiegevoeligheid laat zien, want samenhangt met het steiler lopen van dit monster in Figuur 4.5. Dit is opvallend omdat de monsters Pk1.1_2 en 1.1_3 uit dezelfde profielkuil afkomstig zijn en vlak onder elkaar uit dezelfde bus afkomstig zijn (zie Tabel 3.1). Een oorzaak hiervoor is op basis van de gemeten monstereigenschappen niet gevonden. Wel blijkt uit Bijlage A dat de eigenschappen van de klei op kortere afstand (minder dan 1 meter) behoorlijk kunnen verschillen.

Ook kan opgemerkt worden dat de kritieke schuifspanning juist een duidelijke overeenkomst tussen de monsters uit profielkuil 1 laat zien ($\cong 14$ Pa), terwijl deze van het monster uit profielkuil 2 aanmerkelijk hoger is ($\cong 18$ Pa).

Op basis van deze resultaten wordt het geadviseerd om, ter verkrijging van een indruk van de heterogeniteit, bij volgende (roto-)erosieproeven op bestaande dijkbekledingen op korte afstand meerdere erosieproeven uit te voeren en van elk beproefd monster enkele geotechnische classificatiebepalingen zoals de bepaling van de plasticiteitsindex en de korrelverdeling uit te voeren. Het als representatief nemen van een nabijgelegen monster voor de bepaling van deze eigenschappen kan tot serieuze foute interpretaties/correlaties leiden.

4.3 Verdere analyse erosieproces

In deze paragraaf wordt ingegaan op de resultaten van alle roto-erosieproeven. In Figuur 4.6 is het verloop van de schuifspanning uitgezet tegen de stroomsnelheid op 1 mm van de monsters, waarbij de afname van de gemiddelde monsterdiameter niet is verdisconteerd.



Figuur 4.6 Verband tussen stroomsnelheid en schuifspanning.

Opvallend is dat de resultaten van de proeven redelijk in één zone lijken te liggen zoals blijkt uit de fit door alle monsters, afgezien van Pk3.1_1 die ook niet in de fit is meegenomen. Pk1.1_2 is het monster dat al iets voorbij 1200 tpm volledig bezwijkt (gedetailleerde proef) en toont een wat steiler verloop, terwijl de andere twee gedetailleerde proeven dan nog nauwelijks (Pk2.1_2) of geleidelijk (Pk1.1_3) eroderen. Het steilere verloop van monster PK1.1_2 komt verder tot uiting in de hogere waarde van erosiegevoeligheidsparameter k_d . De overige monsters (Pk1.1_1, Pk1.1_3 en Pk 2.2_1) laten een erosief gedrag zien dat vrij redelijk beschreven wordt door de fit door alle monsters behalve PK3.3_1.

De regressieparameters van de lijnen zijn (Tabel 4.3):

Tabel 4.3 Regressieparameters exponentiele fits.

Monster	Constance	Exponent
Pk1.1_1	3.90	1.026
Pk1,1_2	4.59	3.346
Pk1.1_3	9.52	1.826
Pk2.1_2	4.98	2.648
Pk2.2_1	2.87	0.920
Pk3.1_1	0.81	3.784
Alle monsters	2.77	1.215

Uit de vergelijking van het erosieproces van alle monsters volgt daarnaast dat de schuifspanning van snel eroderende monsters sterker oploopt in vergelijking met minder snel eroderende monsters. Dat houdt verband met het losraken van brokjes van het oppervlak waardoor deze ruwer wordt. De foto's in Bijlage B tonen de grillige vorm van de sterk geërodeerde monsters waaruit de hoge schuifsterkte en daarmee de sterkere eroderende kracht van het rondstromende water volgt. De sterker oplopende schuifspanning komt ook tot uiting in een hoge waarde van k_d en meestal een lage waarde van t_c , hoewel monster PK1.1_2 aantoont dat ook een hogere waarde van t_c gepaard kan gaan met een hogere waarde van k_d .

5 Conclusie

De eigenschappen van de klei in de profielkuilen op de Dollarddijk kunnen aanzienlijk verschillen, zoals blijkt uit profielkuilonderzoek. Uit de roto-erosiemeterproeven volgt dit ook, d.w.z. de klei is een aantal keren erosiegevoelig en een aantal keren weinig erosiegevoelig. Deze klasse-aanduiding die is gebaseerd op het bezwijktoerental bij 30% of meer massaverlies is vergeleken met historische gegevens, waarbij gebruik is gemaakt van het plasticiteitsdiagram. Er is duidelijk verschil in bezwijktoerental (bij 30% massaverlies) tussen de monsters uit de drie profielkuilen.

Voor de weinig erosiegevoelige klei kon het erosieproces, voor zover dat geleidelijk verliep, nader worden geanalyseerd. Dit leverde waarden voor de erodeerbaarheid (erosiegevoeligheidscoëfficiënt) en erosiebestendigheid (kritieke schuifspanning) op in termen van in de internationale literatuur gangbare erosieparameters.

De resultaten laten een vergelijkbaar erosiepatroon van de beproefde monsters zien. Vanaf een stroomsnelheid van 1,3 tot 1,6 m/s begint erosie op te treden. Twee monsters wijken hiervan af. Bij één monster start de erosie al bij 0,8 m/s maar het bezwijken treedt pas veel later op, vergelijkbaar met de overige monsters. Slechts één monster wijkt echt af met een vroeg beginnende erosie en een vrijwel instantaan bezwijken. Dit bedrag lijkt te correleren met een lagere volumieke massa van dit monster. Hoewel uit analyse van de boorkernen volgt dat het zandgehalte sterk kan variëren, is een beïnvloeding hierdoor van het erosieproces van het genoemde monster niet waarschijnlijk. Een hoog zandgehalte is namelijk juist gecorreleerd aan een hogere volumieke massa. Ook uit andere gegevens, zoals de overige classificatiegegevens en de foto's, is geen oorzaak voor het verschil in gedrag geconstateerd.

Grosso modo, geven de resultaten uit de roto-erosieproeven aan dat er erosiegevoelige lagen in de Dollarddijkklei aanwezig zijn, wat bevestigd wordt door profielkuilonderzoek. De erodeerbaarheid van deze klei in het Deltagootonderzoek was ook groot vergeleken met andere kleisoorten. Toekomstig onderzoek moet uitwijzen of een combinatie van profielkuilonderzoek en kleinschalige laboratoriumproeven een voorspellende waarde kan hebben voor de erodeerbaarheid op grotere schaal, zoals gemeten is in Deltagootproeven. Als de klei sterk heterogeen is, zoals bij de Dollarddijk, kan een dergelijke vergelijking een grotere inspanning vergen, dan wanneer de klei relatief homogeen is.

Omdat de 45 cm lange Ø10 cm bussen ten gevolge van steekverlies niet goed gevuld werden, wat duidt op ofwel het samendrukking van het gestructureerde monstermateriaal of het voor de steekmond uit wegdrücken van de klei, wordt aanbevolen om te onderzoeken of andere steektechnieken voor minder verstoring zorgen. Er is speciaal gekozen voor het bemonsteren met deze grote diameter Ø10 cm steekbussen in plaats van met de in de geotechnische wereld standaard Ackermannbussen met een inwendige diameter van 66 mm, maar dit gaf nog niet het gewenste resultaat, mogelijk door de lengte van de bussen. Het graven van proefkuilen biedt in ieder geval de mogelijkheid om onverstoord materiaal op enige diepte met nog grotere steekringen te bemonsteren, maar dit zal zeker niet op alle locaties mogelijk zijn.

Een bemonstering met 20 cm lange Ø15 cm bussen in het proefdijkje (OGD stap 2b) was wel succesvol. Dit laat zien dat wandwrijving hoogstwaarschijnlijk een grote invloed heeft op het steekproces: een geringere lengte van de bus met een grotere diameter blijkt significant minder steekverlies op te leveren.

Gezien de grote variatie die aangetroffen kan worden in eigenschappen van de klei van een kleibekleding, wordt het geadviseerd om van elk in de roto-erosieopstelling getest monster,

enkele standaard geotechnische bepalingen uit te voeren, zodat mogelijke correlaties tussen beide beter vastgesteld kunnen worden.

Referenties

[Briaud et al. 2019]

Jean-Louis Briaud, Iman Shafii, Hamn-Ching Chen, and Zenon Medina-Cetina; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2019. Relationship Between Erodibility and Properties of Soils. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25470>.

[Deltares 2022a]

Onderzoek erodeerbaarheid klei op dijken bij golfaanval; Eerste selectie eenvoudige testmethodes voor classificatie; Deltares 2022; kenmerk 11206993-003-HYE-0006.

[Deltares 2022b]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei_profielkuilen, kenmerk 11207091-005-GEO-0003

[Grondmechanica Delft 1988]

Grondmechanica Delft 1988; CO-275925/14.

[Grondmechanica Delft 1993]

Grondmechanica Delft 1993. Resultaten geotechnisch laboratoriumonderzoek Zeedijk Dollard; CO-342570/7.

Bijlagen

A Geotechnische eigenschappen

M0013-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	1.2
Kalkgehalte	(chem)	[%]	10.9
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	< 0.1
Vloeigrens	W_L	[%]	74.8
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	34.0
A-lijn bij W_L		[-]	40.0
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	40.8
Consistentie index	I_C	[-]	0.9
> 63 μm		[%]	8.0
< 2 μm		[%]	50.3

M0014-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	2.8
Kalkgehalte	(chem)	[%]	11.7
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	< 0.1
Vloeigrens	W_L	[%]	70.7
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	32.7
A-lijn bij W_L		[-]	37.0
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	38.0
Consistentie index	I_C	[-]	0.7
> 63 μm		[%]	21.2
< 2 μm		[%]	41.0

M0023-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	1.6
Kalkgehalte	(chem)	[%]	11.5
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	< 0.1
Vloeigrens	W_L	[%]	76.3
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	30.8
A-lijn bij W_L		[-]	41.1
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	45.6
Consistentie index	I_C	[-]	0.6
> 63 μm		[%]	15.8
< 2 μm		[%]	45.8

M0024-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	1.4
Kalkgehalte	(chem)	[%]	11.2
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	0.2
Vloeigrens	W_L	[%]	78.2
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	29.2
A-lijn bij W_L		[-]	42.5
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	49.1
Consistentie index	I_C	[-]	0.8
> 63 μm		[%]	7.4
< 2 μm		[%]	50.8

M0033-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	4.9
Kalkgehalte	(chem)	[%]	11.2
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	0.2
Vloeigrens	W_L	[%]	100.3
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	35.8
A-lijn bij W_L		[-]	58.6
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	64.5
Consistentie index	I_C	[-]	0.8
> 63 μm		[%]	12.7
< 2 μm		[%]	46.5

M0034-x1			
Organische stof	(chem)	[%]	1.5
Kalkgehalte	(chem)	[%]	9.4
Zoutgehalte	NaCl	[g/l]	< 0.1
Vloeigrens	W_L	[%]	75.9
Plasticiteitsgrens	W_P	[%]	34.8
A-lijn bij W_L		[-]	40.8
Plasticiteitsindex	I_P	[-]	41.1
Consistentie index	I_C	[-]	0.7
> 63 μm		[%]	4.4
< 2 μm		[%]	53.2

Diepte monstername van 0,45 m - MV tot ca. 0,9 m – MV in profielkuilen Dollarddijk. M0013 betekent kuil 1 bus 3 enz.

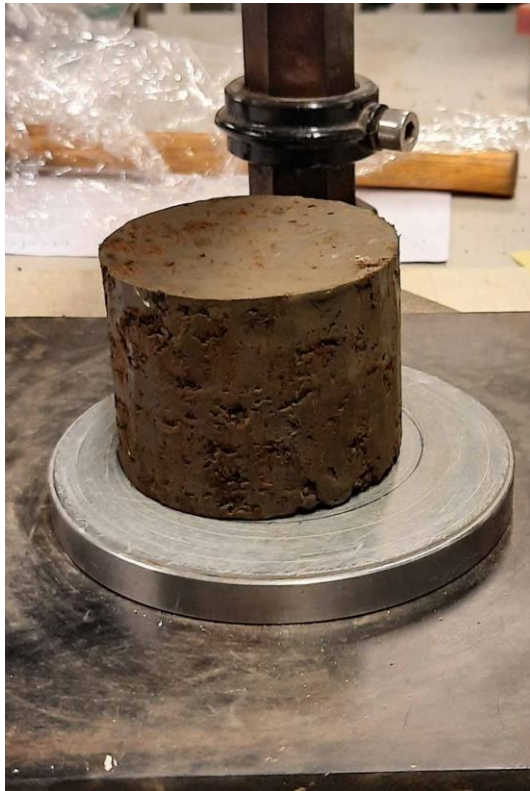
B Foto's beproefde monsters



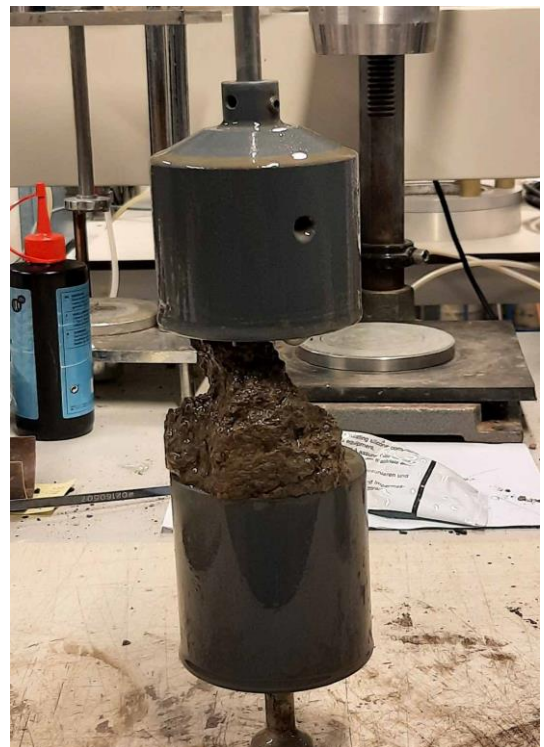
Figuur 5.5 Monster Pk1.1_1 voor (links) en na (rechts) van de erosieproef.



Figuur 5.6 Monster Pk1.1_2 voor de proef.



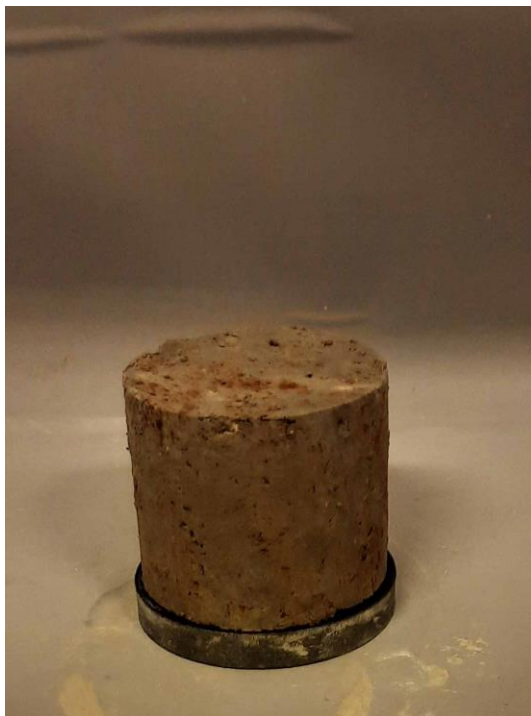
Figuur 5.7 Monster Pk1.1_3 voor (links) en na (rechts) van de erosieproef.



Figuur 5.8 Monster Pk2.1_2 voor (links) en na (rechts) van de erosieproef.



Figuur 5.9 Monster Pk2.2_1 voor (links) en na (rechts) van de erosieproef.



Figuur 5.10 Monster Pk3.1_1 voor de proef.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl