

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei

Auteur(s)

Harry van Essen

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 6 en 7: Roto-erosieproeven op Valgenweg- en Klutenplasklei

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 (Deltares)
Referenties	Projectbeschrijving TKI Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (TKI-OGD) 20210630
Trefwoorden	Brede groene dijk, kleibekleding, erosie, roto-erosiemeter, gerijpte klei, krimpgrens





Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	15-09-2022
Projectnummer	11207091-008
Document ID	11207091-008-GEO-0004
Pagina's	38
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Harry van Essen	

Onderstaande tabel is niet voor publicatie

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

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 van de kwelderklei of de baggerspecie een geschikt bouw materiaal te maken is. Met name het hoge zoutgehalte en hoge organisch stof gehalte maken dat deze klei niet voldoet aan de gestelde eisen. Een belangrijke functionele eigenschap is de erodeerbaarheid van de klei onder golfaanval. 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 is ingezet bij het bepalen van de erosiebestendigheid van reguliere dijkklei onder stromingsbelasting. Er kan dan, naast een vergelijking met het Deltagoot-onderzoek, een vergelijking worden gemaakt met historische gegevens in het plasticiteitsdiagram (met onder meer de A-lijn).

Een vergelijking met de resultaten uit de Deltagootproeven zou kunnen aantonen of deze kleinschalige proeven zinvol zijn bij het voorspellen van het erosiegedrag onder golfaanval, wat wezenlijk anders is dan puur een stromingsbelasting, zoals in de roto-erosiemeter.

De hier gerapporteerde werkzaamheden maken onderdeel uit van stap 6/7 van dit onderzoek en bestaan uit erosiemetingen uitgevoerd met het roto-erosieapparaat op twee soorten gerijpte klei: Valgenweg- en Klutenplasklei welke afkomstig was uit het in de Deltagoot beproefde kleibed. De resultaten zijn gebruikt om bezwijktoerentallen te bepalen en erosieparameters af te leiden. Dit is vergeleken met de erodeerbaarheid van deze twee kleisoorten zoals waargenomen in de Deltagootproeven. Tevens zijn de korrelverdeling en de krimpgrens van het de beproefde monsters bepaald.

Er zijn twee series roto-erosiemeterproeven uitgevoerd: De eerste serie bestaat uit de standaard proeven die in het verleden zijn gebruikt om de erosieklassen in termen van bezwijktoerental vast te stellen. De tweede serie proeven bestaat uit gedetailleerde proeven waarin kleine stappen in toerental direct voorafgaande aan het bezwijktoerental langer zijn vastgehouden en er bij elk toerental meerdere waarnemingen zijn verricht. Zowel de standaard als de gedetailleerde proeven kunnen gebruikt worden om een indeling te maken in de erosieklassen op basis van bezwijktoerental, analoog aan wat gedaan is met de eerder genoemde historische gegevens. De gedetailleerde proeven geven een beeld van de aan bezwijken voorafgaande meer geleidelijke erosie, waarbij de in de literatuur gangbare (Hanson-)erosieparameters kunnen worden afgeleid.

Zowel de standaard als de gedetailleerde proeven zijn bruikbaar gebleken om een indeling te maken in de erosieklassen op basis van bezwijktoerental (bij 30% massaverlies). De gedetailleerde proeven geven een nauwkeuriger inzicht in de meer geleidelijke erosie bij toerentallen direct voorafgaande aan het bezwijktoerental, zodat de in de literatuur gangbare erosieparameters konden worden afgeleid, zijnde de kritieke schuifspanning τ_c [Pa] en : erosiegevoeligheidscoëfficiënt k_d [mm/(Pa.s)].

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. De erosie treedt broksgewijs op en is meestal niet uniform, wat betekent dat de te verkrijgen erosieparameters benaderingen zijn. De grootte van de brokjes die loskomen kan sterk variëren.

De uit de metingen verkregen schuifspanning is geanalyseerd als functie van de stroomsnelheid van het water aan het monsteroppervlak. Deze laatste volgt uit het toerental en de monsterdiameter. Het toenemen van de schuifspanning is in principe gerelateerd aan het losraken van kluitjes uit de wand van het monster, want hoe hoger de schuifspanning, hoe meer aan het materiaal van het monster wordt getrokken. Uiteindelijk bepaalt de taaierheid van het monster of dit ook gevolgen heeft voor het losraken van kluitjes. Uit het verloop van de schuifspanning kan niet direct afgeleid worden of een bepaalde schuifspanning is gecorreleerd aan het losraken van een enkel groot brok of meerdere kleine brokjes.

Klutenplasklei blijkt een lagere schuifspanning te ontwikkelen bij een gegeven stroomsnelheid dan Valgenwegklei, een aanwijzing voor de geringere erosiegevoeligheid van het materiaal. Opvallend is echter dat dit niet tot uiting komt in de erosieparameters, maar wel in het bezwijktoerental. Beide erosieparameters τ_c en k_d laten geen groot verschil zien tussen beide kleisoorten. Qua bezwijktoerental (d.w.z. bij meer dan 30% massaverlies) is er wel duidelijk verschil. De Klutenplasklei valt in erosieklasse 'weinig erosiegevoelig' en de Valgenklei in klasse 'matig tot weinig erosiegevoelig'. Dit geeft ook een beeld van het mogelijke effect van het verhoogde zoutgehalte en verhoogde organisch stofgehalte op de erosiegevoeligheid, waarbij een vergelijking is gemaakt met historische gegevens. Voor de Klutenplasklei lijkt het verhoogde zoutgehalte niet te leiden tot een lagere erosieklasse dan klasse 1 klei, terwijl dat voor de Valgenwegklei mogelijk wel het geval is.

De verschillen in bezwijktoerental zouden kunnen samenhangen met de verschillen in consistentie-index van de geteste monsters. Immers, de consistentie-index van de Valgenweg kleimonsters is lager (gemiddeld 0.64) dan die van de Klutenplas kleimonsters (gemiddeld 0.71). Een hogere consistentie-index voor de kleikluiten betekent een taaier gedrag en daarmee in principe een grotere weerstand tegen erosie.

In de Deltagootproeven was de erodeerbaarheid van de Valgenwegklei groter dan die van de Klutenplasklei. Mogelijk is er een verband met de in de roto-erosiemeterproeven geconstateerde verschillen in erosiegevoeligheid, waarbij de Valgenwegklei duidelijk sneller erodeert dan de Klutenplasklei.

In het Deltagootonderzoek [Deltares 2021] was een positieve relatie van de weerstand tegen erosie met de gemiddelde consistentie-index niet te zien, omdat de beide kleisoorten een vergelijkbare gemiddelde consistentie-index hadden (0,72 voor Valgenweg versus 0,68 voor Klutenplasklei), en dat terwijl de Valgenwegklei wel sneller erodeerde.

Het zandgehalte kan ook effect hebben op de erosiebestendigheid. Het zandgehalte in de voor de roto-erosieproeven gebruikte kleibrokken verschilde nauwelijks (Klutenplasklei: 10,7% en Valgenwegklei: 12,0%). Verder blijkt uit de t_0 -metingen [Boskalis en van Oord 2020], Bijlage B en de korrelverdelingen die op de in onderhavig onderzoek gebruikte kluiten Deltagootklei zijn bepaald, dat het zandgehalte in de Valgenwegklei sterk kan variëren. De hoge waarden uit Bijlage B zijn dus niet representatief voor de Valgenwegklei in de Deltagoot.

Het verschil in erosiebestendigheid tussen Klutenplas- en Valgenwegklei zal nog in relatie tot de eigenschappen van de kleimineralen, zoals mineralogische samenstelling, het totaal specifiek oppervlak en de chemische analyse van de uitwisselbare kationen worden

beschouwd. Tevens is er mogelijk een correlatie met de krimpgrens te vinden. Dit zal apart worden gerapporteerd in stap 8 van het OGD-onderzoek.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.1.1	Aanleiding project	9
1.1.2	Doel van het project	9
1.1.3	Fasering onderzoek	9
1.1.4	Doel stap 6 en 7	10
2	Omschrijving werkzaamheden	12
2.1	Inleiding	12
2.2	Uitvoering	12
3	Resultaten	14
4	Analyse	19
4.1	Discussie krimpgrens resultaten	19
4.2	Roto-erosieproeven	19
4.2.1	Erosieparameters bij geleidelijke erosie	19
4.2.1.1	Inleiding	19
4.2.1.2	Parameters	21
4.2.2	Beschouwing erosieproces	25
5	Conclusie	28
	Literatuur	30
	Bijlagen	31
A	Foto's monsters voor en na beproeving	32
B	Eigenschappen Deltagootklei	37

1 Inleiding

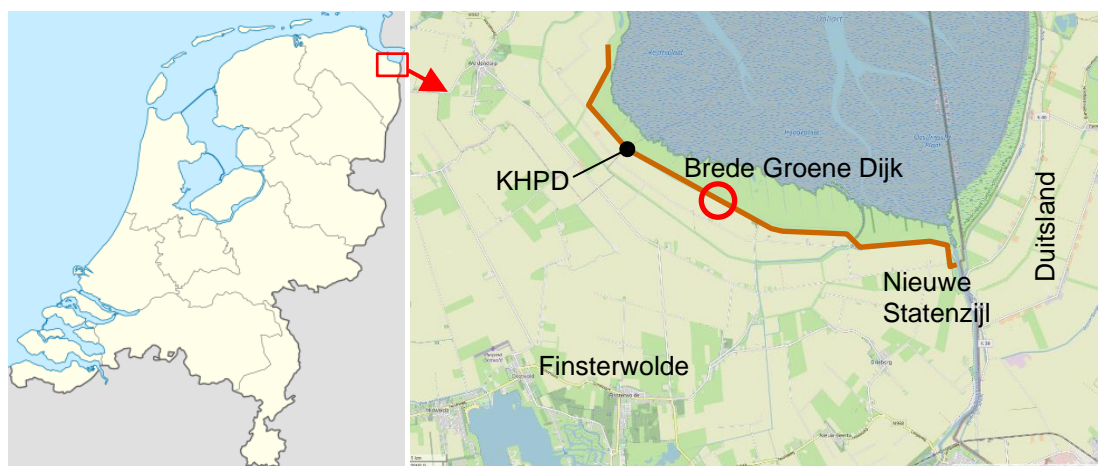
1.1 Achtergrond

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 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.

Het demonstratieproject Brede Groene Dijk (BGD) is gepland om uit te voeren binnen het dijktraject Kerkhovenspolder-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 Kerkhovenspolder - 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 langs de Dollard dit ca. 1,7 miljoen m³ klei is. Om aan de huidige en toekomstige veiligheidseisen te kunnen voldoen, wordt het talud van de nieuwe dijk namelijk een stuk flauwer. Alleen dan is de dijk in staat om de golfklappen die op de dijk slaan op te vangen. Natuurlijk kan die grote hoeveelheid klei vanuit het achterland worden aangevoerd: we hebben het dan over vele tienduizenden vrachtwagenbewegingen. 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 kijken we naar de mogelijkheden van klei uit kwelders die vóór de dijk liggen, klei gemaakt van slib uit de binnendijkse brakwater natuurland Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

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 talud helling 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 9 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.
9. Deltagootproeven.
10. Eindrapportage

Uiteindelijk zullen de onderzoeksresultaten in een eindrapportage worden samengevat. De roto-erosieproeven op Klutenplasklei en Valgenwegklei, die in deze rapportage worden gerapporteerd, vallen onder stap 6/7.

1.1.4 Doel stap 6 en 7

Een belangrijke functionele eigenschap is de erosiegevoeligheid van klei onder golfaanval. De erodeerbaarheid van diverse type klei is onderzocht met behulp van grootschalige golfproeven in de Deltagoot. Het is gewenst om ook met behulp van kleinschalige proeven de erodeerbaarheid van klei te onderzoeken. Dit kan met behulp van de bij Grondmechanica Delft ontwikkelde roto-erosiemeterproef [Grondmechanica Delft 1988]. In het verleden is op basis van zogenaamde bezwijktoerentallen de erosiebestendigheid van reguliere dijkklei onder stromingsbelasting in kaart gebracht. Er moet nog worden aangetoond of deze kleinschalige proeven zinvol zijn bij het voorspellen van het erosiegedrag onder golfaanval, wat wezenlijk anders is dan puur een stromingsbelasting (zoals in de roto-erosiemeterproef) en ook de schaalgrootte verdient aandacht. In het Deltagootonderzoek treden er stroomsnelheden (stroomsnelheid bedraagt zeker 5 à 10 m/s) op die aanzienlijk hoger zijn dan die in de roto-erosiemeterproef, zie de toelichting bij Tabel 1.1. Bij hogere toerentallen wordt het apparaat instabiel, d.w.z. deze gaat te veel trillen. Toekomstig onderzoek moet aangeven voor welke belastingsituaties en type klei de inzet van roto-erosiemeterproeven zinvol is. Tevens kunnen met een aangepast ontwerp van de roto-erosiemeter (met onder meer een grotere diameter) in principe hogere stroomsnelheden worden bereikt.

Het belangrijkste doel van de hier uitgevoerde roto-erosiemeterproeven is om voor brokken Klutenplas- en Valgenwegklei uit het kleibed van de Deltagoot de erosiebestendigheid te bepalen in termen van bezwijktoerental, waarbij gebruik wordt gemaakt van de erosieklassen uit onderstaande Tabel 1.1. De gevonden klasse-indeling kan dan vergeleken worden met de indeling uit eerder genoemd historisch onderzoek op dijkklei, waarbij gebruik kan worden gemaakt van het plasticiteitsdiagram (met o.a. de zogenaamde A-lijn). Deze vergelijking kan inzicht geven in hoe de erosiebestendigheid van de afwijkende Valgenweg- en Klutenplasklei zich verhoudt tot historische data en welke eigenschappen dan het meest van invloed zijn.

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	wenig erosiegevoelig

Toelichting bij Tabel 1.1:

De schoepen aan de roterende cilinder geven een waterstroming die op 1 mm vanaf het monsteroppervlak 0.14 m/s is bij toerental 100 tpm (toeren per minuut) en 1.6 m/s bij toerental 1200 tpm.

Er zijn naast de historische standaard roto-erosiemeterproeven nu ook gedetailleerde proeven uitgevoerd met het oog op het bepalen van de in de internationale literatuur gangbare (Hanson-)erosieparameters. Deze erosieparameters beschrijven een geleidelijk erosieproces dat vooraf gaat aan het bezwijken van het monster. In de analyse van deze

gedetailleerde roto-erosiemeterproeven op de brokken Valgenwegklei en Klutenplasklei zijn diverse aannames gedaan, en in dit rapport wordt besproken hoe valide dat is. Zorgpunt daarbij is dat de erosie van deze klei in brokken plaatsvindt, zoals ook te zien was in het Deltagootonderzoek, en dat gebeurt vaak ongelijkmatig over het kleioppervlak en ook in de tijd gaat dit in sprongen.

2 Omschrijving werkzaamheden

2.1 Inleiding

Onderdeel van de werkzaamheden binnen het OGD is het uitvoeren van Deltagootproeven op lokaal gewonnen klei afkomstig van de kwelder (Klutenplasklei) en klei gemaakt van zout (bagger)slib (Valgenwegklei). Om te onderzoeken of kleine erosieproeven een voorspellende waarde hebben voor het erosiegedrag op grote schaal, is een aantal proeven met het roto-erosieapparaat uitgevoerd op materiaal uit de Deltagootproeven. Na uitvoering van de Deltagootproeven is het materiaal afgegraven en opgeslagen. Van dit materiaal zijn na enige tijd brokken geselecteerd voor de roto-erosieproeven. Geschikte brokken zijn geselecteerd aan het hand van:

- Het materiaal is niet uitgedroogd.
- Het materiaal is niet gescheurd of vertoont andere zwaktezones.
- De brokken hebben voldoende grote afmetingen om hieruit proefmonsters te prepareren.

De monsters verkregen uit deze brokken zijn ongeroerd in het roto-erosieapparaat ingebouwd. Tevens zijn op deze brokken een aantal classificatiebepalingen uitgevoerd, zie paragraaf 2.2.

2.2 Uitvoering

Voordat de proeven zijn uitgevoerd is het watergehalte van de kleibrokken (zie Tabel 3.2) vergeleken met het watergehalte van de klei zoals dat in de Deltagoot is toegepast, om te controleren of de erosiegevoeligheid vergelijkbaar is met de geteste materialen. Uit deze vergelijking volgt dat de brokken Valgenwegklei een paar procent natter zijn, en de Klutenplasbrokken een paar procent droger. Van de klei uit de brokken is een korrelverdeling bepaald. Daarnaast is de krimpgrens van beide kleisoorten conform ASTM D4943 in duplo bepaald. De krimpgrens geeft het watergehalte waaronder dit niet meer af kan nemen zonder dat dit met een scheurvorming gepaard gaat.

De erosieproeven zijn uitgevoerd in de zogenaamde roto-erosiemeter, zie Figuur 2.1 voor het werkingsprincipe. Dit apparaat bestaat uit een met water gevulde trommel met schoepen die rond een cilindrisch monster draait. Het monster heeft een diameter van 0,067 m en een hoogte van 0,05 m. Door het ronddraaien van de trommel stoomt het water rond het monster, waarmee een erosieve kracht op het monster wordt uitgeoefend. De door het stromende water uitgeoefende kracht wordt gebalanceerd, waarbij het monster moet blijven stilstaan. Deze kracht, omgerekend in schuifspanning, wordt gedurende de proef constant gemeten. De massa van het monster wordt op meerdere tijdstippen gemeten, waarbij de trommel tijdelijk stilstaat. Dit gebeurt automatisch door het optillen en wegen van het monster, waarbij het monster geheel onder water blijft. Door middel van een krachtsensor wordt de massa gemeten. De massa-afname die gebruikt wordt in de analyse is het verschil in massa ten opzichte van de massa aan het begin van de proef.

Er zijn twee typen roto-erosiemeterproeven uitgevoerd, namelijk standaard procedureproeven [Grondmechanica Delft 1988] en gedetailleerde proeven.

De standaard procedure luidt als volgt:

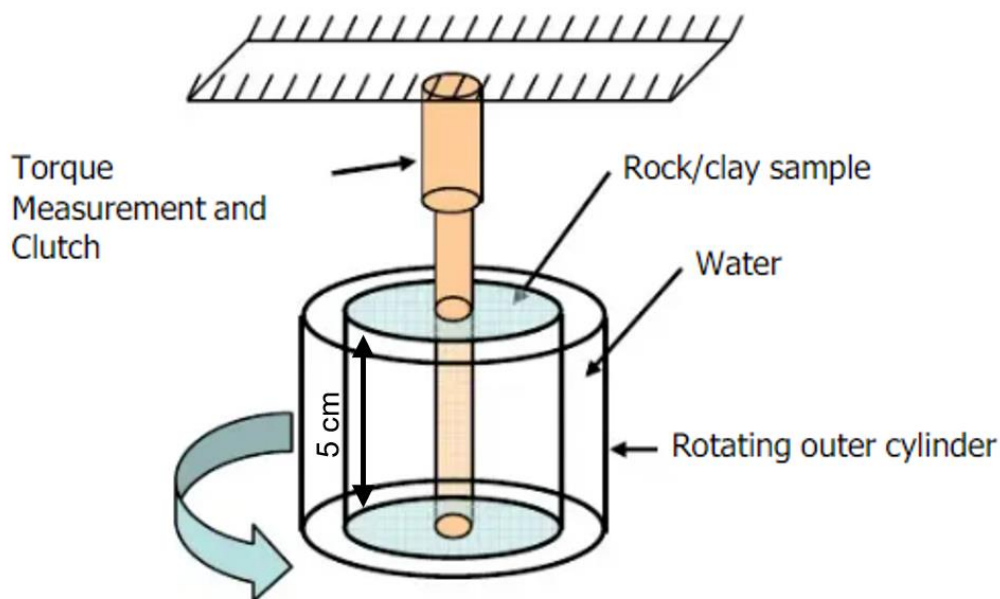
- Verhoging van het toerental elke 10 minuten met 100 tpm tot 600 tpm en voor elke verhoging van het toerental een meting van massa en schuifweerstand. Deze fase duurt 60 minuten. 1 "tpm" betekent: 1 toer of omwenteling van de trommel per minuut, d.w.z. 1 x een volledige 360° rotatie per minuut.

- Gedurende de volgende 60 minuten wordt een toerental van 600 tpm opgelegd, met elke 10 minuten een meting van de massa en schuifweerstand (weerstandskracht [N] tegen de uitgeoefende stromingskracht) .
- Gedurende de derde periode van 60 minuten wordt het toerental elke 10 minuten verhoogd met 100 tpm tot 1200 tpm met voor elke verhoging van het toerental een meting van massa en schuifweerstand.
- Gedurende de vierde en laatste 60 minuten wordt een toerental van 1200 tpm opgelegd met elke 10 minuten een meting van de massa en schuifweerstand. De proef wordt eerder gestopt bij een afname van meer dan 30% van de totale massa. Het toerental waarbij 30% massaverlies optreedt wordt het bezwijktoerental genoemd, zie [Grondmechanica Delft 1988].

Als een vervolgstap is een proef volgens een gedetailleerde procedure uitgevoerd op een nieuw monster. Deze procedure luidt als volgt:

- Start met een toerental dat minstens 100 tpm lager is dan het toerental bij beginnende erosie zoals gemeten in de Standaard procedureproef.
- Dit toerental wordt gedurende 60 minuten opgelegd, waarbij om de 10 minuten een meting van de massa en schuifweerstand wordt uitgevoerd.
- Vervolgens wordt het toerental in stappen van 50 tpm verhoogd. Iedere stap duurt 60 minuten en om de 10 minuten wordt een meting van de massa en schuifweerstand uitgevoerd. Er zijn dus 6 metingen per stap van 50 tpm.
- De proef wordt gestopt bij een toerental van 1250 tpm of eerder bij het toerental van bezwijken, d.w.z. als de totale massa afname de 30% heeft bereikt.

De daadwerkelijk gerealiseerde toerentallen kunnen wat afwijken. Dit is te zien in de figuren met de meetresultaten.

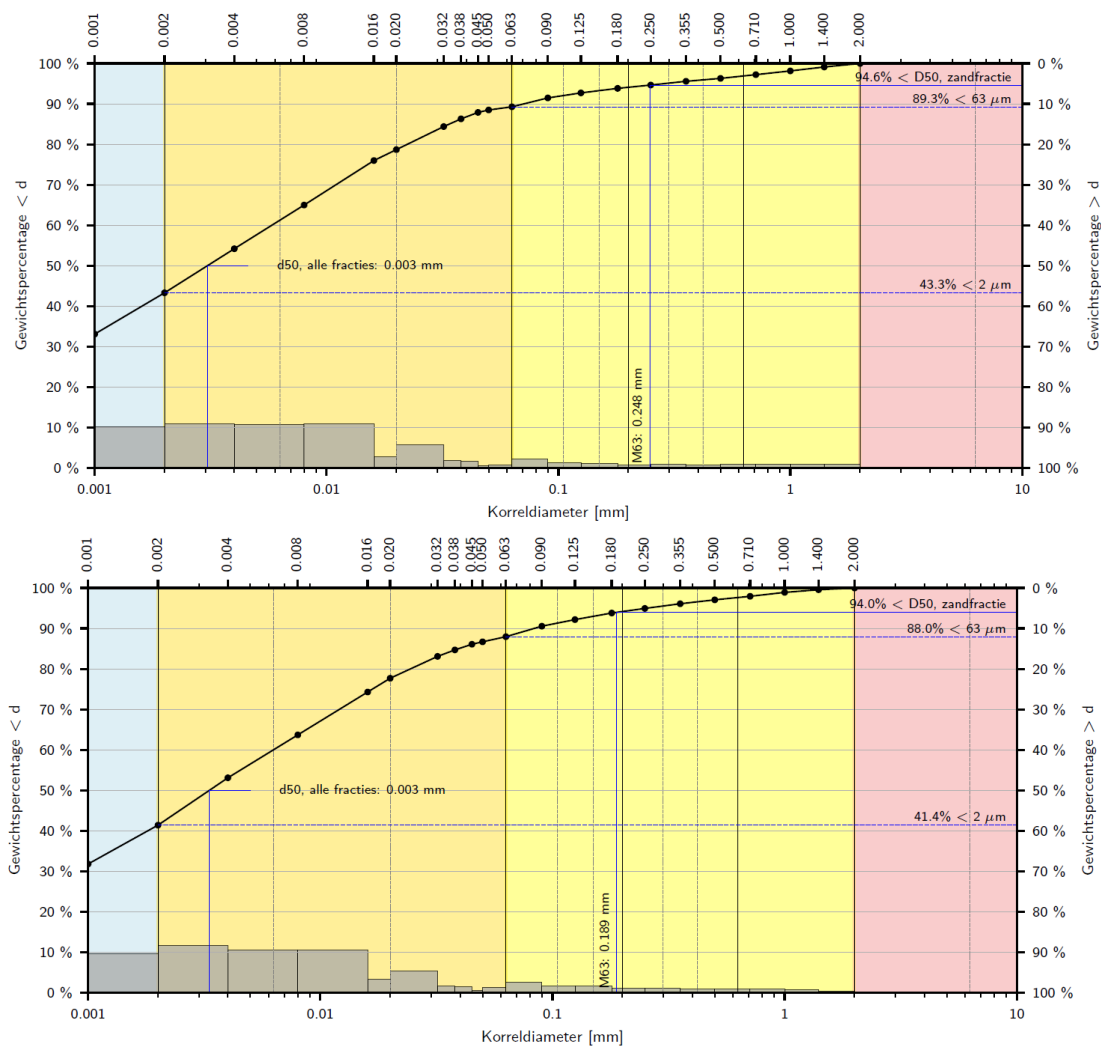


Figuur 2.1 Werkingsprincipe van de roto-erosiemeter [Briaud et al. 2019].

De preparatie van de monsters behoeft enige optimalisatie. Uiteindelijk is voor alle proeven behalve bij Klut1A een aangepaste preparatiemethode toegepast, die er uit bestaat dat, na het trimmen van het monster op de juiste dimensies, het monster zijdelings is ondersteund met een mal. Dit ondersteunde monster is vervolgens onder een boorkolom geplaatst ten behoeve van het gecontroleerd kunnen boren van het centrale gat in het monster. Dit ondersteunen voorkomt deformatie van het monster tijdens het boren.

3 Resultaten

Op de brokken klei die voor de roto-erosiemeterproeven zijn gebruikt zijn korrelverdelingen bepaald. Deze zijn gegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Korrelverdelingen van Klutenplasklei brok (boven) en Valgenwegklei brok (onder)

De bepalingen van de krimpgrens zijn in duplo uitgevoerd. De resultaten staan in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Resultaten bepaling krimpgrens.

Kleisoort	Krimpgrens [%]	Krimpgrens (duplo) [%]
Klutenplasklei	23	24
Valgenwegklei	15	16

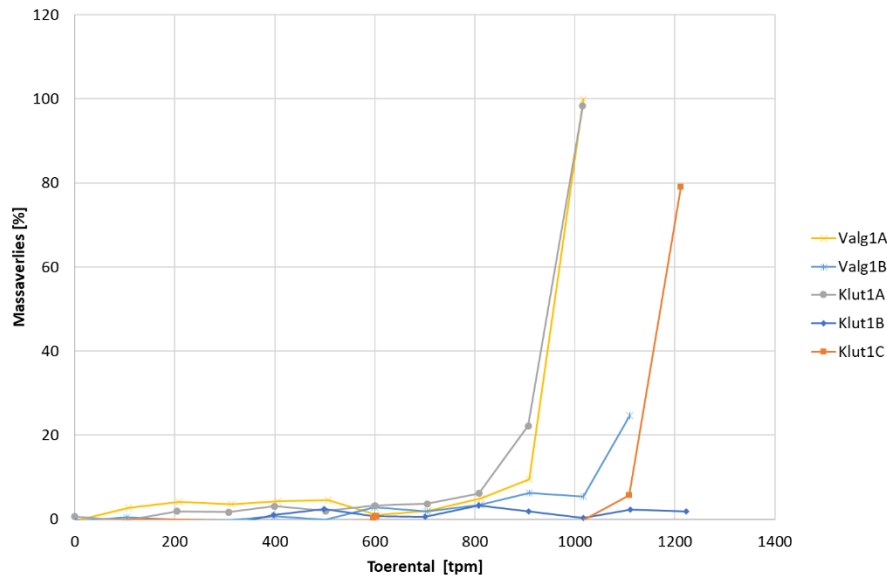
De volumieke massa en het watergehalte van de in de roto-erosiemeter geteste monsters staan in Tabel 3.2. Voor het berekenen van de consistentie-index uit Tabel 3.2 is gebruik gemaakt van het gemiddelde van de plasticiteitsgrenzen van de kleimonsters die genomen zijn gedurende het Deltagootonderzoek. De eigenschappen van de kleimonsters die genomen zijn tijdens het Deltagootonderzoek [Deltares 2021] zijn gegeven in Bijlage B.

Tabel 3.2 Gegevens geteste monsters. Naam met volgnummer 1 is een standaard proef, en met volgnummer 2 is een gedetailleerde proef.

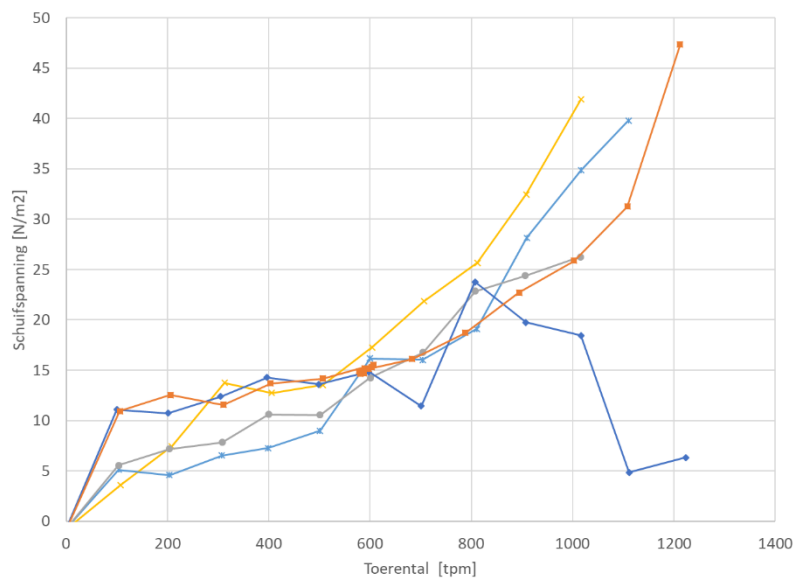
Monster	Volumieke massa [kg/m ³]		Watergehalte [%]	Consistentie index [%]
	nat	droog		
Klut1A	1560	1040	49,66	0,71
Klut1B	1600	1070	49,66	0,71
Klut1C	1600	1060	50,89	0,69
Klut2A	1580	1080	47,42	0,75
Klut2B	1630	1090	49,76	0,71
Valg1A	1630	1050	54,43	0,62
Valg1B	1630	1070	51,47	0,66
Valg2A	1610	1050	53,36	0,63
Valg2B	1640	1070	53,36	0,63

In Figuur 3.2 en Figuur 3.3 zijn de resultaten van de eerste, serie standaard proeven weergegeven. In deze serie zijn 5 monsters getest, twee Valgenwegkleimonsters en 3 Klutenplaskleimonsters. Het feit dat er drie Klutenplasklei monsters zijn getest is het gevolg van het grote verschil in de gedrag tussen de twee monsters (1A en 1B), dat verondersteld wordt samen te hangen met een scheur in het monster die ontstaan is tijdens de preparatie bij monster 1A. Een derde monster (1C) dat met een verbeterde methodiek is geprepareerd, leverde daarop een vergelijkbaar resultaat als monster 1B op.

Deze preparatiemethodiek is in het vervolg van het onderzoek (voor alle proeven behalve dus bij Klut1A) als standaardmethode toegepast. De techniek behelst het, na het trimmen van het monster tot de juiste dimensies, het zijdelings met een mal ondersteunen van het monster na het trimmen tot de gewenste diameter. Dit ondersteunde monster wordt vervolgens onder een boorkolom geplaatst ten behoeve van het gecontroleerd kunnen boren van het centrale gat in het monster.



Figuur 3.2 Verloop van het massaverlies tijdens de eerste serie, standaard proeven

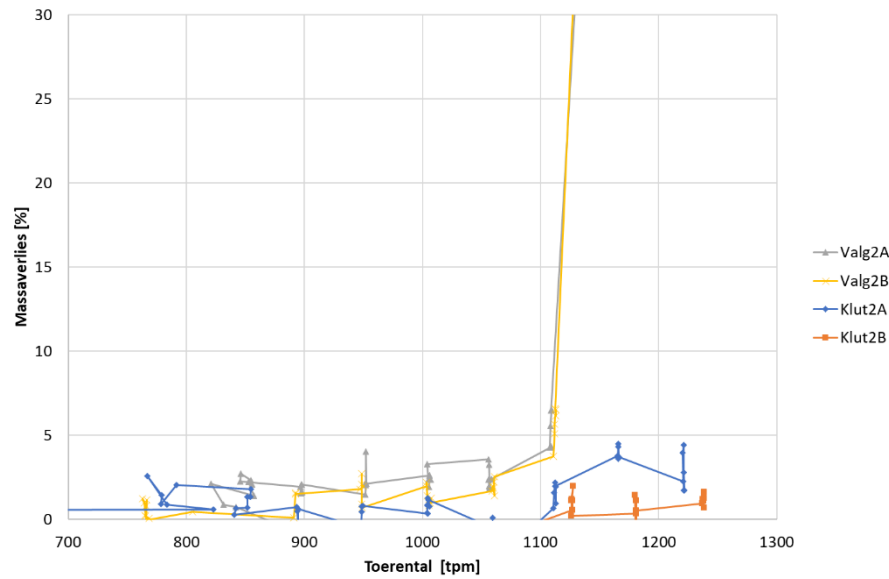


Figuur 3.3 Verloop van de schuifspanning tijdens de eerste serie, standaard proeven

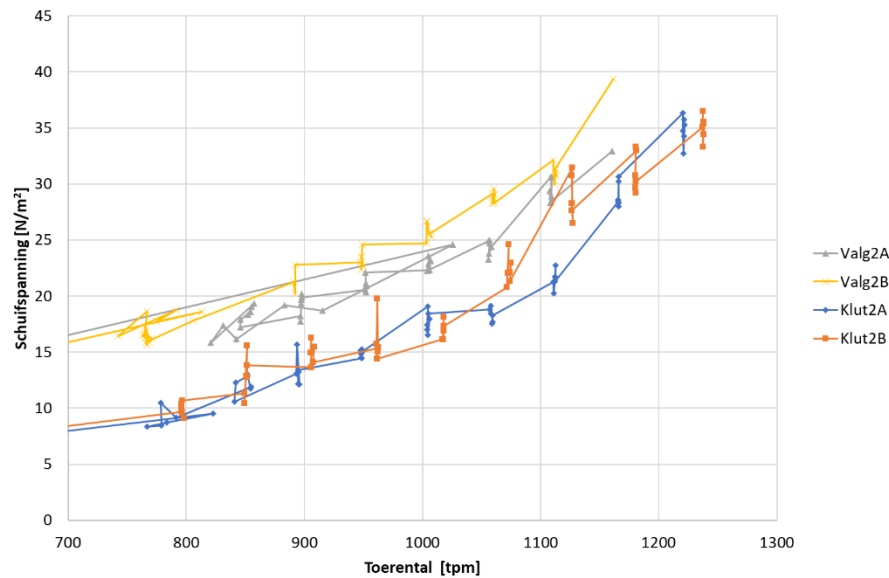
De Klutenplasklei vertoont op basis van deze eerste serie standaard proeven een hogere weerstand tegen erosie dan de Valgenwegklei. De Valgenwegklei begint bij een toerental tussen 800 tpm (Valg1A) en 1000 tpm (Valg1B) te eroderen, waarbij bezwijken (30% of meer massaverlies) voor beide monsters één stap van 100 tpm later optreedt. De Klutenplasklei begint te eroderen bij een toerental van 1100 tpm (Klut1C) tot hoger dan 1200 tpm (Klut1B). Klut1C bezwijkt bij één stap van 100 tpm later.

Het verloop van de schuifspanning laat een vergelijkbaar beeld zien voor alle monsters, afgezien van monster Klut1B. Dit kan te maken hebben met het feit dat monster Klut1B nog nauwelijks erodeerde. Doordat bij Klut1B nog nauwelijks erosie tijdens deze proef optrad, is het mogelijk dat de eerste fase een vrij hoge schuifspanning liet zien en pas later een patroon dat meer overeenkomt met de verwachting gezien de resultaten van de overige monsters: in de eerste fase is er mogelijk een initieel ruw deel van het monster aanwezig geweest dat vervolgens is afgesleten. Bij een toerental van 1150 en 1200 tpm laat dit monster vervolgens

een veel lagere schuifspanning zien dan de overige monsters die in deze fase beter overeenkomt met de lagere geërodeerde massa (Figuur 3.3).
 De resultaten van de tweede serie, gedetailleerde proeven, zijn weergegeven in Figuur 3.4 Figuur 3.4 Verloop van het massaverlies tijdens de tweede serie, gedetailleerde proeven en Figuur 3.5.



Figuur 3.4 Verloop van het massaverlies tijdens de tweede serie, gedetailleerde proeven



Figuur 3.5 Verloop van de schuifspanning tijdens de tweede serie, gedetailleerde proeven

Uit de resultaten van de serie met gedetailleerde proeven blijkt een duidelijk verschil tussen beide kleitypen, waarbij de duploproeven vergelijkbare resultaten laten zien. In Figuur 3.4 is te zien dat de erosie voor de Klutenplaskleimonsters ongeveer start bij een toerental van 1100 tpm, en dit leidt tot maximaal 5% massaverlies. Bij de Klutenplasmonsters treedt geen bezwijken op binnen het aangehouden toerentalbereik. Bij de Valgenwegklei start de erosie vanaf ongeveer 900 tpm, totdat de monsters iets boven de 1100 tpm bezwijken en wel binnen een half uur op dat toerental. Volgens de erosieklasse-indeling uit Tabel 1.1 is de Valgenwegklei matig tot weinig erosiegevoelig en is de Klutenplasklei weinig erosiegevoelig.

Het verschil in erosiegevoeligheid komt ook in het verloop van de schuifspanning tot uiting. Beide Valgenwegkleimonsters laten een hogere schuifspanning zien dan de beide Klutenplaskleimonsters. Dit betekent dat het water bij de Valgenwegklei een grotere wrijvingskracht op de monsters uitoefent, wat samenhangt met een onregelmatig oppervlak waarbij er brokjes klei loslaten.

In bijlage A zijn de foto's van de beproefde monsters voor en na de proef weergegeven. 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 grotendeels broksgewijs plaatsvindt. Dit zou impliceren dat er een begin van structuurvorming te zien kan zijn. Hoewel hier 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 bij roto-erosieproeven te krijgen. Hiervoor zou tussentijds regelmatig een visuele controle van de monsters tijdens de proef plaats moeten vinden.

4 Analyse

4.1 Discussie krimpgrens resultaten

De resultaten van de krimpgrensbepalingen (Tabel 3.1) laten een groot verschil zien tussen de beide kleisoorten. De krimpgrens bedraagt 24%, respectievelijk 16% voor de Klutenplasklei en Valgenwegklei. Dit is een groot verschil wat bij sterke uitdroging een andere bodemstructuur geeft. Klutenplasklei zal meer scheuren gaan vertonen bij uitdroging dan Valgenwegklei. Het verschil in krimpgrens zal ook gevolgen hebben voor de snelheid van rijping van het materiaal. Daar bij Klutenplasklei bij uitdroging eerder scheuren optreden, zal er eerder zuurstof doordringen tot diep in het profiel met een snellere veroudering tot gevolg. Er zijn nog meer kleisoorten beproefd, waaronder de OGD stap 4 bakkenklei. Er kan een vergelijking worden gemaakt met de structuurvorming die optrad in de proef op de zes type klei onder invloed van versnelde seizoenen (bakkenproef) uit stap 4 van het OGD-onderzoek. Voor de range aan watergehalte van de in de roto-erosiemeter beproefde klei is de consistentie-index van belang, niet de krimpgrens. De brokken zijn afkomstig uit het kleibed uit de Deltagoot, welke vers is aangebracht en dus nog geen bodemstructuur heeft ontwikkeld, iets dat mede verband houdt met de intrede van zuurstof en dus uitdroging. De krimpgrens is wel relevant als het watergehalte door bijvoorbeeld door sterke uitdroging tot onder de krimpgrens gaat dalen. De daardoor ontwikkelde krimp-scheuren zullen aangrijpingspunten voor erosie betekenen. Overigens zal ook boven de krimpgrens al structuurvorming op kunnen gaan treden.

4.2 Roto-erosieproeven

4.2.1 Erosieparameters bij geleidelijke erosie

4.2.1.1 Inleiding

Om een vergelijking te maken met bevindingen uit de literatuur is een nadere analyse uitgevoerd in termen van de gangbare erosieparameters erosiegevoeligheidscoëfficiënt (Hanson erosion coefficient) k_d [mm/(Pa·s)] en de kritieke schuifspanning (critical 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 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].

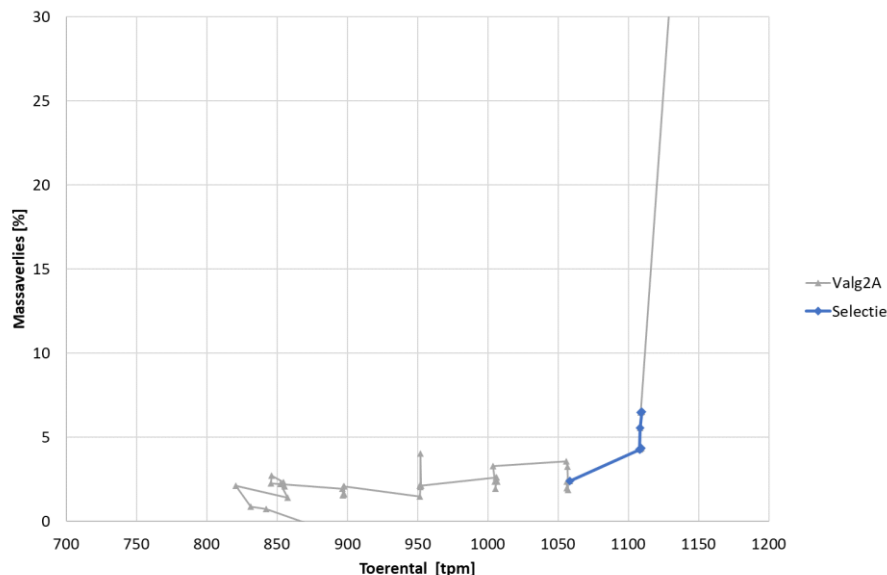
k_d : erosiegevoelheidscoëfficiënt (Hanson erosion coefficient) [mm/(Pa·s)]

De verkregen parameterwaarden zijn specifiek voor de gedetailleerde roto-erosiemeterproef met de wijze van analyse 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 bezwijktoerentalen uit zowel de standaard als de gedetailleerde proeven, zie paragraaf 4.2.2.

De stroomsnelheid v van het water op 1 mm uit het monsteroppervlak kan worden berekend op basis van het toerental en de monsterdiameter. De omrekening voor een nog intact monster is: v [m/s] = 0,0013 [m/s/tpm]*toerental [tpm].

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 is in Figuur 4.1 het resultaat van de proef Valg2A afgebeeld met het meetbereik van de punten die gebruikt zijn voor de bepaling van de parameters, het betreft hier in totaal 7 meetpunten. 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 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, waarbij de snelle toename van het massaverlies richting bezwijken (dat later in de tijd optreedt) niet is meegenomen.

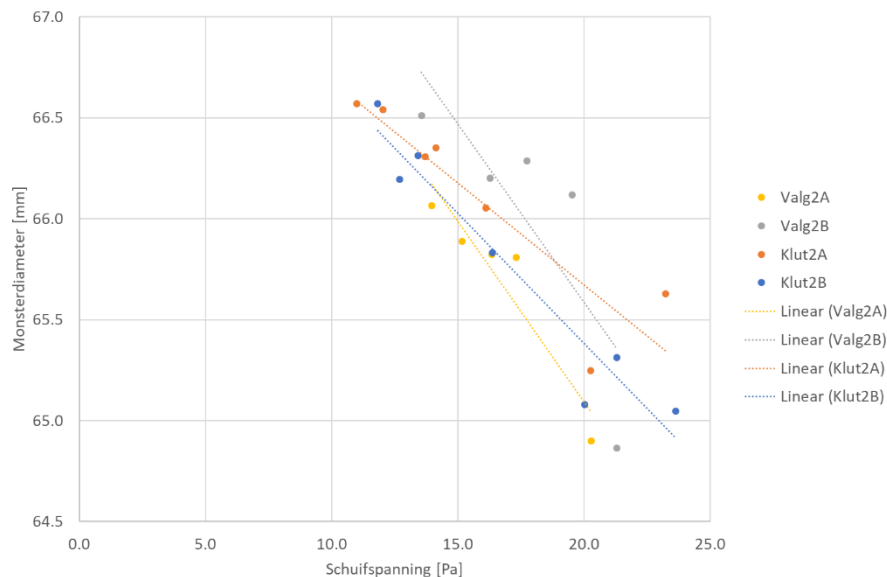


Figuur 4.1 Voorbeeld van het gebruikte meetbereik voor de analyse van proef Valg2A.

4.2.1.2 Parameters

Zoals eerder aangegeven, start de erosie voor de Klutenplaskleimonsters ongeveer bij een toerental van 1100 tpm, en daarna wordt massaverlies maximaal 5%. Bij de Klutenplasmonsters treedt dus geen bezwijken op (d.w.z. meer dan 30% massaverlies) binnen het meetbereik. Voor de Valgenwegklei start de erosie vanaf ongeveer 870 tpm, totdat de monsters iets boven de 1000 tpm bezwijken en wel binnen een half uur op dat toerental. Deze toerentallen bij start van erosie zijn bij de analyse aangehouden.

Zoals eerder beschreven, is in de gedetailleerde proef bij elk toerental een zestal metingen uitgevoerd (steeds met 10 minuten tijd ertussen) van de massa van het monster (ondergedompeld in water) en de schuifweerstand (weerstandskracht [N] tegen de uitgeoefende stromingskracht). In de analyse wordt bij elk toerental gemiddeld over de zes metingen van de massa en van de schuifweerstand, zodat meetfouten minder invloed hebben op de resultaten, zie verderop voor een nadere uitleg. Naast het middelen van de waarden bij elk toerental, is ook een lineaire regressie uitgevoerd op de berekende (inclusief het middelen over de 6 waarden) monsterdiameters als functie van de schuifspanning (inclusief het middelen over de 6 waarden), zie Figuur 4.2. Dit is gedaan om te beoordelen of er een logisch verband ontstaat tussen de verschillen in monsterdiameter bij de opeenvolgende toerentallen. Hiertoe zijn er regressielijnen berekend voor de 4 proeven. In Figuur 4.2 valt het verschil tussen beide kleisoorten en de overeenkomst tussen beide (duplo) monsters van een kleisoort op. De regressielijnen van de twee Klutenplas kleimonsters hebben een vergelijkbare richtingscoëfficiënt (r.c.), en hetzelfde geldt voor de twee Valgenweg kleimonsters. Dit is een aanwijzing dat het middelen van de 6 metingen bij elk toerental en het maken van deze lineaire regressie, ondanks de meetfouten, een acceptabele methode is om de meetresultaten te kunnen verwerken.



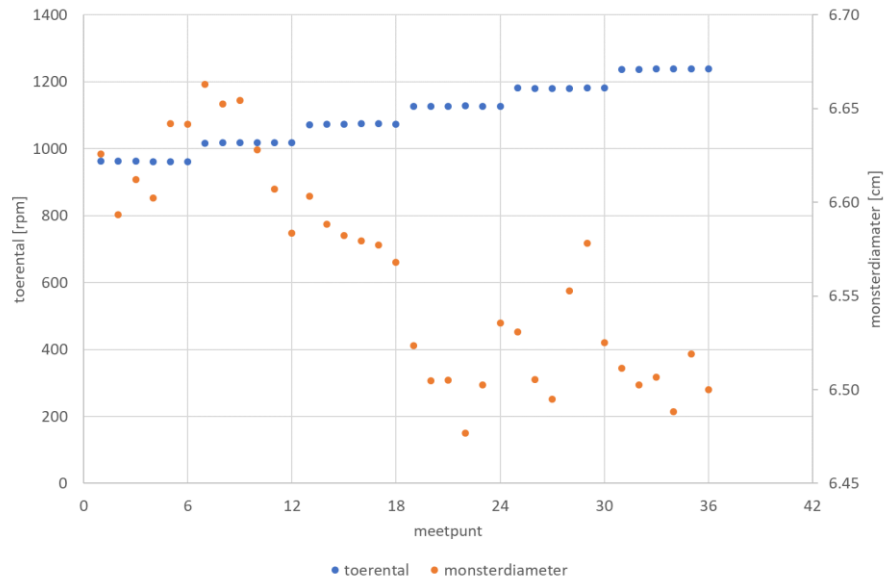
Figuur 4.2 Verband tussen monsterdiameter en schuifspanning voor de gedetailleerde proeven

De waarden voor de regressieparameters van de lijnen uit Figuur 4.2 zijn gegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Regressieparameters

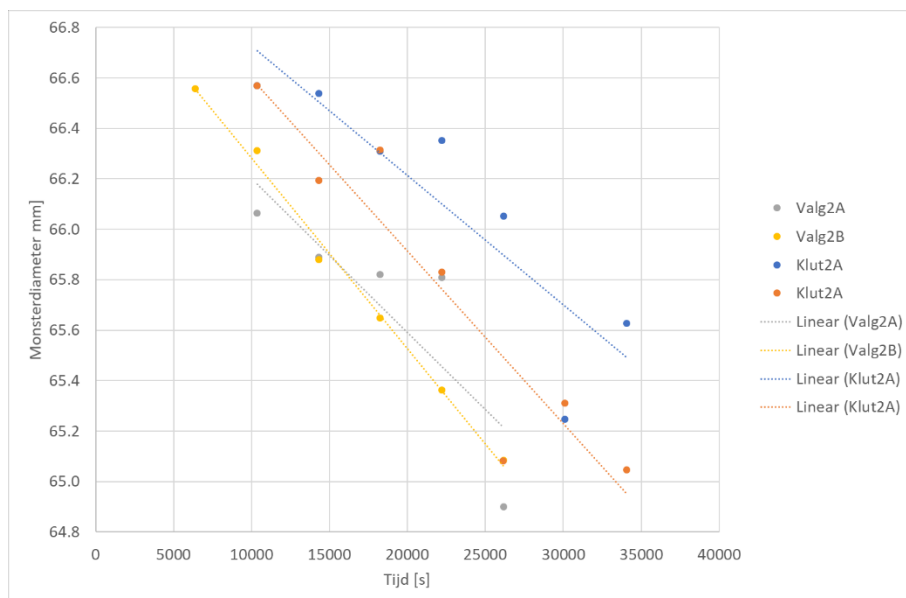
monster	constante	r.c.
Valg2A	68.52	-0.17
Valg2B	68.55	-0.14
Klut2A	67.69	-0.1
Klut2B	67.96	-0.13

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 4.3 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 4.3 Berekende monsterdiameters per meetpunt bij een reeks toerentallen (Klut2B)

Figuur 4.4 toont het verloop van de berekende gemiddelde monsterdiameter in de tijd, waarbij de tijdstappen overeenkomen met de stappen in toerental. De regressielijnen in deze figuur zijn niet in de analyse gebruikt, maar zijn getrokken om het algemene beeld per monster weer te geven. In Figuur 4.4 valt op dat de ligging en de richtingscoëfficiënt van de regressielijnen van de verschillende monsters elkaar niet veel ontlopen. Het begin van de erosie, het 0-punt, blijkt regelmatig significant af te wijken van de regressielijn, zodat besloten is om dit punt achterwege te laten. 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 4.4 Verband tussen proefduur en de monsterdiameter voor de gedetailleerde proeven

De kritieke hydraulische schuifspanning τ_c is gelijk gesteld aan de waarde bij de eerder genoemde toerentallen bij start van erosie, te weten globaal 1000 tpm voor Klutenplasklei en

870 tpm voor Valgenwegklei. Tussen de duplomonsters zijn kleine verschillen in het toerental waarop de erosie start geconstateerd.

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.

Tabel 4.2 geeft de berekende erosieparameters.

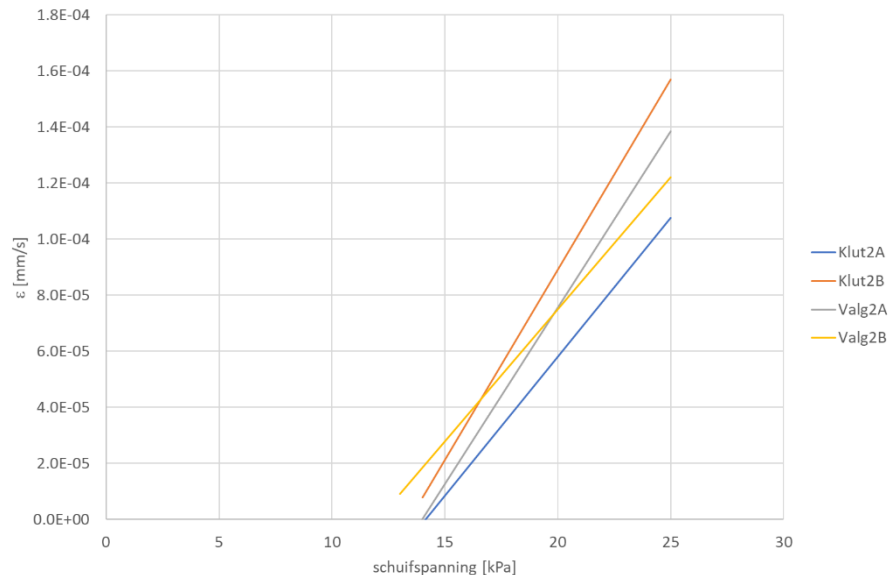
Tabel 4.2 Berekende erosieparameters voor de gedetailleerde proeven

Monster	τ_c	k_d	Standaard deviatie k_d	Bereik toerental zoals gebruikt in analyse
	Pa	mm/(Pa*s)	mm/(Pa*s)	tpm
Klut2A	14.1	9.9E-06	3.6E-06	1000-1220
Klut2B	13.4	1.4E-05	9.7E-06	1020-1230
Valg2A	14.0	1.3E-05	6.7E-06	900-1100
Valg2B	12.0	9.4E-06	9.4E-06	840-1100

In Figuur 4.5 is, op basis van de erosieparameters, de erosiesnelheid grafisch uitgezet tegen de schuifspanning. De kritieke schuifspanning is gelijk aan de schuifspanning waar de lijnen $y=0$ waarde bereiken. In Figuur 4.5 is te zien dat de verschillen tussen de erosieparameters van beide kleisoorten niet groot is en dat beide kleisoorten op het gebied van geleidelijke erosie overeenkomen. Dit wordt ook aangetoond door de in Tabel 4.2 weergegeven standaarddeviatie. Gezien het feit dat de vaststelling van de kritieke schuifspanning bij deze proeven altijd in enige mate subjectief is en deze wellicht ook bij een toerental hoger of lager gekozen kan worden, is bij deze parameter ook een afwijking van enkele Pascals verbonden. Dit zal overigens al snel bij welk erosie-experiment dan ook het geval zijn.

En dat terwijl de toerentallen waarbij de monsters in deze gedetailleerde proeven bezwijken wel duidelijk van elkaar verschillen (te weten iets boven 1100 tpm bij Valgenwegklei, en niet bezwijken binnen het toerentalbereik tot 1250 tpm bij Klutenplasklei).

De verschillen in bezwijktoerental zouden kunnen samenhangen met de verschillen in consistentie-index zoals weergegeven in Tabel 3.2. Immers, de consistentie-index van de Valgenweg kleimonsters is lager (gemiddeld 0.64) dan die van de Klutenplas kleimonsters (gemiddeld 0.71). Een hogere consistentie-index voor de kleikluten betekent een taaier gedrag en daarmee in principe een grotere weerstand tegen erosie.

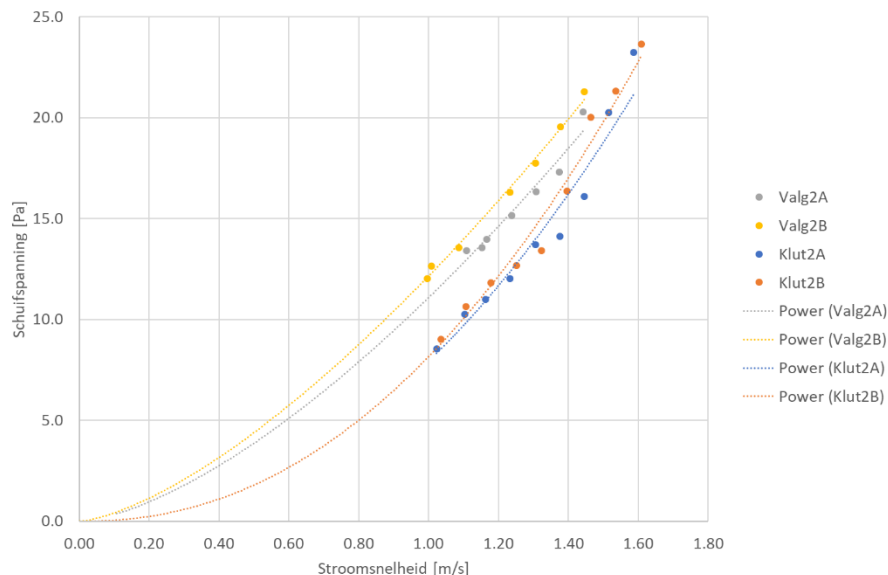


Figuur 4.5 Berekende erosiesnelheid op basis van de erosieparameters

In de Deltagootproeven liet het gemiddelde van de consistentie-index dit verband niet zien, want hoewel de gemiddelde consistentie-index van de in de Deltagoot geteste Valgenweg- en Klutenplasklei vergelijkbaar was (0,72 voor Valgenwegklei versus 0,68 voor Klutenplasklei) erodeerde de Valgenwegklei iets sneller.

4.2.2 Beschouwing erosieproces

Figuur 4.6 toont de schuifspanning als functie van de stroomsnelheid van het water op 1 mm afstand van het oppervlak van het monster. Door de punten is een machtsfunctie gefit; deze lijkt het verband tussen schuifspanning en stroomsnelheid goed te kunnen beschrijven. Theoretisch zou de schuifspanning kwadratisch van de stroomsnelheid kunnen afhangen [Winterwerp&van Kesteren 2004].



Figuur 4.6 Verband tussen schuifspanning en stroomsnelheid voor de gedetailleerde proeven

Opvallend is het verschil tussen beide kleisoorten en de overeenkomst tussen beide (duplo) monsters van een kleisoort. Klutenplasklei blijkt een lagere schuifspanning te ontwikkelen bij een gegeven stroomsnelheid dan Valgenwegklei, een aanwijzing voor de geringere erosiegevoeligheid van het materiaal. Opvallend is echter dat dit niet tot uiting komt in de

erosieparameters, maar wel in het bezwijktoerental. Het toenemen van de schuifspanning is in principe gerelateerd aan het losraken van kluitjes uit de wand van het monster, want hoe hoger de schuifspanning, hoe meer aan het materiaal van het monster wordt getrokken. Uiteindelijk bepaalt de taaiheid van het monster of dit ook gevolgen heeft voor het losraken van kluitjes. Uit het verloop van de schuifspanning kan niet direct afgeleid worden of een bepaalde schuifspanning is gecorreleerd aan het losraken van een enkel groot brok of meerdere kleine brokjes.

De regressieparameters zijn weergegeven in Tabel 4.3

Tabel 4.3 Regresieparameters machtsfuncties

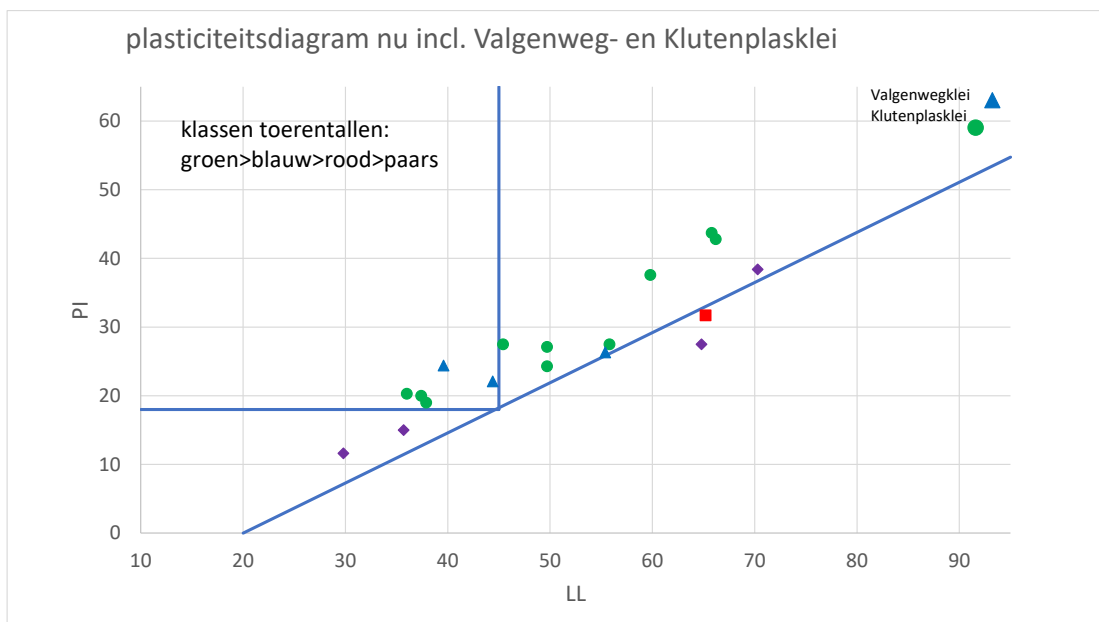
monster	Constante	Macht
Valg2A	11.09	1.52
Valg2B	12.16	1.47
Klut2A	7.93	2.13
Klut2B	8.16	2.19

Tabel 4.4 geeft de gevonden bezwijktoerentalen. Er is een significant verschil in bezwijktoerental tussen Valg1A en Valg1B, en ook t.o.v. Valg2A en Valg2B. Dit zal samenhangen met verschillen in samenstelling tussen verschillende monsters in combinatie met het niet uniforme erosieproces aan het monsteroppervlak. Helaas is dit niet te zien in Bijlage A, omdat het monster aan het einde van de proef helemaal was weg geërodeerd. 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 toerentalen direct voorafgaande aan het bezwijktoerental.

Tabel 4.4 De bezwijktoerentalen bij 30% massaverlies.

Monster	Bezwijktoerental [tpm]
Valgenweg 1A	900
Valgenweg 1B	1100
Klutenplas 1B	1200
Klutenplas 1C	1150
Valgenweg 2A en 2B	1100 - <1150
Klutenplas 2A en 2B	>1200

In Figuur 4.7, die ontleend is aan [Grondmechanica Delft 1988], is de erosiebestendigheid van diverse kleisoorten weergegeven. Tabel 1.1 geeft op basis van de resultaten van de roto-erosieproeven de kwalificatie van de erosiebestendigheid. Indien de combinatie (plasticiteitsindex PI, vloeigrens LL) boven de schuin oplopende zogenaamde A-lijn ligt en rechts van de verticale lijn, dan is aan twee van de eisen voor klasse 1 klei voldaan [TAW 1996]. Uit [Grondmechanica Delft 1988] volgt dat klasse 1 klei meestal een goede erosiebestendigheid heeft, d.w.z. ligt in de klasse weinig erosiegevoelig (groene bolletjes in Figuur 4.7). Een deel van deze historische kleisoorten had een verhoogd zoutgehalte of een hoog zandgehalte, wat effect bleek te hebben op de erosieklasse.



Figuur 4.7 Indeling historische gegevens met bezwijktoerentallen roto-erosiemeterproef, met toegevoegd de nieuwe metingen op Valgenweg- en Klutenplasklei [Grondmechanica Delft 1988].

Het doel van de roto-erosiemeterproeven was ook om na te gaan of de van klasse 1 afwijkende Klutenplas- en Valgenwegklei (te hoog organisch stof- en zoutgehalte), maar met een (PI, LL) combinatie in de hierboven vermelde zone in Figuur 4.7, ook een goede erosiebestendigheid heeft.

De erosiegevoeligheid van de Klutenplasklei bleek een klasse beter (klasse 'weinig erosiegevoelig') dan de Valgenwegkleimonsters (klasse 'matig tot weinig erosiegevoelig'), terwijl beide qua (PI,LL) combinatie dichtbij elkaar liggen. Voor de Klutenplasklei lijkt het verhoogde zoutgehalte niet te leiden tot een lagere erosieklasse dan klasse 1 klei, terwijl dat voor de Valgenwegklei mogelijk wel het geval is.

Het zandgehalte kan effect hebben op de erosiegevoeligheid. Het zandgehalte in de voor de roto-erosieproeven gebruikte kleibrokken verschilde nauwelijks (Klutenplasklei: 10,7% en Valgenwegklei: 12,0%). Verder blijkt uit de t_0 -metingen [Boskalis en van Oord 2020], Bijlage B en de korrelverdelingen die op de in onderhavig onderzoek gebruikte kluiten Deltagootklei zijn bepaald, dat het zandgehalte in de Valgenwegklei sterk kan variëren. De hoge waarden uit Bijlage B zijn dus niet representatief voor de Valgenwegklei in de Deltagoot.

Het verschil in erosiebestendigheid tussen Klutenplas- en Valgenwegklei zal nog in relatie tot de eigenschappen van de kleimineralen, zoals mineralogische samenstelling, het totaal specifiek oppervlak en de chemische analyse van de uitwisselbare kationen worden beschouwd. Tevens is er mogelijk een correlatie met de krimpgrens te vinden.

5 Conclusie

Zowel de standaard als de gedetailleerde proeven zijn bruikbaar gebleken om een indeling te maken in de erosieklassen op basis van bezwijktoerental (bij 30% massaverlies). De gedetailleerde proeven geven een nauwkeuriger inzicht in de meer geleidelijke erosie bij toerentalen direct voorafgaande aan het bezwijktoerental, zodat de in de literatuur gangbare erosieparameters konden worden afgeleid, zijnde de kritieke hydraulische schuifspanning τ_c [Pa] en de erosiegevoelheidscoëfficiënt k_d [mm/(Pa.s)].

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. De erosie treedt broksgewijs op en is meestal niet uniform, wat betekent dat de te verkrijgen erosieparameters benaderingen zijn. De grootte van de brokjes die loskomen kan sterk variëren.

De uit de metingen verkregen schuifspanning is geanalyseerd als functie van de stroomsnelheid van het water aan het monsteroppervlak. Deze laatste volgt uit het toerental en de monsterdiameter. Het toenemen van de schuifspanning is in principe gerelateerd aan het losraken van kluitjes uit de wand van het monster, want hoe hoger de schuifspanning, hoe meer aan het materiaal van het monster wordt getrokken. Uiteindelijk bepaalt de taaierheid van het monster of dit ook gevolgen heeft voor het losraken van kluitjes. Uit het verloop van de schuifspanning kan niet direct afgeleid worden of een bepaalde schuifspanning is gecorreleerd aan het losraken van een enkel groot brok of meerdere kleine brokjes.

Klutenplasklei blijkt een lagere schuifspanning te ontwikkelen bij een gegeven stroomsnelheid dan Valgenwegklei, een aanwijzing voor de geringere erosiegevoeligheid van het materiaal. Opvallend is echter dat dit niet tot uiting komt in de erosieparameters, maar wel in het bezwijktoerental. Beide erosieparameters τ_c en k_d laten geen groot verschil zien tussen beide kleisoorten; de verschillen zijn niet significant te noemen. Qua bezwijktoerental (d.w.z. bij meer dan 30% massaverlies) is er wel duidelijk verschil. De Klutenplasklei valt in erosieklasse 'weinig erosiegevoelig' en de Valgenklei in klasse 'matig tot weinig erosiegevoelig'. Dit geeft ook een beeld van het mogelijke effect van het verhoogde zoutgehalte en verhoogde organisch stof gehalte op de erosiegevoeligheid, waarbij een vergelijking is gemaakt met historische gegevens. Voor de Klutenplasklei lijkt het verhoogde zoutgehalte niet te leiden tot een lagere erosieklasse dan klasse 1 klei, terwijl dat voor de Valgenwegklei mogelijk wel het geval is.

De verschillen in bezwijktoerental zouden kunnen samenhangen met de verschillen in consistentie-index van de geteste monsters. Immers, de consistentie-index van de Valgenweg kleimonsters is lager (gemiddeld 0.64) dan die van de Klutenplas kleimonsters (gemiddeld 0.71). Een hogere consistentie-index betekent een taaier gedrag en daarmee in principe een grotere weerstand tegen erosie.

In de Deltagootproeven was de erodeerbaarheid van de Valgenwegklei groter dan die van de Klutenplasklei. Mogelijk is er een verband met de in de roto-erosiemeterproeven geconstateerde verschillen in erosiegevoeligheid, waarbij de Valgenwegklei duidelijk sneller erodeert dan de Klutenplasklei.

In het Deltagootonderzoek [Deltares 2021] was een positieve relatie van de weerstand tegen erosie met de gemiddelde consistentie-index niet te zien, omdat de beide kleisoorten een vergelijkbare gemiddelde consistentie-index hadden (0,72 voor Valgenweg versus 0,68 voor Klutenplasklei), en dat terwijl de Valgenwegklei wel sneller erodeerde.

Het zandgehalte kan ook effect hebben op de erosiebestendigheid. Het zandgehalte in de voor de roto-erosieproeven gebruikte kleibrokken verschilde nauwelijks (Klutenplasklei: 10,7% en Valgenwegklei: 12,0%). Verder blijkt uit de t_0 -metingen [Boskalis en van Oord 2020], Bijlage B en de korrelverdelingen die op de in onderhavig onderzoek gebruikte kluiten Deltagootklei zijn bepaald, dat het zandgehalte in de Valgenwegklei sterk kan variëren. De hoge waarden uit Bijlage B zijn dus niet representatief voor de Valgenwegklei in de Deltagoot.

Het verschil in erosiebestendigheid tussen Klutenplas- en Valgenwegklei zal nog in relatie tot de eigenschappen van de kleimineralen, zoals mineralogische samenstelling, het totaal specifiek oppervlak en de chemische analyse van de uitwisselbare kationen worden beschouwd. Tevens is er mogelijk een correlatie met de krimpgrens te vinden. Dit zal apart worden gerapporteerd in stap 8 van het OGD-onderzoek.

Literatuur

[Boskalis en van Oord 2020]

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

[Deltares 2021]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk; Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven; Deltares 2021; kenmerk 11206194-002-HYE-0014.

[Grondmechanica Delft 1988]

Grondmechanica Delft 1988; CO-275925/14.

[TAW 1996]

Technisch rapport Klei voor Dijken; TAW 1996.

[Winterwerp&van Kesteren 2004]

Johan C. Winterwerp and Walther G.M. van Kesteren; Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment; Editor T. van Loon; Elsevier 2004.

Bijlagen

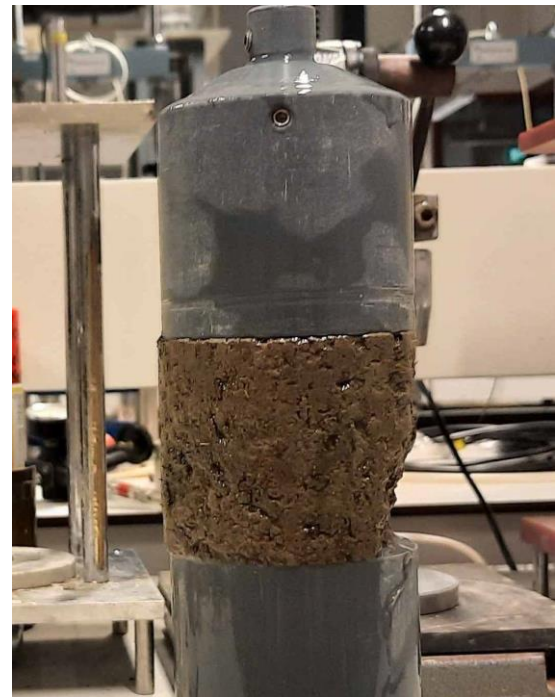
A Foto's monsters voor en na beproeving



Figuur A.5.1 Monster Klut1A voor beproeving.



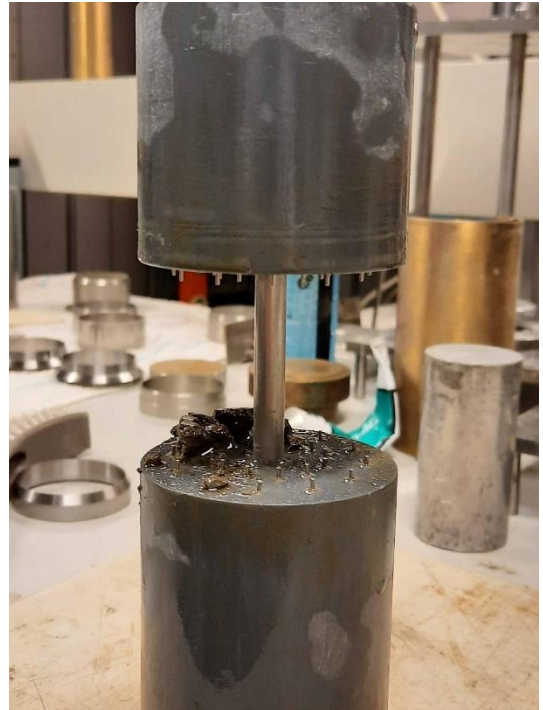
Figuur A.5.2 Monster Klut1B voor beproeving



Figuur A.5.3 Monster Klut1B na beproeving.



Figuur A.5.4 Monster Klut1C voor beproeving



Figuur A.5.5 Monster Klut1C na beproeving.



Figuur A.5.6 Monster Klut2A voor beproeving



Figuur A.5.7 Monster Klut2A na beproeving



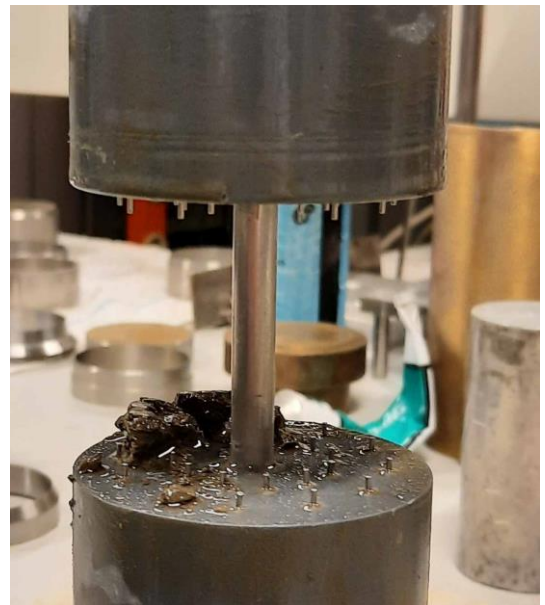
Figuur A.5.8 Monster Klut2B voor beproeving



Figuur A.5.9 Monster Klut2B na beproeving



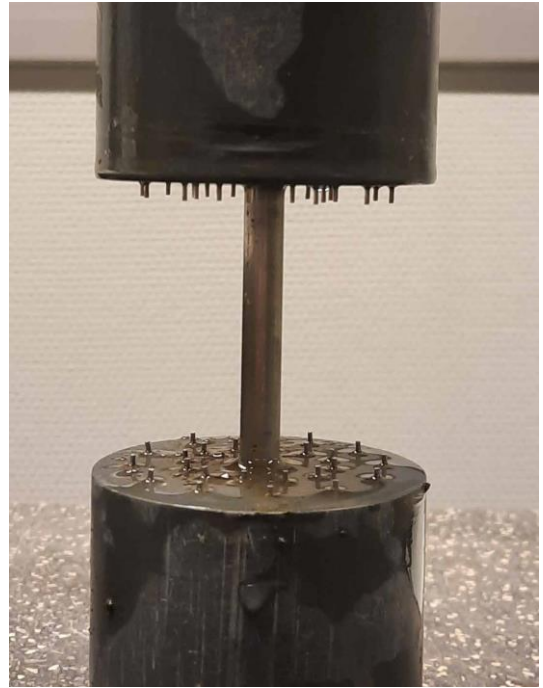
Figuur A.5.10 Monster Valg1A voor beproeving



Figuur A.5.11 Monster Valg1A na beproeving.



Figuur A.5.12 Monster Valg1B voor beproeving



Figuur A.5.13 Monster Valg1B na beproeving.



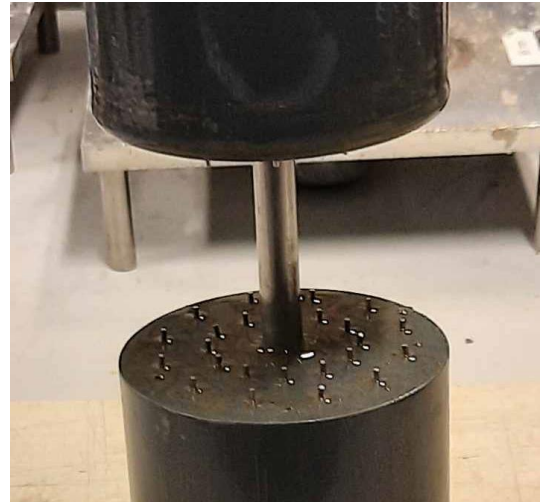
Figuur A.5.14 Monster Valg2A voor beproeving



Figuur A.5.15 Monster Valg2A na beproeving



Figuur A.5.16 Monster Valg2B voor beproeving



Figuur A.5.17 Monster Valg2B na beproeving

B Eigenschappen Deltagootklei

Deltagootklei, beproeving ikv Deltagootproef												
naam	<2mu%	>63 mu%	LL	PL	PI	watergehalte %	org% H2O2	kalk% HCl	zout g/l	consistentieindex	NEN-classificatie	
Valgenweg1	38,8	30	99,4	30,9	68,5	46,3	6	12,5	19,4	0,78	Ks2, spoor grind	
Valgenweg2	39,8	28,8	87,1	31,5	55,6	50,2	2	10,3	16,9	0,66	Ks2, spoor grind	
Valgenweg3	38	32,3	93,2	28,2	65	49,8	6,1	13,8	20,3	0,67	Ks2, spoor grind	
Klutenplas1	44,3	10,6	89,1	33	56	49	6	13,7	5,3	0,72	Ks2, spoor grind	
Klutenplas2	49,7	8,3	90	32	57,9	37,1	7,8	15,2	37,4	0,91	Ks2	
Klutenplas3	44,1	16,3	95,7	32,5	63,2	45,1	6,1	13,5	10	0,80	Ks2g1	

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