

## Onderzoek Geschiktheid Deltaklei i.h.k.v. demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei



**Onderzoek Geschiktheid Deltaklei i.h.k.v. demonstratieproject Brede Groene Dijk**  
Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei

**Auteur(s)**

Harry van Essen

## Onderzoek Geschiktheid Deltaklei i.h.k.v. demonstratieproject Brede Groene Dijk

### Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei

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

#### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	20-12-2022
<b>Projectnummer</b>	11207091-010
<b>Document ID</b>	11207091-010-GEO-0002
<b>Pagina's</b>	62
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

#### Auteur(s)

	Harry van Essen	

# 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).

Het doel van het onderzoek op de vier kleisoorten uit de proefdijk (stap 2b OGD) is om vast te stellen hoe de voor de erosie relevante eigenschappen zich hebben ontwikkeld in de eerste periode na aanleg. Doel is ook vast stellen of er kenmerken zijn die duiden op de wijze van aanleg en de eigenschappen van de klei daarbij.

Het is gewenst om met behulp van kleinschalige proeven de erodeerbaarheid van de vier typen klei te onderzoeken. Dit kan met behulp van de roto-erosiemeter, die in het verleden ingezet is bij het bepalen van de erosiebestendigheid van reguliere dijkenklei onder stromingsbelasting. Er kan dan gebruik worden gemaakt van de erosieklassen uit historisch onderzoek. Uiteindelijk moet een vergelijking worden gemaakt met de resultaten uit de Deltagootproeven (op Klutenplasklei en Valgenwegklei), 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.

Tevens is het doel te onderzoeken hoe de erosiebestendigheid ruimtelijk varieert, waarbij verbanden worden gelegd met uitgevoerde profielkuilonderzoek

In het voorliggend rapport zijn de resultaten gerapporteerd van het uitgevoerde mineralogisch onderzoek op 6 kleisoorten die eerder getest zijn op structuurvorming onder invloed van gesimuleerde natte en droge seizoenen. Het achterliggende idee hierbij is dat structuurvorming een sterke relatie met erosiegevoeligheid heeft. Structuurvorming is het gevolg van rijping en zal altijd in meer of mindere mate in klei plaatsvinden. Hoe sterker de structuurvorming, hoe erosiegevoeliger de klei is het algemene beeld.

Materiaal van de 6 onderzochte kleisoorten is in bakken aangebracht op een onderlaag van zand. Sinds rapportage van dit onderzoek is meer kennis vergaard rond het vastleggen van structuurvorming, zodat besloten is een heranalyse van de structuurvorming uit te voeren om zodoende de relatie met de mineralogie beter uit te kunnen voeren. Echter, omdat de structuurvorming het best uitgevoerd kan worden op basis van visuele waarnemingen in profielkuilen en deze in dit geval op basis van de beschrijvingen en foto's moest worden gedaan, is deze heranalyse slechts beperkt mogelijk gebleken.

Reden voor dit mineralogisch onderzoek is dat er op basis van de standaard uitgevoerde geotechnische classificatieproeven voorsnog geen relatie met de resultaten van de structuurvorming is gevonden. De mineralogische samenstelling ligt aan de basis van de eigenschappen van klei, en de gedachte is dat hiermee mogelijk wel een relatie met de geconstateerde structuurvorming kan worden gevonden. Naast de 6 genoemde kleisoorten zijn twee extra kleisoorten die in de Deltagoot zijn beproefd aan dit onderzoek naar de mineralogie toegevoegd.

De volgende kleisoorten zijn beproefd:

- Valgenweg.
- Kwelderdepot.
- Klutenplas.
- Nieuwe Statenzijl.
- Blija 2020.
- Lauwersmeerdijk.
- Blija 2021.
- Dollarddijk (genomen uit het buitentalud).

De laatste twee zijn de toegevoegde kleisoorten.

Ten behoeve van dit onderzoek zijn de classificatiebepalingen opnieuw uitgevoerd en aangevuld met de bepaling van de krimpgrens en de activiteit van de klei. De activiteit van klei wordt bepaald uit het quotiënt van de plasticiteitsindex met de grootte van de lutumfractie. Uit een vergelijking van de twee series classificatiebepalingen volgt dat de resultaten overwegend bij elkaar in de buurt liggen, maar dat er enkele grote verschillen zijn geconstateerd. De meeste afwijkingen zijn in de korrelgroottesamenstelling geconstateerd. Echter, er zijn ook verschillen gevonden tussen de plasticiteitsgrenzen, in één geval was het verschil tussen de plasticiteitsgrenzen zo groot dat een kleisoort (Kwelderdepotklei) van een overtuigende erosiebestendigheidscategorie 1 naar een categorie 3 klei terug is gevallen. De oorzaak hiervan is niet duidelijk, maar dit laat duidelijk zien dat het goed- of afkeuren van een partij klei op basis van één laboratoriumresultaat risicovol kan zijn.

Met betrekking tot de resultaten van de mineralogische samenstelling valt op dat de kleimonsters met name verschillen in de verhouding kwarts- en kleimineralen, de overige mineralen verschillen niet substantieel tussen de monsters. Het kwartsgehalte correleert met de fractie > 2 µm (die immers voor het grootste deel uit kwarts bestaat). Naast het verschil in samenstelling qua korrelverdeling, hangt een groot deel van het verschil in gedrag tussen kleimonsters samen met het type kleimineralen die in de kleifractie aanwezig zijn. Er zijn actieve kleimineralen en minder actieve kleimineralen. Beide typen zijn aanwezig in de onderzochte kleimonsters en in duidelijk verschillende percentages. De verwachting is dat deze verschillen tot uiting komen in het gedrag van de klei zoals dat met bijvoorbeeld de vaststelling van de plasticiteitsgrenzen wordt bepaald. Uit vergelijking van deze eigenschappen met de mineralogische samenstelling van de kleifractie is een zwak verband geconstateerd tussen het gehalte actieve kleimineralen aan één kant en de plasticiteitsgrenzen en activiteit aan de andere.

In de lutumfractie zijn significante verschillen gevonden met betrekking tot het relatieve aandeel van de reactieve kleimineralen en de eigenschappen daarvan, uitgedrukt in het specifiek oppervlak, de kation uitwisselingscapaciteit (CEC) en de typen geadsorbeerde kationen. Deze eigenschappen van de kleimineralen zijn medebepalend voor de eigenschappen van de klei en geven derhalve mede inzicht in de reactiviteit van de kleimineralen. Bij vrijwel alle kleimonsters bestaan de geadsorbeerde kationen voor het overgrote deel uit calciumionen. Deze tweewaardige kationen beperken de gevoeligheid voor krimp en zwel, waardoor het effect van de mineralogie minder tot uiting komt.

Uit de resultaten van de bepalingen blijkt de krimpgrens voor de meeste onderzochte kleisoorten een vergelijkbare waarde te hebben, zo tussen 20% en 25%. Twee kleisoorten (Valgenweg D7 en Nieuw Statenzijl) hebben een afwijkend lage krimpgrens van 14% tot 16%.

Eén van de doelstellingen van dit onderzoek is te trachten een relatie te leggen tussen de verschillen in structuurvorming van de 6 onderzochte kleisoorten. Onder meer om een betere vergelijking te kunnen maken is de hiervoor genoemde heranalyse van de structuurvorming uitgevoerd. Echter, ook op basis van deze heranalyse zijn geen duidelijk verbanden gevonden tussen de resultaten van de verschillende laboratoriumbepalingen en de mate van structuurvorming, inclusief de krimpgrens en de mineralogie.

Een mogelijke oorzaak hiervoor kan zijn dat de begincondities van de verschillende kleisoorten bij de structuurvorming niet goed vergelijkbaar waren. Dit heeft vooral te maken met de wijze waarop de voorbehandeling is uitgevoerd: hierdoor is het waarschijnlijk dat bijvoorbeeld de historie qua veroudering, door het vooraf niet intensief mengen, niet volledig is geëlimineerd, iets dat wel nodig is voor het kunnen maken van een goede vergelijking. Deze constatering hebben geleid tot een aantal suggesties die deels samenhangen met deze voorbehandeling, maar ook worden suggesties gedaan om bij een eventueel volgend onderzoek naar structuurvorming meer te meten waardoor het verouderingsproces in meer detail kan worden gevolgd, naast het volgen van het Deltares protocol om structuurvorming te beschrijven.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.2	Doelstelling	10
<b>2</b>	<b>Algemene eigenschappen toegepaste kleisoorten</b>	<b>11</b>
2.1	Herkomst	11
2.2	Laboratoriumbepalingen	16
2.2.1	Inleiding	16
2.2.2	Beschrijving onderzochte mineralen	17
2.3	Resultaten bepalingen	19
2.3.1	Classificatiebepalingen	19
2.3.2	Mineralogische bepalingen	20
<b>3</b>	<b>Interpretatie resultaten</b>	<b>24</b>
3.1	Classificatiebepalingen	24
3.2	Mineralogie van de complete monsters	25
3.3	Mineralogie van de kleimineralen	28
3.4	Nadere analyse structuurvorming	30
3.4.1	Historie	30
3.4.2	Nieuwe gegevens en waarnemingen	31
3.4.2.1	Na warme periode aan eind eerste cyclus (15-12-2020): initiële scheurvorming	32
3.4.2.2	Na natte periode in tweede cyclus (24-12-2020): dichtzwellen of verdere ontwikkeling scheuren	32
3.4.2.3	Na koude periode in tweede cyclus (4-1-2021): geen substantiële verandering	32
3.4.2.4	Eindsituatie (16-2-2021): veelal weer terugkeer van de situatie aan het eind van de warme cyclus (§ 3.4.2.1)	33
3.4.2.5	Inspectie op 23 maart 2021	33
3.4.2.6	Resultaat nieuwe beoordeling	33
3.5	Analyse	34
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>38</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>41</b>
<b>A</b>	<b>Beschrijving procedures bepaling mineralogie</b>	<b>43</b>
<b>B</b>	<b>Foto's structuurvormingsonderzoek bakken klei</b>	<b>44</b>
B.1	Beginsituatie (5-11-2020)	44
B.2	Na warme periode aan eind eerste cyclus (15-12-2020)	46
B.3	Na natte periode in tweede cyclus (24-12-2020)	49
B.4	Na koude periode in tweede cyclus (4-1-2021)	52
B.5	Eindsituatie (16-2-2021)	55
B.6	Inspectie op 23 maart 2021	58



# 1 Inleiding

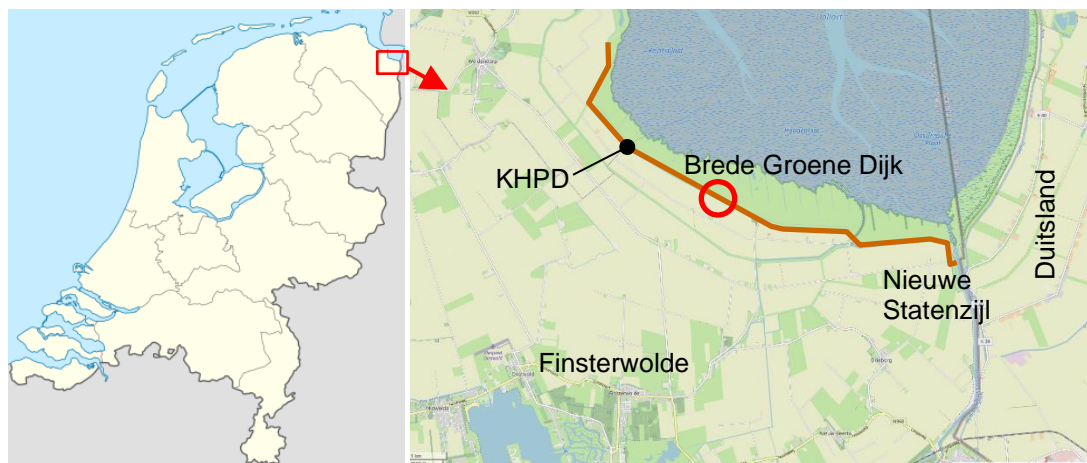
## 1.1 Achtergrond

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 m<sup>3</sup> 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 structuurvorming bakkenklei.
9. Deltagootproeven.
10. Eindrapportage.

De analyse van de structuurvorming bakkenklei die in deze rapportage wordt gerapporteerd valt onder stap 8: Analyse structuurvorming klei. In 2020 is door Deltares [Deltares, 2021a] onderzoek uitgevoerd naar structuurvorming van 6 verschillende kleitypen die in bakken zijn onderworpen aan een versneld verouderings- of rijpingsproces om te onderzoeken hoe

verschillende bagger- en kleisoorten binnen het BGD project zich gedragen onder verschillende gesimuleerde klimatologische omstandigheden. Aanvullend op deze 6 kleisoorten zijn twee andere kleisoorten in dit onderzoek meegenomen.

## 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 vanzelfsprekend<sup>1</sup> 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 structuurvorming in klei afkomstig van diverse bronnen. Met structuurvorming wordt bedoeld het proces waarbij in de loop der jaren door het zwellen en krimpen van de klei en soms ook ten gevolge van vorstwerking, in combinatie met biologische en chemische processen, de klei onder meer scheuren gaat vertonen. Deze scheuren kunnen in het natte seizoen weliswaar dichtgaan door het zwellen van de klei, maar blijven toch zwakke plekken ten aanzien van de erosie van de klei tijdens golfaanval.

Zoals hierboven beschreven is onderzoek uitgevoerd naar de structuurvorming van 6 kleisoorten in bakken. De verschillende kleisoorten zijn in deze vierkante bakken, met een oppervlak van 1 m<sup>2</sup>, aangebracht op een onderlaag van zand. Deze klei is onderworpen aan verschillende opeenvolgende gesimuleerde klimaatcondities. In dit onderzoek zijn significante verschillen in structuurvorming tussen de verschillende kleisoorten geconstateerd. Een duidelijk verband met de uitgevoerde classificatiebepalingen op de klei, uitgedrukt in bijvoorbeeld de korrelgrootteverdeling en de plasticiteit, zijn eerder niet gevonden [Deltares 2021a].

Om deze reden is besloten om meer aanvullend onderzoek naar de geconstateerde verschillen in structuurvorming te kijken. Hierbij is gekozen om, naast het uitvoeren van de standaard classificatiebepalingen als korrelverdeling en plasticiteitsgrenzen, ook de mineralogie van de kleisoorten te bepalen. De mineralogie, in combinatie met bijvoorbeeld de korrelverdeling en het watergehalte bepaalt in hoge mate het gedrag van de grond. Maar ook de historie van klei kan een grote invloed hebben op het gedrag: zo gedraagt gerijpte klei zich in de regel stijver (vervormt minder snel bij een veranderende belasting) dan ongerijpte klei. Rijping is globaal de verandering van de eigenschappen van klei onder invloed van meestal zuurstof, een proces dat vaak ook gepaard gaat met structuurvorming. Teneinde het proces van structuurvorming eenduidig te beschrijven is een protocol ontwikkeld [Deltares, 2022b]. Ten tijde van de uitvoering van het onderzoek naar de structuurvorming van de klei in de bakken, was deze nieuwe kennis nog niet beschikbaar. Om die reden is een heranalyse van de resultaten van het bakkenklei-onderzoek naar structuurvorming van de klei onder gesimuleerde klimaatomstandigheden uitgevoerd. Hoewel dit protocol is bedoeld om de structuurvorming in profielkuilen te beschrijven, is dit nu ook toegepast bij de bakkenklei, omdat nieuwe inzichten tot een betere beschrijving zouden kunnen leiden.

Dit rapport bevat zowel de heranalyse van de structuurvorming in de bakkenproef als de bepaling van de mineralogie, inclusief het specifiek oppervlak, de kation uitwisselingscapaciteit en de kationbezetting. Naast de reguliere classificatiebepalingen zijn nu ook de krimpgrens en de activiteit in de analyse meegenomen.

---

<sup>1</sup> 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.

## 2 Algemene eigenschappen toegepaste kleisoorten

### 2.1 Herkomst

Voor het onderzoek naar de ontwikkeling van de structuurvorming in de klei voor de Brede Groene Dijk is gebruik gemaakt van klei uit een aantal bronnen, namelijk de volgende zes in de bakkenproef geteste kleisoorten:

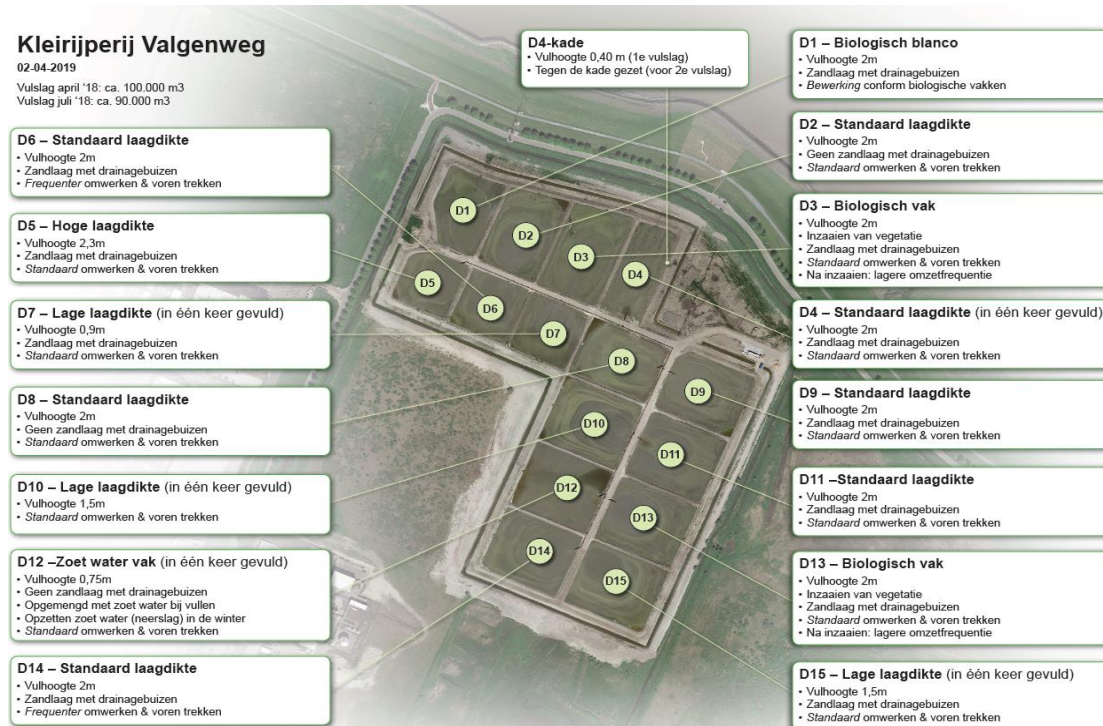
1. Klei uit de Kleirijperij langs de Valgenweg, depot D7 met baggerspecie uit het havenkanaal van Delfzijl (Figuur 2.1).
2. Klei uit de Kleirijperij op de kwelder met gerijpt slib uit polder Breebaart (Figuur 2.2).
3. Klei uit de Klutenplas, die gewonnen is uit de ringdijk rond de Kleirijperij op de kwelder (Figuur 2.2).
4. Klei uit het kleidepot van het waterschap bij Nieuwe Stanzijl.
5. Klei uit de Friese dijk bij Blija (Blija 2020, Figuur 2.3).
6. Klei uit de oostelijke Lauwersmeerdijk (Figuur 2.4 en Figuur 2.5).

En tevens zijn ook nog de volgende in de Deltagoot beproefde kleisoorten onderzocht:

7. Klei uit de Friese dijk bij Blija (Blija 2021, Figuur 2.6).
8. Klei uit de Dollarddijk (Figuur 2.7).

De klei afkomstig uit de bronnen 1 en 2 is in de Pilot Kleirijperij omgezet van slib naar klei. In de Pilot Kleirijperij onderzoeken Rijkswaterstaat, de provincie Groningen, Groningen Seaports, waterschap Hunze & Aa's, Het Groninger Landschap en EcoShape verschillende manieren om slib om te vormen tot klei. Onderzoekers van EcoShape voeren praktijkproeven uit om te kijken welke manier van rijping het beste werkt.

De derde kleisoort is afkomstig van de kwelder (het voorland) van de locatie waar de Brede Groene Dijk is aangelegd. Het is gebruikt om de ringdijk rond het kwelderdepot mee aan te leggen (waar de tweede kleisoort in is gerijpt).



Figuur 2.1 Kleidepot Valgenweg waarvan klei van depot D7 is gebruikt (klei nr. 1).

De vierde, vijfde en zesde kleisoorten zijn kleisoorten die normaal op dijken worden toegepast en in dit onderzoek als referentie dienen. De vierde is de klei die het waterschap beschikbaar heeft in een depot ten behoeve van dijkonderhoud. Deze klei van Nieuwe Statenzijl is afkomstig van de verbreding van de Westerwoldse Aa aan de binnenzijde van de zeedijk (zoet milieu).

De vijfde en zesde kleisoorten zijn in 2020 beproefd in de Deltagoot in het kader van een onderzoek naar de erosiebestendigheid van kleibekledingen met gras op het boventalud van zeedijken [Deltares, 2021b]. Deze kleisoorten zijn als referentie toegevoegd omdat vrij veel bekend is over deze klei.

Het tweede Blija kleimonster (Blija2021) is bijgevoegd uit een tweede experiment in de Deltagoot [Deltares, 2022a]. Deze klei is aangrenzend op dezelfde dijk bemonsterd. De erosie in de Deltagootproeven was duidelijk anders: Waar de Blija 2020 klei vrij snel erodeerde, gebeurde dat bij de Blija 2021 klei vrijwel niet. Een verschil tussen beide is dat de Blija 2020 klei droog en in een brokkelige staat is beproefd, terwijl de Blija 2021 als normale, vochtige klei is beproefd. Het Blija 2021 monster betreft een mengmonster dat is genomen uit het reserveblok uit de Deltagootproef met afmetingen 2x2x0,8 m<sup>3</sup>.

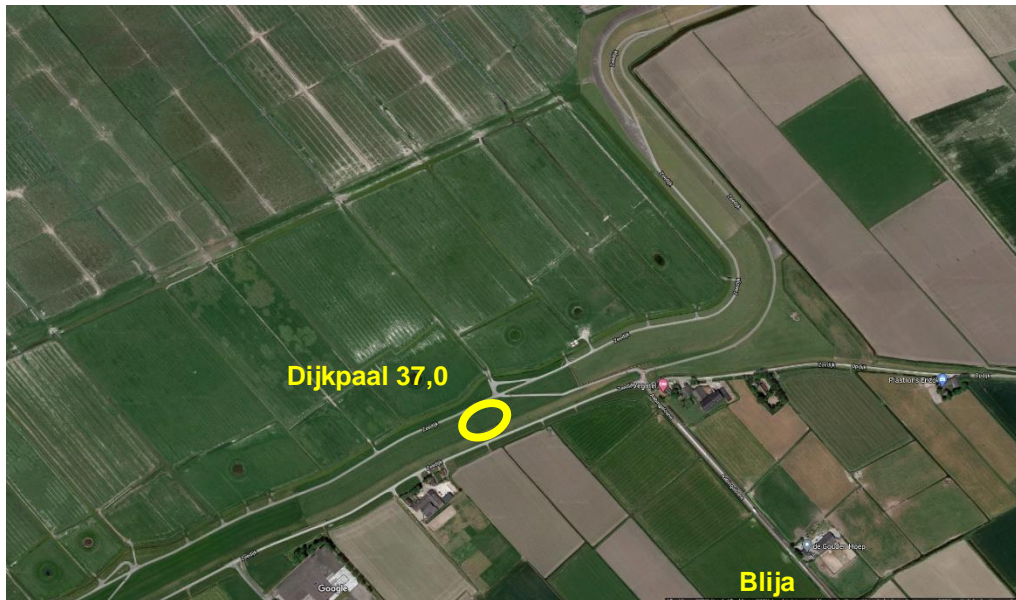
Het achtste monster betreft een mengmonster uit de monsters die in de 3 profielkuilen langs de Dollard (april 2021) [Deltares, 2022b] zijn genomen. Klei uit een aangrenzend dijkvak is beproefd in de Deltagoot.

De laatste twee kleisoorten zijn niet ten aanzien van de ontwikkeling van structuurvorming in de bakkenproef onderzocht.



*Figuur 2.2 Kleirijperij op de kwelder bij de Klutenplas, waar slib uit de polder Breebaart werd gerijpt (kleisoort nr. 2). De klei uit de ringdijk is ook gebruikt (kleisoort nr. 3).*

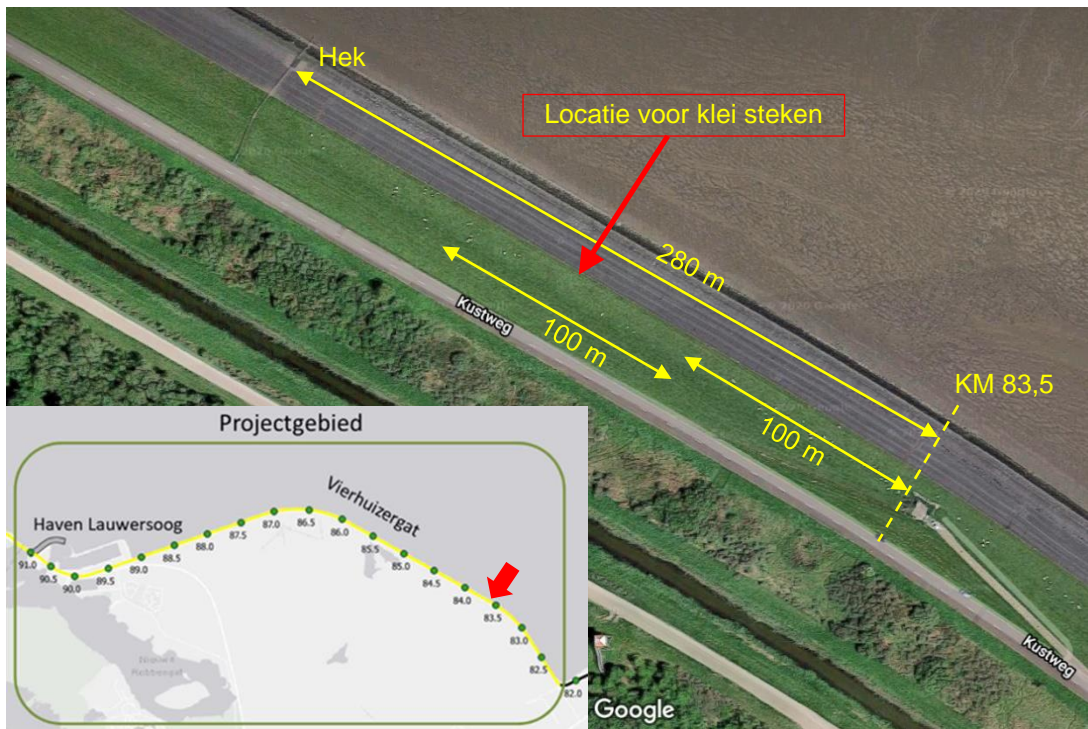




*Figuur 2.3 Locatie op de dijk Koehool-Lauwersmeer bij Blija waar kleiblokken met gras zijn gestoken (Blija 2020).*

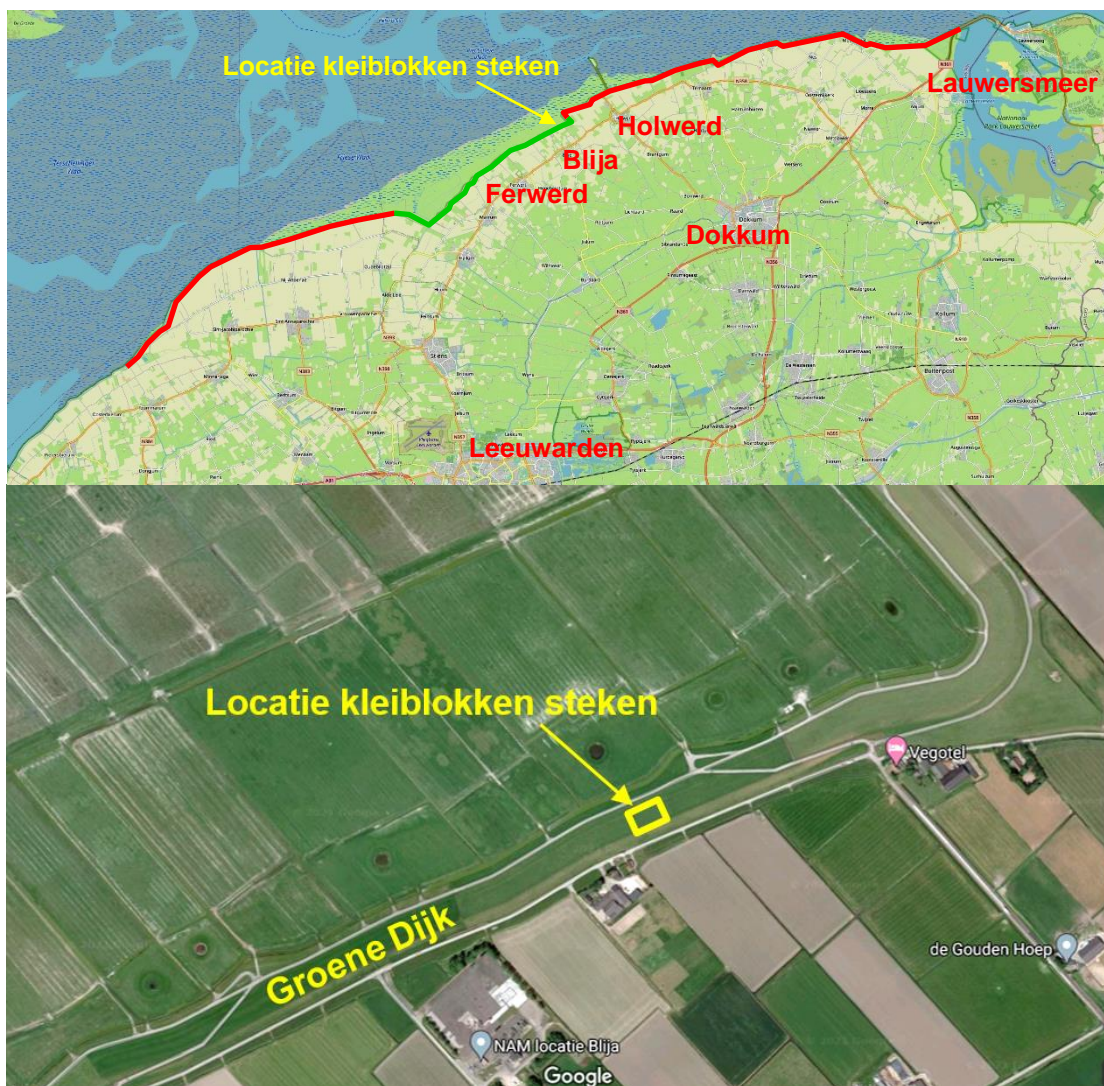


Figuur 2.4 Globale locatie op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat waar kleiblokken met gras zijn gestoken.



Figuur 2.5 Detaillocatie op de dijk Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat waar kleiblokken met gras zijn gestoken.





Figuur 2.6 De dijk Koehool-Lauwersmeer van het Wetterskip Fryslân (rood: met harde bekleding op het ondertalud; groen: volledig met kleibekleding en gras). De onderste figuur toont de locatie waar de Blija2021 klei is gestoken bij dijkpaal 36,90-36,94.



Figuur 2.7 Locatie waar de kleiblokken met gras zijn gestoken op het buitentalud van de Dollarddijk.



## 2.2 Laboratoriumbepalingen

### 2.2.1 Inleiding

Naast de uitvoering van de standaard classificatiebepalingen zoals bijvoorbeeld de plasticiteitsgrenzen en de korrelverdeling is besloten om ook de krimpgrens standaard van elke kleisoort te bepalen. De krimpgrens is een belangrijke parameter inzake structuurvorming van klei. Structuurvorming blijkt een grote invloed te hebben op de erosiegevoeligheid. Immers, door structuurvorming kan een losse, korrelige structuur ontstaan die minder bestand is tegen erosie dan wat op basis van laboratoriumonderzoek op kleine monsters kan worden gemeten.

Naast de genoemde laboratoriumbepalingen is ook de mineralogie van de acht kleisoorten onderzocht. De mineralogie is zeer bepalend voor de eigenschappen van grond, waarbij het type kleimineralen het meest van invloed is. De meeste andere mineralen, zoals kwarts, zijn redelijk inert, dat wil zeggen dat het gedrag aan weinig verandering onderhevig is. De fysische eigenschappen hangen sterk af van de hoeveelheid kleimineralen: reeds bij een lutumgehalte van zo'n 8% gaat grond zich bijvoorbeeld enigszins plastisch gedragen en krijgt het klei-eigenschappen.

In de regel wordt de grens tussen klei en silt/zand qua korrelgrootte bij 2  $\mu\text{m}$  gelegd. Dit is niet de grens tussen de klei- en de overige mineralen. Er zijn namelijk kleimineralen die groter zijn dan 2  $\mu\text{m}$  en de andersoortige mineralen, bijvoorbeeld kwarts, kunnen kleiner zijn dan 2  $\mu\text{m}$ . De fractie kleiner dan 2  $\mu\text{m}$  wordt daarom de lutumfractie (en dus niet kleifractie) genoemd. De bepaling van de mineralogie geeft daarmee een beter inzicht in de werkelijke samenstelling dan het bepalen van de korrelgrootte. Bovendien kunnen de soorten kleimineralen bepaald worden en hierbij kan hun relatieve aandeel worden geschat. Er zijn vele soorten kleimineralen die allen medebepalend zijn voor het gedrag van het materiaal. Er zijn reactieve kleien waarvan het gedrag in hoge mate wordt bepaald door het milieu waar de klei zich bevindt en weinig reactieve kleien die veel minder sterk reageren op veranderingen in het milieu. Maar voor alle kleimineralen geldt dat de eigenschappen veel meer samenhangen met de omstandigheden dan de meeste andere mineralen, bijvoorbeeld, kwarts.

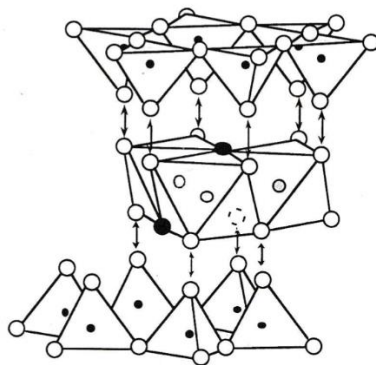
Hoewel minder sterk van invloed dan kleimineralen, kunnen ook andere mineralen invloed hebben op het gedrag van grond. Een bekend voorbeeld is kalk (calciumcarbonaat), dat in een losse zandige structuur voor cementatie kan zorgen. Maar kalk is ook van invloed op het gedrag van de kleimineralen, hetgeen samenhangt met de reactieve eigenschappen van kleimineralen. Bij de bespreking van de verschillende kleimineralen wordt hier nader op ingegaan.

Er zijn verschillende mineralogische analyses uitgevoerd, namelijk een analyse op het totale monster en een aantal op de lutumfractie. De aparte analyse van de lutumfractie is uitgevoerd omdat dit het meest bepalende deel is voor de eigenschappen van kleimonsters. De gevolgde procedures staan beschreven in Bijlage A.

## 2.2.2 Beschrijving onderzochte mineralen

De volgende mineralen zijn bepaald:

- Silicaten
  - Voor het overgrote deel bestaat de aardkorst uit silicaten, deze bevatten silicium en zuurstof. De bekendste silicaten zijn kwarts en veldspaat. Het is een inert mineraal.
- Carbonaten
  - Deze mineralen bevatten allemaal koolstof en zuurstof. De bekendste carbonaten zijn calciet of calciumcarbonaat en dolomiet of calciummagnesiumcarbonaat. Na kwarts is calciet een van de meest voorkomende mineralen in de aardkorst. Kalksteen bestaat bijna volledig uit calciet. Deze mineralen hebben niet alleen een cementerend effect, maar hebben ook invloed op het gedrag van kleimineralen door adsorptie van het calcium ion.
- Oxiden
  - Oxiden bevatten alle zuurstof. De meest voorkomende oxiden zijn goethiet en bauxiet. Als goethiet vervalt wordt het limoniet oftewel een hele reeks aan ijzeroxiden en -hydroxiden. Deze hebben, evenals de carbonaten, een cementerend effect en invloed op het gedrag van kleimineralen indien het ijzerion tussen de kleimineralen geadsorbeerd wordt.
- Haliden
  - Haliden bestaan uit mineralen die fluor, jodium, chloor en broom bevatten. Een kenmerk is dat ze snel reageren met andere chemische stoffen, sommige lossen makkelijk op in water. De bekendste halide is haliet, oftewel natriumchloriet (keukenzout).
- Fosfaten
  - Een mineraalgroep waarin fosfor meestal voorkomt, het is vaak gecorreleerd aan bemesting. Een bekende fosfaat is apatiet.
- Sulfaten
  - Sulfaten bevatten zwavel en zuurstof, gips is bijvoorbeeld een sulfaat.
- Kleien
  - Kleimineralen behoren tot de zogenaamde fytosilicaten en bestaan uit  $\text{SiO}_4$  tetraëders of  $\text{AlO}_4$  octaëders die plaatgewijs zijn gegroepeerd. Er zijn 1:1 mineralen, met een octaëderlaag en een tetraëderlaag en 2:1 mineralen, met een octaëderlaag tussen twee tetraëderlagen in. Voorbeeld van de eerste groep is kaolinite, voor de tweede groep is dat montmorilloniet als lid van de smectietgroep. In een voorbeeld van de structuur van een 2:1 kleimineraal gegeven. De boven en onderzijde vormen de begrenzing van het kleiplaatje, waar zich in de regel weer andere kleiplaatjes bevinden.

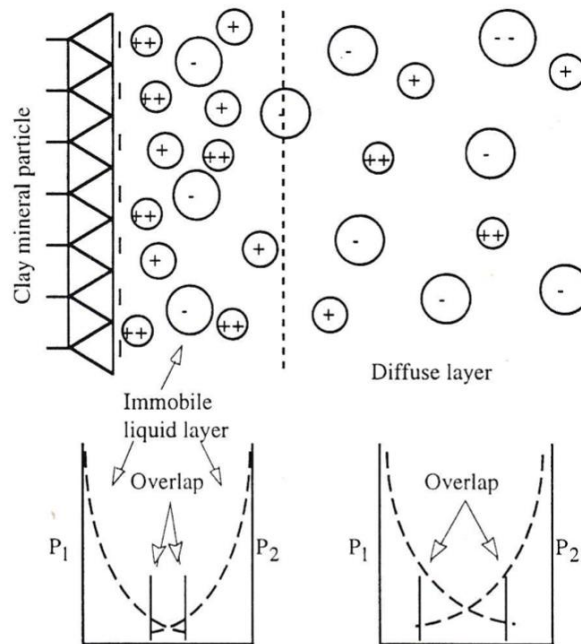


Figuur 2.8 Driedimensionale weergave van een 2:1 kleimineraal. De grote zwarte bollen zijn waterstofoxiden; de kleine zwarte bollen representeren kationen gebonden aan de tetraëder (onder en boven); de grijze bollen kationen gebonden aan de octaëder (midden); de grote witte bollen zijn zuurstofatomen [Moore&Reynolds 1997].

De eigenschappen van de klei zijn in hoge mate gecorreleerd aan deze indeling. Afhankelijk van de samenstelling van de tetraëder- en octaëderlagen hebben kleimineralen een neutrale of (meestal) een negatieve lading, dat samenhangt met isomorfe substitutie: de vervanging

van positief geladen metaalionen door metaalionen met een lagere positieve lading zonder dat de structuur verandert.

Dit ladingstekort is een belangrijke reden voor het gedrag van kleigronden. Tussen de negatief geladen lagen in (de elektrische dubbellaag) zijn kationen geadsorbeerd om het ladingstekort van de kleiplaatjes te compenseren. Deze elektrische dubbellaag bevindt zich tussen de kleiplaatjes boven en onder het weergegeven 2:1 kleimineraal en is schematisch weergegeven in Figuur 2.9.



*Figuur 2.9 Schematische weergave van de elektrische dubbellaag met positief geladen kationen, waarvan de concentratie loodrecht op het oppervlak afneemt met de afstand tot dat oppervlak. P1 en P2 zijn de oppervlakken van twee aangrenzende kleimineralen met een meer of minder grote overlap van de twee dubbellagen [Moore&Reynolds 1997].*

Doordat de concentratie van deze ionen tussen de kleiplaatjes hoger is dan in het omringende bodemwater, wordt er door osmotische krachten water aangetrokken. De hoeveelheid watermoleculen in de dubbellaag is in evenwicht met het omringende poriewater. Hoe hoger het watergehalte, hoe meer water in de dubbellaag zal worden aangetrokken. Hierdoor neemt, bij een toenemende hoeveelheid bodemwater, ook de hoeveelheid water toe tussen de kleiplaatjes: de klei begint te zwellen. Bij uitdroging vindt het omgekeerde plaats. De mate waarin water daadwerkelijk aangetrokken wordt in de dubbellaag is overigens ook onder meer afhankelijk van de sterkte van de Van der Waalskrachten tussen de kleiplaatjes: hoe hoger deze krachten, hoe minder ruimte voor de watermoleculen aanwezig is.

Een andere belangrijke eigenschap van klei is het oppervlak van de kleiplaatjes, het zogenaamde specifieke oppervlak. Voor een mineraal als kaoliniet is deze relatief beperkt, voor montmorilloniet echter kan deze oplopen tot een voetbalveld per gram. Hoe groter het specifieke oppervlak, hoe groter de reactiviteit.

Verder geeft de kationen uitwisselingscapaciteit (CEC) aan in hoeveel en in welke mate de klei kationen aan zich kan binden. Waarbij een hogere CEC een grotere capaciteit betekent waarmee kationen tussen de kleiplaatjes geadsorbeerd kunnen worden om het ladingstekort te compenseren. Een hogere CEC betekent dus een hogere reactiviteit van de klei. Het is ook van belang welke waardigheid de kationen hebben die tussen de kleiplaatjes zitten geadsorbeerd: hoe lager de waardigheid, hoe meer kationen geadsorbeerd moeten worden om het ladingstekort te compenseren en hoe minder de kleiplaatjes naar elkaar worden getrokken (en hoe groter de kationconcentratie) en dus hoe groter het zwelvermogen. Een Na-montmorilloniet zwelt meer dan bijvoorbeeld een Ca-montmorilloniet. De CEC wordt vaak

uitgedrukt in meq/100 gram, waarbij 1 milli-equivalent gelijk staat aan 1 millimol éénwaardige kationen [Moore&Reynolds 1997].

Een extreem voorbeeld van het effect van zout op het gedrag van kleimineralen zijn de zogenaamde quickclays die bijvoorbeeld in Noorwegen worden gevonden. Quickclays zijn mariene kleiafzettingen waarvan, door uitspoeling sinds het boven het zeeniveau uitkomen van de afzetting, zouten uit de kleiafzetting zijn gespoeld. Door het zoute milieu zijn kleiplaatjes als een kaartenhuis gestructureerd. Door het verdwijnen van een groot deel van de kationen, is de kracht waarmee de kleiplaatjes gebonden zijn grotendeels verdwenen en kan het hele kaartenhuis in elkaar storten als bijvoorbeeld een plotselinge schokgolf of andere fysieke verstoring plaatsvindt. Het gevolg is dat vierkante kilometers oppervlak van het ene op het andere moment in zee kunnen verdwijnen en daarbij alles meenemen.

## 2.3 Resultaten bepalingen

### 2.3.1 Classificatiebepalingen

In [Deltares, 2021a] is een overzichtstabel met de resultaten van de classificatiebepalingen gegeven van de eerste 6 kleimonsters. Voor de volledigheid wordt deze hier herhaald (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Relevante resultaten classificatiebepalingen uit [Deltares, 2021a].

Kleisoort	Nr.	Lutum (%)	zand (%)	Uitrolgrens (%)	Vloei-grens (%)	Organisch stofgehalte (%)	Zoutgehalte (g/l)
Valgenweg D7	1	28	12	34	92	11	17
Kwelderdepot	2	38	2,0	35	111	11	12
Klutenplas	3	33	5,5	38	86	7,6	17
Nieuwe Statenzijl	4	34	3,3	25	63	4,5	0
Blija	5	44	14	24	55	2,9*	gering
Lauwersmeerdijk	6	24	40	22	40	1,0*	gering

In Tabel 2.1 is het organisch stofgehalte het resultaat van de gloeirestbepaling op de fractie kleiner dan 2 mm, uitgezonderd de met \* gemerkte resultaten. Deze zijn het resultaat van oxidatie met waterstofperoxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Ten behoeve van deze analyse zijn de bepalingen deels herhaald, de resultaten zijn weergegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Relevante resultaten classificatiebepalingen van de onderzochte kleisoorten.

Kleisoort	Nr.	Lutum (%)	zand (%)	Uitrolgrens (%)	Vloei-grens (%)	Krimp-grens (%)	Organisch stofgehalte (%)	Zout-gehalte (g/l)	Activiteit (-)
Valgenweg D7	1	43	24	32	79	16	5,1	6,6	1,10
Kwelderdepot	2	39	16	34	67	21	4,2	54	0,80
Klutenplas	3	45	9,0	33	82	24	5,0	8,0	1,10
Nieuwe Statenzijk	4	46	7,0	22	57	14	1,5	0,4	0,80
Blija 2020	5	43	13	20	54	21	0,8	0,2	0,80
Lauwersmeerdijk	6	23	42	20	43	24	1,4	0,6	1,00
Blija 2021	7	42	5,0	23	52	25	1,1	0,0	-
Dollarddijk (gem)	8	48	11	33	79	20	2,3	0,1	0,98
Dollarddijk (st. deviatie)		4,3	6,1	2,6	10	-	1,5	0,1	0,22

Het organisch stofgehalte in Tabel 2.2 is in alle gevallen bepaald door oxidatie met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De resultaten van de Dollard klei is het rekenkundig gemiddelde van 6 monsters die in het kader van het profielkuilonderzoek (Deltares, 2022b) genomen zijn, de standaard deviatie is weergegeven in de onderst rij.

Aanvullend op de eerstgenoemde tabel is nu ook de krimpgrens en de activiteit van de klei opgenomen. De activiteit is het quotiënt van de plasticiteitsindex gedeeld door het percentage lutum. Een klei met een activiteit van 0,75 of kleiner heet een niet actieve klei, tussen 0,75 en 1,4 een matig actieve klei en een klei met een activiteit hoger dan 1,4 is een actieve klei. In feite zegt de activiteit iets over de mineralogie van de lutumfractie: een lage activiteit is gecorreleerd aan een minder reactieve klei als kaolinite, een hoge activiteit juist aan een reactieve klei als montmorilloniet. [Özemer, 2017] heeft bijvoorbeeld een negatieve correlatie tussen de activiteit van klei met de erosiegevoeligheid gevonden (hoe hoger de activiteit, hoe lager de erosiegevoeligheid), waaruit zou kunnen worden afgeleid dat montmorilloniet een positieve invloed heeft op de weerstand tegen erosie.

Uit Tabel 2.2 blijkt dat alle kleien in de matig actieve klasse vallen, waarbij moet worden opgemerkt dat één Dollard kleimonster een activiteit van 1,4 liet zien.

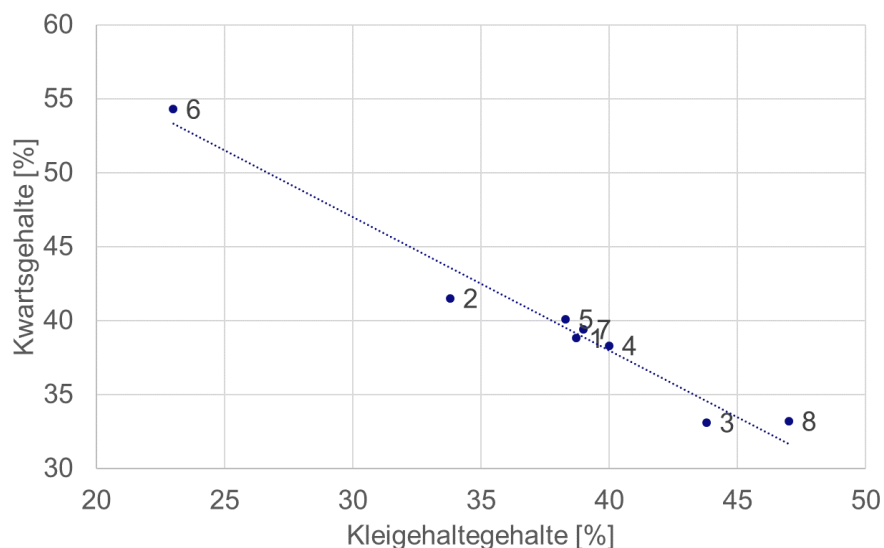
### 2.3.2 Mineralogische bepalingen

Naast de bovengenoemde geotechnische eigenschappen van de kleisoorten is nu ook de mineralogie bepaald. Hierbij is niet alleen, zoals gebruikelijk, de mineralogie van de kleimineralen opgenomen, maar ook de mineralogische samenstelling van het totale monster. In Tabel 2.3 zijn de resultaten samengevat van de volledige monsters.

Tabel 2.3 Mineralogische samenstelling (in %) van de onderzochte kleisoorten.

		Valgen- weg	Kwelder- depot	Kluten- plas	Nieuwe Statenz.	Blija 2020	Lauwers- meerdijk	Dollard	Blija 2021
<b>Silicaten</b>	kwarts	99,9	100,0	99,8	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0
	Alkali veldspaat	38,8	41,5	33,1	38,3	40,1	54,3	33,2	39,4
	Plagioclaas	6,6	6,3	6,1	6,0	6,6	6,3	5,7	6,8
<b>Carbo- naten</b>	Calciet	8,3	8,1	7,9	6,9	6,2	7,2	6,7	5,2
	Dolomiet/Ankeriet	1,1	1,4	1,5	1,6	1,6	1,2	1,3	1,7
<b>Oxiden</b>	Anatase	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4
	Ruliet	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3
	Goethiet	-	-	-	-	-	-	0,3	0,2
<b>Haliden</b>	Haliet	-	0,3	-	0,0	-	-	-	-
<b>Fosfaten</b>	Apatiet	0,9	0,7	0,9	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5
<b>Sulfaten</b>	Gips	-	1,0	0,6	-	-	-	-	-
<b>Kleien</b>	Chloriet	3,8	3,5	3,8	4,1	4,0	2,7	2,1	2,2
	Kaolinit	6,3	5,0	6,3	5,3	4,7	4,5	6,3	5,0
	2:1 silicaten	28,6	25,3	33,7	30,6	29,6	15,8	38,6	31,8
<b>Kleien totaal</b>		39,0	38,7	33,8	43,8	40,0	38,3	23,0	47,0

De verschillen tussen de verschillende kleisoorten blijken niet groot. De voornaamste mineralen zijn het inerte kwarts en klei. Uitgezet tegen elkaar levert Figuur 2.10 op, waaruit blijkt dat beide fracties sterk gecorreleerd zijn en dat de som van de overige mineralen ongeveer gelijk is. De nummers in de grafiek corresponderen met de nummers in Tabel 2.2.



Figuur 2.10 Kleigehalte vs kwartsgehalte.

In deze grafiek valt het schrale Lauwersmeerdijkmonster (6) en de iets vettere Klutenplas (3) en Dollarddijkklei (8) op. De overige monsters hebben een klei- en kwartsgehalte van zo'n 40%.

In Tabel 2.4 is de mineralogische samenstelling van de kleifractie tesamen met de eigenschappen van de kleimineralen weergegeven.

Tabel 2.4 Mineralogische samenstelling kleifractie en eigenschappen kleimineralen.

Klei mineralen	Valgenweg	Kwelder depot	Klutenplas	Nieuwe Statenz.	Blija 2020	Lauwersmeerdijk	Dollard	Blija 2021
kaoliniet	13,9	10,5	10,4	11,2	7,1	13,7	10,8	9,2
illiet/smectiet	27,6	34,9	27,7	32,1	31,5	34,4	39,5	40,6
illiet/muskoviet	-	-	-	-	-	-	-	-
Illiet	28,1	19	21,8	21,6	17,7	27,4	22,9	25,3
smectiet	28,3	34,7	38,5	33,6	42,7	22,3	22,9	21,3
chloriet	2,1	0,9	1,6	1,5	1	2,2	3,9	3,6
<b>Spec. opp. (m<sup>2</sup>/g)</b>	18,7	17,7	25,1	29,4	40,2	11,5	29,6	16,2
<b>CEC (meq/100 g)</b>	51	48	52	31	49	39	18	14
<b>Na</b>	12	13	14	4	14	9	2	1
<b>Ca</b>	17	16	20	14	24	15	15	13
<b>K</b>	18	15	14	11	9	14	0	0
<b>Mg</b>	4	4	4	2	2	1	1	1

Bij de beschreven kleimineralen moet opgemerkt worden dat door verwerking kleimineralen in elkaar over kunnen gaan en dat er dus overgangsmaterialen kunnen zijn. Dat wordt dan weergegeven door twee mineralen die in elkaar aan het overgaan zijn met '/' als scheidingsteken. Dit kan een complicerend effect hebben omdat dus deels reactieve en minder reactieve kleimineralen zich in een overgangsfase kunnen bevinden en dat het



derhalve onduidelijk is in hoeverre er reactieve eigenschappen aan deze overgangsmaterialen toegekend zou moeten worden. Maar ondanks dit kan er vanuit gegaan worden dat de bulk van de reactieve kleimineralen onder de smectietgroep worden weergegeven.

Echter, uit Tabel 2.4 volgt ook dat alle kleisoorten hoge gehalten geadsorbeerde calciumionen tussen de kleiplaatjes bezitten. Dit zal ervoor zorgen dat de reactieve eigenschappen beperkt zijn: echt sterk zwellende kleisoorten zijn arm aan calcium en rijk aan natrium.

## 3 Interpretatie resultaten

### 3.1 Classificatiebepalingen

In 2021 zijn classificatiebepalingen op de zes op scheurvorming geteste kleimonsters uitgevoerd [Deltares, 2021a]. Ten behoeve van het in dit rapport gerapporteerde onderzoek zijn deze bepalingen herhaald en aangevuld met de bepaling van de activiteit en krimpgrens. Bovendien zijn twee kleisoorten aan dit onderzoek toegevoegd, te weten Blija 2021 en Dollarddijk klei.

Indien de resultaten van de twee series bepalingen worden vergeleken, valt op dat de resultaten overeenkomsten vertonen, maar dat ook grote verschillen zijn te constateren. Zo is het relatieve lutumgehalte van de Valgenweg-, Klutenplas- en Nieuwe Statenzijklei 30% tot 55% hoger dan de waarden uit 2021. In het zandgehalte zijn relatieve toenames van 60% tot 700% geconstateerd (Valgenweg- en Kwelderdepotklei). De resultaten van de plasticiteitsgrenzen vertonen minder verschillen, hoewel de vloeigrens van Valgenweg- en Kwelderdepot wel significant lager is. Gezien het feit dat beide onderzoeken uitgevoerd zijn door hetzelfde laboratorium, moeten de verschillen, gezien de grootte van de verschillen, het gevolg zijn van heterogeniteit.

Ook vallen de verschillen in het organisch stofgehalte op, die samen zullen hangen met de verschillen in de bepalingmethode. In het eerste onderzoek is de bepaling uitgevoerd met behulp van de gloeirestmethode (Loss on Ignition), de tweede door middel van oxidatie met waterstofperoxide. Door rijping wordt de organisch stof afgebroken, dit kan ook meespelen bij de lagere gemeten gehalten organische stof, al zal dit naar verwachting, gezien de korte tijd tussen de meetmomenten, slechts een klein gedeelte van het verschil kunnen verklaren.

Dit laat duidelijk zien dat niet moet worden afgegaan op een enkel monster bij de beproeving, maar dat een representatief aantal monsters moet worden onderzocht, die zijn geselecteerd op basis van de grootte van het gebied en de verwachte of geconstateerde heterogeniteit. Tevens moet gelet worden op de proefmethode bij het maken van vergelijkingen.

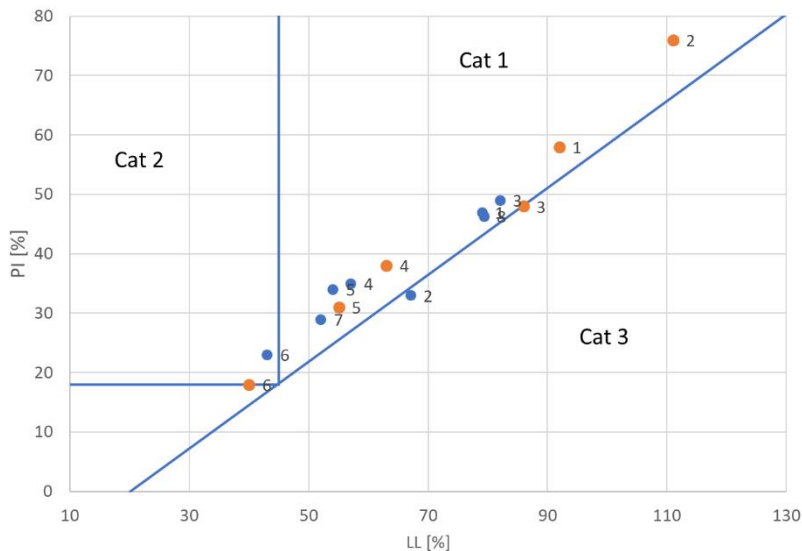
Heterogeniteit kan veroorzaakt zijn door een gebrekkige menging bij aanleg. Hierbij moet worden opgemerkt dat het mengen van verschillende kleisoorten eigenlijk alleen in het laboratorium effectief is. In praktijkgevallen, waar er met veel grotere hoeveelheden klei veel minder intensief wordt gemengd, lukt het mengen eigenlijk niet volledig indien de consistentie-index hoger is dan circa 0,25. Dit kan ook een oorzaak van de geconstateerde verschillen zijn.

De Lauwersmeerklei is duidelijk de schraalste. Deze voldoet in beide gevallen (2021 en 2022) ook niet aan de eisen die aan erosiebestendigheidscategorie 1 [TAW 1996] klei gesteld zijn.

De aanleiding om een extra Blija klei (Blija2021) met dit onderzoek mee te nemen zijn de geconstateerde verschillen in erosiegevoeligheid in de uitgevoerde Deltagoetproeven, waarbij de eerst geteste Blija klei (Blija 2020) aanmerkelijk erosiegevoeliger bleek te zijn dan de tweede (Blija 2021). De resultaten van de classificatiebepalingen zoals weergegeven in Tabel 2.1 en Tabel 2.2 geven hier geen afdoende verklaring voor.

In Figuur 3.1 zijn de resultaten van de plasticiteitsgrensbepaling in het plasticiteitsdiagram weergegeven conform de indeling volgens [TAW, 1996], waarbij zowel de nieuwe bepalingen (Tabel 2.6) als die uit Tabel 2.1 zijn vermeld. De nummers in deze figuur komen overeen met de nummering in Tabel 2.2. Voor het gemak worden deze hieronder herhaald:

- Valgenweg D7 1.
- Kwelderdepot 2.
- Klutenplas 3.
- Nieuwe Statenzijl 4.
- Blija 2020 5.
- Lauwersmeerdijk 6.
- Blija 2021 7.
- Dollarddijk 8.



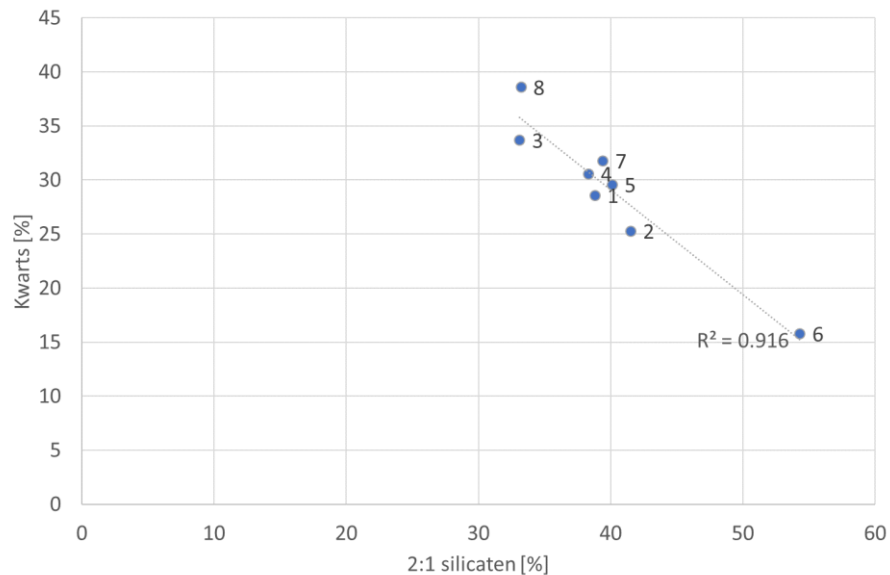
Figuur 3.1 Plasticiteitsdiagram met de 8 onderzochte monsters (rood=oud, blauw=nieuw).

In Figuur 3.1 valt op dat de meeste kleien langs de A-lijn (de lijn die diagonaal door de grafiek loopt) schuin naar beneden zijn verplaatst bij door de herbepaling. Dit is een bekend gevolg van rijping van klei. Echter, invloed van heterogeniteit is ook niet uit te sluiten. De verplaatsing van de kwederdepotklei (nummer 2) is bijvoorbeeld wel erg extreem en deze klei verandert bovendien van een ruime categorie 1 klei in een krappe categorie 3 klei. Maar ook de Klutenplas (nummer 3) en, in mindere mate, de Blija 2020 (nummer 5), laten een afwijkend gedrag zien. Tenslotte laat Lauwersmeerklei (waar er door het lage lutum- en organisch stofgehalte, nauwelijks rijping te verwachten valt), een terugval van categorie 2 naar 3 zien.

Met betrekking tot de krimpgrens valt op dat de verschillen tussen de kleimonsters klein zijn, behoudens de Valgenweg- en Nieuwe Statenzijklei, die een duidelijk lagere krimpgrens laten zien. Een lagere krimpgrens geeft aan dat de klei verder uit kan drogen zonder dat daarbij scheurvorming optreedt.

### 3.2 Mineralogie van de complete monsters

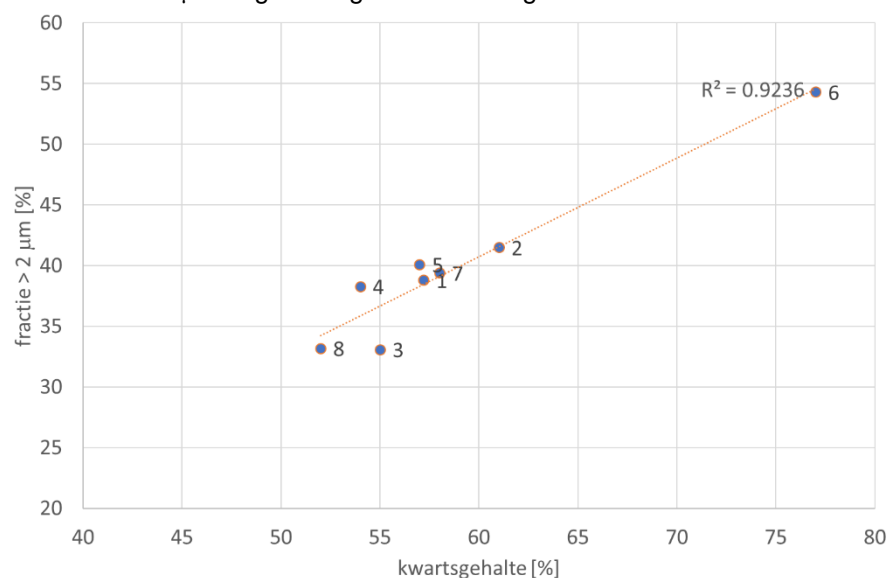
Hierboven (zie Figuur 2.10) is geconstateerd dat het percentage kwarts in hoge mate negatief gecorreleerd is met het percentage kleimineralen. Als wordt ingezoomd op de 2:1 kleimineralen (silicaten) als onderdeel van het totale monster ontstaat het volgende beeld (Figuur 3.2).



Figuur 3.2 Verband tussen het relatieve percentage kwarts en 2:1 silicaten (kleimineralen).

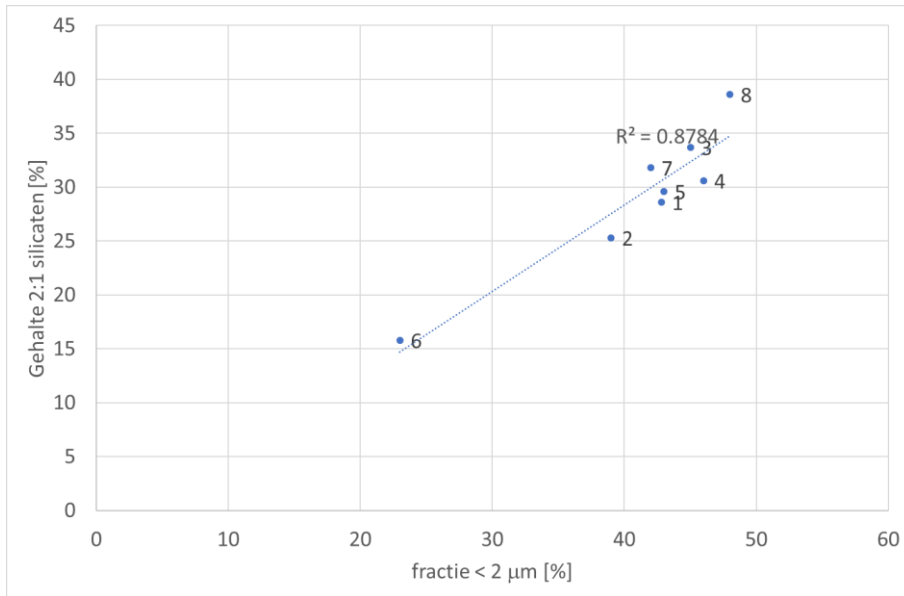
Uit Figuur 3.2 blijkt dat de 2:1 silicaten bepalend zijn voor de samenstelling van de het gehele kleimonster; het weglaten van de resterende kleimineralen verandert het beeld niet significant. Een lager kwartsgehalte betekent voor de onderzochte kleisoorten een hoger gehalte aan 2:1 silicaten (kleimineralen), hoewel het punt rechtsonder (Lauwersmeerdijk) de regressielijn wel sterk beïnvloedt.

Omdat het kwartspercentage samen met het percentage 2:1 silicaten de belangrijkste verschillen zijn tussen de verschillende monsters, zou het kwartsgehalte gecorreleerd moeten zijn met de fractie > 2  $\mu\text{m}$ , zoals dat uit de korrelgrootteverdeling volgt. In Figuur 3.3 is de fractie > 2  $\mu\text{m}$  uitgezet tegen het kwartsgehalte.



Figuur 3.3 Fractie > 2  $\mu\text{m}$  vs kwartsgehalte.

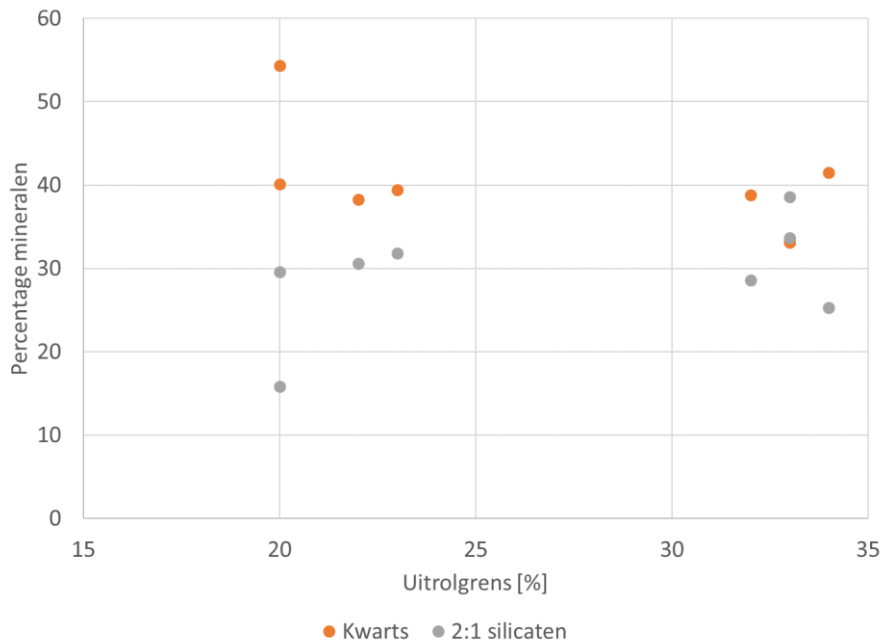
Omdat de 2:1 kleimineralen het belangrijkste verschil in de kleifractie van de verschillende monsters betreft, moet de lutumfractie hiermee correleren. Dit is in Figuur 3.4 weergegeven.



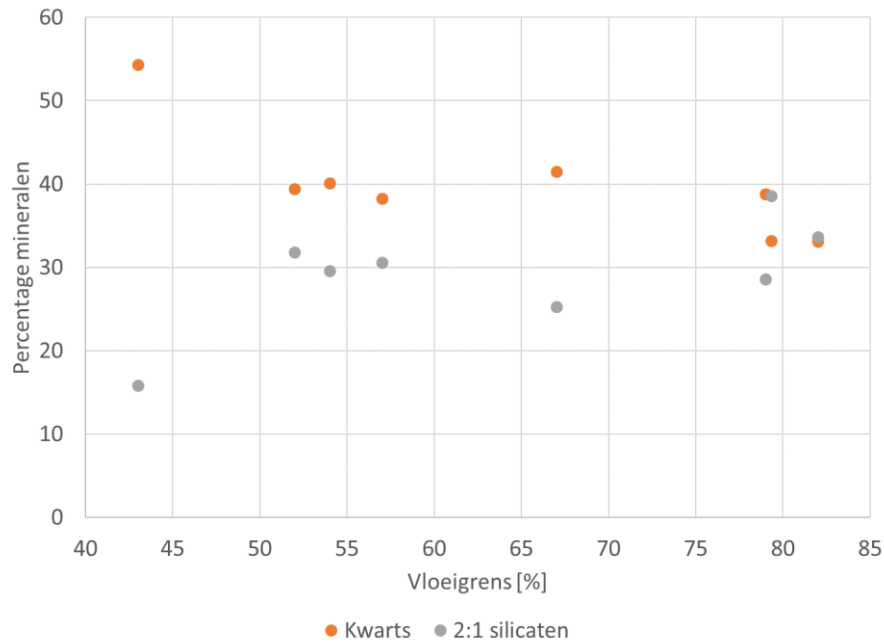
Figuur 3.4 Fractie < 2 μm vs 2:1 kleimineralen.

Uit Figuur 3.3 blijkt dat beide inderdaad sterk gecorreleerd zijn met een  $r^2$  van ruim 0,93, hoewel het enkele resultaat rechtsboven (Lauwersmeerdijk) wederom het resultaat wel sterk beïnvloedt. De analyse van de mineralogie correleert derhalve in hoge mate met de korrelgrootteverdeling.

De verwachting is dat de plasticiteitsgrenzen gecorreleerd zijn aan de hoeveelheid actieve kleimineralen (de 2:1 silicaten): dit is immers het gedeelte van het monster met een sterk waterbindend vermogen. In Figuur 3.5 en Figuur 3.6 is dit grafisch weergegeven.



Figuur 3.5 Verband de uitrolgrens en enkele eigenschappen van de kleimonsters.



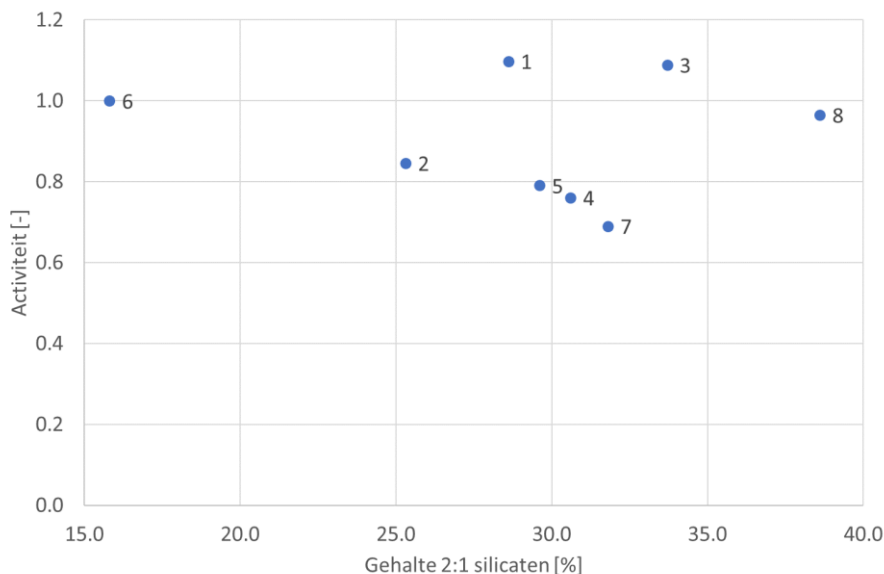
Figuur 3.6 Verband de vloeigrens en enkele eigenschappen van de kleimonsters.

Voor zowel de uitrol- als de vloeigrens wordt een zwak verband gevonden die in de lijn van de verwachting ligt: hoe hoger het aandeel aan 2:1 mineralen, hoe hoger de uitrolgrens en vloeigrens, en dan hoe lager het gehalte aan de inerte kwartsmineralen. De punten aan de linkerkant in Figuur 3.5 en Figuur 3.6 betreffen het Lauwersmeerdijk- en Blija 2020 monster.

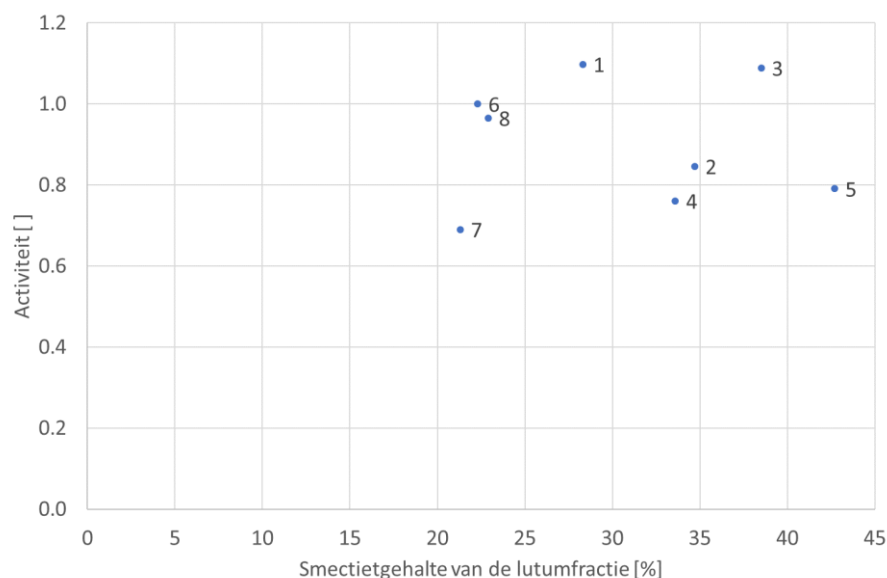
### 3.3 Mineralogie van de kleimineralen

In Tabel 2.4 valt op dat qua kleimineralogie de verschillen vooral in het smectietgehalte tot uiting komen. De overige mineralen verschillen niet significant of het betreft een kleine fractie. Opvallend is dat de lage percentages smectiet van de Dollard en Blija2021 klei ook zich vertalen in een lage CEC. Het verband met het specifiek oppervlakte is minder duidelijk.

De in Tabel 2.2 vermelde activiteit zou een indicatie moeten zijn voor de mineralogische samenstelling van de lutumfractie. Om dit te verifiëren is de activiteit (quotiënt van de plasticiteitsindex en de lutumfractie) uitgezet tegen het gehalte 2:1 silicaten van het totale monster (Figuur 3.7) en het smectietgehalte van de lutumfractie (Figuur 3.8). De verwachting is dat een hoger gehalte aan actieve kleimineralen gepaard gaat met een hogere activiteit.



Figuur 3.7 Verband tussen het gehalte aan 2:1 silicaten met de activiteit.



Figuur 3.8 Verband tussen het smectietgehalte van de lutumfractie met de activiteit.

In Figuur 3.7 is het gehalte aan 2:1 silicaten als onderdeel van het totale monster weergegeven. Daar de activiteit betrekking heeft op de lutumfractie als onderdeel van het totale monster, wordt het eventuele verband beïnvloed door de grootte van de lutumfractie. Dit is goed aan het Lauwersmeerdijkmonster te zien (monster 6) dat een lage lutumfractie heeft waarvan de activiteit nochtans 1 is.

In Figuur 3.8 is het smectietgehalte van de lutumfractie uitgezet tegen de activiteit. Omdat beide betrekking hebben op de lutumfractie, zou hier wel een positief verband mogen worden verwacht. Echter, opvallend genoeg wordt geen enkel verband geconstateerd. De werkelijke activiteit van klei is echter niet alleen afhankelijk van het type kleimineraal, maar ook van het specifiek oppervlak, de kation uitwisselingscapaciteit (CEC) en de kationen die in de elektrische dubbellaag geadsorbeerd zijn (zie §2.2.2).

In §3.2 is geen dusdanig verschil tussen beide Blija kleisoorten qua geotechnische classificatiebepalingen geconstateerd dat hieruit het verschil in erosiegevoeligheid verklaard zou kunnen worden. De verschillen in plasticiteitsgrenzen en samenstelling zijn niet dermate groot dat hieruit een fundamenteel ander gedrag uit af te leiden is, zoals wel is gezien in het Deltagootonderzoek. In de onderzoeken in de Deltagoot van de Blija 2020 en Blija 2021 klei bleek dat de eerste veel erosiegevoeliger was dan de tweede. Er zijn echter wel verschillen tussen beide kleisoorten op het gebied van mineralogie geconstateerd. Echter, uit de mineralogie volgt dat de Blija 2020 klei juist eigenschappen bezit die in eerste instantie gerelateerd zijn aan een grotere weerstand tegen erosie: de Blija 2020 klei heeft significant hoger gehalte smectiet (die onder de groep 2:1 kleimineralen valt) in de lutumfractie, terwijl de lutumfracties van beide kleien qua grootte vergelijkbaar zijn. Ook het specifiek oppervlak en de CEC van de Blija 2021 klei zijn significant lager dan voor de Blija 2020 klei, waardoor verwacht wordt dat de Blija 2020 klei ook om die reden in principe een minder grote erosiegevoeligheid heeft.

Een hoger aandeel smectietgehalte heeft namelijk in eerste instantie een sterkere samenhang tot gevolg, dat een positief effect heeft op de erosiebestendigheid. Op termijn kunnen deze kleisoorten juist, door de hogere krimp- en zwelgevoeligheid, een hogere erosiegevoeligheid krijgen door het ontstaan van scheuren in de klei die aangrijpingspunten zijn voor de erosieve kracht van het water. Wat bij de krimp- en zwelgevoeligheid meespeelt zijn, naast de mineralogie, ook de geadsorbeerde kationen. Vrijwel alle geadsorbeerde kationen van de Blija 2021 calciumionen, terwijl dit voor de Blija2020 slechts ongeveer de helft is. De andere helft van de kationen bestaan uit éénwaardige natrium en kaliumionen. De Blija 2020 is waarschijnlijk, door het hogere gehalte aan reactieve kleimineralen én het lagere gehalte aan Calciumionen, gevoeliger voor zwel en krimp en daarmee structuurvorming. De tweewaardige Calciumkationen beperken de zwellende eigenschappen van klei.



Deze hogere krimp- en zwelgevoeligheid van de Blija 2020 heeft mogelijk meegespeeld in de droge en brokkelige toestand van bij de proef in de Deltagoot. Dit toont het belang van enerzijds het onderzoek naar structuurvorming en de oorzaken daarvan en anderzijds het belang van een vergelijkbare 'state' (bijvoorbeeld de consistentie-index en de maagdelijkheid of mate van veroudering van het materiaal) van kleisoorten bij erosieonderzoek als resultaten vergeleken moeten worden.

Daarnaast is een goede conditie (vochtige, taaie structuur) van de kleibekleding van een dijk altijd van belang.

## 3.4 Nadere analyse structuurvorming

### 3.4.1 Historie

Zoals eerder is vermeld is onderzoek uitgevoerd naar de structuurvorming van 6 kleisoorten die in bakken aan gesimuleerde klimatologische omstandigheden zijn blootgesteld in de zogenaamde bakkentest uit OGD stap 4 [Deltares, 2021a]. De mate van structurering is hierin gekwantificeerd door het opmeten van de spleetbreedte en -diepte met daarbij een visuele beschrijving van de mate van structuurvorming. In Tabel 3.2 worden de resultaten herhaald.

Tabel 3.1 Resultaten metingen aan scheuren.

Kleisoort	Nr.	15-12-2020		24-12-'20	4-1-'21	16-2-2021	
		Breedte	Diepte	Breedte	Breedte	Breedte	Diepte
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Valgenweg D7	1	1,8	10	0,7	0,7	1,7	7
Kwelderdepot	2	1,1	10	0,6	0,7	1,6	15
Klutenplas	3	1,6	8,8	0,4	0,4	1,8	9
Nieuwe Stanzijl	4	1,4	4	0,3	0,5	0,9	2,5
Blija 2020	5	1,2	11	0,2	0,3	1,2	7
Lauwersmeerdijk	6	0,8	12	0,2	0,3	0,8	12
Na .... seizoen		warm		nat	koud	warm	

Tabel 3.2 Visuele beschrijving mate van structurering.

kleisoort	mate van structurering
Valgenweg D7	sterke structurering
Kwelderdepot	Sterke structurering
Klutenplas	sterke structurering
Nieuwe Stanzijl	beperkte structurering
Blija 2020	sterke structurering.
Lauwersmeerdijk	nauwelijks structurering

Na afronding van bovenvermeld rapport is de kennis en beschrijving van de mate van structuurvorming verder ontwikkeld, onder meer tot uiting komend in een protocol voor de beschrijving van profielkuilen [Deltares 2022b] en het verslag van de beschrijving van diverse profielkuilen [Deltares, 2022b]. Op basis van het [Deltares 2021a] rapport en de daarin weergegeven foto's is een heranalyse van de structuurvorming in de bakken uitgevoerd. De foto's uit dat rapport zijn overgenomen in Bijlage B van dit rapport.

In het eerder uitgevoerde onderzoek naar de structuurvorming in de bakken wordt onder structuurvorming vooral de hoeveelheid en vorm van de scheuren bedoeld. In het protocol wordt echter veel meer onder structuurvorming verstaan, het gaat veel meer over de grootte van de bodemaggregaten en de hoeveelheid poriënruimte zoals dat in de regel wordt beschreven in profielkuilen. Doordat de informatie nu alleen uit de foto's is gehaald is deze minder gedetailleerd dan indien een gerichte visuele interpretatie aan de klei zelf uitgevoerd zou worden. Het betreft dus een globale heranalyse waarvan de resultaten niet vergeleken kunnen worden met een volledig onderzoek, zoals bijvoorbeeld uitgevoerd in een profielkuil. De heranalyse is alleen uitgevoerd teneinde betere mogelijkheden te hebben voor de vergelijking met de resultaten van het mineralogisch onderzoek.

### 3.4.2 Nieuwe gegevens en waarnemingen

In de rapportage van het onderzoek naar de structuurvorming met de bakkentest is een aantal zaken niet gerapporteerd die evenwel wel nuttig zijn voor een volledige interpretatie,

zoals dat uit recent onderzoek is gebleken. De volgende aanvullende opmerkingen met betrekking tot de voorbehandeling van de klei zijn naderhand gemaakt: de klei is vooraf niet gemengd, maar wel geroerd aangebracht. Het watergehalte is dusdanig aangepast dat de klei voldoende kon worden verdicht, maar er is niet specifiek op de consistentie-index gestuurd. Tijdens de natte seizoenen is de klei regelmatig nat gesproeid op het oppervlak, waarbij in een deel van het kleioppervlak gaten zijn gemaakt zodat het water er makkelijker in kon dringen.

Dit leidt tot de conclusie dat de historie en dus de eventuele mate van rijping en structuurvorming hoogstwaarschijnlijk deels, maar niet helemaal verloren is gegaan. Dit betekent dat de beginconditie van de verschillende kleisoorten niet gelijk zal zijn, hetgeen de interpretatie van de verschillen complexer maakt. De historie van klei verdwijnt ofwel door het intensief mengen van de klei tot een pasta of de klei belasten met een spanning die hoger is dan in het verleden op de klei heeft gerust. Deze spanning wordt vaak gekwantificeerd door de grensspanning. Het elimineren van de voorgeschiedenis van alle kleisoorten die deel uitmaken van een onderzoek naar de mate van structuurvorming is de enige manier om zekerheid te hebben over een gelijkwaardige beginsituatie.

De volgende aanvullende observaties zijn gedaan aan de hand van de gerapporteerde beschrijvingen en de foto's [Deltares, 2021a], waarbij de gesimuleerde seizoenen zoals vermeld in Tabel 3.1 als analysmomenten zijn genomen. Achter de omschrijving van de klimatologische omstandigheden is een gemiddelde omschrijving van de ontwikkelingen weergegeven. De nummers representeren de baknummers/kleisoorten:

#### 3.4.2.1 Na warme periode aan eind eerste cyclus (15-12-2020): initiële scheurvorming

1. Aan oppervlak veel scheurvorming, brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 36 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 278 cm<sup>2</sup>.
2. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, gemiddelde scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 10 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 1000 cm<sup>2</sup>.
3. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 20 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 500 cm<sup>2</sup>.
4. Aan oppervlak veel scheurvorming, brede en smallere scheuren (beperkt gestructureerd in dit rapport), circa 50 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 200 cm<sup>2</sup>.
5. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 20 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 500 cm<sup>2</sup>.
6. Aan oppervlak weinig scheurvorming, smalle scheuren (nauwelijks gestructureerd in dit rapport), circa 3 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 3300 cm<sup>2</sup>.

#### 3.4.2.2 Na natte periode in tweede cyclus (24-12-2020): dichtzwellen of verdere ontwikkeling scheuren

1. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 15 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 667 cm<sup>2</sup>.
2. Aan oppervlak weinig scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 6 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 1600 cm<sup>2</sup>.
3. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 10 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 1000 cm<sup>2</sup>.
4. Aan oppervlak weinig scheurvorming, smalle scheuren (beperkt gestructureerd in dit rapport), circa 4 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 2500 cm<sup>2</sup>.
5. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 1 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 10000 cm<sup>2</sup>.
6. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, smalle scheuren (nauwelijks gestructureerd in dit rapport), circa 2 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 5000 cm<sup>2</sup>.

#### 3.4.2.3 Na koude periode in tweede cyclus (4-1-2021): geen substantiële verandering

1. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 15 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 667 cm<sup>2</sup>.
2. Aan oppervlak weinig scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 6 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 1600 cm<sup>2</sup>.

3. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 15 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 667 cm<sup>2</sup>.
4. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, smalle scheuren (beperkt gestructureerd in dit rapport), circa 2 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 5000 cm<sup>2</sup>.
5. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 1 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 10000 cm<sup>2</sup>
6. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, smalle scheuren (nauwelijks gestructureerd in dit rapport), circa 2 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 5000 cm<sup>2</sup>.

#### 3.4.2.4 Eindsituatie (16-2-2021): veelal weer terugkeer van de situatie aan het eind van de warme cyclus (§ 3.4.2.1)

1. Aan oppervlak veel scheurvorming, brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 30 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 330 cm<sup>2</sup>.
2. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, zeer brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 8 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 1250 cm<sup>2</sup>.
3. Aan oppervlak gemiddelde scheurvorming, zeer brede scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 20 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 500 cm<sup>2</sup>.
4. Aan oppervlak veel scheurvorming, smalle scheuren (beperkt gestructureerd in dit rapport), circa 40 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 250 cm<sup>2</sup>.
5. Aan oppervlak gemiddeld/veel scheurvorming, brede en smalle scheuren (sterk gestructureerd in dit rapport), circa 20 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 500 cm<sup>2</sup>.
6. Aan oppervlak nauwelijks scheurvorming, smalle scheuren (nauwelijks gestructureerd in dit rapport), circa 4 vakken. Dit geeft een gemiddeld polygoon oppervlak van 2500 cm<sup>2</sup>.

#### 3.4.2.5 Inspectie op 23 maart 2021

1. Bovenste 10 cm klei lijkt veel massiever dan onderin, grote brokken. Scheurvorming gaat niet diep door.
2. Scheuren gaan tot vrijwel het zand door, homogeen pakket, vrij massief met grote brokken.
3. Ondiepe scheurvorming, materiaal valt uit elkaar in kleine brokken.
4. Vergelijkbaar met 1, bovenste 10 cm veel massiever en met grote brokken.
5. Scheuren lijken tot halverwege te gaan, vrij homogeen materiaal zonder duidelijke overgangen. Grote brokken.
6. Scheuren lopen diep door, hier is een duidelijk verschil tussen bovenste 20 cm en daaronder. Ziet er schraal uit.

#### 3.4.2.6 Resultaat nieuwe beoordeling

Op basis van bovenstaande analyses is gekomen tot de volgende indeling van gestructureerdheid, op een schaal van 1 tot 10, waarbij 10 een sterk gestructureerde situatie beschrijft. Er wordt hier een afwijkende indeling gebruikt dan in het [Deltares 2022b] protocol, omdat de in dit rapport beschreven heranalyse een veel minder volledige analyse betreft waarvan het resultaat niet kan worden vergeleken met een profielkuilonderzoek, zoals dat gebruikelijk is bij de beschrijving van structuurvorming.

Tabel 3.3 Eindoordeel mate van structuurvorming (op basis van inspectie op 23 maart 2021).

Kleisoort	mate van structurering (1-10)
Valgenweg D7	6
Kwelderdepot	8
Klutenplas	5
Nieuwe Statenzijl	3
Blija	5
Lauwersmeerdijk	6

Bij de beoordeling van de Lauwersmeerdijkklei moet opgemerkt worden dat deze klei zeer nat was bij de start, maar ook de Blija klei was zeer nat: de consistentie-index van beide kleisoorten was (veel) lager dan die bij de aanleg van een dijk toegestaan is (0.75). Dit zal consequenties hebben voor de mate van geconstateerde gestructureerdheid van de Lauwersmeerdijkklei. Het is zeer aannemelijk dat, indien de klei met een met de overige kleisoorten vergelijkbare consistentie-index, er beduidend minder structuurvorming zou zijn opgetreden. Het relatief overvloedige water kon makkelijk verdampen zodat zuurstof sneller het profiel in kon dringen.

Dit zal samenhangen met de relatief lage plasticiteitsindex van beide kleisoorten: bij een lage plasticiteitsindex is het lastiger precies het juiste watergehalte toe te voegen om een bepaald gedrag van de klei te verkrijgen: er wordt snel teveel water aan toegevoegd. Deze lage consistentie-indexen zorgen er ook voor dat de begincondities van deze twee kleisoorten niet goed vergelijkbaar zijn met de overige kleimonsters, zodat de resultaten van de structuurvorming dat ook niet zijn.

In vergelijking met de eerder uitgevoerde beoordeling van de structuurvorming valt op dat de toegenomen kennis vooral tot meer onderscheid tussen de kleisoorten heeft geleid met betrekking tot de in eerste instantie als sterk beoordeelde structurering. De Nieuw Statenzijlklei heeft in beide gevallen een beperkte structurering als beoordeling gekregen.

### 3.5 Analyse

In Tabel 3.4 wordt een aantal parameters waaronder de consistentie-index aan het begin van de bakkentest voor de zes onderzochte kleisoorten weergegeven. Hierbij moet worden opgemerkt dat de lage relatieve dichtheid van de Blija 2020 en Lauwersmeerdijkklei samenhangt met de lage consistentie-index: hoe lager de consistentie-index, hoe hoger het relatieve watergehalte (het watergehalte minus de vloeigrens ten opzichte van de plasticiteitsindex).

Tabel 3.4 Aantal gegevens van de kleisoorten bij de start van de bakkentest experimenten.

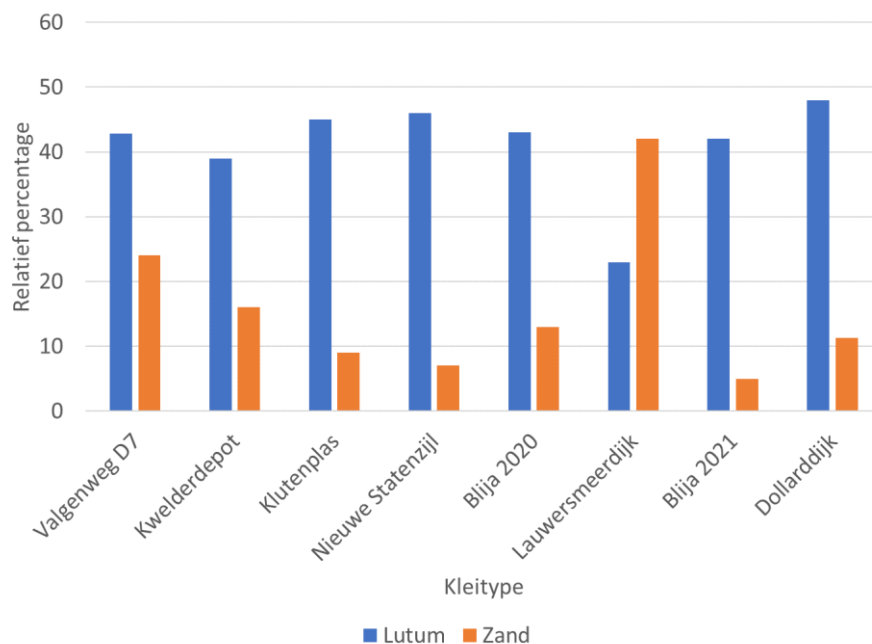
Kleisoort	Nr.	Watergehalte (%)	Consistentie-index (-)	Relatieve dichtheid (%)
Valgenweg D7	1	41,0	0,89	105
Kwelderdepot	2	45,1	0,87	101
Klutenplas	3	48,4	0,77	101
Nieuwe Statenzijl	4	30,5	0,84	101

Kleisoort	Nr.	Watergehalte (%)	Consistentie-index (-)	Relatieve dichtheid (%)
Blija 2020	5	34,3	0,66	89
Lauwersmeerdijk	6	30,9	0,51	88

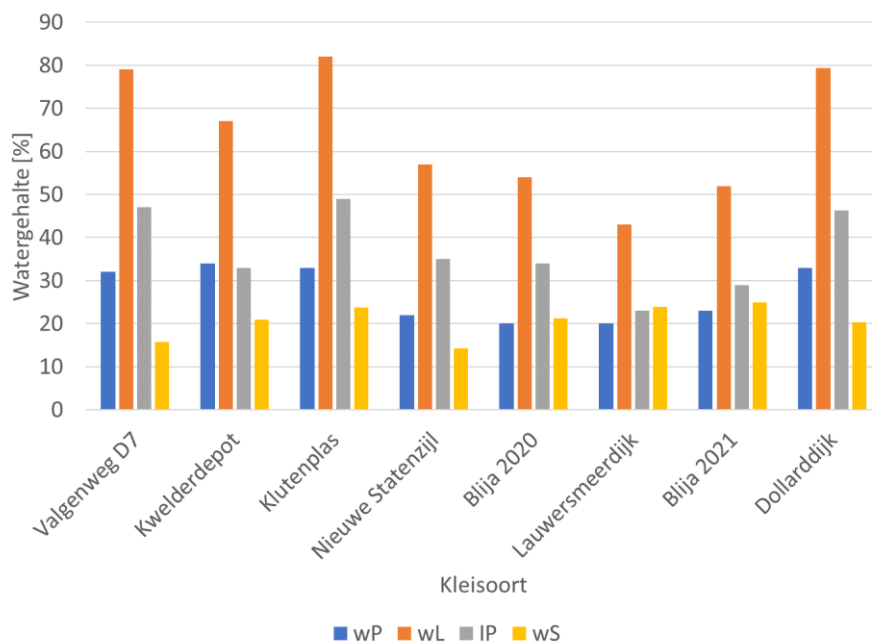
Het optimale watergehalte (het watergehalte waarbij de hoogste droge dichtheid kan worden bereikt, zoals bepaald met de meerpunts proctorproef) van beide kleisoorten ligt rond de 20%. Het aanvangswatergehalte ligt tussen 30 en 35%: het halen van een hoge proctordichtheid was derhalve onmogelijk bij de Blija en Lauwersmeerdijkklei. Dit hoge watergehalte zal invloed hebben gehad op de geconstateerde structuurvorming, dat wil zeggen een sterkere structuurvorming, zoals te zien is in Tabel 3.3. In de regel wordt namelijk juist een geringe structuurvormingsgevoeligheid gevonden bij een schrale klei (klei met een laag lutumgehalte) zoals de Lauwersmeerijkklei. Ook de geconstateerde structuurvorming van de Blija 2020 klei zal hierdoor beïnvloed zijn.

De beperkte structuurvorming van de Nieuwe Statenzijklei is niet duidelijk te herleiden naar de resultaten van zowel de korrelverdeling (Figuur 3.8) als de mineralogische bepalingen. De lutumfractie is juist relatief hoog, alleen de krimprens (Figuur 3.10) van deze klei is wel extreem laag, hoewel die van de Valgenwegklei maar heel weinig hoger is.

De volgens de nieuwe analyse meest gestructureerde klei na afloop van de opeenvolging van de gesimuleerde seizoenen, de Kwelderdepotklei, heeft overwegend gemiddelde eigenschappen. Zowel met betrekking tot het zandgehalte (42%) als het percentage kleien (34%), maar ook de samenstelling van de kleimineralen is gemiddeld. Ook de plasticiteitsgrenzen vertonen een gemiddeld beeld voor deze klei. De hoge mate van gestructureerdheid kan derhalve niet gekoppeld worden aan de intrinsieke eigenschappen van het materiaal. Het materiaal is wel aan te duiden als jonge klei, wellicht dat de sterkte structuurvorming hiermee samenhangt. Het is de verwachting dat jonge verse klei gevoeliger is voor structuurvorming.



Figuur 3.9 Overzicht van het lutum- en zandgehalte van de beproefde monsters.



Figuur 3.10 Overzicht van de plasticiteitsgrenzen van de beproefde monsters.

Waarin:

w<sub>P</sub> : uitrolgrens.

w<sub>L</sub> : vloeigrens.

I<sub>P</sub> : plasticiteitsindex.

w<sub>S</sub> : krimpgrens.

Zoals hiervoor beschreven is de mate van structurering, naast de (gesimuleerde) klimatologische omstandigheden, afhankelijk van de wijze van aanleg, het watergehalte, de verdichtingsgraad en dergelijke. Echter, ook de voorgeschiedenis (mate van veroudering) is van belang: hoe lang een klei al heeft kunnen rijpen voordat de experimenten beginnen. De verschillende kleisoorten zijn voorafgaande aan de bakkentest niet intensief gemengd waardoor de voorgeschiedenis niet geheel zal zijn verdwenen. Een volkomen maagdelijke



klei (een klei waarin geen historie meer aanwezig is) zal meer rijping te zien geven dan een vergelijkbare klei die al in enige mate gerijpt en gestructureerd is geweest en waaruit die historie niet geheel is verdwenen. Het is aannemelijk dat een bepaalde grenstoestand moet worden overschreden voordat er sprake kan zijn van veranderingen in de structuur. Dit is ook het geval met betrekking tot vervormingen bij verandering van de spanning in cohesief materiaal: pas na het passeren van een grensspanning treden relatief grote vervormingen/veranderingen in het materiaal op.

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

- Consistentie-index, deze moet onderling vergelijkbaar zijn en ook gelijk of hoger dan die wordt voorgeschreven bij deklagen (0,75).
- Mate van verdichting, in termen van meerpuntsproctor. De relatieve dichtheid moet vergelijkbaar zijn om een vergelijkbare mate van uitdroging te krijgen die gerelateerd is aan de samenstelling van het materiaal.
- Gelijkwaardige 'state' van de klei, ofwel voorgeschiedenis. De enige mogelijkheid om een vergelijkbare beginsituatie te verkrijgen is het vooraf intensief mengen van de kleimonsters. Gezien het feit dat het goed mengen van relatief grote hoeveelheden klei problematisch kan zijn, moet bezien worden of goede kleimengers voorhanden zijn om klei met een hoge consistentie-index intensief te mengen.
- Gelijkwaardige omstandigheden, bijvoorbeeld een vergelijkbaar bevochtigingsproces.

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

- Grotere hoogte van de kleilagen (bijvoorbeeld een halve meter), zodat de hele zone die in de regel onderhevig is aan structuurvorming wordt beschouwd. De totale test zal hierdoor langer duren, echter de snelheid van structuurvorming met de diepte zal hier naar verwachting niet noemenswaardig doen toenemen.
- De installatie van tensiometers en TDR's op verschillende niveaus om de ontwikkeling in zuigspanning en vochtinhouding te volgen. Ook hiervoor is het beter dikkere kleilagen te onderzoeken.
- Het vaststellen van de mate van structuurvorming door middel van het opgestelde protocol voor veldonderzoek in profielkuilen [Deltares, 2022b].
- Indien de invloed van een initiële rijpingsgraad op de uiteindelijke rijpingsgraad wordt onderzocht is het advies meerdere parallel lopende proeven te doen op één kleisoort met als start verschillende rijpingsgraden. Bij het hierbij vergelijken van verschillende kleisoorten lopen alle mogelijke invloeden op de rijpingsgraad door elkaar.

## 4 Conclusies

Er is aanvullend onderzoek uitgevoerd op de zes kleisoorten die eerder met de zogenaamde bakkentest (OGD stap4) beproefd zijn op structuurvorming. Naast deze kleisoorten zijn twee andere kleisoorten in dit onderzoek meegenomen, waarvan de resultaten uit eerder Deltagootonderzoek aanleiding waren om deze kleisoorten nader te onderzoeken. Naast het opnieuw uitvoeren van geotechnische classificatiebepalingen is voor de acht kleisoorten de mineralogie van zowel het totale kleimonster als alleen de lutumfractie bepaald. Ook is een aanvullende heranalyse van de structuurvorming op basis van het eerder opgestelde protocol [Deltares 2021a] uitgevoerd. Uit deze heranalyse volgde een aangepaste indeling op een schaal van 1 tot 10 in mate van structuurvorming. Normaal gesproken wordt structuurvorming in situ vastgesteld bij bijvoorbeeld een profielkuil. In genoemde aanvullende analyse is echter gebruik gemaakt van een rapport en de daarin weergegeven foto's. Hoewel er sinds 2021 meer informatie over structuurvorming is verkregen dat heeft geresulteerd in een protocol voor veldonderzoek [Deltares, 2022b], is het uitvoeren van een dergelijke beschrijving niet ideaal voor de beoogde aanvullende analyse op basis van foto's en een rapport. Om deze reden is, voor het hier gerapporteerde onderzoek, een andere methodiek aangehouden die los staat van het in [Deltares 2022b] gepubliceerde protocol. Het verdient daarnaast de aanbeveling om meer metingen en observaties te doen tijdens de uitvoering van de bakkentest in vergelijking met die in [Deltares 2021a] beschreven zijn. Hiervoor worden in dit rapport aanbevelingen gedaan, naast de waarnemingen en beschrijvingen die in het protocol [Deltares 2022b] worden beschreven.

Uit het gepresenteerde onderzoek kan geconcludeerd worden dat relaties tussen de structuurvorming en de uitgevoerde bepalingen niet eenvoudig zijn te leggen, wat mogelijk samenhangt met het feit dat het aan goede vergelijkbare resultaten uit het structuurvormingsonderzoek (de bakkentest) ontbreekt. Immers, de verschillende kleisoorten zijn voorafgaande aan de bakkentest niet in een goed vergelijkbare uitgangspositie gebracht doordat de kleimonsters niet intensief is gemengd voorafgaand aan het onderzoek. Ook de verschillen in de consistentie-index bij het mengen maken een goede vergelijking lastig. De verschillen in mineralogie tussen de verschillende kleisoorten hangen met name samen met het kwartsgehalte van de klei. Het kwartsgehalte is vrijwel volledig omgekeerd evenredig met het gehalte aan reactieve kleimineralen (2:1 silicaten).

Er zijn nieuwe bepalingen van de eigenschappen van klei in dit rapport opgenomen, te weten de krimpgrens en de activiteit. De krimpgrens maakt deel uit van de oorspronkelijke Atterbergse grenzen en geeft het watergehalte waarbij klei scheuren gaat vertonen. Omdat gebleken is dat structuurvorming in hoge mate bepalend is voor de erosieve eigenschappen van klei, is deze krimpgrens een belangrijke parameter. Immers, hoe lager de krimpgrens hoe verder de klei uit kan drogen voordat zich scheuren gaan ontwikkelen en dus hoe minder de klei gevoelig is voor structuurvorming. De activiteit is het quotiënt van de plasticiteitsindex en de lutumfractie en is daarmee een indicator van in hoeverre de kleimineralen in de lutumfractie reactieve eigenschappen vertonen. Die reactiviteit is gekoppeld aan de hoeveelheid reactieve kleimineralen die in de regel voor een grotere plasticiteit zorgen. De activiteit van de klei blijkt een relatie te hebben met de uitrol- en vloeigrens, maar het verband is niet sterk.

Uit de resultaten van de mineralogische samenstelling volgt dat de grootste variatie tussen de monsters de grootte van de kwartsfractie en het gehalte aan reactieve kleimineralen betreft. Deze twee zijn sterk gecorreleerd. De overige mineralen hebben ofwel een gering aandeel en/of zijn vergelijkbaar tussen de monsters. Verder blijkt de grootte van de kwartsfractie goed te correleren met de fractie > 2µm. Daarom is de uitvoering van een uitgebreide bepaling van de mineralogie (behoudens de kleimineralen in de lutumfractie)

waarschijnlijk niet altijd nodig. De korrelverdeling geeft al een goede indicatie van het kwartsgehalte.

In de lutumfractie zijn significante verschillen gevonden met betrekking tot het relatieve aandeel van de reactieve kleimineralen en de eigenschappen daarvan, uitgedrukt in het specifiek oppervlak, de kation uitwisselingscapaciteit (CEC) en de typen geadsorbeerde kationen. Deze eigenschappen van de kleimineralen zijn medebepalend voor de eigenschappen van de klei en geven derhalve mede inzicht in de reactiviteit van de kleimineralen. Bij vrijwel alle kleimonsters bestaan de geadsorbeerde kationen voor het overgrote deel uit calciumionen. Deze tweewaardige kationen beperken de gevoeligheid voor krimp en zwel, zodat het effect van de mineralogie minder tot uiting komt.

Uit de resultaten van de bepalingen blijkt de krimpgrens voor de meeste onderzochte kleisoorten een vergelijkbare waarde te hebben, zo tussen 20% en 25%. Twee kleisoorten (Valgenweg D7 en Nieuw Statenzijl) hebben een afwijkend lage krimpgrens van 14% tot 16%. Ondanks de verschillen is geen duidelijke relatie met de mate van structuurvorming in de bakkentest gevonden. In het algemeen is de krimpgrens wel van belang bij onderzoek naar structuurvorming en erosiegevoeligheid.

Ook uit de resultaten van de mineralogische bepalingen is geen duidelijk verband gevonden met de mate van structuurvorming die is geconstateerd in de bakkentest. Dit houdt mogelijk verband met de verschillende beginsituatie van de verschillende kleimonsters. Pas na intensieve menging van de monsters verdwijnt alle historie uit de klei en is er sprake van 'maagdelijk gedrag'. Zonder dit zal er altijd sprake blijven van een (onbekend) verschil in mate van rijping tussen kleimonsters, hetgeen effect zal hebben op de geconstateerde mate van rijping en structuurvorming. Een jonge, ongerijpte klei zal naar verwachting eerder en meer structuurvorming laten zien dan een gerijpte, verdichte klei bij overigens vergelijkbare omstandigheden als verdichtingsgraad en consistentie-index.

In het rapport worden aanbevelingen gedaan met betrekking tot de voorbehandeling van klei teneinde een beter vergelijkbare uitgangspositie te krijgen voor een eventueel nieuw onderzoek naar structuurvorming in de bakkentest. Ook worden aanbevelingen gedaan om bij een dergelijk onderzoek extra metingen uit te voeren. Ontwikkelingen in de klei in termen van het verloop over de diepte in watergehalte en zuigspanning kunnen worden gevolgd, zodat de (rijpings-)processen in de klei zelf beter zichtbaar zijn. Tenslotte wordt geadviseerd om de analyse van de structuurvorming conform het door Deltares opgestelde protocol voor veldonderzoek in profielkuilen [Deltares 2022b] uit te voeren. Hierbij is het gewenst dat de laag klei in de bakkentest wat dikker is (rond de 0,5 m). Het volgen van dit protocol in de heranalyse was niet mogelijk door gebrek aan gegevens. De resultaten uit de heranalyse met schaal van 1 tot 10 in mate van structuurvorming en de indeling volgens het [Deltares 2022b] protocol zijn onderling dan ook niet vergelijkbaar.

De doelstelling van het project 'Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in het kader van demonstratieproject Groene Dijk' is meer inzicht te krijgen in gerijpte (bagger)kleien en of dit in toekomstige dijkversterkingen kunnen gebruiken. Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat de klei die normaal standaard in dijken wordt toegepast een vergelijkbare oorsprong heeft en die, onder meer, door bodemvormende processen gedurende meerdere honderden jaren, in de huidige toestand is gekomen. Door de geringe tijd tussen afzetting en toepassing moeten hiertoe enerzijds speciale voorbehandelingen voor toegepast worden maar ook andere keuringsnormen voor opgesteld worden. Bovendien is het mogelijk dat het ontwerp hier mogelijk op worden aangepast. Het nu uitgevoerde onderzoek is een eerste stap in de vaststelling van deze beoordeling. Uiteindelijk moet dit onderzoek in richtlijnen uitmonden die toepassing van deze alternatieve kleibron mogelijk maken, daar is aanvullend onderzoek voor nodig. Het onderzoeksprogramma 'Dubbele dijk in Deltagoot' maakt gebruik van de resultaten van het onderzoek dat onder meer in dit verslag gerapporteerde resultaten van het onderzoeksprogramma 'Onderzoek geschiktheid Deltaklei in het kader van het demonstratieproject Brede Groene dijk'.

Echter, ook bij bestaande kleien spelen zich processen zich af die invloed heeft op de erosiegevoeligheid van deze klei, zoals de hier onderzochte structuurvorming. De resultaten van de proeven op de dijk bij Blija tonen dit aan. Dit is tot nu toe niet in de huidige beoordelingssystematiek meegenomen. Dit onderzoek draagt dus ook bij aan een verbetering van de generieke beoordelingscriteria zoals die momenteel bij 'dijkenklei' wordt toegepast.

# Literatuur

[Deltares, 2021a]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 4: Structuurvorming in klei van Kleirijperij na versnelde seizoenen, 11205846-002-GEO-0008, april 2021.

[Deltares, 2021b]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven, 11206194-002-HYE-0014, oktober 2021

[Deltares, 2022a]

Erosie van kleibekleding met gras op boventalud van Waddenzeedijken: Analyse van de Deltagootproeven en berekeningen met OpenFoam, 11204841-006-HYE-0012, augustus 2022.

[Deltares, 2022b]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei, Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk, 11207091-010-GEO-0002, oktober 2022

[Moore&Reynolds, 1997]

Moore, D.M; Reynolds, R.C. jr.: X-ray diffraction and the identification of clay minerals, 2<sup>nd</sup> edition. Oxford University Press, 1997.

[Özemir, 2017]

Özdemir, Nutullah; Gülser, Coşkun: Clay activity index as an indicator of soil erodibility, Eurasian J Soil Sci 2017, 6 (4) 307 – 311

[TAW, 1996]

Technische Adviescommissie Waterkeringen, 1996. Technisch rapport geotechnische classificatie van veen, TAW.

[Yang 2018]





# A Beschrijving procedures bepaling mineralogie

Tabel A.1 Eigenschappen van de bulk XRD analyse.

Parameter	Omschrijving
Analyse	Bulk XRD analyse
Monsterpreparatie	geautomatiseerde natte maling in alcohol en specifieke voorbehandeling om voorkeursrichting te voorkomen
Diffractometer	Bruker DB Advance, XE-T detector Cu-K $\alpha$ straling
Data behandeling	Intern

Tabel A.2 Eigenschappen bepaling van de gedetailleerde kleianalyse mbv XRD.

Parameter	Omschrijving
Analyse	Klei extractie en XRD analyse
Monsterpreparatie	Chemische voorbehandeling om cementeermiddelen te verwijderen gevolgd door een extractie van de <2 $\mu$ m fractie door opeenvolgende centrifugaties
Diffractometer	Bruker DB Advance, XE-T detector Cu-K $\alpha$ straling
Data behandeling	Intern

Tabel A.3 Eigenschappen bepaling van de BET analyse (specifiek oppervlak).

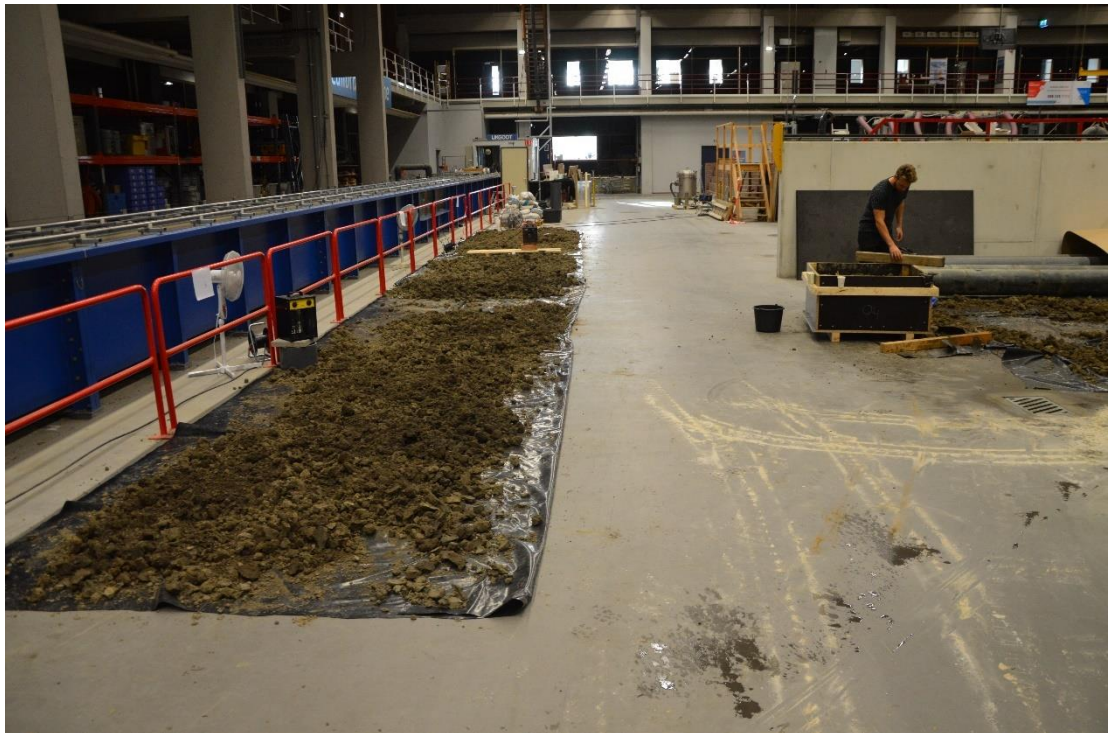
Parameter	Omschrijving
Analyse	Multipoint BET
Monsterpreparatie	Ontgassing door verhitting gedurende 2 uur onder hoog vacuum
Diffractometer	Quantachrome Autosorb
Adsorptiegas	N <sub>2</sub>
Temperatuur tijdens analyse	72.35 K (vloeibaar stikstof)

Tabel A.4 Eigenschappen van de bepaling van de uitwisselbare kationen.

Parameter	Omschrijving
Analyse	Chemische analyse van uitwisselbare kationen
Monsterpreparatie	Extractie van de <2 $\mu$ m-fractie door sequentieel centrifugeren
Diffractometer	Bruker DB Advance, XE-T detector Cu-K $\alpha$ straling

## B Foto's structuurvormingsonderzoek bakken klei

### B.1 Beginsituatie (5-11-2020)



*Figuur B.1 Klei drogen om de juiste consistentie te krijgen voor het aanbrengen in de bakken.*



*Figuur B.2 Steekringmonster na het aanbrengen van de klei in de bak.*



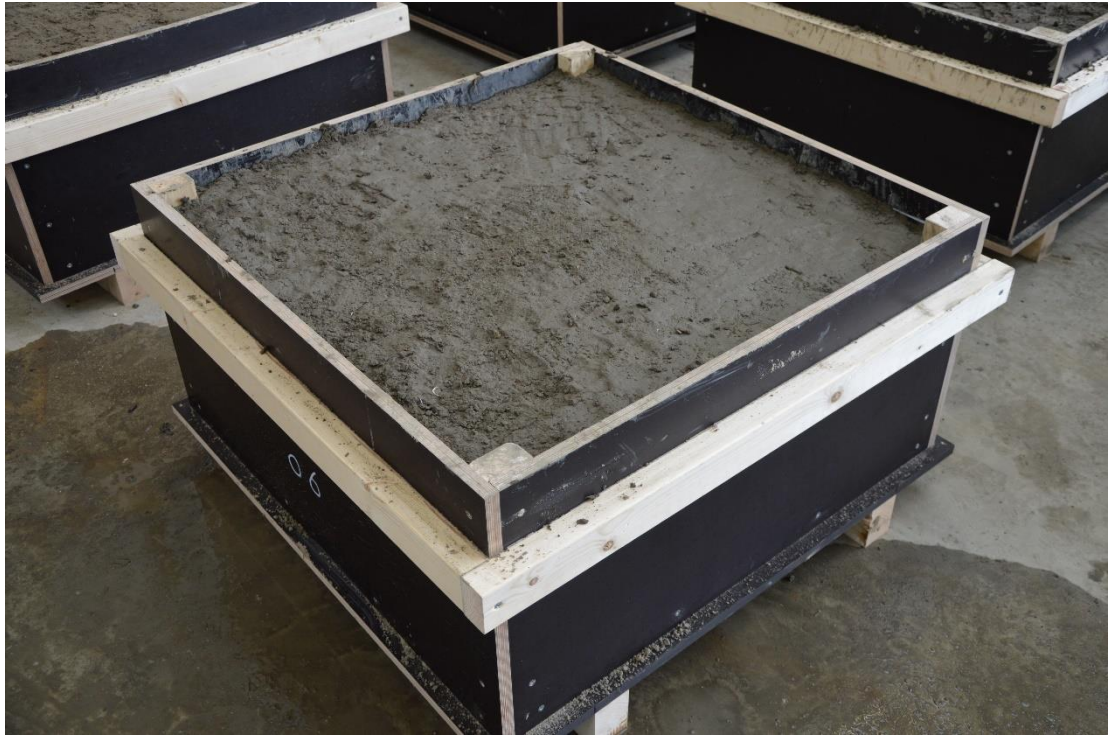


*Figuur B.3 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.4 Klei 5: Blija.*





*Figuur B.5 Klei 6: Lauwersmeerdijk.*

## B.2 Na warme periode aan eind eerste cyclus (15-12-2020)



*Figuur B.6 Klei 1: Valgenweg D7.*





*Figuur B.7 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.8 Klei 3: Klutenplas.*





*Figuur B.9 Klei 4: Nieuw Statenzijl.*



*Figuur B.10 Klei 5: Blija.*





*Figuur B.11 Klei 6: Lauwersmeerdijk.*

### B.3 Na natte periode in tweede cyclus (24-12-2020)



*Figuur B.12 Klei 1: Valgenweg D7.*





*Figuur B.13 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.14 Klei 3: Klutenplas.*





*Figuur B.15 Klei 4: Nieuwe Statenzijl.*



*Figuur B.16 Klei 5: Blija.*





*Figuur B.17 Klei 6: Lauwersmeerdijk.*

#### B.4 Na koude periode in tweede cyclus (4-1-2021)



*Figuur B.18 Klei 1: Valgenweg D7.*





*Figuur B.19 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.20 Klei 3: Klutenplas.*





*Figuur B.21 Klei 4: Nieuwe Statenzijl.*



*Figuur B.22 Klei 5: Blija.*





*Figuur B.23 klei 6: Lauwersmeerdijk.*

## B.5 Eindsituatie (16-2-2021)



*Figuur B.24 Klei 1: Valgenweg D7.*





*Figuur B.25 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.26 Klei 3: Klutenplas.*





*Figuur B.27 Klei 4: Nieuwe Statenzijl.*



*Figuur B.28 Klei 5: Blija.*





*Figuur B.29 Klei 6: Lauwersmeerdijk.*

## B.6 Inspectie op 23 maart 2021



*Figuur B.30 Klei 1: Valgenweg D7.*





*Figuur B.31 Klei 2: Kwelderdepot.*



*Figuur B.32 Klei 3: Klutenplas.*





Figuur B.33 Klei 4: Nieuwe Statenzijl.



Figuur B.34 Klei 5: Blija.





*Figuur B.35 Klei 6: Lauwersmeerdijk.*

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](http://www.deltares.nl)