

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei ihkv demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 2B: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei ihkv demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 2B: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk

Auteur(s)

Harry van Essen

Partners

Erik Jolink

Henk van Norel en Marco Veendorp (Waterschap Hunze & Aa's)

Ulrich Förster (Deltares)

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei ihkv demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 2B: Resultaten laboratoriumproeven op klei proefdijk

Opdrachtgever	TKI Deltatechnologie p/a Vereniging van Waterbouwers
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	Erosiegevoeligheid, roto-erosieproeven, gerijpte baggerspecie, ongedraineerde sterkte, heterogeniteit

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	20-12-2022
Projectnummer	11207091-005
Document ID	11207091-005-GEO-0006
Pagina's	48
Classificatie	
Status	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 dijkklei 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 voorliggend rapport zijn de resultaten gerapporteerd van de uitgevoerde laboratoriumexperimenten op de klei van de proefdijk bij de Dollard. De proefdijk is opgebouwd uit twee verschillende soorten gerijpt baggerslib, klei uit de kwelder en één referentieklei.

Naast roto-erosieproeven zijn krimpgrensbepalingen en triaxiaalproeven uitgevoerd. De triaxiaalproeven zijn uitgevoerd ter bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte en de beoordeling van het verschil in rijpingsgraad tussen de monsters.

Ook zijn in deze rapportage de resultaten opgenomen van bepalingen van het water- en zoutgehalte van drie monsters op verschillende dieptes in elk van de vier delen van de proefdijk ter beoordeling van heterogeniteit en eventuele uitspoeling van zouten.

In een aanpalend onderzoek zijn in situ bepalingen gedaan van de ongedraineerde schuifsterkte met behulp van de torvane en pocket penetrometer uitgevoerd in profielkuilen die in elk van de vakken van de proefdijk gegraven zijn. Deze resultaten zijn ter vergelijking opgenomen in dit rapport.

De resultaten laten zien dat de eigenschappen van drie van de vier verschillende kleien (alle behalve de referentieklei) redelijk vergelijkbaar zijn ondanks de verschillen: het bezwijktoerental van deze drie kleien vertoont een overlap. Het materiaal in vak 3 blijkt het meest resistent tegen erosie.

Tussen 600 en 1000 tpm (stroomsnelheid 0.8 tot 1.3 m/s) begint het materiaal te eroderen, en globaal tussen de 1000 en 1400 tpm zijn de monsters bezweken (d.w.z. meer dan 30% opgetreden massaverlies).

Ook de resultaten van de bepaling van de krimpgrens en de triaxiaalproeven laten zien dat de verschillen tussen de kleisoorten niet groot zijn. Alleen het materiaal in vak 1 (de referentieklei) vertoont een significante grote variatie in de resultaten, zowel op het gebied van de roto-erosieproeven als de krimpgrensproeven.

Uit de vergelijking van de sterktemetingen met die van de roto-erosieproeven volgt dat de metingen van de ongedraineerde schuifsterkte niet eenvoudig is te correleren met de

erosiebestendigheid, hetgeen mogelijk samenhangt met het verschil in spanningen tijdens het erosieproces en die opgelegd bij de triaxiaalproeven. Een andere uitvoeringswijze van de triaxiaalproeven kan hier wellicht meer duidelijkheid in verschaffen. Verder blijken de in-situ metingen significant hogere ongedraineerde schuifsterktes op te leveren dan die zoals bepaald met de triaxiaalproef. Een verklaring voor dit laatste is nog niet gevonden, maar kan samenhangen met uitdroging van de wand van de profielkuilen waarin de metingen uitgevoerd zijn.

Opvallend is dat de resultaten van de roto-erosieproeven niet overeenstemmen met de indeling waarop de erosiecategorieën [RAW] zijn gebaseerd. Alle vier typen klei die zijn getest vallen ruim in erosiecategorie 3 op basis van de plasticiteitsgrenzen terwijl alle kleisoorten bezwijktoerentallen lieten zien die tot de meest erosiebestendige groep [TAW, 1996] behoort, hoewel drie van de vier soorten ook lagere bezwijktoerentallen lieten zien. In verband hiermee moeten de verschillen worden vermeld die zijn geconstateerd tussen de resultaten van de bepalingen op monsters genomen tijdens de aanleg van de proefdijk en die in het kader van dit onderzoek genomen monsters. Er zijn significante verschillen tussen de plasticiteitsgrenzen geconstateerd zoals die tijdens de aanleg en ten behoeve van dit onderzoek zijn gemeten. Waar tijdens de aanleg het materiaal overwegend in erosiebestendigheidscategorie 1 viel, vallen alle monsters nu dus duidelijk in categorie 3. Een oorzaak hiervoor is nog niet gevonden.

Eén van de vragen die bij dit onderzoek speelde was in hoeverre veroudering of rijping van de klei na aanleg van de proefdijken in de resultaten terug te zien is. Hoewel de resultaten van de triaxiaalproeven (op monsters vanaf 0,5 m - MV tot 1 m - MV) aanleiding geven te veronderstellen dat enige mate van veroudering plaats heeft gevonden, blijkt uit de verschillen in de roto-erosietesten met monsters van verschillende diepte (vanaf 0,5 m – MV tot 1,5 - MV) dat er in de diepte geen patroon is te onderscheiden. Hoewel een aantal proeven bij een te hoog toerental is gestart, heeft dit, zo ver kan worden beoordeeld, geen invloed gehad op het gemiddelde van het bezwijktoerental van een kleisoort. De resultaten van deze niet goed uitgevoerde proeven geven geen aanleiding te veronderstellen dat deze proeven tot afwijkende bezwijktoerentallen hebben geleid. De bezwijktoerentallen liggen in de buurt van de bezwijktoerentallen van de overige monsters uit dat deel van de proefdijk.

De mate van veroudering zoals die is afgeleid uit de triaxiaalproeven komt overeen met de veroudering van het materiaal voor aanleg van de proefdijk, d.w.z. dat op basis van de historie van elke kleisoort een mate van veroudering is vastgesteld waarmee de resultaten van de triaxiaalproeven corresponderen.

Na de rijping in het depot is er hoogstwaarschijnlijk tot het moment van bemonstering geen verdere rijping dieper in de proefdijk opgetreden. Dit volgt ook uit de profielkuilinspecties, waarbij is geconstateerd dat de bodemvorming nog steeds ondiep was (tot 0,1 à 0,3 m diep).

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling	9
2	Beschrijving onderzoekslocaties proefdijk	11
3	Methoden van Onderzoek	13
3.1	Monstername en beproeving	13
3.2	Beschrijving roto-erosiemeterproeven	14
4	Resultaten	16
4.1	Visuele kenmerken van de monsters	16
4.2	Bepalingen op monsters	16
4.3	Watergehalte en zoutgehalte bodemvocht	22
4.4	Resultaten uit roto-erosiemeterproeven	23
4.4.1	Vak1 (Nieuw Statenzijl)	23
4.4.2	Vak 2 (Valgenweg)	25
4.4.3	Vak 3 (Kwelderdepot)	26
4.4.4	Vak 4 (Klutenplas)	27
4.5	Krimpgrens	29
4.6	Triaxiaalproeven	29
5	Bespreking resultaten en conclusies	35
	Literatuur	38
A	Foto's roto-erosieproeven	39
A.1	Vak 1	39
A.2	Vak 2	42
A.3	Vak 3	43
A.4	Vak 4	45
B	Resultaten triaxiaalproeven	47

1 Inleiding

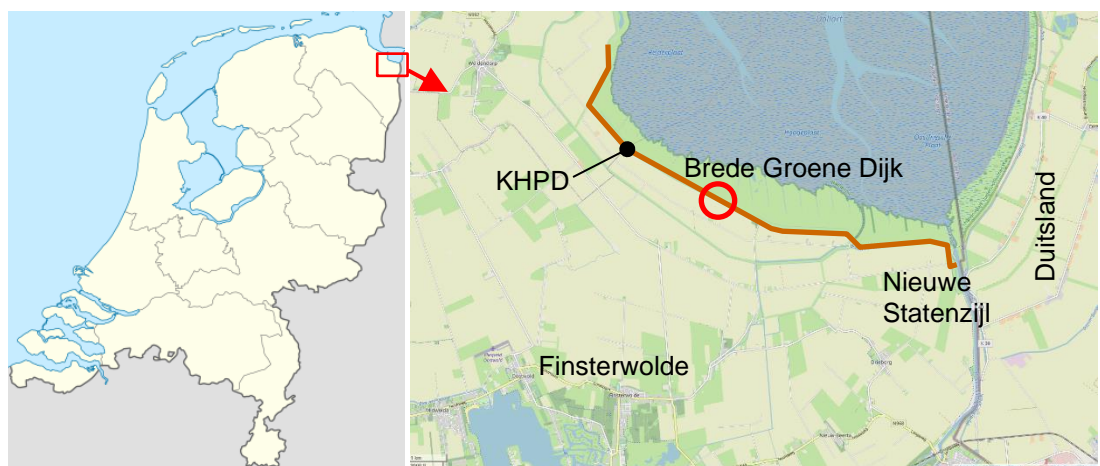
1.1 Achtergrond

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 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.

De proeven die in deze rapportage worden gerapporteerd vallen onder stap 2b: Materiaalonderzoek proefdijk. Het betreft de volgende proeven:

- Roto-erosieproeven.
- Krimp grensbepaling.
- Triaxiaalproeven.

1.2 Doelstelling

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 type 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 dijkklei onder stromingsbelasting. Er kan dan gebruik worden gemaakt van de klassen uit onderstaande Tabel 1.1. 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. Een aspect bij de bepaling van de weerstand tegen erosie en waar tot voor kort weinig rekening mee werd gehouden is de invloed van veroudering/verwerking van de klei. Deze verwerking treedt vooral boven de grondwaterspiegel op ten gevolge van biologische, fysische en chemische processen. Door deze processen ontstaan aggregaten die intern vaak een hoge weerstand tegen verwerking hebben, maar onderling vaak minder samenhang vertonen. Deze processen geven een variatie aan erosiebestendigheid in de diepte. Daarom zijn in de diepte meerdere monsters genomen ten behoeve van de roto-erosiemeterproeven.

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

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

Er kan daarmee een vergelijking worden gemaakt met de resultaten uit roto-erosiemeterproeven op reguliere klei uit historisch onderzoek.

De ongedraineerde sterkte van de klei is naar verwachting positief gecorreleerd met de erosiebestendigheid. In het profielkuilonderzoek is de ongedraineerde schuifsterkte indicatief gemeten met een pocketpenetrometer en een torvane over de diepte van de kuil. Er zijn triaxiaalproeven uitgevoerd om deze meetwaarden te kalibreren.

Van de vier kleisoorten is tevens de krimpgrens bepaald. De krimpgrens is een indicatie van de krimpgevoeligheid van het materiaal: hoe hoger de krimpgrens, hoe eerder de klei zal gaan scheuren bij uitdroging. Dit was ten tijde van het profielkuilonderzoek alleen relevant voor het bovenste deel van de kleidiepte, waar al verdere rijping had plaatsgevonden.

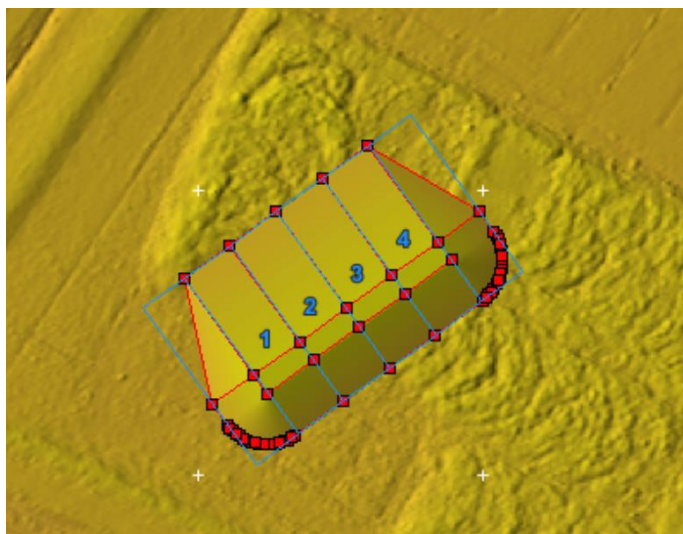
Dit rapport bevat de resultaten van bovenvermelde bepalingen aan monsters genomen uit de proefdijk. Daarnaast zijn de resultaten meegenomen van bepalingen van het zout- en watergehalte van drie over de hoogte verdeelde monsters per vak ter vaststelling van eventuele veroudering/uitdroging of uitspoeling van zouten.

2 Beschrijving onderzoekslocaties proefdijk

Langs de Dollard is in september 2020 een proefdijk aangelegd van circa 40 m lang en 3 m hoog (Figuur 2.1). De proefdijk is ingedeeld in vier segmenten, met in ieder segment een andere soort klei (voor verdere achtergronden, zie Boskalis & Van Oord, 2020). Dit zijn:

- Vak 1: referentieklei, zijnde klasse 1, afkomstig uit een depot bij Nieuw Statenzijl. Heeft voor aanleg 5 jaar in een depot gelegen.
- Vak 2: klei uit het Delfzijldepot (vak D7) van de Kleirijperij, ook bekend als Valgenwegklei. In 2018 is dit als baggerspecie uit de haven van Delfzijl gebaggerd. Vanaf november 2018 is het materiaal in ruggen te drogen gelegd. Bij aanleg van de proefdijk bleek de kern van de ruggen te nat te zijn.
- Vak 3: klei uit het kwelderdepot van de Kleirijperij, afkomstig als baggerslib uit het natuurgebied Polder Breebaart. In de winter van 2019/2020 is dit materiaal in het kwelderdepot ingebracht. Voor de proefdijk is materiaal uit vakken K1 en K2 gebruikt. Klei was nog erg nat vlak voor de aanleg van de proefdijk, zodat ervoor is gekozen alleen de drogere toplaagte gebruiken.
- Vak 4: klei uit de Klutenplas, die in april/mei 2018 is gegraven. Deze klei is gebruikt als ringdijk voor de kleirijperij Kwelder. Een stuk van deze ringdijk (zeezijde vak K1) is gebruikt voor de proefdijk.

Op 20 april 2022 is in elk segment een proefkuil in de kruin van de proefdijk gegraven ten behoeve van een gedetailleerde inspectie van de bodemopbouw, flankerend veldonderzoek en met monsternamen ten behoeve van laboratoriumonderzoek. De kuilen (ongeveer 2x1 m²) zijn aangelegd met een graafmachine tot een diepte van 1.1-1.3 m. De x,y-coördinaten en hoogteligging van het centrum van de kuillocaties zijn voorafgaande aan het graven ingemeten middels een DGPS (Tabel 2.1).



Figuur 2.1 Locatie van de segmenten (uit Boskalis en Van Oord, 2020).

Tabel 2.1 Coördinaten (volgens Rijksdriehoekstelsel) en hoogteligging van het midden van de profielkuilen (voor het afgraven).

Profielkuil	x-coördinaat	y-coördinaat	Maaiveld (m NAP)
Segment 1	269757.8	585921.7	4.27
Segment 2	269766.0	585927.5	4.35
Segment 3	269774.1	585933.4	4.43
Segment 4	269782.3	585939.2	4.47

3 Methoden van Onderzoek

3.1 Monsternamen en bemonstering

De monsters voor het laboratoriumonderzoek zijn gestoken door stalen bussen met een diameter van 10 cm en een lengte van 45 cm met behulp van een kraan verticaal weg te drukken vanaf een diepte van 50 cm en vanaf een diepte van 100 cm (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 Wegdrukken van een steekbus.

In elke kuil zijn drie bussen gestoken, waarvan 1 bus verticaal gestoken op 0,5 m - MV en 2 bussen verticaal op 1 m - MV. De tweede bus op 1 m - MV is gebruikt voor een geotechnische classificatie.

De triaxiaalproeven zijn op de bovenste bus (0,5 m - MV) uitgevoerd.

Op de onderste bus (1,0 m - MV) zijn 2 roto-erosieproeven uitgevoerd (één standaard proef en één gedetailleerde proef).

Zodoende was er onvoldoende materiaal voor een triaxiaalproef over. Daarom zijn alleen triaxiaalproeven uitgevoerd op monsters uit de bovenste bus.

Omdat verwacht werd dat de klei vanaf 1 m - MV wat zachter zou zijn dan de klei gestoken vanaf 0,5 – MV, is als eerste een erosieproef volgens de standaardmethode uitgevoerd op het monster dat gestoken is vanaf 1 m - MV. Dit om een beeld te krijgen van het toerental waarbij erosie begint op te treden.

Naast de monsternamen voor deze proeven is profielkuilonderzoek uitgevoerd [Deltares 2022a, in voorbereiding].

Tevens zijn, als voorbereiding op het meerjarig onderzoek dijkerosie, monsters ten behoeve van JET-testen genomen en is er onderzoek gedaan naar de brokkeligheid van het materiaal in de dijk (Deltares 2022b, rapport 11207091-005-GEO-0001, in wording).

De triaxiaalproeven zijn uitgevoerd conform NEN-EN-ISO 17892-9, de bepaling van de krimpgrens in duplo conform ASTM D-4943.

Daarnaast zijn de volgende geotechnische beproevingen door Wiertsema & Partners uitgevoerd:

- Visuele beschrijving (NEN-EN-ISO 14688).
- Gloeiverlies NEN8991, Bijlage A.
- Erosiebestendigheid (RAW 2020, hfst. 22, par.06, art 06).
- Bepaling van het water- en zoutgehalte bodemvocht op 3 monsters uit elk vak.

3.2 Beschrijving roto-erosiemeterproeven

De erosieproeven zijn uitgevoerd in de roto-erosiemeter. Dit apparaat bestaat uit een met water gevulde trommel met schoepen welke rond een cilindrisch monster draait, zie Figuur 3.2, waardoor er een min of meer laminaire waterstroming aan het oppervlak van het kleimonster optreedt. Het rond het kleimonster stromende water oefent hierbij een schuifkracht uit op het monster, welke gedurende de proef continu wordt gemeten. De massa van het kleimonster wordt geautomatiseerd gemeten tijdens vooraf in te stellen pauzemomenten, waarbij de trommel tijdelijk stilstaat. Dit gebeurt door het monster onder water op te tillen en dan door middel van een krachtsensor het gewicht onder water te meten. Hieruit kan de massa-afname worden bepaald ten opzichte van de massa aan het begin van de proef.

Het bezwijktoerental is het toerental waarbij deze massa-afname groter is dan 30%. Dit bezwijktoerental is relevant in verband met de erosieklasseindeling die in het verleden is gehanteerd (zie Tabel 1.1).

Voor de te beproeven monsters worden de natte dichtheid, watergehalte en droge dichtheid bepaald.

Er zijn verschillende typen roto-erosieproeven uitgevoerd, te weten die volgens de standaard en gedetailleerde procedure.

Bij de standaard procedure is de proef als volgt opgebouwd:

- Verhoging van het toerental elke 10 minuten met 100 tpm (1 tpm = een 360° rotatie per minuut) tot 600 tpm en voor elke verhoging van het toerental een meting van massa en schuifweerstand.
- Gedurende een uur een toerental van 600 tpm met elke 10 minuten een meting van de massa en schuifkracht.
- Verhoging van toerental elke 10 minuten met 100 tpm tot 1200 tpm.
- Gedurende een uur een toerental van 1200 tpm met elke 10 minuten een meting van de massa en schuifkracht. De proef wordt eerder gestopt indien een afname van meer dan 30% van de totale massa is opgetreden.

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

- Start met een toerental dat voor het toerental ligt waarbij bij de standaard procedure erosie is opgetreden¹.
- Dit toerental wordt een uur vastgehouden waarbij elke 10 minuten een meting van de massa en schuifweerstand wordt uitgevoerd.
- Verhoging van het toerental met telkens 50 tpm, waarbij dit toerental gedurende een uur wordt vastgehouden en elke 10 minuten een meting van de massa en schuifkracht wordt uitgevoerd.
- De proef wordt gestopt bij een toerental van 1600 tpm of eerder als een afname van de totale massa van 30% is opgetreden.

¹ De gedetailleerde proeven zijn, voor een deel, bij een wat te hoog toerental van 1000 tpm gestart, waarbij er meteen fors massaverlies optrad. De keuze van het toerental was gebaseerd op eerdere proeven. Idealiter is het doel in de gedetailleerde proef om het massaverlies meer geleidelijk te laten oplopen.

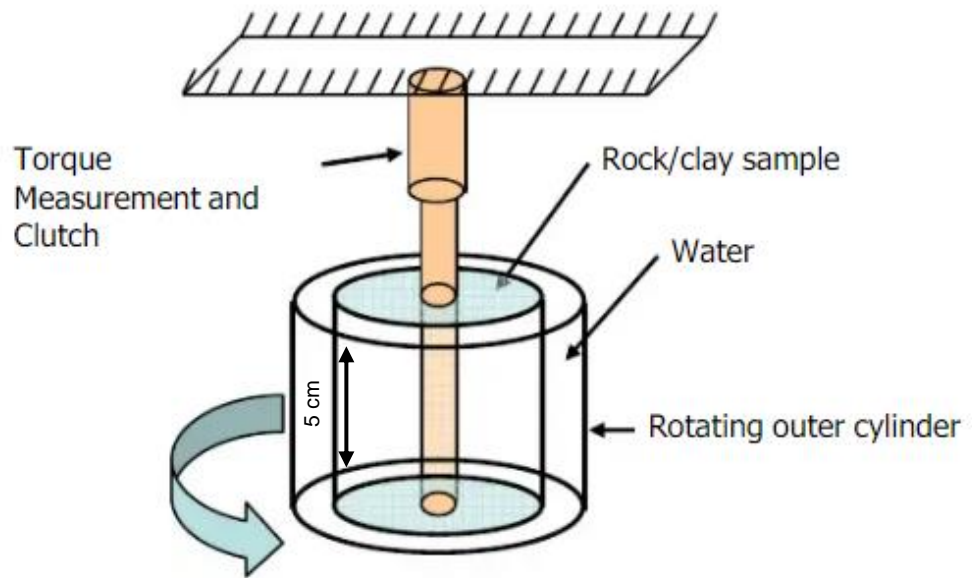


Figure I - 1. Schematic Drawing of the Rotating Erosion Test Apparatus (RETA).

Figuur 3.2 Weringsprincipe van de roto-erosiemeterproef (Rotating Erosion Test Apparatus) [Briaud et al. 2019].

De gedetailleerde methode is nodig om het toerental waarbij massaverlies begint op te treden beter vast te stellen, alsmede het bezwijktoerental bij meer dan 30% massaverlies. Tevens kan in een aantal gevallen, mits de erosie niet te snel verloopt, naast de erosiebestendigheid zo ook de erosiesnelheid (d.w.z. erodeerbaarheid) worden bepaald. Om het aantal proeven beperkt te houden is voor het volgende testschema gekozen. Uitvoering van proeven volgens de standaard procedure op monsters uit de onderste laag en vervolgens proeven volgens de gedetailleerde procedure op monsters uit de onderste (1,0 tot 1,5 m - MV) en bovenliggende laag (0,5 tot 1,0 m - MV). De klei in de bovenliggende laag is vaak wat verder uitgedroogd, is harder en is daarmee meer erosiebestendig. Echter als er veel heterogeniteit is kan je dit mogelijk niet meer terug vinden. Heterogeniteit kan tot uiting komen in het profielkuilonderzoek en betreft meerdere kenmerken zoals mate van structuurvorming, samenstelling, mate van verdichting. Verder is in de 4 kuilen over de diepte het watergehalte en zoutgehalte bepaald op monsters genomen op verschillende dieptes. Dit geeft ook een indruk van de heterogeniteit. Bij de benaming van de proeven is een benaming aangehouden die de locatie van de monsters en de procedure van de proeven beschrijft, bijvoorbeeld:
 Vak(1)_hl: Vak 1, hoog (h) monster (50-95 cm diepte), gedetailleerde of lange procedure (l)
 Vak(4)_ls: Vak 4, laag (l) monster (100-145 cm diepte), standaard procedure (s)

4 Resultaten

In de volgende paragrafen worden de resultaten per testtype beschreven.

4.1 Visuele kenmerken van de monsters

Uit de foto's genomen van de beproefde monsters (bijlage A) volgt dat bij al de onderzochte kleisoorten duidelijk sprake is van een samengesteld materiaal, hetgeen blijkt uit het feit dat er verschillende kleuren duidelijk waarneembaar zijn. De kleuren zijn niet allemaal waarheidsgetrouw en geven dus alleen een indicatie van de verschillen. Dit is het gevolg van het feit dat de foto's niet met een gekalibreerd fototoestel zijn genomen, zonder zuiver daglicht en ook is er geen kleurenkaart mee gefotografeerd, waardoor de verschuiving door de sensor niet achteraf vastgesteld kon worden. Grofweg kan wel opgemerkt worden dat donkerbruine kleuren vaak aan de aanwezigheid van meer organisch materiaal zijn gekoppeld, roodbruine kleuren duiden op geoxideerd ijzer en grijsblauwe kleuren duiden op reducerende omstandigheden (onder de grondwaterspiegel, zuurstofarm). In het profielkuilonderzoek [Deltares 2022a] is in detail naar de kleuren van de klei in de profielkuilen gekeken, voor nadere informatie t.a.v. de kleursamenstelling van het materiaal, wordt daarnaar verwezen.

In de gestoken monsterbusmonsters (45 cm hoog) zijn scheuren en brokken geconstateerd, wat samen zou kunnen hangen met onvoldoende verdichting bij aanleg. Vooral dat laatste kan een groot effect hebben op de resultaten van de erosieproeven. Monsters uit de bussen zijn geselecteerd op basis van een visuele beoordeling op de gewenste afwezigheid van grote verstoringen als scheuren, breuken of vaste onderdelen als kiezels die het proefresultaat negatief kunnen beïnvloeden. Als richtlijn wordt aangehouden dat verstoringen of grote onderdelen als kiezels die groter zijn dan 1/6 tot 1/10 van de kleinste monsterdimensie (hoogte/breedte/diameter) een niet representatief proefresultaat op kunnen leveren. Voor roto-erosie is de kleinste dimensie 5 cm, dat betekent dat de grootste verstoring 5 tot 8 mm mag zijn. Voor de uitgevoerde triaxiaalproeven met de diameter van ongeveer 63 mm betekent dit een maximale grootte van 6 tot 10 mm.

Bij de monsterselectie zijn kleuren niet in de keuze meegenomen. In de meeste gevallen was geen duidelijk verloop in kleur waarneembaar. De kleuren lieten wel een beeld zien waaruit duidelijk was dat er sprake was van brokken en brokjes klei die bijvoorbeeld zowel tekenen van oxidatie als reductie vertoonden. Klei is, als het eenmaal een bepaalde consistentie heeft (vanaf een consistentie-index van globaal 0,25), niet meer goed te mengen, en dan blijft er sprake van de ontgraven brokken die zijn samengeperst bij het verdichten. Het genoemde profielkuilonderzoek gaat hier nader op in.

4.2 Bepalingen op monsters

De resultaten van de bepalingen van de volumieke massa's en het watergehalte staan vermeld in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Volumieke massa's en watergehalte beproefde monsters.

Monster	Diepte (m-MV)	Natte dichtheid (g/cc)	Watergehalte (%)	Droge dichtheid (g/cc)
Vak1_hl	0,88-0,93	1,84	28,9	1,43
Vak1_Is	1,05-1,10	1,81	33,1	1,36
Vak1_II	1,15-1,20	1,80	33,4	1,35
Vak1_II2	1,25-1,30	1,86	29,3	1,43
Vak2_hl	0,70-0,75	1,78	51,1	1,18
Vak2_Is	1,25-1,30	1,77	55,6	1,14
Vak2_II	1,30-1,35	1,77	46,7	1,21
Vak3_hl	0,63-0,68	1,71	45,3	1,18
Vak3_Is	1,15-1,20	1,66	44,8	1,15
Vak3_II	1,25-1,30	1,69	41,5	1,19
Vak3_II2	1,30-1,35	1,72	50,4	1,14
Vak4_hl	0,64-0,70	1,58	53,7	1,03
Vak4_Is	1,15-1,20	1,66	51,9	1,09
Vak4_II	1,28-1,33	1,64	51,0	1,09
Vak4_II2	1,35-1,40	1,72	50,5	1,14

Op basis van de resultaten in Tabel 4.1 kan geen duidelijk beeld over de heterogeniteit worden afgeleid. De verschillen zijn niet groter dan in een natuurlijke afzetting verwacht kan worden, uitgezonderd het materiaal in vak 4 (Klutenplasklei), dat een duidelijke toename in de volumieke massa met toenemende diepte laat zien. Blijkbaar is ofwel de verdichting naar boven toe minder goed uitgevoerd of is de verdichtingsenergie die is uitgeoefend op een aangebrachte laag meer aan onderliggende lagen doorgegeven. Dit laatste wordt overigens minder waarschijnlijk geacht omdat de verdichtingsenergie in klei in het algemeen niet diep reikt en na een centimeter of 20 tot 30 wel is uitgewerkt.

De resultaten van de classificatiebepalingen zijn weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Resultaten classificatiebepalingen (Wiertsema & Partners, 2022).

Vak nr.	Diepte [m-MV]		LOI [%]	Korrelgrootteverdeling [%]		
	van	tot		< 2 µm	2 µm > 63 µm	> 63 µm
1	1,00	1,32	4,35	44,6	50,6	4,8
2	1,00	1,35	6,16	40,7	33,3	26,0
3	1,00	1,39	5,76	45,6	45,2	9,2
4	1,00	1,33	7,69	45,9	47,3	6,8

Waarin: LOI = loss on ignition = gloeiverlies in % massa van droge stof.

De resultaten van de kleikeuringsbepalingen zijn weergegeven in Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Resultaten kleikeuringsbepalingen (Wiertsema & Partners, 2022).

Vak nr.	Watergehalte [%]	Plasticiteitsgrenzen			Org. stof	Kalk	Zout
		w _L	w _P	I _p			
1	32,1	51,2	21,1	30,1	1,5	10,8	0,8
2	74,1	80,5	24,9	55,6	6,0	14,9	34,8
3	48,8	69,9	28,4	41,5	4,7	13,5	38,1
4	54,7	98,8	47,7	51,1	6,2	13,3	31,1

Waarin:

w_P : uitrolgrens (%).

w_L : vloeigrens (%).

I_p : plasticiteitsindex (%).

Org. stof : organische stof (%) met H₂O₂ methode.

Kalk : kalkgehalte [%] met de HCl methode.

Zout : zoutgehalte poriewater (g/l).

De resultaten van de beoordeling van de klei conform de geldende richtlijnen uit de RAW staan in Tabel 4.4. Het erosie-categoriediagram, inclusief de RAW indeling, met de vier monsters is weergegeven in Figuur 4.1.

Tabel 4.4 Resultaten kleikeuring.

Vak nr.	I _c	Ac	CAT	Geschikt
	[]	[]		
1	0,91	0,5	3	ja
2	0,26	0,6	3	nee
3	0,74	0,6	3	nee
4	0,92	1,0	3	nee

Waarin:

I_c : consistentie-index.

Ac : activiteit klei (I_p/fractie < 2 μm).

CAT : erosiebestendigheidscategorie klei op basis van de plasticiteitsgrenzen.

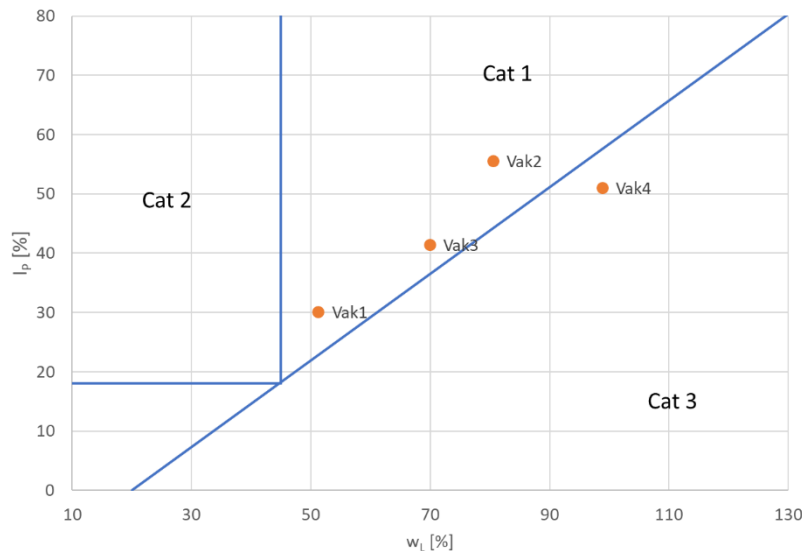
Geschikt : beoordeling geschiktheid klei op basis van het organische stof- en zoutgehalte.

De activiteit van klei is een maat voor de reactiviteit van de kleimineralen, de mate waarin het gedrag afhankelijk is van het watergehalte. Hoe hoger de reactiviteit, hoe hoger in de regel de plasticiteitsgrenzen. Een klei met een activiteit van lager dan 0,7 wordt een niet reactieve klei genoemd, een activiteit hoger dan 1,4 en actieve klei en daartussen een matig actieve klei. Het valt op dat alleen het materiaal uit vak 4 een matig actieve klei genoemd kan worden.

In [Deltares 2022d] wordt nader ingegaan op de samenhang van de activiteit en de mineralogie van klei. In het algemeen kan gezegd worden dat de activiteit van klei samenhangt met een combinatie van de type kleimineralen, de specifieke eigenschappen

daarvan en de type zoutmineralen die aanwezig zijn in de klei. De activiteit heeft naar verwachting een relatie met structuurvorming (hoe en daarmee op de potentiële erosiegevoeligheid van de klei ten gevolge van de structuurvorming. Een duidelijke relatie met de eigenschappen van het materiaal ten tijde van de verwerking van het materiaal tot geschikte klei voor toepassing in dijken wordt niet direct verwacht. Pas na het bereiken van een watergehalte waarbij zuurstof de klei binnen kan dringen wordt invloed die samenhangt met de activiteit van klei verwacht.

Met betrekking tot de kolom 'Geschikt' wordt opgemerkt dat deze beoordeling het gevolg is van een (veel) te hoog zoutgehalte van het materiaal in vakken 2 t/m 4 en wat betreft het organisch stofgehalte geldt dat dit voor het materiaal in vakken 2 en 4 te hoog is.



Figuur 4.1 Erosiecatégoriediagram [TAW 1996] met de monsters uit de 4 vakken.

Bij bovenstaande resultaten moet opgemerkt worden dat significante verschillen zijn geconstateerd met de metingen die eerder uitgevoerd zijn door Boskalis in de t₀ meting [Boskalis&van Oord 2020]. Voor de volledigheid zijn de resultaten uit de t₀ meting overgenomen uit dit rapport (zie Tabel 4.5 en Figuur 4.2).

De oorzaak van de verschillen in plasticiteitsgrenzen is niet duidelijk. Mogelijk hangt het samen met de grote heterogeniteit van het materiaal in de depots. Iets dat ook kan worden afgeleid uit het percentage lutum dat in dit onderzoek duidelijk hoger is (gemiddeld zo'n 14 % bij een origineel lutumgehalte van gemiddeld 31%). Hierbij wordt opgemerkt dat er in het algemeen hogere plasticiteitsgrenzen worden verwacht bij hogere lutumgehaltenes, terwijl er nu gemiddeld juist lagere plasticiteitsgrenzen zijn gemeten (de plasticiteitsindex is bijvoorbeeld gemiddeld 44% lager).

Echter, er zijn verschillende methoden om de lutumfractie te meten, geen enkele geeft 'de waarheid'. De grootte van de lutumfractie kan namelijk niet direct gemeten worden, maar wordt meestal indirect op basis van de wet van Stokes afgeleid. Er zijn verschillende genormeerde methodes [NEN-EN-ISO 17892-4] die allen iets verschillende resultaten opleveren. De volgens de RAW voorgeschreven techniek is die met behulp van de zogenaamde hydrometer. Zowel Wiertsema als Boskalis geven aan deze juiste methode te hebben gebruikt.

Verder speelt ook de voorbehandeling van de grond hierin een rol. Volgens de norm moet het materiaal vooraf worden gedispergeerd, het is mogelijk dat het ene lab dit effectiever doet dan een ander waarbij een intensievere dispersie meer lutum oplevert.

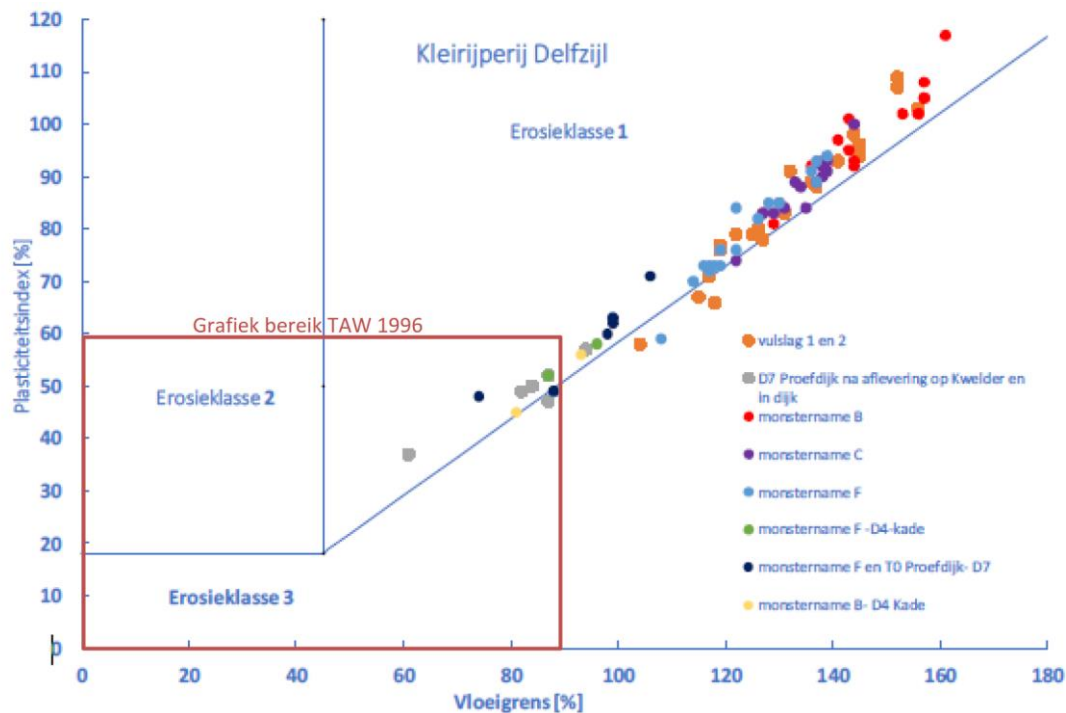
Daarnaast valt op dat het organisch stofgehalte is afgenomen voor alle kleisoorten en dan met name van het materiaal in vakken 1 t/m3. Het verschil met het materiaal in vak 4 is minder groot. Een duidelijke oorzaak hiervoor is niet gevonden. Indien dit het gevolg was van heterogeniteit, kan verwacht worden dat dergelijke waarden tijdens de aanleg ook gemeten zouden zijn. Oxidatie (verwerking) in zo'n korte tijd onder zulke vochtige omstandigheden is niet aannemelijk.

Tenslotte valt het grote verschil in zoutgehaltes op. Deze zijn over de hele linie voor het materiaal in vakken 2 t/m 4 zo ongeveer verdubbelt van 11 tot 17 g/l naar 1 tot 38 g/l. Hoewel het zoutgehalte in vak 1 procentueel ook sterk is toegenomen, is dit in absolute zin beperkt. Een verklaring hiervoor is onduidelijk. Verhoging van het zoutgehalte kan samenhangen met verdamping, maar dit is slechts in het geval van het materiaal in vak 3 ook geconstateerd.

Tabel 4.5 Samenvatting van de resultaten van de t_0 metingen zoals uitgevoerd door Boskalis [Boskalis&van Oord 2020].

Parameters	Eenheid	Partij 1: NSZ-klei	Partij 2: Kleirijperij Delfzijl	Partij 3: Kleirijperij Kwelder	Partij 4: Klutenplas	TAW 1996
Watergehalte	[%]	34.1 (32.4 -38.6)	59.4 (41.1 -73.5)	101.5 (95.1-113.1)	48.8 (48-50.2)	
Droge stof	[%]	74.6 (72.1-75.5)	61.6 (57.9-70.9)	49.7 (46.9-51.3)	67.2 (66.6-67.8)	
Situ dichtheid (ρ_{situ})	[t/m ³]	1.82 (1.76-1.85)	1.61 (1.55-1.67)	1.46 (1.40-1.54)	1.65- (1.62-1.67)	
Max. droge dichtheid - 5-puntsproctor	[t/m ³]	1.35	1.17	1.17	1.13	
Lutumgehalte	[%]	33.9 (31.3-38.3)	27.8 (26.9-28.8)	37.6 (33.1-41)	32.9 (30.3-36.2)	
Zandgehalte	[%]	3.3 (2-5)	11.8 (7-25)	2 (1-3)	5.5 (5-7)	<40
Specifiek Korrelgewicht	kN/m ³	26.1 (26.0-26.1)	25.3 (25.2-25.3)	25.4 (25.2-25.4)	25.3 (25.3-25.3)	
Kalkgehalte	[%]	13 (9.5-19.8)	14.7 (9.8-22.4)	15.1 (12.8-17.8)	17 (15.7-21.6)	<25
Gehalte organische stof	[%]	4.5 (4.4-4.7)	10.9 (9.4-11.7)	11.1 (10.1-12.3)	7.6 (7.3-7.9)	<5
Zoutgehalte	g/l bodemvocht	0.2 (0.1-0.2)	15 (13.4-20)	10.9 (9.1-11.8)	17 (16.4-17.4)	<4
Vloeigrens (LL)	[%]	63 (58-68)	94 (74-106)	110 (105-117)	87 (85-88)	
Rolgrens (PL)	[%]	24 (23-26)	34 (26-37)	36 (33-38)	35 (29-38)	
Plasticiteitsindex (PI)	[%]	39 (32-42)	64 (48-71)	74 (70-82)	52 (48-59)	
Consistentie index (I_c)	[-]	0.76 (0.63-0.84)	0.52 (0.41-0.69)	0.13 (0-0.14)	0.74 (0.64-0.79)	>0.6

De rode getallen geven aan dat deze waarden niet voldoen aan de eisen gesteld in de TAW 1996



Figuur 4.2 Erosiebestendigheidscategorieën [TAW 1996] met de monsters uit de Delfzijl Kleirijperij [Van Oord 2020].

4.3 Watergehalte en zoutgehalte bodemvocht

Ten tijde van de proefkuilbeschrijving zijn 3 monsters per kuil genomen om eventuele heterogeniteit en uitspoeling van zouten vast te stellen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.6. In deze tabel zijn duidelijk de effecten van de uitspoeling van zouten te constateren. Dit is een proces dat meegenomen kan worden in de beoordeling van de ontwikkeling van de sterkte en erosiebestendigheid van de klei.

Het watergehalte laat geen duidelijk verloop in de diepte zien. Er is geen duidelijk effect van uitdroging, een teken dat in de proefdijk veroudering of rijping van het materiaal niet of nauwelijks heeft plaatsgevonden. Uit deze resultaten blijkt wel een significante heterogeniteit in het watergehalte, iets dat ook uit de bepaling van de roto-erosieproeven is gebleken. Met name in vak 4 (Klutenplasklei) zijn de verschillen groot, en duidelijk groter dan verschillen in de watergehaltenes van de roto-erosiemonsters.

Hetgeen dat opvalt is dat de zoutgehaltenes in vanaf een diepte van 60 cm overeenkomen met de zoutgehaltenes zoals vermeld in Tabel 4.3, zodat deze als juist worden verondersteld. Mogelijk dat er een verschil in bepalingswijze aanwezig is, hoewel beide labs volgens de richtlijnen zeggen te hebben gewerkt.

Tabel 4.6 Resultaten bepaling van watergehalte en zoutgehalte bodemvocht.

Monster	Vak	Diepte (m-MV)		Watergehalte (%)	NaCl (g/l)
		van	tot		
1	vak 1	0,30	0,35	31,0	0,2
2	vak 1	0,60	0,65	30,2	1,0
3	vak 1	0,90	0,95	26,8	0,8
4	vak 2	0,30	0,35	50,5	28,2
5	vak 2	0,60	0,65	45,2	40,5
6	vak 2	0,90	0,95	44,4	39,4
7	vak 3	0,30	0,35	42,9	30,1
8	vak 3	0,60	0,65	45,4	34,1
9	vak 3	0,90	0,95	39,7	35,5
10	vak 4	0,30	0,35	50,0	5,3
11	vak 4	0,60	0,65	62,9	17,8
12	vak 4	0,90	0,95	44,2	29,7

4.4 Resultaten uit roto-erosiemeterproeven

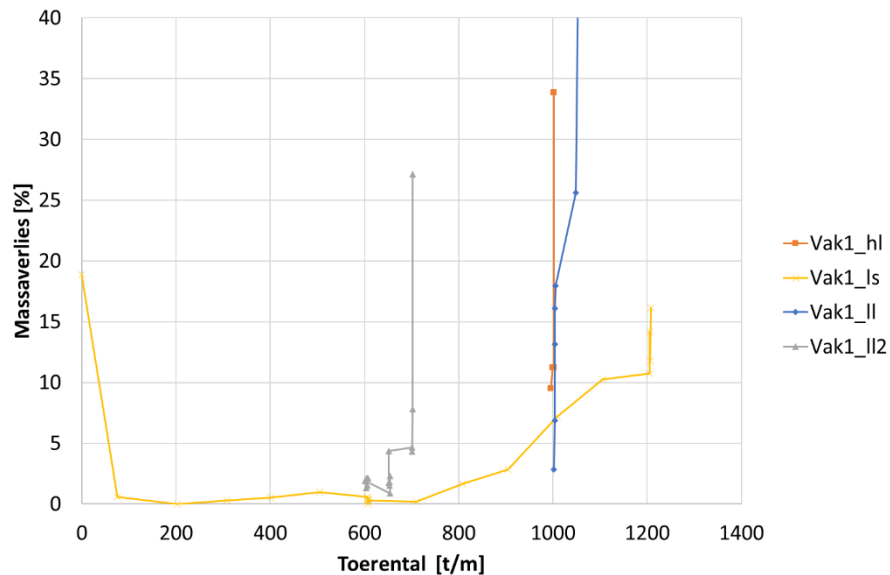
De resultaten van de proeven zijn grafisch weergegeven in termen van het massaverlies van het monster en de schuifkracht op het monster als functie van het toerental tijdens de proef, zie Figuur 4.3 tot en met Figuur 4.10. In de legenda is l = gedetailleerde proef volgens de lange procedure en s = standaard proef.

4.4.1 Vak1 (Nieuw Statenzijl)

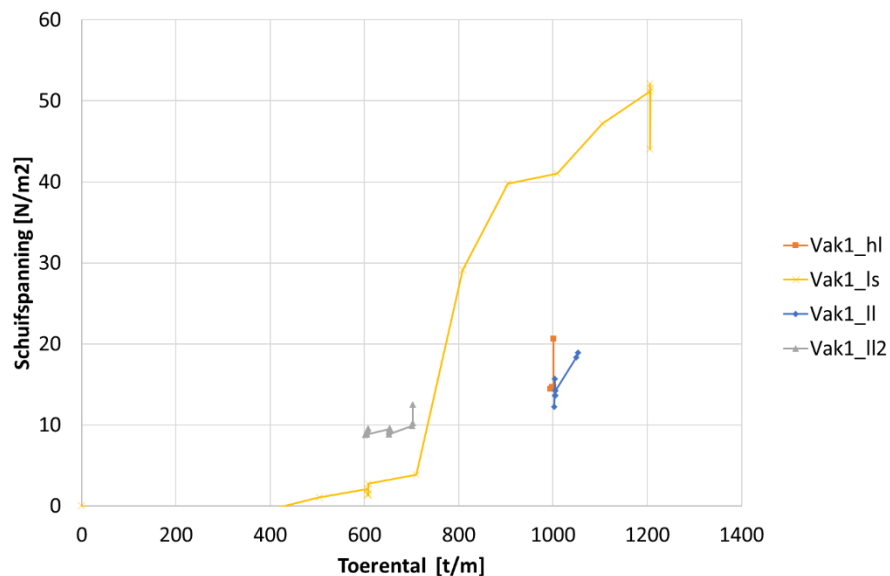
In Figuur 4.3 en Figuur 4.4 zijn de resultaten van de roto-erosieproeven op de monsters uit Vak1 weergegeven, met het verloop van het massaverlies en de schuifkracht tegen het toerental.

De erosie in de standaard proef op het dieper gelegen monster (vak1_ls) start bij 700 tpm (stroomsnelheid 0.9 m/s). In de gedetailleerde proeven is gestart bij een toerental van 1000 waarbij blijkt dat de twee monsters vrijwel direct bezwijken, d.w.z. een massaverlies hebben van meer dan 30%. In de standaard proef is er nog steeds geen bezwijken bij 1200 tpm. Oorzaak van de verschillen tussen de standaardproef en de gedetailleerde proeven zit waarschijnlijk in de heterogeniteit van het materiaal.

Doordat het monster bij de gedetailleerde proefuitvoering vlak na de start van de proef is bezweken heeft dit monster minder tijd gehad om water op te nemen. Het is onwaarschijnlijk dat dit een oorzaak zou kunnen zijn voor het eerder bezwijken van het monster in de gedetailleerde proeven. Immers er zou juist een hogere weerstand tegen erosie worden verwacht, omdat eventuele zuigspanningen hoger zullen zijn in een droger monster.



Figuur 4.3 Verloop massaverlies op de monsters uit Vak 1.



Figuur 4.4 Verloop schuifspanning op de monsters uit Vak 1.

Uit Figuur 4.3 en Figuur 4.4 blijkt dat de resultaten van de roto-erosieproeven sterk verschillen. Het bezwijktoerental varieert tussen 700 en 1200 tpm (stroomsnelheid circa 0.8 en 1.6 m/s). Twee lange duur proeven (vak1_II2 en vak1_II) bevinden zich in het diepe gedeelte van de proefdijk en laten een totaal verschillend beeld zien. Eén proef (vak1_II2) start bij een toerental van 600 tpm en bezwijkt bij 700 tpm, de andere proef (vak1_II) start bij 1000 tpm en bezwijkt bij 1050 tpm. Het derde monster uit die laag, de proef volgens de korte procedure (vak1_Is), start bij 0 tpm, begint significant te eroderen bij 700 tpm en bezwijkt bij 1200 tpm. Een mogelijke verklaring voor het verschil in bezwijktoerental tussen de korte duur proef vak1_Is en de lange duur proef vak1_II2 is dat in de lange duur proef de klei meer tijd heeft gehad om water op te nemen, daardoor zachter is geworden en zo een lagere erosiebestendigheid (toerental bij start erosie) en erodeerbaarheid (bezwijktoerental) laat zien.

Uit eerder onderzoek op klei is gebleken [Deltares 2022a] en [Deltares 2022c] dat de verschillen in uitkomsten tussen de korte en lange duur proeven beperkt zijn, waarbij regelmatig de lange duur proeven op vergelijkbare monsters niet tot eerder bezwijken leiden.

Daarom wordt geconcludeerd dat de verschillen hoogstwaarschijnlijk voornamelijk te maken hebben met heterogeniteit.

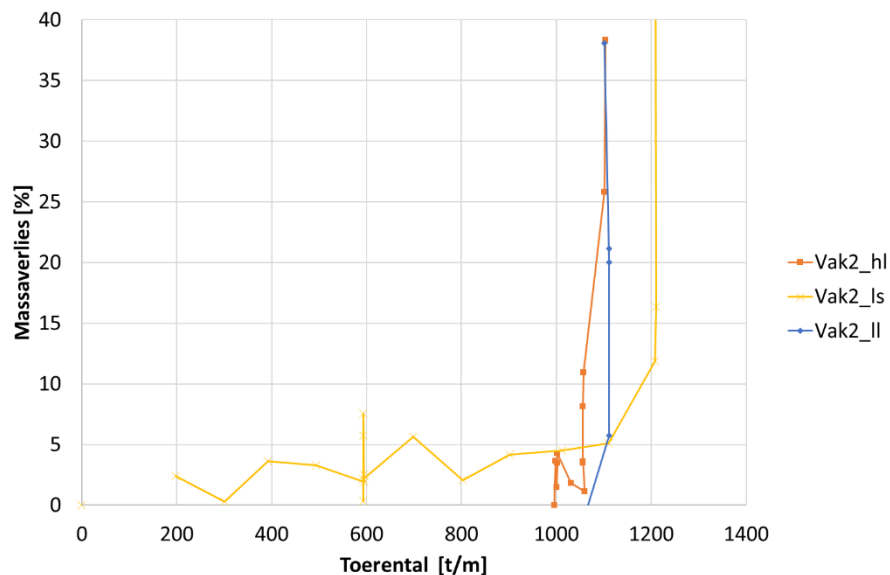
Er is één lange duur erosieproef uitgevoerd op een monster uit de minder diepe laag (vak1_hl) die bij 1000 tpm start en vrijwel instantaan bezwijkt. Deze proef is duidelijk bij een te hoog toerental gestart, waardoor er geen betrouwbare uitspraak over de erosiegevoeligheid van dit monster gedaan kan worden, gezien ook de aangetroffen heterogeniteit.

Blijkbaar is de erosiegevoeligheid sterk wisselend van deze klei. Mogelijk houdt dit verband met een ongelijkmatige verdichting of rijping, maar een verband met de intrinsieke kwaliteitsverschillen is uiteraard ook mogelijk. Een verband met de ligging van de monsters (hoog dan wel laag in het profiel) kan niet worden geconstateerd, wat samenhangt met het te hoge begintoeental van proef vak1_hl, maar ook met de aangetroffen heterogeniteit.

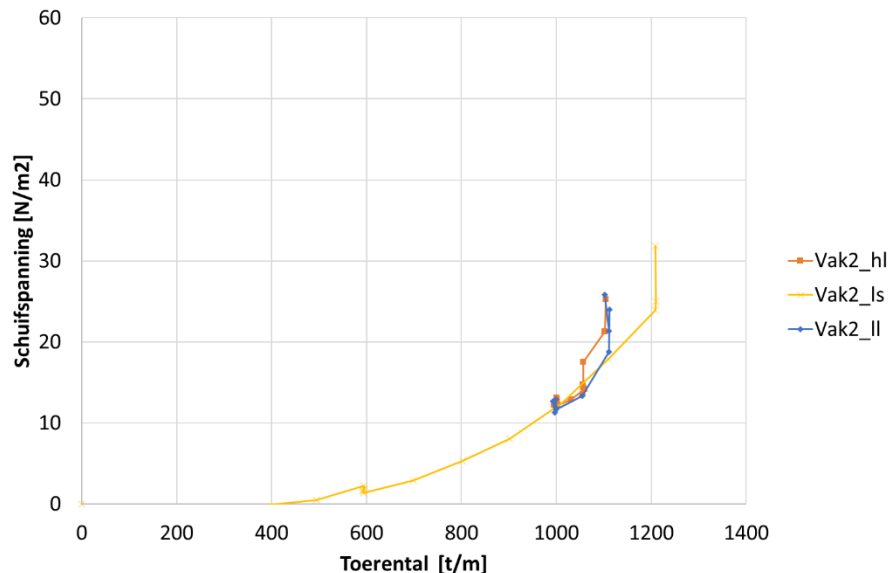
4.4.2 Vak 2 (Valgenweg)

In Figuur 4.5 en Figuur 4.6 zijn de resultaten van de roto-erosieproeven op de monsters uit Vak 2 weergegeven.

De erosie in de standaardproef op het diepe monster start bij 1000 tot 1100 tpm (stroomsnelheid 1.2 tot 1.3 m/s). Het monster bezwijkt bij een toerental van 1200 tpm.



Figuur 4.5 Verloop massaverlies op de monsters uit Vak 2.



Figuur 4.6 Verloop schuifspanning op de monsters uit Vak 2.

Beide gedetailleerde proeven beginnen bij 1050 tpm (stroomsnelheid 1.4 m/s) te eroderen en bezwijken vervolgens bij 1100 tpm.

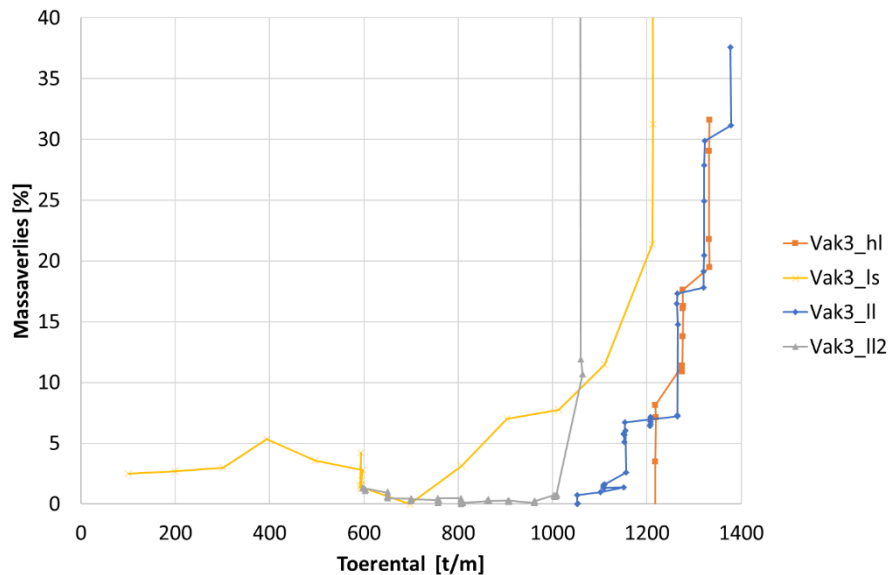
Opvallend is dat, ondanks het feit dat de bezwijktoerentallen bij de verschillende proeven variëren tussen de 1100 en 1200 tpm, de schuifspanningscurves van de verschillende proeven elkaar overlappen tot dat bezwijken optreedt. Blijkbaar ontwikkelen de verschillende monsters een vergelijkbare schuifspanning bij toerentallen tussen 1000 tpm en 1100 tpm. De monsters die op de gedetailleerde wijze zijn beproefd (vak2_hI en vak2_II) bezwijken bij 100 tpm minder, en dat kan verband houden met het feit dat de gedetailleerde proeven langer een bepaald toerental aanhouden en dus meer tijd krijgen bij een geleidelijke erosie te bezwijken. Hoewel deze proeven bij een hoog toerental zijn gestart, zijn de overeenkomsten met de normale procedureproef (vak2_Is) opvallend, daar de schuifspanningen deels overlappen en de bezwijktoerentallen maar beperkt verschillen.

Deze proeven laten geen duidelijk effect zien van zowel heterogeniteit als een verschil in diepte ten gevolge van eventuele rijping.

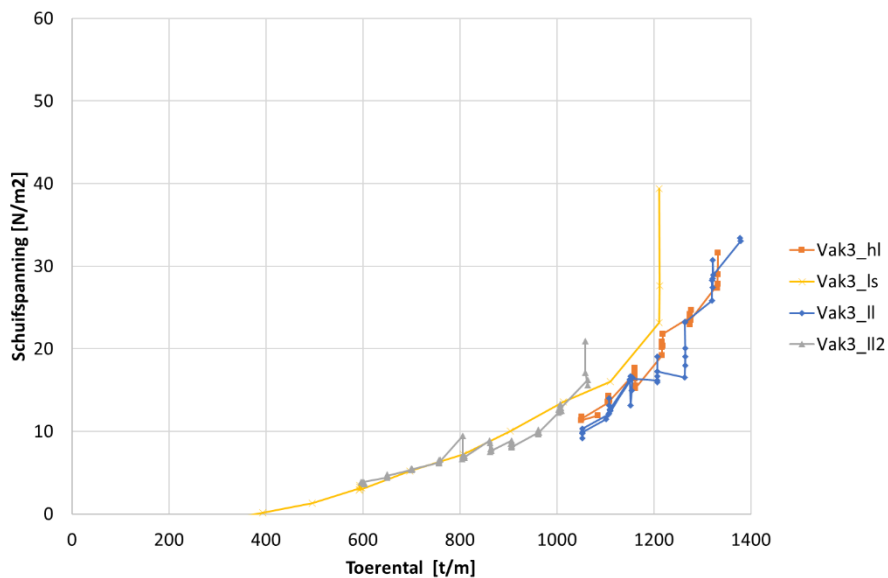
4.4.3 Vak 3 (Kwelderdepot)

In Figuur 4.7 en Figuur 4.8 zijn de resultaten van de roto-erosieproeven op de monsters uit Vak 3 weergegeven.

De erosie in de standaardproef start bij 900 tpm (stroomsnelheid 1.1 m/s) en bij 1200 tpm treedt bezwijken op. De gedetailleerde proeven vak3_hI en vak3_II, welke bij een te hoog toerental van 1000 zijn gestart, tonen een begin van snelle massa afname vanaf respectievelijk 1200 en 1100 tpm totdat bij 1300 tpm bezwijken optreedt. Opvallend is dat de afname van de massa in deze gedetailleerde proeven vrijwel gelijk oploopt, en dat bij een toerental dat hoger ligt dan in de standaardproef vak3_Is. . Eén monster (vak3_II2) begint bij 1000 tpm te eroderen en bezwijkt vrij snel daarna bij 1050 tpm (de proef is gestart bij een toerental van 600 tpm). Deze gedetailleerde proef is wel bij een juist toerental gestart en heeft langer geduurd, zodat het monster meer water kon opnemen. Hierboven (zie § 4.4.1) is echter al geconstateerd dat het effect van de tijdsduur van de proef maar een klein effect op het resultaat van de proef heeft, dus ook hier zal het effect naar verwachting klein zijn. De geconstateerde verschillen in bezwijktoerental tussen de proeven zijn beperkt, waarbij proef vak3_II2 het meest afwijkt, en laten nauwelijks een effect van heterogeniteit zien, ook niet in de diepte.



Figuur 4.7 Verloop massaverlies op de monsters uit Vak 3.

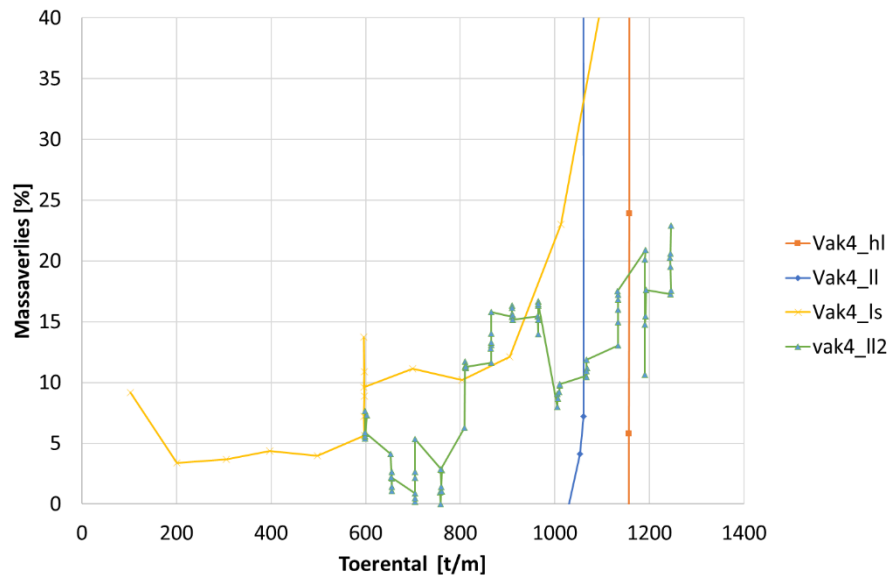


Figuur 4.8 Verloop schuifspanning op de monsters uit Vak 3.

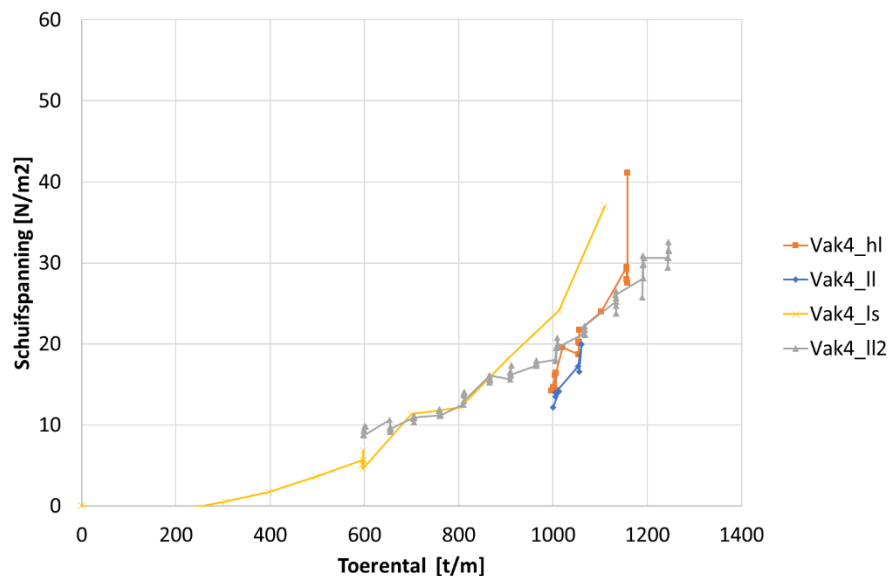
Verder zijn er overeenkomsten en verschillen tussen de monsters qua ontwikkeling van de schuifspanning, zie Figuur 4.8. Waar het verloop van de schuifspanning van de korte procedureproef (vak3_Is) grotendeels overeenkomt met die van vak3_II2, laten beide andere bij een te hoog toerental gestarte lange procedureproeven (vak3_hl en vak3_II) weer een vergelijkbaar beeld zien met een hoger toerental van ongeveer 100 tpm in vergelijking met vak3_Is. Het verloop van de ontwikkeling van de schuifspanning laat geen grote verschillen tussen de monsters zien.

4.4.4 Vak 4 (Klutenplas)

In Figuur 4.9 en Figuur 4.10 zijn de resultaten van de roto-erosieproeven op de monsters uit Vak 4 weergegeven.



Figuur 4.9 Verloop massaverlies op de monsters uit Vak 4.



Figuur 4.10 Verloop schuifsterkte op de monsters uit Vak 4.

De erosie in de standaardproef op het diepe monster (vak4_Is) start globaal bij 600 tpm (stroomsnelheid $\cong 0.8$ m/s) en bezwijken treedt op bij 1050 tpm. Proeven vak4_hl en vak4_II zijn bij een te hoog toerental van 1000 tpm gestart en laten bezwijken zien bij respectievelijk 1150 en 1050 tpm. Daar deze monsters niet meteen al bij het starttoerental 1000 tpm bezweken, is er enig vertrouwen in deze bezwijktoerentallen (rond de 30% massaverlies). De bezwijktoerentallen van proeven vak4_Is en vak4_II liggen dicht bij elkaar, wat duidt op dat de verschillen in de hier gehanteerde proefprocedure beperkte invloed hebben. Proef vak4_II2 laat een grillig verloop in erosie zien, wat mogelijk samen kan hangen met problemen met de proefuitvoering, ook al was deze proef wel bij een juist toerental van 600 gestart. Dit monster gaat richting bezwijken bij 1250 tpm, waarna echter niet meer is gemeten ten gevolge van een softwarestoring. De bezwijktoerentallen van de proeven liggen dus tussen 1050 en 1250 tpm. Het hoger genomen monster vak4_hl (diepte 1,15 tot 1,20 – MV) bezwijkt bij een toerental dat 100 tpm hoger ligt dan bij het lager genomen monster (diepte 1,28 tot 1,33 – MV). Echter

uit het profielkuilonderzoek [Deltares2022b] en ook de watergehalten uit Tabel 4.6 blijkt echter dat er geen duidelijk verloop in sterkte en watergehalte is over de diepte. Een verschil in bezwijktoerental van 100 tpm bij toerentalen boven de 1000 tpm wordt echter sowieso als weinig significant gezien om daar duidelijke verschillen tussen monsters aan te koppelen.

Het verloop van de schuifspanning (zie Figuur 4.10) laat significante verschillen zien tussen de monsters. Waar vak4_1s en vak4_1l2 beide geleidelijk oplopen, laten vak4_1h1 en vak4_1l1 een steiler verloop zien. Mogelijk houdt dit verband met het hoge toerental waarop beide laatste proeven zijn gestart. Uit dit verloop in schuifspanning kan geen informatie over het precieze effect van heterogeniteit worden afgeleid, hoewel duidelijk is dat er in vak 4 sprake is van veel heterogeniteit.

4.5 Krimprens

De krimprens is het watergehalte waarbij bij verdere afname van het watergehalte geen volumeafname van de klei meer plaatsvindt. Hoe lager de krimprens, hoe geringer de kans op scheuren in de klei bij uitdroging. De krimprens is in duplo bepaald. De resultaten staan in Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Resultaten krimprensbepaling.

Monster	Beschrijving	Grondbeschrijving	Krimprens	
vak1_1s	Ks2	klei, matig siltig	13,7%	19,5%
vak2_1s	Ks2	klei, matig siltig, zwak humeus	25,7%	25,4%
vak3_1hs	Ks2	klei, matig siltig	24,4%	25,4%
vak4_1s	Ks2, h1	klei, matig siltig, zwak humeus	22,7%	26,8%

Te zien is dat de verschillen tussen de kleisoorten niet groot is, afgezien van de referentieklei uit vak 1. Deze klei heeft een significant lagere krimprens (16,6% gemiddeld) dan de overige kleisoorten, waarvan de krimprens ongeveer 25% is. Het relatief grote verschil in de duplo-bepaling van de krimprens van de klei uit vakken 1 en 4 wordt toegeschreven aan een grotere mate van heterogeniteit, die bij de monsters uit vak 1 duidelijk te zien is in zowel de resultaten en foto's van de geteste roto-erosiemonsters (bijlage A) als de triaxiaalproeven (bijlage B). Het geconstateerde verschil in de duplobepaling van de krimprens van de klei uit vak 4 komt minder tot uiting in de roto-erosieproeven, maar wel weer in verloop van het watergehalte en zoutgehalte over de diepte (Tabel 4.6). De proeven zijn correct uitgevoerd, een verschil van 1-3% tussen twee duplo krimprensbepalingen kan als een normaal verschil gezien worden dat samenhangt met de wijze van proefuitvoering.

In [Deltares 2022c] is eveneens de krimprens van zowel Klutenplas- als Volgenwegklei bepaald. Waar de resultaten van de Klutenplas overeenkomen met de hier gerapporteerde waarden, verschillen die van de Valgenwegklei sterk. Een verklaring hiervoor is niet evident, afgezien van heterogeniteit. Wellicht dat de bepaling het beste ter verificatie herhaalt kan worden.

4.6 Triaxiaalproeven

De triaxiaalproef is één van de meest gebruikte proeven om de sterkte van grond te bepalen en levert standaard de ongedraineerde schuifsterkte (volgens NEN-EN-ISO 17892-9). De resultaten van de correct uitgevoerde proeven staan in Bijlage B vermeld. In Tabel 4.8 is een samenvatting van de resultaten gegeven. De proeven zijn uitgevoerd bij de terreinspanning,

de heersende korrelspanning op het niveau van de monsters in de proefdijk. Deze terreinspanning is bepaald door de massa van de bovenliggende lagen, op basis van de gemeten volumieke massa van de monsters, in te schatten. Alle monsters zijn afkomstig uit de laag tussen 0,5 tot 1,0 meter onder maaiveld.

Tabel 4.8 Samenvatting resultaten triaxiaalproeven.

Monster	dv [m -MV]	dt [m -MV]	w [%]	ρ_n [g/cc]	ρ_d [g/cc]	σ'_{vc}	s_u [kPa]	E_{50} [MPa]	$\epsilon_{b,50}$ [%]
Vak1_1	0,86	0,99	37,1	1,89	1,38	9,6	34,3	1,6	2,2
Vak2_1	0,75	0,9	51,3	1,84	1,21	9,6	22,6	1,0	2,3
Vak3_1	0,67	0,8	44,5	1,66	1,15	10,5	26,2	2,7	1,0
Vak4_1	0,67	0,8	50,2	1,62	1,08	10,4	27,6	3,3	0,8

Waarin:

dv : diepte van.

dt : diepte tot.

w : watergehalte.

ρ_n : natte volumieke massa.

ρ_d : droge volumieke massa.

σ'_{vc} : verticale consolidatiespanning (terreinspanning).

s_u : ongedraineerde schuifsterkte (maximale waarde van t).

E_{50} : Young's of elasticiteitsmodulus bij 50% van de bezwijkspanning.

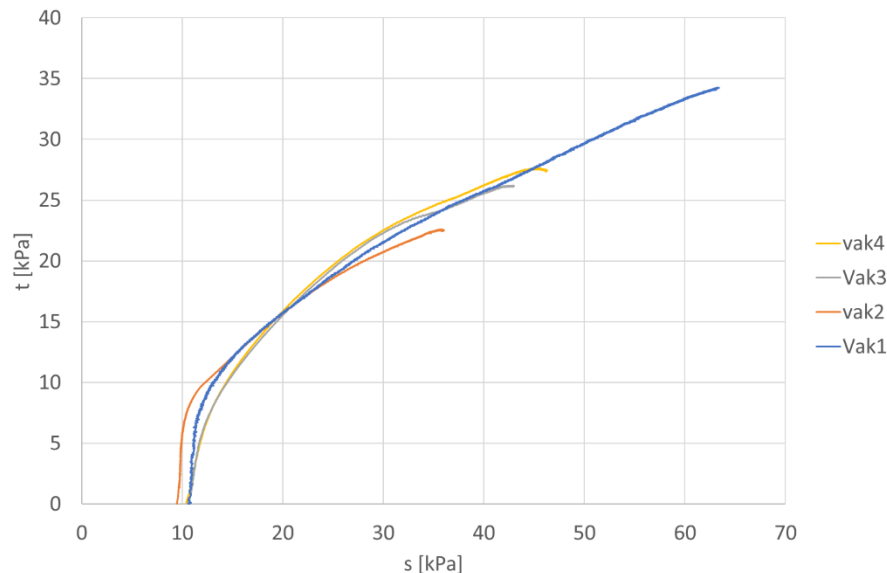
$\epsilon_{b,50}$: rek bij 50% van de bezwijkspanning.

De resultaten tonen een vergelijkbaar gedrag van het materiaal uit de verschillende vakken. In eerste instantie loopt de wateroverspanning u_b (het onderste figuur op pagina 2 van de rapportage in de bijlagen) op tot een paar procent rek, waarna deze af begint te nemen. Gezien het feit dat de monsters op de terreinspanning zijn geconsolideerd, zou de wateroverspanning zo ongeveer rond de 0 kPa moeten bewegen. Dat de waterspanning afneemt duidt dan op enige veroudering van het materiaal. Een negatieve waterspanning duidt op dilatantie van het materiaal: het materiaal wil in volume toenemen tijdens de vervorming waardoor zuigspanningen ontstaan². Dilatantie treedt op wanneer het monster is overgeconsolideerd. Overconsolidatie kan het gevolg zijn van een hogere spanning die in het verleden op het niveau van de monsters heeft geheerst of veroudering ('ageing') van het materiaal. Gezien het feit dat de monsters bij de heersende terreinspanning zijn uitgevoerd, moet het gedrag het gevolg zijn van veroudering. Dit wil overigens niet zeggen dat de veroudering in de proefdijk plaats heeft gevonden.

Door de afnemende waterspanning tijdens de proef, buigt het spanningspad (de schuifspanning t vs. de gemiddelde spanning, het bovenste figuur op pagina 2) naar rechts af en neemt de sterkte toe. Indien er geen veroudering plaats zou hebben gevonden, zou het spanningspad ongeveer naar boven moeten bewegen, in plaats van dat deze naar rechts afbuigt.

In Figuur 4.11 zijn de spanningspaden van de verschillende proeven grafisch weergegeven.

² De monsters worden voor uitvoering verzadigd, de verzadigingsgraad wordt gekwantificeerd met de B_1 factor, die is 1 bij volledige verzadiging. In de norm wordt een minimale B_1 waarde van 0,95 vereist



Figuur 4.11 Spanningspaden van de triaxiaalproeven.

Waarin:

t : schuifspanning.

s : gemiddelde effectieve spanning.

De spanningspaden blijken elkaar qua afbuiging niet veel te ontlopen. Het is wel duidelijk dat het spanningspad van de proef op vak 1 verder doorloopt en dus een sterker dilatant gedrag vertoont hetgeen waarschijnlijk samenhangt met de sterkte rijping of veroudering van dit materiaal. Het materiaal uit vak 4 (Klutenplas, kwelderklei) vertoont een minder sterke veroudering dat het materiaal uit vak 1 (reguliere dijkenglei), gevolgd door vak 3 (Kwelderdepot, gerijpte baggerspecie). De minste veroudering vertoont het materiaal uit vak 2 (Delfzijldepot, gerijpte baggerspecie). Dit komt overeen met de mate van veroudering van de verschillende kleisoorten alvorens deze in de proefdijk werden gebracht. Kwelderklei is immers mogelijk meer verouderd dan de gerijpte baggerspecie. Merk op dat de proeven allemaal tot een rek van 25% zijn uitgevoerd en dat de verschillen in de spanningspaden hier niet mee samenhangen.

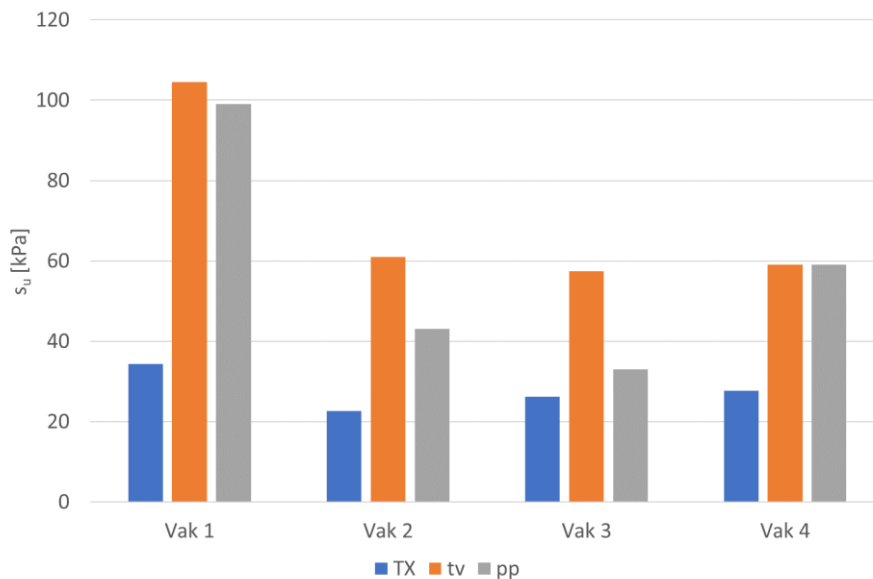
De ongedraineerde schuifsterkte is een indicatie van de sterkte van het materiaal, d.w.z. de weerstand tegen afschuiven van onderdelen van het monster. Hierbij glijden vlakjes in het monster langs elkaar. Afhankelijk van de sterkte of stijfheid van het materiaal gebeurt dit langs een duidelijk schuifvlak of, zoals bij deze proeven is gebeurd (zie bijlage B), door het compleet deformeren van een monster. Hierbij worden er vele schuifvlakjes in een monster gevormd die langs elkaar glijden. In die zin kan dit proces vergeleken worden met het losraken van kluitjes langs potentiële zwaktezones in een monster.

Een probleem hierbij is echter dat de sterkte toe blijft nemen door de ontwikkelde zuigspanningen. Dit zal deels overeenkomen met het proces van losraken van kluitjes tijdens de erosie: de ruimte waar het kluitje los begint te raken neemt in volume toe, waardoor water toe zal moeten stromen om dit aan te vullen. Indien dit wordt verhinderd zal dit losraken meer moeite en dus meer schuifsterkte vergen van het langsstromende water.

Indien de sterkte van de monsters met elkaar vergeleken wordt, dat valt op dat het materiaal uit vak 2 (Delfzijldepot) het minst sterk is en uit Vak 1 (referentieklei, Nieuw Statenzijl) het sterkst. In het profielkuilonderzoek (Deltares 2022a) zijn ook metingen van de ongedraineerde schuifsterkte uitgevoerd met twee handmatig in situ uitgevoerde technieken, de torvane en de pocketpenetrometer. Beide zijn indicatieve metingen die meer de trend in

sterkte weergeven dan dat er bepaalde nauwkeurigheid aan kan worden gekoppeld, dit is onder meer het gevolg van het feit dat de beproevingscondities (spanningen, watergehaltes, ...) bij deze proeven slecht bekend zijn.

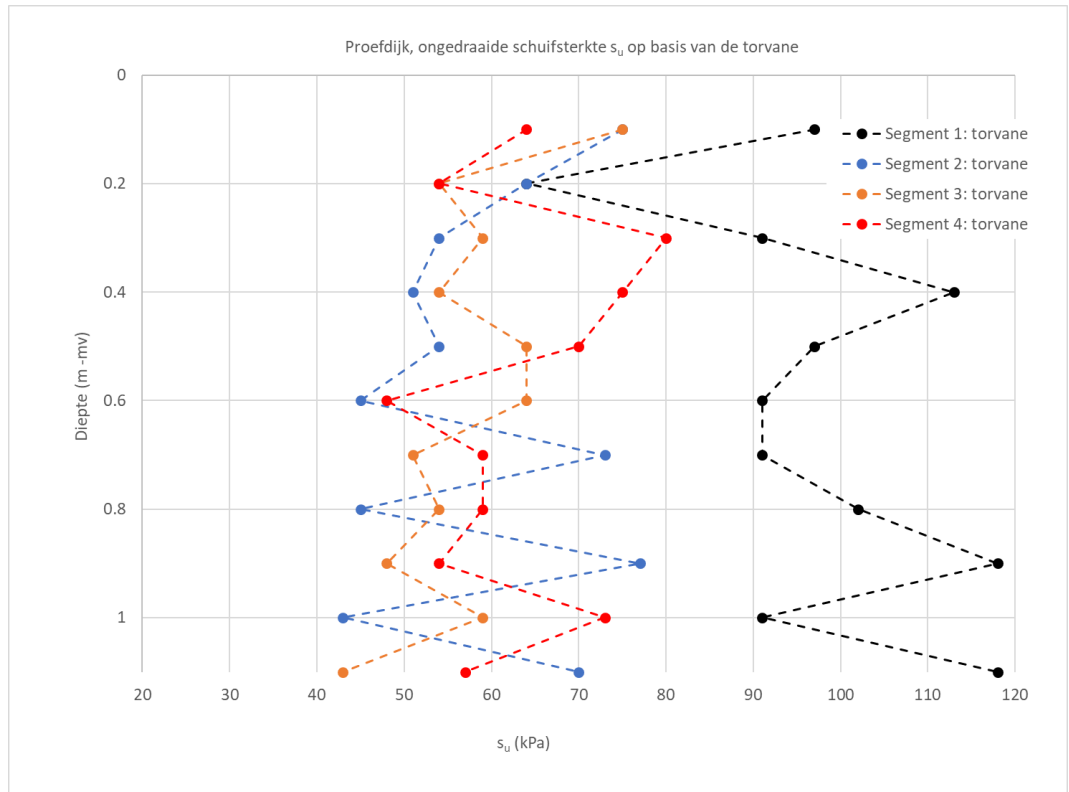
De vergelijking in de resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 4.12, hierbij zijn de sterktes van de torvane en pocketpenetrometer op hetzelfde niveau als de triaxiaalproeven gekozen.



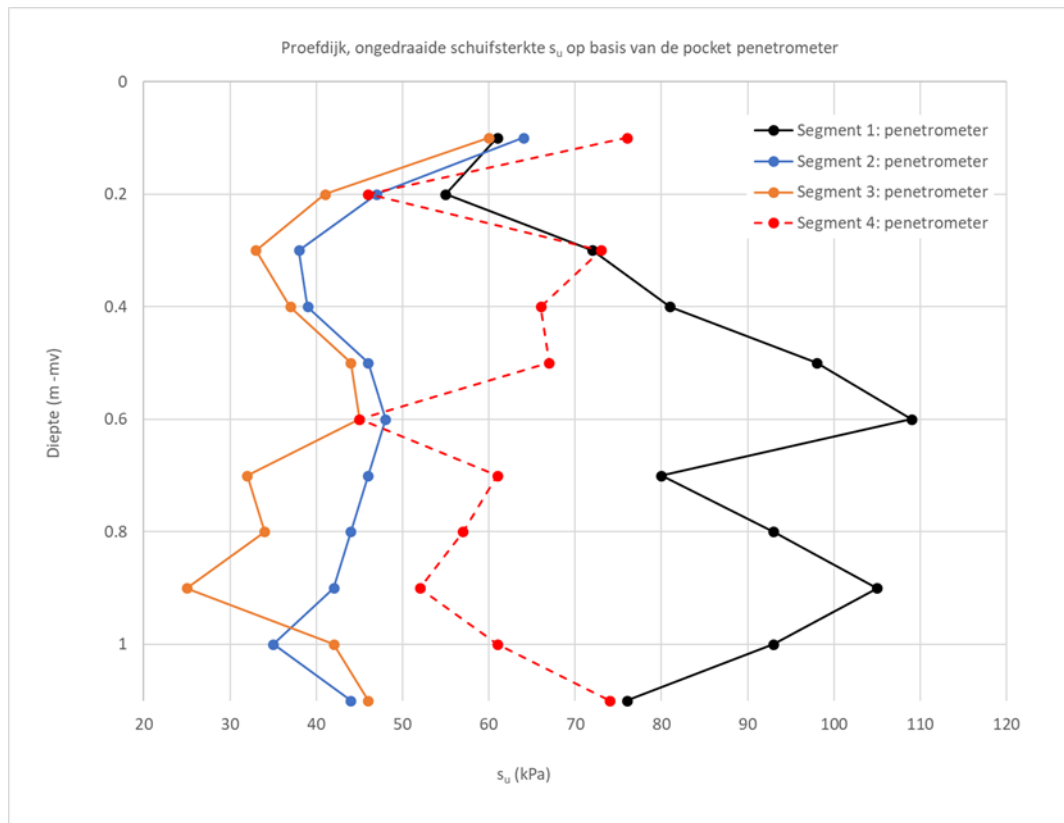
Figuur 4.12 Ongedraineerde schuifsterkte gemeten met de triaxiaalproef, de torvane en de pocketpenetrometer in de verschillende vakken.

Wat hierbij opvalt is het grote verschil in ongedraineerde schuifsterkte tussen de triaxiaalproeven en de andere twee methodes. Alleen in vak 3 (Kwelderdepot) is het resultaat van de pocketpenetrometer enigszins vergelijkbaar met die van de triaxiaalproef. In vak 1 is het verschil bijna een factor 3. Een mogelijke oorzaak van het verschil tussen de triaxiaal en de andere twee methoden zou kunnen zijn dat de torvane- en pocketpenetrometerresultaten afkomstig zijn van de wand van de profielkuilen, die mogelijk al enige tijd aan het uitdrogen is geweest. De triaxiaalmonsters zullen veel minder uitgedroogd zijn, bovendien worden deze vooraf verzadigd. Deze lagere watergehaltes in de wand van de profielkuilen kunnen hogere sterktes tot gevolg hebben, maar dit biedt geen afdoende verklaring voor het grote verschil tussen de sterkte uit triaxiaalproef en de twee andere methoden.

Daarnaast valt op dat de verschillen in de torvaneresultaten tussen vakken 2, 3 en 4 marginaal zijn waar die van de pocketpenetrometer duidelijk meer verschil laat zien. Opvallend is wel dat in vak 2 de torvanewaarden erg heen en weer springen met bijna een factor 2 in het onderste gedeelte, zie Figuur 4.13 [uit Deltares 2022a].



Figuur 4.13 Verloop van de ongedraineerde schuifsterkte over de hoogte van de vakken (torvane).



Figuur 4.14 Verloop van de ongedraineerde schuifsterkte over de hoogte van de vakken (torvane).

Waarschijnlijk is dit het gevolg van een lokaal sterke verdichting, die op het niveau waar de hoge torvane waardes gemeten worden. De triaxiaalmonsters zijn zo'n 12 cm hoog en omvatten dus zowel de minder sterk verdichte als de wel sterk verdichte lagen waarbij het zwakste deel bepalend zal zijn voor de sterkte van het gehele monster. De foto van het bezweken monster (zie TX Vak2_1 in bijlage B) van dit vak wijst ook in die richting: daar is het bovenste deel van het monster bezweken terwijl het onderste deel redelijk intact lijkt. Opvallend is echter dat deze wisseling niet bij de pocketpenetrometermetingen (Figuur 4.14) is te zien. Onduidelijk is hoe dit komt.

Indien wordt aangenomen dat de hoge waarden van de torvane in vak 2 niet bepalend zijn voor de sterkte van de triaxiaalmonsters, komen de onderlinge verschillen qua ongedraineerde schuifsterkte tussen de vakken goed overeen met die van de triaxiaalproeven. Hierbij is de volgorde in afnemende sterkte als volgt: vak 1 (referentieklei), vak 4 (Klutenplas), vak 3 (Kwelderdepot) en vak 2 (Delfzijldepot), waarbij het verschil in ongedraineerde schuifsterkte tussen vakken 3 en 4 klein is voor zowel de triaxiaalproef als torvaneproef.

De resultaten van de pocketpenetrometer laten overigens geen duidelijk overeenkomst zien met beide andere bepalingsmethoden. Deze laten de laagste sterkte zien in vak 3 op een diepte van de triaxiaalproef (circa 0,7 m-MV). Dit komt niet overeen met de sterkte uit de triaxiaalproeven welke het laagst is bij vak 2, die als betrouwbare referentieproef beschouwd kan worden³. Derhalve moet geconcludeerd worden dat de metingen met de pocketpenetrometer in dit geval het minst overeenkomen met de overige sterkte-gerelateerde proeven.

De bezwijktoerentallen uit de erosieproeven laten zien dat het materiaal uit vak 1 het minst erosiebestendig en erg heterogeen is en dat het materiaal uit vak 3 (kwelderdepot) overwegend het beste bestand lijkt tegen erosie (zie Tabel 5.1). Dit komt niet overeen met de volgorde van de vakken qua sterkte. Het verband tussen het resultaat van de sterktemetingen met de erosiegevoeligheid is derhalve niet eenvoudig te leggen. Wellicht dat het dieper ingaan op de sterkteontwikkeling bij kleine rekken in de triaxiaalproef duidelijkere verbanden kan leggen. Het is de verwachting dat de sterkte bij kleine rekken (< 1-2%) beter correleert met de erosiebestendigheid, omdat de rekken bij het loslaten van deeltjes bij erosie naar verwachting ook klein zijn.

Wat ook een rol kan spelen is dat de spanningscondities die heersen tijdens het erosieproces en die heersen bij de sterktebepalingen anders zijn. De triaxiaalproeven zijn geconsolideerd bij de terreinspanning. Tijdens het erosieproces zullen er andere spanningscondities heersen. Een andere uitvoering van de triaxiaalproeven kan hier meer duidelijkheid over geven.

³ Dit is onder meer het gevolg van het feit dat de beproevingsomstandigheden van een triaxiaalproef volledig bekend zijn.

5 Bespreking resultaten en conclusies

De verschillen tussen drie van de vier geteste kleisoorten in de proefdijk zijn niet groot. Zowel de resultaten van de roto-erosieproeven, de krimpgrensproeven als de triaxiaalproeven laten overwegend kleine verschillen zien. Hoewel de bezwijktoerentallen verschillen laten zien tussen deze drie vakken, vertonen deze ook een duidelijke overlap.

Hoewel het bezwijktoerental van het materiaal in vak 1 (de referentieklei uit een depot bij Nieuw Statenzijl) ook een overlap met de overige kleisoorten vertoont, laat deze een dergelijk grote spreiding zien dat deze klei toch als afwijkend wordt beoordeeld. Deze spreiding is ook terug te zien in de resultaten van de krimpgrensproeven. Verder is ook het (gemiddelde) waarde van de krimpgrens en de sterkteproeven dusdanig afwijkend van de overige kleisoorten dat ook op basis hiervan deze klei als afwijkend wordt beoordeeld.

Het materiaal uit drie van de vier vakken (vakken 1 t/m 3) valt in erosiebestendigheidscategorie 1 (RAW). Dit komt overeen met de resultaten van de bepaling tijdens de aanleg, zoals als dat door Boskalis is bepaald [Boskalis&van Oord 2020].

In vergelijking met eerdere roto-erosieproeven uitgevoerd op het materiaal uit de Dollarddijk [Deltares 2022b], blijken de hier onderzochte kleisoorten relatief erosiegevoelig. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de stroomsnelheden waarbij erosie op begint te treden, want deze snelheid van 0.8 tot 1.3 m/s is relatief laag (toerental 600 tot 900 tpm). De bezwijktoerentallen worden in Tabel 5.1 weergegeven. In de laatste kolom in deze tabel zijn de resultaten vergeleken met de originele indeling van de roto-erosieproeven zoals die in het verleden [Grondmechanica Delft 1988] gebruikt zijn bij de interpretatie van de roto-erosieproeven.

Tabel 5.1 Overzicht bezwijktoerentallen roto-erosieproeven.

Vaknummer	Bezuiktoerental (tpm)	Groep (Tabel 1.1)
1	700-1200	c tot e
2	1100-1200	d en e
3	1150-1400	e
4	1050-1250	d en e

In tabel valt op dat hoewel het materiaal in vak 3 weliswaar begint in groep d (overeenkomend met de andere gerijpte kleisoorten) maar beduidend verder in groep e doorloopt en dus gemiddeld het best bestand is tegen erosie.

Erg opvallend is de grote spreiding van het materiaal in vak 1, het verschil in bezwijktoerental tussen de verschillende monsters uit vak 1 is bijna een factor 2. De resultaten van de roto-erosieproeven van vakken 2, 3 en 4 wordt ondanks de verschillen toch als vergelijkbaar beschouwd.

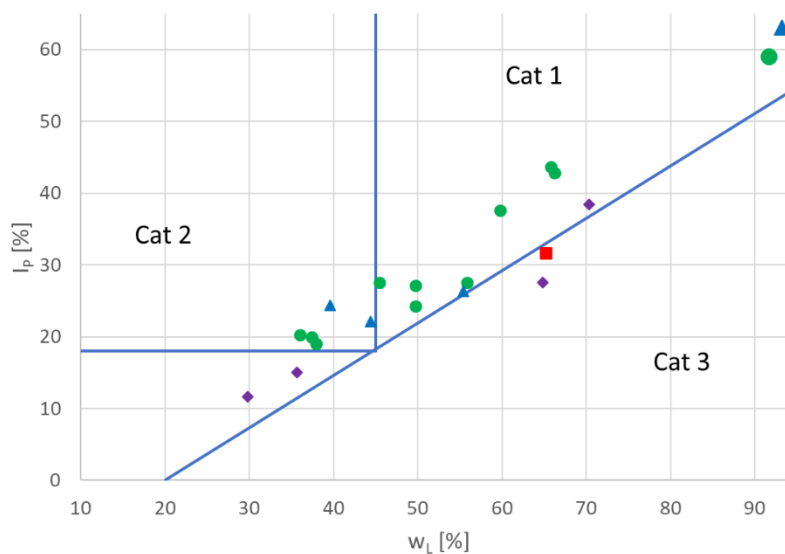
Ook de krimpgrensbepalingen laten een mogelijke invloed van de heterogeniteit van het materiaal in dit vak zien.

De verschillen in bezwijktoerentallen tussen de verschillende vakken laten geen duidelijk verband zien met de volgorde van de (ongedraineerde schuif) sterkte. Deze volgorde is met aflopende sterkte: vak 1 (referentieklei), vak 4 (Klutenplas), vak 3 (Kwelderdepot) en vak 2 (Delfzijldepot) Het verband tussen het resultaat van de sterktemetingen met de erosiegevoeligheid is derhalve niet eenvoudig te leggen. Wellicht dat het dieper ingaan op de sterkteontwikkeling bij kleine rekken in de triaxiaalproef duidelijkere verbanden kan leggen. tussen beide. Het is de verwachting dat de sterkte bij kleine rekken (< 1-2%) beter correleert

met de erosiebestendigheid, omdat de rekken bij het loslaten van deeltjes bij erosie naar verwachting ook klein zullen zijn.

Wat ook een rol kan spelen is dat de spanningscondities die heersen tijdens het erosieproces en die heersen bij de sterktebepalingen anders zijn. De triaxiaalproeven zijn geconsolideerd bij de terreinspanning. Tijdens het erosieproces zullen er andere spanningscondities heersen. Een andere uitvoering van de triaxiaalproeven kan hier meer duidelijkheid over geven.

Gezien het feit dat het materiaal van vakken 1 t/m 3 behoren tot erosiebestendigheidscategorie 1 (RAW) valt op dat dit redelijk overeenstemt met de resultaten van de roto-erosieproeven, zie Figuur 5.1, waarin rechtsonder de erosieklasse c en b is. Vooral het materiaal in vak 3 toont zich erosiebestendig, d.w.z. klasse e. Historische gegevens met klasse e zijn meestal gelegen in er RAW erosiebestendigheidscategorie 1 (rechts boven).



Figuur 5.1 Erosiecategorieën 1 t/m 3 (RAW) met daarin de groepen van Tabel 1.1 uit de in het verleden uitgevoerde roto-erosiemeterproeven.

Uit de metingen van de ongedraineerde schuifsterkte valt op dat hierbij het materiaal in vak 1 duidelijk het sterkst is en dat dit dus niet overeenstemt met de erosiegevoeligheid in de roto-erosietesten waar deze juist als minst sterke uit de bus komt. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat er slechts één triaxiaalproef per vak is uitgevoerd en dat dat bij een hoge mate van heterogeniteit niet representatief hoeft te zijn. Echter, ook de resultaten van de torvane en de pocketpentrometer laten significant hogere sterktes voor vak 1 zien.

Verder valt op dat de, uit de resultaten van de triaxiaalproef afgeleide, mate van veroudering, goed overeenkomt met de historie van de klei: het verloop van de spanningspaden en bereikte niveau van de ongedraineerde schuifspanning laten een duidelijke overeenkomst zien. Hoe rijpeter en dus hoe ouder de klei kan worden beschouwd, hoe verder het spanningspad doorloopt tot hogere waarden van de ongedraineerde schuifspanning. Het moment van het vullen van de depots waar het materiaal uit afkomstig is, is hierbij het uitgangspunt. De volgorde van de vakken qua aflopende ouderdom is als volgt vak 1 (referentieklei), vak 4 (Klutenplas), vak 3 (Kwelderdepot) en vak 2 (Delfzijldepot). Hierbij moet

worden opgemerkt dat deze veroudering niet in de proefdijk zelf heeft plaatsgevonden, maar in de periode voor de aanleg van de proefdijk.

De metingen van het water- en zoutgehalte laten geen duidelijke trend in de eerste zien, maar het zoutgehalte is op het hoogste niveau van de meting (0,3 m -MV) wel duidelijk afgenomen

Concluderend kan worden opgemerkt dat de rijping of veroudering in de proefdijk hoogstwaarschijnlijk niet tot 0,3 meter onder de zode is doorgedrongen, hetgeen aansluit bij de resultaten van het profielkuilonderzoek [Deltares, 2022b]. Er is namelijk geen systematisch verband geconstateerd in zowel de roto-erosieproeven als sterkteproeven met de diepte. Dit betekent dat de tijd vanaf de aanleg van de proefdijk in september 2020 tot het moment van bemonsteren (april 2022) onvoldoende is om extra veroudering in de onderzochte verse kleisoorten te veroorzaken. De verschillen in bezwijktoerental tussen de verschillende vakken zijn overigens wel relevant om de vergelijking met historische gegevens te kunnen maken, bovenlaten deze duidelijk de invloed van heterogeniteit zien.

Zoals hierboven opgemerkt is er het materiaal in de proefvakken overwegend heterogeen te noemen. Niet alleen in vak 1 is dat geconstateerd, maar ook in vak 2 waar sterk verdichte lagen met minder verdichte lagen elkaar afwisselen. Ook zijn in het profielkuilonderzoek duidelijk kleibrokken met een verschillende rijpingsgraad vastgesteld (afgeleid uit de kleur van de verschillende brokken klei). De heterogeniteit is dus voor een groot deel het gevolg van de wijze van aanleg.

Hierbij spelen twee aspecten: er wordt klei met verschillende rijpingsgraad naast elkaar in de dijk verwerkt en de verdichting is niet homogeen.

Met betrekking tot het eerste aspect wordt geadviseerd bij de ontgraving van klei of baggerspecie uit een depot goed te letten op de kleur (blauw/grijs en bruin) en deze soorten apart te beoordelen en te verwerken. Met betrekking tot de verdichting wordt geadviseerd deze tijdens de werkzaamheden te controleren met bijvoorbeeld de torvane en de verdichtingsmethodiek zonodig daarop aan te passen. Het nemen van steekmonsters, zoals dat nu vaak gebeurt bij de verdichtingscontrole, levert hoogstwaarschijnlijk een te gering onderscheidend vermogen door de grotere dimensies van dergelijke steekmonsters.

Homogeniteit van de erosieve eigenschappen is van groot belang voor een dijk, de zwakste zones bepalen voor een groot gedeelte de sterkte van die dijk.

Literatuur

[Boskalis&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.

[Briaud et al.2019]

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

[Deltares 2022a]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 2A: Onderzoek klei bestaande dijk; kenmerk, 11207091-004-GEO-0006

[Deltares 2022b]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei: Profielkuilbeschrijvingen Dollarddijk en proefdijk; kenmerk 11207091-005-GEO-0003.

Deltares 2022c]

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

Deltares 2022d]

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 8: Onderzoek structuurvorming bakkenklei, 11207091-010-GEO-0001

[Grondmechanica Delft 1988]

Grondmechanica Delft 1988; CO-275925/14.

[NEN-EN-ISO 17892-4]

Geotechnisch onderzoek en beproeving - Beproeving van grond in het laboratorium - Deel 4: Bepaling van de korrelgrootte verdeling (ISO 17892-4:2016, IDT)

[TAW 1996]

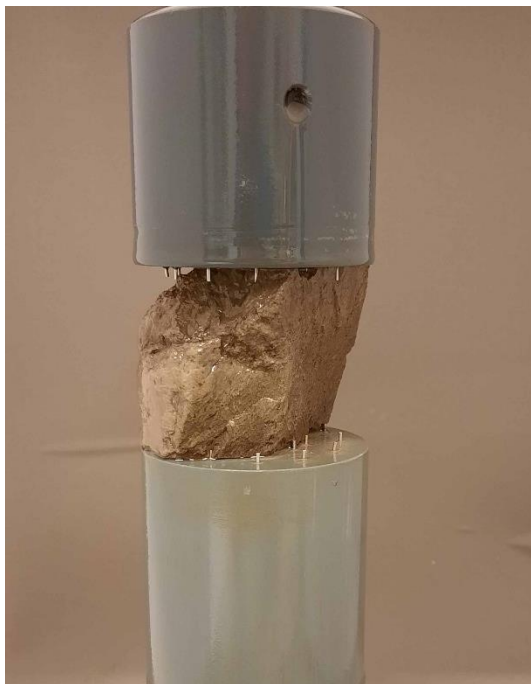
Technisch rapport Klei voor Dijken; TAW 1996.

A Foto's roto-erosieproeven

A.1 Vak 1



Figuur A.2 Monster Vak1_h1 voor de erosieproef.



Figuur A.3 Monster Vak1_h1 na de erosieproef.



Figuur A.4 Monster Vak1_Is voor de erosieproef.



Figuur A.5 Monster Vak1_Is na de erosieproef.



Figuur A.6 Monster Vak1_II voor de erosieproef.



Figuur A.7 Monster Vak1_II2 voor de erosieproef.



Figuur A.8 Monster Vak1_II2 na de erosieproef.

A.2 Vak 2



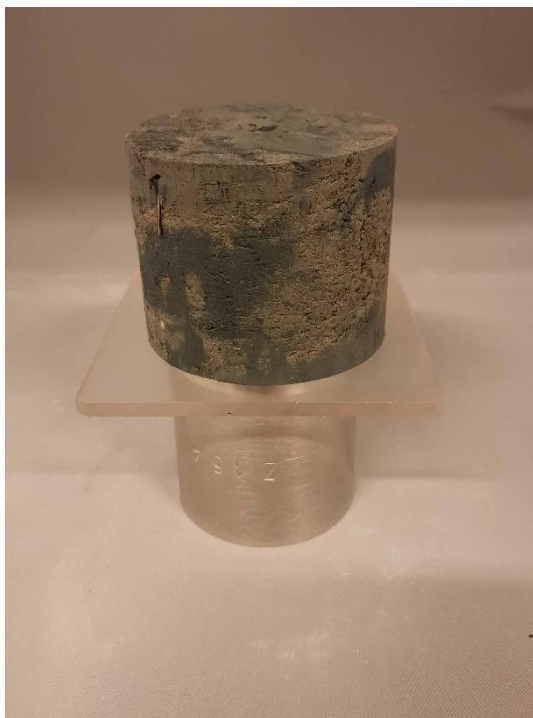
Figuur A.9 Monster Vak2_h1 voor de erosieproef.



Figuur A.10 Monster Vak2_Is voor de erosieproef.



Figuur A.11 Monster Vak2_Is na de erosieproef.



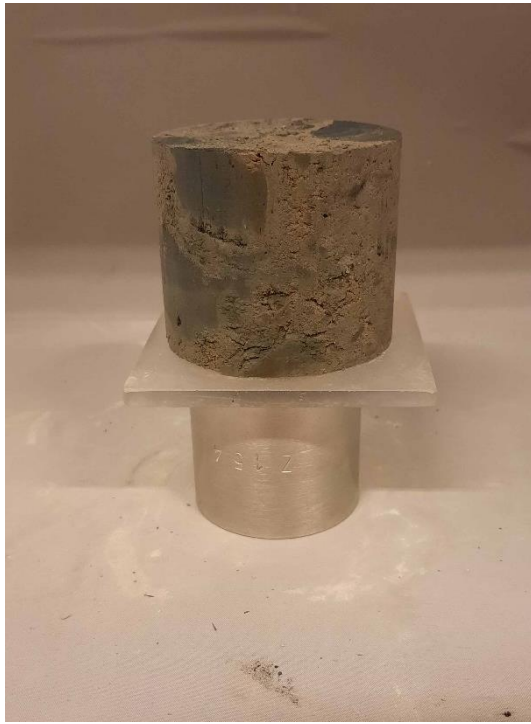
Figuur A.12 Monster Vak3_hl voor de erosieproef.



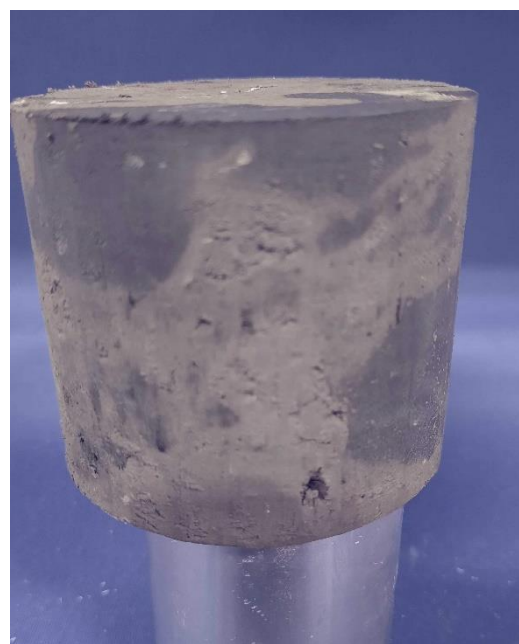
Figuur A.13 Monster Vak3_hl na de erosieproef.



Figuur A.14 Monster Vak3_ls voor de erosieproef.



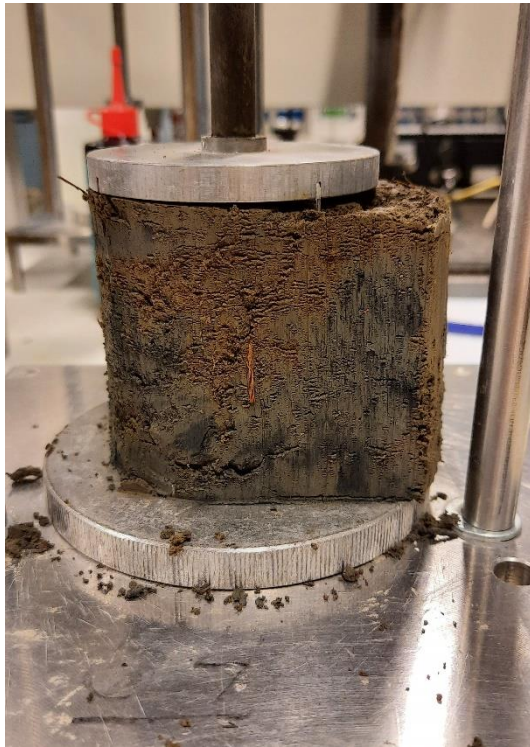
Figuur A.15 Monster Vak3_II voor de erosieproef.



Figuur A.16 Monster Vak3_II2 voor de erosieproef.



Figuur A.17 Monster Vak3_II2 na de erosieproef.



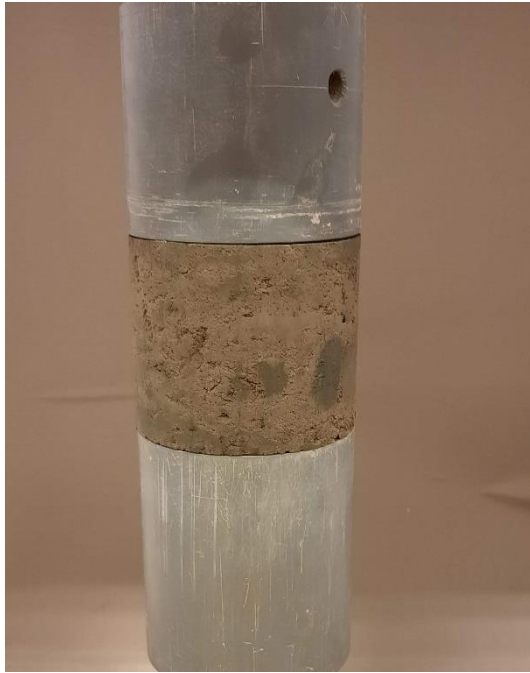
Figuur A.18 Monster Vak4_hl voor de erosieproef.



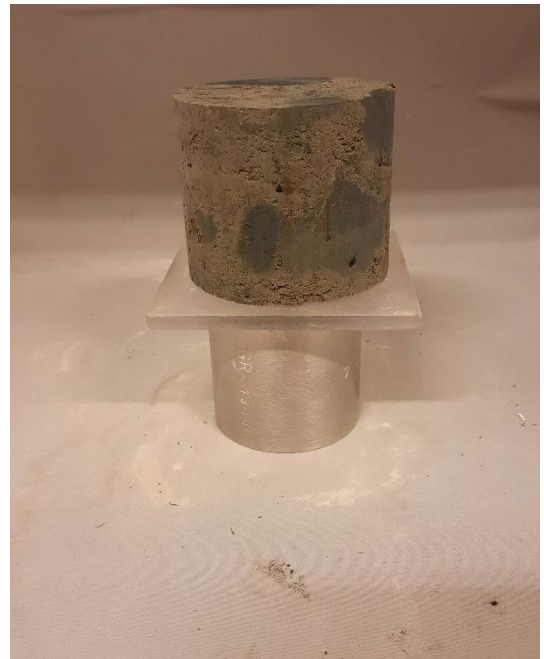
Figuur A.19 Monster Vak4_Is voor de erosieproef.



Figuur A.20 Monster Vak4_Is na de erosieproef.



Figuur A.21 Monster Vak4_II voor de erosieproef.

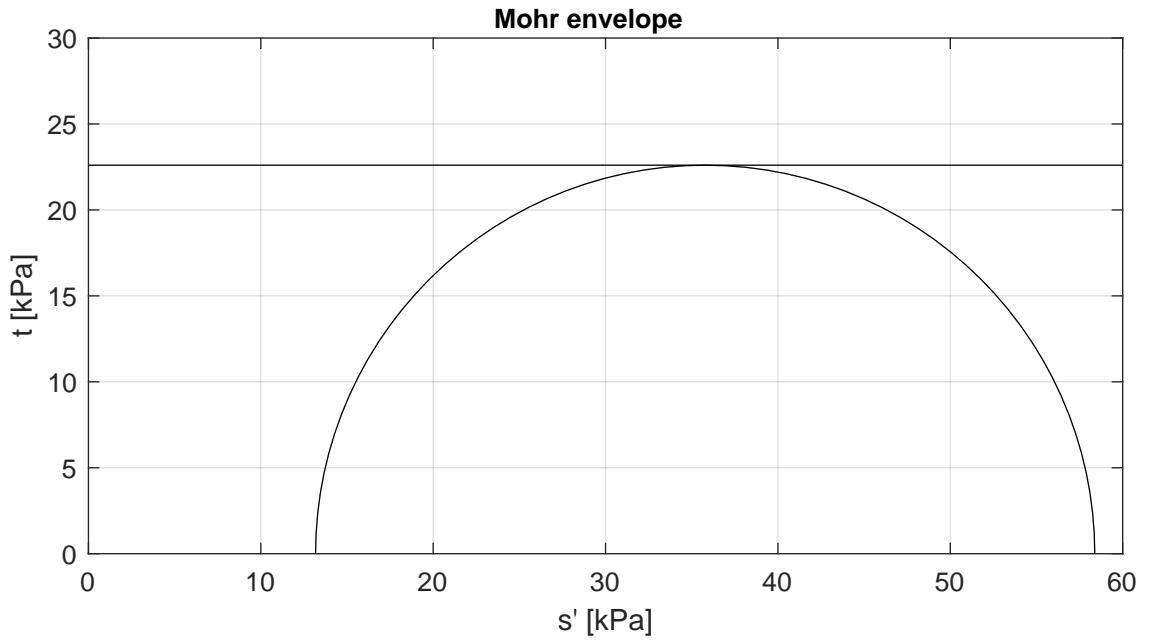


Figuur A.22 Monster Vak4_II2 voor de erosieproef.



Figuur A.23 Monster Vak4_II2 na de erosieproef.

B Resultaten triaxiaalproeven



Criterion	maximum t
c_u [kPa]	22.6

Start testing

Stage number	1
Sample name	Vak2_1
m_i [g]	833.2
D_i [mm]	65.8
h_i [mm]	130.7
w_i [%]	51.3
$\rho_{i,bulk}$ [kg/m ³]	1873
$\rho_{i,dry}$ [kg/m ³]	1238
Material	Clay, moderately silty

Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-25

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak2_hoek2, Sample Vak2_1, depth 3.60 till 3.45m NAP

project
11207091.5

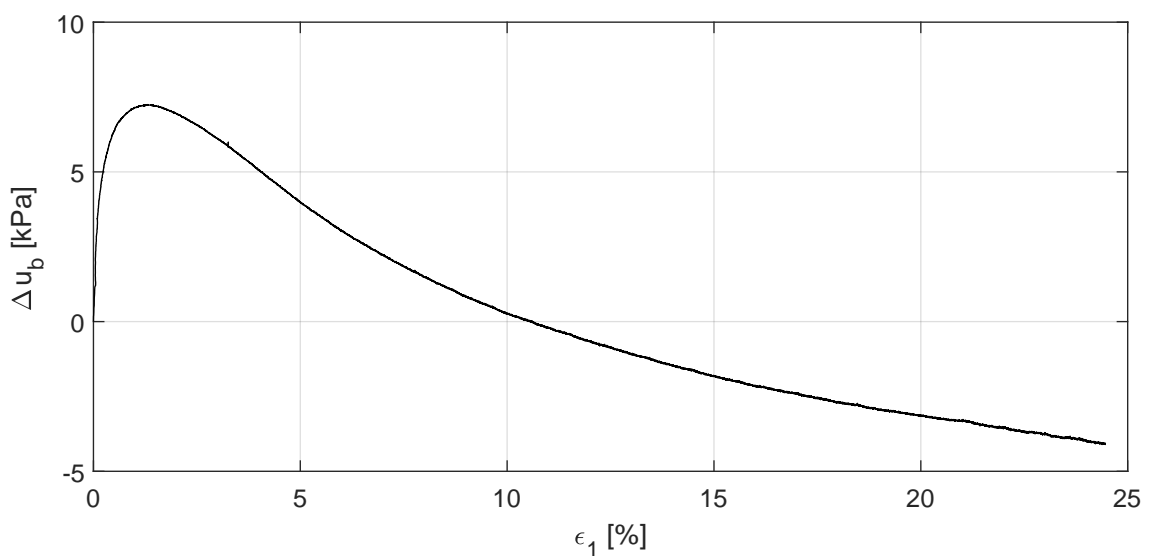
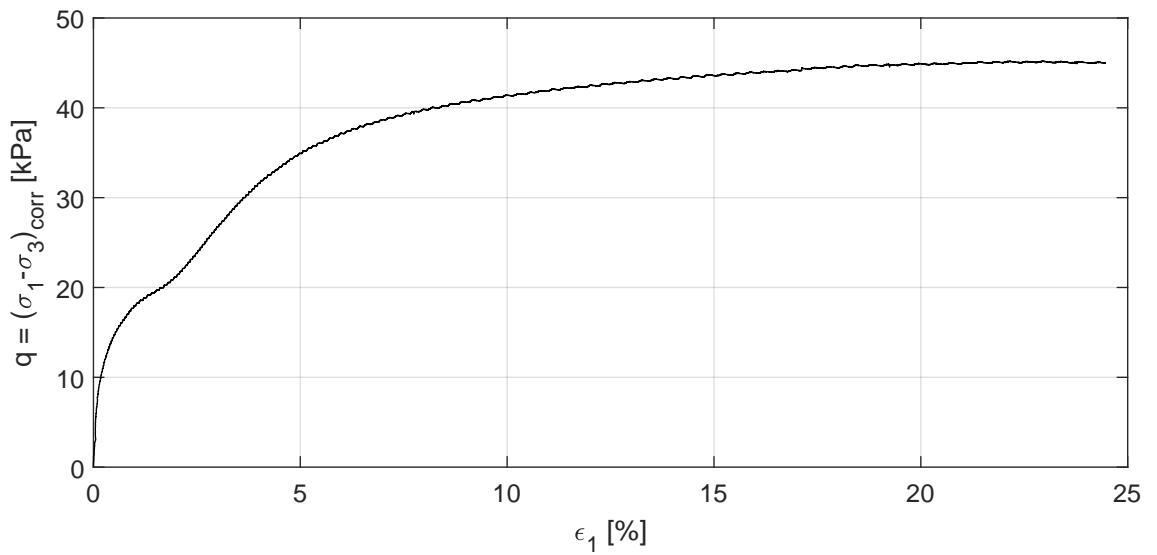
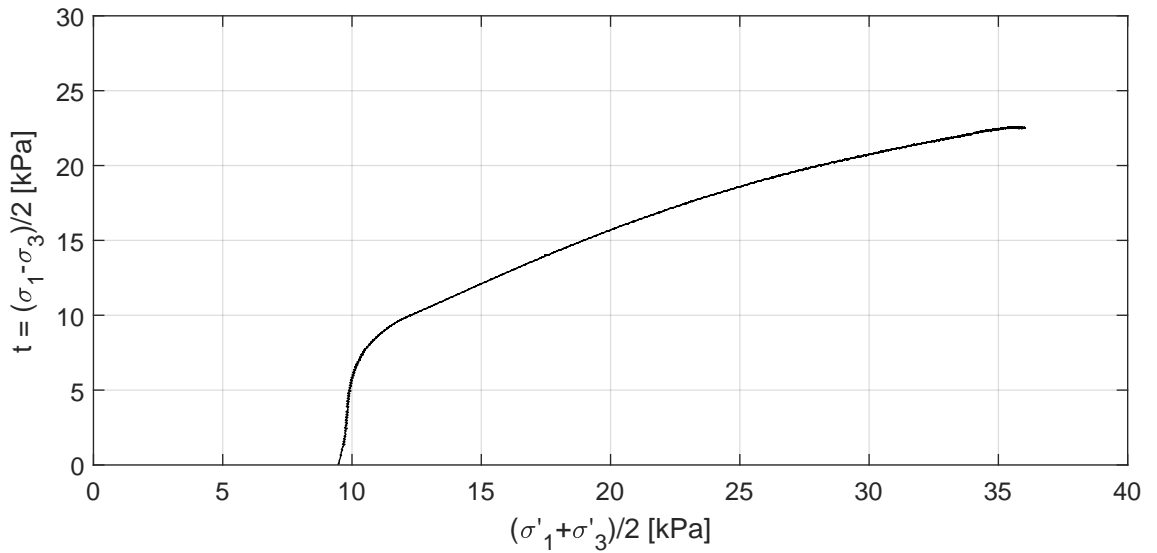
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak2_1

page
1

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-25

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak2_hoek2, Sample Vak2_1, depth 3.60 till 3.45m NAP

project
11207091.5


Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak2_1

page
2

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

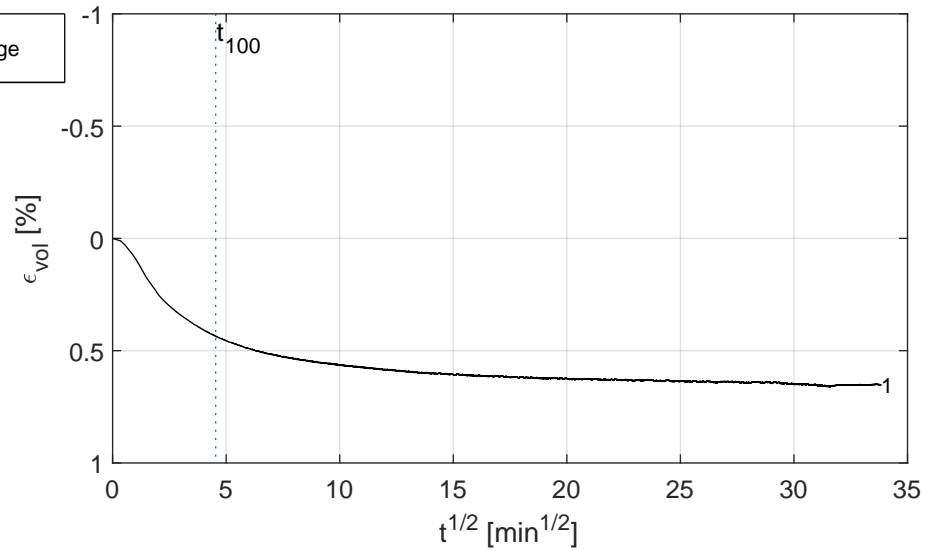
	Loading stage	1	2	3
Saturation stage	B_0 [-]	0.87		
	B_1 [-]	0.98		
Consolidation stage	$\sigma'_{1,c}$ [kPa]	9.6		
	$\sigma'_{3,c}$ [kPa]	9.6		
	t_{100} [min]	20.6		
	h_c [mm]	130.2		
	V_c [cm ³]	441.9		
	$\rho_{n,c}$ [kg/m ³]	1915		
	w_c [%]	53.7		
	u_{bk} [kPa]	501		
	P [-]	2.30		
	Creep rate [%/h]	-0.001		
	v_{max} [%/h]	6.3		
Shear stage	v [%/h]	1.0		
	Stop criterion	ϵ_1 25%		
	Correction text	MP (Deltares)		
	$\sigma_{1,u} - \sigma_{3,u}$ [kPa]	45.2		
After testing	f_{undr} [kPa]	22.6		
	$\epsilon_{1,50}$ [%]	2.28		
	E_{50} [MPa]	1.0		
	w_e [%]	51.8		
	Fail figure			

Vertical strain [%]	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kPa]
2.0	13.0	10.6
5.0	22.9	17.5
10.0	29.9	20.7
24.0 (max)	35.9	22.5

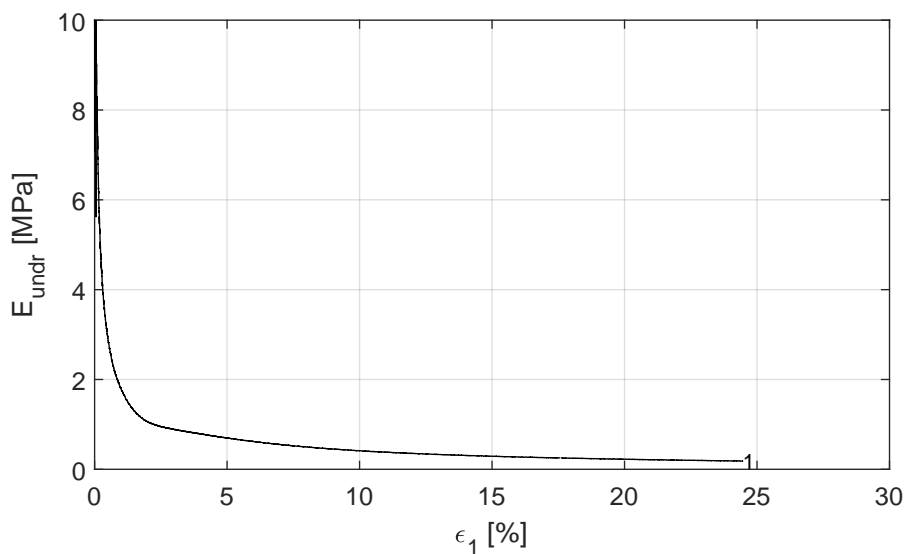
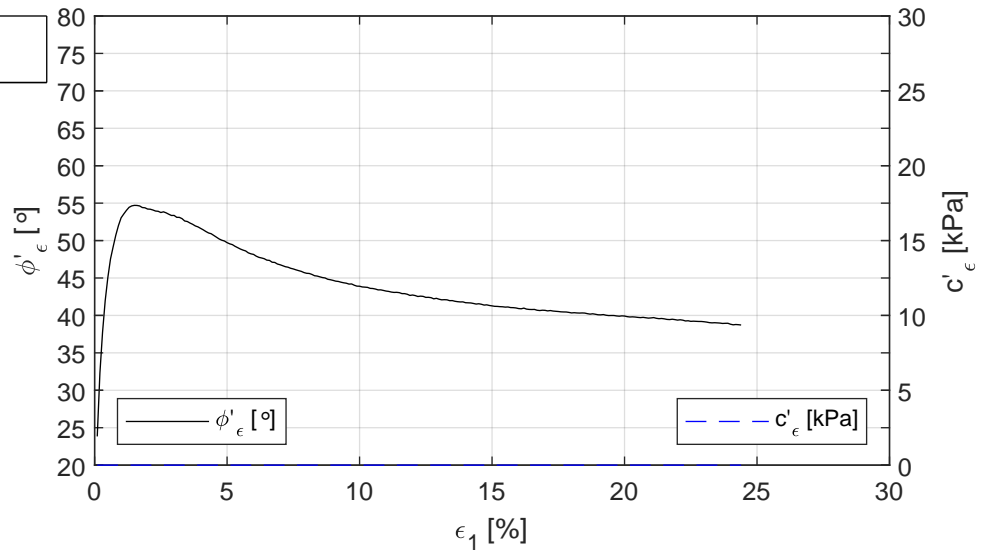
Deltares	PO Box 177, NL 2600 MH Delft	Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:	date	signed
	Boussinesqweg 1, 2629HV Delft	Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl	2022-07-25	venema
Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdiijk			project	Version
Boring Vak2_hoek2, Sample Vak2_1, depth 3.60 till 3.45m NAP			11207091.5	1.1
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9			appendix	page
			TX Vak2_1	3

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

Consolidation stage



Shear stage



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-25

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak2_hoek2, Sample Vak2_1, depth 3.60 till 3.45m NAP

project
11207091.5

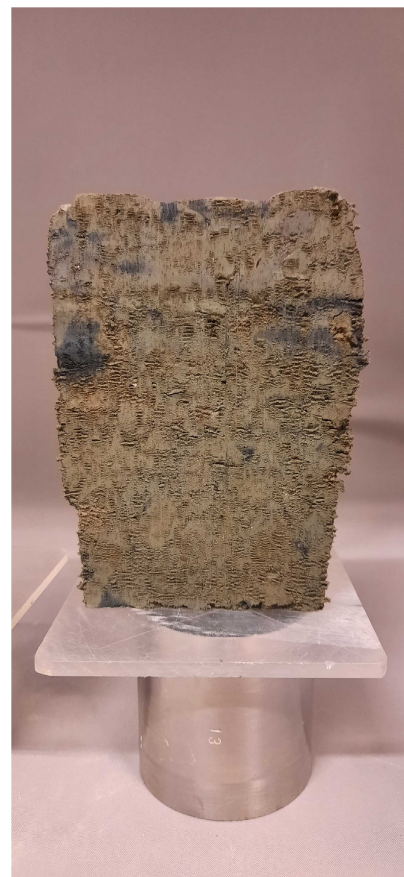
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak2_1

page
4

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629 HV Delft

Telephone +31 (0)88 3358273 Homepage:
Telefax +31 (0)88 3358582 www.deltares.nl

date
2022-07-25

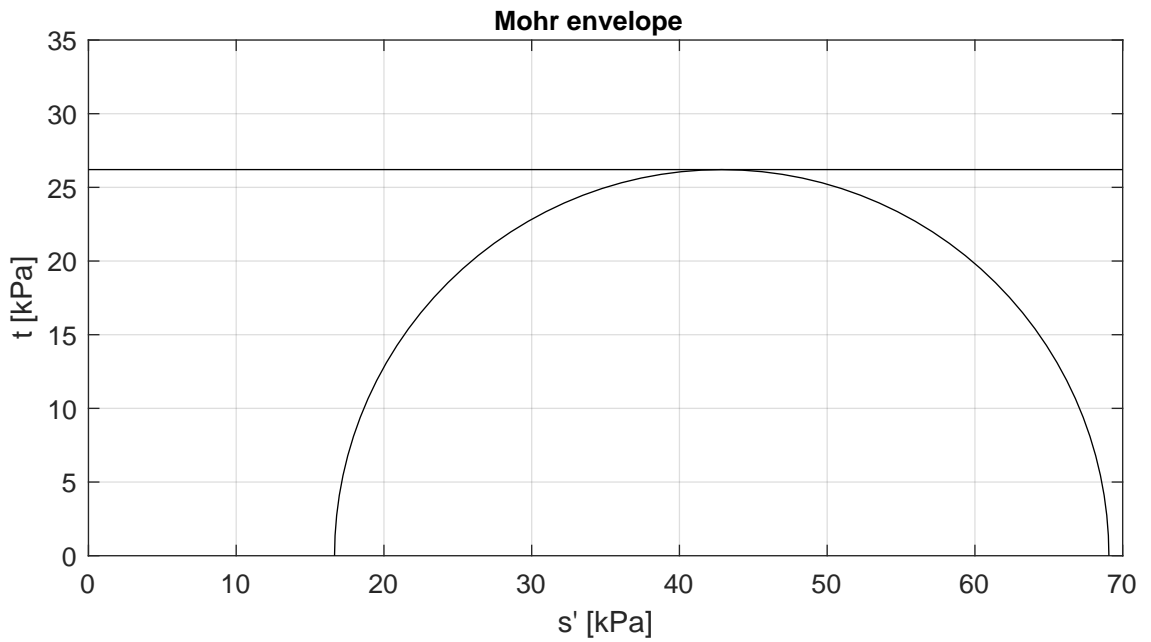
signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak2_hoek2, Sample Vak2_1, depth 3.60 till 3.45m NAP
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

project
11207091.5
appendix
TX Vak2_1

version
1.1
page
5

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Criterion	maximum t
c_u [kPa]	26.2

Start testing

Stage number	1
Sample name	Vak3_1
m_i [g]	788.9
D_i [mm]	67.2
h_i [mm]	131.6
w_i [%]	44.5
$\rho_{i,bulk}$ [kg/m ³]	1689
$\rho_{i,dry}$ [kg/m ³]	1169
Material	Clay, slightly silty, wortels

Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-22

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak3_hoek1, Sample Vak3_1, depth 3.80 till 3.67m NAP

project
11207091.5

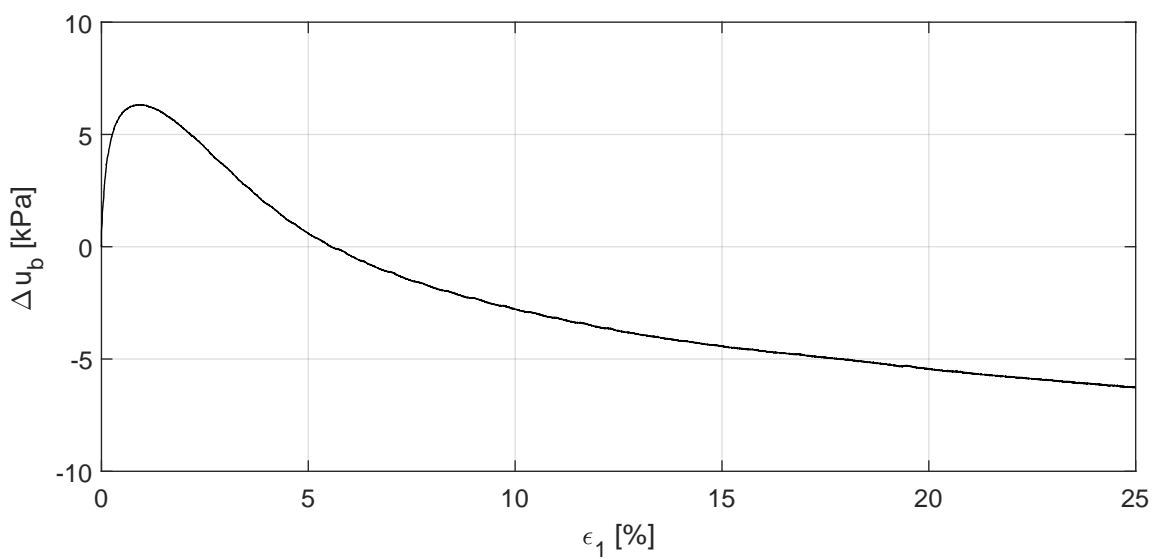
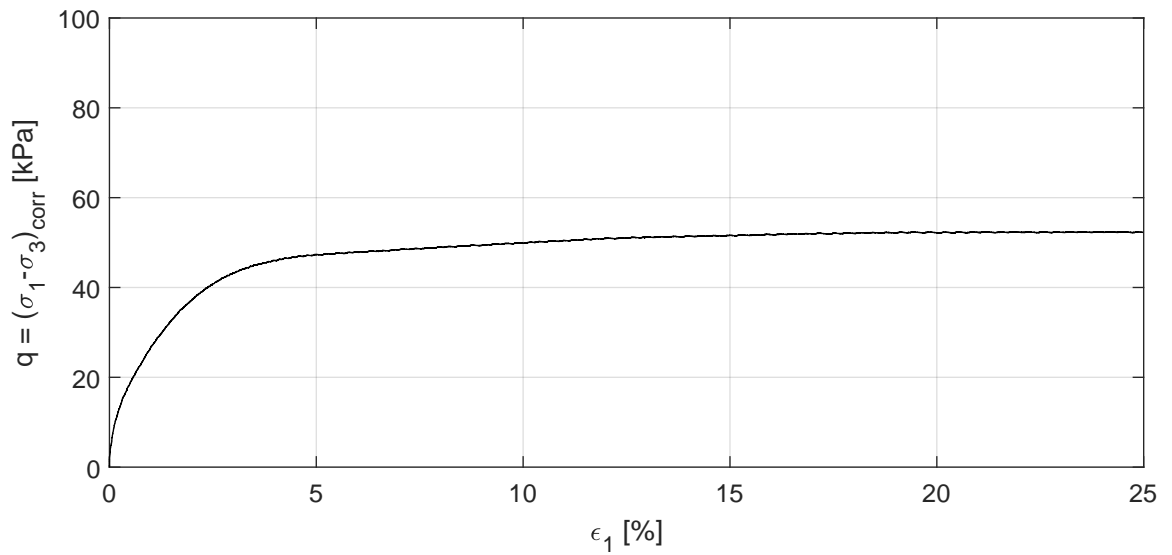
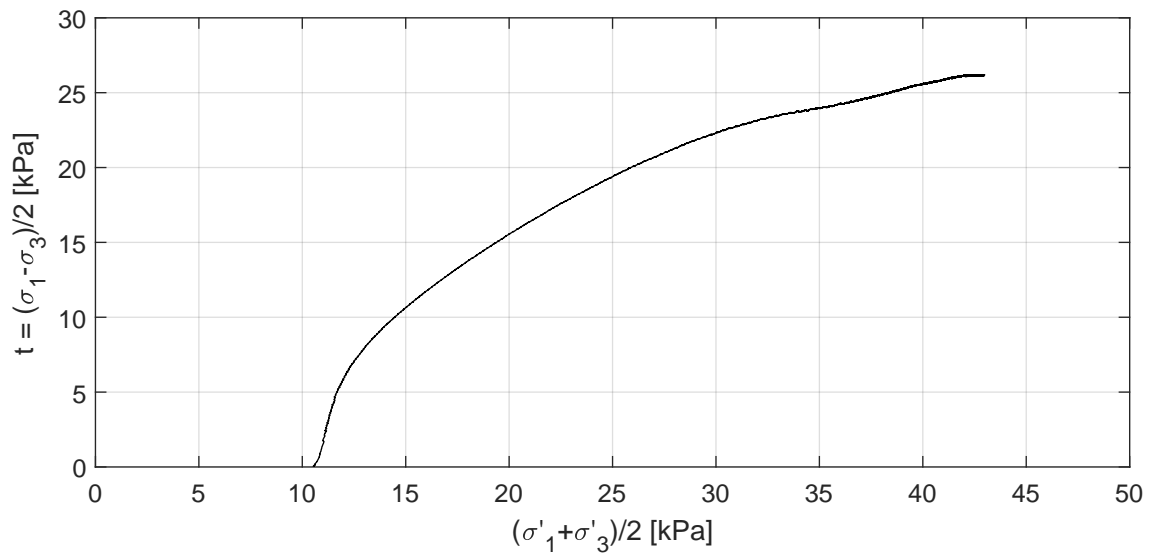
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak3_1

page
1

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-22



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-22

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak3_hoek1, Sample Vak3_1, depth 3.80 till 3.67m NAP

project
11207091.5


Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak3_1

page
2

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-22

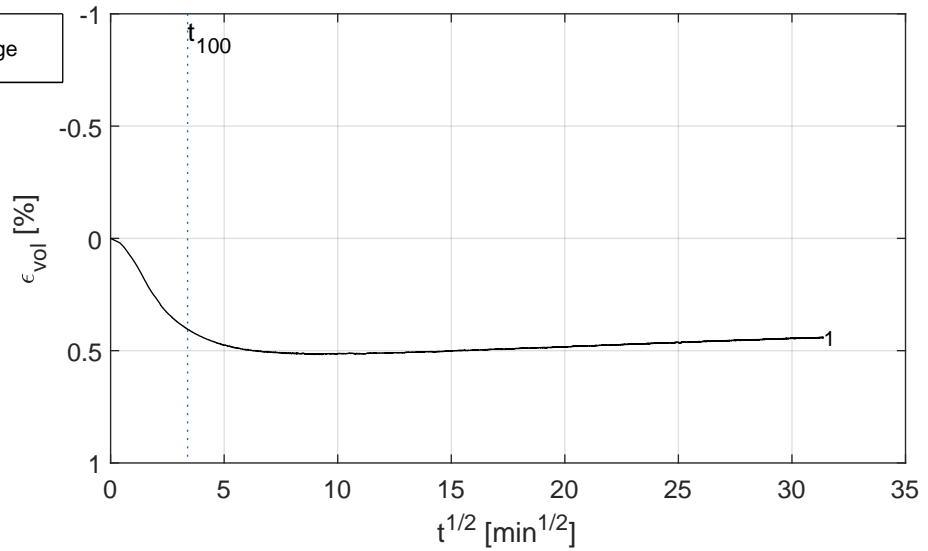
	Loading stage	1	2	3
Saturation stage	B_0 [-]	0.51		
	B_1 [-]	0.97		
Consolidation stage	$\sigma'_{1,c}$ [kPa]	10.5		
	$\sigma'_{3,c}$ [kPa]	10.4		
	t_{100} [min]	11.5		
	h_c [mm]	131.6		
	V_c [cm ³]	465.0		
	$\rho_{n,c}$ [kg/m ³]	1735		
	w_c [%]	47.8		
	u_{bk} [kPa]	501		
	P [-]	2.30		
	Creep rate [%/h]	-0.002		
	v_{max} [%/h]	11.4		
	Shear stage	v [%/h]	1.0	
Stop criterion		ϵ_1 25%		
Correction text		MP (Deltares)		
$\sigma_{1,u} - \sigma_{3,u}$ [kPa]		52.4		
After testing	f_{undr} [kPa]	26.2		
	$\epsilon_{1,50}$ [%]	0.97		
	E_{50} [MPa]	2.7		
	w_e [%]	49.0		
	Fail figure			

Vertical strain [%]	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ [kPa]			$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kPa]		
2.0	24.0			18.7		
5.0	33.6			23.7		
10.0	38.3			24.9		
24.0 (max)	42.8			26.1		

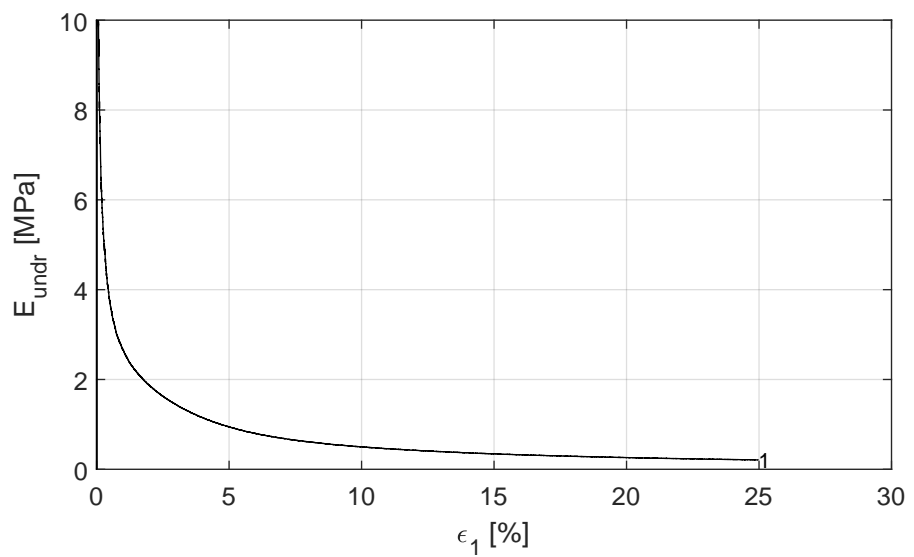
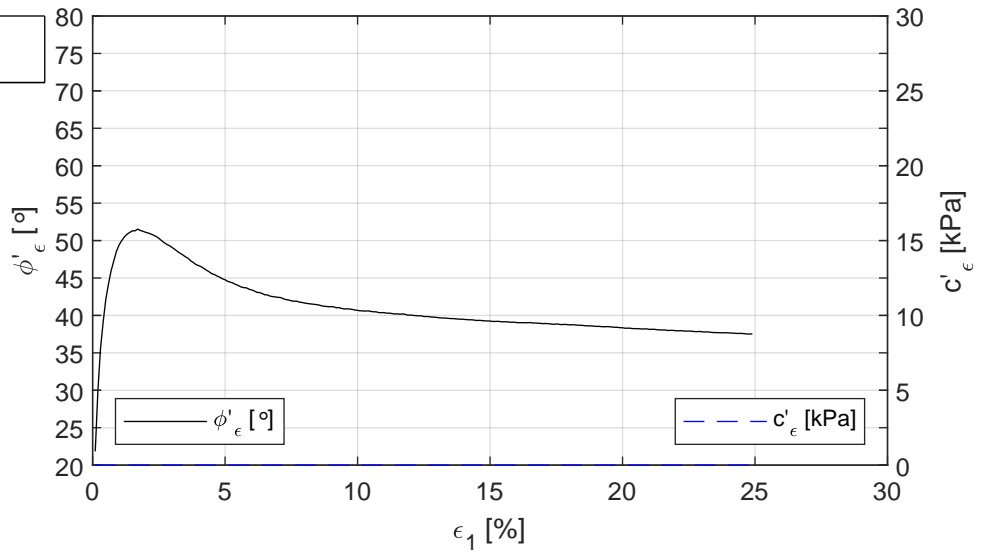
Deltares	PO Box 177, NL 2600 MH Delft	Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:	date	signed
	Boussinesqweg 1, 2629HV Delft	Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl	2022-07-22	venema
Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk			project	Version
Boring Vak3_hoek1, Sample Vak3_1, depth 3.80 till 3.67m NAP			11207091.5	1.1
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9			appendix	page
			TX Vak3_1	3

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-22

Consolidation stage



Shear stage



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-22

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak3_hoek1, Sample Vak3_1, depth 3.80 till 3.67m NAP

project
11207091.5

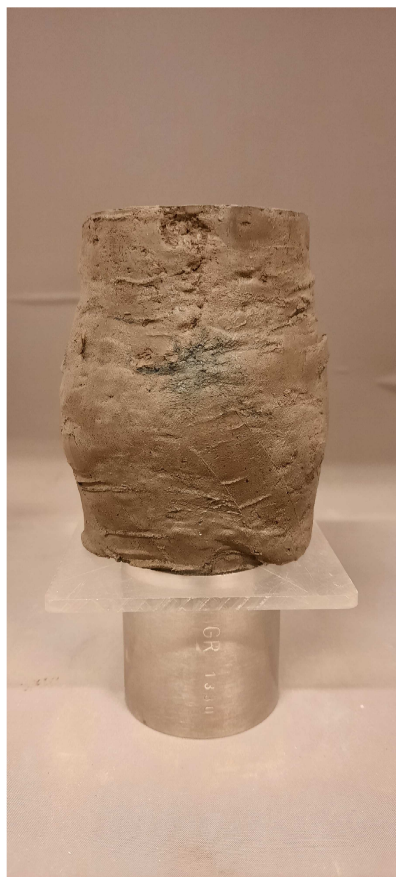
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak3_1

page
4

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-22



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629 HV Delft

Telephone +31 (0)88 3358273
Telefax +31 (0)88 3358582

Homepage:
www.deltares.nl

date
2022-07-22

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak3_hoek1, Sample Vak3_1, depth 3.80 till 3.67m NAP

project
11207091.5

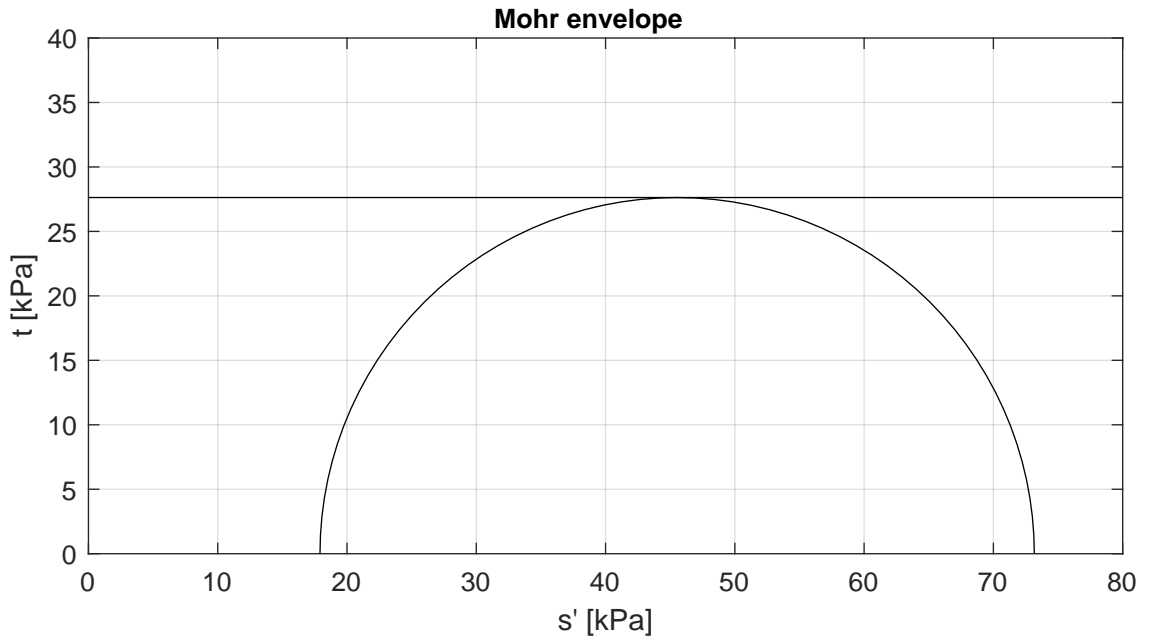
version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak3_1

page
5

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-22



Criterion	maximum t
c_u [kPa]	27.6

Start testing

Stage number	1
Sample name	Vak4_1
m_i [g]	771.9
D_i [mm]	67.1
h_i [mm]	131.7
w_i [%]	50.2
$\rho_{i,bulk}$ [kg/m ³]	1656
$\rho_{i,dry}$ [kg/m ³]	1103
Material	Clay, slightly silty, plant remains, roestplekken

Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-26

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak4_hoek2, Sample Vak4_1, depth 3.88 till 3.75m NAP

project
11207091.5

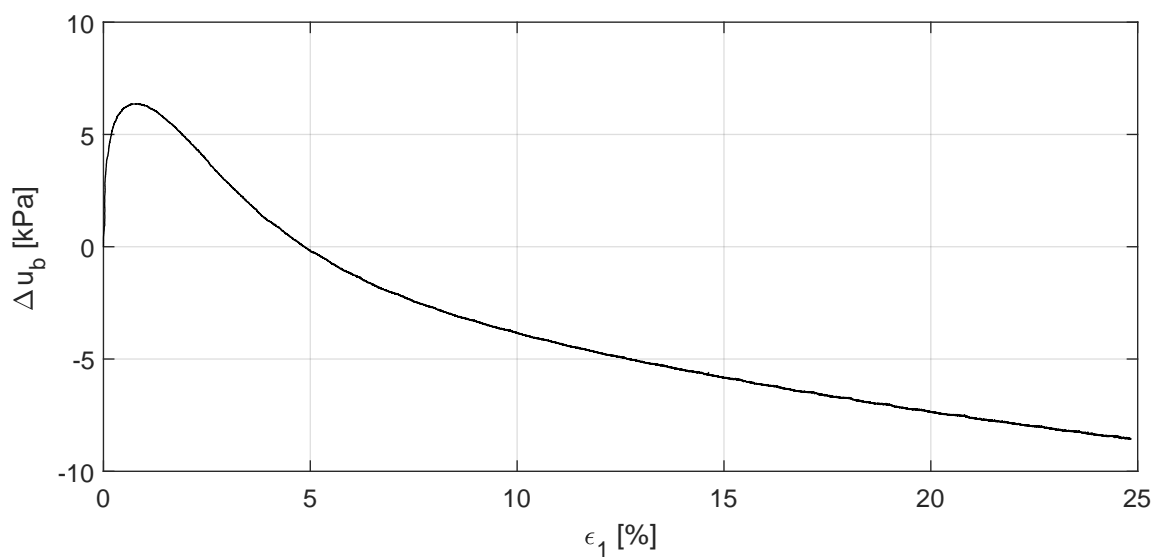
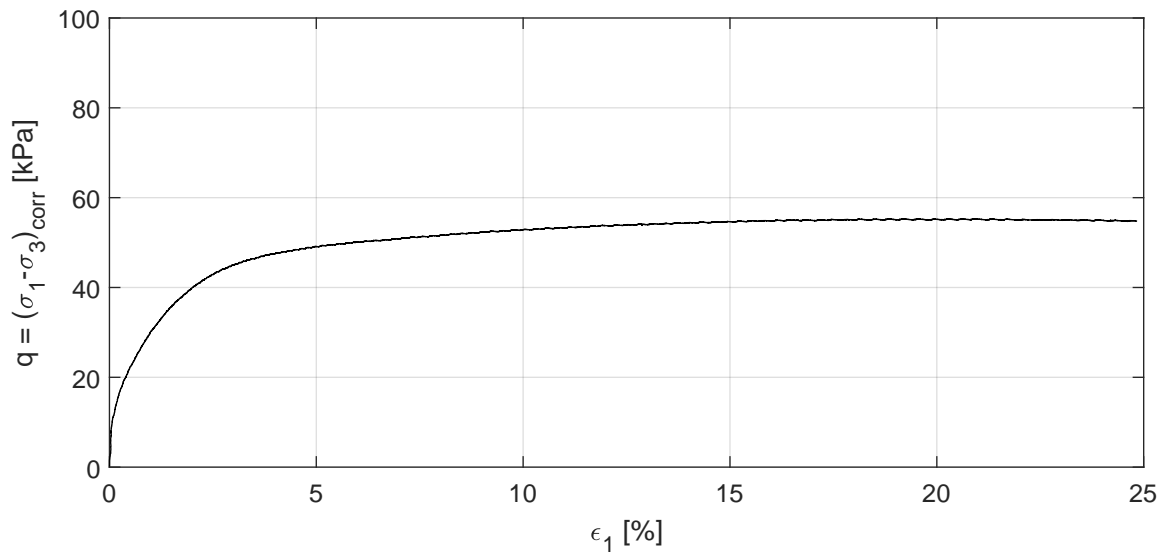
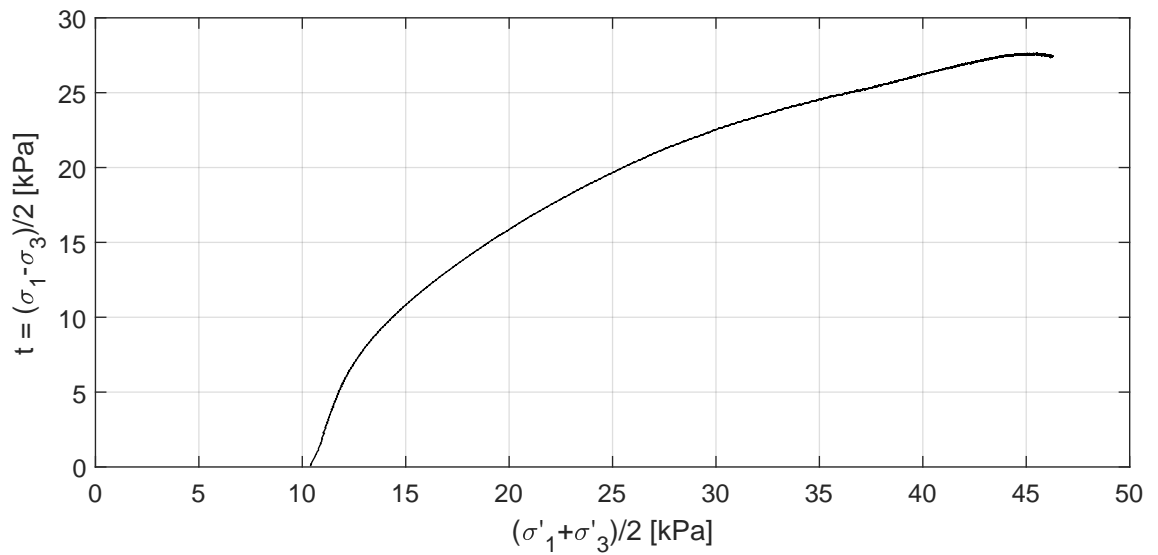
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak4_1

page
1

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-26

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak4_hoek2, Sample Vak4_1, depth 3.88 till 3.75m NAP

project
11207091.5


Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak4_1

page
2

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

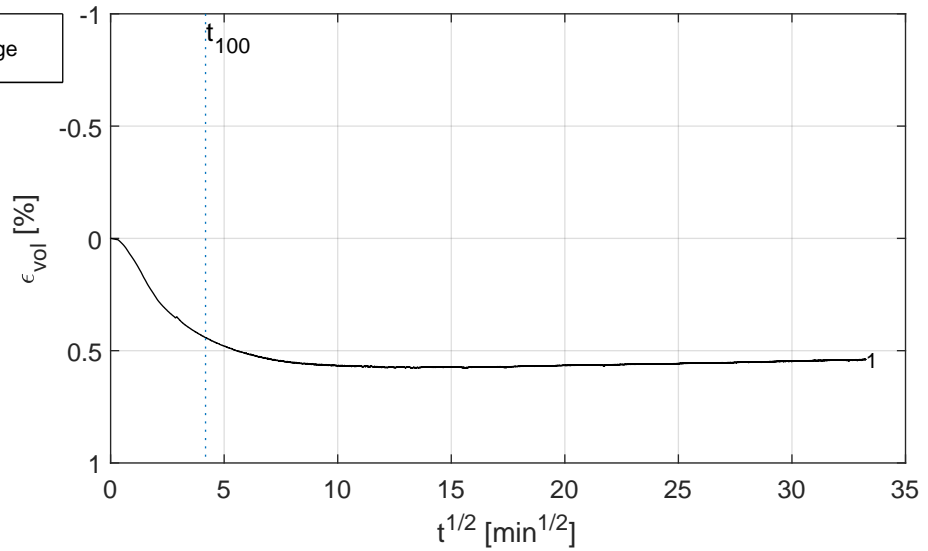
	Loading stage	1	2	3
Saturation stage	B_0 [-]	0.48		
	B_1 [-]	0.97		
Consolidation stage	$\sigma'_{1,c}$ [kPa]	10.4		
	$\sigma'_{3,c}$ [kPa]	10.2		
	t_{100} [min]	17.5		
	h_c [mm]	131.8		
	V_c [cm ³]	463.5		
	$\rho_{n,c}$ [kg/m ³]	1709		
	w_c [%]	54.1		
	u_{bk} [kPa]	501		
	P [-]	2.30		
	Creep rate [%/h]	-0.002		
	v_{max} [%/h]	7.5		
	v [%/h]	1.0		
	Stop criterion	ϵ_1 25%		
Correction text	MP (Deltares)			
After testing	$\sigma_{1,u} - \sigma_{3,u}$ [kPa]	55.3		
	f_{undr} [kPa]	27.6		
	$\epsilon_{1,50}$ [%]	0.84		
	E_{50} [MPa]	3.3		
	w_e [%]	53.4		
	Fail figure			

Vertical strain [%]	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kPa]
2.0	25.5	20.0
5.0	35.1	24.6
10.0	40.6	26.4
24.0 (max)	46.1	27.5

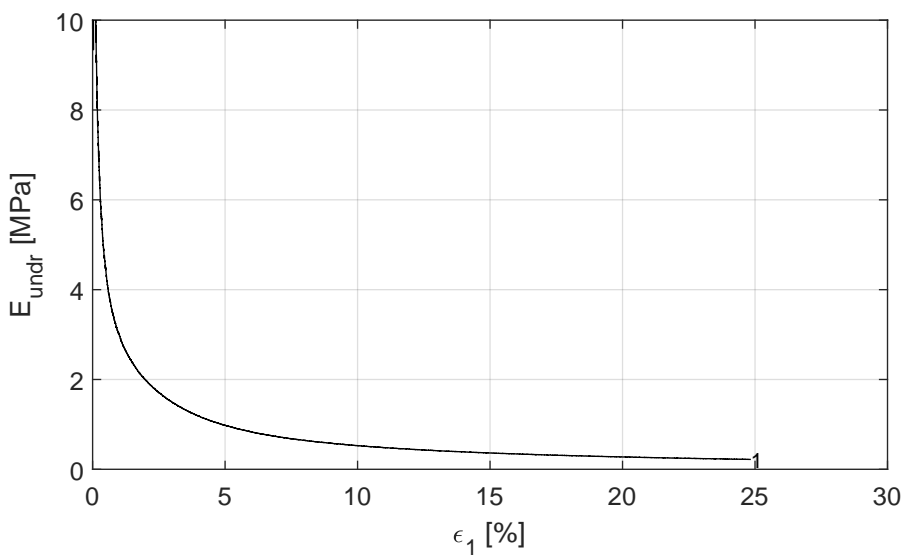
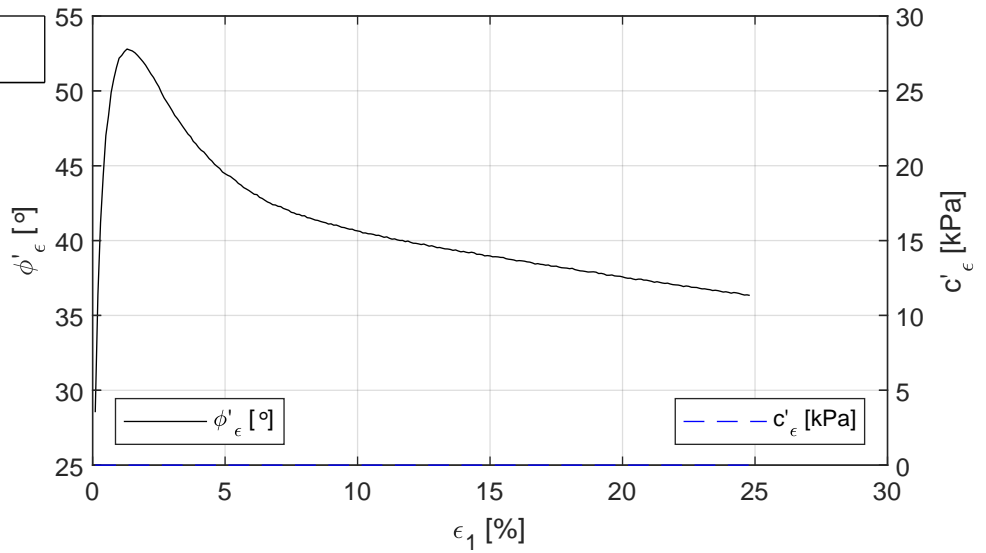
Deltares	PO Box 177, NL 2600 MH Delft	Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:	date	signed
	Boussinesqweg 1, 2629HV Delft	Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl	2022-07-26	venema
Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk			project	Version
Boring Vak4_hoek2, Sample Vak4_1, depth 3.88 till 3.75m NAP			11207091.5	1.1
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9			appendix	page
			TX Vak4_1	3

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

Consolidation stage



Shear stage



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-26

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak4_hoek2, Sample Vak4_1, depth 3.88 till 3.75m NAP

project
11207091.5

Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak4_1

page
4

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629 HV Delft

Telephone +31 (0)88 3358273 Homepage:
Telefax +31 (0)88 3358582 www.deltares.nl

date
2022-07-26

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak4_hoek2, Sample Vak4_1, depth 3.88 till 3.75m NAP
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

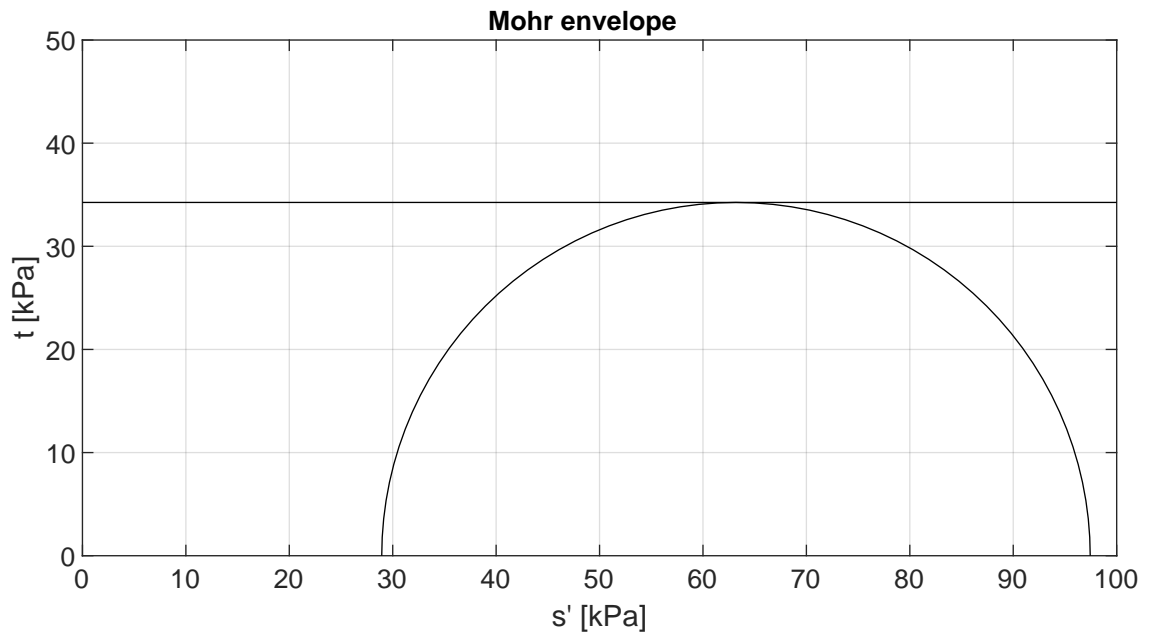
project
11207091.5

version
1.1

appendix
TX Vak4_1

page
5

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Criterion	maximum t
c_u [kPa]	34.3

Start testing

Stage number	1
Sample name	Vak1_1
m_i [g]	804.4
D_i [mm]	66.4
h_i [mm]	120.8
w_i [%]	37.1
$\rho_{i,bulk}$ [kg/m ³]	1925
$\rho_{i,dry}$ [kg/m ³]	1404
Material	Clay, slightly silty

Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-28

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak1_hoek1, Sample Vak1_1, depth 3.47 till 3.34m NAP

project
11207091.5

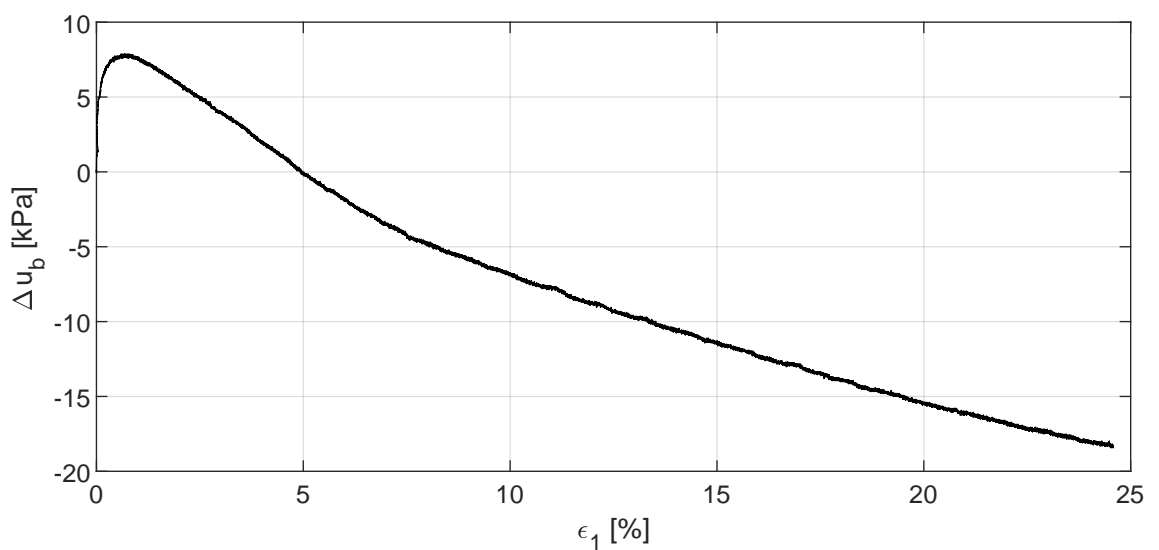
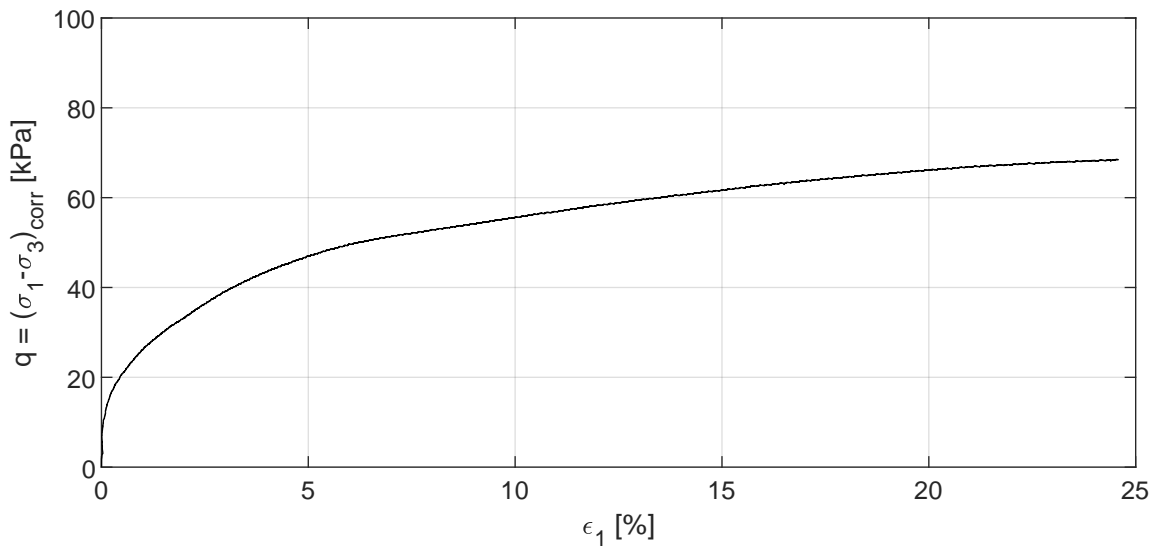
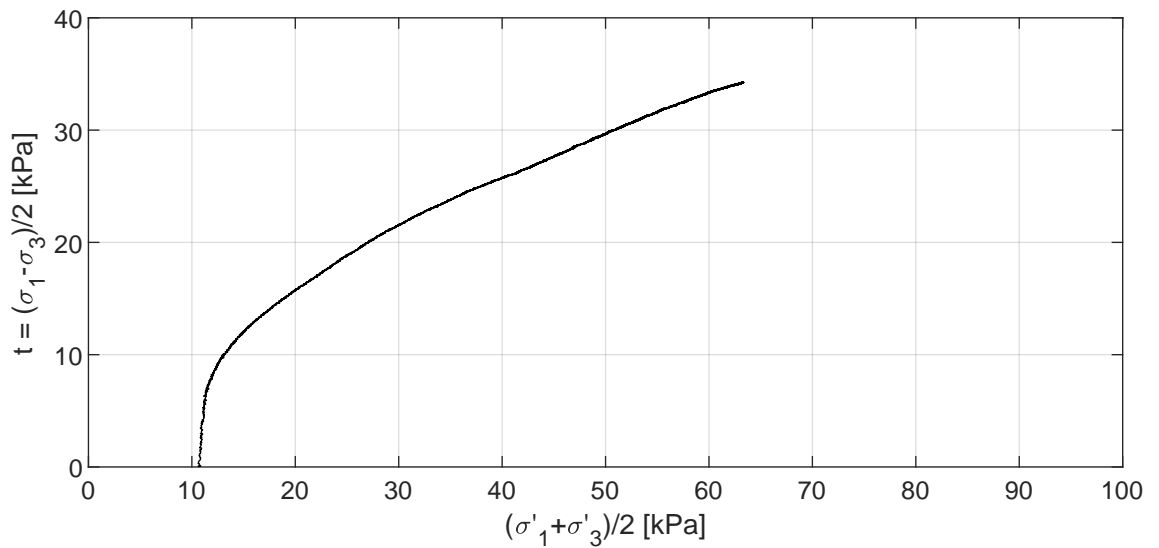
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak1_1

page
1

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629HV Delft

Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:
Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl

date
2022-07-28

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak1_hoek1, Sample Vak1_1, depth 3.47 till 3.34m NAP

project
11207091.5

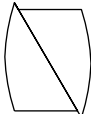
Version
1.1

CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

appendix
TX Vak1_1

page
2

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

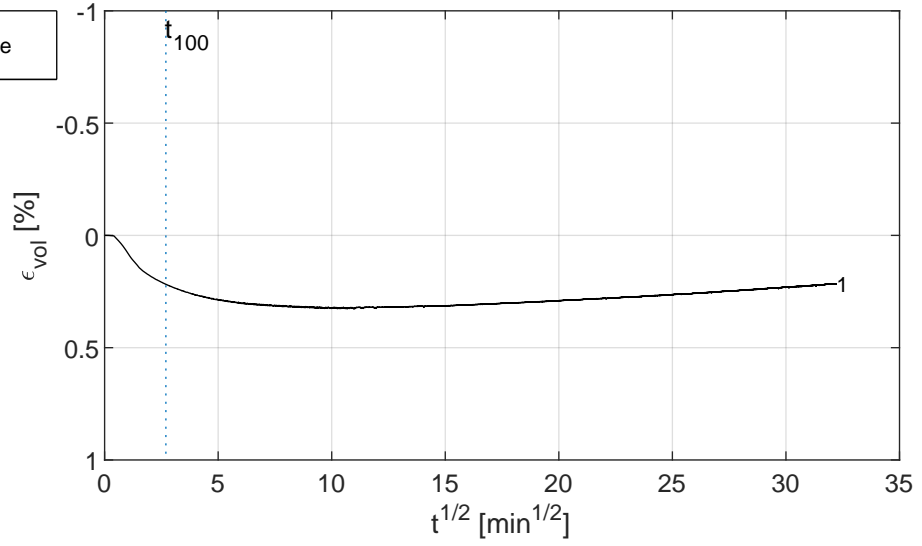
	Loading stage	1	2	3
Saturation stage	B_0 [-]	0.73		
	B_1 [-]	0.99		
Consolidation stage	$\sigma'_{1,c}$ [kPa]	9.6		
	$\sigma'_{3,c}$ [kPa]	9.5		
	t_{100} [min]	7.3		
	h_c [mm]	120.5		
	V_c [cm ³]	416.9		
	$\rho_{n,c}$ [kg/m ³]	1958		
	w_c [%]	39.1		
	u_{bk} [kPa]	501		
	P [-]	2.30		
	Creep rate [%/h]	-0.007		
	v_{max} [%/h]	17.9		
	Shear stage	v [%/h]	1.0	
Stop criterion		ϵ_1 25%		
Correction text		MP (Deltares)		
$\sigma_{1,u} - \sigma_{3,u}$ [kPa]		68.5		
After testing	f_{undr} [kPa]	34.3		
	$\epsilon_{1,50}$ [%]	2.17		
	E_{50} [MPa]	1.6		
	w_e [%]	41.9		
	Fail figure			

Vertical strain [%]	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ [kPa]
2.0	21.4	16.6
5.0	34.2	23.5
10.0	45.3	27.8
24.0 (max)	62.9	34.1

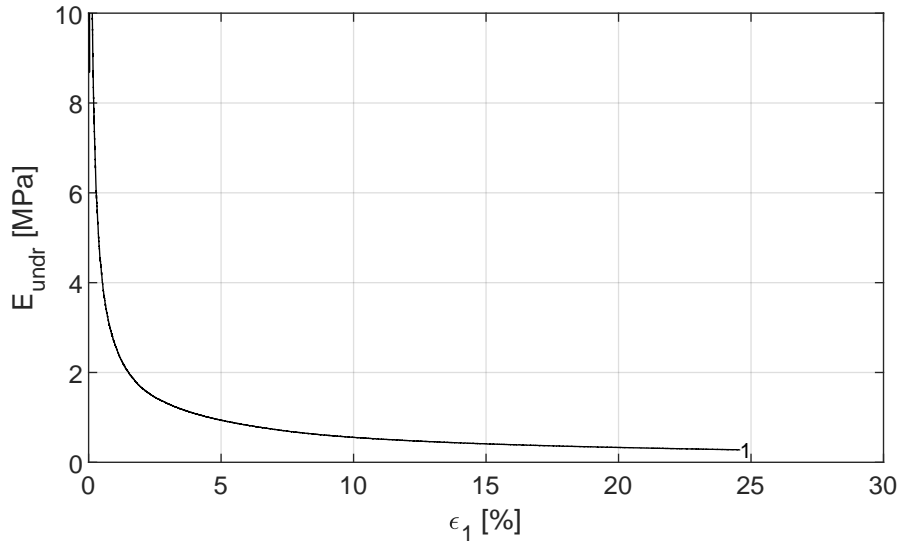
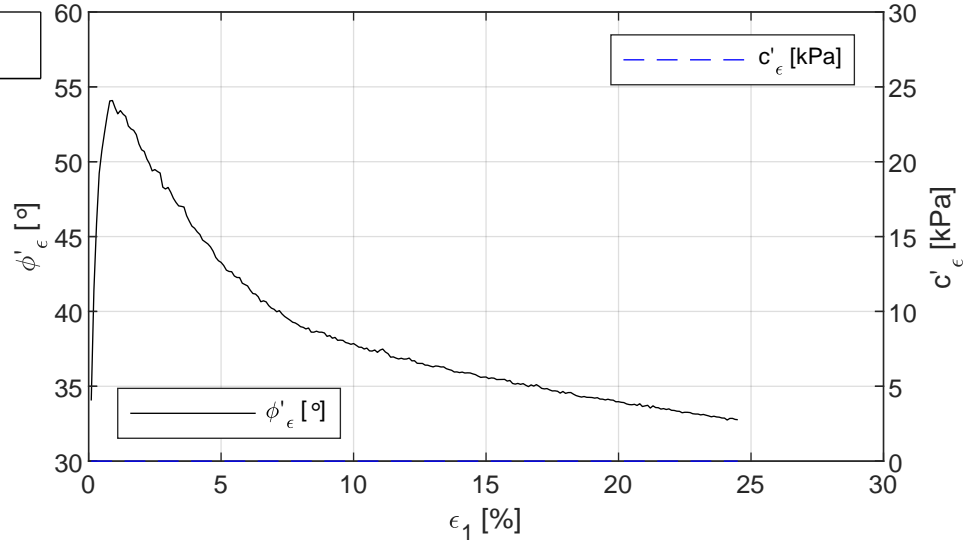
Deltares	PO Box 177, NL 2600 MH Delft	Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage:	date	signed
	Boussinesqweg 1, 2629HV Delft	Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl	2022-07-28	venema
Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk			project	Version
Boring Vak1_hoek1, Sample Vak1_1, depth 3.47 till 3.34m NAP			11207091.5	1.1
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9			appendix	page
			TX Vak1_1	3

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

Consolidation stage

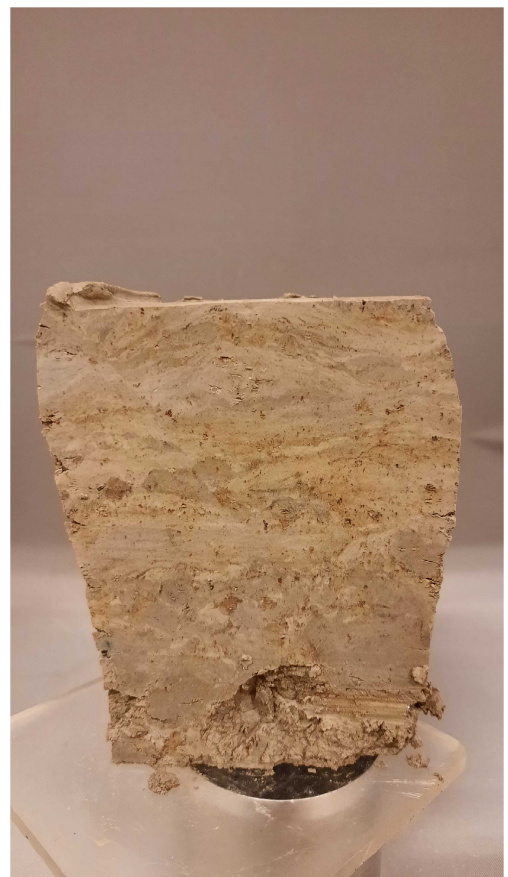
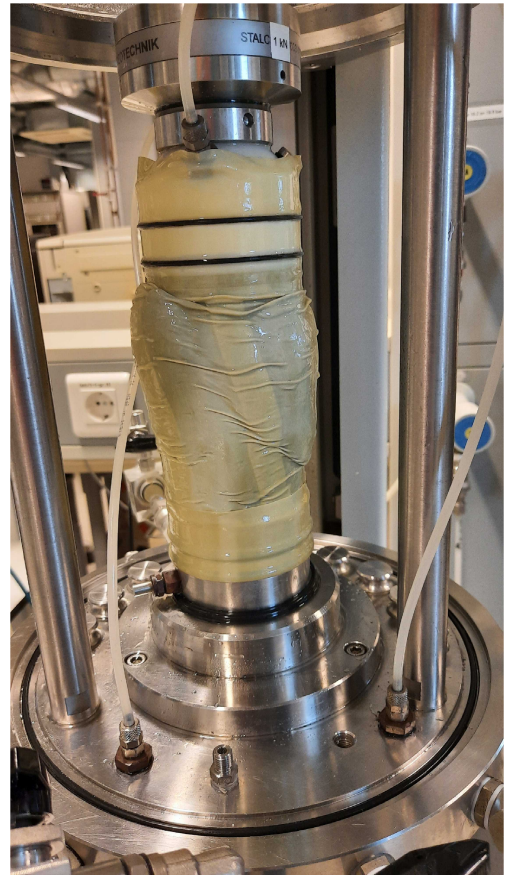


Shear stage



	PO Box 177, NL 2600 MH Delft Bousinesqweg 1, 2629HV Delft	Telephone +31 (0)88 335 7200 Homepage: Telefax +31 (0)88 335 8582 www.deltares.nl	date 2022-07-28	signed venema
	Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk Boring Vak1_hoek1, Sample Vak1_1, depth 3.47 till 3.34m NAP		project 11207091.5	Version 1.1
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9			appendix TX Vak1_1	page 4

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28



Deltares

PO Box 177, NL 2600 MH Delft
Boussinesqweg 1, 2629 HV Delft

Telephone +31 (0)88 3358273 Homepage:
Telefax +31 (0)88 3358582 www.deltares.nl

date
2022-07-28

signed
venema

Klei Brede Groene Dijk: Stap 2b: onderzoek proefdijk
Boring Vak1_hoek1, Sample Vak1_1, depth 3.47 till 3.34m NAP
CU Triaxial test (Singlestage) NEN-ISO 17892-9

project
11207091.5

version
1.1

appendix
TX Vak1_1

page
5

*) Gecontroleerd en vrijgegeven door ess op 2022-07-28

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