

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 1 - Definitie en Bronnenonderzoek



Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk
Stap 1 - Definitie en Bronnenonderzoek

Auteur(s)

Bernadette Wichman

Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk

Stap 1 - Definitie en Bronnenonderzoek






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

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	10-01-2022
Projectnummer	11207091-003
Document ID	11207091-003-GEO-0002
Pagina's	49
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Dr. B.G.H.M. Wichman	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Dr. B.G.H.M. Wichman 	Ir. U. Förster  Ir. M. Klein Breteler  Drs. H. van Essen 	Ing. G. de Vries 	

Samenvatting

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

Dit rapport betreft de rapportage van het literatuuronderzoek in het kader van stap 1 “Definitiefase en bronnenonderzoek”. Het plan van aanpak vermeldt hieromtrent dat de definitiefase en het bronnenonderzoek bestaat uit:

- Formuleren van onderzoeksvragen, vaststellen scope, keuze te onderzoeken trajecten waar afwijkende klei is gebruikt, selectie geschikte methoden en proeven.
- Verzamelen van kennis en ervaring opgedaan in andere projecten waar ook sprake was van een hoger gehalte aan organische stof en zout (o.a. Maasvlakte, kering projecten Zeeland, internationale projecten). Hierbij gaat het zowel erom het afzonderlijke effect als het gecombineerde effect van zout en organische stof trachten te kwantificeren.
- Formuleren functionele eisen, bij een hoger zoutgehalte en gehalte organische stof, in relatie tot opties voor het ontwerp van een BGD.
- Aanvullend literatuuronderzoek (aanvullend op onderzoek in het kader van de Kleirijperij).
- Bronnenonderzoek naar het lange termijn gedrag voor bestaande dijken waar kwelderklei en/of gerijpte baggerspecie is toegepast.

De definitiefase en het bronnenonderzoek bestaan in het bijzonder uit een selectie van geschikte methoden en proeven, het verzamelen van kennis en ervaring opgedaan in andere projecten waar ook sprake was van een hoger gehalte aan organische stof en zout, bronnenonderzoek naar het langetermijngedrag voor bestaande dijken waar kwelderklei en/of gerijpte baggerspecie is toegepast en het formuleren van functionele eisen, bij een hoger zoutgehalte en gehalte organische stof, in relatie tot opties voor het ontwerp van een BGD.

Het plan van aanpak van het project OGD is eigenlijk al vooruitgelopen op de aspecten formuleren van onderzoeksvragen, vaststellen scope en keuze te onderzoeken trajecten. Het formuleren van onderzoeksvragen heeft in de aanloop van dit project al plaatsgevonden, en zal binnen de andere projectonderdelen worden aangescherpt. Wat betreft de functionele eisen, die bij afwijkende klei als uitgangspunt kunnen worden genomen, is er een afbakening aangebracht, omdat het ontwerp van de Brede Groene Dijk al in grote lijnen bekend is. De focus ligt daarom op de functionele eisen ten aanzien van de erosiebestendigheid van en scheurvorming in het buitentalud. Er is onderzocht waar een relatie gelegd kan worden tussen de erosiebestendigheid uit een functionele test en de geotechnische classificatie in het kader van de toetsing op erosiebestendigheid.

Binnen deze onderzoekstap is gericht gezocht naar literatuur ten aanzien van:

- Achtergronden bij de vigerende eisen aan dijkklei
 - Eisen aan klei bij aanleg van dijken
 - Relatie met uitkomsten uit roto-erosiemeterproeven
 - Consequenties bij afwijkende eigenschappen van klei
- Archiefonderzoek Dollarddijk
- Verzamelen ervaringen elders met afwijkende kleisoorten (hoger organisch stof gehalte, zout tot brak milieu, hoge lutumfractie)

- Adviezen t.a.v. functionele testen met richtwaarden als indicatoren voor erosiebestendigheid.

Het onderzoek heeft geleid tot de volgende conclusies:

Er is een aantal cases gevonden waarin is gewerkt met klei met een hoge lutum-fractie en/of hoog organisch stofgehalte en/of verhoogd zoutgehalte. In al deze cases is succesvol een grondlichaam gebouwd met klei uit baggerspecie of met kwelderklei. De erosiebestendigheid onder overloop (Dredgdike) beperkte golfaanval (Dollarddijk) bleek vrij goed te zijn, en de grasmat kwam na 1 à 2 jaren tot ontwikkeling. Er zijn wel flinke scheuren geconstateerd, mede vanwege het natter aanbrengen van de klei dan als optimaal wordt gezien. Bij de proefophoging op de Maasvlakte waren er na 5 jaren geen doorgaande scheuren te zien en was de doorlatendheid van de klei nog steeds laag.

Wat betreft de geotechnische eigenschappen, is in het kader van het Kleirijperij onderzoek gesteld dat door verwijdering van een deel van het organische stof tijdens de rijping ook de vloeigrens, en in mindere mate de uitrolgrens zullen afnemen. Daarmee zal bij gelijkblijvend watergehalte ook de consistentie-index afnemen. Ontziltig heeft ook effect op de Atterbergse grenzen: met name de vloeigrens wordt lager. De aard van het organische stof verandert ook, maar dat is met de standaard geotechnische methoden niet goed vast te stellen. Het effect van ontziltig op het erosiegedrag in het laboratorium is echter nog niet onderzocht, maar lijkt wel nuttig.

Voor het demonstratieproject Brede Groede Dijk zijn de volgende functionele testen van belang:

- De Roto-erosiemeter proef (ter bepaling van de erosiebestendigheid aan de hand van toerentallen in erosiebestendigheidsgrogrammen),
- Bepaling ongedraineerde schuifsterkte s_u -waarde (met veld-vin (torvane) of conus),
- verificatie van deze waarde met een triaxiaalproef of direct simple shear (DSS) proef teneinde een relatie met het grondgedrag te kunnen leggen,
- erosieproeven op niet ontzilt en ontzilte klei
- bepaling krimpgrens als onderdeel van de bepaling van de overige Atterbergse grenzen [ASTM 4943-18]
- Het maken van profielkuilbeschrijvingen is nuttig in combinatie met in-situ veldvin (torvane)- en pocket-penetrometer testen, om de mate van verdroging en structuurvorming in de diepte vast te kunnen stellen. Er is door Deltares een protocol opgesteld voor zo een profielkuilinspectie. Tevens kan dan onderzoek worden gedaan naar de samenhang in de klei en de brokkeligheid van de klei, door de klei handmatig los te trekken of los te steken.

T.a.v. de toe te passen kwelderklei:

- De bakkenproef uit stap 4 is nuttig t.a.v. het ontstaan van een scheurenpatroon bij herhaald verdrogen en vernatten. Er is verschil te zien tussen schralere en vette klei bijvoorbeeld. De vette klei vormt meer structuur.

Mogelijk zijn ook JET-testen interessant, met name in verband met het type belasting wat mogelijk wat meer op het effect van golfklappen lijkt en wat nog nader onderzoek vergt. Daarnaast wordt door Fugro de BET (Bore Hole Erosion-test) ontwikkeld voor Nederlandse omstandigheden, waarmee profielen van relatieve erosiebestendigheid in de diepte kunnen worden gemaakt. Binnenkort wordt deze test mogelijk ingezet in dijkversterkingsprojecten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Overzicht relevante literatuur	10
2.2	Eisen aan dijkenklei	10
2.2.1	Erosiebestendigheidsklassen	10
2.2.2	Roto-erosiemeterproeven	11
2.2.3	Geotechnische eigenschappen:	15
2.2.4	Eisen bij aanleg	16
2.2.5	Consequenties afwijkende eigenschappen klei	16
2.3	Dollarddijk: archiefonderzoek	17
2.3.1	Beschrijving dijkverzwaring	17
2.3.2	Eigenschappen kwelderklei	18
2.3.3	Erosiebestendigheid	19
2.3.4	Scheurvorming en reparaties	19
2.4	Ervaringen elders	20
2.4.1	Dredgdike project	20
2.4.2	Proefophogingen Maasvlakte	25
2.4.3	Emanuelpolderdijk	28
2.5	Functionele testen als indicator erosiebestendigheid	28
2.5.1	Invloed gestructureerdheid van de klei	28
2.5.2	Erosiebestendigheidsonderzoek op kleinere schaal	30
3	Samenvatting en Conclusies	32
	Literatuur	36
A	Bijlage A Erosietesten	39
B	Roto-erosiemeter	46
C	Bepaling krimpgrens	47
D	Zoute klei in dijken	48

1 Inleiding

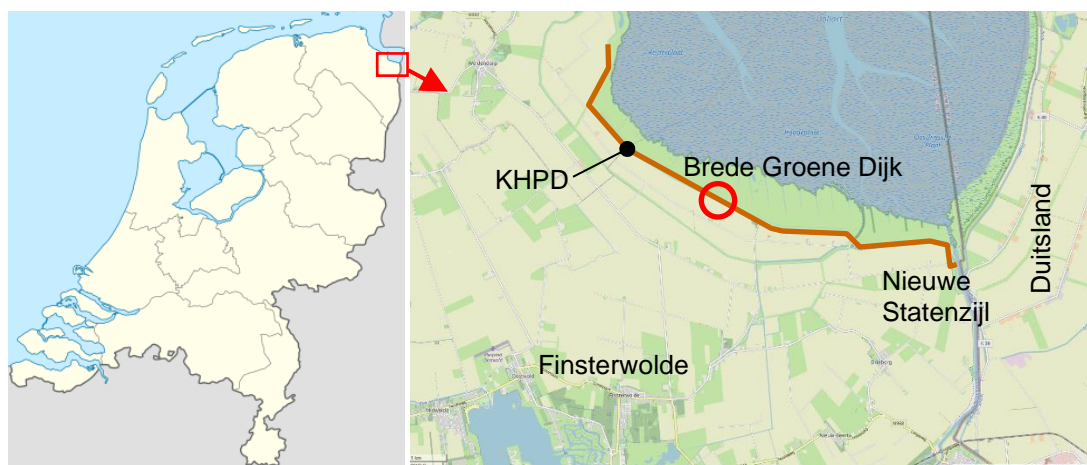
1.1 Achtergrond

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

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

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

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



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

1.1.1 Aanleiding project

Voor het omvormen van de bestaande afgekeurde dijk tot een Brede Groene Dijk is veel klei nodig: er is berekend dat voor een BGD over het traject KHPD 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 natuurpolder Breebaart én naar klei gemaakt van zout (bagger)slib uit het havenkanaal van Delfzijl.

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

1.1.2 Doel van het project

Het doel van dit project is aan te tonen, en daarmee vertrouwen op te bouwen, dat het gerijpte materiaal (het sediment), ondanks een hoog gehalte aan zout en organische stof, geschikt is om een waterveilige dijk mee te realiseren. 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 10 stappen:

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

Uiteindelijk zullen in stap 10 (nog op te dragen) de onderzoeksresultaten in een eindrapportage worden samengevat.

1.2 Onderhavige deelproject

De onderhavige rapportage bevat een overzicht van de resultaten uit het bronnen- en literatuuronderzoek in het kader van stap 1 “Definitiefase en bronnenonderzoek” uit het project Onderzoek Geschiktheid Deltaklei.

De definitiefase en het bronnenonderzoek bestaat uit:

- Formuleren van onderzoeksvragen, vaststellen scope, keuze te onderzoeken trajecten waar afwijkende klei is gebruikt, selectie geschikte methoden en proeven.
- Verzamelen van kennis en ervaring opgedaan in andere projecten waar ook sprake was van een hoger gehalte aan organische stof en zout (o.a. Maasvlakte, kering projecten Zeeland, internationale projecten). Hierbij gaat het zowel erom het afzonderlijke effect als het gecombineerde effect van zout en organische stof trachten te kwantificeren.
- Formuleren functionele eisen, bij een hoger zoutgehalte en gehalte organische stof, in relatie tot opties voor het ontwerp van een BGD.
- Aanvullend literatuuronderzoek (aanvullend op onderzoek in het kader van de Kleirijperij).
- Bronnenonderzoek naar het lange termijn gedrag voor bestaande dijken waar kwelderklei en/of gerijpte baggerspecie is toegepast.

2 Overzicht relevante literatuur

2.1 Selectiecriteria en afbakening

Binnen deze onderzoekstap is gericht gezocht naar literatuur ten aanzien van:

- Achtergronden bij de vigerende eisen aan dijkklei
 - Eisen aan klei bij aanleg van dijken
 - Relatie met uitkomsten uit roto-erosiemeterproeven
 - Consequenties bij afwijkende eigenschappen van klei
- Archiefonderzoek Dollarddijk
- Verzamelen ervaringen elders met afwijkende kleisoorten (hoger organisch stof gehalte, zout tot brak milieu, hoge lutumfractie)
- Adviezen t.a.v. functionele testen met richtwaarden als indicatoren voor erosiebestendigheid

De focus ligt op de erosiebestendigheid van het buitentalud, wat voor de Brede Groene Dijk de grootste kennisleemte betreft. Er dient ook aandacht te zijn voor structuurvorming in de klei, omdat dit zeer bepalend is voor de erosiesnelheid, zie paragraaf 2.5.

2.2 Eisen aan dijkklei

2.2.1 Erosiebestendigheidsklassen

[HWBP 2018] beschrijft de meest recente stand van zaken m.b.t. de indeling in erosiebestendigheidsklassen van dijkklei, met indicatie waar deze in de dijk kan worden toegepast. Dit is in lijn met de schematiseringshandleiding voor gras, versie 28 mei 2021, [SHgras 2021].

In [RWS 2018] worden quick wins genoemd t.a.v. de volgende aspecten:

Quick win 1: Aanpassing classificatiegrenzen klei;

Quick win 2: Bandbreedte toestaan in beoordeling kleimonsters;

Quick win 3: Realistische waarden verkrijgen voor doorlatendheid kleilagen;

Quick win 4: Verbetering van de werkwijze bij het verdichten van kleilagen en de controle daarop

Onder Quick win 1 worden meerdere aanbevelingen gedaan, waarvan de onderstaande twee zijn overgenomen:

- a. Onder voorwaarden -die hier niet nader zijn beschreven- kunnen hogere organische stofgehalten toegestaan worden. Zo is er in het project Reevedijken gewerkt met klei met een organisch stofgehalte tot 6%. Hiervoor is aanvullend onderzoek gedaan waarover ENW positief heeft geadviseerd [ENW 15-16]. Ook acht ENW in dit kader dat organische stofgehalten tot 7, misschien 8% mogelijk kunnen zijn. Deltares stelt dat gehalten tot 7% mogelijk zijn [Kruse 2015]. Indien voor een specifieke situatie gewerkt gaat worden met klei met een hoger organisch stofgehalte, dan zal aanvullend onderzoek nodig zijn, en kunnen er nadere voorwaarden aan de toepassing gesteld worden.
- b. Bij Projectbureau Zeeweringen is reeds ervaring opgedaan met klei met bodemvocht gehalten tot 8 g/l zout. [Kruse 2013] en het toepassen van klei met een hoger zoutgehalte in dijklichamen. Delft: Deltares, Brief naar Projectbureau Zeeweringen, 5 pp geeft aanwijzingen hoe hiermee tot een veilige en beheerbare dijk gekomen kan worden.

2.2.2 Roto-erosiemeterproeven

In het verleden zijn in [Grondmechanica Delft 1988] resultaten uit roto-erosiemeterproeven gerapporteerd, waarbij de kleimonsters zijn ingedeeld in een plasticiteitsindex-vloeigrens erosieklassen diagram (zie Figuur 2.3).

De onderzochte locaties liggen verspreid langs de grote rivieren (18 locaties) en de kust (5 locaties). Locaties zijn gekozen in Noord Brabant, Friesland, Gelderland, Noord Holland, Overijssel, Zeeland en Zuid Holland. De monsters voor de proeven zijn met stalen bussen verticaal gestoken in kuilen op een diepte van circa 0,4 tot 0,5 m in het talud van de dijken. Er zijn op diverse hoogtes op het talud monsters genomen. De onderzochte dijkbekledingen waren, op twee na, alle meer dan 5 jaar voor het onderzoek aangelegd. De eigenschappen van de genomen monsters zijn beschreven in Figuur 2.4.

De hierbij toegepaste roto-erosiemeterproef staat beschreven als zijnde de Rotating Erosion Test Apparatus in paragraaf 2.1.11 uit [Briaud et al. 2019] en de gehanteerde proefprocedure is beschreven in [Grondmechanica Delft 1988]. Figuur 2.1 toont het werkingsprincipe van de roto-erosiemeterproef. Voor een Deltares-erosieproef, zoals wordt ingezet binnen het project OGD, wordt een cilindrisch monster met een diameter van 0,067 m en een hoogte van 0,05 m in water geplaatst. Het cilindrische kleimonster in het midden van de opstelling wordt belast met door waterstroming dat door een roterende cilinder aan de buitenzijde wordt opgewekt. De schoepen aan de roterende cilinder geven een waterstroming die op 1 mm vanaf het monsteroppervlak 0.14 m/s is bij toerental 100 en 1.6 m/s bij toerental 1200. Het toerental van deze roterende cilinder kan in stappen worden opgevoerd, waarbij na tijdsintervallen naar keuze de proef wordt stopgezet en steeds het gewicht van het kleimonster wordt gemeten. In [Grondmechanica Delft 1988] is gesteld dat de maatgevende erosie wordt bereikt na ca. 33% gewichtsverlies, op basis waarvan de erosiegevoeligheid wordt bepaald, zie Figuur 2.2 met de erosiegevoeligheidsklassen op basis van bezwijktoerental. Het bezwijktoerental is het toerental waarbij het gewichtsverlies van > 33% optreedt.

Figuur 2.5 toont de bezwijktoerentallen van de monsters uit Figuur 2.4.

Deze proef kan eerst in grove stappen op een monster van de betreffende klei worden uitgevoerd om het relevante toerental te bepalen, en daarna kan bij een selectie aan toerentallen het gewichtsverlies van een ander soortgelijk kleimonster na kleine tijdsintervallen worden bepaald, waarmee dan de erosiesnelheid K_d en de drempelwaarde van de schuifspanning τ_c kunnen worden bepaald. Deze analysemethode is in ontwikkeling. De maximale schuifspanning die door het stromende water bij de Deltares-proefuitvoering wordt opgelegd (resultierend in de gemeten torsie) is 200 Pa.

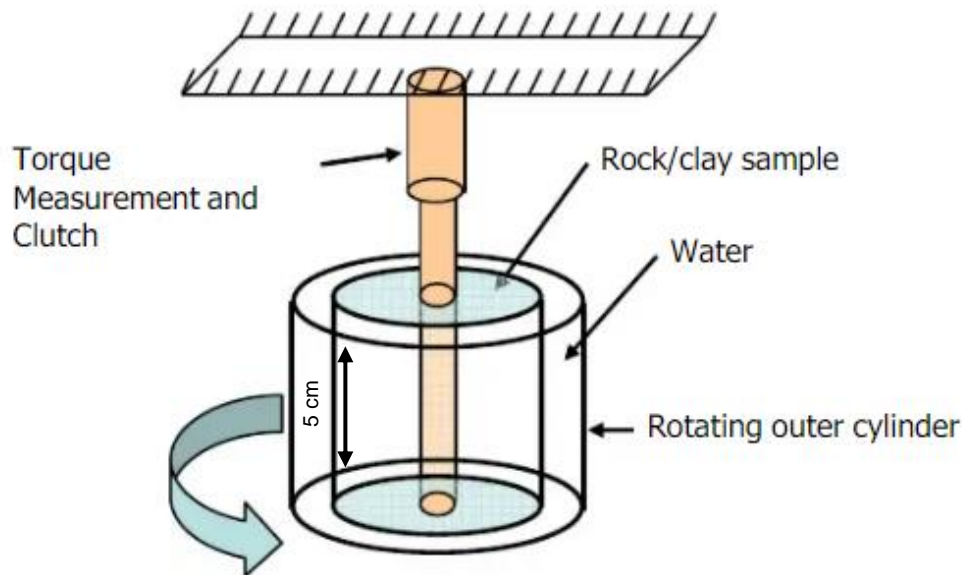


Figure I - 1. Schematic Drawing of the Rotating Erosion Test Apparatus (RETA).

Figuur 2.1. Werkingsprincipe van de roto-erosiemeterproef (Rotating Erosion Test Apparatus) [Briaud et al. 2019].

De afmetingen van de roto-erosiemeter zijn gegeven in Bijlage B.

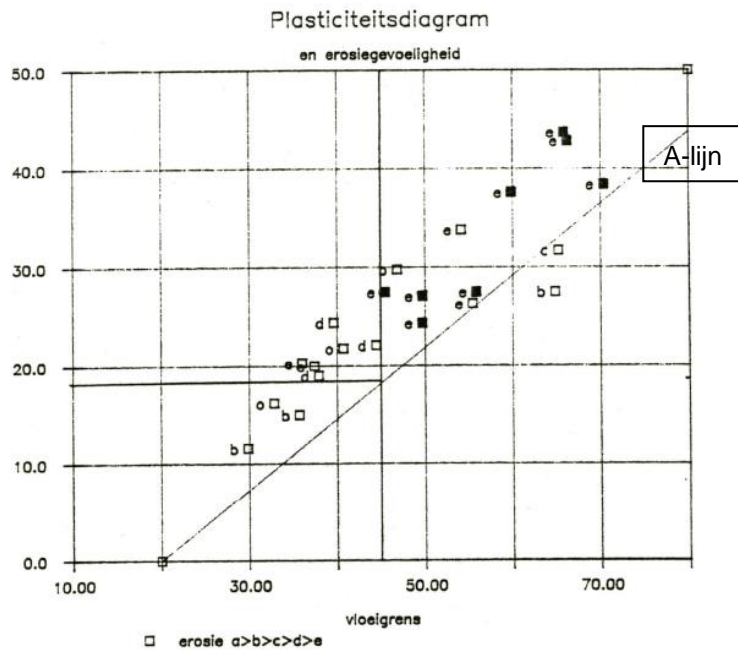
TABEL 5.1: Klassen van erosiegevoeligheid aan de hand van bezwijktoerental van monsters zoals die in dit rapport worden gehanteerd.

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

Figuur 2.2. De in de roto-erosiemeterproef gehanteerde stapsgewijs opgehoogde toerentalen met indicatie erosiegevoeligheid. Het toerental is in aantal omwentelingen per minuut met 1200 als begrenzing van het apparaat bij Deltares.. De snelheid van de roterende schoepen is de omwentelingsnelheid resulterend in de gewenste waterbeweging.

Figuur 2.3 toont het zogenaamde plasticiteitsdiagram ("plasticity chart") met daarin de monsters van het roto-erosiemeteronderzoek geplott. Naast de punten is de erosiegevoeligheid van het materiaal van de locaties weergegeven, waarbij erosieklasse b zeer erosiegevoelig en e weinig erosiegevoelig is. Van de monsters van de zeer erosiegevoelige a-groep konden de Atterbergse grenzen niet worden bepaald, en van de monsters aangegeven met o is de erosiegevoeligheid niet bepaald. Bijna alle erosieresistente monsters vallen in het gebied boven de A- lijn en boven een vloeigrens van 45%. De erosiegevoelige monsters hebben een vloeigrens van minder dan 40% of vallen onder de A-lijn. Monsters van materiaal dat gedurende lange tijd intact blijft bij de hoogste belasting zijn met zwarte blokjes aangegeven.

Figuur 2.4 geeft een overzicht van de eigenschappen van de in de roto-erosiemeter beproefde kleimonsters [Grondmechanica Delft 1988]. Er zijn hiervan 22 monsters waarvan de Atterbergse grenzen zijn bepaald, weergegeven in Figuur 2.3. Op de betreffende locaties zijn ook profielkuilbeschrijvingen gemaakt [Grondmechanica Delft 1988]. Figuur 2.5 geeft de bezwijktoerentallen in de roto-erosiemeter voor deze monsters.



Figuur 2.3 Indeling in erosieklassen met de klassen a, b, c, d, e qua bezwijktoerentallen uit het roto-erosiemeter apparaat [Kruse 1988]. Voor toelichting zie tekst.

Verzamelde standaardbepalingen:
 <2mu, <16mu, >63mu, >200 korrelgroottefracties in gewichtsprocenten
 pl= vloeigrens, pp= uitrolgrens, pi= plasticiteitsindex
 spopp= specifiek oppervlak in m2/g droge stof
 kalk= gewichtsverlies in gewichtsprocenten bij HCl behandeling
 orgm= organisch materiaal (H₂O₂ behandeling) in gewichtsprocenten
 NaCl= zoutgehalte in mg NaCl/kg droge stof; Ec = elektrische geleidbaarheid in mS/cm

locatie	<2mu	<16mu	>63mu	>2000	pl	pp	pi	kalk	orgm	NaCl	Ec
bar2	31.0	62.3	10.2	0.0	55.4	29.1	26.3	20.1	3.6	46.8	395
bar3	27.6	52.3	21.4	0.2	44.4	22.3	22.1	18.5	1.5	23.6	255
dkst	11.8	28.7	52.6	0.0	29.6			13.2	1.6	79.0	190
dpl24	24.6	50.0	25.2	0.0	45.4	17.9	27.5	13.7	3.3	35.0	250
giesb2					59.8	22.2	37.6	17.8	2.4	38.4	460
giesb3	5.3	8.3	69.3		36.0	15.7	20.3	16.4	1.8	30.7	430
har2	29.6	48.5	28.7	1.3	37.4	17.4	20.0	18.3	1.2	116.3	370
har3	28.4	42.9	28.8	0.7	37.9	18.9	19.0	15.1	3.4	30.9	320
hattem	35.2	56.0	26.0		40.7	18.9	21.8	19.2	1.7	20.0	275
hmp52	27.2	40.6	56.1	0.0	46.8	17.0	29.8	8.6	2.6	16.0	110
hol3	33.1	53.8	25.3	0.0	70.3	31.9	38.4	19.9	4.8	3981.0	11800
hpl10	36.2	70.2	4.5	0.0	49.7	25.3	24.3	12.1	2.5	46.0	84
hrx	13.7	34.3	52.0	0.6	39.4			15.4	2.5	20.0	245
ijlo4	19.5	45.3	23.8	0.0	35.7	20.7	15.0	17.2	1.0	38.0	180
ijlo5	7.9	18.1	75.0	0.9	24.6			7.0	1.8	61.0	305
kandia2					54.1	20.3	33.8	19.1	3.0	23.0	220
kandia3	21.7	36.7	36.7		39.6	15.2	24.4	19.2	1.7	23.0	315
lc126	37.4	70.1	12.3	0.0	49.7	22.6	27.1	12.6	2.5	35.0	70
loc66	18.4	38.0	47.6	0.0	29.8	18.2	11.6	10.1	2.5	26.0	78
loo	24.8	40.0	42.3		32.8	16.6	16.2	10.3	2.2	19.1	225
seing2					66.2	23.4	42.8	13.7	2.2	30.7	315
seing3	37.6	80.0	8.2		65.8	22.1	43.7	16.6	2.8	38.4	420
tn3	11.9	20.9	67.6					8.9	1.3	56.8	16
tz3	11.3	21.4	64.5					8.9	1.7	24.9	21
vee3	8.6	12.6	75.3					10.0	0.6	19.4	13
waa2	27.6	57.4	19.7	0.0	65.2	33.5	31.7	27.0	4.1	404.9	840
waa3	26.1	54.7	21.9	0.0	64.8	37.3	27.5	25.2	4.7	144.9	375
wlwk	28.1	63.3	10.2	0.0	55.8	28.3	27.5	20.9	3.4	35.0	295

Figuur 2.4 Overzicht van de eigenschappen van de beproefde monsters. Er is een relatie met Figuur 2.5.

CO=279927	infiltr.	bezw	bezw	grondwater	
loc. datum	x(10e-5)	zoet	zout	min.	max.
bar2 860516		1100	1200	475	415
bar3 861014	3.38				
bar3 860807	5.82			575	515
bar3 860516	2.15	1000	900		
dkt 870831		800		270	310
dpl24870827		1200		370	450
giesb860800		1200		240	200
giesb860400	1.00				
giesb860800	0.20			370	330
giesb861100	0.20	1200			
har2 860506		1200	1200		
har3 861009	7.63				
har3 860506	2.58	1200	800	825	767
har3 860506	4.10				
hmp5 870828		25		202	282
hol3 860507	0.11	200	360		
hol3 860805	0.13				
hol3 861010	0.84			900	840
hp110870825		1200		320	400
hrxl 870831		500		280	340
ijlo4870831		300		190	250
ijlo5870831		600		230	290
kandi860800		1200		370	310
kandi860400	3.00				
kandi860800	5.00	1100		520	460
kandi861100	1.6				
lc226870825		1200		250	430
loc66870825		500		180	260
seing860800		1200			
seing860400	2.9				
seing860800	7.40	1200		470	410
seing861100	1.60				
tn3 861015		50		440	380
ts3 861015		50		450	390
vee3 861016		50		600	540
waa2 860515		800	800		
waa3 860806	3.38				
waa3 860515	8.35	400	1200		
waa3 860930	5.31				
wlwk 870825		1200			

Figuur 2.5. Resultaten uit onder meer roto-erosiemeterproeven. Onder bezw.zoet - zout = toerental waarbij vrij plotseling meer dan 33% gew.% van het monster is weggeërodeerd in zoet resp. zout water.

Deze inzichten uit de roto-erosiemeter testen kunnen worden vergeleken met de huidige inzichten uit het Handboek Dijkenbouw [HWBP 2018]. Het gaat dan met name om de eigenschappen van de gebleken weinig erosiegevoelige klei, die mogelijk afwijken van de eisen uit het Handboek Dijkenbouw.

Ook voor gerijpte klei uit baggerspecie, zijnde een niet natuurlijke afzetting, is erosiegevoeligheidsonderzoek mogelijk, en ook kan onderzocht worden of een verhoogde organische stof fractie of zoutgehalte effect heeft op de bezwijk-toerentallen. Hoewel de roto-erosiemeterproeven aanvullend op de eisen in [HWBP 2018] inzicht geven in de erosiebestendigheid, is het nog wel de vraag of de stromingsbelasting in deze proeven vergelijkbaar is met de waterbeweging bij golfaanval (golfklappen). Dit vergt nader onderzoek. Eventueel is er wel een rating mogelijk in erosiebestendigheid, waarbij dan een vergelijking kan worden gemaakt met resultaten uit het Deltagootonderzoek.

2.2.3 Geotechnische eigenschappen:

Wat betreft de geotechnische eigenschappen, is in het kader van het Kleirijperij onderzoek [Deltares 2021] gesteld dat door verwijdering van het organische stof tijdens de rijping ook de vloeigrens, en in mindere mate de uitrolgrens zullen afnemen. Daarmee zal bij gelijkblijvend watergehalte ook de consistentie-index afnemen.

Ontziling heeft ook effect op de Atterbergse grenzen, met name de vloeigrens wordt lager. De aard van het organische stof verandert ook, maar dat is met de standaard geotechnische

methoden niet goed vast te stellen. Het effect van ontziltig op het erosiegedrag in het laboratorium is echter nog niet onderzocht, maar lijkt wel nuttig.

2.2.4 Eisen bij aanleg

Het Handboek Dijkenbouw [HWBP 2018] geeft eisen voor het watergehalte van klei (consistentie-index) bij aanbrengen van de klei. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de kern van de dijk en deklagen. Verder zijn er eisen vermeld voor de te bereiken verdichtingsgraad en de te hanteren laagdikte bij aanleg.

[RWS 2018] gaat in op mogelijke innovaties in aanlegeisen en uitvoering, met het gebruik van een referentievak en/of proefvak hierbij. Om betrouwbaar de maximaal bereikbare verdichting te kunnen bepalen wordt eerst een referentievak aangelegd. Dit is een klein stukje werk dat volgens de best bekende wijze (bijvoorbeeld zoals in Handboek Dijkenbouw [HWBP 2018] is omschreven) is verdicht, en waarvan de verdichting zeker voldoet. Daarna wordt een proefvak aangelegd volgens de door de opdrachtnemer in het verdichtingsplan beschreven methode. De in het proefvak behaalde verdichting wordt vergeleken met de verdichting in het referentievak. Laat het proefvak voldoende verdichting zien, dan kan de rest van het werk worden uitgevoerd conform de voorgestelde methode van de opdrachtnemer. Hierbij krijgt ook het watergehalte (consistentie-index) bij aanleg aandacht.

2.2.5 Consequenties afwijkende eigenschappen klei

Er is correspondentie geweest over het toestaan van een hoger organisch stofgehalte en hoger zoutgehalte, zie [RWS 2018]. In [HWBP 2018] staat een overzicht van mogelijke consequenties van afwijkende waarden voor de in dit handboek vermelde klei-eisen, zie Figuur 2.6. Men stelt: "In tabel 8.2 is kort toegelicht wat de consequenties zijn bij een afwijking van de eisen. Als klei niet aan de keuringseisen voldoet, dan is deze niet per definitie ongeschikt. Onderaan de tabel is vermeld hoe dan kan worden gehandeld." In geval van een sterk verhoogd zoutgehalte en/of organisch stofgehalte worden met name ontwerpaanpassingen voorgesteld. Tevens wordt bij kleinere afwijkingen in meetwaarden uit de controle bij aanlevering in het werk aangegeven onder welke voorwaarden de klei mag worden toegepast.

Tabel 8.2 Consequenties als klei afwijkt van een eis.

Afwijking	Consequentie
Plasticiteitsindex te laag	Erosiebestendigheid wordt minder. Verwerkbaarheid klei is te gevoelig voor wisselingen in het vochtgehalte.
Vloei grens te laag	Cohesie wordt lager.
Zandgehalte te hoog	Erosiebestendigheid wordt minder. Doorlatendheid wordt groter.
Organisch stofgehalte te hoog	Verhoogde inklinking. Samenhang wordt minder. Doorlatendheid wordt groter.
Zoutgehalte te hoog	Verhoogde erosie bij contact met zoet water. Verziltting van de bodem en het grondwater.
Watergehalte bij verwerken te hoog	Structuurvorming door krimp. Klei kleeft aan materieel. Klei wordt moeilijk begaanbaar (spoorvorming / wegzakken). Klei wordt zijdelings weggeperst tijdens verdichten.
Watergehalte bij verwerken te laag	Harde kluiten in klei laten zich lastig verdichten. Er blijven holtes in de klei achter, die vol met water kunnen komen staan. Dit kan uiteindelijk leiden tot verweking.
Kalkgehalte te hoog	Verhoogde inklinking. O.a. vormvastheid en erosiebestendigheid kunnen nadelig worden beïnvloed.
Lutumgehalte te hoog	Klei is te vet, ontwikkeling van een grasmat is niet goed mogelijk.
Lutumgehalte te laag	Zand wordt aangezien voor klei. Doorlatendheid is te laag (bij toepassing als kernmateriaal).
Extreme verkleuringen / sterke geuren	Klei is mogelijk verontreinigd. Kleiartij is mogelijk niet homogeen. Bijmengingen (o.a. mineralen) kunnen o.a. vormvastheid en erosiebestendigheid nadelig beïnvloeden.
Zandinsluitingen	Samenhang wordt minder. Ophoping van water in zandinsluitingen. Structuurvorming wordt bevorderd. Doorlatendheid wordt groter.
Handelwijze bij afwijkingen:	
<ul style="list-style-type: none"> • Verkeerd watergehalte: zie "Beheersing van het watergehalte in klei" in paragraaf 8.3.3. • Kleine / incidentele afwijking samenstelling: zie "Samenstelling grond" in paragraaf 8.7.4. • Grote / structurele afwijking samenstelling: zie "Gebiedseigen grond" in paragraaf 8.3.4. 	

Figuur 2.6 Consequenties als klei afwijkt van een eis [HWBP 2018]. Opmerking bij rij met "lutumgehalte te laag": waarschijnlijk wordt bedoeld dat zand ten onrechte is aangezien voor klei en dat later na testen blijkt dat het lutumgehalte te laag is.

2.3 Dollarddijk: archiefonderzoek

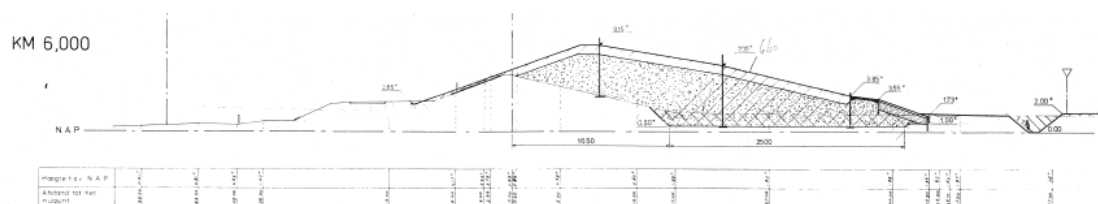
2.3.1 Beschrijving dijkverzwaring

1976-1989 periode dijkversterking door Provincie Groningen; deel rond kilometerpaal km 6 in of vlak na 1983.

Het ontwerp van de dijkverzwaring was vrijwel identiek voor het gehele tracé.

Er is nabij km 6 klei uit het buitentalud van de Dollarddijk genomen ten behoeve van onderzoek in de Deltagoot. Er is bestek informatie verzameld van dit specifieke gedeelte.

Figuur 2.7 toont het dwarsprofiel van de dijkverzwaring bij km 6.



Figuur 2.7 Dwarsprofiel bij km 6 van verzwaring van de Dollarddijk [Provinciale Waterstaat 1983].

Kwelderklei (laag van +2 m NAP tot +0,5 m NAP) vlak voor de oude dijk is gebruikt voor het buitentalud. Deze kwelderklei is niet tussentijds gerijpt alvorens toe te passen.

Hieronder is een beschrijving van de werkwijze bij aanleg gegeven:
Uit [Waterschap Ommelanderzeedijk 1992]:

De volgende punten kwamen uit het gesprek naar voren:

De werken zijn geheel uitgevoerd als een buitendijkse dijkverzwaring. De teen van het binnentalud ligt op dezelfde plaats als het binnentalud van de oude dijk. Alleen langs de polder Breebaart is een nieuw tracé gekozen.

De oude kleidijk is half afgegraven en deze klei is binnendijks in depot gezet.

Daarna is buitendijks een cunet gegraven en met deze klei-slib grond is een perskade aangelegd.

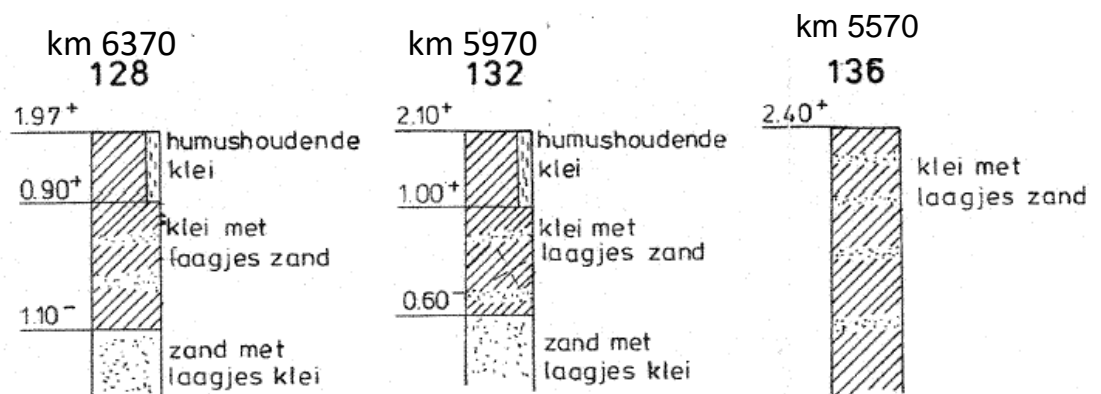
Vervolgens is het zandlichaam van de dijk opgespoten en geprofileerd.

De klei uit de oude dijk is daarna op het binnentalud aangebracht en de klei van de perskade is op het buitentalud aangebracht.

Naar aanleiding van grondmechanisch onderzoek is i.v.m. de te verwachten zetting op het buitentalud een overhoogte van gemiddeld 2,3 m aangebracht ter plaatse van de teen buitendijks van de oude dijk.

2.3.2 Eigenschappen kwelderklei

Boringen geven een beeld van de opbouw van de kwelderklei, deels met zandlaagjes [LGM, zie Figuur 2.8]. Lokale toepassing van de kwelderklei is waarschijnlijk omdat de dijk als geheel water moest blijven keren, waarbij steeds per trajectdeel is ontgraven en opgebouwd. Het organisch stofgehalte in de bovenste laag uit Figuur 2.8, zijnde zwak humeus bij km 6370 en km 5970, is in lijn met bepalingen uit 1993 bij km 6 (zie Tabel 2.1). Bij km 5570 is het humusgehalte erg laag, maar er zijn daar wel veel zandlaagjes aanwezig.



AN HET L.G.M. TE DELFT CO_234960

Figuur 2.8 Boringen in de vlak voor de oude dijk gelegen kwelderklei nabij km 6.

De boornummers lopen op van west naar oost. Er lijkt een verband te zijn met de slechtere kwaliteit klei (met zandlenzen) die in de oostelijke blokken Deltagootklei nabij km 6 is aangetroffen.

In bestekken staat niets over homogeniseren van de ontgraven kwelderklei, dus de zandlenzen en afwijkende humuspercentages in de Dollarddijk klei op het buitentalud hangen hier mogelijk mee samen.

Tabel 2.1 Bepalingen op kleimonsters uit het buitentalud van de Dollarddijk, ontleend aan [Grondmechanica Delft 1993]. (*) Bepalingsmethode is onbekend, zeer waarschijnlijk was het de waterstofperoxide methode. (**) Exacte bepalingmethode is onbekend.

boring	Diepte m-MV	LL [%]	PL [%]	PI [%]	Watergehalte % m/m ds	Zoutgehalte g NaCl/l	Humusgehalte (*) % m/m ds	% > 63 µm	% < 2 µm (**)
km 0,5	0,4-0,6	74,7	26,3	48,4	40,6	0,07	3,6	9	48
	0,8-1,0	68,9	23,4	45,4	41,8	0,07	3,8	10	46
km 3	0,4-0,6	78,6	31,2	47,4	47,7	0,09	5,3	25	45
	0,8-1,0	90,0	36,4	53,6	55,1	0,08	5,9	6	55
km 6	0,4-0,6	68,5	27,9	40,6	49,5	0,06	3,9	10	51
	0,8-1,0	81,3	34,1	47,2	56,0	0,21	4,2	5	52
km 12	0,4-0,6	51,2	16,8	34,4	30,6	0,07	2,3	26	35
	0,8-1,0	43,4	21,4	22	32,7	0,16	1,8	9	38

In 1993 was het zoutgehalte minder dan 0,21 g NaCl/liter (winter), zie Tabel 2.1. Dit betekent dat de oorspronkelijk zoute klei nog maar weinig zout bevat. We weten echter niet waar op het buitentalud de beproefde monsters zijn genomen.

In de afgelopen 30 jaren zijn er geen grote aanpassingen in de kwelder geweest [Henk van der Leij 2021], waaruit kan worden geconcludeerd dat de huidige kwelderklei zou kunnen lijken op die waarmee de Dollarddijk is verzwaard. Opgemerkt wordt dat de huidige Klutenplasklei afwijkt (hoger organisch stofgehalte, hogere vloeigrens, zoutgehalte erg variabel en hoog) van de boringen uit Figuur 2.2 en de eigenschappen uit Tabel 2.1, waarschijnlijk omdat de Klutenplas verder zeewaarts ligt.

2.3.3 Erosiebestendigheid

Uit [Henk van der Leij 2021]: De grasgroei was in het begin vertraagd, waarbij geen speciaal zoutminnende soort gras is gebruikt. Er is destijds geen aparte toplaag aangebracht met geschikte grond voor het inzaaien van het gras. Het graszaad is direct op het kleidek van de kwelderklei aangebracht. Na 1 jaar was op het talud nog kale grond zichtbaar. Het hoog water van 1985 is echter goed doorstaan.

2.3.4 Scheurvorming en reparaties

Vanaf 1991 wordt er melding gemaakt van scheurvorming, die na oppervlakkige reparatie steeds terugkomt. Het scheurenpatroon verslechtert jaarlijks. In 1992 wordt hier het volgende over medegedeeld, zie [RWS 1992]:

De dijk is verbeterd in het kader van de deltawerken en is gereedgekomen in 1988/1989. De dijk bestaat uit een zandkern met een klei-afdekking van ongeveer 1,2 m dik. De klei is gedeeltelijk afkomstig uit de oude dijk en gedeeltelijk uit het achterliggende gebied. De klei is, volgens zeggen, tamelijk nat aangebracht. Op de buitenberm (NAP+2,5m) ligt een asfalt onderhoudsweg. Het buitentalud in de richting van de teen is verdedigd met een harde bekleding. Aan de bovenzijde van de berm is grasbekleding aanwezig. Aansluitend aan de asfaltberm liggen doorgroeištenen. De taludhelling varieert tussen 1:2,5 en 1:3. De kruinhoogte varieert tussen NAP+7,5m en NAP+9,0m. Het grasbeloop wordt onderhouden met schapen. Bijmaaien is slechts zelden noodzakelijk.

PROBLEEM.

In de kleilaag treden scheuren op, de belangrijkste in lengterichting van de dijk. De bovenzijde van de scheuren bevinden zich op gelijke hoogte, dit duidt er op dat de scheuren niet het gevolg zijn van deformaties van het dijklichaam. De meeste scheuren zijn waargenomen op het binnentalud (zuidzijde)

maar ook op de kruin en voornamelijk sinds afgelopen (droge) winter op het buitentalud komen scheuren voor. De grootte van de scheuren varieert en neemt toe in de tijd. Scheuren met een breedte van 10 à ~20 cm en een diepte van 50 cm zijn geen zeldzaamheid op een gedeelte van de dijk dat ongeveer 15 jaar geleden is aangelegd. Op de kruin is een scheur aanwezig met een breedte van 15 cm, een diepte van 50 cm en een lengte van 30 m.

HUIDIG HERSTEL.

De scheurvorming over een strekking van 6 km noodzaakt tot het nemen van maatregelen maar ook in de later aangebrachte dijkgedeelten zijn reeds scheuren zichtbaar. Herstel vindt op drie manieren plaats, namelijk met de hand, bekleien en frezen.

Met de hand worden de grootste scheuren gevuld. Deze methode leidt tot goed gevulde scheuren.

Bekleien is het verspreiden van klei met een mestaanhanger. Vervolgens wordt de klei met een slede in de scheuren geveegd. Deze methode wordt jaarlijks herhaald.

Gefreesd wordt tot een laagdikte van 20 cm. Vervolgens wordt het talud geëgaliseerd en opnieuw ingezaaid. Deze methode is twee jaar geleden voor het eerst toegepast. Hier zijn nog geen nieuwe scheuren waarneembaar.

Het frezen van de klei blijkt te voorkomen dat de grotere scheuren terugkomen. Het lijkt er op dat in 1993 nu vrijwel de gehele dijk is gefreesd, zie [Waterschap Ommelanderzeedijk 1992]. Tot het jaar 2000 is er bekleid.

De oorzaak van de langgerekte scheur in de kruin parallel aan de dijk is waarschijnlijk het optreden van ongelijkmatige zetting.

De andere scheuren zijn het gevolg van het te nat aanbrengen van de klei, waardoor er veel krimp is opgetreden. Deze krimp werd aangewakkerd door de lokaal aanwezige zandinsluitingen, waardoor het water er gemakkelijker in en uit kan. Want als de scheuren of zandlenzen diep reiken, dan gaat de structuurvorming ook dieper.

Na 1993 is de kwelderklei nog verder gerijpt, waarbij het onderhoud minder intensief is geweest. Vanaf 2000 was er minder scheurvorming zichtbaar. Grofweg zijn is het uitgevoerde beheer en onderhoud te omschrijven in 3 perioden, zie Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Omschrijving van uitgevoerd beheer en onderhoud Dollarddijk.

tabel 5.1 Tijdlijn beheer en onderhoud zeedijk

Periode	Toelichting
1976 - 1989	Aanleg/uitvoering dijkverbetering
1989 - 1993	Zeer veel scheurvorming Zeer intensief beheer en onderhoud
1993 - 2000	Veel scheurvorming Intensief beheer en onderhoud
2000 - heden	Minder scheurvorming, continue seizoensafhankelijke scheurvorming Beheer en onderhoud meer van cosmetische aard

2.4 Ervaringen elders

2.4.1 Dredgdike project

In het kader van het Europese Interreg project Dredgdike is er onderzoek gedaan naar een veilige toepassing van gerijpte brakke en organisch rijke baggerspecie op dijktaluds.

[Dredgdikes Guideline 2015], inclusief Annex II, bevat een beschrijving van de werkzaamheden en bevindingen. Zie ook <https://www.dredgdikes.eu/>.

Er zijn nabij Rostock rijpingsvelden aangelegd waarin de baggerspecie gedurende maximaal 5 jaren werd behandeld. De baggerspecie is afkomstig van de stad Rostock.

Eigenschappen materiaal

De eigenschappen van de baggerspecie variëren, zie tabel 2.3 [Dredgdikes Guideline 2015]. De baggerspecie aangeduid met M1 is 'fine grained' en is 5 jaren gerijpt, type M2 is 'fine grained' en is 2 jaren gerijpt. Type M3 is 'mixed' en heeft 2 tot 5 jaren gerijpt. De kleimineralen van deze baggerspecie bestaan voornamelijk uit Kaoliniet en Illiet, met kleinere hoeveelheden Chloriet en Muskoviet.

Materiaal M1 heeft een TOC-waarde (total organic carbon) tussen 6 en 7, en M2 tussen 5 en 6.

Een schatting van het organisch stofgehalte OM volgt volgens [Dredgdikes Guideline 2015] uit volgende relatie: $OM = 1,724 \cdot TOC$ met TOC-bepaling volgens ISO 10694(*)
(*)ISO 10694. Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), 1995.

Zodoende vinden we voor OM = 10 tot 11 voor M1-materiaal en TOC= 9 tot 10 voor M2-materiaal. Materiaal M3 is mixed en bevat meer zand dan M1 en M2. Daardoor is de TOC-waarde kleiner, d.w.z. 3, zodat OM= 6.

Tabel 2.3 Eigenschappen van de baggerspecie uit Rostock. DM=dredged material, TOC=total organic carbon.

Table 2.1. General parameters of treated brackish DM (IAA Rostock)

Dredged material	Sand	Silt	Clay	TOC	CaCO ₃
Mean fine-grained	40	38	24	6	8
Max. fine-grained	74	64	46	10	16
Mean mixed DM	74	16	8	3	6
Max. mixed DM	90	26	15	6	10

De bepaling van de Atterbergse grenzen van M1 en M2-materiaal geeft hoge waarden voor zowel de PL en LL, te weten voor M1: PL= 75 en LL=111, en voor M2: PL = 60 en LL= 96 Deze waarden zijn bepaald volgens de DIN 18122-1 (Casagrande methode). In geval van 53% zand in M3 geldt: PL = 45 en LL=63. Deze waarden lijken wat gangbaarder.

Grondconstructie

Er is nabij de rijpingsvelden een grondconstructie van enkele meters hoog aangelegd met een drietal compartimenten (polders), zie Figuur 2.9, welke gebruikt is als testlocatie. Deze constructie is in het voorjaar van 2012 aangelegd. Er zijn daar onder meer overlooppoeven uitgevoerd. Het talud is voor een aantal proefsecties versterkt met een geotextiel (RECP, zijnde een colbond Enkamat) en/of een "erosion control grid" (Huesker Fortrac 3D). Bij sectie H in Polder 3 is ook een drainagevoorziening aangelegd.

Er zijn 3 type doorsnedes aangelegd. Doorsnede Polder 1 bestaat uit een zandkern met op het buitentalud een 1,5 m dikke laag M2-materiaal en op het binnentalud een 1 m dikke laag M2-materiaal. De taludhelling voor Polder 1 is 1:2. Doorsnede Polder 2 bestaat uit een zandkern met daarop een 1 m dikke laag M1 of M2 materiaal (zie Figuur 2.9 onderaan), met taluds 1:3. Doorsnede Polder 3 bestaat geheel uit M3 materiaal (heeft een hogere zandfractie), met talud 1:2.

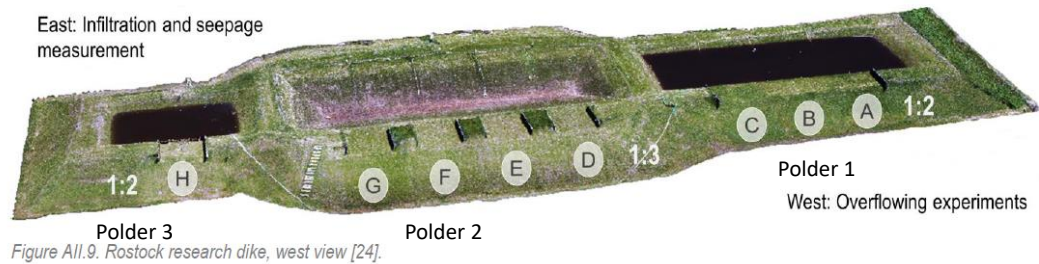


Figure All.9. Rostock research dike, west view [24].

Table All.9. Research dike - cross-sections and materials

Section	A	B	C	D	E	F	G	H
Material	M1	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M3
RECP	No	no	EW	no	W	W	no	no
Geogrid	no	no	no	no	E	E	no	no
Drainage composite	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	EW
Slope (V:H)	1:2	1:2	1:2	1:3	1:3	1:3	1:3	1:2

Figuur 2.9. De grondconstructie met 3 compartimenten nabij Rostock.

Het verdichten

In een apart proefvak zijn diverse verdichtingsmethoden van de gerijpte baggerspecie onderzocht. Hierbij ligt het watergehalte van het M1 materiaal tussen 40 en 85%. Voor type M2 is dit 30 tot 65%. Het watergehalte van M3 ligt tussen 25 en 45%. Bulldozer-verdichting (zie Figuur 2.10) blijkt acceptabele resultaten te geven, uiteindelijk ook voor de middelste proefsectie (Polder 2) uit Figuur 2.9. Hierbij is het materiaal steeds in lagen van 30 cm dik aangebracht. Men streefde naar een compactiegraad van minstens 90% van de 5-punts maximale proctordichtheid. Door de natte zomer van 2011 was het materiaal echter te nat om dit te kunnen halen. De in het proefveldje gerealiseerde compactiegraad t.o.v. de 5-punts proctordichtheid is vaak lager dan de gewenste range van 92 tot 83% afhankelijk van het aanwezige watergehalte. Dit is mogelijk ook het geval geweest bij de aanleg van de poldergrondconstructie in het voorjaar van 2012.



Figure All.135. Compaction with the excavator shovel only

Figuur 2.10 Bulldozer-verdichting op proefveldje.

Ontwikkeling in tijd

Het in het eluaat gemeten zoutgehalte (Chloride) is laag, d.w.z. maximaal 0,4 g/l [Henneberg & Neumann 2014]. Het kan zijn dat dit gegevens van de klei op de taluds van het grondlichaam betreft, waarbij het zout in het poriewater na enige tijd lijkt te zijn uitgespoeld.

Vanaf het gereed komen van de grondconstructie in mei 2012, zijn er drie erg droge zomermaanden geweest. Dit heeft geleid tot serieuze scheurvorming in het M1 en M2 materiaal. In het M3 materiaal waren er geen scheuren te zien. In de lente van 2013 bleek de ontwikkeling van de grasvegetatie vertraagd als gevolg van de lange strenge winter. In mei 2013 herstelde de vegetatie zich en binnen een paar weken was er een dichte vegetatie (zie Figuur 2.11 links). Er ontstonden ook gaten als gevolg van graverijen door muizen (zie Figuur 2.11 rechts).



Figuur 2.11 Polder 1 tegen einde mei 2013: links pas gemaaid; rechts activiteit van muizen.

Uit persoonlijke mededelingen Stefan Cantré (Universiteit van Rostock 2021): Er zijn scheuren tot op 1 à 1,5 meter diepte in de deklaag waargenomen. Meestal zijn het geen doorgaande scheuren.

De doorlatendheid is groter dan verwacht werd, en veel groter dan volgt uit metingen in het laboratorium. Er is gekeken naar inwendige erosie rond de scheuren. Er treedt nauwelijks uitspoeling van materiaal op. Ten gevolge van de dichte grasmat zijn de scheuren nu nog maar in enkele gevallen zichtbaar, ook in droge zomers.

Er zijn ook geodetische zettingsmetingen uitgevoerd. De resultaten staan in Figuur 2.12.

Average settlements [m]	6 June to 16 Oct 2012	6 June 2012 to 16 April 2013	6 June 2012 to 27 June 2013
Polder 1 west crest	0.05	0.08	0.09
Polder 1 east crest	0.09	0.13	0.15
Polder 2 west crest	0.08	0.14	0.15
Polder 2 east crest	0.14	0.22	0.23
Polder 3 crest	0.08	0.14	0.15
North dam crest	0.10	0.16	0.17
Underground west	0.01	0.02	0.01
Slope east	0.06	0.10	0.11
Underground middle	0.01	0.04	0.01
Underground east		0.01	0.00

Figure All.43. Results of the geodetic settlement measurements

Figuur 2.12 De resultaten van de geodetische zettingsmetingen aan de Polder 1 t/m 3 grondconstructie.

Aanvullende eis

Als aanvulling of alternatief voor een controle op de verdichtingsgraad wordt voorgesteld om met een veld-vin de ongedraineerde schuifsterkte s_u te controleren, met name in geval van een grote variatie in samenstelling van het baggerspecie-materiaal en bij veel variatie in watergehalte. Ook in andere literatuur wordt de ongedraineerde schuifsterkte genoemd als een invloedrijke parameter is het voorspellen van het erosieproces [Briaud et al. 2019].

Bij laboratoriumonderzoek werd ook een vin-test gebruikt. Mogelijk treedt er dilatatie tijdens de proefnemingen, met name bij een relatief hoog zandgehalte (nabij 30%), waardoor de gemeten s_u -waarden kunstmatig mogelijk te hoog zijn vanwege de ontstane suctie. De eis volgens Dredgdike is dat de klei een s_u -waarde moet hebben die groter is dan 50 kPa, zoals steeds bepaald met een vin-test. Dit is van belang als er grotere scheuren in het dijklichaam aanwezig zijn, waarbij de naastgelegen grond kan afschuiven onder golfklapbelasting. Hoewel wordt verwezen naar het bezwijkgedrag van klei in de nabijheid van openstaande scheuren onder golfklapbelasting [Führböter 1966] is de precieze berekening van de 50 kPa is niet gevonden, en daarmee is deze eis niet te gebruiken als een algemeen geldige eis. Aanbevolen wordt om voor diverse klei-soorten verbanden te leggen tussen erosie-proeven op prototypeschaal op natuurlijke, deels gestructureerde, klei en de ongedraineerde schuifsterkte-waarden op diverse locaties en diepte in deze klei. Er is onderzocht wat er met de s_u -waarden in het Dredgdike-grondlichaam is gebeurd na 10 dagen infiltratie van het binnentalud. Het blijkt dat ruimschoots aan de eis $s_u > 50$ kPa wordt voldaan, behalve in de door menselijke activiteit beïnvloede toplaag van 20 cm. Dit geldt zowel voorafgaande als na de infiltratie. Opgemerkt wordt dat deze 20 cm toplaag goede samenhang vertoont ten gevolge van graswortels. Het zandgehalte was hoog, zie Tabel 2.3. Bepaling van de s_u -waarde, vooral bij heterogene klei, wordt als praktischer gezien dan werken met een verdichtingsgraad ten opzichte van de 5-puntsproctordichtheid bij het optimale watergehalte.

Overloopprouven

De uitwendige erosie is getest aan de hand van overloopprouven, zie Figuur 2.13.



Figure All.12. Basic experimental set-up of the flume system



Figure All.13. Two pumps deliver water into the polders

Figuur 2.13 Impressie van experimentele set-up van de overloopprouven.

Figuur 2.14 geeft een overzicht van de overloopprouven die zijn uitgevoerd; de eerste serie in september 2013 en de tweede serie in mei 2014.

Een short term test duurde 45 minuten; een long term test tussen 18 en 22,5 uren. Het debiet q (l/m/sec) was maximaal 279 in 2013 en 352 in 2014. Het debiet werd bij de opeenvolgende short term testen in stappen verhoogd. De long term testen zijn aan het einde van de series proeven uitgevoerd.

Het resultaat is dat de over de testsecties gemiddelde verliezen aan grond minder zijn dan 1,27 cm in diepte. De debieten q zijn hierbij ongeveer 200 l/s/m (in 2013) en 550 l/s/m (in 2014).

Opgemerkt wordt dat overslag mogelijk meer erosie zou kunnen veroorzaken dan in de overloop proeven, onder meer afhankelijk van de grootte van de overslaande watervolumina en hiermee gemoeide stroomsnelheden.

Er wordt geconcludeerd dat de erosie zeer beperkt is gebleven en dat brakke en organische klei uit baggerspecie zeer geschikt zou kunnen zijn om te gebruiken als deklaag in vergelijking tot de Duitse reguliere klei. De effecten van uitspoeling van zout en afbraak van het organische materiaal op langere termijn (10 jaren en meer na aanleg) zijn echter nog niet bekend.

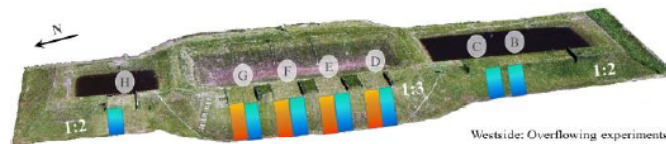


Figure All.11. Overflowing sections of the 2013 (blue) and 2014 (orange) experiments

Table All.10. Information about the cross-sections used for overflowing

Section	B	C	D	E	F	G	H
Material	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M3
RECP	no	EW	no	W	W	no	no
Slope (V:H)	1:2	1:2	1:3	1:3	1:3	1:3	1:2
Length [m]	6.0	6.0	7.8	7.8	7.8	7.8	5.4
No. test sections*	10	10	13	13	13	13	9
No. short term tests	10	11	23	27	22	25	10
No. 6h-tests	-	1	1	1	-	-	1
No. long-term tests	-	-	2	2	3	2	-

* No. of test sections resp. measuring areas each flume is divided into

Figuur 2.14 Overzicht van de uitgevoerde overloopprouwen op testlocatie nabij Rostock.

2.4.2 Proefophogingen Maasvlakte

Er zijn met gerijpte baggerspecie uit de Rotterdamse haven diverse proefophogingen gemaakt, te weten de proefophoging in 1995 [RWS2000] en een sandwichconstructie in 2003 [RWS 2004]. De ervaringen met de sandwichconstructie zijn voor dijkbekledingen minder relevant, aangezien gewerkt is met afwisselende laagjes van klei en zand.

Proefophoging Maasvlakte 1995

Nabij de Slufter op de Maasvlakte aan de noordkant van het Slufter depot is in augustus 1995 een ophoging van gerijpte klei uit baggerspecie aangelegd in het kader van het project 'Hergebruik Baggerspecie' (PHB). Het doel van dit project was het testen van de toepasbaarheid van klei uit baggerspecie in constructieve ophogingen.

Nabij het Slufter depot is het slib in lagen van 0,5 m dikte gedurende iets meer dan één jaar gerijpt. Voor het maken van de proefophoging is gebruik gemaakt van de klei uit depot 2 van categorie klasse 2. De klei in dit depot had in februari 1995 de volgende plasticiteitsgrenzen: vloeigrens = 90 - 99%; uitrolgrens = 27 - 29%. In mei 1995 was dit voor hetzelfde materiaal: vloeigrens = 90 - 95%; uitrolgrens = 31 - 32%. De samenstelling van de monsters is in mei waarschijnlijk net wat anders geweest dan in februari.

De klei uit het depot, zoals gebruikt voor de proefterp, had op 6 juni 1995 de volgende eigenschappen:

Tabel 9 Eigenschappen van monsters van tabel 8

Monster	< 63 μm % (m/m)	< 2 μm % (m/m)	organi- sche stof % (m/m)	CaCO ₃ % (m/m)	NaCl	
					g/l	g/kg dr.st.
boven	89	39	10,6	16,7	23,0	11,8
midden	91	36	10,2	16,3	11,0	7,5
onder	87	32	10,1	16,4	9,7	8,2

Figuur 2.15 Eigenschappen van gerijpte klei uit tussendepot, zoals gebruikt voor proefterp [RWS 1997]. Bepalingmethode organisch stof is onbekend.

Deze klei had een hoog organisch stof gehalte en een hoog zoutgehalte. Er is in de laatste maanden gewerkt met rijping in een tussendepot. Op 1 augustus 1995 werd het tussendepot nog eens bemonsterd. Nu werden 6 boringen uitgevoerd. Het gemiddelde vochtgehalte per boring varieerde van 56,9 tot 49,5 % (m/m) en was gemiddeld 54,6 % (m/m). Dit komt overeen met een $I_c = 0,62$. In de top van het tussendepot kwamen vochtgehalten voor tot 13 % (m/m) en onderin tot maximaal 73 % (m/m). De sterke verlaging van het vochtgehalte was veroorzaakt door warm en droog weer sinds de vorige meting in juni 1995 van gemiddeld 66,4%. Zonder de erg droge toplaag is het bereikte gemiddelde watergehalte vlak voor aanleg onder de 56% ($I_c > 0,6$). De droge korst werd gescheiden en is voor de oprit gebruikt.

Met de klei is een proef-ophoging aangelegd met onderstaande afmetingen:

- Klei ophoging van 4,0 m hoog (aangebracht in 8 lagen van ca. 0,50 m na verdichting)
- Toplaag van zand met dikte 1,0 m (aangebracht in lagen van ca. 0,50 m)
- Bovenoppervlak 6 x 20 m², kruinbreedte = 4 m.
- Basisoppervlak (breedte x lengte) = 18 x 26 m²; met aansluitend oprit met talud 1:1.
- Taludhelling 2:3 (verticaal:horizontaal)

Er is gebruik gemaakt van de eis consistentie-index $I_c > 0,6$ voor een constructieve ophoging met categorie I klei uit het bouwstoffenbesluit [RWS1997]. Dit betreft een baanlichaam, niet een dijkbekleding. Deze grenswaarde is bij de verwerking van het materiaal uit de rijpingsvelden aangehouden.

De ophoging werd gemaakt op 14 t/m 17 augustus 1995. Het weer was droog en over het algemeen zonnig met maximum temperaturen tussen 20 en 25°C en lichte wind. De ondergrond waarop de ophoging werd aangelegd bestond uit geëgaliseerd vast zand.

De klei is in lagen van maximaal 0,5 m dikte met een bulldozer in de ophoging aangebracht en verdicht (zie Figuur 2.16).



Figuur 2.16 Proefophoging Slufter - Aanlegfase 14 t/m 17 augustus 1995 [RWS1997].

Het verdichten betreft het wegdrücken van de holle ruimten tussen de kleibonken. Dit lukte met weinig verdichtingsenergie door met de bulldozer enkele malen heen en weer te rijden. Na achterwaarts in de ophoging te rijden en na het kiepen van de klei werd het materiaal met een bulldozer "D6" met normale rupsbreedte (0,60 m) verwerkt. Hierbij werd de klei in een laagdikte tot 0,5 m na verdichting uitgevlakt en door berijding verdicht. Deze berijding omvatte in principe niet meer dan voor spreiding en profilering nodig was. Bij aanleg is echter in geval van plaatselijk hogere vochtgehalten enige spoorvorming (0,1 tot 0,3 m diep) opgetreden.

Tijdens aanleg lag het vochtgehalte tussen de 41,6 en 59,5%. Het betrof een kleisoort met een min of meer homogene samenstelling, maar met een relatief grote spreiding in vochtgehalte en verdichtingsgraad.

In de wielsporen van de vrachtauto's bij aanleg van de ophoging is met een torvane-apparaatje gemeten dat de gemiddelde schuifsterkte van de opeenvolgende lagen ligt tussen de 18 en 27 kPa. Met een pocket-penetrometer volgde dat de gemiddelde cohesie van de opeenvolgende lagen waarden had tussen 18 en 36 kPa. Deze waarden betreffen laag 2 en 7 uit de ophoging. De nauwkeurigheid van de torvane en de pocketpenetrometer is hierbij een paar kPa (naar mededeling van H. van Essen Deltares).

De proefophoging is in 2000, d.w.z. 5 jaar na aanleg, ontmanteld. Om voor die tijd nog zoveel mogelijk informatie te kunnen verzamelen over de eigenschappen van klei werd een onderzoeksprogramma opgestart, zie [Fugro 2000]. Het doel hiervan is het verwerven van inzicht/informatie met betrekking tot de volgende aspecten:

- De stabiliteit van de klei-ophoging.
- De vervormingen van de klei-ophoging.
- De effectiviteit van de toegepaste verdichtingsmethode.
- De eigenschappen van de klei.

Het onderzoek uit [Fugro 2000] richt zich op de ontmanteling van de proefophoging. Tijdens de ontmanteling zijn in chronologische volgorde de volgende werkzaamheden verricht:

1. Inmeten van de nog aanwezige vaste meetpunten en een dwarsprofiel over de afgraving.
2. Uitvoeren van piëzonderingen.

3. Meten van de waterspanningen in de kleilagen.
4. Visueel vastleggen van de klei en de laagopbouw.
5. Uitvoeren van infiltratiemetingen.
6. Nemen van milieumonsters voor sulfaatonderzoek (verder uitgewerkt door Tauw).
7. Bemonsteren van de verschillende kleilagen (steekbussen en geroerde monsters) t.b.v. geotechnische parameters.
8. Uitvoeren van een versteilingsproef.
9. Uitvoeren van laboratoriumonderzoek op de genomen monsters.
10. Analyse van de versteilingsproef met het eindige elementenmodel Plaxis.

Voor de werkzaamheden 4 t/m 7 is de proefophoging in de dwarsrichting afgegraven onder een talud van 1:1. Voor de versteilingsproef is de proefophoging over de lengterichting bijna loodrecht afgegraven.

De onder punt 4 genoemde visuele inspectie heeft als resultaat:
 De bovenste 1,5 meter klei is verkleurd naar bruin terwijl dieper in de ophoging de kleur zwart is. De ophoogslagen zijn terug te zien omdat in het bovenste deel van de ophoogslag de klei beter is verdicht dan onderin de ophoogslag. De kluiten die bij aanleg tegen elkaar aan zijn gedrukt zijn deels terug te zien. Er zijn prismatische structuren met verticale spleten ertussen waargenomen, maar geen doorgaande scheuren. Voor een meer uitgebreide beschrijving zie [Fugro 2000]. De infiltratiemetingen uit punt 5 geven aan dat de klei nog steeds (ook na 5 jaren) slecht doorlatend is. De Atterbergse grenzen van de klei zijn na 5 jaar niet veranderd. Ook het watergehalte is gemiddeld weinig veranderd.
 In [Fugro 2000] wordt een gemiddelde waarde van 8,5% voor het gloeiverlies van deze klei gegeven in 1995. In 2000 is dit 7,5%. Het zoutgehalte NaCl [g/l] is 15 in 1995 en 2000. Ook de andere geotechnische eigenschappen zijn in 2000 niet veel veranderd ten opzichte van 1995. De klei kende in 2000 een voldoende stabiliteit en vervormde niet tijdens de talud-versteilingsproef die liep van mei tot in september 2000.

2.4.3 Emanuelpolderdijk

Informatie is te vinden onder [Emanuelpolder VN - DeltaExpertise \(zeeuwingenwiki.nl\)](https://www.zeeuwingenwiki.nl). Ten behoeve van onder meer dit project is door Kruse advies uitgebracht over het toelaten van een hoger zoutgehalte in dijklichamen [Kruse 2013, zie Bijlage D]. Hieronder een korte beschrijving van de context ten aanzien van dit advies.

Het dijktraject Emanuelpolder ligt aan de zuidkant van Zuid-Beveland, ten oosten van Waarde. Het beheer is in handen van het waterschap Scheldestromen. Voor het dijkvak ligt een groot schor ("het schor van Waarde"), dat in beheer is bij Staatsbosbeheer. Het gedeelte dat is geselecteerd voor verbetering ligt tussen dp 120+16m en dp 146+50m, 2,6 km. De dijk moet onder meer worden verhoogd. Zowel het bovenbeloop van de dijk als de kruin bevatten voor versterking een kleilaag van 80 cm dik. De beheerder wil de dikte van deze kleilaag aanpassen naar een dikte van 1,40 m. De kruinhoogte van de nieuwe dijk dient hierbij minimaal NAP +9,00 m te zijn, en de buitenberm 5,00 m breed, zodat over de planperiode van 50 jaar de golfoverslag over de kruin minder dan 1 l/s/m zal bedragen.

Overwogen is om klei uit de voor de dijk gelegen schor te gaan gebruiken. Er is onderzoek naar deze klei gedaan. De klei voldeed bijna aan de normen voor erosiebeständigheids-categorie 1 klei, behalve voor het zoutgehalte bodemvocht dat tussen de 18,7 en 20,6 g/l lag. Er is serieus overwogen om deze klei te gaan gebruiken, maar vanwege de strakke planning is hier uiteindelijk van afgezien.

2.5 Functionele testen als indicator erosiebestendigheid

2.5.1 Invloed gestructureerdheid van de klei

Klei in de buurt van het dijkoppervlak zal in de loop der tijd veranderen van structuur. Net nadat de dijk is aangelegd en goed is verdicht, is er sprake van een compacte massa klei die als één geheel beschouwd kan worden. In de loop der jaren zal er echter door de invloed van de seizoenen sprake zijn van krimpen en zwellen van de klei. De variatie van het vochtgehalte in de loop van de seizoenen is hiervoor een belangrijke oorzaak.

Dit proces is uitvoerig beschreven in [Deltares 2010] en samengevat in [Deltares 2012].

Kruse beschrijft dit als volgt in het rapport [Deltares 2012]:

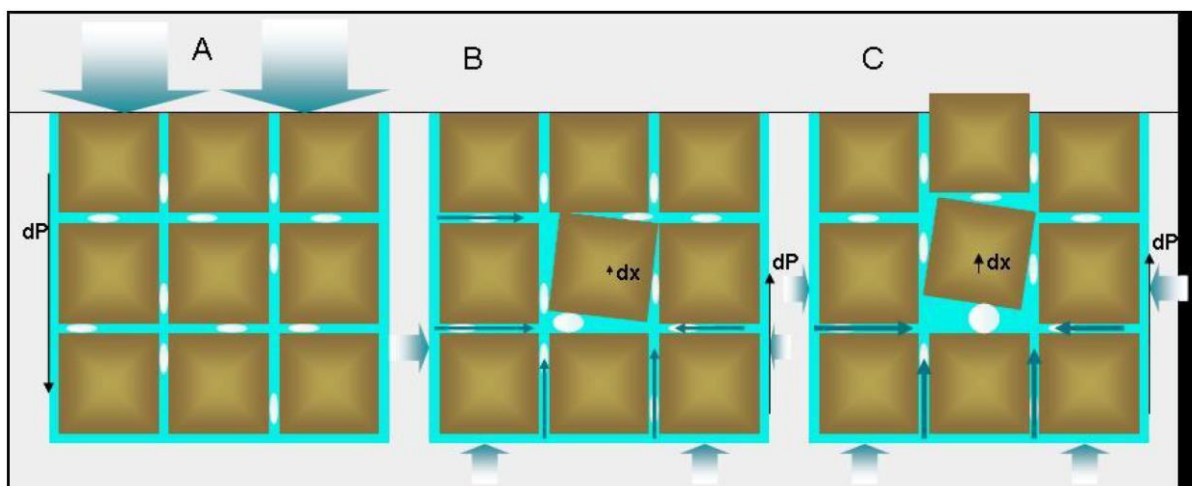
De bovenlaag gaat ongeveer 0.2 – 0.3 m beneden maaiveld over in een laag met een stapeling van aaneengesloten brokken met afmetingen van 0,03 - 0,1 m tot een diepte van ongeveer 1 m onder het maaiveld (1 m –mv). Zo'n representatief profiel ontstaat in een periode van 3 tot 5 jaar op een dijk in Nederland, en dieper na verloop van meer tijd en afhankelijk van de grondwaterstand.

Het patroon van scheuren die ontstaan door het effect van de seizoenen, wordt verder versterkt door chemische processen, die maken dat de randen van de scheuren in de klei een verminderde cohesie krijgen. Het maakt dat dichtgedrukte scheuren in de winter (nat seizoen), toch zwakke plekken zijn waar de klei gemakkelijk weer openscheurt.

Dit maakt dat een kleilaag op den duur is opgebouwd uit brokken klei die netjes in elkaar passen, maar onderling een verminderde samenhang hebben.

De golfbelasting op de klei geeft een zware belasting, waarbij er lokaal door de golven aan de klei wordt getrokken/geduwd. Bij gestructureerde klei kunnen de hoge drukpieken zich voortplanten in de scheuren, en zo extra krachten op de klei uitoefenen. In gestructureerde klei zal de hydraulische belasting op de kleibrokken daardoor meer effect hebben dan in ongestructureerde klei. In Figuur 2.17 is dit nader toegelicht door Kruse [Deltares 2012].

Anderzijds zijn de bindingskrachten tussen de verschillende brokken in de gestructureerde klei veel minder dan de cohesie in ongestructureerde klei. Daardoor zullen de uitgeoefende krachten op de klei gemakkelijker leiden tot het wegspoelen van brokken, dan dat er stukken klei worden afgebroken in ongestructureerde klei.

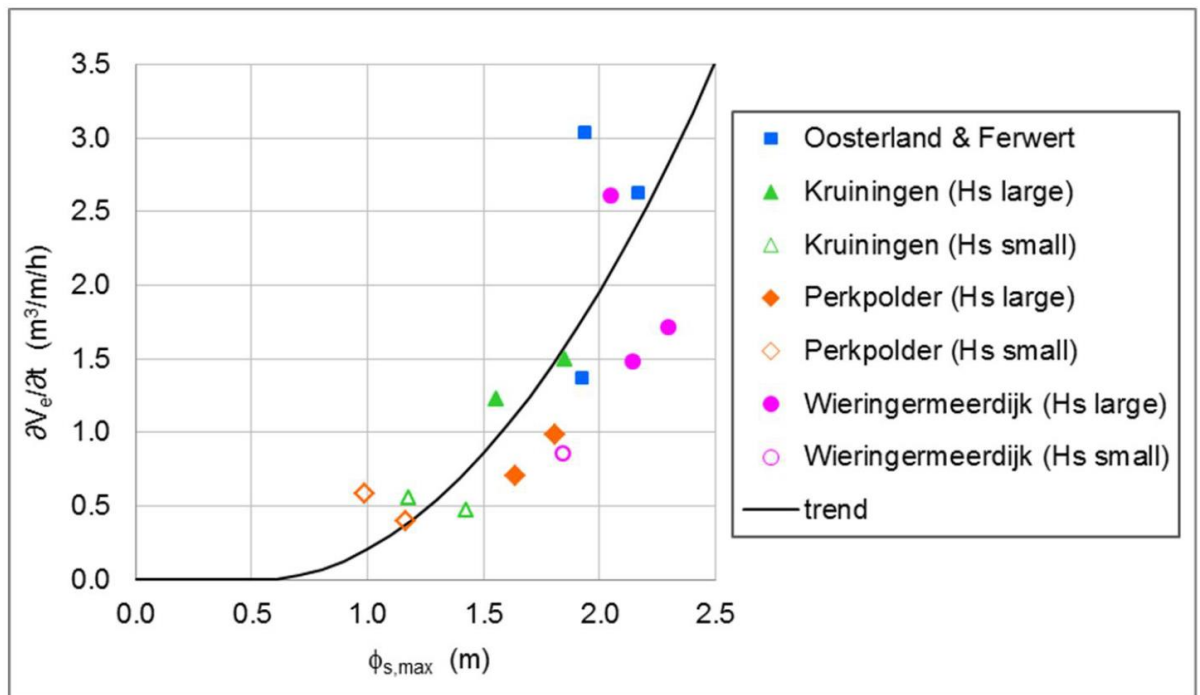


Figuur 2.17, Schematische voorstelling van het mechanisme van ontgronding door de waterdrukken die in de grond ontstaan door golfwerking. In de linker figuur staat er waterdruk van de golfbeweging op het talud. In de middelste figuur is de golfdruk op het talud weg en bestaat er nog een netto opwaartse druk in het talud waardoor een blok gaat bewegen en in de rechter figuur is deze vervorming doorgegaan door het toegestroomde water. De verrichte arbeid bij het losmaken is evenredig met dx en dP (de drukgradiënt)

Vette klei (met groot lutumgehalte) en klei met een sterk zwel/krimpgedrag, zal in de loop der jaren meer gestructureerd raken dan schrale klei of klei dat weinig zwelt/krimpt bij variërend vochtgehalte.

Bij gelijke gestructureerdheid zal vette klei beter bestand zijn tegen golfbelasting (erosiebestendiger) dan schrale klei. Doordat echter op den duur vette klei meer gestructureerd raakt dan schrale klei, wordt dit verschil sterk verkleind. Door Mourik [Deltares 2020b] is daarom

geconstateerd dat de erosiesnelheid, van de tot 2015 beproefde kleisoorten in de Deltagoot, weinig verschillen qua erosiebestendigheid, zie Figuur 2.18. Daarom heeft hij in zijn formule geen onderscheid gemaakt tussen schrale klei en vette klei.



Figuur 2.18, Analyse van de erosiesnelheid (verticale as) als functie van de piekdruk in de golfklappen (horizontale as) (Mourik, 2020)

2.5.2 Erosiebestendigheidsonderzoek op kleinere schaal

Voor afwijkende klei kan het interessant zijn om de erosiebestendigheid te onderzoeken met een kleinschalige erosieproef. In [Briaud et al. 2019] is een overzicht gegeven van een breed scala van erosieproeven van klein en minder krachtig naar groot, zowel in het laboratorium als voor in het veld. Er zijn ook voor- en nadelen gegeven van deze proeven.

Afhankelijk van de met name de belastingsituatie, opbouw van de grond en structuur in de grond kan hieruit een keuze worden gemaakt.

Bijlage A geeft een overzicht van erosietesten uit [Briaud et al. 2019], en vervolgens is informatie opgenomen over een aantal erosietesten die kansrijk lijken.

In Bijlage B is extra informatie opgenomen over de afmetingen van de roto-erosiemeter.

De Projectoverstijgende Verkenning Dijkversterking met Gebiedseigen Grond (POV-DGG) is bezig met de borehole erosion test (BET, zie [Briaud et al. 2019] paragraaf 2.2.3). Deze kan ingezet worden in het veld, zie Bijlage A. De kosten voor deze BET-test zijn gemiddeld en vanaf maaiveld kan over een diepte van meerdere meters een profiel worden gemaakt van de relatieve erosiebestendigheid.

Deltares heeft ervaring met de in paragraaf 2.2.1 beschreven roto-erosiemeterproef, zie ook Bijlage B. Deze roto-erosiemeter is in 2021 opnieuw ingezet om de diverse klei-soorten die in de Deltagoot zijn getest te onderzoeken. Een hoog bezwijktoerental geeft aan dat de klei een goede erosiebestendigheid heeft volgens het oude PI tegen LL diagram, zie paragraaf 2.2.1. Dit is een proef uitsluitend voor in het laboratorium. Het voordeel van deze proef dat er al veel ervaring mee is opgedaan in Nederland met klei die is verkregen uit dijken, zie ook paragraaf 2.2.1. Echter, er is voornamelijk nog geen kwantitatieve relatie gelegd tussen de resultaten uit de roto-erosiemeter proef en het gedrag van de klei onder golfklapbelasting in Deltagootproeven.

Verder is er ervaring in het Hedwigepolder 2C's project opgedaan met de LJET-proef [Boucher et al. 2018], een grote versie van de JET-test. Een JET-test kan zowel in het veld als in het laboratorium worden opgesteld. De LJET-proeven op materiaal uit de

Hedwigepolder zijn gedaan in het laboratorium. De JET-test geeft weer een hele andere belasting van de klei dan in de voorgaande twee testen, omdat er een jet-stroom met hoge snelheid op het klei-oppervlak wordt gericht. Dit lijkt mogelijk wat meer op een golfklapbelasting: er wordt immers niet alleen het effect van langsstromend water, maar ook het effect van opvallend water gemeten. De resultaten van de twee type proeven zijn daardoor niet zomaar vergelijkbaar.

Bijlage A geeft een overzicht van enkele in [Briaud et al. 2019] genoemde erosieproeven.

Naast het direct meten van de erosiebestendigheid wordt in de literatuur (Dregdike project, paragraaf 2.4.1) voorgesteld om voor de ongedraineerde schuifsterkte te eisen dat $s_u > 50$ kPa. De waarde van 50 kPa, die in de proefophoging in het kader van het Dregdike project werd gemeten correspondeerde bij overloopprouwen met een goede erosiebestendigheid van de daar gebruikte kleisoort, en dat terwijl er flinke scheuren in de klei aanwezig waren. Hoewel wordt verwezen naar het bezwijkgedrag van klei in de nabijheid van openstaande scheuren onder golfklapbelasting [Führböter 1966] is de precieze berekening van de 50 kPa is niet gevonden, en daarmee is deze eis niet te gebruiken als een algemeen geldige eis. Ook de empirische onderbouwing bij golfklapbelasting van een dergelijke eis ontbreekt vooralsnog. Aanbevolen wordt om voor diverse klei-soorten verbanden te leggen tussen erosie-proeven op prototypeschaal op natuurlijke, deels gestructureerde, klei en de ongedraineerde schuifsterkte-waarden op diverse locaties en diepte in deze klei.

Wat functionele eisen betreft blijkt de bepaling van de krimpgrens heel nuttig, en dat in combinatie met stap 4 van het OGD, de kleibakproeven met versneld verdrogen en vernatten van de diverse type klei. In het verleden zijn ook proeven met versneld rijpen uitgevoerd in het kader van toepassing van gerijpte baggerspecie [Deltares 2020a].

De beoogde krimpgrensbepaling is volgens ASTM D 4943 – 08, zie Bijlage C.

3 Samenvatting en Conclusies

De definitiefase en het bronnenonderzoek bestaat uit:

- Formuleren van onderzoeksvragen, vaststellen scope, keuze te onderzoeken trajecten, selectie geschikte methoden en proeven.
- Verzamelen van kennis en ervaring opgedaan in andere projecten waar ook sprake was van een hoger gehalte aan organische stof en zoutgehalte (o.a. Maasvlakte, kering projecten Zeeland, internationale projecten). Hierbij gaat het zowel om het afzonderlijke effect als het gecombineerde effect van zout en organische stof trachten te kwantificeren.
- Formuleren functionele eisen, bij een hoger zoutgehalte en gehalte organische stof, in relatie tot opties voor het ontwerp van een BGD.
- Aanvullend onderzoek literatuur (aanvullend op inspanning in kader van de Kleirijperij).
- Bronnenonderzoek naar lange termijn gedrag voor bestaande dijken waar kwelderklei en/of gerijpte baggerspecie is toegepast.

Het formuleren van onderzoeksvragen heeft in de aanloop van dit project al plaatsgevonden, en zal binnen de andere project-onderdelen worden aangescherpt. Wat betreft de functionele eisen die bij afwijkende klei als uitgangspunt kunnen worden genomen, is er een afbakening aangebracht, omdat het ontwerp van de Brede Groene Dijk al in grote lijnen bekend is. De focus ligt daarom op de functionele eisen ten aanzien van de erosiebestendigheid van en scheurvorming in het buitentalud. Er is onderzocht waar een relatie gelegd kan worden tussen de erosiebestendigheid uit een functionele test en de geotechnische classificatie in het kader van de Toetsing erosiebestendigheid (NEN-EN-ISO 17892:12(2018), conform RAW 2015 22.06.06/07). Mogelijk bevat de RAW 2020 ook dit proefvoorschrift.

De bevindingen zijn als volgt:

Cases:

Er is informatie over een aantal cases gevonden waarbij is gewerkt met klei met een hoge lutum-fractie en/of hoog organisch stofgehalte en/of verhoogd zoutgehalte. In al deze cases is succesvol een grondlichaam gebouwd met klei uit baggerspecie of met kwelderklei.

Hier volgt een korte samenvatting van de bevindingen:

De Dollarddijk is tussen 1976 en 1985 versterkt met zoute kwelderklei en geeft een goed beeld van het lange termijn gedrag van deze klei. De kwelderklei was erg nat bij aanbrengen, wat heeft geresulteerd in onacceptabele scheurvorming (scheurbreedte tot 20 cm). Men is in staat gebleken deze scheurvorming te repareren, waarbij ook het frezen van de toplaag noodzakelijk bleek.

Het verhoogde zoutgehalte heeft geen problemen, zoals verhoogde erosie bij contact met zoet water, opgeleverd. Na verloop van enkele jaren na aanleg is er een goede grasmat ontstaan. In 1993 bleek het zout grotendeels uitgespoeld. Het organisch stofgehalte van deze kwelderklei lag onder de 6% (waterstofperoxidemethode). Het zoutgehalte was in 1993 erg laag, d.w.z. ruim lager dan 4 g/l NaCl in bodemvocht. Er is geen melding gemaakt van grotere stormschade toen het gras nog niet volledig was ontwikkeld. Het hoog water van 1985 is goed doorstaan.

Het voor nader onderzoek gebruikte tracé van de Dollarddijk is gekozen bij kilometerpaal km 6; dit omdat daar in de voorliggende kwelder de Klutenplas is gegraven, zijnde kwelderklei. Voor het buitentalud van de Dollarddijk is ook klei uit de voorliggende kwelder gebruikt, hoewel deze dicht bij de dijk-as is ontgraven.

Er is ook bruikbare informatie gevonden uit het Dregdike project, waarbij een grondlichaam is gebouwd met gerijpte brakke baggerspecie uit de stad Rostock. Het organisch stofgehalte van het fijn gegradeerde deel van de baggerspecie was hoog, zoals blijkt uit de TOC-waarden (total organic carbon) van gemiddeld 6 en maximaal 10, wat een organisch stofgehalte OM impliceert tussen de 10 en 17. Hoewel de klei bij aanleg deels natter was dan eerder beoogd, was de aanleg haalbaar. Wel is er na een droge zomer scheurvorming geconstateerd, wat echter de erosiebestendigheid van de later met gras begroeide taluds niet heeft aangetast. Dit is getest met overloopprouwen. De doorlatendheid in het veld was veel groter dan gemeten in het laboratorium, wat duidt op een flink aantal openstaande scheuren.

Het zandgehalte was substantieel, d.w.z. voor het fijn gegradeerde materiaal gemiddeld 40%. Verder zijn er met de vinproef ongedraineerde schuifsterkte s_u -waarden gemeten van 50 kPa en hoger, ook na langere tijd (10 dagen) van infiltratie. Men stelt als functionele eis onder meer een $s_u > 50$ kPa. Bepaling van de s_u -waarde, vooral bij heterogene klei, wordt als praktischer gezien dan werken met een verdichtingsgraad ten opzichte van de 5-puntsproctordichtheid bij het optimale watergehalte.

De waarde van 50 kPa is niet goed onderbouwd, en kan beïnvloed zijn door het hoge zandgehalte in de klei, waardoor er ten gevolge van dilatantie te hoge s_u -waarden worden gemeten.

Bij de Proefophoging Maasvlakte 1995 is er gewerkt met brakke klei (9,7 a 23 g/l NaCl in bodemvocht) met een laag zandgehalte (9 a 13%) en een hoog organisch stofgehalte (10 a 11 % gloeiverlies). Deze klei heeft een korte rijpingstijd gehad van 1 tot 2 jaren. De aanleg van de ophoging was succesvol, hoewel het watergehalte hier en daar te hoog was t.o.v. de vereiste consistentie-index van groter dan 0,6. In de wielsporen van de vrachtauto's bij aanleg van de ophoging is met een torvane-apparaatje gemeten dat de gemiddelde schuifsterkte van de opeen volgende lagen lag tussen de 18 en 27 kPa. Met een pocket-penetrometer volgde dat de gemiddelde cohesie van de opeenvolgende lagen waarden had tussen 18 en 36 kPa¹. Dit betreft indicatieve waarden. Triaxiaal-onderzoek geeft meer betrouwbare resultaten.

De ophoging heeft er 5 jaren gelegen en is bij afgraven weer onderzocht. Er is in 2000 structuurvorming in de klei te zien tot circa 1,5 m diepte. Er zijn geen doorgaande scheuren aangetroffen en de doorlatendheid van de klei was nog steeds laag. De geotechnische eigenschappen zijn vrijwel onveranderd gebleven in de periode 1995 tot 2000.

Geotechnische eigenschappen:

Wat betreft de geotechnische eigenschappen, is in het kader van het Kleirijperij onderzoek [Deltares 2021] gesteld dat door verwijdering van het organische stof tijdens de rijping ook de vloeigrens, en in mindere mate de uitrolgrens zullen afnemen. Daarmee zal bij gelijkblijvend watergehalte ook de consistentie-index afnemen.

Ontziltling heeft ook effect op de Atterbergse grenzen, met name de vloeigrens wordt lager. De aard van het organische stof verandert ook, maar dat is met de standaard geotechnische methoden niet goed vast te stellen. Het effect van ontziltling op het erosiegedrag in het laboratorium is echter nog niet onderzocht, maar lijkt wel nuttig.

Functionele testen:

T.a.v. kansrijke functionele testen in relatie tot erosiebestendigheid is uit literatuuronderzoek gebleken dat er veel Nederlandse ervaring is met de roto-erosiemeter. De bij deze test geformuleerde erosiebestendigheidsklassen corresponderen goed met het erosiebestendigheiddiagram met plasticiteitsindex tegen vloeigrens [Grondmechanica Delft 1988]. Om afwijkende klei een plek te geven in het erosiebestendigheiddiagram is daarom besloten deze test in het project OGD ook in te zetten voor klei met hoog organisch stof- en zoutgehalte, iets wat nog niet eerder is gedaan voor deze afwijkende klei. Hierbij moeten de monsters op een diepte uit de dijkenklei worden genomen waar de klei niet te veel is gestructureerd. De

¹ Hierbij moet opgemerkt worden dat metingen met zowel de torvane als de pocket penetrometer indicatieve waarden voor de s_u opleveren met een paar kPa nauwkeurigheid.

monsters werden in het verleden met stalen bussen (\varnothing 100 mm) verticaal weggedrukt in kuilen op een diepte van circa 0,4 tot 0,5 m vanaf maaiveld in het talud. Deze methode is binnen het project OGD ook aangehouden bij het steken van monsters in de Dollarddijk. Er is nog geen kwantitatieve relatie gelegd tussen de uitkomsten van kleinschalige erosietesten en het erosieonderzoek in de Deltagoot onder golfklapbelasting.

In de literatuur wordt de ongedraineerde schuifsterkte s_u van klei genoemd als een invloedrijke parameter voor het optreden van erosie, waarbij dan de klei afschuift in de nabijheid van een scheur onder golfklapbelasting [Dredgdikes Guideline 2015]. Ook voor overloop en overslag wordt de waarde van s_u als belangrijk gezien [Dredgdikes Guideline 2015]. Hoewel in [Dredgdikes Guideline 2015] wordt verwezen naar het bezwijkgedrag van klei in de nabijheid van openstaande scheuren onder golfklapbelasting [Führböter 1966] is de precieze berekening van de eis $s_u > 50$ kPa is niet gevonden, en daarmee is deze eis niet te gebruiken als een algemeen geldige eis. Tevens is er in het geval van golfklapbelasting geen empirische onderbouwing voorhanden. Aanbevolen wordt om voor diverse klei-soorten verbanden te leggen tussen erosie-proeven op prototypeschaal op natuurlijke, deels gestructureerde, klei en de ongedraineerde schuifsterkte-waarden op diverse locaties en diepte in deze klei.

Aanbevolen wordt om, net als bij de proefophoging Maasvlakte, tijdens aanleg de s_u -waarde te bepalen, maar ook later in de tijd, door metingen in de diepte te doen, bijv. met een veldvin of een pocket-penetrometer in een profielkuil. Zo kan in aanvulling op visueel onderzoek worden vastgesteld tot hoe diep de uitdroging van de klei en hiermee gemoeide structuurvorming zijn voortgeschreden.

De minimaal vereiste s_u -waarde bij klei met een lager zandgehalte kan mogelijk lager worden aangenomen dan de aanbevolen ondergrens van 50 kPa in het Dredgdike project.

Het wordt tevens aanbevolen de bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte uit te voeren met een triaxiaalproef; hiermee kan het gedrag van het materiaal beter gevolgd worden en kan vastgesteld worden of de gemeten ongedraineerde schuifsterkte het gevolg is van cohesieve eigenschappen van het materiaal of ook verband houdt met het optreden van dilatantie. Dilatantie is bij sterk zandig materiaal een sterk bepalende factor voor de waarde van de s_u , maar deze is dan echter niet positief gecorreleerd met de erosiebestendigheid.

Wat functionele eisen betreft blijkt de bepaling van de krimpgrens heel nuttig, en dat in combinatie met stap 4 van het OGD, de kleibakproeven met versneld verdrogen en vernatten van de diverse type klei. In het verleden zijn ook proeven met versneld rijpen uitgevoerd in het kader van toepassing van gerijpte baggerspecie [Deltares 2020a].

Resumerend zijn voor de Brede Groene Dijk de volgende functionele testen relevant:

- Roto-erosiemeter proef (ter bepaling van de erosiebestendigheid aan de hand van toerentallen in erosiebestendighedsdiagrammen),.
- Bepaling ongedraineerde schuifsterkte s_u -waarde (met veld-vin (torvane) of conus).
- Verificatie van deze waarde met een triaxiaalproef of Direct Simple Shear (DSS) proef teneinde een relatie met het grondgedrag te kunnen leggen.
- Erosieproeven op niet ontzilt en ontzilde klei.
- Bepaling krimpgrens als onderdeel van de bepaling van de overige Atterbergse grenzen [ASTM 4943-18].
- Verder is de mate structuurvorming relevant voor het bezwijkgedrag onder met name golfklapbelasting. Dit zou kunnen worden onderzocht door middel van:
- De bakkenproef uit stap 4 is nuttig t.a.v. het ontstaan van een scheurenpatroon bij herhaald verdrogen en vernatten. Er is verschil te zien tussen schralere en vette klei bijvoorbeeld. De vette klei vormt meer structuur.
- Het maken van profielkuilbeschrijvingen is nuttig in combinatie met in-situ veldvin- en pocket-penetrometer testen, om de mate van verdroging en structuurvorming in de diepte vast te kunnen stellen. Er is door Deltares een protocol opgesteld voor zo een

profielkuilinspectie. Tevens kan dan onderzoek worden gedaan naar de samenhang in de klei en de brokkeligheid van de klei, door de klei handmatig los te trekken of los te steken.

Mogelijk zijn ook JET-testen interessant omdat het type belasting mogelijk wat meer op het lokale effect van golfklappen lijkt. Er wordt immers niet alleen het effect van langstromend water op de erosiesnelheid bemeten, maar ook het effect van opvallend water.

Hiernaar wordt door Deltares, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, onderzoek gedaan.

Daarnaast wordt door Fugro de BET (Bore Hole Erosion-test) ontwikkeld voor Nederlandse omstandigheden, waarmee profielen van relatieve erosiebestendigheid in de diepte kunnen worden gemaakt. Binnenkort wordt deze test mogelijk ingezet in dijkversterkingsprojecten.

Literatuur

[ASTM D4943-18]

Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States

[Boucher et al. 2018]

Maxime Boucher, Rémi Béguin and Jean-Robert Courivaud; 2018. Development of a New Apparatus for the Jet Erosion Test (JET); S. Bonelli et al. (Eds.): EWG-IE 2018, LNCE 17, pp. 25–33, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_3.

[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 2010]

Studie voor richtlijnen klei op dijktafuds in het rivierengebied; auteur Gerard Kruse; Deltares 2010; kenmerk 1202512-000-GEO-0002.

[Deltares 2012]

Klein Breteler, M., A. Capel, G.A.M. Kruse, G.C. Mourik en D. Kaste (2012) Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven SBW reststerkte; analyse Deltagootproeven Deltares, rapport 1204200-008, 18 mei 2012

[Deltares 2020a]

Navraag intern Deltares in kader van Kleirijperij onderzoek.

[Deltares 2020b]

Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack WTI-2017 Product 5.21 Deltares, report 1209437-017, 20 July 2020

[Deltares 2021]

Monitoringsrapportage Kleirijperij; Concept Rapportage 2018, 2019 en 2020 Kleirijperij Delfzijl; Deltares 2021; kenmerk 11201344-002-ZKS-0003.

[Dredgdikes Guideline 2015]

Dredgdikes; South Baltic Guideline for the Application of Dredged Materials, Coal Combustion Products and Geosynthetics in Dike Construction; 2015; Universiteit Rostock, ISBN: 978-3-86009-423-5. Inclusief Annex I en II.

[ENW 15-16]

Advies gehalte organische stof in klei en vorm dijkbekleding; ENW 15-16 advies aan Waterschap Groot Salland, 2 november 2015.

[Fugro 2000]

Ontmanteling van proefophoging met klei uit baggerspecie; Fugro 2000, Opdrachtnummer: K-0027/004.

[Führböter 1966]

Alfred Führböter; Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen; Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technische Hochschule Hannover Heft 28 1966.

[Grondmechanica Delft 1988]

Grondmechanica Delft 1988; CO-275925/14.

[Grondmechanica Delft 1993]

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

[Henk van der Leij 2021]

Mondelinge raadpleging van Henk van der Leij, zijnde gepensioneerd ex-medewerker van Hunze & Aa's, t.a.v. aspecten rondom de Dollarddijk.

[Henneberg & Neumann 2014]

Henneberg, M. & Neumann, R. 2014 Environmental and vegetational assessment report, Dredgdikes component 4. Project report.

[HWBP 2018]

Handboek Dijkenbouw 20, Uitvoering versterking en nieuwbouw. 2018; uitgegeven door Hoogwaterbeschermingsprogramma.

[Kruse 2013]

Toepassen klei met hoger zoutgehalte in dijklichamen; brief van Deltares (contactpersoon Gerard Kruse) aan Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen; 14 november 2013.

[Kruse 2015]

Klei eigenschappen in verband met het project "Ruimte voor de Rivier IJsseldelta"; brief van Deltares (contactpersoon Gerard Kruse) aan Waterschap Groot Salland, 2015; kenmerk 220595-000-BGS-0004.

[LGM]

LGM-rapport CO-234960

[Provinciale waterstaat 1983]

Provinciale Waterstaat van Groningen, bestek 16/1983 verzwaring Dollarddijk.

[RWS 1992]

NOTITIE: WBA-M-92111. van: J.C.P. Johanson; aan: dhr van der Ley, Seijffert, Muijs. betreft: scheurvorming klei, 20 oktober 1992.

[RWS 1997]

Toepassing van klei uit baggerspecie; Onderzoek proefophoging Slufter; Modulaire rapportage; Rijkswaterstaat rapport: DWW-AB-R-97002.

[RWS 2000]

Toepassing van klei uit baggerspecie - Onderzoek proefophoging Slufter, modulaire rapportage, rapport DWW-AB-R-97002, Rijkswaterstaat, DWW, 1995-2000.

[RWS 2004]
Rapportage “Sandwich-constructie op de Slufter”,
Rijkswaterstaat, DWW, juni 2004.

[RWS 2018]
Vier quick wins grond en klei. Optimalisaties voor dijkversterkingen. Rijkswaterstaat 2018.

[SHgras 2021]
Schematiseringshandleiding grasbekleding WBI 2017; Rijkswaterstaat, 28 mei 2021.

[Waterschap Ommelanderzeedijk 1992]
Veele 14 december 1992.
Aan het Management Team van het Waterschap Ommelanderzeedijk.
Betreft: Tussenrapportage scheurvorming kleidek van de zeedijk langs de Dollard.

A Bijlage A Erosietesten

Table 4. Summary of all types of erosion tests in terms of their application.

Laboratory Erosion Tests	In Situ Erosion Tests
<ul style="list-style-type: none"> • Lab jet erosion test (JET) • Hole erosion test (HET) • Pinhole erosion test • Drill hole erosion test • Slot erosion test (SET) • Rotating cylinder test (RCT) and improved versions • Rotating erosion testing apparatus (RETA) • EFA and similar versions of it (e.g., SEDflume, SERP, ESTD) • Stress-controlled erosion apparatus • True triaxial piping test apparatus (TIPTA) • Constant gradient piping test apparatus 	<ul style="list-style-type: none"> • Field jet erosion test (JET) • In situ erosion evaluation probe (ISEEP) from North Carolina State University • Borehole erosion test (BET) • Pocket erodometer test (PET) • Adjustable Shear Stress Erosion and Transport (ASSET) flume • In situ scour testing device (ISTD) • Field flume tests

In het veld gemakkelijk in de diepte de erosiesnelheid bepalen? Alleen de genoemde BET kan dit.

De in-situ JET vraagt het graven van een kuil en heeft de nodige nadelen, zie rapport Briaud2019. De miniatuur-insituJET (diameter ongeveer 10 cm) heeft mogelijk een lager bereik in shear stress.

PET heeft een te laag bereik in shear stress.

ISEEP-apparaat is duurder, gebruik mogelijk goedkoper dan de BET?

of the ISEEP are normally much less than the imparted velocities in the EPA. ISEEP can invest-
gate the erodibility of any soil at any depth, provided the probe can penetrate by erosion.

Table 5. Some erosion tests with information about their application.

Erosion Test	Range of Soil Types That Can Be Tested	Range of Shear Stress (Pa) That Can Be Applied	Cost of Device ^a	Reliability of Results	Lab of Field	
					Lab (L)	Field (F)
Lab JET	Sands to clays	<100	Low	Good	L	
In situ JET	Sands to clays	<500	Medium	Good	F	
EFA	Sands to clays	<165	High	Good	L	
HET	Clayey soils	≤800	High	Good	L	
SET	Clayey soils	≤400	High	Medium	L	
RETA	Clayey soils	<100	High	Medium	L	
PET	Sands to clays	<20	Very Low	Medium	F	
ISEEP	Sands to clays	<650	High	Good	F	
BET	Sands to clays	<600	Medium	Good	F	

^aVery low: <\$5,000; low: \$5,000 to \$15,000; medium: \$15,000 to \$30,000; high: >\$30,000.

2.2.3 Borehole Erosion Test

The borehole erosion test (BET) is an in situ test developed by Briand at TAMU (Briand et al. 2017a). The purpose of this test is to quantify the erodibility of the soil layers as a function depth, as follows:

1. Drill a hole into the ground, say 100 mm in diameter, 10 m deep.
2. Remove the drilling rods and measure the initial diameter of the borehole with a borehole caliper.
3. Reinsert the rods to the bottom of the hole and circulate water down the rod and up the outside annulus of the hole for a given time, say 15 minutes.
4. Remove the rods and measure the diameter of the hole with the borehole caliper.
5. Calculate the erosion rate. The increase in diameter of the borehole at a certain depth given by the calipers divided by the flow time is the erosion rate of the soil at that depth for the flow velocity applied during the test.

Profiles of erosion rate for different velocities can be prepared in this fashion.

Figure 27 shows a schematic diagram of the BET and field work photographs. The advantages and drawbacks of the BET areas follows:

Advantages

1. Only typically available field equipment (i.e., common drilling rig for wet rotary boring, flow meter in line with the drilling rig pump, and borehole caliper) is used to perform a BET; therefore, this test can be performed in many drilling projects.
2. Each test gives the erosion function for all layers traversed, since a complete borehole diameter profile is obtained from the caliper. Many tests on many samples would be required if laboratory tests were to be conducted.
3. The BET has two component tests: the lateral erosion test associated with the increase in diameter of the borehole and the bottom erosion test associated with the increase in depth below the bottom of the drilling rods during the flow. The latter is much like an in situ JET.
4. The BET can be used in any soil or rock in which a hole can be drilled.

Drawbacks

1. The shear stress is obtained from the Moody chart.
2. The test is limited by the pump flow available on the drill rig.
3. The hole needs to be capable of staying open.
4. In sand boreholes, the addition of bentonite during drilling needs to be controlled, so as not to affect the erosion resistance.
5. Because of gravity, the velocity over a given distance changes and needs to be taken into account.
6. Erosion of layers above the tip of the pipe could be altered by the sediment transport from the lower layers. For example, Sheppard (2002) showed that equilibrium scour depths are reduced by the presence of suspended fine sediments.
7. Borehole measurements with the caliper may not be accurate as a result of material sloughing off.

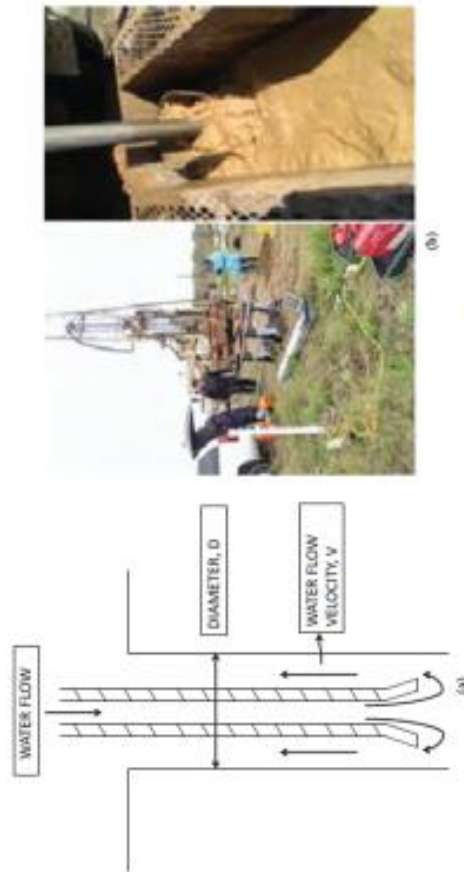


Figure 27. BET: (a) schematic diagram and (b) photographs of the test at the Riverside campus at TAMU (Briand et al. 2017).

FIELD AND LABORATORY JET TESTING METHOD FOR DETERMINING COHESIVE MATERIAL ERODIBILITY

By Gregory J. Hanson, Research Hydraulic Engineer,
USDA-ARS Hydraulic Engineering Unit, Stillwater, Oklahoma

Author contact point: USDA-Agricultural Research Service, Plant Science and Water Conservation Research Laboratory, 1301 N. Western Street, Stillwater, OK 74075. Phone number (405) 624-4135, Fax number (405) 624-4136, e-mail address: ghanson@pswcr1.ars.usda.gov.

Abstract: *This paper provides a summary of the progress made in development and use of a submerged jet test for measurement of soil erodibility. The apparatus and methodology have been developed as a tool to measure the erodibility of cohesive materials. A submerged jet is directed at the material surface and amount of scour is measured. The two orifices used to produce the jets have been 6 mm and 13 mm diameter, respectively. The orifice height above the material surface used in testing has been from 6 to 20 times the diameter of the orifice. The method of analysis has progressed from use of a jet index to a physical analysis of the hydraulic excess stress parameters based on jet diffusion principles. The test device is capable of producing boundary shear stresses from less than 1 Pa to 1000 Pa. The methodology has been used to determine erodibility of materials in headcuts, embankments, scour holes, rills, compacted soils, streambeds, and stream banks. Erodibilities of cohesive materials have been found to vary over several orders of magnitude. This apparatus and methodology can be a useful tool for scientists, consultants, and government agencies interested in quantifying erodibility of cohesive materials.*

The design method for stable channel boundaries in continuous open channel flow in erodible materials was initially based on an "allowable velocity." Generally, this method has been replaced by the concept of an "allowable stress." Allowable stress is the maximum stress that the channel bed can experience without excessive erosion. Research on stable channel boundary design has concentrated on the correlation of the allowable stress to fundamental soil and water properties (Dunn 1959, Smerdon and Beasley 1959, Carlson and Enger 1963, Lyle and Smerdon 1965, Kamphius and Hall 1983). Allowable stress is determined primarily by either one of two ways: visually assessing failure at a measured stress, or by plotting the erosion rate against stress and taking the allowable stress as the point at which the slope changes. In the literature, the stress at this point is commonly referred to as the critical stress. The latter approach, along with the need for understanding soil erodibility in unstable channel boundaries, has led researchers to not only observe fundamental soil and water properties in correlation to the allowable stress but also to observe the erosion rate at various stresses. This approach has led to the development of the excess stress equation to represent the detachment process of soil materials:

$$\epsilon = k_d (\tau_e - \tau_c)^a \quad [1]$$

where

ϵ = the erosion rate in volume of soil per unit time per unit area,

τ_e = the local effective stress, Pa

τ_c = the critical stress, Pa

k_d = the detachment coefficient, and

a = exponent (often assumed to be = 1).

This equation, although controversial as a mathematical representation of the detachment process, has proven useful as a simple equation to characterize soils. The terms k_d and τ_c are soil parameters, whereas the term τ_e is a hydraulic parameter.

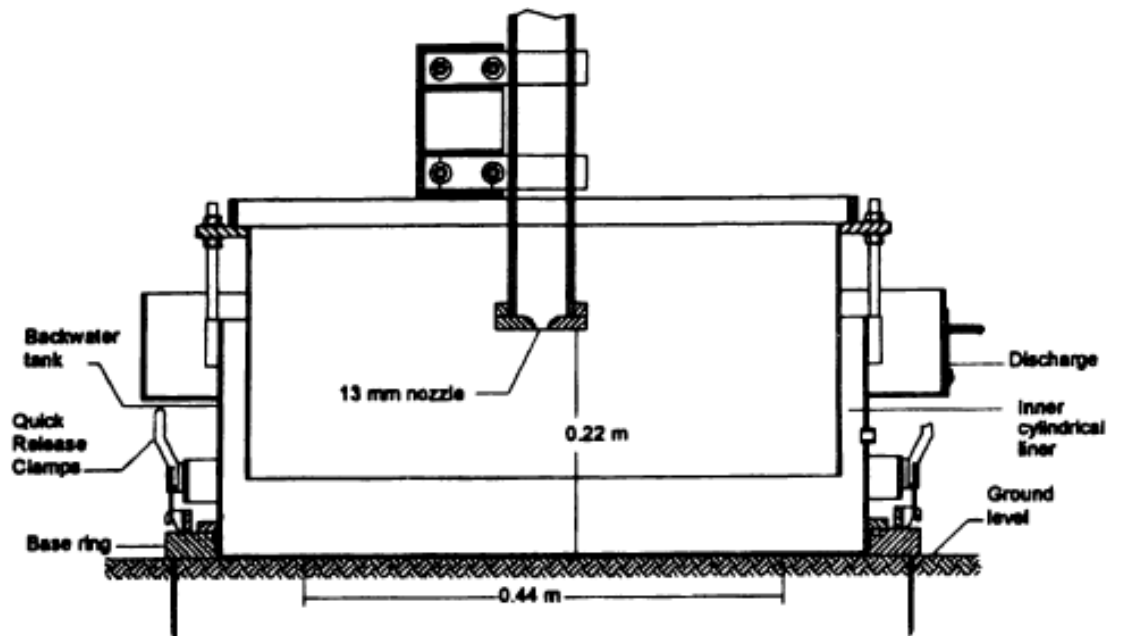
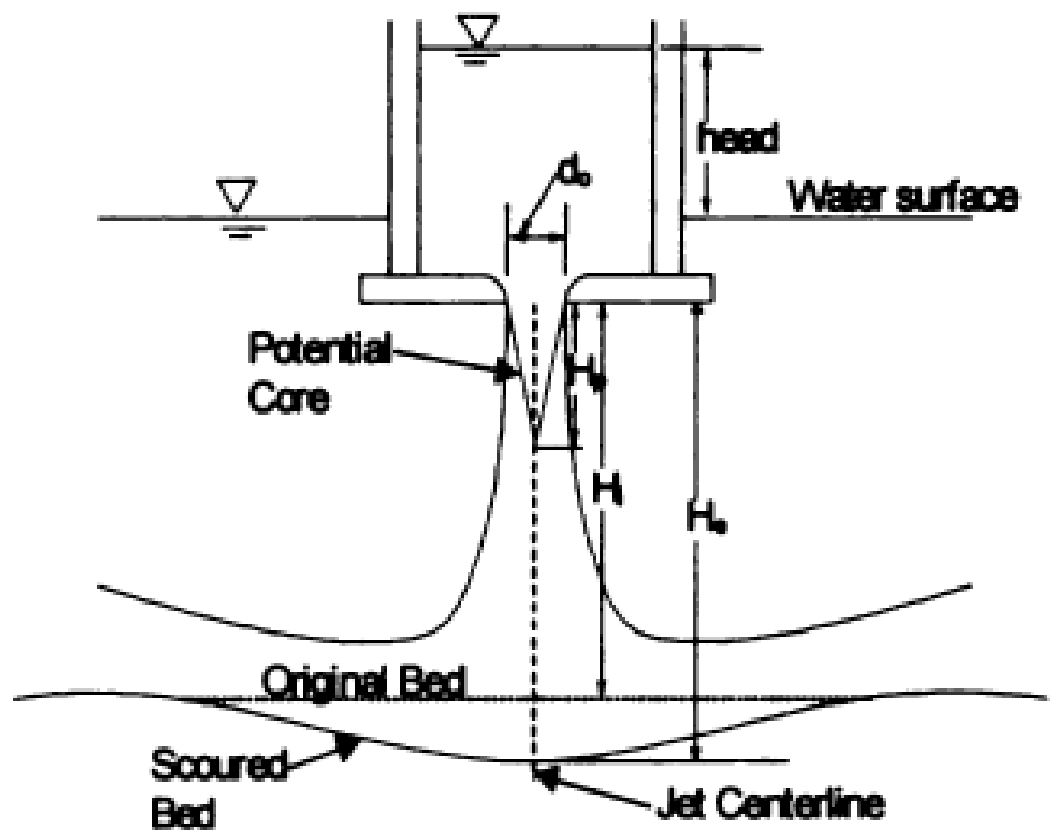


Figure 1. Submerged jet device for in-situ testing (Hanson, 1990).



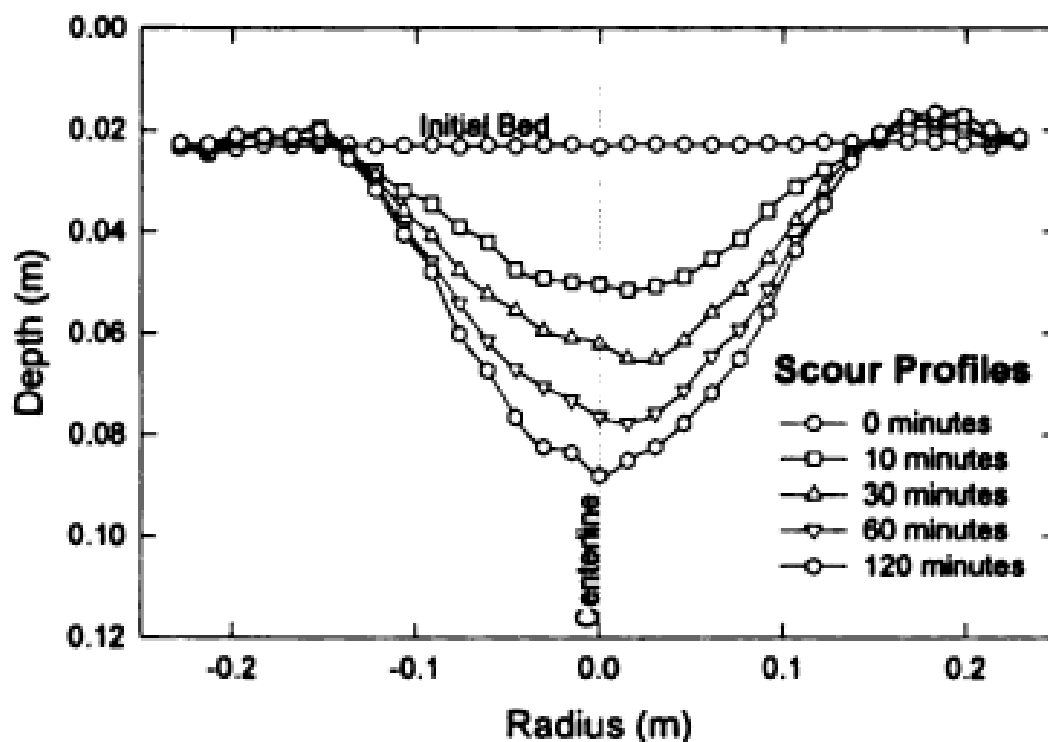


Figure 2. Measured scour profiles.

Development of a New Apparatus for the Jet Erosion Test (JET)

Maxime Boucher¹, Rémi Béguin^{1(✉)}, and Jean-Robert Courivaud²

¹ geophyConsult, 159 quai des allobroges, 73000 Chambéry, France
 remi.beguin@geophyconsult.com

² EDF-CIH, 73370 Le Bourget du Lac, France

© Springer Nature Switzerland AG 2019

S. Bonelli et al. (Eds.): EWG-IE 2018, LNCE 17, pp. 25–33, 2019.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_3

Abstract. The Jet Erosion Test consists of impacting a soil sample with a water jet and analyzing the evolution of the scour depth in order. It was originally designed to assess the resistance of fine soils against overflowing erosion by modelling the headcut migration. To extend this research to the overflowing erosion of mixed coarse – fine soils, EDF and geophyConsult have developed a larger JET apparatus, relying on the hypothesis, which needs to be confirmed, that some mixtures of fine and coarse soils may also have a headcut migration-type overflowing erosion process. A first test campaign has confirmed that JET tests carried out on the same soil with the original Hanson bench and the new apparatus provide comparable results. A second test campaign studied the influence of the nozzle diameter, testing the same soil successively with 6.35, 12 and 20 mm nozzle diameter. The first results confirmed that the results are not significantly influenced by this parameter. A third series of tests were related to soils that contain particles above 4.75 mm. Parallel to this experimental research, the interpretation of the test has been re-analysed, trying to understand the reason for the discrepancies observed between results obtained on French soil tests database and Hanson classification.

Keywords: Jet erosion test · Bench-testing · Automating · Overtopping Classification

2 Large Jet Erosion Test: Development of a Versatile Bench-Testing

A new JET apparatus (Fig. 1) connected to a pressurized reservoir, provided with interchangeable nozzles and performing larger eroding jets has been developed. The size of the bottom reservoir has been increased so that larger samples can be tested (up to about 25 cm in diameter). In order to overcome the uncertainties associated with the operator, and carry out quicker tests, the whole bench is being automated by a system of valves and acoustic measurement devices. Flow, pressure and scour depth are recorded during the test by the data acquisition system. Mass monitoring of erosion is also planned.

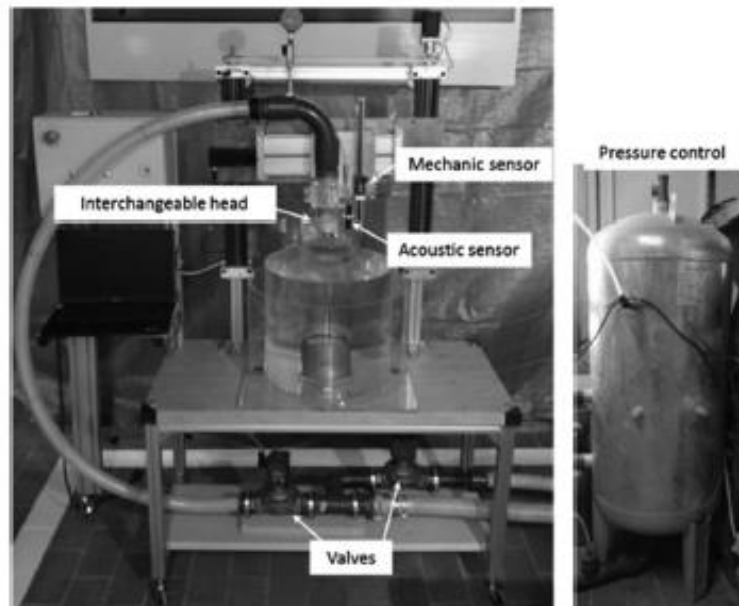
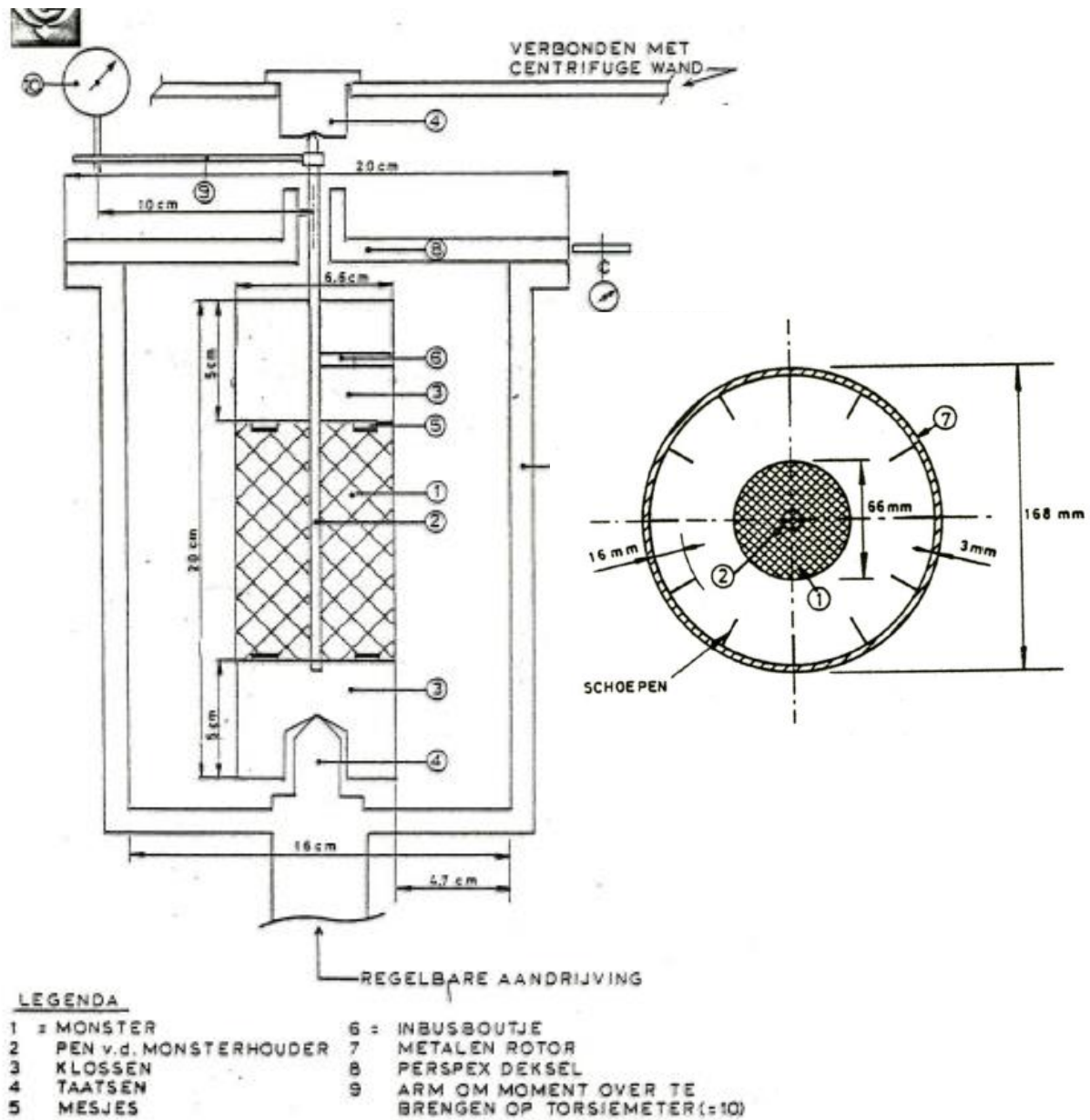


Fig. 1. Large Jet Erosion Test-bench

B Roto-erosiemeter



C Bepaling krimpgrens



Designation: D 4943 – 08

Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Wax Method¹

This standard is issued under the fixed designation D 4943; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

4. Summary of Test Method

4.1 A sample of fine-grained soil is thoroughly remolded with water to form a paste that is at approximately the liquid limit consistency. This paste is used to fill a small dish to form a soil pat. The initial moisture content of the wet soil pat is determined. The soil pat is slowly dried to constant mass. The volume of the dry soil is determined using a water submersion technique. A coating of wax is used to prevent water absorption by the dry soil pat. Then the moisture-content loss to dry the soil to a constant volume is determined and subtracted from the initial moisture content to calculate the shrinkage limit. The measurements are used to compute the soil constants.

5. Significance and Use

5.1 The term shrinkage limit, expressed as a moisture content in percent to the nearest whole number, represents the amount of water required just to fill all of the voids of a given cohesive soil at its minimum void ratio obtained by oven-drying. The shrinkage limit can be used to evaluate the shrinkage potential, crack development potential, and swell potential of earthwork involving cohesive soils.

D Zoute klei in dijken

Rijkswaterstaat Projectbureau Zeeweringen
T.a.v. de heer Y. Provoost
Postbus 1000
4330 ZW MIDDELBURG

Datum	Aantal pagina's	
14 november 2013	5	
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Gerard Kruse	+088 335 742 8	gerard.kruse@deltares.nl

Onderwerp
Toepassen klei met hoger zoutgehalte in dijklichamen

Geachte heer Provoost,

In antwoord op uw email van 5 november 2013 doe ik u hierbij enige inzichten toekomen ten aanzien van het toepassen van klei met een zoutgehalte dat hoger is dan 4 gram per liter (g/l) bodemvocht, zoals dat wordt gehanteerd in het Technisch Rapport Klei voor dijken (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, RWS, Delft, 1996). Er wordt van uitgegaan dat het om het toepassen van klei in dijken in een zoutwateromgeving gaat. De inzichten hebben betrekking op de invloeden van zoutgehalte bij het aanbrengen op het functioneren van klei in een dijklichaam en op het beoordelen van de geschiktheid voor toepassing in dijklichamen.

Het functioneren van de klei in een dijklichaam heeft betrekking op respectievelijk vormvastheid en sterkte, substraatfunctie voor bekleding, bestendigheid tegen ontgroning door golfwerking stroming en golfoverslag en overloop. Daarnaast is het gedrag van klei bij aanleg van belang en de verandering in de grond na aanleg. Het zoutgehalte van kleigrond heeft een invloed op al deze aspecten.

Het is bekend dat het zoutgehalte van het poriewater in klei een belangrijke invloed heeft op de mechanische interactie tussen kleimineraaldeeltjes in geroerde toestand. Onder andere omdat kleigrond slechts voor een deel uit kleimineralen bestaat (hooguit tientallen procenten) en omdat de geroerde toestand voor enigszins verdichte kleigrond na enige dagen tot weken teniet is gedaan, zijn deze effecten in de natuur minder duidelijk en meer gevarieerd dan in eenvoudige laboratoriumopstellingen. Voor bepaalde aspecten en in algemene zin is de trend van deze effecten van zoutgehalte evenwel ook van toepassing voor kleigrond in de natuur. Daarnaast heeft het zoutgehalte invloed op de substraatfunctie voor vegetatie (welke invloed deels veroorzaakt wordt door verwante mechanismen).

De algemene invloeden van verhoogd zoutgehalte in kleigrond zijn het gevolg van vooral de interactie tussen watermoleculen en de ionen van het zout en tussen deze moleculen en ionen en het oppervlak van gronddeeltjes. Ten opzichte van niet zoute klei gaat het met name om respectievelijk:

- 1 Verhoging evenwichtwatergehaltes (watergehalte van grond in evenwicht met de omgeving, met name atmosfeer en grondwater)
- 2 Beperking van wateronttrekking door organismen (planten)
- 3 Verhoging van sterkte, zowel bulksterkte als binding van individuele deeltjes
- 4 Zwellen bij opname van minder zout water, hetgeen aan een oppervlak van de grond aan maaiveld of in spleten en andere grote poriën, tot wegspoelen van klei leidt: de zogenaamde dispersie
- 5 Concentratie van zout door verdamping tot tijdelijk ongewenst hoge waarden (in droge perioden zoals perioden in de zomer en bij vriesweer)

De eerste twee genoemde invloeden zijn het gevolg van vooral verandering van osmotische waarde van de grond. De volgende twee invloeden (3, 4) worden veroorzaakt door verandering van onderlinge attractie- en repulsiekrachten tussen gronddeeltjes die afhankelijk zijn van de aard en concentratie van het zout. Met name neemt het volume van kleigrond aan het grondoppervlak zeer sterk toe als zoute klei zoet wordt, bijvoorbeeld door infiltratie van neerslagwater.

In het volgende worden relevant geachte invloeden en effecten kort besproken en wordt de consequentie ervan voor het functioneren en het beoordelen nagegaan.

Het evenwichtswatergehalte in grond boven de grondwaterspiegel wordt door omgevingsinvloeden (klimaat, weer, begroeiing, grondwaterstand) en de grond bepaald. Voor gestandaardiseerde omgevingsinvloed wordt de, in dit geval equivalente poriewaterdruk (de zuigspanning) bepaald door de affiniteit voor water van de grond. Deze affiniteit kan worden gekarakteriseerd met de Atterbergse grenzen van de grond. Met het evenwichtswatergehalte kan een grens worden gesteld aan de volumeverandering, met name krimp, van grond na aanbrengen. Voor grond uit een zoetwateromgeving is vastgesteld dat de zogenaamde consistentie-index, I_c , aan de buitenzijde van een grondlichaam lager dan 0.75 dient te zijn en voor de kern van een grondlichaam, buiten invloed van grondwater, een waarde hoger dan 0.6 moet hebben. Met deze waarden voor I_c wordt excessieve krimp, en het daarbij ontstaan van permanente, wijde spleten na aanbrengen voorkomen. De waarde van de Atterbergse grenzen hangt af van het zoutgehalte van de geteste grond. Als een grond met een zoute porievloeistof getest wordt, zal de vloeigrens ervan aanmerkelijk hoger liggen dan dezelfde grond met niet zout water. Het watergehalte bij $I_c = 0.75$, respectievelijk $I_c = 0.6$ ligt dan hoger dan voor dezelfde grond met een lager zoutgehalte. Een eventueel hoog zoutgehalte van een grondlichaam boven maaiveld zal onder Nederlandse omstandigheden afnemen (behoudens in geval van zeer intensieve zeer frequente spray). Daarmee zal ook het evenwichtswatergehalte van de grond veranderen (afname osmotische druk). Het evenwichtswatergehalte van zout aangebracht grond die ontzilt is, zal daarom lager zijn dan uit de Atterbergse tests bij aanbrengen volgt. Een overzicht van anekdotische gegevens in gepubliceerde bronnen en adviesrapportages leidt ertoe te stellen dat het watergehalte van zoute grond waarvan het zoutgehalte zal afnemen bij aanbrengen 3 % tot 5 % lager moet zijn dan volgens de consistentie index, I_c , vereist is. De zoutgehalten waar de referenties naar verwijzen zijn niet eenduidig vastgelegd (in termen van zoutgehalte van de porievloeistof). Er wordt voorshands van uitgegaan dat grond zout geacht wordt bij een zoutgehalte van 8 g/l bodemvocht. Voor grond met een lage vloeigrens, ongeveer 40 %, dient het watergehalte dan 3 % lager te zijn en voor grond met een hoge vloeigrens, zeg 80 %, ongeveer 5 % lager. Het is daarom van belang

na te gaan in welke mate het zoutgehalte na aanbrengen zal veranderen, hetgeen hieronder aan de orde komt. Ten aanzien van het gebruik van de I_c voor het bepalen van de verwerkbaarheid ($I_c > 0.6$) wordt nog opgemerkt dat deze waarde uiteraard geldt voor het zoutgehalte bij aanbrengen.

Zoute kleigrond aan het oppervlak kan oplossen (dispergeren) en verspoelen bij indringing van zoet water. Neerslag of ander zoet water op zoute klei leidt op die manier tot erosie van het oppervlak. In grond met grote poriën, zoals spleten of tussen kluiten, vindt dit plaats als er neerslagwater langs sijpelt. Het grondvolume kan daarbij met veel meer dan 5 % afnemen, wegspoelen, in enige maanden tijd. Grond met een bodemstructuur, zoals die zich ontwikkelt op termijn van enige jaren in een kleibekleding onder blokken en onder gras, is gevoelig voor dergelijk grondverlies. Het beschermen van de grond op het talud met een folie beperkt de invloed van weer en wind op de vorming van de bodemstructuur. De temperatuureffecten worden er niet door tegengehouden echter en de waargenomen effecten van vorstwerking tot een diepte van 0.2 – 0.3 m in de klei onder gezette steen worden er niet door beperkt. Eventuele percolatie met neerslagwater wordt door het folie tegengegaan.

Graslandvegetatie die niet als zouttolerant wordt aangemerkt, ondervindt hinder bij het vormen van een gesloten zode op zoute kleigrond. Voor het ontwikkelen en het in stand houden van een graszode zijn het ontkiemen van zaden, en het tot wasdom komen en het intact blijven van volgroeide planten van belang. Er zijn geen bronnen gevonden die deze aspecten adequaat samenvatten voor langere termijn ontwikkeling van graszode. In dit beperkte onderzoek is het niet mogelijk gebleken de bronnen voor de norm in genoemd Technisch Rapport te achterhalen. Aspecten van de ontwikkeling en korte termijn experimenten zijn wel gerapporteerd, maar over langere termijn ontwikkeling zijn slechts meer globaal beschreven omstandigheden gerapporteerd. Uit het overzicht van de vermelde zoutgehalten en de vermelde effecten ervan voor graszode kan worden gedestilleerd dat zoutgehalte boven 4 g/l effect heeft op de graszode. Meerdere bronnen (onder andere http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/EC_guide.pdf) vermelden dat voor kleigrond bij een geleidbaarheid van ongeveer 5 dS de grasbegroeiing ernstige hinder ondervindt van zout. Er zijn kale plekken van meer dan 1 m² in graszode op kleigrond met een geleidbaarheid van 4 tot 8 dS. Tot een geleidbaarheid van 2 dS is er geen effect merkbaar. Tussen 2 tot 4 dS ondervinden planten als straatgras en klaver reeds ernstige hinder. Met de gebruikelijke correlatie tussen geleidbaarheid en zoutgehalte van het poriewater in kleigrond leiden deze bevindingen ertoe dat bij een zoutgehalte van 3 g/l planten als klaver en straatgras niet meer voorkomen en dat bij 6 g/l kale plekken in de graszode kunnen ontstaan (voor de volledigheid: bij 30 g/l bodemvocht is de geleidbaarheid bijna 20 dS). De waargenomen ontwikkeling van graszode langs de Waddendijken in Duitsland en Denemarken, laten zien dat er in de zone direct boven gemiddeld hoogwater slechts een fragmentarische zode aanwezig is, gevormd door planten die niet algemeen zijn in de gebruikelijke graszode op dijken in Nederland. Voorshands lijkt de norm van 4 g/l bodemvocht voor het ontwikkelen van een gesloten graszode van geschikt en van toepassing voor Nederlandse omstandigheden.

Zout water dat door windwerking als spray op dijktaaluds komt verhoogt het zoutgehalte van de grond op het talud tenminste tijdelijk. Uit praktijkwaarneming blijkt dat kleigrond van een dijktaalud langs zout en brak water vaak een enigszins zoutige smaak heeft. Deze smaaksensatie ontstaat echter al bij een zoutgehalte van minder dan 1g/l poriewater en er wordt vermeld dat “zoute” klei als heel erg zout wordt beoordeeld. De grond van dijktaaluds ruim boven gemiddeld hoogwaterniveau is daarom naar het zich laat aanzien niet erg zout, en het zoutgehalte zal in het algemeen veel lager zijn dan 6 g/l. Vanwege het gedrag van Na⁺ en Cl⁻

ionen in natuurlijke kleigrond is het waarschijnlijk dat een groot deel van het zout van spray snel (dagen tot hooguit enige weken) uit de bovengrond verdwijnt door neerslag en dauw.

Kleigrond in contact met grondwater in een zoutwateromgeving kan zout poriewater hebben. Al naar gelang de ligging van de grond in het grondlichaam ten opzichte van het freatisch vlak zal de grond zout opnemen of afstaan. In getijdegebieden is de ervaring dat grond onder de dijk tot hoger dan gemiddeld hoogwaterniveau zout is, hetgeen afwijkt van de zoetwaterbel die zich onder een terreinverheffing van doorlatende grond op den duur vormt, en wat mogelijk wordt veroorzaakt door slecht doorlatende lagen en capillaire opstijging in kleigrond in het dijklichaam. Anekdotische waarnemingen aan klei in de kern van dijken geven aan dat die kleigrond tot minstens 1 m boven gemiddeld hoog water zout is. Deze omstandigheid is binnen 20 jaar na aanleg zeker aanwezig, maar er zijn geen waarnemingen voor de situatie voor kortere perioden na aanleg.

Praktijkervaring leert dat binnen 1 tot 3 jaar het uitspoelen van zout uit rulle kleigrond of grond met een bodemstructuur tot een zodanig zoutgehalte leidt dat er gewassen op kunnen groeien. Daarbij wordt opgemerkt dat de dispersie, die hiervoor is genoemd, wel optreedt hetgeen de doorlatendheid lokaal sterk kan beperken en daarmee de effectiviteit van de uitspoeling.

Ten aanzien van het zoutgehalte van klei in een dijklichaam na een periode van enige tot 10-tallen jaren wordt op basis van de schattingen en overwegingen in het bovenstaande het volgende gesteld:

- Klei in de kern van een dijklichaam in zoutwateromgeving in Nederland is tot minstens 1 m boven gemiddeld hoogwaterniveau zout. De kern wordt geacht de grond op meer dan 1 m van de buitenkant van de dijk te zijn.
- Klei op het buitentalud van een dijk in het getijdegebied, zoutwateromgeving, gelegen boven ongeveer 1 m boven gemiddeld hoogwater heeft een voor plantengroei effectief zoutgehalte van minder dan 4 g/l bodemvocht.
- Klei op het buitentalud van een dijk in het getijdegebied, zoutwateromgeving, gelegen beneden ongeveer 1 m beneden gemiddeld hoogwaterniveau heeft een zoutgehalte van veel meer dan 4 g/l bodemvocht.

Deze aannamen kunnen met metingen aan grond van dijklichamen worden geëvalueerd.

Indien wordt uitgegaan van de aannamen over het uiteindelijke zoutgehalte van kleigrond in een dijklichaam in het getijdegebied, zoutwateromgeving, en van de hier beschreven verwachte effecten voor beoordeling en functioneren, kan het volgende gesteld worden, te weten:

- Kleigrond op een buitentalud met grasbekleding dient een zoutgehalte lager dan 4 g/l bodemvocht te hebben tot een diepte van tenminste 0.8 m (loodrecht) beneden maaiveld
- Kleigrond in de bovenste 0.3 m (loodrecht) van een kleibekleding onder gezette steen boven ongeveer 1 m (verticaal) boven gemiddeld hoogwaterpeil dient niet een hoog zoutgehalte te hebben, voorshands wordt een zoutgehalte lager dan 4 g/l aanbevolen
- Kleigrond in een dijklichaam met een hoog zoutgehalte, voorshands hoger dan 4 g/l bodemvocht, dient niet langdurig in contact met neerslag water te zijn
- Het watergehalte van klei met een zoutgehalte hoger dan 8 g/l bodemvocht boven 1 m (verticaal) boven gemiddeld hoogwaterpeil dient bij het aanbrengen een watergehalte te hebben dat respectievelijk:
 - o voor kleigrond met een vloeigrens van 40 % 3 % lager is dan dat bij de voor de toepassing voor niet zoute klei gestelde consistentie-index, I_c

Datum
14 november 2013

Pagina
5/5

- o voor kleigrond met een vloeigrens van 80 % 5 % lager is dan dat bij de voor de toepassing voor niet zoute klei gestelde consistentie-index, I_c

Het bepalen van het zoutgehalte van grond betreft meestal de gewichtsafname bij spoelen met gedemineraliseerd of gedestilleerd water. Het is van belang bij de bepaling eventueel gewichtsverlies door het uitspoelen van zeer fijne vaste stof bestanddelen te voorkomen dan wel minimaal te laten zijn.

De in deze brief beschreven bevindingen ten aanzien van het toepassen van klei met een zoutgehalte hoger dan 4 g/l bodemvocht zijn gebaseerd op een voorlopig onderzoek en praktijkervaringen. De praktijkervaring leert dat in het verleden er meermaals zoute klei in dijken is verwerkt en dat een te hoog watergehalte bij het aanbrengen in veel gevallen tot een weinig coherente kleibekleding heeft geleid. De praktijkervaring leert ook dat de dispersie onder een bekleding van gezette steen zonder afdekkend folie tot aanmerkelijk grondverlies heeft geleid en dat teveel zout de ontwikkeling van een gesloten graszode beperkt. Er is geen informatie over de betreffende watergehalten bij aanbrengen of de overgang van zout naar zoet voor deze gevallen bekend. De praktijkwaarnemingen wijzen er wel op dat er met deze effecten voor de praktijk relevant zijn.

Hoogachtend,

drs. G.A.M. Kruse
Senior Specialist

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