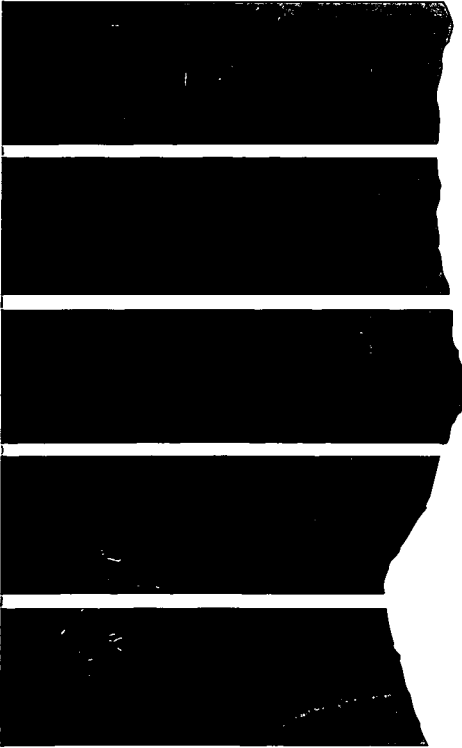


ad.g73611

B6 97.02



GRONDMECHANICA
DELFT



**EROSIEPROEVEN OP
KLEI BEÏNVLOED DOOR
WEER EN WIND**

CO-374100/32

augustus 1997



EROSIEPROEVEN OP KLEI BEÏNVLOED DOOR WEER EN WIND

CO-374100/32
augustus 1997
Kru/Heij/374100r/32

Opgesteld in opdracht van:
Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde
AQ
Postbus 5044
2600 GA DELFT

AFDELING Strategisch Onderzoek
projectleider: drs. Gerard A.M. Kruse
projectbegeleider: Ir. T.P. Stoutjesdijk

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911



Rapport nr.: CO-374100/32	Datum rapport: 1997-08-12				
Titel en sub-titel: EROSIEPROEVEN OP KLEI BEÏNVLOED DOOR WEER EN WIND	Behandelende afdeling: Strategisch Onderzoek				
	Projectnaam: A2IDEEVERIF: Erosie geconditioneerde klei				
Projectleider(s): drs. Gerard A.M. Kruse	Projectbegeleider(s): Ir. T.P. Stoutjesdijk				
Naam en adres opdrachtgever: RWS DWW Postbus 5044 2600 GA DELFT	Referentie opdrachtgever: 3100/0243, DWW-nr.1260				
	Verzonden in: 15 -voud				
	Type rapport: definitief				
<p>Samenvatting rapport:</p> <p>Er is een experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de erosie van monsters van een klei-onderlaag van een blokkenglooiing in Zeeland. De erosie van ongeroerde monsters is vergeleken met die van ongeroerde monsters die zijn geconditioneerd door afwisselend respectievelijk vriezen en drogen, bevochtigen en drogen, zout- en zoetwaterbaden. Tevens is de erosie van de grond gemengd met polyacrylamide nagegaan. Tenslotte is de erosie van de ongeroerde grond met en zonder conditioneren met zout-zoetwisselingen nagegaan. De opgelegde belasting komt ongeveer overeen met die in een 3 mm spleet onder en tussen blokken bij een belasting met golven van $H_s = 1.5$ m en bedraagt ongeveer 2 m/s op 35 mm van het oppervlak van de monsters.</p> <p>De gemiddelde erosiesnelheid neemt door conditioneren in het laboratorium met omstandigheden als onder gezette steen slechts zeer weinig toe. Deze slechts geringe toename is in overeenstemming met de omstandigheid dat de ongeroerde monsters reeds in de natuur zijn geconditioneerd en daardoor een bodemstructuur hebben verkregen. Conditioneren met meer extreme omstandigheden, intensief bevroren en wisseling in zoet- en zoutwaterbaden leidt tot zeer sterke toename van erosie en tot geheel uiteenvallen van monsters. Uit de waarnemingen blijkt dat onderlinge beweging van aggregaatjes in de bodem optreedt bij de opgelegde belasting, waardoor erosie wordt versterkt.</p> <p>Bedekking met geotextiel doet de gemiddelde erosiesnelheid sterk afnemen. Het conditioneren met zout-zoetwisselingen van met geotextiel bedekte monsters doet de erosiesnelheid zeer sterk dalen. Deze zeer geringe erosiesnelheid is, naar het zich laat aanzien het gevolg van het zeer nauw aaneensluiten van het geotextiel met het grondoppervlak in die omstandigheid. Het fijnere geotextiel zoals thans wordt toegepast in dijkverbetering in Zeeland bij Borssele resulteerde in een zeer geringere erosiesnelheid na conditioneren. Niet met geotextiel bedekte monsters hadden erosiesnelheden die in een periode van 1 tot enige tientallen jaren tot gemiddeld 0.1 m ontgroning zouden kunnen leiden. Monsters bedekt met het geotextiel dat in de dijkverbetering bij Borssele wordt toegepast ($O_{90} = 105\mu\text{m}$, non woven) hadden gemiddelde erosiesnelheden waarbij in niet geconditioneerde toestand in 70 jaar 0.1 m ontgroning zou optreden en in met zout-zoetwisselingen geconditioneerde toestand pas na enige duizenden jaren 0.1 m ontgroning zou optreden.</p>					
Opmerkingen:					
Trefwoorden: klei, erosie, weer, zout, vorst, drogen, geotextiel	Verspreiding: RWS DWW, TAW A2				
Opgeslagen op PC479 145.3.5.138 onder titel:374100r.32		Aantal blz.: 27			
Versie:	Datum:	Opgesteld door:	Paraaf:	Gecontroleerd door:	Paraaf:
1	1997-08-12	Kruse		Stoutjesdijk	



INHOUDSOPGAVE

1	Algemeen	1
2	Methoden	3
2.1	Erosieproeftoestel, meting en waarnemingen van erosie	3
2.2	Geotextielen	5
2.3	Conditioneren van monsters	5
2.4	Mengen met polymeer	7
3	De kleilaag en de monsters	9
4	Metingen en waarnemingen	13
4.1	Visuele waarnemingen	13
4.1.1	Voorbehandeling en conditioneren	13
4.1.2	Erosieproeven	14
4.2	Metingen grondverlies	16
5	Discussie	19
6	Concluderende opmerkingen	25
	Referenties	27

BIJLAGEN

- Bijlage 1: Gegevens over de monsters, conditionering en erosie
- Bijlage 2: Beschrijvingen van monsteroppervlak na de proef
- Bijlage 3: Grondmechanica Delft erosiecentrifuge

1 Algemeen

In opdracht van Rijkswaterstaat, de Dienst Weg- en Waterbouwkunde is experimenteel laboratoriumonderzoek uitgevoerd naar de erosiebestendigheid van het oppervlak van klei die blootgesteld geweest is aan gesimuleerde invloeden van weer en wind en wisselingen van zoet- en zoutwater. Het onderzoek is een aansluitend vervolg op een bronnenonderzoek [GD 1996], mede aan de hand waarvan specificaties voor het experimentele onderzoek zijn opgesteld, onder andere voor experimenten waarbij de grond met geotextiel is afgedekt.

Het onderzoek is uitgevoerd om beter inzicht te verkrijgen in de erosie van klei onder blokkenbekledingen, met name in de geulvorming die daarbij optreedt (zie ook [GD 1996]). Uit onder andere [GD 1996] is naar voren gekomen dat effecten van weer en wind op het oppervlak van klei zodanig zijn dat de erosiebestendigheid van het klei-oppervlak sterk afneemt. In het hier gerapporteerde onderzoek is experimenteel de mate van afname van erosiebestendigheid nagegaan onder gesimuleerde omstandigheden als onder een blokkenglooïing. Tevens is de beschermende werking van 2 soorten geotextiel voor die omstandigheden nagegaan. De resultaten van het hier gerapporteerde onderzoek dienen tevens ter ondersteuning van het ontwerpen van aangepaste blokkenbekledingen dat momenteel voor een aantal dijkvakken in Zeeland gaande is.

Geulen worden algemeen waargenomen aan de teenzijde van blokkenglooïingen (zie [GD 1996]). Uit de diepte van de geulen en de periode waarin de geulen zijn ontstaan, kan worden geconcludeerd dat gemiddeld over enige jaren de toename van de diepte van geulen 5 tot 10 mm per jaar is. Opgemerkt wordt dat deze diepte toename het gevolg kan zijn van een regelmatige geringe groei tijdens regelmatig optredende beperkte belastingen, maar ook het gevolg kan zijn van sterke ontgronding tijdens relatief weinig voorkomende zeer hoge belastingen.

In dit onderzoek wordt experimenteel de erosie van grond bepaald bij een belasting die condities die overeenkomen met die onder blokkenglooïingen simuleert. Om de mogelijk zeer geringe erosie zoals bij langzame groei van geulen te kunnen meten, is het nodig om in een erosietoestelproef die een zeer beperkte duur heeft, ook zeer geringe erosie goed te kunnen meten.

Er is gekozen voor het simuleren van een erosie-belasting die regelmatig optreedt onder veel blokkenglooïingen langs zeeuwse wateren, aangezien geulen ook zijn waargenomen onder blokkenglooïingen die niet met enige regelmaat zeer hoge golfbelasting doorstaan.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt op de methoden en randvoorwaarden ingegaan. Hoofdstuk 3 gaat in op de gebruikte grond en in hoofdstuk 4 worden de resultaten van de metingen en waarnemingen weergegeven. Na een korte discussie in hoofdstuk 5, worden in hoofdstuk 6 de bevindingen

geresumeerd en worden conclusies gepresenteerd ten aanzien van de effecten van weer en wind op erosiebestendigheid, en ten aanzien van de werking van geotextielen voor erosiebestendigheid van het substraat voor blokkenglooiingen.

2 Methoden

De opzet van het experimentele onderzoek omvatte het volgende:

- monsternamen van ongeroerde klei van 2 locaties op een dijkwal nabij Borssele, met zogenaamde Delftse bussen met een binnendiameter van 67 mm
- erosietoestelproeven op ongeroerde klei
- conditioneren van ongeroerde monsters door middel van drogen-bevochtigen, vriezen-dooien en zout-zoetwisselingen
- erosietoestelproeven op geconditioneerde klei
- mengen van grond met een Polyacrylamide (PAM)
- erosietoestelproeven op geroerde met PAM gemengde grond
- conditioneren van met PAM gemengde grond door middel van zout-zoetwisselingen
- erosietoestelproeven op met PAM gemengde geroerde geconditioneerde grond
- bedekken van monster voor erosietoestelproef met 2 typen geotextiel
- erosietoestelproeven op met geotextiel afgedekte ongeroerde klei
- conditioneren van met geotextiel afgedekte monsters door middel van zout-zoetwisselingen
- erosietoestelproeven op met geotextiel afgedekte geconditioneerde klei.

2.1 Erosieproeftoestel, meting en waarnemingen van erosie

Waterbeweging in het erosietoestel

De erosiegevoeligheid van de grond is bepaald door middel van proeven met het erosietoestel van Grondmechanica Delft (zie bijlage 3). In het apparaat wordt water rond een cilindrisch monster (diameter ~ 66 mm) bewogen door middel van een met schoepen bezette roterende cilinder. De uiteinden van de schoepen bevinden zich op 35 mm van het monster.

Als representatieve snelheid van het water voor erosiebelasting op klei als onder blokkenglooiingen is gekozen voor 2 m/s. Deze stroomsnelheid komt overeen met een berekende stroomsnelheid die bij een golfaanval van $H_s \approx 1.5$ m gedurende elke golf enige tijd optreedt in smalle spleten (~ 3 mm) onder en tussen blokken. In het erosietoestel komt de rotatiesnelheid van de schoepen ongeveer overeen met de snelheid van het water op 35 mm afstand van het monster. Een snelheid van 2 m/s komt voor het erosietoestel overeen met een toerental van 294 rpm, waarbij de optredende stroming in het apparaat geheel turbulent is. De snelheid van het water op millimeter-afstand van het monster, is uiteraard minder dan 2 m/s bij dat toerental. Bij wat zwaardere golfaanval zal de watersnelheid die bij 294 rpm op millimeterafstand van het monster in het erosietoestel optreedt dan ook enige tijd optreden in de smalle spleten onder gezette steen op klei.

Teneinde de eerste reactie van het monster op bewegend water te kunnen beoordelen is aan het begin van elke erosietoestelproef gedurende 5 minuten met een schoepensnelheid van 1 m/s belast, waarna de turbiditeit van het water werd geïnspecteerd (zie bijlage 1, tabel 2). De proef werd voortgezet met gedurende 25 minuten een belasting met bovengenoemd toerental van 2 m/s. Voor de proeven waarbij het monster met geotextiel was bedekt zijn er ook proeven met een duur van 17 uur uitgevoerd teneinde de erosie beter te kunnen vaststellen.

Erosie

De erosie die tijdens de proef optreedt, wordt zowel kwantitatief bepaald in termen van gewicht van verwijderde vaste stof, alswel wordt het oppervlak van het geërodeerde monster met een binoculaire loupe (microscopisch) geïnspecteerd. Ook sedimentatie en turbiditeit zijn zowel na 5 minuten belasten met een schoepensnelheid van 1 m/s en na afloop van de proeven met snelheid van 2 m/s gedurende 25 minuten of van 16 uur en 55 minuten visueel beoordeeld.

De opgetreden erosie wordt in de hier gebruikte erosieproef kwantitatief bepaald door de hoeveelheid vaste stof te bepalen die van het monster is verwijderd tijdens de erosieproef. De binnenkant van het erosietoestel is daarom met een zeer soepel membraan bekleed dat nauw over het interieur van de roterende cilinder paste. Na de erosieproef werd het membraan met inhoud, al het water en geërodeerd materiaal, uit het apparaat verwijderd. De hoeveelheid vaste stof in het water wordt na filtratie gravimetrisch bepaald (zie bijlage 1, tabel 1). Het is met deze methode mogelijk om een hoeveelheid geërodeerde vaste stof van 1 mg in 10 liter water nauwkeurig vast te stellen. Het volume dat die grond gemiddeld in het monster heeft ingenomen, is bepaald met het nat volumegewicht en het watergehalte van het monster (zie bijlage 1, tabel 1). Het volume is omgerekend naar een gemiddelde erosiesnelheid, waarbij is aangenomen dat de erosiesnelheid constant in de tijd en over het monsteroppervlak is.

De inspectie van het monsteroppervlak met de binoculaire loupe (vergroting tot 31 x) vond plaats op het nog vochtige monster (bijlage 2). Bij de inspectie werd nagegaan waar op het oppervlak zichtbaar materiaal was verwijderd tijdens de proef en hoe de samenhang daarvan was met de zeer fijne heterogeniteit als zandnestjes en laagjes en de fijne bodemstructuur die in het materiaal aanwezig was. Ook de verdeling van materiaal dat op het geotextiel was achtergebleven werd met deze inspecties vastgesteld.

Bedekking van de monsters

Uit eerdere erosietoestelproeven op klei uit de onverzadigde zone was reeds gebleken dat de erosie gedomineerd wordt door het verlies van de brokken en brokjes van de bodemstructuur. Voor erosie van klei-oppervlakken in relatief kleine spleten, waar dit onderzoek zich op richtte, was het nodig deze brokjes-erosie te beperken. Om te voorkomen dat grotere brokken uit het monster zouden worden geërodeerd, werden de monsters tijdens de proeven met een nylon gaas met ruitvormige mazen, wijde 4 bij 6 mm, bedekt, behalve voor de proeven met geotextielbedekking. Er zijn 7 proeven uitgevoerd op monsters met geotextielbedekking.

2.2 Geotextielen

Er zijn 7 proeven uitgevoerd waarbij het monster met geotextiel was bedekt. De gebruikte geotextielen waren voldoende soepel om rond de cilindrische monsters bevestigd te worden, waarbij het geotextiel met rubberen bandjes op de monsterhouders boven en onder het monster werd vastgehouden.

De gebruikte geotextielen zijn:

identificatie type	O_{90}	dikte (circa)
geotextiel 1 non woven	100 μm	5 mm
geotextiel 2 woven (platte stroken)	205 μm	1 mm

Geotextiel 1 (leverancier Rook Krimpen te Krimpen a/d IJssel) is het materiaal dat momenteel wordt gebruikt voor verbetering van de blokkenbekleding in Zeeland bij Borssele (Waterschap Zeeuwsche Eilanden). Het materiaal bestaat uit een netwerk van kronkelige gladde transparante nogal stugge massieve draden van zo'n 20 μm dikte, het oogt wit en het is zeer soepel. Geotextiel 2 (Oostenrijks fabrikaat) is afkomstig van eerdere experimenten door het Waterloopkundig Laboratorium, bekend onder de identificatie LP 120. Het materiaal bestaat uit een regelmatig rechthoekig weefsel van ongeveer 1.5 mm brede dunne soepele stroken, het is zwart, en buigt niet in alle richtingen even goed.

2.3 Conditioneren van monsters

Drogen-bevochtigen

Identificatie: n d

De monsters werden afwisselend 8 uur in een gekoelde ruimte (10° C) juist boven een vrij wateroppervlak geplaatst (relatieve luchtvochtigheid 100%) en 16 uur in een laboratoriumruimte met temperatuur 20° C en relatieve luchtvochtigheid 55%. Er is 3 keer gewisseld. Deze omstandigheden

zijn enigszins vergelijkbaar met dag- en nachtwisselingen onder gezette steen in een zomerperiode.

Vriezen-dooien

Er zijn 2 methoden gevolgd: Naar aanleiding van de ervaring met de oorspronkelijk voorgestelde methode is er een tweede minder extreme methode toegepast.

Methode 1, identificatie: v d+

De monsters werden afwisselend 3 uur in een vrieskist met temperatuur -20°C en 21 uur in een laboratoriumruimte met temperatuur 20°C en relatieve luchtvochtigheid 55% geplaatst. Er werd 3 keer gewisseld. De monsters droogden door deze behandeling sterk uit, reden waarom een tweede methode is gevolgd.

Methode 2, identificatie: v d-

De monsters werden afwisselend 1 uur in een vrieskist met temperatuur -20°C en 2 uur in een laboratoriumruimte met temperatuur 20°C en relatieve luchtvochtigheid 55% geplaatst. Er werd 3 keer gewisseld.

Zout-zoet

De monsters werden afwisselend 8 uur in een bak met zoutwater (zeewatersamenstelling) en 16 uur in bak met zoetwater (kraanwater) geplaatst. Er werd 3 keer gewisseld. Reeds bij het plaatsen in zoutwater begonnen er deeltjes van de monsters los te raken. Na enige wisselingen waren er zoveel aggregaatjes van de zijanten van de monsters afgevallen dat de monsters bijna in kegels met een natuurlijke rusthoek waren veranderd. De monsters met geotextielbedekking ondergingen dezelfde behandeling, waarbij er echter een aanpassing is gemaakt, te weten:

Methode 1, identificatie: z z-

De monsters in de houder en met geotextiel bedekt werden direct van de ene in de andere bak geplaatst, zonder dat het water in het geotextiel gelegenheid kreeg uit te lekken.

Methode 2, identificatie: z z+

De monsters in de houder en met geotextiel bedekt werden uit de ene bak gehaald, waarna het water in het geotextiel gelegenheid kreeg uit te lekken. Het monster werd vervolgens in de andere bak geplaatst met een geringe op- en neergaande beweging teneinde het nog in het geotextiel aanwezige water van de vorige bak zo goed mogelijk te vervangen door het water in de nieuwe bak, zonder evenwel het monster daarbij te belasten.



2.4 Mengen met polymeer

Er zijn proeven uitgevoerd op monstermateriaal dat met een polymeer was gemengd. Zoals overeengekomen, is er geen vergelijkend onderzoek uitgevoerd. De gebruikte polymeer, een zwak anionische polyacrylamide met hoog molecuulgewicht (SUPERFLOC⁺ A-100, molm 1.2×10^7 met 20% actieve groepen, leverancier: CYTEC Industries B.V., Botlek Rotterdam) werd met de grond gemengd in een concentratie die is afgeleid van de specificaties van de leverancier. De geleverde polyacrylamide werd verdund tot een concentratie van 500 mg per liter water. Het watergehalte van de monsters bedroeg ongeveer 27%. Er is een hoeveelheid van 40 cc van de aangemaakte oplossing per kilogram monster met de grond geroerd met een grondmenger, teneinde een polymeerconcentratie van ongeveer 20 mg/liter bodemvocht te verkrijgen. Het watergehalte na het mengen bedroeg ongeveer 31%. Het geroerde materiaal is in een daartoe geschikte cilinder verdicht tot een volumieke massa van 1820 kg/m^3 tot 1860 kg/m^3 , hetgeen een paar procent lager is dan de dichtheid van de meeste ongeroerde monsters.

3 De kleilaag en de monsters

De grond die in de proeven is gebruikt is afkomstig van een klei-onderlaag van het buitentalud van een dijk ten zuiden van Borssele, Waterschap Zeeuwsche Eilanden. De klei ligt onder betonblokken type Haringman op een talud 1:3.5 met zuidelijke expositie. Er is met 25 zogenaamde Delftse bussen (binnen diameter 67 mm lengte 0.44 m) ongeroerd monstermateriaal gestoken van 2 locaties op 0.8 m van de betonband aan de onderzijde van de betonblokkenglooing, ongeveer 2 m van de gemiddelde hoogwaterlijn. In tabel 3.1 is een beknopte beschrijving van grond op de beide locaties weergegeven. De bussen hebben de bovenste ongeveer 0.25 m van de klei-onderlaag bemonsterd. Opgemerkt wordt dat de variatie in samenstelling van de toplaag groot is: Veel zandinsluitingen, meer en minder kleiige intervallen en puin. In tabel 3.2 zijn als illustratie enige classificatie-eigenschappen van 2 monstertjes van de grond gegeven en in figuur 3.1 is de korrelgrootteverdeling weergegeven.

Tabel 3.1 Beschrijving van de kleilaag op de beide locaties bij Borssele, gebaseerd op ondiepe ontgraving en handboring

Locatie 1	
dijkpaal 22. Bekleding: Haringmanblokken 0.2 m dik, met ingegoten basalt lager op het talud. Er komen tot en met 2 m van de betonband geulen in het klei-oppervlak voor.	
diepte [m]	Beschrijving
0.00 - 0.25	Zandige klei, met fijne blokken structuur, bruingrijs met duidelijke bruine en oranjebruine verkleuringen, veel zandinsluitingen
0.25 - 0.30	Oude zodelaag, zwart, veel plantenresten (gras)
0.30 - 0.90	Klei, grijs gevlekt bruin, matige bodemstructuur
0.90 - 1.10	Klei, grijs en olijf, stijf
Locatie 2	
dijkpaal 14. Bekleding: Haringmanblokken 0.25 m dik, met ingegoten basalt lager op het talud. Er komen tot en met 2 m van de betonband geulen in het klei-oppervlak voor.	
diepte [m]	Beschrijving

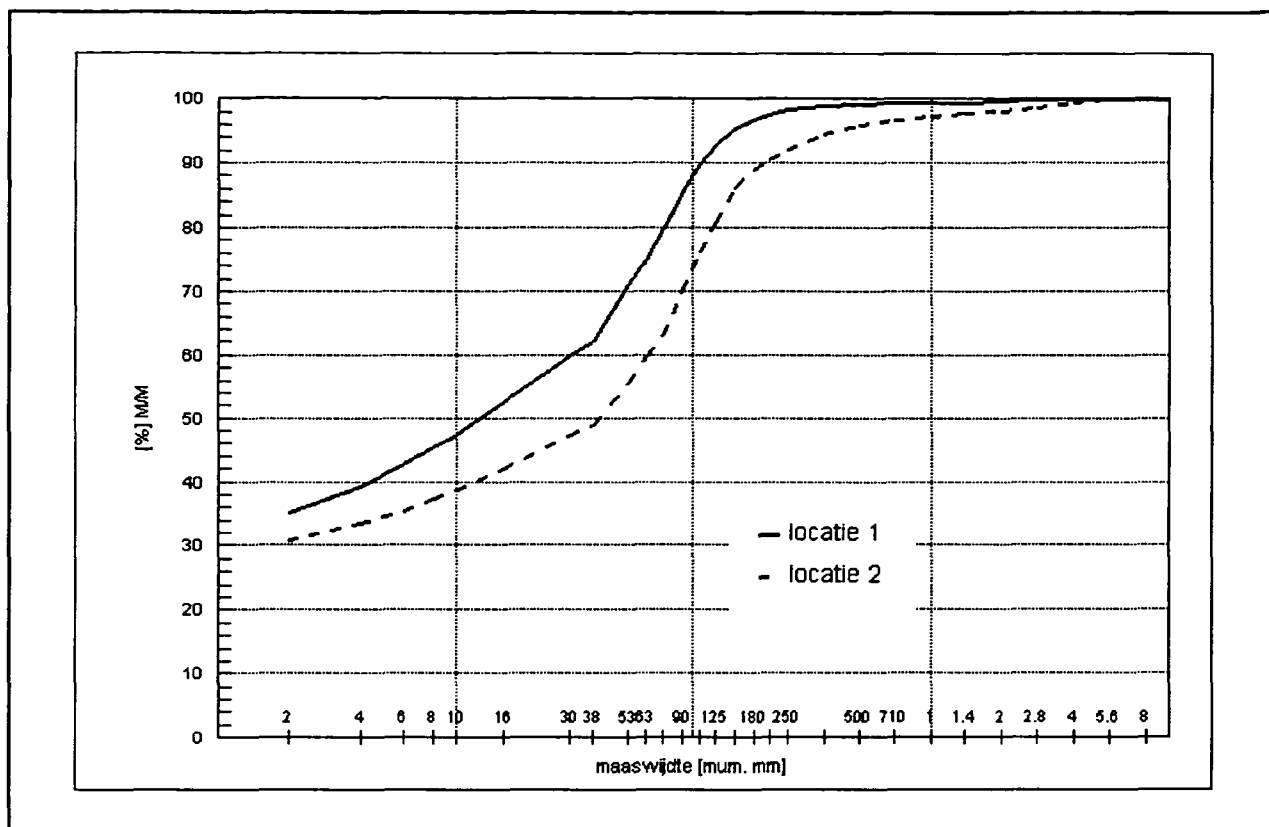
0.00 - 0.20	Klei, met fijne blokken structuur, bruingrijs, veel zandinsluitingen
0.20 - 0.30	Oude vlijlaag, baksteen, grind, schelpenresten en zand
0.30 - 0.70	Klei en zand, grijs gevlekt olijf
0.70 - 0.80	Klei, grijs, stijf

Tabel 3.2 Classificatie-eigenschappen van de bemonsterde klei van de beide locaties

Locatie	Lutum- gehalte [%]	zand- gehalte [%]	Vloiegrens [%]	Uitrolgrens [%]	plasticiteits- index [%]	water- gehalte [%]	Volumieke massa [kg/m ³]
1	35.3	25.0	45.5	14.7	30.8	30.5	1951
2	31.0	40.4	46.4	14.3	32.1	17.3	2014

	Geabsorbeerde ionen [cmol/kg]				Uitwisselings- capaciteit [cmol/kg]	Natrium uitwisseling [%]
	Ca	Mg	Na	K	CEC	ESP
1	43.4	3.9	1.1	1.1	17.7	5.9
2	38.3	4.9	1.7	2.0	12.1	14.3

Er is een discrepantie tussen de verhoudingen van de waarden voor de Atterbergse grenzen en het zandgehalte voor locatie 2; het zandgehalte is relatief hoog voor de waarde van de vloiegrens. Deze discrepantie is wel in overeenstemming met de waargenomen grote heterogeniteit van het bemonsterde materiaal, waardoor het monster voor de korrelgrootteverdeling een iets andere samenstelling kan hebben dan het monster voor de zandgehaltebepaling. De geabsorbeerde cationen hebben waarden die representatief zijn voor klei uit brakwateromgeving. De Na-ionen verzadiging is echter relatief laag, vergelijkbaar met die van locaties veel hoger op het talud elders (zie [GD 1987]), hetgeen mogelijk het gevolg is van frequente toevoer van zoetwater. Opgemerkt kan worden dat de ESP van locatie 1 opvallend laag is.



Figuur 3.1: Korrelgrootteverdeling van monsters van de beide locaties.

4 Metingen en waarnemingen

Er zijn 31 monsters getrimd en geschikt gemaakt voor verdere beproeving, maar 9 monsters waren reeds zodanig door het conditioneren aangetast dat verdere beproeving niet mogelijk was. Er zijn in totaal 24 monsters geconditioneerd, 8 monsters zijn in geotextiel gepakt en er zijn 22 erosietoestelproeven uitgevoerd. Er is niet een niet geconditioneerd of gemengd maar wel geroerd monster beproefd. In bijlage 1, tabel 1 en 2 wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de proeven. In figuur 4.1 wordt de berekende gemiddelde erosiesnelheid van de monsters weergegeven en kunnen deze waarden voor de verschillende monsters vergeleken worden.

4.1 Visuele waarnemingen

4.1.1 Voorbehandeling en conditioneren

De monsters vertonen alle op centimeter en millimeter schaal soms aanzienlijke variatie in opbouw en samenstelling, onder andere:

- er kwam in het monstermateriaal veel puin en andere grove fragmenten voor waardoor slechts een deel van de grond op het oog voldoende homogeen was voor beproeving
- aanzienlijke variatie in korrelgrootteverdeling, onder andere lamina van zand of silt en zandinsluitingen van soms enige 100-den korrels
- er is in sommige monsters zeer veel graaf-activiteit geweest waardoor er tientallen graafgangen van diameter 100 μm of meer per cm^2 voor kunnen komen
- er komen in veel monsters aanrijkingen van ijzer- en aluminiumverbindingen die in sommige monsters zelfs harde korstjes van 50 tot 150 μm vormen langs spleten of graafgangen.

De wijze van monsternemen en het maken van monsters voor beproeving hebben ertoe geleid dat alle monsters over het grootste deel van het oppervlak een zeer dun (50 tot 150 μm) versmeerd oppervlaktelaagje kregen zoals uit visuele waarnemingen blijkt. Door het monsteroppervlak met een borsteltje van eventuele losse deeltjes te ontdoen, alvorens de beproevingen te beginnen, hebben alle monsters sporen van het borstelen in het versmeerde oppervlaktelaagje. Dit laagje en de borstelsporen bleken bij de microscopische inspectie een nuttig hulpmiddel bij het herkennen van aantastingen van het oppervlak door erosie.

Het is gebleken dat het conditioneren door drogen en vervolgens bevochtigen van de monsters de integriteit zodanig werd aangetast dat de monsters zeer snel uiteenvielen. Er zijn slechts 2 van de 4 voorgenomen erosietoestelproeven op zodanig geconditioneerde monsters uitgevoerd. Uit de waarnemingen met de binoculaire loupe is gebleken dat het drogen en bevochtigen scheurtjes in het versmeerde laagje deden ontstaan die de fijne aggregaten-structuur van de onderliggende grond reflecteerden.

Het conditioneren van monsters met zout-zoetwisselingen leidde eveneens tot uiteenvallen van de niet in geotextiel ingepakte monsters, ook de met polyacrylamide gemengde monsters. Na enige wisselingen was de buitenkant van de monsters tot een bijna kegelvormige hoop aggregaten onder natuurlijke rusthoek omgevormd en bleef slechts de kern van het monster in vorm. De zoet-zoutwisselingen leidden ook tot het ontstaan van losse fijne deeltjes of aggregaten. Aangezien het water ook in het zoetwaterbad geheel helder was zijn er niet veel individuele kleideeltjes losgeraakt. Wel zijn er fijne aggregaatjes losgeraakt hetgeen onder andere bleek uit het 'opstuiven' van grond bij enige turbulentie in het bad. Deze deeltjes bezonken ook in het zoetwaterbad weer binnen enige seconden en zijn derhalve niet fijner dan enige 10-tallen μm geweest.

4.1.2 Erosieproeven

De waarnemingen van de monsters en het monsteroppervlak na de erosieproeven kunnen als volgt worden samengevat (zie ook bijlage 1, tabel 2 en bijlage 3).

De waarnemingen van turbiditeit na 5 minuten belasten met een schoepensnelheid van 1 m/s geven aan dat er geen ontgroning heeft plaatsgevonden in die tijd bij die belasting behalve voor een monster dat met polymeer was gemengd en een monster dat met geotextiel 2 was bedekt en dat geconditioneerd was met zout-zoetwisselingen. Bij dit laatste monster was reeds enig materiaal naar buiten gekomen tijdens het conditioneren.

Al de monsters, ook de niet in het laboratorium geconditioneerde, worden aangetast, waarbij de grovere heterogeniteit (structuur van spleten en aggregaten en materiaalverschillen), meer of minder wordt uitgeprepareerd. Ontgroning is dan ook vooral in de omgeving van spleten en dergelijke opgetreden, terwijl elders delen van het oppervlak onaangetast kunnen zijn volgens visuele waarnemingen.

Waar het oppervlak bij de grotere spleten en dergelijke is aangetast, treedt ontgroning op door het verlies van individuele zand en siltdeeltjes en door verlies van kleine en grotere aggregaatjes. Het verlies van aggregaatjes lijkt, naar de vorm van het monsteroppervlak na de proef, in volume belangrijker dan het verlies van individuele gronddeeltjes.

In de wat grotere poriën, zoals millimeter wijde spleten, liggen vaak nog losse kleine aggregaatjes van 250 μm en meer. Deze aggregaten zijn dan afgerond, evenals vaak de wanden van de spleten waar ze in liggen. De waterbeweging is kennelijk nog niet voldoende geweest om de aggregaatjes te verwijderen of om ze geheel te laten verslijten. De onderlinge beweging van gronddeeltjes draagt kennelijk bij aan de erosie.

Aan het oppervlak van de niet geconditioneerde monsters zijn de oorspronkelijke structuren in de grond in nagenoeg oorspronkelijke vorm te herkennen. Ook de gecementeerde korstjes van spleten en poriën zijn duidelijk, als 'harde' klifjes en platte aggregaten aanwezig. De ontgronding komt nagenoeg geheel voor rekening van de verwijdering van gehele aggregaten en er is slechts zeer lokaal afronding door slijtage en plaatselijk zijn zandkorrels in het oppervlak deels uitgerepareerd. Het versmeerde laagje op het oppervlak is deels geheel intact bewaard gebleven. Eén monster (8A) is deels uiteengevallen en vertoont zeer sterke erosie.

Het oppervlak van door drogen en bevochtigen geconditioneerde monsters is na de proeven ruw, doordat er veel zandkorrels ver uitgerepareerd zijn en omdat er kleine brokjes of schilfers uitgetrokken zijn (50 tot 2000 μm). Slechts 1 monster (16A) is plaatselijk uiteengevallen en vertoont zeer sterke erosie.

De monsters die door 3 uur vriezen en 21 uur dooien zijn geconditioneerd en die zijn beproefd, zijn geheel uiteengevallen (7, 18). Het versmeerde oppervlak van de niet beproefde monsters (9A, 20) vertoont zeer vele fijne scheurtjes die tenminste deels de eronder gelegen structuur reflecteren. Losliggende aggregaatjes zijn 100 tot 400 μm groot. Het oppervlak van de monsters die door 1 uur vriezen en 3 uur dooien zijn geconditioneerd vertonen grote gelijkenis met de monsters die met drogen en bevochtigen zijn geconditioneerd, te weten relatief ruw oppervlak waar schilfers en brokjes vanaf zijn en waar zandkorrels ver zijn uitgerepareerd.

De deeltjes en aggregaatjes op het oppervlak van de monsters met geotextielbedekking die door zout-zoetwisselingen waren geconditioneerd, bleken na de proeven verplaatst te zijn geweest, in tegenstelling tot het oppervlak van niet geconditioneerde monsters; Veel zandkorrels aan het oppervlak van de geconditioneerde monsters waren gemakkelijk heen en weer te bewegen. Opgemerkt wordt dat dit materiaal niet in het water in het erosietoestel terecht is gekomen en dus ook niet in de erosiesnelheid is verwerkt. De bedekking met geotextiel heeft het verwijderen van deze losse laag tenminste voor een belangrijk deel voorkomen. Het water in het erosietoestel was na de proeven met monsters met bedekking van geotextiel 2 wel enigszins troebel, wat erop wijst dat er enig losgeraakt materiaal in terecht gekomen is. Het oppervlak van de geconditioneerde monsters wordt gekenmerkt door zandkorrels die uit de fijnkorrelige matrix steken, zeker voor de langdurig beproefde monsters. Bij de door met zout-zoetwisselingen geconditioneerde monsters met geotextiel bedekking die 17 uur belast zijn geweest, bleek het oppervlak bij en langs de grotere spleten en dergelijke aangetast,

waarbij monstermateriaal als fijne enigszins geplette aggregaatjes onder het geotextiel naar beneden is gezakt, vooral voor het monster met het grovere geotextiel 2.

Het oppervlak van de met zout-zoetwisseling geconditioneerde monsters met geotextielbedekking was zodanig verweekt dat er, zeer lokaal, miniatuur erosiegeultjes van 100 tot 200 μm breedte in waren ontstaan. De geultjes draineren naar grotere poriën, spleten en gangen in het monsteroppervlak. De geultjes zijn voor een groot deel ontstaan door afvoer van colloïdaal (zeer fijn) materiaal van het begin van de geultjes ('headerosion'). De geultjes vertakken zich bij zandkorrels in het oppervlak. Het lijkt erop dat de geultjes zijn ontstaan door stroming door capillaire werking bij het droogvallen van het monster.

4.2 Metingen grondverlies

Voor al de uitgevoerde erosiecentrifugeproeven is het gewicht van de van het monster afgekomen grond bepaald, hetgeen in bijlage 1, tabel 1 is weergegeven. Het volume dat die grond gemiddeld in het monster heeft ingenomen is bepaald met het nat volumegewicht en het watergehalte van het monster (zie bijlage 1, tabel 1). Het volume is omgerekend naar een gemiddelde erosiesnelheid. Bij deze berekening is aangenomen dat de erosiesnelheid constant in de tijd en over het monsteroppervlak is, hetgeen uiteraard niet het geval is, maar waardoor enige directe vergelijking van de waarden voor de verschillende monsters mogelijk is (zie figuur 4.1).

De monsters die tijdens de erosieproef geheel uiteenvallen hebben erosiesnelheid hoger dan 1 cm/uur. De monsters die plaatselijk langs spleten en dergelijke uiteenvallen hebben een erosiesnelheid hoger dan 1 mm/uur. De overige monsters die niet met geotextiel zijn bedekt hebben gemiddelde erosiesnelheden variërend tussen 20 $\mu\text{m}/\text{uur}$ tot 200 $\mu\text{m}/\text{uur}$.

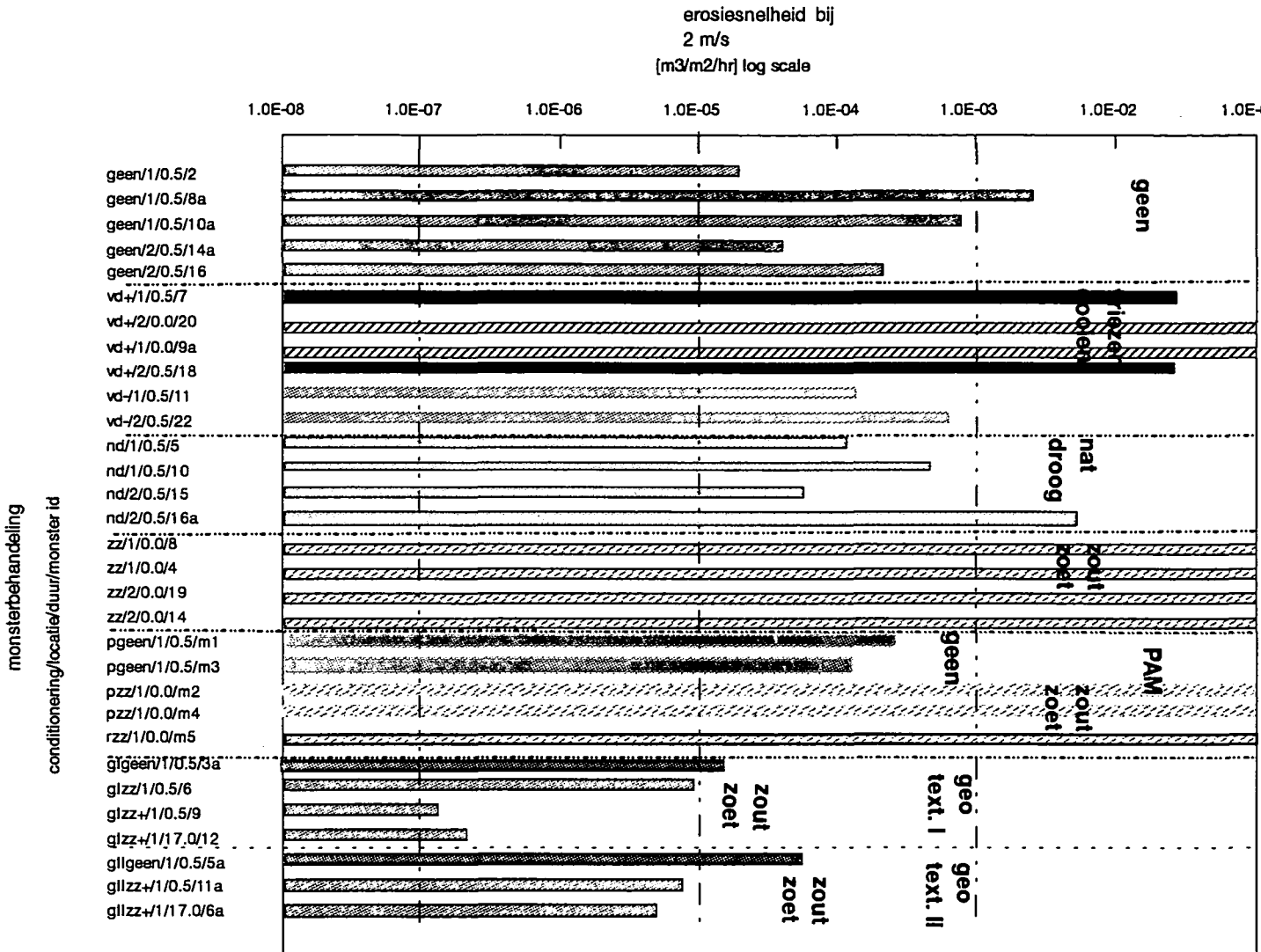
De monsters met geotextielbedekking die niet of niet intensief zijn geconditioneerd hebben erosiesnelheden van 9 $\mu\text{m}/\text{uur}$ tot 60 $\mu\text{m}/\text{uur}$. De monsters met geotextielbedekking die met zoet-zoutwisselingen zijn geconditioneerd hebben erosiesnelheden lager dan 10 $\mu\text{m}/\text{uur}$; voor bedekking met geotextiel 1 zijn de gemiddelde erosiesnelheden voor de intensief met zoet-zoutwisselingen geconditioneerde monsters zelfs lager dan 0.2 $\mu\text{m}/\text{uur}$. In de discussie in Hoofdstuk 5 zal hier nader op worden ingegaan.

De geotextielen die van de monsters zijn gehaald, bevatten plaatselijk grond. Bij de non woven geotextiel 1, $O_{90} = 100 \mu\text{m}$, zijn er vooral met menisci-achtige vormen begrensde kleiige eilandjes (gevormd door de capillaire oppervlakken van het hangwater waarin de deeltjes zaten). Ook in de op het oog zeer vuile stukken geotextiel is de grond geconcentreerd in groepjes van meer of minder kleine eilandjes van enige 100-den μm . De grond op de woven geotextiel 2, $O_{90} = 205 \mu\text{m}$ is meer



verdeeld over het oppervlak, plaatselijk komen vlekken van zeer dun verdeelde fijnkorrelige grond voor, maar zand en siltkorrels die met colloïdaal materiaal aan het geotextiel kleven domineren. Opgemerkt wordt dat de openingen van het non woven geotextiel 1 zeer veel groter zijn dan $100 \mu\text{m}$ in een niet samengedrukte toestand, zoals in het erosietoestel. De fijne zand- en de siltkorreltjes in het monstermateriaal zouden zonder enige hinder door zulke openingen kunnen passeren. De openingen tussen de stroken van het woven geotextiel 2 daarentegen, zijn zelden grover dan $50 \mu\text{m}$ zoals uit microscoopinspectie blijkt. Slechts bij intensief vouwen komen er openingen tussen de stroken waar zandkorrels door kunnen. De kwalificatie van de geotextielen kan derhalve niet rechtstreeks met microscoopwaarnemingen worden afgeleid.

Het mengen met een zwak negatieve polyacrylamide van hoog molecuulgewicht heeft geen positieve invloed op de erosiebestendigheid of bestendigheid tegen zout-zoetwisselingen van de grond. In de discussie in hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op deze waarneming die niet strookt met de bevindingen in de literatuur [GD 1996].



Figuur 4.1: Berekende gemiddelde erosiesnelheid bij belasting met stroomsnelheid van 2m/s op 35 mm afstand van het monster.

Codering: geen = geen conditionering, vd = vriezen-drogen + = sterk - = zwak zie tekst, zz = zoet-zoutwisseling + - sterk - = zwak zie tekst, nd = nat-droogwisseling, p = met polymeer PAM, 0.5 = 0.5 uur erosie, 17 = 17 uur erosie, I = geotextiel 1, II = geotextiel 2, 1 = locatie 1, 2 = locatie 2, gearceerde kolommen geven niet beproefde monsters aan.)

5 Discussie

De resultaten, waarnemingen en metingen geven aanleiding tot enige beschouwingen over de effecten van de structuur van het monster, het conditioneren, de geotextielbedekkingen, het mengen met polyacrylamide (PAM) en de erosiemechanismen. In de discussie wordt tot slot ingegaan op de gemeten erosiesnelheid in verband met ontgroning onder blokkenglooiingen.

Effecten van de bestaande structuur in de monsters en conditioneren

Als monsters ten dele uiteenvallen dan is de afgeleide gemiddelde erosiesnelheid in het erosietoestel hoger dan 1 mm/uur ($= 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2$). Als de monsters geheel uiteenvallen is de erosiesnelheid hoger dan 10 mm/uur (de monsters die tijdens conditioneren zijn bezweken zijn met arcering in figuur 4.1 aangegeven). De monsters kunnen in de proef geheel of gedeeltelijk uiteenvallen door de reeds aanwezige structuur van het materiaal of door het effect van conditioneren. Deze laatste mogelijkheid is in het algemeen slechts met enige zekerheid aanwijsbaar als er van herhaling sprake is bij dezelfde conditionering. Het is daarom waarschijnlijk dat de structuur van de monsters (naar de waarnemingen aan de monsters) het deels uiteenvallen van de monsters 8A (niet geconditioneerd) en 16 A (nat- en droogwisselingen) veroorzaakt.

Het conditioneren in het experiment door middel van wisselingen van licht vriezen en dooien en van drogen en bevochtigen heeft geen eenduidig effect op de erosiesnelheid van de monsters. De niet in het laboratorium geconditioneerde monsters zijn reeds in de natuur met vergelijkbare processen geconditioneerd en de laboratoriumsimulatie van die natuurlijke omstandigheden vermindert de samenhang van de monsters slechts zeer weinig. De gemiddelde erosiesnelheid van de in het laboratorium geconditioneerde monsters is gemiddeld dan ook slechts weinig hoger dan die van de niet geconditioneerde monsters. Het conditioneren door de monsters intensief te bevriezen en te laten dooien, met de daarbij optredende zeer sterke uitdroging leidt wel tot extreme erosie. Zulke omstandigheden treden kennelijk niet regelmatig op onder blokkenglooiingen en veranderen de samenhang van de monsters wel aanmerkelijk; het versmeerde oppervlak van de monsters is geheel door fijne scheuren uiteengevallen.

De effecten van licht vriezen en dooien, en drogen en bevochtigen zijn duidelijk te zien aan de versmeerde oppervlaktelaag van de monsters, die een ruw karakter krijgt. Het blijkt dat de monsters door drogen en bevochtigen, en door vriezen en dooien eenzelfde oppervlaktestructuur en -textuur krijgen als in de erosietoestelproef. Deze waarneming wijst erop dat de werking van vriezen en dooien, deels op het drogende effect ervan zal berusten, zoals eerder verondersteld (zie GD [1996]). Het is opvallend dat zeer veel zandkorrels, nog voor veel meer dan de helft, uit het oppervlak steken na de erosieproef. Tractie van water is, ook zonder geotextielbedekking, voor veel monsters onvoldoende om zandkorrels die nog een beetje in de fijnkorrelige matrix zitten te verwijderen; reeds

geringe cohesie of cementatie houdt zandkorrels aan het monster.

Er is een extreem effect van het conditioneren door zout-zoetwisselingen op de samenhang van de monsters, waardoor ze niet eens meer beproefd kunnen worden. Het waargenomen verschijnsel wordt algemeen met 'slacking' aangeduid. Het betreft het uiteenvallen van grond in brokken en brokjes, wat in dit geval wordt veroorzaakt door zwel- en krimpbewegingen, als gevolg van de wisseling van poriewatersamenstelling en verlies van cohesie tussen de brokjes door die beweging en door de verandering van het poriewater (zie ook [GD 1996]). De samenhang in de grond op het niveau van primaire deeltjes verdwijnt niet zoals dat bij dispersie het geval is, waarbij de zeer kleine colloïdale deeltjes losraken en in de vloeistof opgenomen worden. Een en ander valt af te leiden uit de waarneming dat ook in de zoetwaterbaden het water geheel helder bleef, zelfs direct na het wisselen van bad, hetgeen bij dispersie zeker niet het geval is. Slacking leidt in het algemeen tot kleinere en grotere aggregaatjes, in dit geval van enige 10-tallen micrometers tot 10 mm. Zulke aggregaatjes kunnen effectief slechts met moeite door de fijnere geotextielen, zoals uit de proeven met geotextielbedekking is gebleken. Voortdurende beweging van zulke aggregaatjes met botsingen en wrijving langs grond en obstakels kan echter tot voortgaande slijtage leiden, waarbij wel zeer fijne deeltjes kunnen losraken.

Geotextielbedekking

Bijna alle monsters met geotextiel bedekking hebben minder erosie dan zonder geotextiel. De non woven geotextiel 1, $O_{90} = 100 \mu\text{m}$, beperkt erosie meer dan de woven geotextiel 2, $O_{90} = 205 \mu\text{m}$. Het is opvallend dat de monsters met geotextielbedekking die intensieve zoet-zoutwisseling hebben ondergaan, minder eroderen dan de monsters die niet zijn geconditioneerd. Het grootste verschil tussen de wel en niet geconditioneerde monsters, is het effect van het wisselende zoutgehalte dat, zoals hierboven beschreven, vooral tot slacking leidt, waarbij aggregaatjes losraken. Na de proeven konden korrels dan ook gemakkelijk over het waterige monsteroppervlak heen en weer bewogen worden, dat slechts bijeengehouden werd door de capillaire spanning. Er waren plaatselijk wel zeer fijne deeltjes van het oppervlak verwijderd, vooral bij geotextiel 2, maar dit heeft tot slechts geringe turbiditeit van het water in het erosietoestel geleid (zie bijlage 1, tabel 2). Het oppervlak van de niet geconditioneerde monsters was veel steviger en vertoonde een sterke overeenkomst met niet of weinig aangetaste delen van niet met geotextielbedekte niet geconditioneerde grond. De afname van de erosiesnelheid door het conditioneren met zout-zoetwisselingen is naar het zich laat aanzien het gevolg van het meer fluïde oppervlak van de geconditioneerde grond. Het contact tussen monsteroppervlak en geotextiel is in die omstandigheid veel beter en er zijn niet gedurende langere tijd openingen tussen grond en geotextiel. Ten eerste is de waterbeweging direct aan het grondoppervlak wellicht minder bij direct contact tussen grond en geotextiel en ten tweede hebben de deeltjes weinig bewegingsvrijheid en kunnen niet, of veel minder, langs elkaar schuren bij beweging van het water in en onder het geotextiel. Daarnaast worden de eventuele aanvankelijke onregelmatigheden van het monsteroppervlak geëgaliseerd door het conditioneren en het beproeven met een plastisch oppervlak, waardoor het water

eveneens minder aangrijpingspunten voor ontgronding heeft. Verder wordt opgemerkt dat de uitvoerende laborant meldde dat het geotextiel 2 meer star was dan geotextiel 1, waardoor er meer mogelijkheid van ruimte tussen geotextiel en monster bestond. De wat sterkere erosie van de monsters met bedekking met geotextiel 2 ten opzichte van de erosiesnelheid van de monsters met geotextiel 1 kan daar deels mee samenhangen. Het is, gezien de voorgaande argumenten, daarom voorshands de verwachting dat de zeer geringe erosiesnelheid van de met geotextielbedekte geconditioneerde monsters het gevolg is van het zeer nauw aansluiten van het geotextiel op het monsteroppervlak. De wat hogere erosiesnelheid van met geotextiel bedekte niet geconditioneerde monsters is dan tenminste deels het gevolg van plaatselijke zones waar het geotextiel niet direct op het monsteroppervlak ligt.

Polyacrylamide

Het mengen van polyacrylamide (PAM) met de bemonsterde grond heeft nagenoeg geen verbetering van de erosiebestendigheid te zien gegeven. Ook vielen de gemengde monsters geheel uiteen bij het conditioneren met zout-zoetwisselingen. Deze waarneming is in tegenspraak met de literatuurbevindingen waarbij behandeling met deze polymeer juist beperking van erosie veroorzaakt (zie [GD 1997]). De tegenspraak is, naar het zich laat aanzien, het gevolg van de omstandigheid dat de in de literatuur genoemde toepassingen uitgaan van grond met een bodemstructuur. In de toepassing in dit onderzoek is de polymeer gemengd met geheel geroerde grond waarin de natuurlijke bodemstructuuraggregaatjes niet meer bestonden. In de in de literatuur genoemde toepassingen kan het polymeer als coating op de oppervlakken van bestaande aggregaten hechten en tevens eventueel bruggen tussen aggregaten maken. In het hier gerapporteerde onderzoek kon het polymeer slechts bruggen tussen primaire gronddeeltjes of kluitjes geroerde grond maken, waartoe positief geladen polymeren in het algemeen beter toe in staat zijn, tenminste in zoetwater omstandigheden. Zwak negatieve PAM met hoog molecuulgewicht werkt kennelijk alleen als het reeds bestaande aggregaten beschermt en niet als het om geheel geroerde grond gaat. Opgemerkt wordt dat de erosiesnelheid van de sterk geroerde grond met PAM bij niet conditioneren gemiddeld niet afwijkt van die van grond met bodemstructuur. De polymeer verleent kennelijk toch enige bestendigheid aan de sterk geroerde en niet sterk verdichte grond die vaak veel erosiegevoeliger is dan niet geroerde grond. De slechte werking van de polymeer bij het bijhouden van de grond bij het conditioneren met zout-zoetwisselingen is ten dele wellicht veroorzaakt door de negatieve lading van de polymeer die door de grote hoeveelheid cationen teniet wordt gedaan.

Erosiemechanismen

Er zijn diverse erosiemechanismen in de literatuur en eerdere onderzoeken aan kleibekledingen onderkent (zie onder andere [GD 1991, 1996]). De waarnemingen in dit onderzoek voegen er nog één aan toe, waarbij de interactie tussen grond en deeltjes van belang is. Zulke mechanismen zijn in de literatuur voor grootschalige erosieverschijnselen reeds lang onderkent, maar nog niet in de thans waargenomen verschijningsvorm ervan voor grond met een bodemstructuur.

De onderlinge beweging van aggregaatjes in grond met een bodemstructuur bij een belasting in de vorm van een niet stationaire stroming, leidt tot slijtage van de aggregaatjes zoals uit de waarnemingen blijkt (zie paragraaf 4.1). Het heen en weer bewegen van een losgeraakt aggregaatje in een spleet, dat reeds bij geringe waterbeweging kan optreden, zal dus tot slijtage en ontgroning leiden. Reeds vrijliggende aggregaatjes worden er steeds kleiner door, welke slijtage enerzijds direct grondverlies veroorzaakt en anderzijds de aggregaatjes steeds kleiner maakt waardoor ze uiteindelijk wel uit de holte kunnen ontsnappen. Deze onderlinge beweging veroorzaakt een deel van de ontgroning bij belasting als door golven en heeft meer te maken met de mate van bewegen van aggregaatjes die het bewegende water veroorzaakt dan met de directe tractie van water op individuele aggregaten.

Belasting, erosiesnelheid en ontgroning op dijktaluds

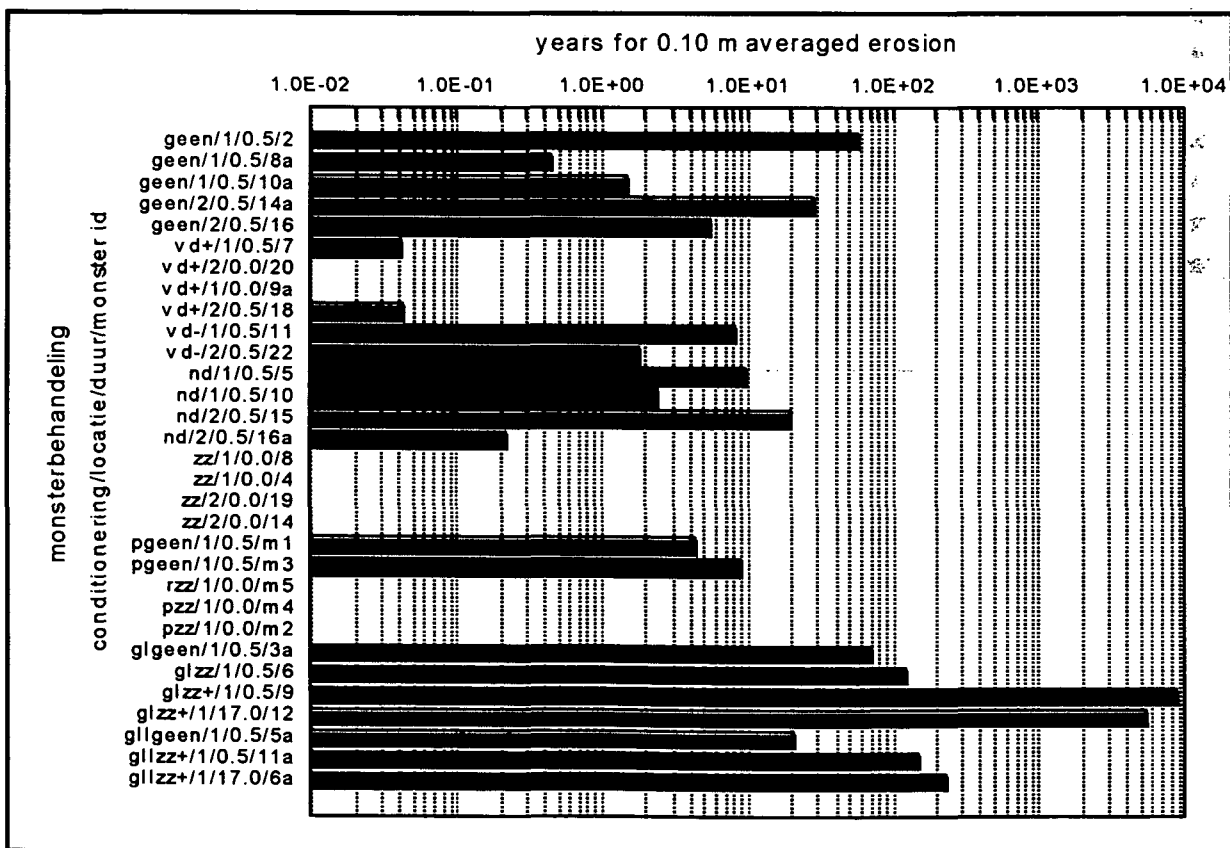
De resultaten van de experimenten kunnen in een praktische gerichte context worden beschouwd door na te gaan in hoeveel jaren ontgroning tot een bepaalde diepte zou kunnen ontstaan. Daarbij moet dan worden verondersteld dat de omstandigheden niet sterk door de lokale geometrie van de geulen en dergelijke wordt bepaald.

Er is voor de waterbeweging bij de proeven uitgegaan van een regelmatig optredende belasting, zijnde de stroomsnelheid berekend voor een 3 mm spleet onder gezette steen die wordt overschreden bij een golfaanval met golven van $H_s \approx 1.5$ m/s [GD 1993, WL 1993, WL 1996]. De berekende snelheid van ongeveer 1.5 m/s kan in het erosietoestel op enige millimeters van het monsteroppervlak worden verkregen door de schoepen op 35 mm van het oppervlak met een snelheid van 2 m/s te laten bewegen. Er zijn nogal wat onzekerheden in het bepalen van een relevante belasting (ruwheid van het oppervlak, effect turbulentie, niet stationaire stroming en dergelijke), maar het is voorshands de verwachting dat de opgelegde belasting representatief is voor spleten onder blokken voor tenminste 20% van de duur van een golfbelasting met $H_s = 1.5$ m. Zulke golven of hoger, komen voor een substantieel deel van de zeeuwsche dijken gedurende meer dan 30% van de tijd voor (gebaseerd op jaargemiddelde van golfhoogteverwachtingen en van windsnelheden). De belasting waarvan is uitgegaan kan op de blokkenglooiing nabij de hoogwaterlijn gedurende een deel van die 30% van de tijd optreden. Voorshands is er vanuit gegaan dat gedurende 5% van die tijd de golven het relevante deel van het talud kunnen belasten. De berekende stroming door dunne spleten zou dan jaarlijks gemiddeld zo'n 1% van de tijd optreden. Met deze tijdsduur en de gemiddelde erosiesnelheden bepaald met de erosietoestelproeven, kan dan worden vastgesteld hoelang het duurt om 0.1 m ontgroning te krijgen onder gemiddelde omstandigheden als in het erosietoestel.

In figuur 5.1 is voor de beproefde monsters weergegeven hoeveel jaar nodig zou zijn om 0.1 m ontgroning te veroorzaken in de kleilaag onder blokken van een dijktalud nabij de hoogwaterlijn. Opgemerkt moet worden dat de geometrie van de erosievormen sterk gaat afwijken van de spleet van 3 mm waarvoor de belasting in het erosietoestel is afgeleid. Door de toename van de ruimte onder

blokken verandert bijvoorbeeld de stroming hetgeen de snelheid van geulvorming aanmerkelijk kan beïnvloeden. Er is in het onderzoek niet nagegaan of er eventueel een kritische snelheid voor erosie van het gebruikte materiaal was en hoe hoog die was. Echter, het water in de erosiecentrifuge was bijna altijd helder na 5 minuten belasting bij 1 m/s schoepensnelheid en een eventuele kritische snelheid zal dus hoger liggen dan een belasting als in het erosietoestel bij een schoepensnelheid van 1 m/s. Ook is er in het onderzoek niet nagegaan of er een toename van gemiddelde erosiesnelheid met toename van de waterbeweging is. De meeste proeven over erosie van klei wijzen erop dat de erosiesnelheid afhankelijk is van de intensiteit van de waterbeweging (zie ook [GD 1996]. Door de erosie onder blokkenglooiingen ontstaan in het algemeen geulen met nogal steile wanden. De wanden van geulen volgen vaak de wanden van grotere spleten van de bestaande bodemstructuur en andere heterogeniteiten. Gezien de gevoeligheid van niet met geotextiel bedekte monsters voor gebrek aan zijdelingse steun bij erosietoestelproeven en bij zoet-zoutwisselingen zullen de steile wanden de ontgronding versterken.

(Codering bij figuur 5.1: geen = geen conditionering, vd = vriezen-drogen, zz = zoet-zoutwisseling, nd = nat- en droogwisseling, p = met polymeer PAM, 0.5 = 0.5 uur erosie, 17 = 17 uur erosie, I = geotextiel 1, II = geotextiel 2, 1 = locatie 1, 2 = locatie 2.)



Figuur 5.1 Tijdsduur in jaren voor 0.1 m ontgronding bij erosiesnelheid gemeten in erosietoestelproeven en belasting als tijdens die proeven gedurende 1 % van de tijd

6 Concluderende opmerkingen

In opdracht van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde zijn er met de Grondmechanica Delft erosiecentrifuge, erosieproeven uitgevoerd op ongeroerde kleimonsters van een dijktaald met een blokkenglooiing. De hoeveelheid geërodeerde grond is na filtratie gravimetrisch bepaald waarmee gemiddelde erosiesnelheden van minder dan $0.5 \mu\text{m/hr}$ te bepalen zijn. De erosiesnelheid van de monsters is bepaald voor monsters die geconditioneerd waren met respectievelijk herhaald vriezen en dooien, zout-zoetwisselingen, nat-droogwisselingen, voor monsters die met Polyacrylamide gemengd waren en al dan niet geconditioneerd waren en voor monsters die niet geconditioneerd waren. De erosiesnelheid is tenslotte bepaald voor monsters die met geotextiel bedekt waren en die al dan niet geconditioneerd waren met zout-zoetwisselingen.

De afgeleide gemiddelde erosiesnelheden zijn zodanig dat de diepte van algemeen voorkomende geulen in een periode van 1 tot 30 jaar kan worden bereikt als er geen op het grondoppervlak aansluitende geotextielbedekking is. De aanwezige heterogeniteit in samenstelling en de bodemstructuur bepalen voor een deel de opgetreden erosie, vooral voor niet met geotextiel bedekte monsters.

Uit het onderzoek blijkt dat het in het laboratorium conditioneren met omstandigheden zoals die in de natuur verwacht mogen worden, slechts tot zeer beperkte toename van de gemiddelde erosiesnelheid leidt voor monsters van grond die reeds een natuurlijke bodemstructuur bezitten. Het conditioneren met meer extreme belastingen zoals 3 maal achtereenvolgens 3 uur bevroren bij -20°C en ontdooien bij 20°C of het wisselen van monsters van zout- naar zoetwaterbaden leidt tot een zeer sterke toename van de erosiesnelheid en tot het zeer sterk aantasten van de samenhang in het monster. Door het monster te conditioneren met afwisseling van zout- en zoetwater, valt het grotendeels in aggregaten uiteen bij gebrek aan zijdelingse steun.

Het bedekken van het monsteroppervlak met geotextiel doet de erosiesnelheid enigszins afnemen. Door het monster met geotextielbedekking vervolgens met zout-zoetwisselingen te conditioneren neemt de erosiesnelheid zeer sterk af. Voor een non woven geotextiel met $O_{90} = 100 \mu\text{m}$ werd de erosiesnelheid in dat geval zelfs minder dan $0.5 \mu\text{m/hr}$. Het is waarschijnlijk dat de extreem geringe erosiesnelheid van met geotextielbedekte en met zout-zoetwisselingen geconditioneerde monsters het gevolg is van het zeer nauw aansluiten van het geotextiel op het monsteroppervlak. De zanddeeltjes en micro-aggregaatjes zijn door het conditioneren met zout-zoetwisselingen veel mobieler geworden, waardoor het oppervlak zich aan het geotextiel aanpast. Bij geotextielbedekking is bij langdurige belasting zelfs grond in de vorm van korrels en aggregaatjes weggezakt tot beneden het monster, en wel tussen de monsterhouder en geotextiel, waarbij er echter geen materiaal door het geotextiel naar buiten is gekomen.

De waterbeweging in het erosietoestel bij een snelheid van 2 m/s van de schoepen op 35 mm van het monsteroppervlak (zie bijlage 3), is vaak onvoldoende om zandkorrels los te maken die voor minder dan de helft in een fijnkorrelige matrix van ongeroerde grond gevat zijn.

Het onderling bewegen van aggregaatjes bij niet stationaire stroming leidt tot slijtage van de aggregaatjes en versterkt daarmee erosie, door slijtageproducten en doordat mobiele aggregaatjes voortdurend kleiner worden.

Referenties

[GD 1987]

GD

Onderzoek van kleibekledingen van dijken aan zout en brak water in Friesland, Zuid-Holland en Zeeland voor het ontwikkelen van keuringseisen voor klei.

Grondmechanica Delft rapport, kenmerk CO-275923/29, voor RWS DWW Delft, 81 pp.

[GD 1991]

GD

Beschouwingen over de reststerkte van een kleilaag onder gezette steen.

Grondmechanica Delft rapport, kenmerk CO-318170/10 voor RWS DWW Delft, 56 pp.

[GD 1993]

GD

Reststerkte van dijkbekledingen: Sterkte van klei onder golfbelasting.

Grondmechanica Delft rapport, kenmerk CO-338430/17 voor RWS DWW Delft, 39 pp.

[GD 1996]

GD

Erosiebestendigheid klei-onderlaag en geulen onder blokkenglooiing.

Grondmechanica Delft rapport, kenmerk CO-367430/13 voor RWS DWW Delft, 51 pp.

[WL 1993]

WL

Reststerkte van dijkbekledingen, stabiliteit van steenzettingen en klei-onderlaag: Deel III
Meetverslag Deltagootonderzoek.

Waterloopkundig Laboratorium rapport, kenmerk H1550 voor RWS DWW Delft, 28 pp.

[WL 1996]

WL

Mondelinge toelichting ir. M. Klein Breteler, gedateerd 1996-11-21.

BIJLAGEN

Tabel 1 Gegevens over de monsters, het conditioneren, gewicht ge-erodeerde grond en daarvan afgeleide erosiesnelheid

Monster	Locatie	Conditionering	erosie duur [hr]	Vaste stof in water [kg]	Volumieke massa [kg/m ³]	Erosie bij 2 m/s [m/s]	Water- gehalte [%]
2	1	geen	0,5	1,51e-04	1910	1,95e-05	27,9
8a	1	geen	0,5	2,07e-02	1940	2,56e-03	26,6
10a	1	geen	0,5	6,06e-03	1880	7,74e-04	28,7
14a	2	geen	0,5	3,39e-04	2040	3,95e-05	23,1
16	2	geen	0,5	1,75e-03	1910	2,10e-04	22,4
7	1	vr do+	0,5	2,45e-01	1800	2,80e-02	27,3
20	2	vr do+	-				24,6
9a	1	vr do+	-		1880		29,8
18	2	vr do+	0,5	2,44e-01	1850	2,64e-02	23,0
11	1	vr do-	0,5	1,07e-03	1920	1,36e-04	28,6
22	2	vr do-	0,5	5,32e-03	2010	6,40e-04	26,0
5	1	nat dr	0,5	8,51e-04	1820	1,18e-04	32,6
10	1	nat dr	0,5	3,39e-03	1770	4,67e-04	28,7
15	2	nat dr	0,5	4,51e-04	1930	5,74e-05	27,6
16a	2	nat dr	0,5	4,73e-02	2040	5,26e-03	22,4
8	1	zz	-		1920		26,6
4	1	zz	-		1900		29,2
19	2	zz	-		1970		25,2
14	2	zz	-		2000		23,1
m1	1	pol.geen	0,5	1,94e-03	1860	2,62e-04	31,5
m3	1	pol.geen	0,5	9,23e-04	1840	1,25e-04	31,1
m5	1	ger.zz	-		1840		31,0
m4	1	pol.zz	-		1820		31,2
m2	1	pol.zz	-		1830		31,6
3a	1	gl geen	0,5	1,22e-04	1970	1,61e-05	36,8
6	1	gl zz-	0,5	7,40e-05	1940	9,32e-06	28,2
9	1	glzz+	0,5	1,00e-06	1900	1,29e-07	29,8
12	1	gl zz+	17	7,10e-05	1890	2,12e-07	
5a	1	gll geen	0,5	4,17e-04	1880	5,53e-05	32,6
11a	1	gll zz+	0,5	5,90e-05	1880	7,59e-06	28,6
6a	1	gll zz+	17	1,28e-03	1860	4,86e-06	28,2

Tabel 2 Opmerkingen en waarnemingen van turbiditeit en bezinksel in erosietoestel

Monster	Locatie	Voorbe- handeling	Erosie duur [hr]	Waarneming na 5 min [water]	Waarneming na afloop erosieproef	Opmerkingen
2	1	geen	0,5	helder	weinig troebel brokjes op bodem	geen net
8a	1	geen	0,5	helder	troebel, resten aan membraan	
10a	1	geen	0,5	helder	weinig troebel brokjes in water, brokken in net	
14a	2	geen	0,5	helder	helder, zand op bodem	
16	2	geen	0,5	helder	weinig troebel zand op bodem	
7	1	vr do+	0,5	helder	monster verdwenen, veel schuim	brokken van 1 kant eraf
20	2	vr do+	-			monster te droog
9a	1	vr do+	-			monster te droog
18	2	vr do+	0,5	helder	monster verdwenen	na 7 minuten veel schuim
11	1	vr do-	0,5	helder	weinig troebel fijne grond op bodem en schoepen	
22	2	vr do-	0,5	helder	weinig troebel, 1 brok verdwenen (zand?)	
5	1	nat dr	0,5	helder	troebel, kleibrokjes zand	
10	1	nat dr	0,5	helder	troebel	meest grond in brokken van droge bovendeel
15	2	nat dr	0,5	helder	weinig troebel	onderkant monster vochtiger
16a	2	nat dr	0,5	helder		monster boven en onder aangetast
8	1	zz	-			monster uiteengevallen
4	1	zz	-			monster uiteengevallen
19	2	zz	-			monster uiteengevallen
14	2	zz	-			monster uiteengevallen
m1	1	pol. geen	0,5	helder	zeer weinig troebel, veel zand	
m3	1	pol. geen	0,5	helder, krumels op bodem	helder, korrels op bodem	
m5	1	geroerd. zz	-			geen polymeer, monster uiteengevallen, na 1 uur eerste brokken
m4	1	polym. zz	-			monster uiteengevallen, na 1 uur eerste brokken

Monster	Locatie	Voorbe- handeling	Erosie duur [hr]	Waarneming na 5 min [water]	Waarneming na afloop erosieproef	Opmerkingen
2	1	geen	0,5	helder	weinig troebel brokjes op bodem	geen net
m2	1	polym. zz	-			monster uiteengevallen, na 1 uur eerste brokken
3a	1	gl geen	0,5	helder	helder	geotextiel I niet geconditioneerd
6	1	gl zz	0,5	helder	helder	geotextiel I geconditioneerd
9	1	gl zz+	0,5	helder	helder	geotextiel I, idem c7, grondige zout-zoetwisseling
12	1	gl zz+	17	helder	helder	geotextiel I materiaal tussen geotextiel naar beneden gevallen
5a	1	gll geen	0,5	helder	zeer troebel	geotextiel II niet geconditioneerd
11a	1	gll zz+	0,5	helder	zeer weinig troebel	geotextiel II, geconditioneerd, weinig klei aan geotextiel
6a	1	gll zz+	17	weinig troebel	troebel, veel materiaal op bodem	geotextiel II, zand valt bij wisselingen eraf

Algemeen

De beschrijvingen van daartoe geschikte monsters zijn gemaakt met een binoculaire loupe vergroting tot 31 x. Voor schatting van afmetingen is een transparante film met een 200 en 400 µm schaalverdeling gebruikt.

Geen conditioneren

Monster 10A

Klei 1: Veel harde Fe-Al coatings. Coatings zijn soms bescherming tegen erosie. Spleetjes uitgerepareerd, Zandkorrels gevat in kleimatrix. Aantasting door verwijdering aggregaatjes bij grotere spleten, geroerd oppervlak weinig aangetast.

Monster 2

Klei 1: Veel harde Fe-Al-coatings die als microklifjes uitsteken. Zandkorrels gevat in kleimatrix. Aantasting vooral bij grotere spleten. Van geroerd oppervlak is fijn materiaal geërodeerd, maar borstelsporen zijn nog zichtbaar, soms versterkt, verwijd, door erosie.

Monster 8A

Klei 1: Veel kleine graafgangen (diameter 400-700 µm) soms met Fe-Al coating. Plaatselijk zeer zandig en siltig vaak gecementeerd, ondergevuld met cohesief materiaal, elders zandkorrels uitgerepareerd. Rond graafgangen zijn klifjes gevormd.

Monster 14A

Klei 2: Zandige siltige klei, grijs met weinig verkleuringen. Monstervorm intact. Borstelsporen op oppervlak grotendeels intact, maar veel fijn materiaal verdwenen resulterend in een zandige siltige oppervlaktestructuur, kleine spleetjes zijn goed zichtbaar. Plaatselijk wat verdiepte groeven (600 - 1500 µm breed) in oppervlak.

Monster 16

Klei 2: Zandige siltige klei, grijs met zeer weinig verkleuringen. Monster bij grotere spleten aangetast. Gangen en spleetjes en andere onregelmatigheden zijn uitgerepareerd, zandkorrels vaak door cementatie bijeengehouden. Borstelsporen op oppervlak zijn nog herkenbaar, maar vaak vaag en overal onderbroken door putjes en dergelijke.

Vriezen en dooien (3 uur in vriezer)

Monster 7

Klei 1: Monster bijna geheel weggespoeld.

Monster 9A (niet beproefd)

Klei 1: In het met een borstel geroerde oppervlak zijn zeer veel kleine spleetjes ontstaan, waardoor het oppervlak plaatselijk al in brokjes < 200 μm uiteen begint te vallen.

Monster 18

Klei 2: Monster geheel weggespoeld.

Monster 20 (niet beproefd)

Klei 2: Monsteroppervlak zit vol spleetjes van 100 tot 2000 μm lengte in een quasi rechthoekig patroon en is plaatselijk al opgebroken in kleine zeer hoekige aggregaatjes van soms niet meer dan een paar zandkorrels grootte. Plaatselijk is er neerslag van zout op het oppervlak en is het oppervlak poreus en heeft een 'bloemkool' structuur.

Zout Zoet wisselingen

Monsters 4,8,14,19,m2,m4,m5

Voor een groot deel in brokken en brokjes van minimaal enige 10-tallen μm uiteengevallen tijdens conditioneren. Materiaal dwarreld op bij aanraking, maar bezinkt ook in zoet water binnen enige seconden weer geheel.

Drogen en bevochtigen

Monster 5

Klei 1: Veel zand aan oppervlak. Monster aangetast bij grotere spleten en dergelijke. Zeer veel kleine graafgangen (diameter 100-200 μm). Borstelsporen goed zichtbaar op het geroerde oppervlak. Vaak zandkorrels bijna geheel vrij aan oppervlak.

Monster 10

Klei 1: Veel zand aan oppervlak. Monster plaatselijk aangetast langs grotere spleten. Zeer veel kleine graafgangen (diameter 100-200 μm). Borstelsporen weinig zichtbaar op het geroerde oppervlak. Vaak zandkorrels bijna geheel vrij aan oppervlak, waardoor oppervlak ruw is.

Monster 15

Klei 2: Weinig zand aan oppervlak. Monster slechts zeer plaatselijk aangetast bij grotere spleten en dergelijke. Borstelsporen op oppervlak goed herkenbaar, plaatselijk zeer weinig aangetast. Veel zeer kleine spleetjes door geroerde oppervlak, die niet zijn aangetast. Bijna losliggende zandkorrels op

oppervlak.

Monster 16A

Klei 2: Monster geheel uiteengevallen.

Vriezen dooien (1 uur vriezen)

Monster 11

Klei 1: Klei met plaatselijk verkleuringen van Fe-Al coatings, veel kleine graafgangen (diameter 200 - 600 μm). Monster zeer lokaal bij grotere spleten aangetast. Oppervlak zeer zandig ruw, plaatselijk borstelsporen op geroerde klei oppervlak, waarbij fijne deeltjes in ruggen tussen strepen vaak verdwenen. Veel putjes in oppervlak.

Monster 22

Klei 2: Klei, zandig grijs. Monster plaatselijk bij spleten en dergelijke aangetast. Oppervlak ruw door zandkorrels en klifjes, nagenoeg geen borstelsporen. Zandkorrels vaak veel minder dan 50% gevat in matrix.

Mengsel met PAM geen conditioneren

Monster 1M

Klei 1: Zandige klei. Monster langs randen van brokken en brokjes aangetast. Veel open ruimtes 100 μm in oppervlak. Plaatselijk weinig aangetaste borstelsporen zichtbaar. Plaatselijk veel fijn materiaal verdwenen uit borstelspoorruggetjes.

Monster 3M

Klei 1: Klei. Monster langs randen van brokken en brokjes aangetast. Borstelsporen op groot deel oppervlak.

Bedekking geotextiel I geen conditioneren

Monster 3A

Klei 1: Klei grijs met weinig Fe-Al verkleuringen. Monsteroppervlak bij grotere spleten en dergelijke enigszins aangetast. Oppervlak enigszins 'vervloeid', met weinig uitstekende zandkorrels. Borstel- en geotextielsporen zijn meestal vaag, maar plaatselijk scherp. Bij sommige grotere spleetjes en grafgangen 'headerosion' van 100 μm wijde geultjes in glad oppervlak. Er is wat klei tussen monsterhouder en geotextiel gespoeld. Filter bevat fijn silt en kleiig materiaal veelal in klonters (soms met menisci-achtig oppervlak), soms zijn enkelvoudige draden bedekt met grond.

Bedekking geotextiel I zout-zoetwisselingen zonder uitlekken 0.5 uur belasten

Monster 6

Klei 1: Klei, grijs. Monster weinig aangetast. Monsteroppervlak weinig ruw, zandkorrels steken weinig uit. Borstelsporen vaak duidelijk, maar aangetast. Enige ondiepe (10-50 μm) geultjes met 'headerosion' bij grotere poriën. Groot deel van geotextiel bevat gronddeeltjes, vaak in klonters.

Bedekking geotextiel I zout-zoetwisselingen met uitlekken 0.5 uur belasten

Monster 9

Klei 1: Klei grijs met Fe-Al weinig verkleuringen. Monster weinig aangetast, maar bij grotere spleten herkenbare aantasting. Oppervlak weinig ruw, over gehele oppervlak lijkt enig fijn materiaal te zijn weggespoeld (10 - 50 μm ?) zandkorrels steken deels uit matrix. Borstelsporen zijn enigszins aangetast. Meer dan 50% van geotextiel bevat wat grond, meest op plaatsen waar menisci tussen parallelle draden bestonden.

Bedekking geotextiel I zout-zoetwisselingen met uitlekken 17 uur belasten

Monster 12

Klei 1: Zandige klei. Monster weinig aangetast, maar bij grote spleten en dergelijke aantasting duidelijk te herkennen. Oppervlak met veel zandkorrels deels ontgraven, over gehele monster lijkt enig fijn materiaal te zijn verdwenen (10 - 50 μm ?). Borstelsporen weinig aangetast, plaatselijk randen aangevreten. Meer dan 50% van het filter bevat grond, veelal in aaneengesloten gebieden met zeer veel klonters zand en fijn materiaal. Er is enig materiaal tussen het geotextiel en de onderste monsterhouder terechtgekomen.

Bedekking met geotextiel II geen conditioneren

Monster 5A

Klei 1: Klei, grijs met Fe-Al verkleuringen. Monster bij grote spleten en dergelijke enigszins aangetast. Monsteroppervlak grotendeels weinig aangetast, geotextielafdrukken over een deel van het monster. Bij spleten en dergelijke aantasting van randen en losgeraakte aggregaatjes. Op geotextiel vlekken met voornamelijk fijne gronddeeltjes.

Bedekking met geotextiel II zout-zoetwisselingen 0.5 uur belasten

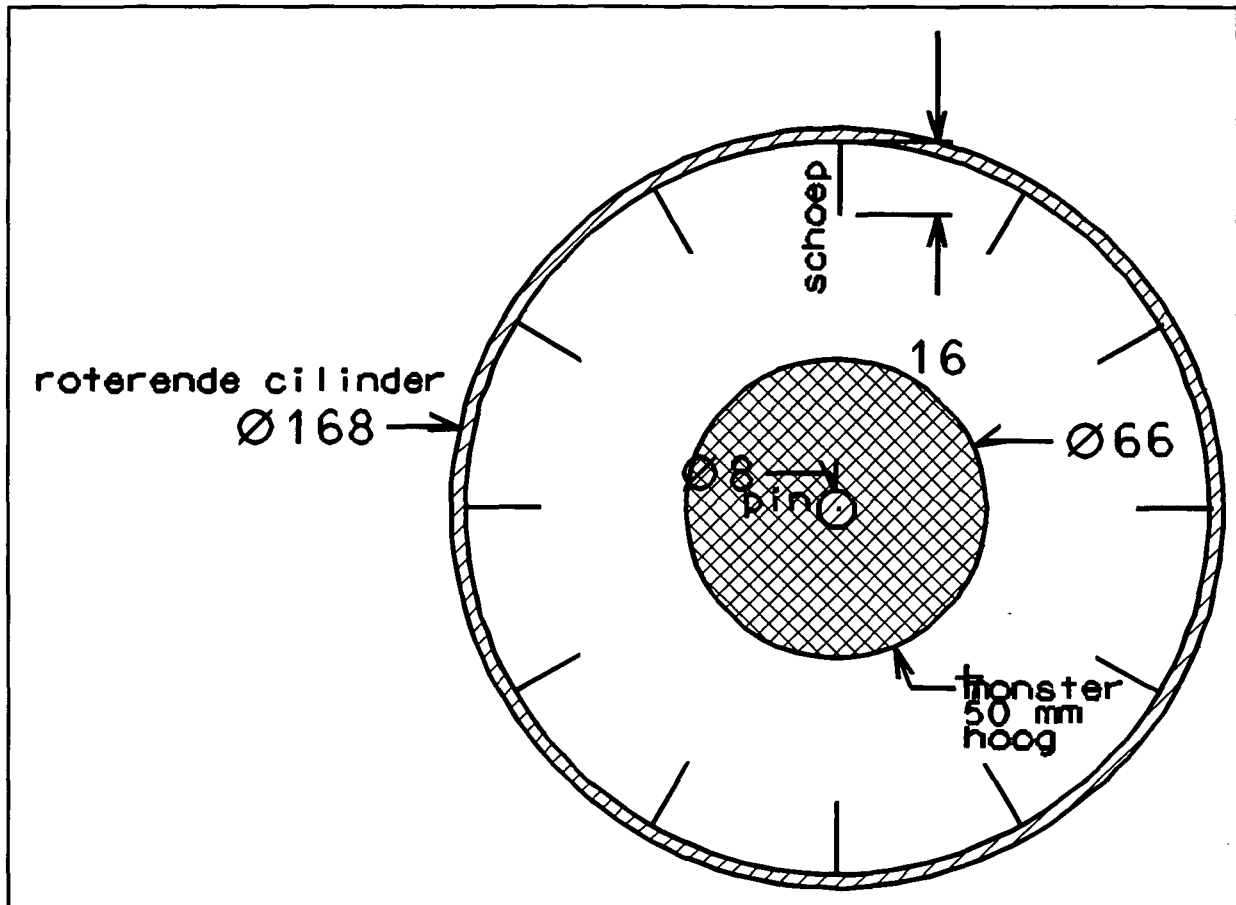
Monster 11A

Klei 1: Klei grijs met weinig roodbruine verkleuringen. Zandige siltige klei. Oppervlak over groot deel enigszins ruw door zandkorrels. Geotextiel heeft de korrels in het oppervlak geduwd (bij monsterbehandeling ?). Er is fijn materiaal van het oppervlak verdwenen. Bij grotere poriën zijn er korte ondiepe (10 - 30 μm) geultjes met enige 'headersion'. Op geotextiel plaatselijk vlekken met voornamelijk klei en silt gronddeeltjes.

Bedekking met geotextiel II zout-zoetwisselingen 17 uur belasten

Monster 6A

Klei 1: Siltige Klei met Fe-Al verkleuringen. Monster aangetast bij grotere spleten en dergelijke. Fijnere structuren plaatselijk enigszins uitgeprepareerd, waardoor ook aggregaatjes zijn los komen te liggen. Van het oppervlak lijkt fijn materiaal te zijn verdwenen. Randjes van met Fe-Al gecementeerd zand steken plaatselijk uit. Op geotextiel plaatselijk vkeken met zand en fijne grond. Er is veel grond tussen geotextiel en monsterhouder gezakt.



Doorsnede van de trommel met monster van de Grondmechanica Delft erosiecentrifuge, maten in millimeters

Stieltjesweg 2
Postbus 69, 2600 AB Delft
The Netherlands
Telephone +31 15 2693500
Telefax +31 15 2610821