

**Update inzichten in gebruik  
van klei voor ontwerp en  
uitvoering van dijkversterking**

**aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering**



# **Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking**

**aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering**

G.A.M. van Meurs  
G.A.M. Kruse

1220633-000

## Titel

Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking

**Opdrachtgever**  
RWS HWBP2

**Project**  
1220633-000

**Kenmerk**  
1220633-000-GEO-0012-  
gbh

**Pagina's**  
36

## Trefwoorden




klei, grond, dijkversterking, ontwerpen, uitvoeren, kwaliteitsborging

## Samenvatting

Inzichten in het functioneren en beoordelen van kleigrond die de afgelopen twee decennia zijn ontwikkeld, zijn samengebracht. Met deze inzichten is een nadere optimalisatie van het gebruik van klei mogelijk bij dijkversterking. Aanbevelingen zijn geformuleerd voor het verantwoord omgaan met klei bij het ontwerp en uitvoering van dijkversterking.

De inzichten betreffen respectievelijk het beoordelen van klei voor gebruik in dijken, de ontwikkeling van schade in klei op dijken en aspecten van klei in het werk bij de uitvoering. Het rapport is opgesteld om een overzicht te geven van die inzichten en om de aanbevelingen in breed verband met opdrachtgevers, opdrachtnemers en adviesorganen te bespreken en daarbij afwegingen te kunnen maken over de toepassing. Aanbevelingen zijn ook gegeven over het op gang brengen van de toepassing van deze inzichten.

In het rapport wordt kort ingegaan op de ontwikkeling van de inzichten, de achtergronden en de aanleidingen van de aanbevelingen. In het rapport worden tabellarische overzichten van de aanbevelingen gepresenteerd en is aangegeven voor welke onderwerpen nog scherper inzicht ontwikkeld moet worden. Ten aanzien van het beoordelen van klei voor dijken wordt aanbevolen de thans gehanteerde categorie indeling van klei aan te passen en zorg te dragen voor een voldoende kwaliteitsborgingsysteem voor het beoordelen van klei, van monsternamen tot en met rapportage van classificatiegegevens en het omgaan met gerapporteerde gegevens. Ten aanzien van de ontwikkeling van schade aan functionele onderdelen van klei is het met de huidige inzichten mogelijk bij het ontwerp de mogelijke ontwikkeling van schade te overzien en dat te betrekken in afwegingen over kwaliteit van grond en dimensionering (taludgeometrie), met inbegrip van economische overwegingen. Voor de uitvoering zijn een aantal op praktijkervaring gebaseerde aanbevelingen opgenomen, onder andere ten aanzien van verdichten van klei en het gebruiken van de Proctorproef in de kwaliteitscontrole. De samenvatting van de aanbevelingen is in een separaat beschikbaar gestelde tabel opgenomen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2	jan. 2017	Dr.ir. G.A.M. van Meurs drs. G.A.M. Kruse		Ir. A. van Hoven		Ir. L. Voogt	

## Status

definitief

## Contents

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2 Parameters en parameterwaarden</b>	<b>2</b>
2.1 Algemeen	2
2.2 Aanvullende inzichten en kennis	2
2.3 Status van de kennis	3
2.4 Toepassen van de inzichten	4
2.4.1 Aanpassing van de indeling in categorieën kleigrond	4
2.4.2 Omgaan met overschrijdingen van grenzenwaarden van categorieën klei.	6
2.4.3 Monsternamen en ruimtelijke variatie in parameterwaarden	7
2.4.4 Kwaliteit van laboratoriumbepalingen	8
2.5 Samenvatting van aanbevelingen	8
<b>3 Ontwerp en schadeontwikkeling</b>	<b>10</b>
3.1 Algemeen	10
3.2 Aanvullende inzichten en kennis	10
3.3 Status van de kennis	12
3.4 Toepassen van de inzichten	13
3.4.1 Schade door belasting door directe golfaanval	14
3.4.2 Schade door overslag en overloop	18
3.4.3 Schadeontwikkeling door golfaanval en ontwerpgeredheid	18
3.4.4 Schade door stabiliteitsverlies van kleibekledingen	19
3.4.5 Schade direct na aanleg	19
3.4.6 Stochastische benaderingen schadeontwikkeling	20
3.4.7 Afwegingen tussen veiligheid en kosten voor herstel van schade.	21
3.5 Samenvatting van aanbevelingen	22
<b>4 Aandachtspunten voor klei in het werk</b>	<b>23</b>
4.1 Algemeen	23
4.2 Water en watergehalte	23
4.3 Verdichten	24
4.4 Verdichtingsgraad kleigrond	27
4.4.1 Algemeen	27
4.4.2 De Proctorproef in de praktijk	27
4.4.3 Specificatie en controle verdichting op het werk	29
4.5 Overzicht over beschikbare grond en grondstromen	30
4.6 Ontwikkeling graszode	31
4.7 Samenvatting van aanbevelingen	32
<b>5 Conclusies</b>	<b>34</b>
<b>Referenties</b>	<b>35</b>

## 1 Inleiding

De afgelopen twee decennia, na publicatie van “Klei voor dijken” (TAW, 1996), zijn inzichten in het functioneren en beoordelen van kleigrond ontwikkeld, waarmee nadere optimalisatie van het gebruik van klei in dijken mogelijk is. De inzichten betreffen respectievelijk het beoordelen van klei voor gebruik in dijken, de ontwikkeling van schade in klei op dijken en aspecten van klei in het werk bij de uitvoering. Dit rapport is een samenvatting van de inzichten in het beoordelen van klei voor gebruik in dijken, de ontwikkeling van schade in klei op dijken en aspecten van klei in het werk bij de uitvoering.

Het rapport geeft een overzicht van die inzichten. Het rapport is gericht op het doen van aanbevelingen die in breder verband met opdrachtgevers, opdrachtnemers en adviesorganen kunnen worden besproken, met als doel te komen tot breed gedragen voorschriften voor het maken van afwegingen bij de toepassing van klei in dijken. De aanbevelingen zijn in een separaat verstrekte tabel samengevat.

Het rapport geeft aanbevelingen voor het omgaan met klei bij het ontwerp en uitvoering van dijken. De inzichten betreffen respectievelijk het beoordelen van klei voor gebruik in dijken, de ontwikkeling van schade in klei op dijken en aspecten van klei in het werk bij de uitvoering. In het rapport wordt kort ingegaan op de ontwikkeling van de inzichten, de achtergronden en de aanleidingen van de aanbevelingen. In het rapport worden tabellarische overzichten van de aanbevelingen gepresenteerd en is aangegeven voor welke onderwerpen nog scherper inzicht ontwikkeld moet worden.

De meeste aandacht gaat uit naar de functie die klei veelal heeft voor bekleding van dijken. De klei in de kern komt alleen ter sprake wat betreft de vormvastheid ervan en de berm wordt niet expliciet benoemd omdat daar bekledingseisen van toepassing kunnen zijn en de doorlatendheid ervan een rol speelt.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de beoordeling van kwaliteit van klei en kwaliteitsborging, met onder andere een voorstel voor aanpassing van de categorie indeling van de erosiebestendigheid van klei op dijken. Hoofdstuk 3 gaat in op afwegingen over kwaliteit van klei en het ontwerp van dijken, waarbij de ontwikkeling van schade als factor wordt ingebracht, bijvoorbeeld in de relatie tussen taludhelling en belasting op de kleibekleding. In hoofdstuk 4 komen aandachtspunten voor het werken met klei bij de uitvoering aan de orde.

De samenvattingen van aanbevelingen in dit rapport zijn in een separaat beschikbaar gestelde tabel opgenomen.

## 2 Parameters en parameterwaarden

### 2.1 Algemeen

Het TAW technisch rapport “Klei voor dijken” (TAW, 1996) bevat een algemeen gebruikte indeling voor geschiktheid van klei en er zijn richtlijnen in de RAW systematiek (RAW, 2015) voor bepaling van parameterwaarden voor de indeling. Dit hoofdstuk betreft inzichten en kennis over uitkomsten van standaard classificatietesten voor het beoordelen van klei en het geven van indicaties voor het omgaan met parameterwaarden van monsters genomen uit een partij klei en zo te komen tot uniformiteit in bepalingen. Er wordt ingegaan op de mogelijkheden om het functioneren van klei voor dijken te beoordelen met die eenvoudig te bepalen waarden voor veelgebruikte parameters voor het kwalificeren van grond. De vereisten voor een dergelijke beoordeling worden besproken.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op inzichten en kennis over het omgaan met het beoordelen van klei met classificatieproeven. De aanvullende inzichten en kennis staan vermeld in paragraaf 2.2. De status van die inzichten en kennis voor de waterbouw staat beschreven in paragraaf 2.3 en het toepassen in paragraaf 2.4. In paragraaf 2.5 worden de bevindingen naar aanleiding van de beschouwingen samengevat en worden voorstellen voor aanpassing gedaan. De aanbevelingen worden eveneens in tabelvorm gegeven in een separaat beschikbare bijlage.

### 2.2 Aanvullende inzichten en kennis

De kwaliteiten van klei met betrekking tot aanleg, beheer en schadeontwikkeling wordt direct en indirect bepaald door samenstelling, plaats en wijze van aanbrengen van de grond, en door weer en wind en begroeiing. Er zijn aanvullende inzichten ontwikkeld ten aanzien van de kwaliteit en de invloeden daarop uit resultaten van respectievelijk:

- numerieke simulaties, waarmee effecten van eigenschappen van grond op aspecten van het berekende gedrag zijn nagegaan (Deltares, 2011), (Kruse, 2010), (Nugroho & Kruse, 2013), (Mourik, 2015).
- grootschalige proeven en veldwaarnemingen (Grondmechanica Delft, 1994), (Grondmechanica Delft, 1995), (ENW, 2008), (Klein Breteler, Residual strength of grass on clay in the wave impact zone. Basis for safety assessment method of WTI-2017, product 5.10, 2015), (Klein Breteler & Mourik, 2016), (Kruse, 1998), (Kruse, 2010), (Mourik, 2015), (Hoven, 2015a), (Vroeg, Kruse, & Gent, 2002), (Waterloopkundig Laboratorium, 1993), (Waterloopkundig Laboratorium, 2007).
- aanvullende analyses van de invloed van parameterwaarden op het functioneren van kleigrond in dijken voor in uitvoering zijnde projecten, onder andere (GeoDelft, 2006), (Grondmechanica Delft, 2001), (Kruse, 2013), (Kruse, 2015).

De inzichten uit de veldwaarnemingen en de numerieke en fysieke simulaties wijzen erop dat de samenstelling van de grond weliswaar een element in de kwaliteit vertegenwoordigt, maar dat bodemvorming, lokale variaties en wijze van aanbrengen evenzeer de uiteindelijke kwaliteit van de dijk bepalen. De samenstelling van monsters van grond voor een dijk die is bepaald met de gangbare classificatieproeven, geeft daarom een indruk van de uiteindelijke kwaliteit van de grond in de dijk. De wijze van aanbrengen is bijvoorbeeld evenzeer van belang. Zo leidt te nat aanbrengen van klei bijvoorbeeld tot een geringe samenhang in de bodem hetgeen leidt tot een aanzienlijke verhoging van de ontgrondingssnelheid. Evenzo leidt goed verdichten van de grond in de zone buiten de directe invloed van weer en wind bijvoorbeeld tot een weinig eroderend massief zelfs bij zeer hoge golven. In de zone onder invloed van weer en wind geeft de samenstelling van de grond inzicht in bepaalde

ontwikkelingen van de eigenschappen, maar expositie van een talud, ligging ten opzichte van grondwater en aard van de bekleding hebben daarnaast belangrijke invloeden.

Naast genoemde inzichten is de afgelopen twee decennia ervaring opgedaan met het gangbare systeem van beoordelen van kleigrond voor dijken (TAW, 1996) en met het functioneren daarvan. In (Kruse, 2010) is een korte beschouwing daarover opgenomen en (Klein Breteler, 2015) en (Klein Breteler & Mourik, Schematiseringshandleiding voor toetsing steenzettingen, 2016) bevatten een mede daarop gebaseerd voorstel voor aanpassing van de beoordeling voor het toetsen van de reststerkte van grasbekleding, respectievelijk steenbekleding op klei. Er zijn tevens talloze projectgebonden ad hoc adviezen gegeven door ter zake deskundigen over het hanteren van de uitkomsten van laboratoriumbepalingen op partijen kleigrond. Uit de ervaringen komt de behoefte naar voren aan respectievelijk:

- Verbetering van de indeling in categorieën.
- Handvatten voor het omgaan met de gerapporteerde waarden van classificatieproeven.
- Een betere omschrijving voor monsternamen borgen van de kwaliteit van bepaling van de gerapporteerde parameterwaarden.

### 2.3 Status van de kennis

De aanvullende kennis en inzichten zijn grotendeels opgedaan in adviesprojecten. In het kader van WBI (WTI) 2017 zijn verschillende bevindingen in toetsvoorschriften en voorstellen daarvoor opgenomen, onder andere in (Klein Breteler, 2015) en (Klein Breteler & Mourik, 2016) over het beoordelen van zandvoorkomens in kleibekledingen en (Van der Meer, et al., 2012) over het beoordelen van de aan de grond gerelateerde graszode.

Er is een aanpassing voorgesteld van de indeling in categorieën kleigrond (Kruse, 2010) die in hierboven aangehaalde toetsvoorschriften is opgenomen.

ENW techniek heeft resultaten van de aanvullende analyses voor specifieke omstandigheden beoordeeld en van toepassing bevonden voor met name het gehalte aan organische stof (Kruse, 2015).

Er is door deskundigen van het gebruik van klei voor dijken met instemming gereageerd op voorstellen om de beoordeling van kleigrond ten aanzien van zoutgehalte (Kruse, 2013) specifiek te maken voor de verschillende toepassingen van kleigrond in dijken. Een en ander is in het kader van HWBP onderzocht voor toepassing van klei onder gezette steen en is aangevuld met randvoorwaarden voor andere toepassingen van klei met hogere zoutgehalten in dijken.

In de praktijk is gebleken dat de huidige wijze van beoordelen van partijen kleigrond met classificatieparameterwaarden regelmatig leidt tot onjuiste beoordeling en tot een allesbehalve optimaal gebruik van beschikbare grond. Dit inzicht wordt over de breedte van het veld gedeeld en kenbaar gemaakt door betrokkenen, van uitvoering tot veiligheidsbeschouwingen en tot landinrichting. Er zijn, behalve een aanzet in het onderzoek naar de dikte van kleibekleding in het rivierengebied (Kruse, 2010), echter nog geen initiatieven geweest om de praktijk op dit punt te verbeteren. Bovendien bestaat er momenteel geen duidelijkheid over de wijze waarop met eventuele overschrijdingen van gerapporteerde waarden van parameters dient te worden omgegaan. Het is bijvoorbeeld niet duidelijk of deze waarden nooit overschreden mogen worden voor monsters van een partij kleigrond, dan wel of een vereiste waarde als een statistisch representatieve waarde voor een dergelijke partij kleigrond beschouwd kan worden (gemiddelde, percentiel-waarde en

dergelijke). De praktijk gaat ervan uit dat de waarden slechts bij uitzondering overschreden kunnen worden.

In Tabel 2.1 zijn praktijkvoorbeelden weergegeven van de complicaties van gerapporteerde waarden die tot onjuiste beoordeling van partijen kleigrond zouden leiden. De voorbeelden betreffen gerapporteerde waarden voor classificatieproefbepalingen van een serie monsters van kleigrond die zijn genomen voor instructiedoeleinden.

Het eerste voorbeeld betreft de waarden voor monsters 1 en 2 in de tabel. De waarden voor monster 1 duiden op de aanwezigheid van een fractie organische stof die voor een enigszins geofeende waarnemer zeer duidelijk herkenbaar zou moeten zijn. De grond van het monster leek sterk op die van monster 2 en de overeenkomst in de waarden voor zand- en lutumgehalte wijst daar ook op. Het hoge gehalte organische stof in monster 1 is voor ter zake deskundigen echter niet herkenbaar geweest in het toegeleverde monster, dat op basis van de waarneming eerder een gehalte als in monster 2 zou moeten hebben. De verschillen tussen de waarden voor vloeigrenzen en uitrolgrenzen tussen monster 1 en 2 zijn in overeenstemming met de verschillen in gehalte organische stof. De verschillen tussen de gerapporteerde waarden en de indicatie van de waarneming van de samenstelling van de monsters wijzen erop dat bij het samenstellen van de rapportage of bij monsterbehandeling en -administratie (behandeling van deelmonsters) verwisselingen van waarden zal hebben plaatsgevonden.

Het tweede voorbeeld betreft monster 4. De waarde voor de vloeigrens van monster 4 is extreem hoog in verhouding tot gerapporteerde waarden voor de andere parameters voor het monster. De waarde voor de vloeigrens is 10-tallen procenten te hoog ten opzichte van de waarde die de overige parameters, met name lutumgehalte en gehalte organische stof, aangeven. Het praktijkvoorbeeld illustreert de wenselijkheid van een betere borging van de kwaliteit van de laboratoriumbepalingen.

Bepaling	Monster		
	1	2	4
monster ID.	1	2	4
lutumgehalte [% M/M]	25.3	25.3	<b>20.8</b>
zandgehalte [% M/M]	11.7	9.7	4.4
vloeigrens [% M/M]	68	48	<b>66</b>
uitrolgrens [% M/M]	34	19	27
plasticiteitsindex [% M/M]	34	29	39
gehalte organische stof [% M/M]	<b>5.1</b>	<b>1.8</b>	2.7
Massaverlies HCl bepaling [%M/M]	9.6	12.6	16.4

Tabel 2.1 Gerapporteerde waarden voor classificatieproefbepalingen van monsters van kleigrond genomen voor instructiedoeleinden. De waarden laten onderlinge discrepantie voor monster 4 zien en een aanmerkelijk verschil tussen monster 1 en 2 dat bij waarnemingen door ter zake deskundigen zou hebben moeten blijken, maar dat niet als zodanig aanwezig werd bevonden

## 2.4 Toepassen van de inzichten

### 2.4.1 Aanpassing van de indeling in categorieën kleigrond

In (Kruse, 2010) is een aangepaste indeling naar geschiktheid van kleigrond voorgesteld. Deze indeling is inmiddels in (Klein Breteler, 2015), (Klein Breteler & Mourik, 2016) en (Van der Meer, et al., 2012) voor WBI 2017 overgenomen en kan worden aangevuld met de bevindingen in (Kruse, 2013), (Kruse, 2015). Met deze aangepaste indeling worden

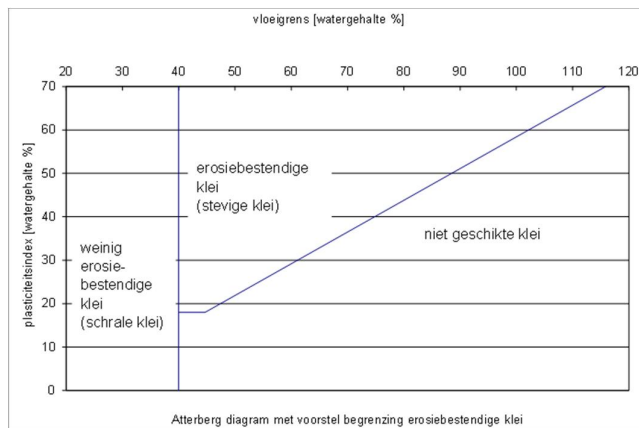


inconsistenties die in de indeling in (TAW, 1996) bestaan vermeden: onder andere is de niet terecht geduide erosie categorie 2 klei komen te vervallen en is conservatisme in de begrenzing van de categorie erosiebestendige klei weggenomen.

In de nieuwe in WBI 2017 gehanteerde indeling wordt met betrekking tot gebruik van kleigrond (zoals bedoeld in de NEN-EN-ISO 14688-1+2 nl en natuurlijk afgezette kleigrond betreffend) in dijkbekleding onderscheid gemaakt in 3 categorieën grond te weten: "erosiebestendige klei", "weinig erosiebestendige klei" (ook wel als "stevige klei respectievelijk "schrale klei" aangeduid) en een categorie klei die niet geschikt is voor gebruik als bekledingsklei.

De grenswaarden tussen de categorieën zijn:

- A. "erosiebestendige klei" is grond afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal met een zandgehalte ( $> 63 \mu\text{m}$ ) lager dan 40%, een plasticiteitsindex hoger dan 18% en hoger dan  $0,73 \times (\text{vloeigrens} - 20)$ , met een vloeigrens hoger dan 40%,
- B. "weinig erosiebestendige klei" heeft een vloeigrens lager dan 40 %
- C. niet geschikte klei met een vloeigrens hoger dan 40 % en een plasticiteitsindex lager dan  $0,73 \times (\text{vloeigrens} - 20)$  of lager dan 18 % (zie ook Figuur 2.1).(Opgemerkt wordt dat de kleigrond niet geschikt is als bekledingsklei.)



Figuur 2.1 Atterbergse grenzen en de voorgestelde indeling in categorieën kleigrond

Niet voor bekleding geschikte klei heeft meer dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode, of meer dan 25% gewichtsverlies bij de HCl-behandeling of significante bijmenging van puin grind en dergelijke, of heeft veel heldere (rode, bruine en gele, zwarte en soms blauwe) verkleuringen. De categorie niet geschikte grond komen grondsoorten voor die door bijvoorbeeld een hoog gehalte aan plantenresten zoals wortels (graszode), of door hoge gehalten aan ijzer- en zwavelverbindingen niet geschikt zijn voor gebruik als bekledingsklei.

Aanvullend op de momenteel in WBI gehanteerde indeling wordt ten aanzien van gehalte organische stof en zoutgehalte voor bekledingsklei voorgesteld, respectievelijk:

- Het organische stofgehalte dient lager te zijn dan 7%. Bij aanleg van een dijk met klei met organische stofgehaltenes hoger dan 5% dient rekening gehouden te worden met meer klink en zal een overhoogte aangehouden moeten worden (Kruse, 2015).

Bijvoorbeeld, de aan te houden overhoogte bedraagt 6 % van de dikte van de kleilaag voor klei met een organisch stofgehalte van 6%.

- Bij een zoutgehalte van 8 g/l dient aangebrachte klei bij aanbrengen een watergehalte van 3 - 5% of lager te hebben dan volgens de hiervoor genoemde consistentie-index vereist is (Kruse, 2013). Indien verwacht wordt dat de klei in een bekledingslaag ontzilt raakt na aanleg, dient rekening gehouden te worden met uitspoeling van kleigrond, leidend tot een afname van het volume van 5 tot 10 %. Deze volumeafname kan worden tegengegaan door afdekken van de grond met folie. Klei die van invloed is op de grasbekleding dient een zoutgehalte niet hoger dan 4 g/l te hebben om kale plekken in de begroeiing te voorkomen. Voor andere vegetatie typen kunnen andere zoutgehalten van toepassing zijn. Opgemerkt wordt dat het ontziltten van een ca. 1 m dikke laag zoute cohesieve grond boven grondwaterpeil 1-3 jaar duurt en dat het vormen van een gesloten graszode dus langer zal duren dan bij zoete cohesieve grond. Opgemerkt wordt dat in gebieden waarbij het grondwater relatief zout is, de zoutgehalten tot minstens 1 m boven gemiddeld hoog water en voor minstens tientallen jaren hoog zijn.

Ten aanzien van het watergehalte bij het aanbrengen zijn geen aanpassingen voorgesteld.

#### 2.4.2 Omgaan met overschrijdingen van grenzenwaarden van categorieën klei.

In de praktijk gaat men er van uit dat de gerapporteerde waarden van de bepaling van de classificatieproeven waarden betreffen die niet, dan wel bij uitzondering, over- of onderschreden kunnen worden. De wijze van en de representativiteit van monsternamen en de kwaliteit van de bepalingen hebben een relevante invloed op de vastgestelde waarde en kunnen leiden tot soms aanmerkelijke spreiding, hetgeen zelden in enig detail aan de orde komt. De wijze waarop met de gerapporteerde waarden van de bepaling van de classificatieproeven kan worden omgegaan hangt daarom samen met de kwaliteit van de monsternamen en van de laboratoriumbepalingen waarop in de paragrafen 2.4.3 en 2.4.4 wordt ingegaan. Op basis van de ervaringen in de praktijk worden hieronder aanpassingen voorgesteld. Van belang daarbij zijn overwegingen over het beperken van de kosten van de beoordeling en aannames over de kwaliteit van monsternamen en laboratoriumbepalingen.

Het is mogelijk om het beoordelen van een partij grond te laten berusten op het patroon van de spreiding van de parameterwaarden voor de partij. Voorbeelden zijn:

- Het gemiddelde van een partij moet voldoen aan gestelde grenswaarden en dat niet meer dan een bepaalde fractie van de bepalingen de grenswaarde mag overschrijden. Deze aanpak vergt in het algemeen zeer veel bepalingen.
- Overschrijding wordt toegestaan indien niet meer dan een enkele waarde van bepaalde parameters van een aantal monsters van een enkele partij grond een overschrijding betreft en dat die overschrijding voor niet meer dan een bepaalde fractie van de monsters van die partij grond voorkomt.

Voorgesteld wordt deze laatste wijze van beoordelen te volgen. Het relatieve aantal monsters waarvoor wordt toegestaan dat ze niet aan de eisen voor de bepaalde parameters voldoen, hangt samen met de voorwaarden die voor monsternamen (paragraaf 2.4.3) en kwaliteit van bepaling van gerapporteerde waarden (paragraaf 2.4.4). Voor het aantal acceptabele afwijkingen zal een statistische onderbouwing moeten worden opgesteld.

In verband met de kwaliteit van de bepalingen wordt gewezen op de afwijkingen van de waarden die optreden voor monsters door de thans gebruikte laboratoriumbepalingen. Op basis van ad hoc waarnemingen zijn afwijkingen als volgt geschat:

- Lutumgehalte tot  $\pm 5\%$ .
- Plasticiteitsindex tot  $\pm 5\%$ .
- Gehalte organisch materiaal 1 - 3 %.

Deze afwijkingen zijn significant. Het is van belang om de huidige praktijk van het laboratoriumonderzoek te evalueren. De consistentie van de bepalingen en relevantie van eventuele afwijkingen voor de toepassing dient nagegaan te worden.

Als er overeenstemming is over de wijze van de bepalingen, over verbetering van de kwaliteit ervan en met overeenstemming over de monsternamepraktijk kunnen algemene regels vastgesteld worden over het omgaan met overschrijdingen van grenswaarden. Voorshands is het slechts op basis van bevindingen van ter zake deskundigen mogelijk om de effecten van afwijkingen van de classificatie te beoordelen voor een toepassing.

#### 2.4.3 Monstername en ruimtelijke variatie in parameterwaarden

In verband met het aanleggen of verbeteren van dijken is het voor de beoordeling van partijen grond nodig om vereisten te formuleren voor toelaatbare ruimtelijke variatie in parameterwaarden. Het betreft bijvoorbeeld de aanwezigheid en afmetingen van niet cohesieve lagen (zand- en siltlagen) in de partij grond en de afmetingen van stukken grond in het werk waarvoor een andere dan de toegestane parameterwaarde kan gelden.

Zo is variatie op centimeter tot decimeter schaal binnen een hele kleibekleding vaak niet van belang voor het vervullen van de functie van de bekleding. Opgemerkt wordt overigens dat bij monstername deze schaal wel van belang is, omdat de schaal van een monster, en de deelmonsters daaruit, dezelfde afmetingen betreffen. Ruimtelijke variatie in een kleibekleding is wel van belang als daardoor bijvoorbeeld stukken talud groter dan  $1 \text{ m}^2$  met meer dan 25 % van de laagdikte aan ongeschikte grond kunnen ontstaan. Er kunnen hanteerbare procedures worden opgesteld, waarmee het mogelijk wordt de ruimtelijke spreiding in parameterwaarden en effecten daarvan te beoordelen.

Voor het opstellen van zulke procedures is een nadere analyse nodig van consequenties van de ruimtelijke variaties voor het functioneren van de kleilaag. Voor het uitvoeren van die procedures voor het beoordelen van grond voor dijken is ter zake ontwikkelde ervaring nodig voor de personen die de beoordeling moeten uitvoeren. De ervaring kan bestaan uit daarvoor geschikte opleiding of bijvoorbeeld aantoonbaar vele jaren ervaring in het terrein met het zelfstandig beoordelen van grond.

De procedure die voor het WBI 2017 is voorgesteld (Klein Breteler & Mourik, Schematiseringshandleiding voor toetsing steenzettingen, 2016) en die gebaseerd is op bevindingen van ter zake deskundigen, kan als voorbeeld dienen. De procedure betreft het waarden van het aantreffen van zandlagen en –laagjes in kleibekleding onder gezette steen voor het beoordelen van de bijdrage van de kleibekleding aan de reststerkte. De procedure gaat in op aantal en dikte van aangetroffen zandvoorkomens in boorkernen van de kleibekleding. De procedure is gebaseerd op effecten van zandvoorkomens op het functioneren van de bekleding en op de wijze waarop zandlagen en –laagjes in klei voorkomen en gedetecteerd en gekarakteriseerd kunnen worden met eenvoudig grondonderzoek.

Een mogelijke, en hier voorgestelde aanpak voor het beoordelen van een partij kleigrond is dat de partij grond door een ter zake voldoende ervaren persoon waar nodig op voorhand wordt onderverdeeld naar gelang de variatie in samenstelling. Hierbij gaat het om onderscheiden van eventuele deelpartijen met relevant verschil in samenstelling van voldoende ruimtelijke afmetingen. Dit betreft een eerste onderverdeling op. Vervolgens wordt elke hieruit komende deelpartij bemonsterd. Voorshands wordt geschat dat van elke voldoende ruimtelijk homogene deelpartij ten minste drie monsters van ongeveer 1 liter moeten worden genomen voor elke 4.000 ton grond. Dit is ongeveer een kleilaag van 1 m dik over 50 x 50 m<sup>2</sup>. Alleen als anderszins kan worden aangetoond dat een groter volume grond eenzelfde samenstelling heeft kan dit aantal monsters minder zijn. Om kosten van monsternamen en monsterbepalingen te beperken wordt aanbevolen dat er een systeem voor het ontgraven en volgen van de partijen grond tot in het werk wordt ingericht. Een dergelijk systeem vergt ten minste instructie en controle voor machinisten en van grondtransport.

#### 2.4.4 Kwaliteit van laboratoriumbepalingen

Er zijn een aantal veel voorkomende oorzaken voor de soms opmerkelijke afwijkingen in consistentie van uitkomsten van de classificatieproefbepalingen. Afwijkingen komen voort uit onder andere: onvoldoende homogeniseren van monstermateriaal voor de bepalingen op deelmonsters, verschillen in wijze van bepaling, uitvoeringswijzen van de proeven (bijvoorbeeld verschillen tussen laboranten en hun uitrusting) en administratieve onvolkomenheden (bijvoorbeeld (deel-) monster markering en verwisseling en vastleggen van meetwaarden).

Het is aan te bevelen om de kwaliteit van laboratoriumbepalingen in de huidige praktijk, geïllustreerd in paragraaf 2.3, na te gaan met blinde tests om de mate van spreiding van bepalingen vast te kunnen stellen. Waar nodig kan de oorzaak van spreiding of afwijkingen nagegaan worden. Daarbij dient ook aandacht aan de deskundigheid van de betrokkenen te worden geschonken. Mogelijk is harmonisatie van de bepalingwijzen nuttig of nodig.

### 2.5 Samenvatting van aanbevelingen

Voorgesteld wordt de grenzen van de categorieën kleigrond, in termen van classificatieproefparameters aan te passen (zie paragraaf 2.4.1) zoals in WBI reeds is gedaan. De aanpassingen kunnen daartoe in breder verband aan de orde gesteld worden met een taakgerichte werkgroep en in ENW techniek verband. Het verdient aanbeveling ook de inzichten over gehalte aan organische stof en zoutgehalte daarbij te betrekken. Het is mogelijk de aanpassing in contracten op te nemen per aan te nemen project en om middels CROW en andere instanties de RAW richtlijnen aan te passen of toe te voegen teneinde er brede kring meer eenduidig om te kunnen gaan. De aanpassingen kunnen ook in het OI (Ontwerp Instrumentarium) worden ingebed, rechtstreeks of via verwijzing.

Voorgesteld wordt over- of overschrijding van gerapporteerde waarden van bepaalde classificatieproeven toe te staan onder bepaalde voorwaarden. De voorwaarden hangen samen met de voorwaarden voor monsternamen en kwaliteit van bepaling van gerapporteerde waarden en de aard van de parameter. Een aanpak zoals geschetst in paragraaf 2.4.3 zou gevolgd kunnen worden. Beperkte overschrijdingen van de vereiste waarden van bijvoorbeeld de vloeigrens zouden daarbij niet meer dan één van de drie bepalingen mogen betreffen, of zou het gemiddelde van de consistentie-index van de drie monsters moeten voldoen aan de voor de toepassing vereiste waarde. Een dergelijke aanpak vergt een analyse van de verschillende aspecten van invloeden en effecten.

Het is voor de beoordeling van partijen grond daarnaast nodig om de effecten na te gaan van de mate en aard van de ruimtelijke variatie van de grond voor het functioneren ervan in de verschillende toepassingen.

Het wordt aanbevolen om de kwaliteiten van laboratoriumbepalingen in de huidige praktijk na te gaan en waar nodig de oorzaak van spreiding of afwijkingen na te gaan. In paragraaf 2.4.4 wordt aanbevolen de kwaliteit met tests met ringonderzoek na te gaan. Aanbevolen wordt om in dat onderzoek ook de monstername te betrekken.

### 3 Ontwerp en schadeontwikkeling

#### 3.1 Algemeen

Het functioneren van klei in dijken betreft het voorkomen van het bezwijken van de waterkering bij maatgevende hydraulische belastingomstandigheden of andere extreme omstandigheden. De grond moet ook het beheer van de dijk faciliteren. Hier wordt alleen ingegaan op het functioneren bij extreme belastingen aangezien de aard van de grond slechts zeer indirect invloed heeft op het beheer (slechts middels effecten op bijvoorbeeld vegetatie, of betreden).

Schade kan direct tot falen leiden, maar is in veel omstandigheden een ondermijnende factor die op termijn tot falen of ander relevant functieverlies kan leiden. In veel gevallen kan dat functieverlies op termijn beheerst worden met onderhoud. Het is daarom relevant na te gaan op welke wijze schade zich ontwikkelt. In het TAW technisch rapport "Klei voor dijken" (TAW, 1996) is geen aanduiding van acceptabel geachte schade aan een dijk gegeven. In dat rapport is impliciet uitgegaan van schades die niet ernstiger zijn dan wat destijds (1988) bij regulier onderhoud hersteld werd. Door de aangepaste inzichten in het beoordelen van de veiligheid van waterkeringen en door veranderde verhoudingen in de verantwoordelijkheden voor de kosten van aanleg en onderhoud van waterkeringen (HWBP, 2014) (Ministerie van I&M, 2014) verdient het beoordelen van schadeontwikkeling aandacht.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van inzichten en kennis over schadeontwikkeling en het beoordelen ervan in verband met klei op dijken teneinde te komen tot uitgangspunten voor het beoordelen van toelaatbaar geachte schade aan klei in de dijk. De mogelijkheden om met voldoende geachte zekerheid belangrijke mogelijke schadeontwikkeling vast te kunnen stellen komen daarin aan de orde. Opgemerkt wordt dat in het WBI 2017 de schade tot een diepte tot ca. 0,2 m, zijnde de graszode en de hier vlak onder gelegen sterk doorwortelde zone, los van de schade aan het deel van de kleibekleding onder de (gras-) zode wordt beoordeeld. Dat onderscheid wordt hier niet expliciet gemaakt voor aanleg en onderhoud van dijken, aangezien er bij de ontwikkeling van de ondiepe ondergrond van de dijk en bij het ontwikkelen van schades velerlei onderlinge afhankelijkheden bestaan.

Aanvullende inzichten en kennis worden in paragraaf 3.2 gegeven. De status van die inzichten en kennis voor de waterbouw zijn opgetekend in paragraaf 3.3 en het toepassen ervan in paragraaf 3.4. De bevindingen op basis van de beschouwingen over schade aan klei in dijken zijn samengevat in paragraaf 3.5.

#### 3.2 Aanvullende inzichten en kennis

Voor het beoordelen van schade aan klei-eenheden in een functionerende dijk is het nodig dat het effect van de schade op het functioneren en beheren van de waterkering nagegaan kan worden. Schade kan optreden als gevolg van erosie, als gevolg van stabiliteitsverlies ofwel afschuiven van een grondmoot, of een combinatie zoals erosie na het optreden van een afschuiving. Aanvullende inzichten over effecten van schade aan klei in de dijk betreffen voornamelijk respectievelijk:

- Bestendigheid van klei in een dijk tegen ontgronden door golven, overloop en overslag (Grondmechanica Delft, 1995), (Hoven, 2015a), (Klein Breteler, 2015), (Kruse, 2010), (Mourik, 2015), (Nugroho & Kruse, 2013), (Vroeg, Kruse, & Gent, 2002).
- Effecten van ontgronden en van lokaal stabiliteitsverlies op het functioneren van dijklichamen (Hoven, 2014), (Hoven, 2015a), (Kruse, 2010), (Kruse, 2015), (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

- Ontwikkeling van stochastische en gerelateerde veiligheidsbeschouwingen waarin effecten van ontstaan en uitbreiden van schade meer of minder expliciet kan worden opgenomen (Diermanse, 2016), (Klein Breteler, 2015).
- Schade direct na aanleg van een kleibekleding (Kruse, 2010).
- Verandering van financiering van aanleg, aanpassing en onderhoud van waterkeringen (HWBP, 2014), (Ministerie van I&M, 2014).

De in 2013 gewijzigde wetgeving over de subsidiëring van aanleg van waterkeringen (Ministerie van I&M, 2014) verandert de afwegingen tussen kosten van aanleg, en beheer en onderhoud van dijken. Optimalisatie naar de integrale kosten van de waterkering, met afwegingen tussen kosten voor herstel van schade in beheer en onderhoud en risico's van schade (kosten en kans van optreden) die een ontwerp met zich meebrengt, is met de aanpassing van subsidiëring beter mogelijk (HWBP, 2014).

Er zijn geen aanvullende inzichten en kennis voor stochastische en gerelateerde veiligheidsbeschouwingen specifiek voor klei in dijken ontwikkeld. De verkregen kennis en inzichten over die onderwerpen zijn echter wel van belang in het kader van schade zoals in paragraaf 3.4 over het toepassen van de inzichten wordt besproken.

De stabiliteit van kleibekleding wordt in (Hoven, 2015c) besproken. De methoden zijn gebaseerd op reeds bestaande inzichten. Er is een methodiek ontwikkeld (Hoven, 2014) om de vervolgschade na het optreden van een afschuiving van het binnentalud in combinatie met golfoverslag te bepalen. Door de macro-instabiliteit komt de kern bloot te liggen, waardoor deze kwetsbaar is voor erosie indien er golfoverslag is.

De inzichten die sedert 1996 zijn ontwikkeld voor ontgronden door golven, overloop en overslag van klei zijn nader gespecificeerd door een aantal proeven met 1:1 simulaties van golfbelasting en van overloop- en overslagbelasting (Grondmechanica Delft, 1995), (Klein Breteler, 2011), (Klein Breteler, 2015), (Kruse, 1998), (Steeg, 2014), (Hoven, 2015a), (Vroeg, Kruse, & Gent, 2002), (Waterloopkundig Laboratorium, 2007). Daarnaast zijn numerieke simulaties uitgevoerd om de gevoeligheid voor taludhelling en beschadiging bij ontgroning van een talud na te gaan (Kruse, 1998), (Kruse, 2010), (Mourik, 2015), (Nugroho & Kruse, 2013).

Ontgronden door golven is tevens onderwerp van enige inventarisaties van historische schades waarover goede indicaties over de grond, de dijk en de belasting beschikbaar waren, onder andere (Kruse, 2010).

Ten aanzien van schadeontwikkeling, ontgroning, door golfaanval zijn er in hoofdlijnen twee benaderingen gevolgd met verschil in accent en gewicht toegekend aan de invloeden op de betrokken mechanismen. In de benadering gevolgd in (Mourik, 2015) en in (Klein Breteler, 2015), voor het toetsen met het WBI 2017 voor schade aan gras, wordt uitgegaan van een rekenkundige formulering. Deze formuleringen zijn afgeleid uit een model voor een standaard taludgeometrie en taludopbouw, dat is gebaseerd op waarnemingen bij een aantal golfgoot- en golfklapsimulatorproeven en op hydrodynamische overwegingen. Daarnaast is er een benadering in (Kruse, 2010) die naast de waarnemingen en metingen bij 1:1 proeven is gebaseerd en op schades die in het terrein zijn waargenomen. Dit betreft schades waar meer of minder goede schattingen voor beschikbaar zijn van de eigenschappen van de weggeslagen grond, de belastingduur en golfaanval. De resultaten van 1:1 proeven van golf- en overloop- en overslagbelasting worden in die benadering beoordeeld in het licht van de

invloeden op waargenomen schade in het terrein en aangevuld met overwegingen uit numerieke simulaties over de interactie tussen grond en golfwerking. Deze benadering is in (Nugroho & Kruse, 2013) nader uitgewerkt voor het effect van individuele golfklappen op een schade en voor het verloop van schadeontwikkeling.

De benadering in (Kruse, 2010) maakt onderscheid tussen twee categorieën kleigrond en zandgrond welke ook voor historische schades zijn vast te stellen. De benadering in (Mourik, 2015) onderscheid een generieke klei en keileem. In (Klein Breteler, 2015) wordt het zandgehalte als parameter voor de kwaliteit van grond gehanteerd, waarbij er invloed van zandgehalte bestaat voor kleilig zand en zeer sterk zandige klei.

Er bestaat een onderscheid tussen het ontstaan van schade door buitenwater tijdens en direct na aanleg van een kleibekleding en het ontstaan van zulke schade na verloop van één of meer jaren. Naast de hierboven genoemde basis voor de inzichten over ontgronden van taluds, die in de loop der jaren in evenwicht met hun omgeving zijn geraakt, is ervaring in de praktijk opgedaan met schade bij en direct na aanleg die in (Kruse, 2010) aan de orde komt.

De verkregen inzichten hebben hooguit zijdelings betrekking op de ontwikkeling van schade aan waterkerende kleilagen in voor- en achterland van een dijk waarbij zulke kleilagen functioneren in het tegengaan van kwel en piping. Bij enkele projecten met aanpassing en aanleg van dijken zijn adviezen gegeven, beoordeeld en toegepast betreffende de aanleg van kleilagen voor het beperken van de infiltratie.

### 3.3 Status van de kennis

In het kader van WBI 2017 zijn methodieken opgesteld voor de kwaliteitsborging bij het toetsen van waterkeringen om na te gaan of een bepaald onderdeel van klei in een dijk de eraan toebedeelde functie kan vervullen. In de meeste gevallen gaat het dan om (de kans op) bezwijken van het betreffende onderdeel. In dat verband zijn studies, richtlijnen en voorschriften beschikbaar gekomen die ook voor het ontwerpen van dijken en dijkverbeteringen kunnen worden ingezet, met name (Diermanse, 2016) en (Hoven, 2014), en voor kleibekledingen (Hoven, 2015b), (Klein Breteler, 2015), (Klein Breteler & Mourik, 2016).

Als basis voor de toetsvoorschriften zijn studies gebruikt waarin wordt ingegaan op de ontwikkeling van schade aan taluds. Deze studies zijn breder inzetbaar voor aanleg en verbeteringen, te noemen zijn (Hoven, 2015a), (Hoven, 2015c), (Klein Breteler, 2015), (Kruse, 2010), (Mourik, 2015), (Nugroho & Kruse, 2013), (Steeg, 2014), (Van der Meer, et al., 2012), (Vroeg, Kruse, & Gent, 2002). Deze studies zijn beoordeeld in de procedures voor kwaliteitsborging gehanteerd bij het toetsen.

Waar stochastische en daaraan gerelateerde veiligheidsbeschouwingen aan de orde zijn voor klei en het toetsen in de systematiek van WBI 2017, betreft dat de schematisatie van de hydraulische belasting en in beperkte mate de grondeigenschappen voor grondmechanische stabiliteit. Voor de parameters voor ontgroning van kleilagen en de mechanismen, wordt bij het toetsen uitgegaan van meer of minder behoudend geachte aannamen.

In het kader van deze rapportage is niet in detail nagegaan of breder inzetbare ontwikkelingen zijn geweest met betrekking tot optimalisatie naar de integrale kosten van een waterkering. Bij een dergelijke optimalisatie kunnen de kosten voor herstel van schade in beheer en onderhoud afgewogen worden tegen de risico's van schade (kosten en kans van optreden). De mogelijkheden om met verkregen inzichten nadere optimalisatie te



bewerkstelligen hebben echter de aandacht van alle betrokkenen bij het ontwerpen en aanleggen of verbeteren van dijken.

De stabiliteit van een kleibekleding is aan de orde in (Hoven, 2014), (Hoven, 2015a), (Kruse, 2010) en (Kruse, 2015) hetgeen in het kader van WBI (WTI) 2017 aan de orde is geweest, respectievelijk door ENW techniek is beoordeeld.

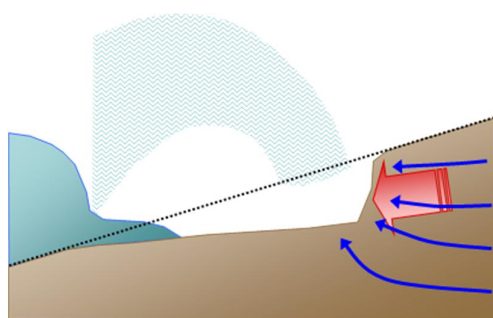
Specifieke aanvullende inzichten en kennis voor stochastische en gerelateerde veiligheidsbeschouwingen zijn niet ontwikkeld voor klei in dijken. De verkregen kennis en inzichten over die onderwerpen zijn echter wel van belang in het kader van met name schade zoals wordt besproken in paragraaf 3.4 over het toepassen van de inzichten.

De schade die in kleibekledingen kan ontstaan door hydraulische belasting direct na aanleg, als gras of harde bekleding nog niet functioneert, wordt in (Kruse, 2010) besproken. Ook schade direct na de aanleg door een onjuiste wijze van aanleg van grondwerken met klei komt daarin aan de orde. Deze rapportage is in ENW techniek besproken, maar er is daarbij geen expliciete aandacht aan dit onderwerp besteed. De kwestie komt regelmatig aan de orde in adviezen, waarbij dan op ad hoc basis oordelen en maatregelen volgen.

De inzichten voor ontgronden door golven, overloop en overslag van klei zijn in WBI-verband en in ENW-techniek aan de orde geweest. Voor bepaalde aspecten van het onderwerp bestaan verschillende benaderingen zoals in paragraaf 3.2 genoemd, en daarom worden de inzichten in paragraaf 3.4.1 kort samengevat. De verschillen in benadering en resultaten daarvan worden zodanig bevonden dat nadere toelichting relevant is welke in paragraaf 3.4 wordt gegeven.

### 3.4 Toepassen van de inzichten

Sedert 1996 zijn inzichten in ontgroning door buitenwater verdiept en verbreed. Deze ontwikkelingen bieden handvatten voor meer flexibiliteit en optimalisaties bij het ontwerpen van waterkeringen, met name ten aanzien van het gebruik van grondstoffen en taludhelling.



*Figuur 3.1 Schematische voorstelling van de schadeontwikkeling in een talud door een golfaanval. De ontgroning begint beneden de stilwaterlijn en de verdere ontgroning betreft vooral recessie van de steile achterwand van de schade, de klif (Kruse, 2010).*



*Figuur 3.2 Schade door overslag tijdens een proef met de overslagsimulator. (Rijkswaterstaat, 2012). De schade ontwikkelt zich voornamelijk door het langs de helling naar boven verplaatsen van de steile achterwand, wat in dit geval wordt versterkt door het wegspoelen van zand voor de kleibekleding.*

Alvorens het toepassen van de inzichten te behandelen, wordt hier een korte beschrijving van ontgroning op taluds gegeven. Deze toelichting wordt noodzakelijk geacht vanwege de

consequenties ervan voor de toepassingen. De schade aan kleibekledingen door golfaanval en door overslag en overloop, neemt in zijn algemeenheid de vorm aan van een terras in het talud bestaande uit een vlakke flauw hellende bodem en een steile achterwand (zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2). De helling van de bodem van de schade wordt, naast hydraulische werkingen, hoofdzakelijk bepaald door de opbouw van de grond in de dijk, met name gelaagdheid door bodemvorming en door aanleg.

De gelaagdheid in een kleitalud is een gevolg van aanleg en bodemontwikkeling. De bodemstructuur die zich in een kleibekleding ontwikkelt, betreft in de bovenste paar decimeter een losse stapeling van kleine kleibrokjes met daaronder een dichter gepakte laag van brokken klei die met de diepte steeds groter worden met een steeds hechtere pakking. De ligging van het grondwaterpeil is daarbij van belang, maar beneden een diepte van 1,0 tot 1,5 m in de bekleding is de structuur van elke kleilaag zo goed als massief. Daarnaast komen in kleibekledingen natuurlijk lagen en insluitingen voor als gevolg van de aanleg, onder andere zandlagen van werkwegen en van zand dat is meegekomen bij extractie van kleigrond. De steile achterwand van de schade verplaatst zich bij de ontgroning naar achteren en de verplaatsingsnelheid daarvan en eventuele gelaagdheid bepalen het toenemen van de diepte van de schade in de tijd. Dit proces is voor golfaanval beschreven in (Kruse, 1998) en gemodelleerd in onder andere (Nugroho & Kruse, 2013).

Toepassing van de verkregen inzichten over schadeontwikkeling aan taluds door directe golfaanval wordt besproken in paragraaf 3.4.1 en in paragraaf 3.4.2 wordt ingegaan op golfoverslag. Het gebruik van de inzichten voor buitentaluds staat vermeld in paragraaf 3.4.3. Toepassingen voor andere schademechanismen worden behandeld in paragrafen 3.4.4 en 3.4.5. De algemene aspecten van het toepassen van de inzichten komen aan de orde in de paragrafen 3.4.6 en 3.4.7.

#### 3.4.1 Schade door belasting door directe golfaanval

Bij een golfaanval wordt een zone van beperkte hoogte langs het talud aangevallen. Voor taluds met een helling van 1:3 tot 1:4 waarvan de helling intact is, is dat meestal een gebied vanaf de stilwaterlijn tot ongeveer  $0,5 \times H_s$  en lager, tot  $1 \times H_s$  en lager voor flauwere taluds.

Uit de beschikbare onderzoeken blijkt dat een intacte graszode een zeer aanzienlijke bijdrage levert in het voorkomen en beperken van schade aan taluds. In dit rapport over gebruik van klei wordt daar slechts zijdelings, in verband met de invloed op bodemstructuur, op ingegaan.

In deze paragraaf 3.4.1 worden een drietal ontwikkelingen beschreven die het mogelijk maken om het ontwerpen van dijktaluds te optimaliseren met keuzes voor grond en geometrie. De ontwikkeling betreffen:

- Het kunnen vaststellen van de omvang van schade door golfaanval die na verloop van tijd in een talud van een bepaalde kwaliteit kan ontstaan.
- De invloed van de taludhelling op de snelheid van ontwikkelen van de schade.
- Zeer hoge bestendigheid van massieve dichte klei tegen ontgroning.

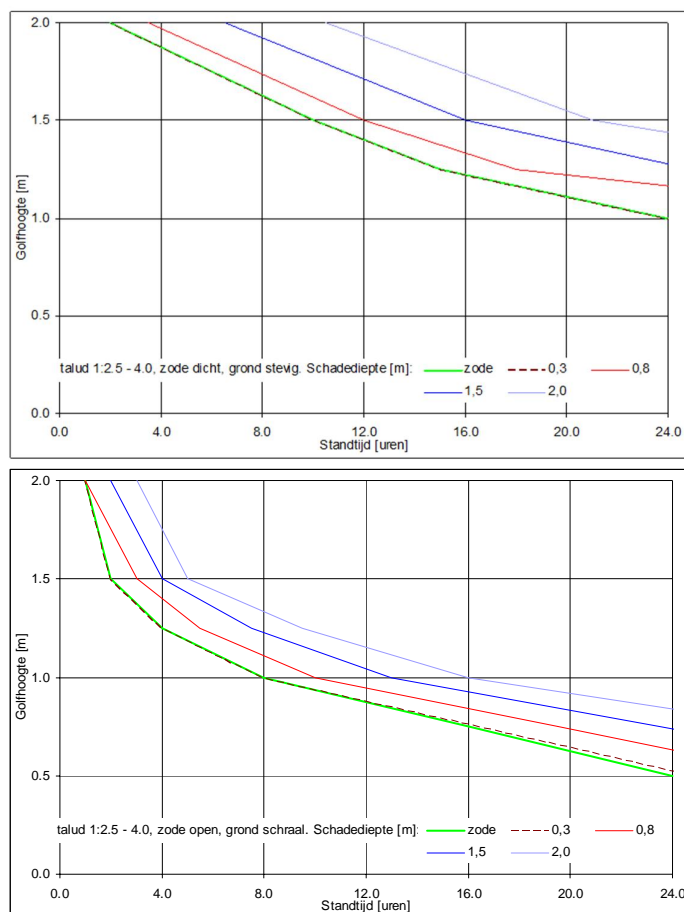
##### 3.4.1.1 Diepte schade door golfaanval

De ontwikkeling van schade door directe golfaanval en de invloeden daarop worden hier besproken voor de twee in paragraaf 3.2 benoemde benaderingen. In de volgende paragraaf 3.4.1.2 wordt het effect van taludhelling besproken.

Op basis van waarnemingen aan schade in het terrein en bij 1:1 golfgootproeven, aangevuld met bevindingen van numerieke analyse van de effectiviteit van golfaanval is in (Kruse, 2010) het verloop van de schadeontwikkeling voor de verschillende lagen in de bodem van kleitaluds nagegaan voor verschillende belastingniveaus. De ontwikkeling van schade zoals die daaruit naar voren komt, kan in grafische vorm zoals in Figuur 3.3 worden weergegeven. In (Kruse, 2010) worden in verband met schadeontwikkeling respectievelijk onderscheiden:

- Twee categorieën taludhelling (1:2.5 – 1:4 en 1:5 – 1:8).
- Twee categorieën kleigrond, “stevig” en “schraal” (zie paragraaf 2.4.1) en
- drie typen kwaliteit van graszode (“fragmentarisch”, “open” en “gesloten”).

De diepte van de schadeontwikkeling bij een bepaalde golfhoogte en een bepaalde duur van belasting wordt voor al de combinaties van deze categorieën weergegeven in (Kruse, 2010). Figuur 3.3 geeft een voorbeeld. Opgemerkt wordt dat de opgegeven duur van verwijderen voor de verschillende diepte-intervallen als behoudend is gekozen.



*Figuur 3.3 Maximale diepte van de schade aan een buitentalud door golfaanval voor een 1:2.5 – 1:4 talud met een dichte zode op stevige klei, respectievelijk een open zode op schrale klei (Kruse, 2010). Het verschil in duur van verwijdering van de zode (groene lijn) en de decimeters daar direct onder is zeer gering in beide gevallen. Voor de schrale klei is de snelheid van ontgronden veel hoger dan voor de stevige klei. De schade-ontwikkeling is behoudend ingeschat.*

Deze wijze van benaderen is in de hiervoor aangehaalde analyse in (Nugroho & Kruse, 2013) nader gedetailleerd waarbij het accent op de invloeden op en van het terugschrijden van de steile achterwand van de schade is gericht. De relatie tussen het aantal golfklappen waardoor de schade zich uitbreidt, en de snelheid van ontgronden komt daarbij aan de orde.

In de grotendeels parallelle benadering (Klein Breteler, 2015) wordt voor het gebruik bij het toetsen van dijken met grastaluds een wijze van schatten gepresenteerd voor de reststerkte van de klei tot 0,5 m diepte, gericht op een taludhelling van 1:3 - 1:3.5 en gegeven voor belasting als in het rivierengebied met relatief steile golven ( $H_s/L_{op} = 0,04$  tot  $0,06$ ) met een hoogte  $0,5 < H_s < 1,0$  m. In de benadering wordt een erosiecoëfficiënt ( $c_d$ ) voor kleigrond bepaald middels schattingen uit verschillende proeven op een schaal van 1:1 (Steeg, 2014) aangevuld met een analyse van resultaten van numerieke analyse naar het effect van taludhelling (Mourik, 2015). De erosiecoëfficiënt ( $c_d$ ) wordt gehanteerd in de vergelijking:

$$R_e = c_d (H_s - 0.5) (\tan\alpha)^{1.5}$$

met  $\alpha$ , taludhelling;  $H_s$ , significante golfhoogte en  $R_e$ , de gemiddelde snelheid van de dieptetoename van de schade.

De waarde voor  $c_d$  wordt bepaald met het zandgehalte van de klei in de formule:

$$c_d = 0.6 + \max(0; 8 (F_{zand} - 0.7))$$

waarin  $F_{zand}$ , zandgehalte van de grond (voor de gemiddelde waarde van  $c_d$ ). De gevolgde benadering is een vereenvoudiging van de aanpak in (Mourik, 2015) waarin de golfsteilheid ( $H_s / T_p$ ) optreedt die een maat is voor de effectiviteit van individuele golven en voor het aantal golfklappen per tijdseenheid. Evenals in de hierboven beschreven benadering zijn aannamen en schattingen gebruikt bij het afleiden van de formuleringen en de daarin gehanteerde waarden.

De verschillen tussen de benaderingen, in (Kruse, 2010) en in (Mourik, 2015) zijn niet groot voor standaard dijkstaluds met een kleibekleding met een dikte van 0,8 m en een talud met een helling van 1:3. De tijd tot ontwikkeling van een schade tot 0,8 m diep in een 1:3 talud door golven van  $H_s = 1,25$  m en  $T_p = 5$  s bedraagt in de benadering in (Mourik, 2015) ongeveer 2 uur en in (Kruse, 2010) 3 uur. Opgemerkt wordt dat de benadering in (Klein Breteler, 2015) schade tot 0,5 m betreft en is opgesteld voor kortere, rivier-, golven. Voor al de benaderingen geldt dat meer en betere waarnemingen de benodigde onzekerheidsmarge voor het toepassen van de benaderingen, kunnen beperken vooral waar het gaat om niet courante taludhellingen en effecten van dikkere kleibekledingen.

#### 3.4.1.2 *Invloed taludhelling:*

De genoemde benaderingen baseren het effect van de taludhelling grotendeels op algemene fysische principes en numerieke analyses van golfaanval, waarbij in de benadering in (Kruse, 2010) tevens de effecten daarvan in de grond worden betrokken. In de benadering in (Klein Breteler, 2015) neemt de tijd tot het ontwikkelen van een schade van 0,2 tot 0,5 m door riviergolven met  $H_s = 1.0$  m met een factor 2.8 toe tussen een taludhelling van 1:6 ten opzichte van een 1:3 talud. In de benadering in (Mourik, 2015) bedraagt de toename veel meer dan een factor 10 voor een 0,8 m diepe schade in een talud van 1:6 in vergelijking met een 1:3 talud. Opgemerkt wordt dat voor de afhankelijkheid van schade van de taludhelling de nadruk ligt op de golfsteilheid in de benadering in (Klein Breteler, 2015) en in (Mourik, 2015).

Bij de benadering in (Kruse, 2010) neemt de duur tot een 0,8 m diepe ontgronding in een talud van 1:6 toe met een factor 1.7 ten opzichte van een 1:3 talud voor dezelfde golfhoogte en vergelijkbare grond. De tijd tot ontwikkeling van een schade tot een diepte van 0,8 m in een 1:3 talud bedraagt in de benadering in (Mourik, 2015) 20 uur en in (Kruse, 2010) 4 uur.

De benadering in (Kruse, 2010) lijkt daarmee tot een behoudende schatting van de standtijd van een kleibekleding te leiden en ook is het effect van verflauwen van het talud minder uitgesproken dan bij de benadering in (Mourik, 2015).

De beide in paragraaf 3.4.1.1, genoemde benaderingen geven aan dat er een duidelijke invloed aanwezig is van de taludhelling op schadeontwikkeling in kleitaluds. De mate daarvan kan met het uitvoeren van nadere analyses beter vastgesteld worden, maar voorshands lijkt het verflauwen van een talud van 1:3 naar 1:6, de duur van ontwikkeling van schade tot een bepaalde diepte met tenminste een factor 2 te bewerkstelligen. Het verdient aanbeveling om de verschillende aspecten in beide benaderingen nader te analyseren en daarmee te komen tot een geschikt gereedschap (tabellen en formules) voor het ontwerpen van dijken waarmee kwantitatief effecten van de keuze voor een taludhelling en grondsoort op de schadeontwikkeling nagegaan kunnen worden.

#### 3.4.1.3 *Schade aan massieve dichte klei:*

Massieve dichte klei is zeer goed bestand tegen ontgroning door golfwerking en overloop. Er zijn niet veel voldoende gedocumenteerde gevallen van ontgroning van dichte massieve klei. In (Kruse, 2010) wordt een schade aan een havenhoofd van klei beschreven waar na twee hoogwaterperioden met golven tot tenminste  $H_s = 3$  m een schade in de basaltzuilenbekleding en in de klei tot een diepte van ongeveer 0,5 m was ontstaan. Deze schade beperkte zich tot een diepte van enige decimeters tot waar bodemvorming in de omgeving een rol speelt. In klei met een diepe bodemstructuur is op een locatie in de buurt in dezelfde stormperiode schade ontstaan tot een diepte van meer dan 0,8 m. Deze, en minder goed gedocumenteerde schadegevallen met massieve klei wijzen erop dat massieve klei zeer goed bestand is tegen ontgroning door buitenwater. Massieve klei komt voor in de zone dieper dan ongeveer 1,2 – 1,5 m beneden maaiveld, of in de zone minder dan 0,5 m boven het grondwater en de klei moet bij aanleg, of van nature goed verdicht zijn.



*Figuur 3.4 Schade aan een havenhoofd na een zware storm. Slechts de sterk door bodemvorming beïnvloede kleigrond in de aangevallen zone is verdwenen en de compacte klei, bijna zonder bodemstructuur is bijna niet aangetast*

### 3.4.2 Schade door overslag en overloop

Er zijn een aantal proeven uitgevoerd op een schaal 1:1 met een golfoverslagsimulator. De proeven zijn uitgevoerd op verschillende binnentaluds (Hoven, 2015a). De proeven laten voornamelijk de invloed van de grasbekleding in het uitstellen van schadeontwikkeling zien. Voor de locaties van de proeven is ook voldoende informatie over de ondergrond beschikbaar om indicaties over de invloed ervan op schadeontwikkeling te kunnen aangeven.

Bij golfoverslag en -overloop, begint de schadeontwikkeling bij talud- en bekledingsdiscontinuïteiten, of op soms al dan niet goed aanwijsbare maar kennelijk kwetsbare plekken op een talud (soms graafgangen, maar vaak niet herleidbaar) (Grondmechanica Delft, 1995), (Hoven, 2015c).

Stevige klei is in het algemeen goed bestand tegen overslag, behoudens wellicht voor langdurige extreme belasting. Een diepere schade die zich in een proef in zulke stevige klei ontwikkelde, lijkt, naar de karakteristieken van de achterwand van de schade, het gevolg te zijn van aanwezigheid van poreuze (slecht verdicht, of vergraven) kleigrond ter plaatse. De dikte van de kleibedekking lijkt ook een belangrijke factor. Waar de dikte van de klei minder is dan 0,4 m, treedt ook bij relatief beperkte belasting schade op zoals aangegeven in (Hoven, 2015a). Zo was in een proef op een kleibekleding met een dikte van ongeveer 0,4 m, de bekledingslaag van schrale klei plaatselijk, na het bezwijken van de zode, binnen een belastingsperiode van enige uren verdwenen.

Schade door overloop en overslag zoals waargenomen in de proeven is in de meeste gevallen beperkt tot overgangen in bekleding op de dijk en verflauwing aan de basis van de taludhelling.

Een grote hoeveelheid anekdotische informatie maakt duidelijk dat massieve klei goed bestand is tegen ontgroning door zeer grote hoeveelheden kolkend water. In veel foto's en video's van schade-uitbreiding na een dijkdoorbraak (bijna alle niet in Nederland) is te zien dat het dijklichaam ter plaatse is verdwenen en dat de massa water over een slechts zeer beperkt door ontgroning aangetaste ondergrond de riviervlakte instroomt. De ontwikkeling van diepe kuilen in de uitstroomopeningen lijkt gerelateerd aan het voorkomen van niet cohesieve, zand, löss (silt) grond. De beschikbare informatie wijst er daarom op dat massieve kleigrond zeer bestand is tegen ontgroning door extreme overloop en overslag.

### 3.4.3 Schadeontwikkeling door golfaanval en ontwerpgeredeenschap

Met de in de voorgaande paragrafen beschreven verkregen inzichten worden ontwikkelingen beschreven die het mogelijk maken om met keuzes voor grond en geometrie het ontwerp van een dijk te optimaliseren. De onderlinge verschillen tussen de benaderingen beschreven in paragraaf 3.4.1 rechtvaardigen een nadere analyse. In dat verband wordt opgemerkt dat in de benaderingen van (Mourik, 2015) en (Klein Breteler, 2015) veel aandacht uitgaat naar de modellering van de hydraulische belasting en er geen aandacht aan de verandering van de bodemstructuur met de diepte en dat er geen relevante differentiatie naar aard van de grond is. Anderzijds is de benadering in (Kruse, 2010) gebaseerd op schadegevallen waarvoor, behalve voor de proeven op een schaal van 1:1 uitgevoerd in de Deltagoot, vaak slechts indicaties beschikbaar zijn over de belasting.

Met de beschikbare benaderingen kunnen reeds globale schattingen van effecten van effecten van aard van de grond en van bijvoorbeeld taludhelling gegeven worden. Het verdient echter aanbeveling om tot meer eenduidig ontwerpgeredeenschap te komen. Het realiseren daarvan vergt nadere analyse van de verschillende aspecten met betrekking tot de

fysische mechanismen en de beschikbare informatie. Op voorhand lijkt een beperkte analyse mogelijk al tot een relevante verbetering van het ontwerpgeredeenschap.

#### 3.4.4 Schade door stabiliteitsverlies van kleibekledingen

De stabiliteit van kleibekleding wordt in (Hoven, 2015c) besproken. De methoden zijn gebaseerd op reeds bestaande inzichten. Ten aanzien van de eigenschappen van de grond (sterkte, doorlatendheid) wordt in beperkte mate rekening gehouden met de invloed van de bodemstructuur daarop. In (Hoven, 2014) wordt een methodiek beschreven om de invloed van vervolgschade aan de dijk door golfoverslag na macro-instabiliteit van een dijk vast te stellen.

In (Kruse, 2010) en (Kruse, 2015) wordt ingegaan op benodigde dikte van kleibekledingen voor stabiliteit bij vallend buitenwater. Op basis van die bevindingen is voor de dijken van het Reevediep in de IJsseldelta afgezien van een ontwerp met een wigvormig verloop van de dikte van de kleibekleding van het buitentalud. Zo'n dikteverloop van de kleibekleding is in (ENW, 2008) voorgesteld in afwachting van een destijds nog te ontwikkelen, toegesneden ontwerpmethodiek. In de benadering die voor de Reevediepdijken van toepassing wordt geacht, is uitgegaan van de poriewaterdruk in het dijklichaam bij de kleibekleding bij vallend buitenwater en wordt de stabiliteit van de dijk daarmee nagegaan. Thans algemeen beschikbare kennis en inzichten geven de mogelijkheid daarvoor.

Met de thans beschikbare berekeningsmethoden (zoals DGFlow, Plaxis) kunnen randvoorwaarden voor het functioneren van kleipakketten in dijken worden bepaald. Voor het vaststellen van te gebruiken parameterwaarden, is het nodig om de invloed van de bodemstructuur in de buitenste 1,2 tot 1,5 m van de dijk daarin te beschouwen (toename doorlatendheid, toename sterkte van structurelementen en verlies van samenhang ervan, en verschillen in de pakking ertussen). Het betrekken van in meer detail afgeleide waarden voor parameters voor doorlatendheid, die aanmerkelijk hoger zijn dan vaak wordt aangenomen op basis van laboratoriumonderzoek op kleine monsters, leidt in veel gevallen tot beperking van de benodigde dikte van de kleibekleding die nodig is voor de stabiliteit van de dijk. Opgemerkt wordt dat het gebruik van Plaxis en DG-Flow voor een gedetailleerde grondwaterstroming- en stabiliteitsanalyse van de kleibekleding mogelijk is, maar thans nog zeker niet gangbaar. De rekenmethoden worden niet voor dit doel beschreven in het OI 2014 versie 4 en of WBI 2017. Binnen het WBI 2017 zou een dergelijke analyse vallen onder een toets op maat. De kennis wordt af en toe toegepast, bijvoorbeeld voor het ontwerp van de Afsluitdijk (De Raadt, W.S., D-J. Jaspers Focks, A Van Hoven, 2015).

#### 3.4.5 Schade direct na aanleg

Als een pakket stevige klei van voldoende dikte op een dijk goed is verdicht, is de kans op ernstige schade zeer gering voor een nog niet bekleed talud direct na de aanleg zoals in (Kruse, 2010) wordt gesteld. De grond heeft dan nog een massieve opbouw. Deze omstandigheid is met name van belang voor dijktaaluds die een grasbekleding gaan krijgen.

Aanleg van grasbekleding vindt vaak plaats na de aanleg van de kleibekleding en gebeurt vaak aan het eind van, of na de zomer. De periode om tot voldoende wasdom te komen na inzaaien, of vormen van een samenhangende zode, van het gras is dan vaak te kort om een effectieve zodelaag te ontwikkelen. In de winterperiode, ook het stormseizoen, ontstaat in de bovenste ongeveer 0.1 m een zeer losse bodemstructuur in kleigrond. Deze toplaag wordt reeds door kleine golven ( $H_s < 0.5$  m) verwijderd van de massieve ondergrond. De schade die ontstaat, beperkt zich echter tot deze toplaag en bedreigt niet de standtijd van de hele

kleibekleding. De schades zijn na het stormseizoen eenvoudig te herstellen, ook als het om een afslagrand van meerdere kilometers gaat.

Het komt regelmatig voor dat niet voldoende verdichte kleigrond tijdens of direct na de aanleg niet stabiel blijkt in een periode met hevige neerslag of als drainage van water op het werk onvoldoende is en water lokaal in de grond kan dringen. Het stabiliteitsverlies ontstaat door het verlies van sterkte van de bij de aanleg sterk geroerde kleigrond. In niet verdichte grond raken de holtes tussen de kluiten van het aanbrengen gemakkelijk gevuld met water en wordt de klei van de kluiten zeer nat, terwijl dit in verdichte klei of in klei aangebracht in droge omstandigheden niet het geval is.

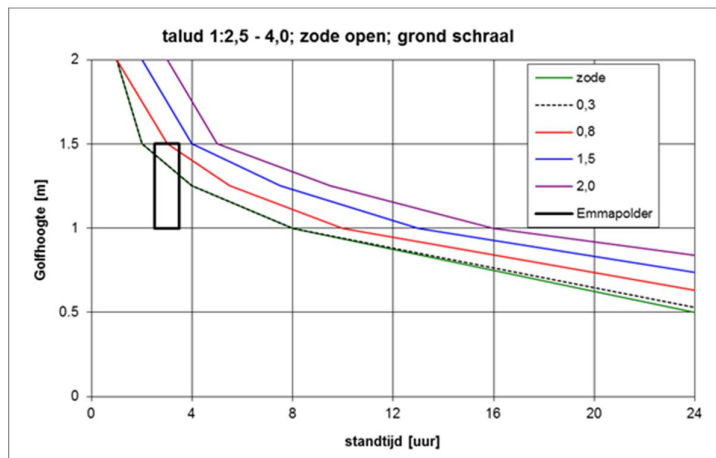
In zeer zandige kleigrond kan het “verweken” direct na aanleg ook optreden in wel goed verdichte klei, vooral wanneer het zand in de klei voorkomt in dunne kleine laagjes. Echter, na verloop van tijd wint ook zeer zandige klei aan sterkte (effecten die samenhangen met het indrogen) en kan dan ook stabiele taluds vormen. Bij het toepassen van zandige kleigrond dient met deze omstandigheid rekening gehouden te worden.

#### 3.4.6 Stochastische benaderingen schadeontwikkeling

Er zijn geen ontwikkelingen van stochastische en gerelateerde veiligheidsbeschouwingen voor schade aan en door klei in dijken (Diermanse, 2016). Waar stochastische en gerelateerde veiligheidsbeschouwingen voor klei en het toetsen met het WBI 2017 aan de orde zijn, betreft dat de schematisatie van de hydraulische belasting en grondeigenschappen voor grondmechanische stabiliteit. Voor de ontgroning betreffende parameters en de effecten van de mechanismen wordt bij het toetsen uitgegaan van meer of minder behoudende aannamen. Opgemerkt wordt dat er in (Klein Breteler, 2015) wel een waarde voor de 5% overschrijdingswaarde wordt gegeven voor de ontgroning door golfaanval. Ontgroning is nog niet in alle gevallen integraal onderdeel van de veiligheidsbeschouwing van de waterkering. Een kalibratiestudie voor de procedure van bepaling van rekenwaarden van sterkte en belasting parameters voor ontgroning is nodig. Deze studie kan eventueel in samenhang met het optreden van initiërende mechanismen, zoals falen van de gras- of steenbekleding, of macro-instabiliteit worden opgezet.

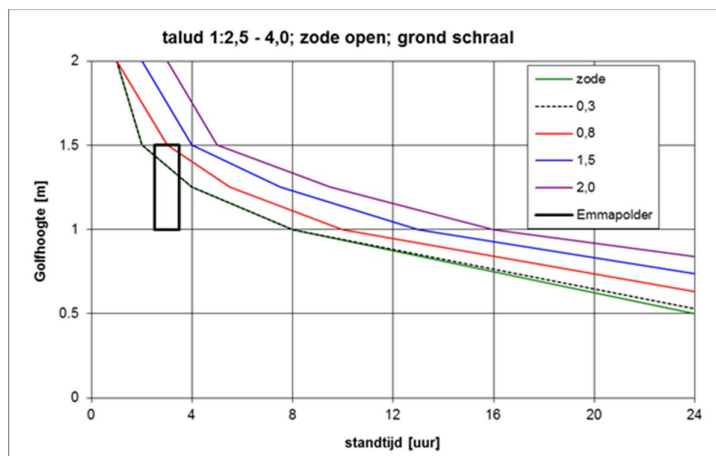
De beschikbare analyses van de gegevens zijn niet expliciet gericht op het onderscheiden van meer of minder waarschijnlijke gebeurtenissen en er wordt in bijna alle gevallen uitgegaan van omhullenden voor schadeontwikkeling voor meer of minder behoudende waarden voor de variabelen. Het is mogelijk om met meer gedetailleerd onderzoek indicaties te verkrijgen over de kans op overschrijden van een schadediepte indien er van minder behoudende schattingen van de ligging van omhullenden of parameterwaarden kan worden uitgegaan.





Figuur 3.5 geeft een voorbeeld van een waargenomen schadegeval tijdens een storm, waarbij de zode en de kleibekleding (0.5 m zeer zandige klei, schrale klei, op zand) geheel aangetast waren. Met nadere analyse van deze en dergelijke schadegevallen kan nagegaan worden of de standtijd soms, met een tabellarische aangegeven kans, hoger kan zijn.

Er zijn in de gegevens vaak marges aan te geven voor meer of minder waarschijnlijke, of waarschijnlijk geachte, omstandigheden en gebeurtenissen. Het lijkt daarom mogelijk om een classificatie voor kans van optreden van bepaalde schadeontwikkeling te bepalen op te stellen. Een dergelijke classificatie kan van dienst zijn bij het optimaliseren van ontwerp en aanleg van dijken.



Figuur 3.5 Schade dieptes (zode, 0.3 m, 0.8 m 1.5 m en 2.0 m) die ontstaan bij een bepaalde golfhoogte in een bepaalde grond na bepaalde duur (standtijd). De rechthoek geeft de range van de globale schatting van de golfhoogte en de duur van de belasting die tot de schade leidde voor een schadelocatie.

#### 3.4.7 Afwegingen tussen veiligheid en kosten voor herstel van schade.

De inzichten in de paragrafen hierboven over de omvang en de ernst van schade kunnen worden gebruikt in het maken van een afweging tussen kosten te maken bij de aanleg en kosten te maken voor het herstel van schade, wat één van de elementen is voor de verdeling van kosten aangegeven in (Ministerie van I&M, 2014) en in (HWBP, 2014). Detaillering van dergelijke afwegingen hangen in hoge mate samen met de gehanteerde contractvorm voor een werk.

Een zeer uitgesproken variant met betrekking tot kosten van herstel van schade en van aanleg is gebaseerd op de grote bestendigheid tegen ontgronden van massieve stevige klei wat besproken is in paragraaf 3.4.1.3. De overwegingen leiden tot de constatering dat een dergelijke belasting kan worden weerstaan zonder de aanwezigheid van een harde bekleding indien een laag kleigrond aanwezig is met een massieve structuur over een voldoende dikte. Aanleg van een talud zonder harde bekleding kan op basis daarvan zonder directe gevolgen voor de veiligheid worden overwogen indien het risico op het moeten herstellen van diepe schade beperkt is ten opzichte van het risico met een harde bekleding of herstel daarvan.

### 3.5 Samenvatting van aanbevelingen

De verkregen inzichten beschreven in de voorgaande paragrafen, maken ontwikkelingen mogelijk om keuzes voor grond en geometrie bij het ontwerpen van dijktraluds te optimaliseren. Deze ontwikkelingen betreffen met name:

- Benaderingen waarmee nagegaan kan worden tot welke diepte een schade zich in een kleibekleding zal ontwikkelen als gevolg van belasting door buitenwater en waarmee risico's met betrekking tot kosten en veiligheid nagegaan kunnen worden: Er kan rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat er bepaalde geaccepteerde schade mag ontstaan.
- Deze benaderingen kunnen worden verbeterd met thans beschikbare informatie en kennis. Voorgesteld wordt om met de daarvoor benodigde en beschikbare expertise een beknopte analyse uit te voeren om met een beperkte inspanning te komen tot een voor afgebakende omstandigheden eenduidige vaststelling van schadeontwikkeling. Bijvoorbeeld kan worden nagegaan wat de standtijd voor een 2 m dikke kleibekleding is voor een aantal combinaties van taludhelling en kwaliteiten van kleigrond.
- Er zijn mogelijkheden voor een classificatie van de kans op een bepaalde schadeontwikkeling bij een bepaalde belasting in bepaalde omstandigheden. Een dergelijke classificatie kan gebruikt worden om te komen tot een nadere optimalisatie bij het ontwerpen en realiseren van dijken.
- Met een kalibratiestudie voor een stochastische karakterisering van ontgroning in inbedding in het "safety format" zoals gebruikt in WBI en Ontwerp Instrumentarium (OI) mogelijk.
- De benaderingen om schade en effecten van schade door stabiliteitsverlies van klei, als element in de kern of de bekleding van dijken, na te gaan zijn sedert 1996 veel meer gedetailleerd en sterk verbeterd.
- Detaillering van afwegingen tussen kosten te maken bij aanleg en kosten voor herstel van schade hangen in hoge mate samen met de voor een werk gehanteerde contractvorm en kan voor courante vormen worden nagegaan. Afhankelijk van de toebedeling van verantwoordelijkheden die in de contracten zijn, kunnen de ontwikkeling van schade en de risico's daarvan worden afgewogen tegen de kosten van aanleg.

## 4 Aandachtspunten voor klei in het werk

### 4.1 Algemeen

Een aantal aspecten van het omgaan met kleigrond tijdens de aanleg en gedurende de uitvoering verdient nadere aandacht om de kwaliteit van de dijk en de borging van de kwaliteit te verbeteren en om onnodige kosten te vermijden. In dit hoofdstuk komen een aantal aspecten aan de orde.

Uit overwegingen van efficiëntie neemt de omvang van werken, en daarmee de capaciteit van het materieel en het tempo van de uitvoering, toe. Ook hebben veranderingen in de organisatie van dijkverbeteringen, zoals de contractvormen, invloed op het borgen van kwaliteit. Aangezien de kwaliteit van een kleilaag afhangt van de wijze waarop, en de conditie waarin, deze laag is aangebracht, is het volgende van belang, te weten:

- De kwaliteit van op het werk aangevoerde grond, met name samenstelling en watergehalte.
- De wijze van verwerken van de grond, met name het verdichten van de grond in het werk.
- Het overzicht over beschikbare grond, dat nodig is voor planning van uitvoering van het werk en mogelijke optimalisatie.

Op basis van praktijkervaringen wordt in de volgende paragrafen ingegaan op watergehalte, verdichten van de grond en op aspecten van de grondstromen voor een werk.

### 4.2 Water en watergehalte

Het watergehalte van klei bij het verdichten, is van belang voor de verwerkbaarheid. Bovendien is het van belang in verband met de vorming van permanente scheuren in de grond door het optreden van irreversibele krimp. Deze scheuren veroorzaken ernstige ondermijning van de samenhang van de kleilaag en beïnvloeden in sterke mate de doorlatendheid.

Voor de verwerkbaarheid van kleigrond moet deze voldoende stevigheid hebben om het verdichtingswerktuig te kunnen dragen en om te voorkomen dat de klei niet zijdelings wordt weggeperst. De grond moet ook niet zo stevig te zijn dat kluiten grond niet kunnen vervormen of breken en effectief verdichten van een kleilaag verhinderen. De consistentie bij een watergehalte lager dan bij  $I_c = 0,6$  is gebleken een maximum te zijn voor het effectief verdichten van de grond (Grondmechanica Delft, 2001). Voorgesteld wordt hier dat tevens het watergehalte hoger moet zijn dan  $0,9 \times$  de uitrolgrens van de grond.

Het watergehalte van de grond komt na het aanbrengen in evenwicht met de luchtvochtigheid in de omgeving. Indien de grond erg nat is aangebracht, daalt het watergehalte daardoor. Om ernstige scheuren in de grond te voorkomen moet het watergehalte niet hoger zijn dan bij  $I_c = 0,6$  voor de grond beneden ongeveer 1,5 m van het maaiveld en niet hoger dan  $I_c = 0,75$  voor grond binnen 1 m van het maaiveld. In de bovenste ongeveer 0,5 m zijn dergelijke scheuren binnen enige jaren door vergraven verdwenen. Op diepte blijven deze scheuren tientallen jaren in stand en beïnvloeden het functioneren van de dijk.

Het vochtgehalte van de klei bij het verdichten is van grote invloed op de kwaliteit. Waar eventueel levering van te natte grond aan de orde kan zijn, is het nodig een tijdelijk depot beschikbaar te hebben. Te natte kleigrond kan bij Nederlandse weer gedurende de periode

van 4 tot 8 weken, van het late voorjaar tot het vroege najaar, goed drogen indien de grond op een goed drainerende ondergrond wordt aangebracht in ruggen tot 0,5 m hoogte en taluds met een helling van 1:1 tot 1:1,5 met tussen de ruggen een goede afvoer van hemelwater.

Kluiten te natte klei, maar ruim beneden de vloeigrens, drogen in ruggen van zulke grond van iets minder dan 1 m hoogte en taluds met een helling van 1:1 in een periode van enkele (ongeveer 2 tot 4) maanden tot een geschikt watergehalte. Omzetten van de grond kan het proces enigszins versnellen. Het is nodig de laagten tussen de ruggen goed te draineren om staand water te voorkomen. Klei in ruggen tot 0,5 m hoogte en taluds met een helling van 1:1 droogt binnen enkele weken op een goed gedraineerde ondergrond.

(Het drogen van te natte kleigrond kan gebruik maken van de open stapeling van kleikluiten. Het meeste water van neerslag dringt niet of weinig in de kluiten en veel water sijpelt door de stapeling en kan door een geschikte drainage afgevoerd worden. De verdamping van het vrije kleioppervlak onder invloed van wind maakt de ontwatering ook bij niet zomerse omstandigheden effectief).

Voorkomen moet worden dat de kleigrond bij het verdichten een te hoog watergehalte krijgt en daarom is het nodig te voorkomen dat stagnerend water aanwezig is op het werk. Er moet daarom rekening worden gehouden met de noodzaak van drainage van depressies tussen nieuw en oud werk en van drainage van eventuele aanwezige sleuven. Waar kleigrond horizontaal moet worden aangebracht is het nodig dit vlak toch onder afschot aan te brengen. Een helling van 1:10 volstaat vaak al als het terrein vlak is, dat wil zeggen zonder diepere spoorvorming. Kleigrond die is aangebracht moet worden verdicht en het oppervlak moet zijn afgewerkt als hiervoor beschreven om te voorkomen dat neerslag zich tussen kluiten en in sporen in de klei verzameld.

Als grond teveel water bevat, bijvoorbeeld bij aanbrengen tijdens een periode met veel neerslag zonder voldoende drainage, of onder of nabij de waterlijn, kan er niet effectief verdicht worden. Eventueel te natte kleigrond dient gedroogd te worden zoals hiervoor is beschreven, dan wel kan de natte klei bijvoorbeeld behandeld worden met ongebluste kalk als de toepassing dat toelaat. Opgemerkt wordt dat behandeling van klei met toeslagmiddelen veel eigenschappen van de grond beïnvloedt en dat de consequenties van die beïnvloeding nagegaan moeten worden voor het functioneren van de grond. Voor de volledigheid wordt tevens opgemerkt dat er aanmerkelijke kosten verbonden zijn aan het verbeteren van grond met bijvoorbeeld ongebluste kalk.

#### 4.3 Verdichten

In de Nederlandse praktijk van dijkenbouw wordt uitgegaan van de verdichtende werking van de tracks van bulldozers. De kleigrond wordt in slagen van soms 0,2 m dikte, of, vaak 0,4 m dikte (zie onder andere de Standaard RAW bepalingen (CROW, 2015)), verdicht met enige passages van een bulldozer met tracks met een breedte van 0,4 – 0,6 m en een gewicht van meest 10 - 15 ton. De dieptewerking van deze verdichting is beperkt tot ongeveer 0,2 m bij voldoende overgangen als de klei niet te droog of te nat is (watergehalte tussen dat van 0,9 x uitrolgrens en  $I_c \geq 0.6$ ). De dikte van aangebrachte slagen moet in overeenstemming zijn met de doelstelling. Bij slagen met een dikte van 0,4 m, zoals vaak wordt voorgeschreven, betreft de effectieve verdichting iets minder dan de helft van de aangebrachte slag (Figuur 4.1). De helft van de slag is daardoor gevoelig voor klink en heeft een relatief hoge doorlatendheid en zal dat houden beneden de diepte met intensieve bodemvorming. Er zijn weinig specifieke ervaringen met het functioneren van anders verdichte kleigrond. Het wordt daarom voorgesteld om bij het aanleggen van dijken uit te gaan van een praktijk passend bij de

bestaande ervaring, dan wel andere wijzen van verdichten te specificeren en aan te tonen dat die andere werkwijzen tot tenminste dezelfde kwaliteit leiden.

De klink van dijklichamen van klei die op hiervoor beschreven wijze zijn gemaakt, bedraagt ongeveer 4 – 8 % van de aangelegde hoogte (Grondmechanica Delft, 2001). De specifieke doorlatendheid van de klei die op een dergelijke wijze is aangebrachte, is niet laag en bedraagt in de richting van de aangebrachte lagen effectief ongeveer  $10^{-5}$  m/s en soms veel hoger. In de buitenste ongeveer 1 m van de dijk volstaat een dergelijke mate van verdichten aangezien weer en wind in een periode van 1 tot 3 jaar de structuur van de grond geheel hebben aangepast (waarbij de infiltratiesnelheid en doorlatendheid ongeveer  $3 \times 10^{-5}$  m/s worden). Minder intensief verdichten, bijvoorbeeld wanneer de aangebrachte slagen veel dikker zijn dan 0,4 m, leidt regelmatig tot afschuivingen binnen een tijdsperiode van 1 jaar na aanleg (Figuur 4.2).



*Figuur 4.1 De onderste helft van de foto, beneden de spijker, is het met bulldozer verdichte deel van (dikte ongeveer 0,15 m) van een opgebrachte kleilaag, een slag met een dikte van 0,4 m. De bovenste helft van de foto is de onderkant van de daarop gelegen, volgende slag klei met een dikte van 0,4 m dikte. Ook die slag is verdicht met bulldozer overgangen, maar, zoals te zien, is de onderste helft van de slag niet verdicht*

Met de bak van een hydraulische kraan kan hooguit 0,1 m van de top van een aangebrachte laag worden verdicht (Grondmechanica Delft, 2001). Indien klei door omstandigheden met de bak van een kraan verdicht moet worden, dient de slagdikte niet meer dan 0,1 m te bedragen en moet zorg gedragen worden voor een gelijkmatige verdichting van de gehele aangebrachte slag.

Een zeer waterdichte, dichte kleilaag met een in situ specifieke doorlatendheid veel lager dan  $10^{-8}$  m/s, die tevens in zeer hoge mate bestand is tegen stroming en golfaanval, kan in de kern of aan de basis van een waterkering worden gemaakt en zal deze eigenschappen behouden boven de grondwaterspiegel indien er tenminste 1,5 m gronddekking op een voldoende breed deel van deze laag is, dan wel dat de laag meestal (negen maanden per jaar) minder dan 0,4 m boven het grondwaterpeil ligt. Een dergelijke waterdicht kleilichaam

vergt verdichten van kleigrond met een  $I_c$  van 0,6 in lagen van 0,2 m (met een wals (Grondmechanica Delft, 2001) of ander zwaar materieel).

Intensief verdichten van kleigrond in slagen met een dikte van 0,2 m of minder, resulteert in een kleipakket dat zeer goed bestand is tegen ontgroning door golven of overslag. Indien een dergelijk kleipakket buiten de invloed van weer en wind blijft, wordt deze hoge weerstand tegen ontgronden niet aangetast, zoals op meer dan 1,5 m beneden het dijkoppervlak in de onverzadigde zone, of beneden gemiddeld hoogwaterpeil langs de getijdewateren, of beneden 0,4 m boven grondwaterpeil dat meer dan negen maanden per jaar bestaat. Een op die manier aangebracht en verdicht kleipakket vertoont ook geen klink.



*Figuur 4.2* Overzicht, boven, van een verzakking van een dijktalud enige weken na aanleg. Het talud bestaat uit kleigrond die bijna niet is verdicht. Op sommige locaties is de met een bulldozer verdichte slag aangebrachte grond 0.9 m dik, op andere locaties is de slagdikte meestal meer dan 0.5 m. De foto links foto geeft een overzicht van losgepakte kleikruimels en kluiten in de kleilaag. (verdichtingsgegevens bekend bij Deltares: J.E.J. Blinde, J. Dekker, G.A.M. Kruse, M.J.M. Wijnberg)

#### 4.4 Verdichtingsgraad kleigrond

##### 4.4.1 Algemeen

Uit verschillende praktijkonderzoeken is gebleken dat de Proctorproef onvoldoende indicatie over de mate van verdichting van klei geeft voor de praktijk. In ons omringende landen, en bijvoorbeeld in de USA, wordt de proef hooguit bij uitzondering voor kleigrond met weinig grof materiaal, zoals in dijken in Nederland, wordt gebruikt (Grondmechanica Delft, 2001). In heel veel gevallen kan er voor die grond geen, voor verdichtingsgraad relevant, verband tussen dichtheid en watergehalte worden vastgesteld. De reden daarvoor is, naar het zich laat aanzien, de vaak in de kleigrond in de mal ingesloten lucht bij het compacteren voor de bepaling van de Proctorcurve. Zulke ingesloten lucht laat zich nauwelijks verdrijven uit een container met lagen van geroerde kleigrond.

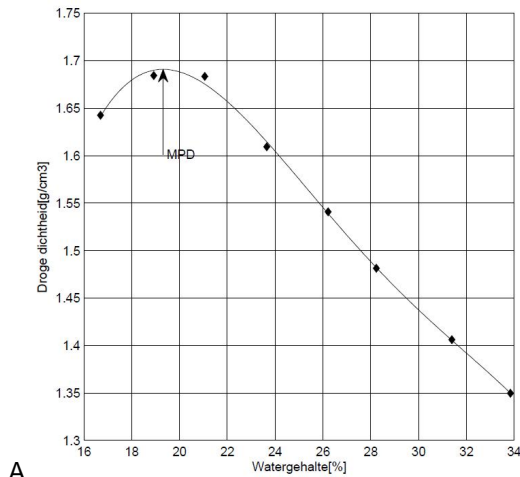
In het volgende wordt geïllustreerd dat de Proctorproef niet een geschikte proef is voor bepaling van de kwaliteit van een kleilaag. Voorgesteld wordt om op basis van de uitgevoerde verdichtingsinspanning de kwaliteit van een kleilaag die daarmee samenhangt, te bepalen.

##### 4.4.2 De Proctorproef in de praktijk

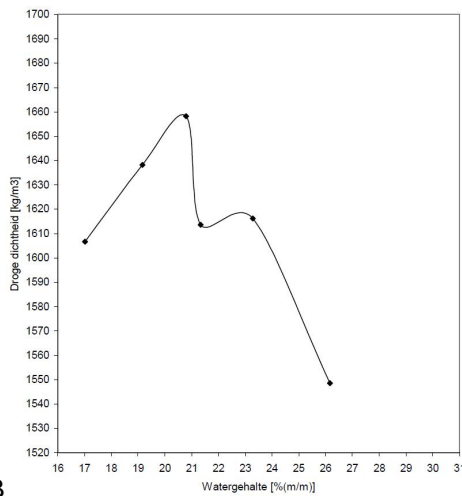
De toepassing van de Proctorproef voor de bepaling van de verdichtingsgraad van kleigrond, zoals in Nederland gewoonlijk voor dijken wordt gebruikt, is bij herhaling gebleken niet tot een effectieve controle van de verdichting te leiden. Figuur 4.3 laat grond van een kleibekleding zien met daarin een grote holle ruimte, zoals vaak voorkomt in de onderkant van een 0,4 m dikke slag die verdicht is met een bulldozer. Deze kleibekleding is nader onderzocht, waaruit onder andere bleek dat de grond met de holle ruimte, zoals in de figuur is te zien, een Proctordichtheid van 103 % had (verdichtingsgegevens bekend bij Deltares: J. Dekker, G.A.M. Kruse). Monsters van de vaak nog geheel rulle grond van de verzakte kleibekleding die in Figuur 4.2 is te zien, hadden een Proctordichtheid hoger dan de vereiste 97% en meestal hoger dan 100 % Proctordichtheid behorend bij het watergehalte van de monsters (verdichtingsgegevens bekend bij Deltares: J.E.J. Blinde, J. Dekker, G.A.M. Kruse, M.J.M. Wijnberg).



*Figuur 4.3 Een grote open ruimte in een kleipakket zoals die aanwezig is in het onderste deel van een aangebrachte 0,4 m dikke slag die verdicht is. Een gestoken monster van deze grond bleek met holle ruimte een Proctordichtheid van 103 % te hebben op basis van een volledige Proctorproef op de ter plaatse bemonsterde grond (verdichtingsgegevens bekend bij Deltares: J. Dekker, G.A.M. Kruse)*



A



B

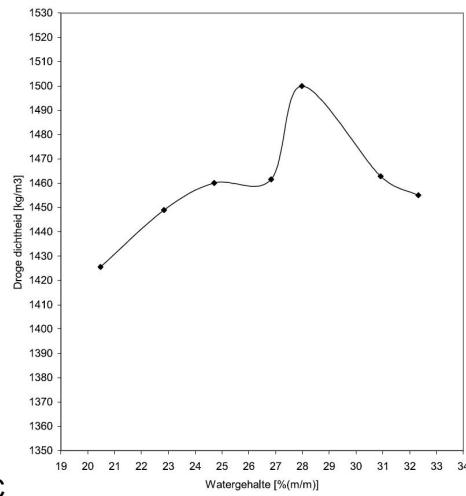
Figuur 4.4 Vier voorbeelden van resultaten van de bepaling van de Proctorcurve op klei van een werk met zeer beperkte verschillen in samenstelling. De curve in A heeft de vorm van een standaard curve. De curve in D heeft eveneens die vorm maar bevat geen gegevens voor hogere watergehalten. De curves in B en C laten onder andere, naar het zich laat aanzien, de effecten zien van de onvolkomenheid in de wijze van bepaling van verdichting van slecht luchtdoorlatende grond.

A: opgegeven maximum Proctor droge dichtheid (MPD) 16.6 kN/m<sup>3</sup> is 1694 kg/m<sup>3</sup> in de grafiek, optimum watergehalte 19.3 % (m/m)

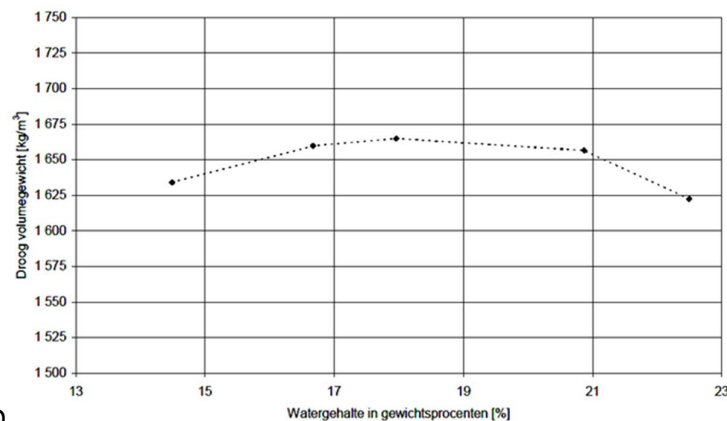
B: maximum droge dichtheid 1658 kg/m<sup>3</sup>, optimum watergehalte 20.8 % (m/m)

C: maximum droge dichtheid 1500 kg/m<sup>3</sup>, optimum watergehalte 28.0 % (m/m)

D: maximum droge dichtheid 1665 kg/m<sup>3</sup>, optimum watergehalte 18.0 % (m/m)



C



D



Figuur 4.4 geeft een viertal voorbeelden van Proctorcurves zoals die in de praktijk van dijkwerken worden gerapporteerd. De curves laten zien dat het vaststellen van de Proctordichtheid bij een bepaald watergehalte niet rechttoe rechtaan is. De Proctorcurves in de Figuur 4.4 A geeft een beeld zoals dat in tekstboeken wordt weergegeven en ook de kromme in Figuur 4.4 D heeft een ordentelijk verloop. De curves in Figuur 4.4 B en C tonen een opvallend verloop dat nogal willekeurig verdeelde meetpunten voor volumieke massa en watergehalte volgt, onder andere als gevolg van met name de hiervoor genoemde fysische problemen bij de bepaling. Echter, ook als de krommen een regulier verloop hebben geeft de ligging van de punten geen voldoende indicatie over de aanwezigheid van grotere holle ruimte in de grond. Opgemerkt wordt dat in de curve van Figuur 4.4 D de voor het werk relevante bepalingen van de volumieke massa en watergehalten ontbreken.

Opgemerkt wordt dat de in de Nederlandse praktijk vaak specifieke massa (droge volumieke massa) wordt gebruikt in de specificatie van de Proctordichtheid en dat in de oorspronkelijke (USA) publicaties, en in de huidige praktijk vaak ook, uitgegaan wordt van specifiek gewicht. Verwisseling van deze eenheden leidt voor de gerapporteerde volumieke massa van kleigrond tot een relevant verschil in waarde (2 %) als de eenheden door elkaar gebruikt worden bij het vaststellen van de verdichtingsgraad. In de Figuur 4.4 A wordt de specifieke massa in de curve gerapporteerd en wordt de maximum Proctordichtheid in  $\text{kN/m}^3$  gerapporteerd.

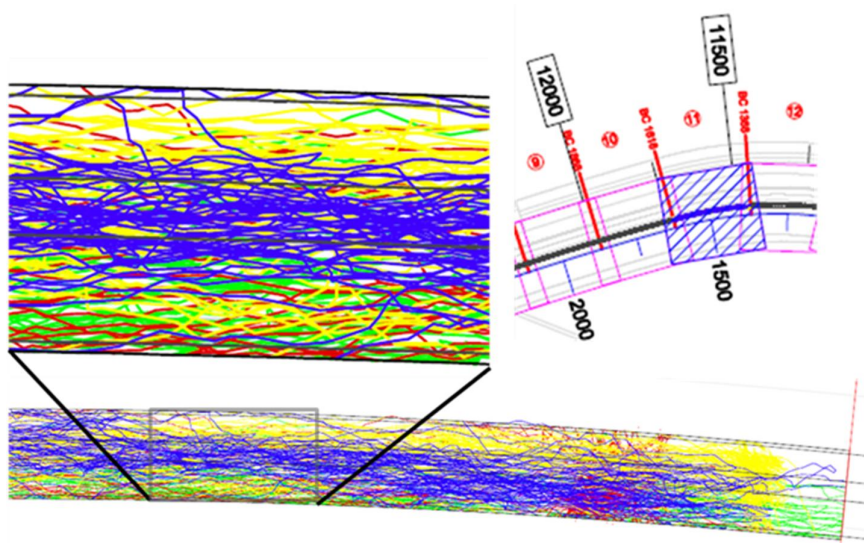
#### 4.4.3 Specificatie en controle verdichting op het werk

Het beoordelen van de verdichting van klei in een werk op basis van resultaten van de Proctorproef is in de praktijk onvoldoende gebleken. Er zijn geen andere geschikte en voldoende eenvoudig uit te voeren proeven bekend waarmee de verdichtingsgraad van kleigrond zodanig bepaald wordt dat de kwaliteit van kleilagen effectief geborgd kan worden. In het buitenland is het meer gebruikelijk de verdichtingsinspanningen voor een werk te specificeren en te monitoren. Bij gebrek aan andere geschikte methoden kan daarom thans de kwaliteit van de grond slechts voldoende worden beoordeeld met specificatie van de verdichtingsinspanning en op basis van intensieve controle op de wijze van uitvoering van het werk.

In omringende landen is controle op de wijze van uitvoering meer gebruikelijk voor het beoordelen van de mate van verdichten. De controle van de uitvoering van de verwerking en verdichting vergt dat er voor elke aangevoerde lading grond goed inzicht is in de verspreiding ervan en de intensiteit van het verdichten (aantallen overgangen). Deze methode kan worden ondersteund door bijvoorbeeld het vaststellen van de gangen van gebruikt materieel op het werk met GPS trackers op het materieel (bulldozers, dumpers) waarvan Figuur 4.5 een voorbeeld is. Voorgesteld wordt om voor kleibekledingen uit te gaan van verdichting met slagen met een dikte van 0,4 m in ten minste drie gangen met bulldozers met voldoende gronddruk (voorshands 10 ton met 0,4 m tracks), waarbij bijvoorbeeld 80% tenminste 3 x door de bulldozertracks bereden is.

Eventueel kan voor een gerede kleilaag tevens de kwaliteit visueel worden vastgesteld en, ter verificatie, met een meer nauwkeurige, maar arbeidsintensieve methode worden bepaald.

Met de visuele beoordeling moet worden vastgesteld of tenminste de helft van de dikte van de aangebrachte grond voor niet meer dan 5% van het oppervlak uit grotere (zichtbare) poriën bestaat en dat de niet zodanig verdichte lagen dunner zijn dan 0,2 m en minder dan 50 % van de totale dikte betreffen. Zulke visuele beoordeling vergt bekendheid met het visueel in detail beoordelen van de opbouw van kleigrond.



Figuur 4.5 GPS tracker data vastgelegd voor het vaststellen van de uitvoering bij verdichten van een kleilaag op een dijk

De verificatie van de visuele beoordeling kan door de ruimte van de macroporiën met metingen vast te stellen in een intact monster met afmetingen van  $0,15 \times 0,15 \times 0,15 \text{ m}^3$  op basis van volumieke massa in veldvochtige en in droge toestand en het watergehalte en de volumieke massa's van een drietal kleine monsters van  $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$  van dezelfde grond. De grond is goed verdicht als de volumieke massa van het grote monster niet meer dan ongeveer 1 % procent lager is dan die van het gemiddelde van de kleine monsters. Deze methode vergt echter grote nauwkeurigheid bij het bepalen van de afmetingen van de monsters.

Voor een adequate beoordeling van de verdichting van klei wordt voorgesteld de Proctorproef te vervangen door het objectief vaststellen van de verdichtingsinspanning (bijvoorbeeld met GPS trackers) met ter controle visuele inspectie van de verdichte grond in een waarnemingskuil, welke inspectie, waar nodig geacht, kan worden geverifieerd met een daarvoor ingerichte proef zoals hierboven beschreven.

#### 4.5 Overzicht over beschikbare grond en grondstromen

Om zekerheid te hebben over de uitvoerbaarheid van het project binnen een realistische planning, is inzicht in de tijdig beschikbare geschikte grond nodig. Inzicht in de kwaliteiten van de beschikbare grond is vooral onmisbaar bij het ontwerpen voor projecten waar sprake is van "werk met werk maken" en waarbij het plannen van de mogelijke inzet van beschikbaar komende soorten grond optimalisaties mogelijk maakt. Het is in veel projecten nuttig om zekerheid over levering van geschikte grond te verkrijgen in de contractfase dan wel over alternatieven voor levering van geschikte grond te beschikken. Dit geldt met name ook voor projecten waar werk met werk gemaakt wordt en er bij het ontwerp van de waterkering met de beschikbare grond rekening gehouden moet worden door de bij het contract betrokken partijen.

Voor sommige projecten is het van belang al tijdens het ontwerp te weten of er ruimte voor tussenopslag van grond gereserveerd moet worden die geschikt is om bijvoorbeeld grond te

drogen, of in verband met grondbeslag in projecten met “werk met werk maken”. De depotruimte moet voldoende gedraineerd zijn om kleigrond niet natter te laten worden dan de aangevoerde grond is. De aangevoerde kleigrond wordt in kluiten aangevoerd en gestort en kan in een nat depot daarom zeer nat worden door het verknedden bij het storten en vergraven.

Grond in natuurlijke voorkomens, of in depots, of aan te passen dijken vertoont ruimtelijke variatie in eigenschappen. Waar er eisen aan de kwaliteiten van de grond gesteld worden, moet bij het ontgraven met deze variatie rekening gehouden worden en is gedegen instructie nodig voor de betrokkenen, met name de machinisten. Aandacht moet vooral besteed worden aan de procedures die gehanteerd moeten worden bij overgangen naar sterk zandige of naar venige grond en die gericht zijn op beperken of verhinderen van vermenging van klei met andere grond. Ook hier geldt dat met name bij “werk met werk maken” de heterogeniteit van de grond vaak als complicerende factor optreedt die de nodige aandacht vergt en eisen stelt aan het ontwerp waar de grond gebruikt kan gaan worden. In veel gevallen moet voor de uitvoering dan rekening worden gehouden met depotruimten waarmee gescheiden uitgraven van grond wordt gefaciliteerd.

Vanwege tijdsdruk bij de uitvoering in het stadium dat kleibekledingen gemaakt worden, is het nodig dat de kwaliteit van de aangevoerde grond en van het opgeleverde werk efficiënt beoordeeld kunnen worden. Immers, afkeuren en verwijderen zetten vaak een nauwelijks of niet aanvaardbare druk op de uitvoering. Het beoordelen van de geschiktheid van de geleverde grond vergt met name in die omstandigheden, dat er op het werk toezicht is dat de verschillen in kwaliteiten van klei in de praktijk kan beoordelen. Gezien de variatie in voorkomens van grond en de heterogeniteit van kleigrond is het daarom nodig dat bij de uitvoering beschikt kan worden over inzicht in materialen en omgevingsinvloeden op kleigrond en om de kwaliteit van de opgeleverde producten vast te stellen. Voor het beoordelen van grond voor dijken is ter zake ontwikkelde ervaring nodig voor de personen die de beoordeling moeten uitvoeren zoals omschreven staat in paragraaf 2.4.3.

#### 4.6 Ontwikkeling graszode

Het ontwikkelen van een graszode vergt enige tijd en vereist een geschikt substraat. Het substraat voor een zich ontwikkelende zode, moet voldoende open zijn. Een dergelijk substraat is aanwezig in schrale klei, ook na niet zeer intensief verdichten. Stevige kleigrond die is verdicht, leent zich aanvankelijk slecht voor kolonisatie door grasplanten. De toplaag van een dergelijke verdichte kleilaag is echter na een vorst- of winterperiode voldoende open voor het vestigen van grasland.

Om te functioneren moet zodevorming van een grasbekleding ruim voor de winter beginnen. Het aanbrengen van een toplaag van ongeveer 0,2 m schrale klei bij het taludoppervlak faciliteert deze tijdige ontwikkeling van een zodelaag. In het geval dat een kleibekleding van stevige klei het stormseizoen ingaat voordat zich een geschikte graszode heeft ontwikkeld, kan gebruik gemaakt worden van de relatief zeer hoge bestendigheid van geroerde verdichte kleigrond. Indien de golfbelasting niet hoog is, zoals in het grootste deel van het rivierengebied, volstaat bij het ontbreken van een graszode om de het talud van stevige klei te verdichten en glad af te werken. Een dergelijk talud kan belasting van beperkte golfhoogte ( $H_s = 0,75 - 1,0$  m) gedurende vele dagen doorstaan zonder relevante schade. Mocht toch een hogere, maar niet zeer hoge belasting optreden, dan zal in de strekkingen geen schade ontstaan die de veiligheid bedreigt als de kleibekleding voldoende dik is (0,8 m of meer) en over de gehele dikte voldoende verdicht is. De kosten van een dergelijke schade zijn lager

dan die van een effectief geborgde krammat bekleding langs een dijk over de gehele hoogte van een talud.

Het beheer moet zorgdragen voor het ontwikkelen van een geschikte zodelaag op een dijk. Op zowel schrale klei als op stevige klei kan zich een dichte zode vormen bij geschikt beheer. Waar schrale klei wordt toegepast aan het maaiveld, moet rekening worden gehouden met het optreden van kleine beschadigingen op taluds (kleine afschuivingen en geulvorming) vanwege de in de eerste jaren geringe stabiliteit op decimeterschaal van de toplaag en effecten van intense buien.

#### 4.7 Samenvatting van aanbevelingen

In de paragrafen in dit hoofdstuk komen aandachtspunten aan de orde voor klei in het werk bij de aanleg van onderdelen van kleigrond in dijken. Samenvattend zijn de gevolgtrekkingen:

Inzicht in beschikbare grond:

- Een tijdig en voldoende gedetailleerd inzicht in voor aanleg van kleilagen benodigde en beschikbare grond is nodig en dient naast specificatie van de kwaliteit van de grond, inzage te geven in ruimtelijke variatie van te winnen kleivoorkomens en de begrenzingen met daaronder en -boven gelegen grond. Het inzicht kan indien nodig meerdere scenario's voor levering van de grond omvatten. Deze overwegingen gelden temeer voor "werk met werk maken" projecten.
- Beschikbaar hebben van inzicht in de kwaliteiten van grond en van de invloeden daarop draagt bij aan de efficiëntie en maakt optimalisaties mogelijk voor met name "werk met werk maken" projecten.
- De eventuele noodzaak en mogelijkheden voor tijdelijke depots moet onderkend worden en de voor de inrichting en aanleg benodigde randvoorwaarden moeten vastgesteld worden.

Klei op het werk:

- Er mag geen vrij water op het werk zijn op plaatsen waar klei verwerkt wordt en de drainage van het werk dient daartoe ingericht te zijn en de werkoppervlakken dienen voldoende afschot te hebben.
- Indringen van vrij water, als gevolg van neerslag, in een kleilaag moet tegengegaan worden door verdichten en glad afwerken van het oppervlak van de kleigrond dat voldoende afschot moet hebben.
- Te natte kleigrond (maar met in situ watergehalte ruim beneden de vloeigrens) kan gedroogd worden binnen een periode van 1 tot 3 maanden in de periode van het late voorjaar tot het vroege najaar in Nederland onder niet extreem natte omstandigheden. Bij gebrek aan tijd kan te natte klei met ongebluste kalk verwerkbaar en geschikt voor toepassing gemaakt worden, waarbij kosten een belangrijke overweging vormen en waarbij rekening gehouden moet worden met verandering van overige eigenschappen.

Verdichten:

- Met de in Nederland in de dijkenbouw gebezigde methode van verdichten van 0,4 m dikke slagen kleigrond met een bulldozer van 10 - 15 ton met 0,4 – 0,6 m brede tracks wordt een kleipakket gevormd waarvan steeds slechts ongeveer de bovenste helft van elk van de slagen goed verdicht is. Deze werkwijze resulteert in een klink van 4 – 6 % en in een niet zeer lage specifieke doorlatendheid.

- Intensief verdichten van kleigrond in slagen met een dikte van 0,2 m of minder, resulteert in een kleipakket met een lage doorlatendheid dat zeer goed bestand is tegen ontgroning door golven of overslag.
- De Proctorproef geeft geen geschikte informatie voor het beoordelen van de kwaliteit van de verdichting van kleilagen zoals die gebruikt worden in dijken in Nederland.
- Het verdient aanbeveling de kwaliteit van de kleilagen te borgen door het voorschrijven van de te volgen werkwijze en van controle daarop in het werk, wat gefaciliteerd kan worden met bijvoorbeeld GPS tracking.

Ontwikkeling graszode en taludbescherming:

- Een graszode komt ook op stevige klei tot wasdom indien er in de winter na aanleg van een kleibekleding een kruimelige toplaag is ontstaan vooral door vorstwerking.
- Een goed verdichte en vlakke kleibekleding kan in de eerste winter na aanleg ook zonder graszode een belasting van beperkte golfhoogte, zoals in het merendeel van het rivierengebied, gedurende vele dagen doorstaan zonder relevante schade. Bij een hogere golfbelasting in het rivierengebied zal er geen, de veiligheid bedreigende, schade ontstaan als de kleibekleding voldoende dik is (0,8 m of meer) en over de gehele dikte voldoende verdicht is.

## 5 Conclusies

In de afgelopen twee decennia is het inzicht in het toepassen van klei in dijken vergroot. De verworven inzichten kunnen worden gebruikt voor het optimaliseren van het ontwerpen en realiseren van dijken waarbij rekening gehouden kan worden met beschikbare grond. De inzichten dragen tevens bij aan beter controleerbare afwegingen voor contractpartners waar het gaat om het leveren en verwerken van klei in dijken. De verwachting is dat daar economische voordelen mee gehaald kunnen worden.

Er is beter inzicht ontstaan in beoordelen van klei voor toepassing in dijken. De indeling in categorieën klei kan worden verbeterd, vereenvoudigd. Verbetering van de kwaliteitsborging van het beoordelen van klei kan bijdragen aan het tijdig en efficiënter inventariseren en inzicht krijgen in de kwaliteit van voor het werk beschikbaar te stellen grond. Ook de kwaliteit van het opgeleverde werk kan beter, met meer zekerheid, beoordeeld worden, zowel wat betreft de aard van de gebruikte grond als de toestand waarin het is opgeleverd.

De verworven inzichten geven mogelijkheden om met meer detail de consequenties voor de standzekerheid van dijken na te gaan in het geval van de ontwikkeling van beperkte schade. Deze consequenties kunnen in het ontwerpen worden betrokken. Er kan met meer zekerheid een afweging worden gemaakt tussen beschikbare materialen en de keuze voor taludhelling, taludbekleding en dikte kleibekleding. Bovendien kan de standzekerheid van de dijk beter vastgesteld worden.

In het rapport worden aanbevelingen gedaan voor verbeteringen van de werkwijzen en worden overwegingen daarvoor gegeven. De aanbevelingen die in dit rapport worden genoemd, zijn voor algemene doeleinden samengevat. De samenvatting bestaat uit een tabel die in een separaat document is opgenomen (Deltares, 2016).

De toegenomen mogelijkheden bij het ontwerpen en de verbetering van de beoordeling van grond kunnen de efficiëntie van “werk met werk maken” projecten verbeteren.

Risico's van standzekerheid van dijken en economische overwegingen kunnen met de verworven inzichten over kwaliteit van grond en de mogelijkheden voor de geometrie van dijklichamen met meer zekerheid vastgesteld worden.

## Referenties

- CROW. (2015). *Standaard RAW Bepalingen 2015*.
- De Raadt, W.S., D-J. Jaspers Focks, A Van Hoven. (2015). How to determine the phreatic surface in a dike during storm conditions with wave overtopping: A method applied to the Afsluitdijk. *Schweckendiek, T. et al. (Eds.) Geotechnical Safety and Risk V* (pp. 509 - 515). Rotterdam: IOS Press, Amsterdam.
- Deltares. (2011). *Grondeigenschappen van belang voor ontgroning van klei met bodemstructuur*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2016). *Tabel met aanbevelingen voor verbetering gebruik klei bij dijkversterking*. Delft: Deltares, memo, 1220633-000-GEO-0013, 22 december 2016, 2 bladzijden.
- Diermanse, F. (2016). *WTI - Onzekerheden*. Delft: Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004 voor RWS, 130 pp.
- ENW. (2008). *Addendum I bij de Leidraad Rivieren t.b.v. het ontwerpen van rivierdijken*. Den Haag: Ministerie Verkeer en Waterstaat, rapport, 2008-12-10, pp 34.
- ENW. (2008). *Addendum I bij de leidraad rivieren, ten behoeve van het ontwerpen van rivierdijken*. RWS, 23 pp. Den Haag: RWS.
- GeoDelft. (2006). *Onderzoek toepassing kleiafdekking Nedereindse Plas*.
- Grondmechanica Delft. (1994). *Eerste analyse van Deltagootproeven op een grastalud*. Delft: GeoDelft, Rapport, CO-334430 voor Waterloopkundig Laboratorium / RWS DWW, 64 pp.
- Grondmechanica Delft. (1995). *Eindrapportage veld- en laboratoriumonderzoek Dijkoverslagproef*. Delft: GeoDelft, Rapport CO-342770/121 voor Rijkswaterstaat DWW, 52 pp.
- Grondmechanica Delft. (2001). *Klei in constructieve ophogingen, regels, richtlijnen en achtergronden*. Delft: Rapport voor RWS-DWW, CO-397360/03, 54 pp.
- Hoven, A. v. (2014). *Residual dike strength after macro-instability*. Deltares rapport 1207811-013-HYE-0001 voor RWS, 61 pp. Delft.
- Hoven, A. v. (2015a). *Overslag overloop rapportages*. Deltares rapport. Delft: Deltares.
- Hoven, A. v. (2015b). *Schematiseringshandleiding voor toetsing grasbekleding*. Delft: Deltares rapport 1220086-HYE-0002 voor RWS, 49 pp.
- Hoven, A. v. (2015c). *WTI 2017 Onderzoek en ontwikkeling landelijk toetsinstrumentarium: Sliding of inner slope cover layer during wave overtopping*. Deltares rapport 1209437-003 voor RWS, 82 pp. Delft: Deltares.
- HWBP. (2014). *Programmarapportage. Hoogwaterbeschermingsrapportage*, 36 pp. Den Haag.
- Klein Breteler, M. (2011). *Erosie van een dijk na bezwijken van de steenzetting door golven*. Delft: Deltares rapport 1204200-008-HYE voor RWS, 91 pp.
- Klein Breteler, M. (2015). *Residual strength of grass on clay in the wave impact zone. Basis for safety assessment method of WTI-2017, product 5.10*. Delft: Deltares rapport 1209437-11HYE-0004, 29 pp. .
- Klein Breteler, M., & Mourik, G. v. (2016). *Schematiseringshandleiding voor toetsing steenzettingen*. Delft: Deltares rapport 1220086-013 voor RWS, 22pp.
- Kruse, G. (1998). *Analyse van Deltagootproeven op een grastalud*. Delft: Grondmechanica Delft, Rapport356460/05, 83 pp.
- Kruse, G. (2010). *Studie voor Richtlijnen klei op dijkstaluds in het riviereengebied*. Delft: Deltares, rapport, 1202512-0000-GEO-0002, Versie 3, definitief.
- Kruse, G. (2013). *Toepassen klei met hoger zoutgehalte in dijklichamen*. Delft: Deltares, Brief naar Projectbureau Zeeweringen, 5 pp.

- Kruse, G. (2015). *Klei eigenschappen in verband met het project Ruimte voor de Rivier IJsseldelta*. Delft: Deltares, Brief, 32 pp.
- Ministerie van I&M. (2014). *Regeling van de Minister van Infrastructuur en Milieu, van 10 maart 2014, nr. IENM/BSK-2014/57174, houdende vaststelling van de Regeling subsidies hoogwaterbescherming*> *Staatcourant 2014. Nr. 7049*. Den Haag.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Leidraad Rivieren*.
- Mourik, G. (2015). *Prediction of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack; product 5.21*. Delft: Deltares.
- Nugroho, S., & Kruse, G. (2013). *Pore water pressure gradients in soil of dike slopes during simulated wave attack*. *Deltares rapport1206012-011 voor RWS*, 32 pp. Delft: Deltares.
- RAW. (2015). *Standaard RAW Bepalingen 2015*. Ede: CROW.
- Rijkswaterstaat. (2012). *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Steeg, P. v. (2014). *Residual strength of grass on river dikes under wave attack*. Delft: Deltares rapprt 1207811-009-HYE-0011 voor RWS, 59 pp.
- TAW. (1996). *Technisch Rapport Klei voor Dijken*. Lelystad: Rijkswaterstaat, TR-17, 52 pp.
- Van der Meer, J., Van Hoven, A., Paulissen, M., Steendam, G., Verheij, H., Hoffmans, G., et al. (2012). *Handreiking Toetsen Grasbekledingen op Dijken t.b.v. het opstellen van het beheerdersoordeel (BO) in de verlengde derde toetsronde*. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Vroeg, d. J., Kruse, G., & Gent, M. v. (2002). *Processes related to breaching of dikes. Erosion due to overtopping and overflow*. Delft: Delft Cluster, Rapport, DC-030202/H3803.
- Waterloopkundig Laboratorium. (1993). *Grasdijken: meetverslag grootschalig modelonderzoek*. Delft: Rapport, H 1565, voor RWS DWW, 27 pp.
- Waterloopkundig Laboratorium. (2007). *Deltagootproeven naar de sterkte van keileem. Keileem van de Wieringermeerdijk, Deel 1*. Delft: WL, Rapport H 4739, voor RWS Noord-Holland, 56 pp.