

## DIV Toename sterkte in de tijd

Veld,- laboratoriumonderzoek en eerste analyse



## **DIV Toename sterkte in de tijd**

Veld,- laboratoriumonderzoek en eerste analyse

### **Auteur(s)**

Alexander van Duinen

Theo Stoutjesdijk

## DIV Toename sterkte in de tijd

Veld,- laboratoriumonderzoek en eerste analyse

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Opdrachtgever</b>  | Waterschap Rivierenland  |
| <b>Contactpersoon</b> | DIV  |
| <b>Referenties</b>    |  |
| <b>Trefwoorden</b>    | Macrostabieliteit, toename schuifsterkte in de tijd, isotachen |

### Documentgegevens

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| <b>Versie</b>        | 2.0                   |
| <b>Datum</b>         | 12-04-2024            |
| <b>Projectnummer</b> | 11209373-002          |
| <b>Document ID</b>   | 11209373-002-GEO-0004 |
| <b>Pagina's</b>      | 32                    |
| <b>Classificatie</b> |                       |
| <b>Status</b>        | Definitief            |

### Auteur(s)

|  |                      |  |
|--|----------------------|--|
|  | Alexander van Duinen |  |
|  | Theo Stoutjesdijk    |  |

# Samenvatting

Met het onderzoek Toename sterkte in de tijd wordt invulling gegeven aan de wens om op een verantwoorde manier een eventuele toename van sterkte van het materiaal in de ondergrond in rekening te kunnen brengen bij stabiliteitsbeschouwingen van waterkeringen.

Dit rapport doet verslag van de eerste stap in dit onderzoek. In deze eerste stap is onderzocht of de toename van sterkte in de tijd van het materiaal onder dijken aangetoond kan worden of niet, en zo ja, of deze beschreven kan worden met het isotachen-concept. In de internationale literatuur zijn verschillende implementaties van het isotachen-concept beschreven. In dit rapport is specifiek gekeken naar de implementatie zoals die in de Nederlandse adviespraktijk wordt toegepast.

Uit het uitgevoerde veld- en laboratoriumonderzoek blijkt dat er in zekere mate wel sprake is van toename van sterkte in de tijd, maar deze is minder dan voorspeld wordt met de isotachen-methode.

Er zijn twee locaties geselecteerd waar geruime tijd geleden dijken zijn versterkt. Bij beide locaties is een flinke ophoging aangebracht op een slappe ondergrond. Naar verwachting is de invloed van twee-dimensionale effecten in de ondergrond door ongelijke ophoging beperkt. Deze locaties zijn gevonden bij de Lekdijk West (dijkteruglegging Bergambacht) en bij de Anthonie Fokkerweg in Papendrecht (afsluiting Gantel). Op beide locaties zijn 3 tot 4 sonderingen en 1 boring uitgevoerd. Vervolgens zijn monsters geselecteerd en terreinspanningen bepaald voor DSS-, triaxiaal- en Ko-CRS proeven in het laboratorium.

De huidige implementatie van het isotachen-model blijkt de ontwikkeling van de OCR in de tijd te overschatten. Er blijkt wel enige toename van de sterkte in de tijd: de OCR-waarde van de beproefde monsters zit tussen 1,0 en 1,5. Dit is geen verwaarloosbare toename, maar minder dan voorspeld werd met de isotachen-methode voorafgaand aan het onderzoek. Het gevolg hiervan is dat de combinatie van de huidige implementatie van het isotachen-model en de SHANSEP-benadering voor het schatten van de toekomstige ongedraineerde schuifsterkte leidt tot een overschatting van deze ongedraineerde schuifsterkte.

Het is van belang na te gaan waarom de huidige implementatie van de isotachen-methode niet werkt voor deze toepassing, welke consequenties de bevindingen hebben voor andere toepassingen van de isotachen-methode, met name het voorspellen van zettingen, en of er modelmatige verbeteringen op dit punt mogelijk zijn. Dit valt buiten de scope van dit onderzoek.

Op basis van de gevonden resultaten kan wel een pragmatische aanbeveling worden gegeven voor de adviespraktijk. De gevonden OCR-waarden voor beide locaties liggen tussen 1,0 en 1,5 met een gemiddelde waarde van 1,24, een standaardafwijking van 0,10 en een karakteristieke ondergrenswaarde van 1,09. Deze waarden gelden voor een kruiptijd van 23 jaar en voor alle kleiige en venige grondsoorten. Deze waarden kunnen ook worden toegepast in dijkversterkingsprojecten, waar stabiliteitsbermen worden ontworpen voor een planperiode van minimaal 23 jaar. De genoemde waarden kunnen worden gebruikt om invulling te geven aan de verwachte 'pre overburden pressure' (POP) behorend bij de toekomstige dagelijkse omstandigheden (TDO), zoals voorgesteld in KPR-Factsheet omgang met grensspanning in het ontwerp (KPR, 2018).

# Inhoud

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
|          | <b>Samenvatting</b>                             | <b>4</b>  |
| <b>1</b> | <b>Context, doel en opzet van het onderzoek</b> | <b>6</b>  |
| 1.1      | Inleiding en context                            | 6         |
| 1.2      | Theoretisch kader                               | 6         |
| 1.3      | Doel van het onderzoek                          | 8         |
| 1.4      | Uitwerking van de onderzoeksopzet               | 9         |
| 1.5      | Leeswijzer                                      | 10        |
| <b>2</b> | <b>Veld- en laboratoriumonderzoek</b>           | <b>11</b> |
| 2.1      | Locatiekeuze                                    | 11        |
| 2.2      | Locatie Bergambacht                             | 11        |
| 2.3      | Papendrecht Afsluiting Gantel                   | 14        |
| 2.4      | Veldonderzoek                                   | 15        |
| 2.4.1    | Locatie Dijkteruglegging Bergambacht            | 15        |
| 2.4.2    | Locatie afsluiting Gantel bij Papendrecht       | 16        |
| 2.5      | Laboratoriumonderzoek                           | 17        |
| 2.5.1    | Algemeen  | 17        |
| 2.5.2    | Bergambacht                                     | 17        |
| 2.5.3    | Papendrecht                                     | 19        |
| <b>3</b> | <b>Eerste analyse</b>                           | <b>21</b> |
| 3.1      | Berekende parameters                            | 21        |
| 3.2      | Bergambacht                                     | 22        |
| 3.3      | Papendrecht                                     | 24        |
| 3.4      | Analyse   | 25        |
| <b>4</b> | <b>Conclusies en aanbevelingen</b>              | <b>28</b> |
| <b>5</b> | <b>Referenties</b>                              | <b>31</b> |

# 1 Context, doel en opzet van het onderzoek

## 1.1 Inleiding en context

Binnen het project De Innovatie Versneller (DIV) is ruimte om onderwerpen die met een relatief korte slag van nut zijn voor HWBP-projecten (ontwerp en uitvoering van dijkversterkingsprojecten) te accommoderen. Het onderzoek Toename sterkte in de tijd is zo'n onderwerp. De redenen voor dit onderzoek zijn tweeledig:

- Voor toekomstige dijkversterking valt hier naar verwachting forse winst te behalen, doordat minder omvangrijke dijkversterking nodig is. Hier wordt in dijkversterkingsontwerpen soms op geanticipeerd door een OCR-waarde voor de eindsituatie groter dan 1 te kiezen. Deze keuze echter nog niet aangetoond en gevalideerd door onderzoek. De keuze kan ook zijn een OCR waarde van 1 aan te houden. Dit is op basis van de theorie conservatief.
- Voor beoordeling van dijken, die reeds versterkt zijn, kan het in rekening brengen van het effect van toename van sterkte in de tijd tot gevolg hebben dat dijken minder snel in aanmerking komen voor versterking; de levensduur kan worden opgerekt.

De huidige stand van zaken is dat er onder deskundigen overeenstemming is over het feit dat er onder grondophogingen sprake is van (mogelijk aanzienlijke) toename van de ongedraineerde schuifsterkte van de ondergrond. Er is er echter nog geen algemeen geaccepteerde (gevalideerde) methode waarmee hier in de praktijk rekening kan worden gehouden. In de praktijk zijn er drie werkwijzen:

- Er wordt geen rekening gehouden met toename van sterkte in de tijd.
- Er wordt een keuze gemaakt voor de sterkte waarmee gerekend wordt (bijvoorbeeld POP = 20), maar hier is geen onderbouwing voor en het is evenmin gebruikelijk om deze keuze achteraf te verifiëren.
- De methode toekomstig dagelijkse omstandigheid (TDO): in deze methode wordt voor de grensspanning gekeken naar toekomstige dagelijkse omstandigheden. Deze methode is opgenomen in het KPR-Factsheet omgang met grensspanning in het ontwerp (KPR, 2018).

Hieruit spreekt dat er in de praktijk een duidelijke wens is om gebruik te maken van de extra sterkte in de tijd, maar er is geen onderbouwde manier om dit op een verantwoorde manier in rekening te brengen. Het onderzoek Toename sterkte in de tijd wil hierin voorzien.

Dit rapport doet verslag van de eerste stap in het onderzoek naar de ontwikkeling van ongedraineerde schuifsterkte in de loop der tijd als gevolg van veroudering. Theoretisch wordt een toename van deze sterkte voorspeld op basis van het isotachen-model. Verificatie van deze theorie kan betrekkelijk eenvoudig plaatsvinden op basis van gegevens die zijn verkregen uit veldmetingen aan geruime tijd geleden gerealiseerde dijkversterkingsprojecten, waarin deze sterkte-toename zich inmiddels zou moeten hebben gerealiseerd.

## 1.2 Theoretisch kader

Deze paragraaf geeft een korte samenvatting van de te valideren theorie. In de beoordeling van de stabiliteit van dijken en het ontwerp van dijkversterkingen op slappe grond wordt conform de vigerende leidraden (RWS, 2019) gebruik gemaakt van de ongedraineerde schuifsterkte,  $s_u$ .

Deze kan worden bepaald volgens een procedure die aangeduid met *Stress History And Normalised Soil Engineering Properties* SHANSEP. (o.a. Ladd, 1991). De SHANSEP procedure leidt tot de volgende uitdrukking:

$$s_u = S(OCR)^m \sigma'_v$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_v}, \quad m = \frac{CR-RR}{CR}, \quad m = \frac{b-a}{b} \quad (1.1)$$

Waarin:

- $s_u$  = ongedraineerde schuifsterkte.
- $S$  = schuifsterkte ratio voor normaal geconsolideerde condities.
- OCR = over consolidatie ratio.
- $\sigma'_v$  = effectieve verticale spanning.
- $\sigma'_{vy}$  = grensspanning.
- RR = re-compressie ratio; stijfheid bij herbelasten.
- CR = compressie ratio; stijfheid normaal geconsolideerd gedrag.
- $a$  = re-compressie ratio; stijfheid bij herbelasten op basis van natuurlijke rek.
- $b$  = compressie ratio; stijfheid normaal geconsolideerd gedrag, op basis van natuurlijke rek.

In de bovenstaande vergelijking wordt de macht  $m$  uitgedrukt in de verhouding van de één-dimensionale stijfheidseigenschappen. Internationaal wordt hier veelal de stijfheden gebaseerd op lineaire rek toegepast. In de Nederlandse praktijk wordt conform schematiseringshandleiding (RWS, 2019) de stijfheden gebaseerd op de natuurlijke rek toegepast. Over het algemeen levert dit dezelfde waarde op.

Indien voor de beoordeling van macrostabiliteit of voor het ontwerp van een dijkversterking de toekomstige sterkte moet worden bepaald, dient, conform vergelijking (1.1) de ontwikkeling van de OCR te worden bepaald. De andere parameters zijn grondeigenschappen die aangenomen worden niet te veranderen in de tijd. Een verandering van OCR is het gevolg van een verandering in de verticale effectieve spanning,  $\sigma'_v$  of van de grensspanning,  $\sigma'_{vy}$ .

De waarde van  $\sigma'_v$  zal veranderen indien de geometrie van het dijklichaam wordt aangepast of indien er significante veranderingen in waterspanningen optreden. Bij een gelijkblijvende  $\sigma'_v$  kan de grensspanning en daarmee OCR toenemen als gevolg van aging. Zoals aangegeven in de voorgaande paragrafen geeft het isotachen-raamwerk de mogelijkheid om de ontwikkeling van OCR als gevolg van aging te berekenen.

Een complete toelichting op het isotachenmodel valt buiten de scope van dit rapport. Het isotachenmodel zoals dat is geïmplementeerd in de Nederlandse adviespraktijk is onder andere beschreven in Deltares (2021), Den Haan (1994a, 1994b en 2008) Visschedijk (2010), CROW (2022).

Conform de huidige implementatie van het isotachenmodel volgt de ontwikkeling van de OCR uit (Deltares, 2021):

$$\tau = \tau_0 (OCR)^{\frac{CR-RR}{c_\alpha}}, \quad \tau = \tau_0 (OCR)^{\frac{b-a}{c}} \quad (1.2)$$

Waarin:

- $\tau$  = equivalente tijd.
- $\tau_0$  = equivalente tijd behorend bij referentie isotach,  $\tau_0 = 1$  dag.
- $c_\alpha$  = kruipparameter op basis van lineaire rek.
- $c$  = kruipparameter op basis van natuurlijke rek.

Net als in vergelijking (1.1) wordt vergelijking (1.2) zowel toegepast op basis van lineaire rek als op basis van natuurlijke rek. Beiden zijn hier gegeven, in aansluiting op de schematiseringshandleiding wordt in dit rapport vooral de parameters op basis van de

natuurlijke rek toegepast. De verhouding van stijfheden in vergelijking (1.2) wordt soms ook aangeduid met  $m$ . Echter, dit moet niet verward worden met de  $m$  uit vergelijking (1.1).

Vergelijking (1.2) kan worden omschreven tot:

$$OCR = \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{\frac{c}{b-a}} \quad (1.3)$$

Vergelijking (1.3) laat zien dat als de tijd,  $\tau$ , toeneemt, onder de voorwaarde dat de belasting gelijk blijft, OCR toeneemt. Voor Nederlandse grondsoorten ligt de verhouding  $c/(b-a)$  in de orde van 0,1 voor humeuze gronden tot 0,05 voor siltige kleien.

De verificatie die in dit rapport wordt besproken heeft betrekking op vergelijking (1.3). De SHANSEP benadering, vergelijking (1.1) staat in dit rapport niet ter discussie. Wel dient vergelijking (1.1) te worden gebruikt om de voorspelde toename in OCR, volgens vergelijking (1.3) te vertalen naar een toename in  $s_u$ .

### 1.3 Doel van het onderzoek

Het onderzoek gaat over de ontwikkeling van ongedraineerde schuifsterkte in de loop der tijd als gevolg van veroudering. Theoretisch wordt een toename van deze sterkte voorspeld op basis van het isotachen-model (paragraaf 1.2). In het onderzoek moet een aantal vragen worden geadresseerd:

1. Kan de toename van de ongedraineerde schuifsterkte in de praktijk worden bevestigd?
2. Kan deze toename vervolgens op een correcte manier worden beschreven op basis van de theoretische inzichten van het isotachen-model?
3. Indien het niet overeenkomt, hoe kan het model worden aangepast of nieuw model worden ontwikkeld om wel tot een correcte voorspelling te komen?
4. Op welke wijze kan de sterkte-toename in de tijd in dijkversterkingsontwerpen op een verantwoorde manier in rekening worden gebracht? Eenvoudig gesteld: is dat een vaste waarde voor de OCR, is dat de sterkte na 1, 2 of meer jaar, of is een (semi-) probabilistische benadering de beste wijze?

Het doel van het totale onderzoek is een antwoord te geven op deze laatste vraag. Het onderzoek verloopt in drie fasen:

#### Fase 1:

- Wordt de theoretische toename van de sterkte in de praktijk aangetoond?
- Klopt de grootte van de toename met de theorie?

#### Fase 2:

- Indien sterktetoeiname significant is: indien nodig: aanpassen van de theoretische beschrijving

#### Fase 3:

- Vertaling van beschrijving van sterktetoeiname naar ontwerp- en beoordelingsprocedure

Het beoogde resultaat is een handelingsperspectief voor projecten waarin wordt aangegeven hoe in projecten kan worden omgegaan met de sterkte toename in de tijd en daarnaast een

business case voor vervolgonderzoek voor andere grondsoorten of deelvragen die in het uitgevoerde onderzoek naar voren komen.

In dit rapport gaat het om Fase 1 van het onderzoek: het antwoord op de eerste twee vragen. Fase 2 en 3 zijn nog niet uitgevoerd.

## 1.4 Uitwerking van de onderzoeksopzet

De hypothese is dat na uitvoering van een dijkversterking (ophoging) de sterkte in de ondergrond als gevolg van aging toe zal nemen. Deze toename is van belang bij het vaststellen van de stabiliteit van de waterkering gedurende de planperiode van de versterking. Dit onderzoek is er op gericht vast te stellen of en in welke mate deze sterkteontwikkeling in de praktijk kan worden vastgesteld, of deze correct wordt voorspeld met theoretische modellen en wat dit betekent voor in rekening te brengen sterkte bij dijkversterkingen en dijkbeoordelingen.

De toename van de sterkte kan worden berekend met bestaande theorie (zie paragraaf 1.2). Deze wordt namelijk met de combinatie van de isotachen en SHANSEP-methode voorspeld, voor zover het gaat om toename van de sterkte als gevolg van kruip. Hierbij staat de SHANSEP methode niet ter discussie. De isotachen-methode is geverifieerd voor 1-dimensionale consolidatie ( $K_0$ -CRS proef) voor proeven met een tijdsduur van enkele dagen tot maanden. Het is echter nog niet aangetoond dat dit in praktijksituaties en over een periode van jaren correcte voorspellingen geeft. Om dit te toetsen zijn de volgende stappen nodig:

- Voer boringen en sonderingen uit onder een recent aangelegde berm, waarbij als randvoorwaarde geldt dat voorafgaand aan de versterking terrein- en laboratoriumonderzoek van voldoende omvang en kwaliteit is uitgevoerd. Met enerzijds sonderingen (correlatie met de POP) en anderzijds laboratoriumproeven (triaxiaalproeven en DSS proeven) kan een schatting worden gemaakt van de sterkte-toename zoals die in de werkelijkheid is opgetreden. De stijfheidsparameters en grensspanning om de sterkte-toename theoretisch te voorspellen volgen uit  $K_0$ -CRS proeven. Dit geeft de huidige sterkte. Om de sterkte toename vast te kunnen stellen zou dit vergeleken moeten worden met de oorspronkelijke sterkte, de sterkte direct vóór of na opbrengen van de ophoging. Het is in deze eerste analyse niet uitgezocht of de gegevens hiervoor kunnen worden teruggevonden en voldoende zijn om deze analyse te doen. Waarschijnlijk is dit niet het geval.
- Vergelijk de opgetreden sterkte-toename met de theoretische voorspelling. Gebaseerd op die vergelijking zijn diverse uitkomsten mogelijk:
  - Er wordt weinig tot geen sterkte-toename gevonden. Het onderzoek stopt.
  - De sterkte-toename kan (al dan niet met kleine aanpassingen) met het isotachen-model worden beschreven.
  - De sterkte-toename kan niet met het isotachen-model worden beschreven. Het onderzoek (binnen het kader van DIV) stopt, want er zal een fundamenteel onderzoek nodig zijn om een betere theorie te ontwikkelen.
- De sterkte-toename moet op een verantwoorde manier vertaald worden naar ontwerp- en beoordelingsprocedure. Voorheen was een struikelpunt dat er voor ontwerp vaak uitgegaan werd van de laagste sterkte gedurende de levensduur per faalmechanisme. Met de overgang naar overstromingsrisico's wordt uitgegaan van de sterkte van de waterkering als geheel. Hierdoor kan een tijdelijk lagere sterkte (macrostabiliteit) direct na aanleg van de versterking worden opgevangen omdat de kans op golfoverslag direct na aanleg verwaarloosbaar klein is (nog geen hogere waterstanden door klimaatverandering en een hoge kruin). Er wordt met andere woorden gekeken naar de sterkte en belasting

van de waterkering gedurende de levensduur voor alle bezwijkmechanismen samen in plaats van per bezwijkmechanisme.

De genoemde stappen zijn bij twee in het verleden uitgevoerde dijkversterkingen uitgevoerd. Hiermee is de huidige sterkte van de ondergrond bepaald en wordt deze vergeleken met de volgens het model voorspelde sterkte toename sinds de dijkversterkingen.

Met het veld -, en laboratoriumonderzoek wordt zowel de sterkte ontwikkeling in de tijd als de ontwikkeling van de OCR vastgesteld. Vervolgens wordt nagegaan in hoeverre de ontwikkeling van beiden met behulp van de beschikbare modellen met elkaar in overeenstemming kunnen worden gebracht.

Het ongedraineerde schuifsterkteprofiel als bepaald op basis van de  $CPT_u$  en triaxiaalproeven voor de onderzochte locatie kunnen rechtstreeks worden vergeleken met het ongedraineerde schuifsterkteprofiel zoals bepaald door de theorie en de parameters uit de  $K_0 - CRS$  proeven. Op deze wijze wordt de validiteit van de theoretische benadering volgens het isotachen-model voor de desbetreffende bodemtypen geverifieerd.

## 1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt eerst ingegaan op de locatiekeuze voor het onderzoek en zijn de locaties kort beschreven. Het veld- en laboratoriumonderzoek is uitgevoerd door Wiertsema & Partners. Een samenvatting van de uitgevoerde onderzoeken is eveneens opgenomen in Hoofdstuk 2. De twee factual reports van Wiertsema (één voor iedere locatie) zijn opgenomen als bijlagen bij dit rapport. Dit is uiteindelijk de hoofdmoot van de werkzaamheden geweest.

Op de resultaten van het veld- en laboratoriumwerk is in Hoofdstuk 3 een eerste analyse uitgevoerd. Deze heeft vooral tot doel om na te gaan of vervolg van dit onderzoek nuttig is (werken aan een verantwoorde methode om toename van sterkte in de tijd op een verantwoorde manier in rekening te brengen) of dat de vooruitzichten op succes hiervan te beperkt zijn om dit aan te bevelen.

Het totaal van veldwerk, laboratoriumonderzoek en eerste analyse is samengevat in de conclusies en aanbevelingen van Hoofdstuk 4.

Het veldwerk en het laboratoriumwerk zijn uitgevoerd door Wiertsema & Partners. De onderzoeksgegevens zijn opgenomen in een tweetal rapporten die een groot deel van het onderhavige onderzoek vertegenwoordigen:

- 84309-1 R91782 Geotechnisch onderzoek. Nader onderzoek versterkte Lekdijk te Bergambacht. Rapport VN 84309 – 1 27 september 2023.
- 84309-3 R92170 Geotechnisch onderzoek. Nader onderzoek dijk Anthonie Fokkerweg te Papendrecht . Rapport VN 84309 – 3 17 oktober 2023.

De rapporten zijn te beschouwen als bijlagen bij dit rapport, maar zijn dusdanig omvangrijk dat deze om praktische redenen niet als bijlagen bij dit rapport zijn opgenomen, maar los worden bijgeleverd.

## 2 Veld- en laboratoriumonderzoek

### 2.1 Locatiekeuze

Er is eerst een inventarisatie uitgevoerd naar de meest geschikte locaties voor het veldonderzoek. In het onderzoek wordt gezocht naar:

- Een locatie waar geruime tijd geleden een dijkversterking is uitgevoerd met daarbij een hoge berm over een behoorlijke breedte. Het effect van een ophoging op de ondergrond kan het beste bestudeerd worden als er een behoorlijke dikte aan grond is opgebracht en de tweedimensionale effecten zijn het minste als dit over een redelijke (berm)lengte is gebeurd. Met tweedimensionale effecten wordt zowel spanningsverspreiding als verandering in geometrie (ongelijke ophoging) bedoeld.
- Een locatie met voldoende slappe lagen (veen en klei), omdat dit de lagen zijn waarvan het effect van een belasting op de sterkte in de tijd wordt onderzocht.
- Locaties met een verschillend bouwjaar om het verloop van de toename van de sterkte in de tijd te kunnen zien.
- Locaties waar geen relevante veranderingen zijn geweest na de dijkversterking, die invloed kunnen hebben op de spanningstoestand van de grond (bijvoorbeeld aanpassing polderpeil).

Gekeken is naar een aantal projecten, waaronder:

- Kinderdijk Schoonhovense Veer, Lekdijk Streefkerk Boezem, sectie O.
- Hardinxveld-Giesendam Oost (GeoDelft project CO 303960 en 303961).
- Gorinchem -West (GeoDelft project CO 343560).
- Papendrecht Centrum Westeind -Noordhoek (GeoDelft project CO 264790).
- Dijkteruglegging Bergambacht (GeoDelft project CO 356570 en CO 376820).
- Afsluiting Gantel Papendrecht (GeoDelft project CO 264790 tot en met 264794).

Het zoekgebied is hiermee niet al te groot, waardoor de bodemopbouw ook redelijk vergelijkbaar was voor alle locaties. Er waren twee factoren die de doorslag hebben gegeven bij de keuze: zo klein mogelijke tweedimensionale effecten in de ondergrond en de mogelijkheid om snel toestemming te regelen voor het benodigde veldonderzoek.

De eerste locatie is de dijkteruglegging bij Bergambacht. Er is hier een nieuwe dijk na ontgraving en de aanleg van een zandcunet op het bestaande terrein geconstrueerd. Omdat er geen bestaande dijk is versterkt zijn de tweedimensionale effecten midden onder de dijk waarschijnlijk klein. Het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard was snel met het verlenen van de benodigde vergunning.

De tweede locatie is de dijk ter plekke van de afsluiting van de voormalige vaargeul de Gantel. Dit is in de hoek tussen Westeinde en Anthonie Fokkerweg. Ook hier is een nieuwe dijk op een grondverbetering aangelegd. Waterschap Rivierenland heeft het traject voor vergunning voor de veldwerkzaamheden voortvarend ondersteund.

### 2.2 Locatie Bergambacht

De voornaamste informatiebronnen zijn het Evaluatierapport Dijkversterking Lekdijk-West, Bergambacht (CO-376820) en Dijkverbetering Lekdijk-West Bergambacht (CO-356570).

Uit het evaluatierapport blijkt dat er ter plaatse van de bochtafsnijding een zandcunet tot een diepte van NAP – 4 m is toegepast. Overigens (zie verder) is de grondverbetering niet over het gehele traject aanwezig. De dijkversterking is gestart in 1997 en eind 1999 afgerond.

Het pleistocene zand zit op ongeveer NAP -13 m, dus is een meter of 9 samendrukbare grond aanwezig.

Uit rapport Dijkverbetering Lekdijk West – Bergambacht is het volgende citaat, figuren en tabel met zettingen overgenomen:

**Traject 4 (5a) Nespolder**

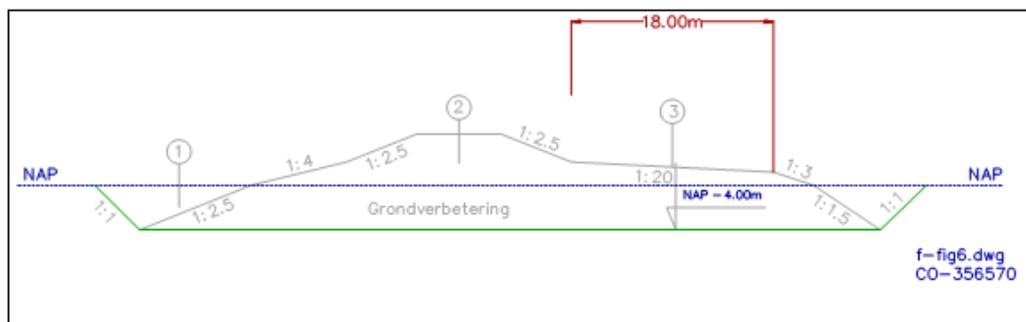
In traject 4 zijn 2 varianten geoptimaliseerd. Een binnenwaartse versterking met ter plaatse van hmp 84.55 een beperkte bochtafsnijding door een asverschuiving van maximaal 5 m naar binnen (variant 'versterking op huidige tracé') respectievelijk een bochtafsnijding van maximaal circa 100 m naar binnen (variant 'bochtafsnijding'). In dit laatste geval komt een deel van de bochtafsnijding te liggen in deeltraject 5a waar het tracé van de huidige dijk weer wordt bereikt. Met deze varianten wordt beoogd een beperkte respectievelijk een ruime rivierbedcompensatie te vinden. Consequentie van de laatstgenoemde variant is wel dat 7 hoofd- en 9 bijgebouwen gesloopt moeten worden. Bij de variant 'versterking op huidige tracé' is de doelstelling alle bebouwing die in het geding is door middel van constructies, cq. licht materiaal te sparen.

Het grootste gedeelte van het nieuwe tracé is geprojecteerd op een bijzonder slappe ondergrond, waarbij van enige voorbelasting (zoals in de directe omgeving van de bestaande dijk) géén sprake is. Alleen ter plaatse van het meest westelijke gedeelte van het tracé is de ondergrond veel steviger, hier is een dunne kleilaag op een zandondergrond aangetroffen.

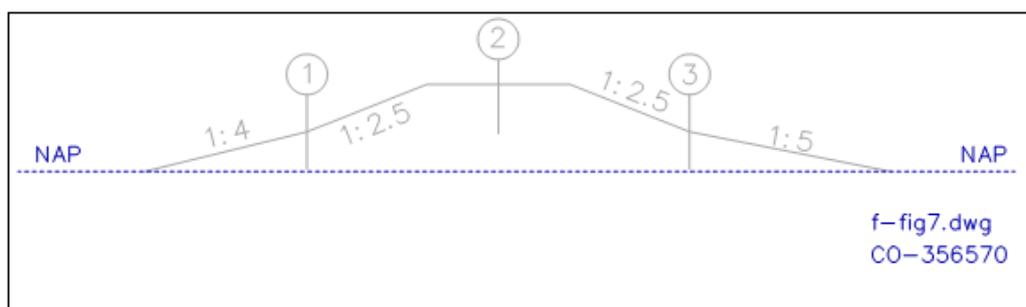
Teneinde onder andere te voorkomen dat het nieuwe dijklichaam tot in lengte van jaren blijft vervormen, is besloten om het nieuwe dijklichaam te funderen op een grondverbetering, dat wil zeggen een gedeelte van het slappe lagenpakket wordt verwijderd en vervangen door zand.

| traject | berekende eindzetting in m's ter plaatse van verticaal |      |      |
|---------|--|------|------|
| hmp     | 1  | 2    | 3    |
| 82.3    | 1,60   | 2,90 | 2,50 |
| 87.7    | 0,30   | 0,40 | 0,35 |

Tabel 44 Eindzettingen



Figuur 6. Zettingsverticalen bij dijkversterking inclusief grondverbetering tussen hmp 82.3 - 86A



Figuur 7. Zettingsverticalen bij dijkversterking tussen hmp 86A - 87.7

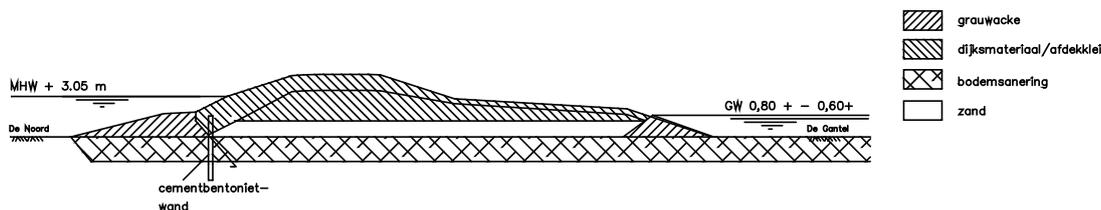
Figuur 2.1 Citaat, zettingstabellen en figuren uit het rapport *Dijkverbetering Lekdijk West Bergambacht*.

Omdat op een deel van het traject ter plekke van de kruin ondanks de grondverbetering nog een zetting van 2,90 m is geprognostiseerd kan worden gesteld dat de bodem onder de grondverbetering behoorlijk slap is. Daarmee voldoet de locatie voor het onderzoek.

## 2.3 Papendrecht Afsluiting Gantel

Bij de dijkversterking die omtrent de eeuwwisseling is uitgevoerd is de bestaande primaire waterkering die in Papendrecht Centrum West langs het Westeind liep deels verlaten en buitendijks omgelegd door een bestaande geul (de Gantel of Papendrechts Diep) af te sluiten en de dijk verder buitenom de bestaande dijk langs de rivier te laten lopen. Precies ter plekke van de afsluiting van de geul is een nieuw grondlichaam en dus een grote hoeveelheid grond, aangebracht op een slappe ondergrond. Gegevens zijn te vinden in de dijkversterking Papendrecht Centrum West onder CO-nummer 264794 en voorgaande nummers (264790 tot en met 264794).

Onderstaande prent van de dwarsdoorsnede ter plaatse van de Gantel komt uit CO264792\_21.doc uit het jaar 2000. Berekende zettingen komen uit in de buurt van 1,45 m, dus er zit wel wat samendrukbaar materiaal onder het zandcunet. Geotechnisch profiel is beschikbaar. Relevant onderzoek zijn sondering/boring 43, sonderingen/boringen 61 t/m 64 en sonderingen 0201, 0202, 0204. Het geotechnisch profiel loopt wel over de bestaande dijk, maar geeft wel een goede indruk wat er ter plekke van de Gantel verwacht kan worden.



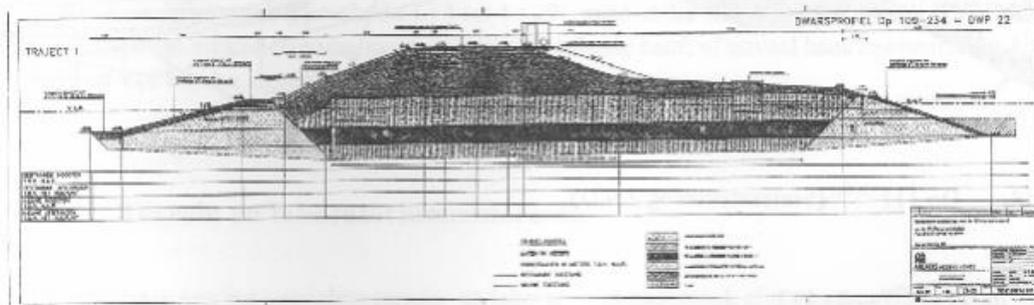
### Traject I: dp 109<sup>+087m</sup> - dp 109<sup>+288m</sup>

Het gekozen principeprofiel bestaat uit nieuw aan te leggen tweede Ganteldam.

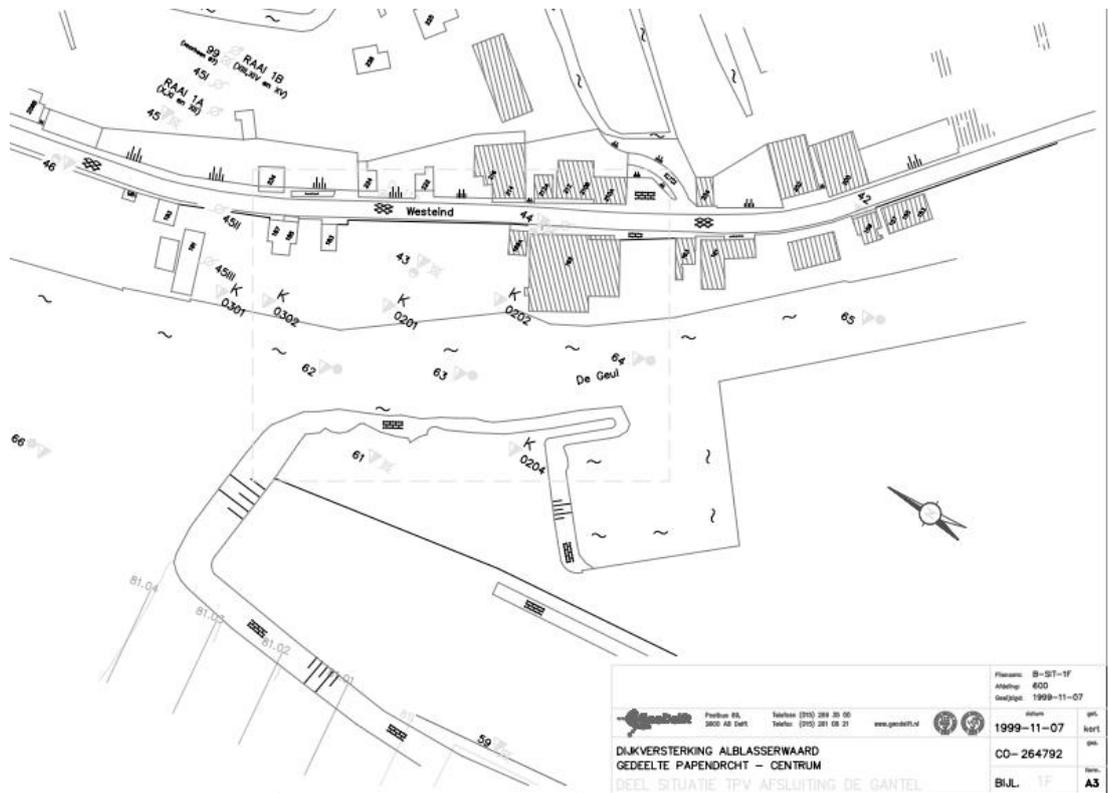
Het buitentalud boven de op NAP + 1,0 m gelegen plasberm heeft een helling 1:2 en 1:3. Het onderste deel met een helling 1:2 krijgt een basaltbekleding. Vanaf de plasberm naar beneden wordt een buitentalud 1:3 aangebracht met stortsteen.

Het onderwatertalud wordt geprojecteerd op 1 : 3 tot de aansluiting met het bestaande onderwatertalud. Er wordt een grondsanieering voor de onderwaterbodembodem voorzien.

Aan de binnenzijde is een circa 22 m brede berm nodig uit oogpunt van piping.



Figuur 1.18 Dp 109<sup>+234m</sup> (conceptbesteksprofiel dwp 22)



Figuur 2.2 Figuren omtrent de afsluiting van de Gantel bij Papendrecht (overgenomen uit rapport CO264792\_21.doc).

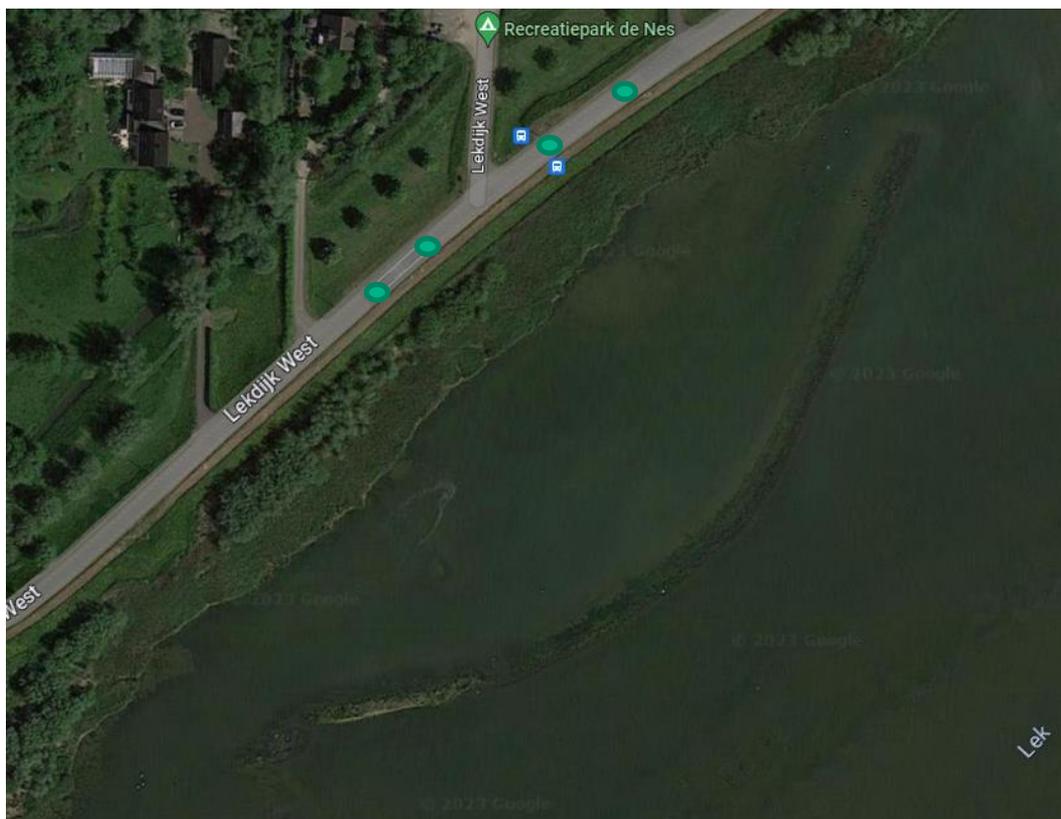
Boring en sondering 62 en 63 zijn het meest relevant. De boringen zijn echter niet teruggevonden.

Het feit dat tweedimensionale effecten hier minder zijn dan bij een dijkversterking van een bestaande dijk, en het feit dat er tussen de grondverbetering en het pleistocene zand slappe lagen aanwezig zijn maakt deze locatie geschikt voor het onderzoek.

## 2.4 Veldonderzoek

### 2.4.1 Locatie Dijkteruglegging Bergambacht

Onderstaand zijn vier onderzoekslocaties aangegeven met groene stippen. Dit is in de kruin van de dijk, gepositioneerd tussen op- en afritten. Bij de tweede stip van links wordt de boring gepositioneerd. Voor de duidelijkheid: het gaat dus om 4 sonderingen en 1 boring met monsternamen. Sonderingen zijn klasse 1 sonderingen en de boring is rond 67 mm. In de figuur is in de rivier nog de contour van de oude dijk zichtbaar.



Figuur 2.3 Dijk ter plaatse van de dijkeruglegging bij Bergambacht. Locatie grondonderzoek.

Het grondonderzoek is uitgevoerd op de nieuwe dijk. In het dwarsprofiel zijn de onderzoekspunten zo dicht mogelijk bij het midden van de kruin uitgevoerd, maar langs de Lek is er een redelijk grote bedrijvigheid buitendijks en de weg wordt druk gebruikt, dus de punten zijn verschoven richting de binnenkruinlijn. Vanaf de kruin tot de grondverbetering tot NAP – 4 m is zand aangebracht. Hieronder zitten de slappe lagen waarom het gaat tot circa NAP - 13 m. De sonderingen en boringen zijn uitgevoerd tot een totale onderzoeksdiepte van circa 19 meter.

#### 2.4.2 Locatie afsluiting Gantel bij Papendrecht

Op de onderstaande foto staan de onderzoekslocaties gegeven. In totaal zijn er drie sonderingen en een boring uitgevoerd. Het terrein is vanaf de weg prima toegankelijk. De boring is uitgevoerd direct naast de weg naast de middelste sondering.



Figuur 2.4 Onderzoeklocaties bij de afsluiting in de Gantel Papendrecht.

## 2.5 Laboratoriumonderzoek

### 2.5.1 Algemeen

Per meetlocatie zijn uitgevoerd:

- triaxiaalproeven OC op de kleilagen.
- triaxiaalproeven NC op de kleilagen.
- direct simple shear proeven OC op Hollandveen.
- direct simple shear proeven NC op Hollandveen.
- CRS-proeven op bovengenoemde grondlagen.

De aantallen proeven en de toe te passen consolidatiespanningen zijn aan de hand van de uitkomsten van het veldonderzoek, door middel van boorbeschrijvingen, volumieke gewichten en sonderingen met meting van waterspanningen, vastgesteld. Dit is in paragraaf 2.5.2 en paragraaf 2.5.3 uitgewerkt.

### 2.5.2 Bergambacht

De specificaties voor de laboratoriumproeven zijn in onderstaande tabel opgenomen. De terreinspanning is bepaald op basis van de grondopbouw zoals deze uit boring en sonderingen is afgeleid. De aantallen proeven zijn eveneens op basis van de grondlaagopbouw op basis van het veldonderzoek bepaald.

Tabel 2.1 Overzicht uitgevoerde constant rate of strain proeven voor locatie Bergambacht (boring MB002).

| Monster | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort        | Terreinspanning $\sigma_{vi}^2$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--|--|---|---------------------------|
| M025-a1 | -6,49                 | -6,52                 | veen              | 155  | 10,93                                      | 3,41  | 220,2                     |
| M027-c1 | -7,58                 | -7,61                 | veen              | 155  | 11,55                                      | 4,14  | 178,9                     |
| M029-a1 | -8,38                 | -8,41                 | klei              | 155  | 15,91                                      | 10,21                                       | 55,8                      |
| M031-a1 | -9,13                 | -9,16                 | klei              | 155  | 14,77                                      | 8,26  | 79                        |
| M032-c1 | -9,53                 | -9,56                 | klei zwak zandig  | 155  | 18,53                                      | 14,20                                       | 30,4                      |
| M038-a1 | -11,99                | -12,02                | klei sterk zandig | 176  | 17,85                                      | 12,95                                       | 37,8                      |
| M039-a1 | -12,37                | -12,4                 | klei sterk zandig | 179  | 17,86                                      | 13,16                                       | 35,8                      |
| M041-b1 | -13,12                | -13,14                | klei              | 185  | 17,47                                      | 12,16                                       | 43,6                      |

Tabel 2.2 Overzicht uitgevoerde triaxiaalproeven voor locatie Bergambacht (boring MB002).

| Monster | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort        | Terreinspanning $\sigma_{vi}^2$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--|--|---|---------------------------|
| M029-a2 | -8,27                 | -8,38                 | klei              | 155  | 16,06                                      | 10,44                                       | 53,8                      |
| M031-a2 | -9,02                 | -9,13                 | klei              | 155  | 15,10                                      | 9,05  | 66,7                      |
| M038-a2 | -11,88                | -11,99                | klei sterk zandig | 176  | 17,17                                      | 12,08                                       | 42,1                      |
| M039-a2 | -12,26                | -12,37                | klei sterk zandig | 179  | 17,94                                      | 13,17                                       | 36,1                      |
| M041-b2 | -13,01                | -13,12                | klei              | 185  | 17,20                                      | 12,55                                       | 37,1                      |
| M028-a2 | -7,76                 | -7,87                 | veen kleiig       | 155  | 12,31                                      | 5,29  | 132,9                     |
| M029-a3 | -8,16                 | -8,27                 | klei              | 155  | 14,18                                      | 8,27  | 71,5                      |
| M030-a1 | -8,52                 | -8,63                 | klei              | 155  | 16,12                                      | 10,48                                       | 53,9                      |
| M031-a3 | -8,91                 | -9,02                 | klei              | 155  | 16,00                                      | 10,36                                       | 54,5                      |
| M038-a3 | -11,77                | -11,88                | klei sterk zandig | 176  | 17,33                                      | 12,30                                       | 41                        |
| M039-a3 | -12,15                | -12,26                | klei sterk zandig | 179  | 17,75                                      | 12,75                                       | 39,2                      |
| M040-a1 | -12,55                | -12,66                | klei              | 182  | 16,42                                      | 10,75                                       | 52,7                      |
| M041-a1 | -12,89                | -12,99                | klei              | 185  | 12,36                                      | 4,99  | 147,3                     |

Tabel 2.3 Overzicht uitgevoerde direct simple shear proeven voor locatie Bergambacht (boring MB002).

| Monster | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort          | Terreinspanning $\sigma'_{vi}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|---------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---|--|---|---------------------------|
| M025-a3 | -6,73                 | -6,77                 | veen vast           | 155   | 10,83                                      | 3,76  | 188,37                    |
| M027-a1 | -7,4                  | -7,44                 | veen vast           | 155   | 11,04                                      | 3,90  | 182,65                    |
| M024-d1 | -6,39                 | -6,43                 | veen stevig         | 155   | 10,59                                      | 3,22  | 229,71                    |
| M025-a2 | -6,55                 | -6,59                 | veen vast           | 155   | 11,27                                      | 4,36  | 158,55                    |
| M026-b1 | -7,12                 | -7,16                 | veen vast           | 155   | 9,85                                       | 2,75  | 258,4                     |
| M027-c2 | -7,54                 | -7,58                 | veen stevig         | 155   | 10,34                                      | 3,36  | 207,67                    |
| M028-a1 | -7,71                 | -7,75                 | veen kleilig stevig | 155   | 10,86                                      | 3,71  | 192,54                    |

### 2.5.3 Papendrecht

De specificaties voor de laboratoriumproeven zijn in onderstaande tabel opgenomen. De terreinspanning is bepaald op basis van de grondopbouw zoals deze uit boring en sonderingen is afgeleid. De aantallen proeven zijn eveneens op basis van de grondlaagopbouw op basis van het veldonderzoek bepaald.

Tabel 2.4 Overzicht uitgevoerde constant rate of strain proeven voor locatie Papendrecht (boring MB003).

| Monster | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort       | Terreinspanning $\sigma'_{vi}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|---------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|--|---|---------------------------|
| M026-b2 | -5,52                 | -5,55                 | veen             | 140   | 10,91                                      | 2,96  | 268,2                     |
| M029-a2 | -6,5                  | -6,53                 | veen             | 145   | 11,69                                      | 4,19  | 178,9                     |
| M031-a2 | -7,49                 | -7,52                 | veen             | 145   | 10,89                                      | 3,27  | 234                       |
| M034-b1 | -8,76                 | -8,79                 | klei zwak zandig | 150   | 17,05                                      | 11,93                                       | 42,9                      |
| M036-a1 | -9,5                  | -9,53                 | klei zwak zandig | 155   | 17,35                                      | 12,56                                       | 38,2                      |
| M039-b1 | -10,66                | -10,69                | klei zwak zandig | 165   | 16,97                                      | 11,69                                       | 45,1                      |
| M041-b1 | -11,41                | -11,44                | klei             | 170   | 16,46                                      | 10,75                                       | 53,1                      |
| M044-a1 | -12,69                | -12,72                | klei             | 175   | 19,39                                      | 15,23                                       | 27,4                      |

Tabel 2.5 Overzicht uitgevoerde triaxiaalproeven voor locatie Papendrecht (boring MB003).

| Monster   | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort       | Terreinspanning $\sigma'_{vi}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|--|---|---------------------------|
| M035-a1   | -9,02                 | -9,13                 | klei             | 154   | 17,47                                      | 12,62                                       | 38,4                      |
| M040-a1   | -10,94                | -11,05                | klei             | 168   | 16,83                                      | 11,46                                       | 46,9                      |
| M043-c1   | -12,31                | -12,42                | klei             | 173   | 17,01                                      | 11,80                                       | 44,1                      |
| M034 - b2 | -8,65                 | -8,76                 | klei zwak zandig | 150   | 17,27                                      | 12,10                                       | 42,7                      |
| M036 - a2 | -9,37                 | -9,48                 | klei zwak zandig | 155   | 17,64                                      | 12,69                                       | 38,9                      |
| M038-a1   | -10,14                | -10,25                | klei             | 160   | 16,79                                      | 11,73                                       | 43,2                      |
| M039-b2   | -10,55                | -10,66                | klei zwak zandig | 165   | 17,12                                      | 11,82                                       | 44,8                      |
| MM041-x1  | -11,3                 | -11,41                | klei             | 170   | 16,58                                      | 11,15                                       | 48,6                      |
| M041-c1   | -11,48                | -11,59                | klei             | 170   | 15,55                                      | 9,86  | 57,7                      |
| M042 - a1 | -11,64                | -11,75                | klei zwak zandig | 170   | 16,50                                      | 11,10                                       | 48,5                      |
| M044-a2   | -12,58                | -12,69                | klei             | 175   | 19,19                                      | 15,28                                       | 25,6                      |

Tabel 2.6 Overzicht uitgevoerde direct simple shear proeven voor locatie Papendrecht (boring MB003).

| Monster | Diepte t.o.v. NAP (m) | Diepte t.o.v. NAP (m) | Grondsoort  | Terreinspanning $\sigma'_{vi}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Volumiek gewicht bulk (kN/m <sup>3</sup> ) | Volumiek gewicht droog (kN/m <sup>3</sup> ) | Watergehalte initieel (%) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------|---|--|---|---------------------------|
| M028-b2 | -6,28                 | -6,32                 | veen stevig | 145   | 10,27                                      | 3,05  | 236,99                    |
| M031-a3 | -7,45                 | -7,49                 | veen stevig | 145   | 10,31                                      | 2,94  | 250,37                    |
| M026-b1 | -5,55                 | -5,59                 | veen stevig | 140   | 10,25                                      | 2,77  | 270,94                    |
| M027-a1 | -5,82                 | -5,86                 | veen stevig | 140   | 10,62                                      | 3,50  | 203,12                    |
| M028-b1 | -6,36                 | -6,4                  | veen stevig | 145   | 10,67                                      | 3,37  | 216,83                    |
| M029-a1 | -6,46                 | -6,5                  | veen stevig | 145   | 11,07                                      | 3,87  | 186,57                    |
| M031-a1 | -7,55                 | -7,59                 | veen stevig | 145   | 10,70                                      | 3,27  | 227,48                    |

## 3 Eerste analyse

### 3.1 Berekende parameters

De toename van de sterkte van de grond in de tijd onder de ophogingen bij Bergambacht en Papendrecht is uit het uitgevoerde laboratoriumonderzoek afgeleid door het bepalen van de overconsolidatieratio OCR. Een belangrijke bijdrage aan de toename van de sterkte in de tijd wordt geleverd door kruip van de grond. Bij kruip van de grond is de OCR een geschikte parameter om de toename van de sterkte uit te drukken. De waarde van OCR wordt afgeleid uit de constant rate of strain proeven en teruggerekend uit de triaxiaalproeven en direct simple shear proeven.

De in situ effectieve verticale spanning voor de huidige situatie op beide onderzoekslocaties is als volgt bepaald:

- Met de boorbeschrijvingen vanuit het veld en de sonderingen is de opbouw van de ondergrond vastgesteld.
- De verticale totaalspanning is bepaald op de basis van de opbouw van de ondergrond en de volumieke gewichten die in het veld zijn bepaald voor alle steekbussen.
- Het verloop van de waterdrukken in en onder de dijk is bepaald op basis van de gemeten waterspanningen met de sonderingen in de zandlagen (zandkern van de dijk en watervoerende zandlaag). De waterdrukken in de klei- en veenlagen zijn lineair geïnterpoleerd op basis van de waterdrukken in de zandlagen.
- De effectieve verticale spanning is berekend door de totaalspanning te verminderen met de waterspanning.
- In deze analyse is geen rekening gehouden met spannings spreiding als gevolg van de 2D-geometrie van de dijk. Omdat de boringen in de kruin van de dijk zijn uitgevoerd en de dijk breed is, is de aanname gedaan dat spannings spreiding mag worden verwaarloosd.

De aannames over het waterdrukverloop en de spannings spreiding zijn niet vanzelfsprekend. Deze punten zorgen voor onzekerheid in de analyses. Gezien de hoge spanningen onder de dijken op beide locaties wordt echter niet verwacht dat andere aannames op deze punten tot wezenlijk andere uitkomsten zouden leiden.

OCR is voor de huidige situatie op beide onderzoekslocaties als volgt bepaald (zie ook paragraaf 1.2):

- Uit de CRS proeven:
  - Grensspanning en isotachen parameters  $a$ ,  $b$  en  $c$  uit proeven afgeleid. Hierbij is de grensspanning volgens methode “Den Haan” gebruikt.
  - Op basis van grensspanning en verticale effectieve spanning is OCR berekend.
  - Op basis van  $a$ ,  $b$  en  $c$  is met de formule voor de bepaling van de “equivalent age” op basis van het isotachen-model OCR berekend:  $OCR = \left(\frac{t_{age}}{t_0}\right)^{\frac{c}{b-a}}$ , met  $t_{age}$  de equivalente tijd in dagen en  $t_0$  de referentietijd in dagen ( $t_0 = 1$  dag), zie ook paragraaf 1.2. Hierbij is uitgegaan van een periode ( $t_{age}$ ) van 23 jaar voor beide locaties.
  - Op basis van  $a$ ,  $b$  en  $c$  is ook sterkte toename exponent  $m$  voor het SHANSEP-model berekend.
- Uit de triaxiaal- en direct simple shear proeven:

- Ongedraineerde schuifsterkte ratio  $s_u/\sigma'_{vi}$  uit overgeconsolideerde proeven, geconsolideerd bij de geschatte in situ verticale effectieve spanning, afgeleid. Hierbij is uitgegaan van de piekwaarde van de ongedraineerde schuifsterkte.
- Ongedraineerde schuifsterkte ratio  $S$  uit normaal geconsolideerde proeven, geconsolideerd bij een verticale effectieve spanning ruim boven de grensspanning volgens de CRS-proeven, afgeleid. Hierbij is eveneens uitgegaan van de piekwaarde van de ongedraineerde schuifsterkte.
- Op basis van de piekwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio  $s_u/\sigma'_{vi}$  en de ongedraineerde schuifsterkte ratio  $S$  en de SHANSEP-parameter  $m$  is  $OCR$  berekend met het SHANSEP-model uit de overgeconsolideerde proeven:  $OCR = \left(\frac{s_u}{\sigma'_{vi} \cdot S}\right)^{1/m}$ .

$OCR$  is teruggerekend uit de piekwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte uit de triaxiaalproeven en direct simple shear proeven. Deze keuze is gemaakt om onzekerheden in de berekening van  $OCR$  te minimaliseren. Het is bekend dat bij triaxiaalproeven (met name normaal geconsolideerde proeven) aanzienlijke ongelijkmatige vervormingen van de proefmonsters kunnen optreden bij toenemende axiale rek. Bij de proefuitwerking worden standaard correcties toegepast om te corrigeren voor deze deformatie van proefmonsters. De grote vervormingen en de correcties brengen aanzienlijke onzekerheid van de ongedraineerde schuifsterkte met zich mee. Omdat deze onzekerheden toenemen bij toenemende axiale rek is de  $OCR$  teruggerekend op basis van de pieksterkte van de ongedraineerde schuifsterkte.

Er is wel een controle uitgevoerd met de ongedraineerde schuifsterkte bij de 'ultimate state' (maximale rek in de proeven). Deze analyse leidt tot een grotere bandbreedte van  $OCR$ -waarden met ongeveer hetzelfde gemiddelde.

Voor de spanningscondities in de ondergrond na aanleg van de nieuwe dijken in Papendrecht en Bergambacht is in de uitgevoerde analyses aangenomen dat de grond normaal geconsolideerd was ( $OCR = 1,0$ ). Voor Holocene klei- en veenlagen geeft de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit (RWS, 2019) een bandbreedte voor de Pre Overburden Pressure  $POP$  tussen 0 en 75 kPa, met verwachtingswaarden van 11 tot 27 kPa, afhankelijk van de grondsoort. Gezien de grote ophogingen, die zijn aangelegd op beide onderzoekslocaties, inclusief compensatie voor zettingen, is het aannemelijk dat de toename van de verticale effectieve spanning als gevolg van de uitgevoerde ophogingen ruimschoots hoger was dan de genoemde  $POP$ -waarden. Bij Bergambacht gaat het om een netto ophoging van 5 m op een grondverbetering met een cunet van 4 m diep en een voorspelde zettingscompensatie van 2,9 m (bruto circa 11 m volgens de voor dit onderzoek uitgevoerde sonderingen). Dat zal grofweg tot een toename van de effectieve verticale spanning van meer dan 120 kPa hebben geleid. Bij Papendrecht gaat het om een bruto ophoging van 9 à 10 m volgens de voor dit onderzoek uitgevoerde sonderingen (inclusief zettingscompensatie), waarbij eerst een cunet van circa 2 m diep is gegraven. Dit resulteert in een toename van de effectieve spanning van ongeveer dezelfde grootte als bij Bergambacht. Voor beide locaties is de spanningstoename dus groter dan de te verwachten  $POP$ -waarden voor de situatie voorafgaande aan de dijk aanleg.

Voor beide onderzoekslocaties zijn de resultaten van de berekeningen gepresenteerd in Tabel 3.1 tot en met Tabel 3.6.

## 3.2 Bergambacht

De resultaten van de berekeningen van  $OCR$  uit de laboratoriumproeven voor de onderzoekslocatie Bergambacht zijn gepresenteerd in Tabel 3.1 tot en met Tabel 3.3.

Tabel 3.1 Resultaten van constant rate of strain proeven van locatie Bergambacht.

| Monster | Grens-<br>spanning<br>(kPa) | a<br>(-) | b<br>(-) | c<br>(-) | (b-a)/c<br>(-) | m<br>(-) | OCR<br>o.b.v.<br>grens-<br>spanning<br>(-) | OCR<br>o.b.v.<br>isotachen<br>model<br>(-) |
|---------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------------|----------|--|--|
| M025-a1 | 199                         | 0,031    | 0,282    | 0,020    | 12,51          | 0,89     | 1,28                                       | 2,06                                       |
| M027-c1 | 224,8                       | 0,030    | 0,253    | 0,016    | 13,88          | 0,88     | 1,45                                       | 1,92                                       |
| M029-a1 | 178,6                       | 0,010    | 0,129    | 0,007    | 16,57          | 0,92     | 1,15                                       | 1,72                                       |
| M031-a1 | 199,1                       | 0,011    | 0,177    | 0,011    | 15,33          | 0,94     | 1,28                                       | 1,80                                       |
| M032-c1 | 231,9                       | 0,003    | 0,067    | 0,003    | 22,87          | 0,95     | 1,50                                       | 1,48                                       |
| M038-a1 | 241,3                       | 0,005    | 0,070    | 0,004    | 17,64          | 0,93     | 1,37                                       | 1,67                                       |
| M039-a1 | 270                         | 0,004    | 0,062    | 0,003    | 17,24          | 0,93     | 1,51                                       | 1,69                                       |
| M041-b1 | 222                         | 0,014    | 0,110    | 0,003    | 28,65          | 0,87     | 1,20                                       | 1,37                                       |

Tabel 3.2 Resultaten van triaxiaal proeven van locatie Bergambacht.

| Monster | Type<br>proef | Consolidatie-<br>spanning<br>(kPa) | q_piek<br>(kPa) | q_eind<br>(kPa) | $S_{u,peik}/\sigma'_{vc}$<br>(-) | S<br>(-) | OCR<br>(-) |
|---------|---------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------|------------|
| M029-a2 | NC            | 281,1                              | 219,66          | 168,23          | 0,39                             | 0,39     | 1,0        |
| M031-a2 | NC            | 281                                | 215,14          | 160,56          | 0,38                             | 0,38     | 1,0        |
| M038-a2 | NC            | 612,6                              | 441,88          | 409,26          | 0,36                             | 0,36     | 1,0        |
| M039-a2 | NC            | 708,1                              | 664,99          | 664,43          | 0,47                             | 0,47     | 1,0        |
| M041-b2 | NC            | 490,8                              | 331,44          | 257,47          | 0,34                             | 0,34     | 1,0        |
| M028-a2 | OC            | 152,9                              | 212,17          | 133,32          | 0,69                             | 0,45     | 1,58       |
| M029-a3 | OC            | 153,6                              | 118,12          | 65,73           | 0,38                             | 0,38     | 1,00       |
| M030-a1 | OC            | 153,1                              | 126,7           | 92,61           | 0,41                             | 0,387    | 1,06       |
| M031-a3 | OC            | 153,2                              | 153,27          | 120,58          | 0,50                             | 0,387    | 1,31       |
| M038-a3 | OC            | 175,4                              | 147,78          | 140,91          | 0,42                             | 0,349    | 1,22       |
| M039-a3 | OC            | 177,7                              | 171,56          | 164,92          | 0,48                             | 0,47     | 1,02       |
| M040-a1 | OC            | 179,9                              | 134,61          | 104,65          | 0,37                             | 0,349    | 1,06       |
| M041-a1 | OC            | 181,9                              | 199,78          | 140,72          | 0,55                             | 0,45     | 1,22       |

Tabel 3.3 Resultaten van direct simple shear proeven van locatie Bergambacht.

| Monster | Type proef | Consolidatie-spanning (kPa) | tau_piek (kPa) | tau_eind (kPa) | $S_{u, piek} / \sigma'_{vc}$ (-) | S (-) | OCR (-) |
|---------|------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|-------|---------|
| M025-a3 | NC         | 367,02                      | 148,15         | 131,14         | 0,40                             | 0,40  | 1,0     |
| M027-a1 | NC         | 395,19                      | 147,72         | 131,52         | 0,37                             | 0,37  | 1,0     |
| M024-d1 | OC         | 155,07                      | 62,44          | 53,28          | 0,40                             | 0,389 | 1,04    |
| M025-a2 | OC         | 155,07                      | 63,98          | 50,9           | 0,41                             | 0,389 | 1,07    |
| M026-b1 | OC         | 155,04                      | 75,57          | 68,53          | 0,49                             | 0,389 | 1,29    |
| M027-c2 | OC         | 155,1                       | 72,15          | 61,28          | 0,47                             | 0,389 | 1,22    |
| M028-a1 | OC         | 155,04                      | 64,1           | 76,85          | 0,41                             | 0,389 | 1,07    |

### 3.3 Papendrecht

De resultaten van de berekeningen van OCR uit de laboratoriumproeven voor de onderzoekslocatie Papendrecht zijn gepresenteerd in Tabel 3.4 tot en met Tabel 3.6.

Tabel 3.4 Resultaten van constant rate of strain proeven van locatie Papendrecht.

| Monster | Grens-spanning (kPa) | a (-) | b (-) | c (-) | (b-a)/c (-) | m (-) | OCR o.b.v. grens-spanning (-) | OCR o.b.v. isotachen model (-) |
|---------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|
| M026-b2 | 191,3                | 0,035 | 0,302 | 0,020 | 13,11       | 0,88  | 1,37                          | 1,99                           |
| M029-a2 | 204,6                | 0,028 | 0,270 | 0,019 | 12,43       | 0,90  | 1,41                          | 2,07                           |
| M031-a2 | 185,4                | 0,033 | 0,293 | 0,021 | 12,24       | 0,89  | 1,28                          | 2,09                           |
| M034-b1 | 184,5                | 0,006 | 0,082 | 0,004 | 17,29       | 0,93  | 1,23                          | 1,69                           |
| M036-a1 | 213,5                | 0,004 | 0,050 | 0,002 | 19,65       | 0,91  | 1,38                          | 1,58                           |
| M039-b1 | 208,9                | 0,005 | 0,097 | 0,005 | 18,09       | 0,95  | 1,27                          | 1,65                           |
| M041-b1 | 197,3                | 0,007 | 0,117 | 0,006 | 18,60       | 0,94  | 1,16                          | 1,63                           |
| M044-a1 | 283,8                | 0,006 | 0,072 | 0,002 | 40,08       | 0,92  | 1,62                          | 1,25                           |

Tabel 3.5 Resultaten van triaxiaal proeven van locatie Papendrecht.

| Monster   | Type proef | Consolidatie-spanning (kPa) | q_piek (kPa) | q_eind (kPa) | $s_{u,peik}/\sigma'_{vc}$ (-) | S (-) | OCR (-) |
|-----------|------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------|---------|
| M035-a1   | NC         | 547,5                       | 404,07       | 358,71       | 0,37                          | 0,37  | 1,00    |
| M040-a1   | NC         | 503                         | 375,94       | 337,79       | 0,37                          | 0,37  | 1,00    |
| M043-c1   | NC         | 295,2                       | 206,04       | 156,07       | 0,35                          | 0,35  | 1,00    |
| M034 - b2 | OC         | 148,8                       | 138,6        | 122,4        | 0,47                          | 0,36  | 1,31    |
| M036 - a2 | OC         | 154,2                       | 186,02       | 182,52       | 0,60                          | 0,36  | 1,73    |
| M038-a1   | OC         | 161                         | 145,06       | 122,96       | 0,45                          | 0,36  | 1,28    |
| M039-b2   | OC         | 163                         | 131,26       | 105,74       | 0,40                          | 0,36  | 1,11    |
| MM041-x1  | OC         | 169,1                       | 145,72       | 122,89       | 0,43                          | 0,36  | 1,21    |
| M041-c1   | OC         | 170,8                       | 135,11       | 133,26       | 0,40                          | 0,36  | 1,11    |
| M042 - a1 | OC         | 169,6                       | 159,45       | 156,96       | 0,47                          | 0,36  | 1,33    |
| M044-a2   | OC         | 174,2                       | 200,94       | 192,78       | 0,58                          | 0,36  | 1,65    |

Tabel 3.6 Resultaten van direct simple shear proeven van locatie Papendrecht.

| Monster | Type proef | Consolidatie-spanning (kPa) | tau_piek (kPa) | tau_eind (kPa) | $s_{u,peik}/\sigma'_{vc}$ (-) | S (-) | OCR (-) |
|---------|------------|-----------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------|---------|
| M028-b2 | NC         | 280,1                       | 124,36         | 114,86         | 0,44                          | 0,44  | 1,00    |
| M031-a3 | NC         | 250,15                      | 107,66         | 97,95          | 0,43                          | 0,43  | 1,00    |
| M026-b1 | OC         | 140,08                      | 64,9           | 60,17          | 0,46                          | 0,437 | 1,07    |
| M027-a1 | OC         | 140,05                      | 64,46          | 58,27          | 0,46                          | 0,437 | 1,06    |
| M028-b1 | OC         | 145,13                      | 67,89          | 60             | 0,47                          | 0,437 | 1,08    |
| M029-a1 | OC         | 145,13                      | 66,99          | 57,82          | 0,46                          | 0,437 | 1,06    |
| M031-a1 | OC         | 145,04                      | 59,03          | 49,05          | 0,41                          | 0,400 | 1,02    |

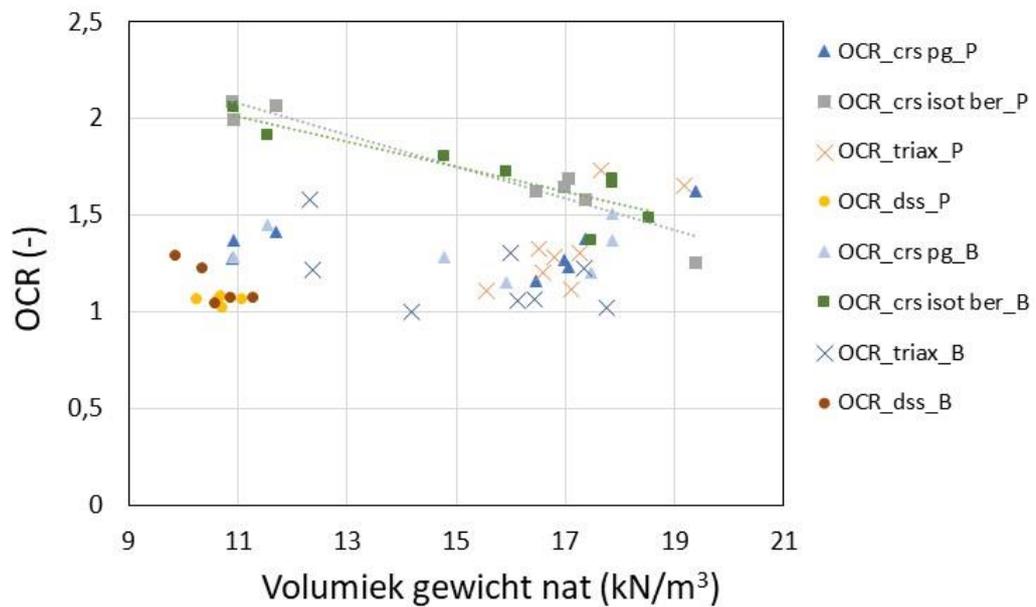
### 3.4 Analyse

Het doel van een eerste analyse is om na te gaan of:

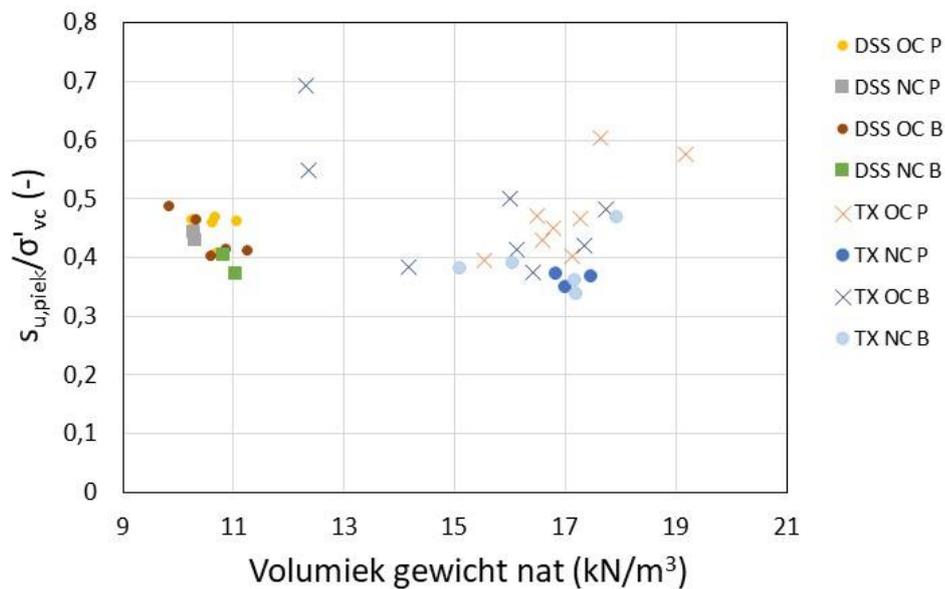
- De voorspelde toename van de sterkte in het veld en het laboratorium daadwerkelijk kan worden aangetoond.
- De toename van de sterkte goed beschreven kan worden met de theorie van de isotachenmethode.
- Te bepalen of het zinvol is om de volgende fase van het onderzoek in te gaan.

Figuur 3.1 en Figuur 3.2 vertellen het grootste deel van het verhaal. Op basis van de bevindingen in deze twee figuren zijn de conclusies en aanbevelingen geformuleerd. Figuur 3.1 en Figuur 3.2 zijn de grafische presentatie van de berekende OCR-waarden uit Figuur 3.1 tot en met Tabel 3.6.

Figuur 3.1 geeft alle berekende OCR-waarden van de meetlocaties Bergambacht (B) en Papendrecht (P). De OCR-waarden zijn uitgezet tegen het volumieke gewicht, die hier is gebruikt als een indicator voor de verschillende grondsoorten. In de uitgevoerde analyse is er van uitgegaan, dat OCR gelijk was aan 1,0 na aanleg van de dijken op beide locaties. Figuur 3.2 geeft de piekwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio  $s_{u,peik}/\sigma'_{vc}$  en de ongedraineerde schuifsterkte ratio S.



Figuur 3.1 Berekende OCR-waarden van de meetlocaties Bergambacht (B) en Papendrecht (P) uitgezet tegen het volumiek gewicht. De berekende OCR op basis van het isotachen-model zijn weergegeven met vierkantjes en verbonden met regressielijn.



Figuur 3.2 Piekwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio  $s_{u,peik}/\sigma'_{vc}$  en de ongedraineerde schuifsterkte ratio S van de meetlocaties Bergambacht (B) en Papendrecht (P) uitgezet tegen het volumiek gewicht.

Uit Figuur 3.1 en Figuur 3.2 blijkt het volgende:

- De berekende OCR op basis van triaxiaalproeven (klei) en direct simple shear proeven (veen) ligt tussen 1,0 en 1,35. Uitzonderingen zijn enkele monsters van kleiig veen en zandige klei. Figuur 3.2 met de ongedraineerde schuifsterkte ratio's laat ook duidelijk zien dat de overgeconsolideerde proeven (OC) in veel gevallen niet een veel hogere sterkte hebben dan de normaal geconsolideerde proeven (NC).
- Voor klei is er een mooie overeenkomst tussen de teruggerekende OCR uit triaxiaalproeven en de OCR op basis van de grensspanning uit CRS proeven. Hierbij is de grensspanning volgens methode "Den Haan" gebruikt.
- De OCR op basis van de grensspanning uit CRS proeven ligt bij veen iets hoger dan de teruggerekende waarde uit de DSS proeven: OCR is 1,3 tot 1,45. Hierbij is ook de grensspanning volgens methode "Den Haan" gebruikt.
- De berekende OCR op basis van de isotachen-theorie ligt voor klei en vooral voor veen duidelijk hoger dan de OCR uit de CRS-proeven. Hierbij is uitgegaan van een kruiptijd van 23 jaar. Dat kan iets meer of minder zijn, maar dat geeft geen significant verschil. De toename van OCR door kruip gaat volgens de theorie in de eerste jaren het snelst. De kruiptijd moet worden verlaagd tot minder dan een jaar om de berekende OCR op basis van de isotachen-theorie overeen te laten komen met de afgeleide OCR uit de sterkteproeven.
- De berekende OCR op basis van de isotachen-theorie geeft een duidelijke trend met een sterkere OCR-toename in de tijd bij afnemende volumieke gewichten. De triaxiaalproeven en direct simple shear proeven laten deze trend niet zien. De OCR op basis van de grensspanning uit CRS-proeven heeft die trend misschien een beetje, als de resultaten voor de zandige klei ( $>18 \text{ kN/m}^3$ ) buiten beschouwing worden gelaten.
- De resultaten van Papendrecht (P) en Bergambacht (B) liggen goed over elkaar heen. Dus wat dat betreft mooie consistente resultaten. Dat lijkt logisch vanwege het feit dat de dijkversterkingen hier ongeveer even lang geleden zijn uitgevoerd, in beide gevallen is uitgegaan van 23 jaar.
- Voor het ontwerpen van dijkversterkingen lijkt grofweg een karakteristieke ondergrenswaarde van OCR van circa 1,1 voor de langere termijn (voor de dagelijkse gemiddelde situatie) ongeveer waar maximaal op gerekend kan worden, zowel voor klei als veen. Tabel 3.7 geeft de verdelingsfunctie en de karakteristieke ondergrenswaarde voor OCR onder een ophoging van 23 jaar of ouder.

Tabel 3.7 Stochastische verdeling van de overconsolidatieratio OCR onder een ophoging van 23 jaar of ouder voor toepassing in D-Stability. De verdelingsfunctie is log-normaal. In de verdelingsfunctie is rekening gehouden met het aantal steekproeven (42 voor Bergambacht en Papendrecht) en uitmiddeling van onzekerheid langs een schuifvlak.

|     | Verwachtingswaarde (-) | Standaardafwijking (-) | Karakteristieke ondergrenswaarde (-) |
|-----|------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| OCR | 1,24                   | 0,10                   | 1,09                                 |

## 4 Conclusies en aanbevelingen

In de vigerende leidraden wordt voor het schematiseren van de sterkte in stabiliteitsanalyses van dijken het gebruik van de ongedraineerde schuifsterkte voorgeschreven. De ongedraineerde schuifsterkte is afhankelijk van de overconsolidatieratio, OCR. De toename van de sterkte in de tijd is in de mathematische beschrijving gekoppeld aan de ontwikkeling van de OCR in de tijd. Het isotachen model beschrijft de ontwikkeling van de OCR in de tijd. In het onderzoek is met name gekeken of de ontwikkeling van de OCR die voor veldcondities wordt gemeten past bij de OCR ontwikkeling die wordt voorspeld met het isotachen model.

Puntsgewijs worden de volgende conclusies uit het uitgevoerde onderzoek en eerste analyse gegeven:

1. Er is een zekere toename van de OCR en daarmee van de ongedraineerde schuifsterkte vastgesteld.
2. De toename is minder groot dan volgens de isotachen-methode voorspelt.
3. Het aannemen van een waarde voor de POP of de methode Toekomstige dagelijkse omstandigheden (TDO) lijkt mogelijk te optimistisch.
4. De opgetreden toename van de OCR is goed vast te stellen aan de hand van laboratoriumproeven.
5. In beide geanalyseerde cases is de gevonden toename in OCR in dezelfde orde van grootte. Hierbij wordt opgemerkt dat deze toename in dezelfde tijdsperiode is ontwikkeld.

Afgezet tegen de verwachtingen vooraf zijn de resultaten van het onderzoek opmerkelijk. De gevonden uitkomsten hebben praktische consequenties. In het ontwerp van dijkversterkingen dient rekening gehouden te worden met toekomstige situaties en dient daarmee ook de toekomstige sterkte te worden ingeschat. In het beoordelen van bestaande dijken dient eveneens een schematisatie van de sterkte te worden opgesteld waarin de OCR een rol speelt. Hier komen nu twee vervolgvragen naar boven:

1. In nieuwe dijkversterkingsontwerpen kan niet zondermeer worden uitgegaan van de isotachen methode om de toekomstige sterkte te kunnen inschatten. Hoe kan deze schatting dan wel worden gemaakt?
2. In recent uitgevoerd dijkversterkingen zijn aannamen gedaan over de OCR ontwikkeling. Zijn deze aannamen, in het licht van de resultaten van dit onderzoek, terecht?

Om de bovenstaande vragen te kunnen beantwoorden zijn drie sporen in het vervolgonderzoek mogelijk. Het eerste spoor is een diepgaander analyse voor de meetlocaties Bergambacht en Papendrecht. Het tweede spoor is een meer fundamenteel spoor. In dit spoor wordt gekeken naar de vraag waarom de voorspelling van de OCR ontwikkeling met het isotachen model afwijkt van de velddata en hoe de voorspellingsmethode kan worden verbeterd. Het derde spoor is een meer praktisch spoor waar op basis van ervaringen een voorstel wordt opgesteld voor een praktijkrichtlijn.

Bij een diepgaander analyse voor de meetlocaties Bergambacht en Papendrecht (eerste spoor) gaat het om:

- Opnieuw bepalen van effectieve spanningen in de ondergrond, rekening houdend met variaties en onzekerheden in grondlaagopbouw, volumieke gewichten en verloop van waterspanningen.

- Bepalen wat de invloed van rivierwaterstandsfluctuaties voor beide locaties zou kunnen betekenen voor de toename van OCR en schuifsterkte in de tijd. Dit is vooral relevant voor de diepere grondlagen, boven de watervoerende zandlaag.
- Simulatie van de uitgevoerde CRS-proeven met een numeriek model (soft soil creep) en daarmee een scherpere parameterset afleiden.
- Simulatie van de aanleg van de dijken op beide meetlocaties met een numeriek model, gebruik makend van de scherpere parameterset, zoals hiervoor genoemd. In deze numerieke simulatie wordt dan ook rekening gehouden met spanningsverspreiding onder de dijk en daaraan gekoppeld ook met de niet volledige ééndimensionale  $K_0$ -toestand onder de dijk, die ook invloed heeft op de OCR- en sterkte-toename in de tijd. Ook de samenhang tussen de dissipatie van wateroverspanningen als gevolg van de dijkbouw en het 'onderwater zakken' in de tijd en het effect van kruip worden hiermee mogelijk netter gemodelleerd.
- Nagaan in hoeverre het zettingsverloop in de tijd op basis van satelliet-metingen voor beide locaties overeen komt met het berekende zettingsverloop in de numerieke simulaties.

Gezien de hoge spanningen onder de dijken op beide locaties wordt niet verwacht dat de genoemde punten individueel tot wezenlijk andere uitkomsten zullen leiden, maar de combinatie van deze punten leidt mogelijk wel tot een ander inzicht.

In het fundamentele spoor (tweede spoor) kan worden gekeken naar de nieuwste ontwikkelingen die op het gebied van isotachenmodellen zich voordoen. Nagegaan kan worden of meer complexe modellen een verbetering in de voorspelde OCR ontwikkeling opleveren en welke aspecten daar aan de verbeteringen bijdragen. Een ander punt in het theoretisch spoor is het verschil in laboratorium condities en veld condities. In laboratorium condities wordt een klein monster beproefd. De afmetingen van het monster zijn vele malen kleiner dan de laagdiktes in het veld waar de monster representatief voor staan. Het gevolg van de kleine laagdikte is dat consolidatie sneller verloopt. Hierdoor is het mogelijk om laboratoriumproeven in een korte tijd, in een periode van uren tot dagen, uit te voeren. Het gevolg hiervan is dat de opgelegde reksnelheden onder laboratoriumomstandigheden veel groter zijn dan onder veldcondities.

Het isotachenmodel is voornamelijk op basis van laboratoriumproeven opgesteld. Er zijn verschillende publicaties waaruit volgt dat het de waarnemingen op laboratoriumschaal, inclusief de OCR ontwikkeling in de tijd goed kan voorspellen. Dit levert de vervolgvraag op waarom het isotachenmodel voor lage reksnelheden over langere perioden dan gebruikelijk in laboratoriumproeven het grondgedrag niet goed beschrijft.

In het praktische spoor (derde spoor) kan worden nagegaan in hoeverre de resultaten reproduceerbaar zijn. Er zijn nu voor twee cases in het benedenrivieren gebied voor een periode van circa 23 jaar vergelijkbare resultaten gevonden. Voor een praktische richtlijn zal ook aandacht moeten zijn voor typen ondergrond, zoals in het bovenrivierengebied of waddenzeekust en andere periodes, zowel korter als langer. Er zou een database kunnen worden opgesteld met verschillende cases waarbij OCR ontwikkeling in de tijd en daaraan gekoppeld de sterkte ontwikkeling in de tijd is vastgelegd. Bij het opstellen van een dergelijke database dient aandacht te zijn voor de invloed van monsterverstoring en de betrouwbaarheid van correlaties. Bij voorkeur zou in de database op verschillende wijzen de OCR, met laboratorium -, en veldproeven, moeten worden vastgelegd. Hierdoor kan een eenduidig beeld van de OCR of sterkte ontwikkeling worden vastgelegd.

Een verdere uitwerking van deze sporen kan leiden tot een praktijkrichtlijn op basis waarvan de sterkte ontwikkeling voor het beoordelen van de stabiliteit van dijken en ontwerp van dijkversterkingen kan worden vastgesteld.

Op basis van de gevonden resultaten kan voor lopende dijkversterkingsprojecten wel een pragmatische aanbeveling worden gegeven. De gevonden OCR-waarden voor beide locaties liggen tussen 1,0 en 1,5 met een gemiddelde waarde van 1,24, een standaardafwijking van 0,10 en een karakteristieke ondergrenswaarde van 1,09. Deze waarden gelden voor een kruiptijd van 23 jaar en voor alle kleiige en venige grondsoorten. Deze waarden kunnen ook worden toegepast in dijkversterkingsprojecten, waar stabiliteitsbermen worden ontworpen voor een planperiode van minimaal 23 jaar. De genoemde waarden kunnen worden gebruikt om invulling te geven aan de verwachte 'pre overburden pressure' (POP) behorend bij de toekomstige dagelijkse omstandigheden (TDO), zoals voorgesteld in KPR-Factsheet omgang met grensspanning in het ontwerp (KPR, 2018).

## 5 Referenties

CROW (2022) Handboek construeren met grond. CROW-CUR rapport 162:2022, <https://www.crow.nl/online-kennis-tools/kennismodule-geotechniek>.

Deltares (2021) D-Settlement, User Manual, Deltares systems, version 21.2.

Den Haan, E.J. (1994a) Vertical compression of soils (PhD thesis TUD). Retrieved from: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:b8dc88e0-f400-4d86-9a2e-4e00b68d0472/>.

Den Haan, E.J. (1994b) Stress-independent parameters for primary and secondary compression *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Fdn Eng.* New Delhi 1:65-70.

Den Haan, E.J. (2008) De intrinsieke tijd in het isotachenmodel *Geotechniek*, januari 2008, pp. 34-38.

KPR-Factsheet omgang met grensspanning in het ontwerp. Versie 2. Datum 23-1-2018. Kennisplatform Risicobenadering.

Ladd, C.C. (1991) Stability Evaluation During Staged Construction *Journal of Geotechnical Engineering* vol 117 no 4 p. 540-615.

RWS (2019) Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017. Tech. rep., Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Retrieved from [https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/157033/sh\\_macrostabiliteit\\_3\\_0\\_1.pdf](https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/157033/sh_macrostabiliteit_3_0_1.pdf).

Visschedijk, M.A.T. (2010). Isotachen berekeningen op een sigarendoosje *Geotechniek*, juli 2010, pp. 30-33.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

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