

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

Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Contactpersoon	DIV
Referenties	
Trefwoorden	Macrostabieleit, toename schuifsterkte in de tijd, isotachen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	18-12-2023
Projectnummer	11209373-002
Document ID	11209373-002-GEO-0003
Pagina's	30
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Alexander van Duinen	
	Theo Stoutjesdijk	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Theo Stoutjesdijk	Cor Zwanenburg	Harm Aantjes

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 wordt 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 de isotachen-theorie. 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 aanzienlijk minder dan voorspeld zou worden met de isotachen-methode.

Er zijn twee locaties geselecteerd waar geruime tijd geleden dijken zijn versterkt, waar een flinke ophoging heeft plaatsgevonden op een slappe ondergrond en waar naar verwachting zo beperkt mogelijke invloed is van twee-dimensionale effecten in de ondergrond door ongelijke ophoging. Deze locaties zijn gevonden bij de Lekdijk West (dijkteruglegging Bergambacht) en bij de Anthonie Fokkerweg in Papendrecht (afsluiting Gantel). Op de locaties zijn 3 tot 4 sonderingen en 1 boring uitgevoerd. Vervolgens zijn monsters en terreinspanning geselecteerd voor DSS-, triaxiaal- en K_0 -CRS proeven in het laboratorium.

Er blijkt groot verschil te zitten tussen de proefresultaten en de berekende voorspelling met de isotachen-methode. De isotachen-methode blijkt niet geschikt om de toename van sterkte in de tijd te voorspellen.

Er blijkt wel enige toename van de sterkte in de tijd: de OCR-waarde van de beproefde monsters zit tussen 1 en 1,5. Dit is geen verwaarloosbare toename, maar veel minder dan voorspeld werd met de isotachen-methode voorafgaand aan het onderzoek.

Voor de praktijk is het van belang om de resultaten te vertalen naar praktisch bruikbare regels voor het rekenen aan stabiliteit van waterkeringen. Dit valt buiten de scope van deze eerste analyse.

Daarnaast is het van belang na te gaan waarom de isotachen-methode kennelijk 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 een beter theoretisch kader te bedenken valt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Context, doel en opzet van het onderzoek	6
1.1	Inleiding en context	6
1.2	Doel van het onderzoek	7
1.3	Uitwerking van de onderzoeksopzet	7
1.4	Opzet van het onderzoek en Leeswijzer	8
2	Veld- en laboratoriumonderzoek	10
2.1	Locatiekeuze	10
2.2	Locatie Bergambacht	10
2.3	Papendrecht Afsluiting Gantel	13
2.4	Veldonderzoek	14
2.4.1	Locatie Dijkteruglegging Bergambacht	14
2.4.2	Locatie afsluiting Gantel bij Papendrecht	15
2.5	Laboratoriumonderzoek	16
2.5.1	Algemeen	16
2.5.2	Bergambacht	16
2.5.3	Papendrecht	18
3	Eerste analyse	20
3.1	Berekende parameters	20
3.2	Bergambacht	21
3.3	Papendrecht	23
3.4	Analyse	24
4	Conclusies en aanbevelingen	28

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.

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. In het totale onderzoek moeten 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 een 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 onderzoek is uiteindelijk antwoord op deze laatste vraag. Het onderzoek verloopt echter 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 sterkte-toename significant is: indien nodig: aanpassen van de theoretische beschrijving

Fase 3:

- Vertaling van beschrijving van sterkte-toename naar ontwerp- en beoordelingsprocedure

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.

1.2 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. 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. Dit rapport doet verslag van Fase 1 (de eerste twee vragen).

1.3 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 erop gericht vast te stellen of en in welke mate deze sterkte-ontwikkeling 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. Hiertoe wordt bij twee in het verleden uitgevoerde dijkversterkingen de huidige sterkte van de ondergrond bepaald en wordt deze vergeleken met de volgens het model voorspelde sterkte toename.

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.

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.

Het onderzoek bestaat uit veldonderzoek (sonderingen en boringen) en laboratoriumonderzoek (triaxiaalproeven en samendrukkingsproeven) en een eerste analyse van de resultaten van terrein- en laboratoriumonderzoek.

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.

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.

1.4 Opzet van het onderzoek en Leeswijzer

De toename van de sterkte kan worden berekend met bestaande theorie. Deze wordt namelijk met de isotachen-methode voorspeld. 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 sterktetoeename zoals die in de werkelijkheid is opgetreden. De stijfheidsparameters en grensspanning om de sterktetoeename 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 lastig.

- 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 aanzienlijke hoeveelheid 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.

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

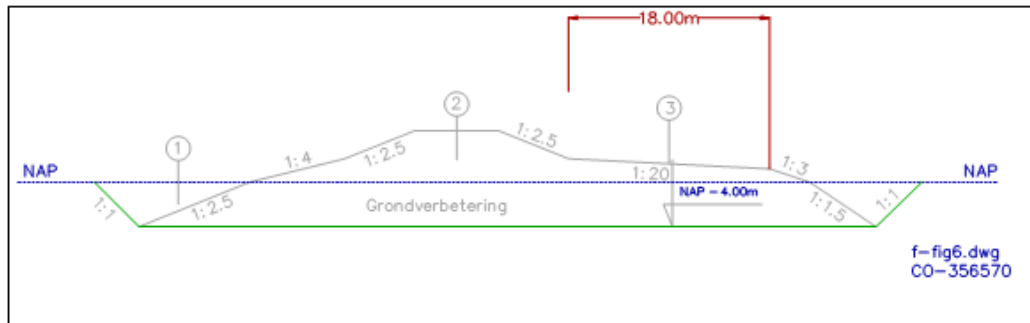
In traject 4 zijn 2 varianten geoptimaliseerd. Een binnenwaartse versterking met ter plaatse van hmp 84.55 een beperkte bochtafsnijding door een asverschuiving van maximaal 5 m naar binnen (variant 'versterking op huidige tracé') respectievelijk een bochtafsnijding van maximaal circa 100 m naar binnen (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.

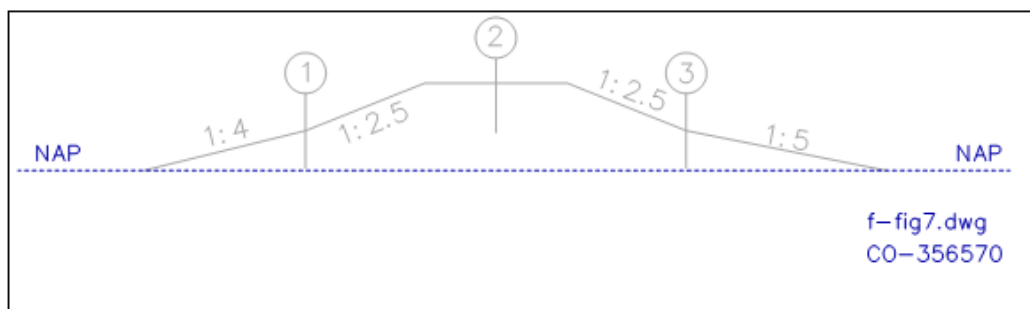
Teneinde onder andere te voorkomen dat het nieuwe dijklichaam tot in lengte van jaren blijft vervormen, is besloten om het nieuwe dijklichaam te funderen op een grondverbetering, dat wil zeggen een gedeelte van het slappe lagenpakket wordt verwijderd en vervangen door zand.

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

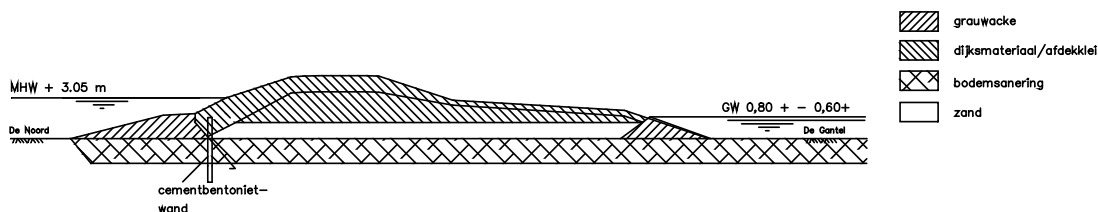
Figuur 2.1 Citaat, zettingstabellen en figuren uit het rapport *Dijkverbetering Lekdijk West Bergambacht*.

Omdat op een deel van het traject ter plekke van de kruin ondanks de grondverbetering nog een zetting van 2,90 m is geprognoseerd 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.



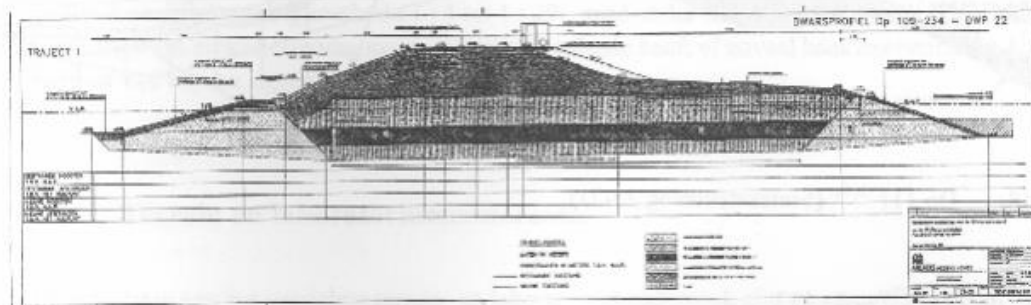
Traject I: dp 109^{+087m} - dp 109^{+288m}

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

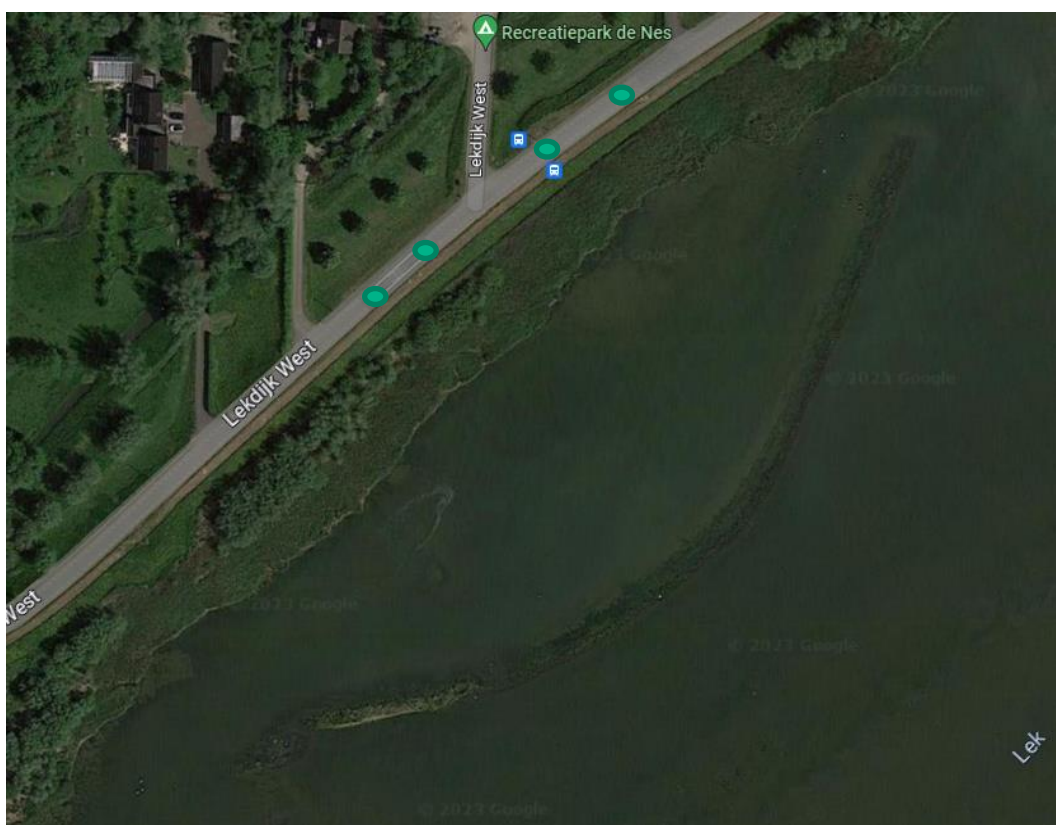
Het buitentalud boven de op NAP + 1,0 m gelegen plasberm heeft een helling 1:2 en 1:3. Het onderste deel met een helling 1:2 krijgt een basaltbekleding. Vanaf de plasberm naar beneden wordt een buitentalud 1:3 aangebracht met stortsteen.

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^{+234m} (conceptbesteksprofiel dwp 22)



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 (inmiddels zal deze dieper liggen) 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 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 σ_{vi}^2 (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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 σ_{vi}^2 (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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 σ'_{vi} (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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 σ'_{vi} (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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 σ'_{vi} (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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 σ'_{vi} (kN/m ²)	Volumiek gewicht bulk (kN/m ³)	Volumiek gewicht droog (kN/m ³)	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. OCR kan zowel worden afgeleid uit de constant rate of strain proeven als 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.

OCR is voor de huidige situatie op beide onderzoekslocaties als volgt bepaald:

- 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: $OCR = \left(\frac{t_{age}}{t_0}\right)^{\left(\frac{c}{b-a}\right)}$, met t_{age} de equivalente tijd in dagen en t_0 de referentietijd in dagen ($t_0 = 1$ dag). 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 testen:
 - Ongedraineerde schuifsterkte ratio s_u/σ'_{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/σ'_{vi} en de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de SHANSEP-parameter m is OCR

berekend met het SHANSEP-model uit de overgeconsolideerde proeven: $OCR =$

$$\left(\frac{s_u}{\sigma_{vi}^* S} \right)^{1/m}.$$

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.

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 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 dijkaanleg.

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- spanning (kPa)	a (-)	b (-)	c (-)	(b-a)/c (-)	m (-)	OCR o.b.v. grens- spanning (-)	OCR o.b.v. isotachen model (-)
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 proef	Consolidatie- spanning (kPa)	q_piek (kPa)	q_eind (kPa)	$S_{u, \text{piek}} / \sigma'_{vc}$ (-)	S (-)	OCR (-)
M029-a2	NC	281,1	219,66	168,23	0,39	0,387	1,0
M031-a2	NC	281	215,14	160,56	0,38	0,387	1,0
M038-a2	NC	612,6	441,88	409,26	0,36	0,349	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	0,349	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)	$s_{u,peik}/\sigma'_{vc}$ (-)	S (-)	OCR (-)
M025-a3	NC	367,02	148,15	131,14	0,40	0,389	1,0
M027-a1	NC	395,19	147,72	131,52	0,37	0,389	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	0,36	1,00
M040-a1	NC	503	375,94	337,79	0,37	0,36	1,00
M043-c1	NC	295,2	206,04	156,07	0,35	0,36	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	0,437	1,00
M031-a3	NC	250,15	107,66	97,95	0,43	0,437	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

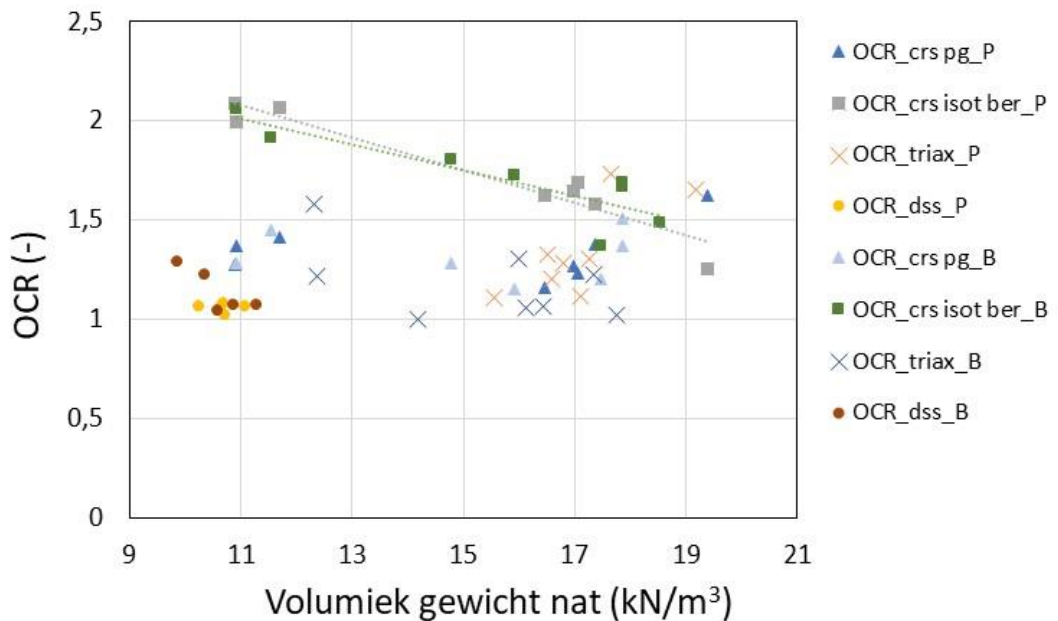
Het doel van een eerste analyse is om na te gaan of:

- 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.

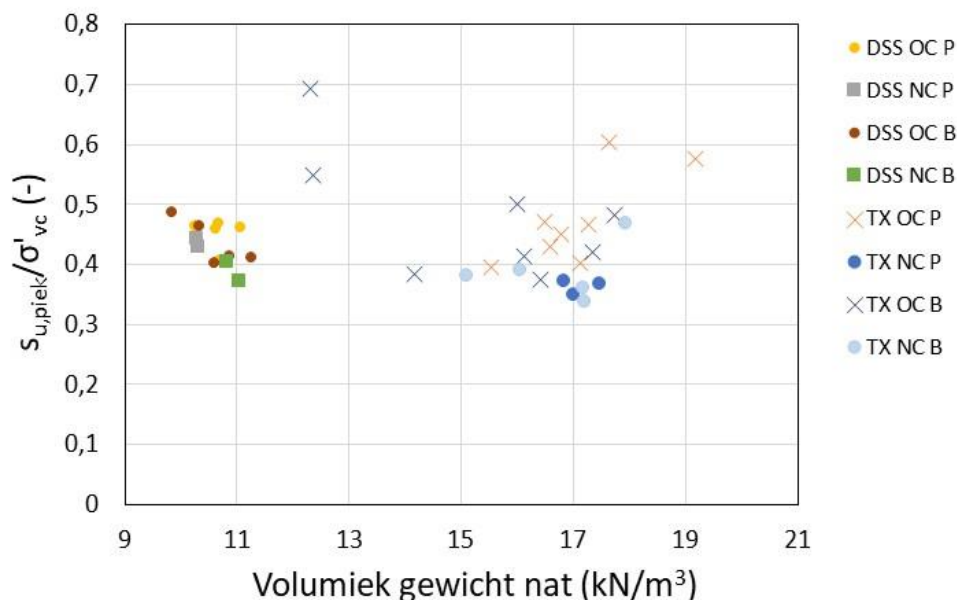
Figuur 3.1 en Figuur 3.2 vertellen het grootste deel van het verhaal. Op basis van de bevindingen in deze twee figuren zijn de conclusies en aanbevelingen geformuleerd. De figuren zijn samengesteld uit het veld- en laboratoriumonderzoek van Wiertsema. Deze rapporten van Wiertsema worden bij dit rapport meegeleverd.

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.



Figuur 3.2 Piekwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio $s_{u, piek} / \sigma'_{vc}$ 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 kleig 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 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 volgens 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 "gemeten" OCR. 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 berekende OCR op basis van de isotachen-theorie geeft een duidelijke trend met een sterkere OCR-toename in de tijd bij afnemende volumieke gewichten, zoals te verwachten op basis van de abc-parameters. De triaxiaalproeven en direct simple shear proeven hebben die trend helemaal niet. De OCR op basis van de grensspanning uit CRS-testen heeft die trend misschien een beetje, als de resultaten voor de zandige klei (>18 kN/m³) 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 (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 overconsolidatie ratio, 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 twee sporen in het vervolgonderzoek mogelijk. Het ene 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 tweede spoor is een meer praktisch spoor waar op basis van ervaringen een voorstel wordt opgesteld voor een praktijkrichtlijn.

In het fundamentele 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 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.

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