



ir. J.D. Stoop
Adviseur Waterkeringen
Hoogheemraadschap
van Rijnland

Samenvatting

Resultaten van dijktoetsingen op macrostabiliteit en de benodigde omvang van versterking van dijken die op macrostabiliteit zijn afgekeurd hangen onder andere af van de aangehouden schuifsterkteparameters van in en onder de dijk onderscheiden grondlagen. Bepaling van die schuifsterkteparameters is nog regelmatig onderwerp van discussie. Gezien de maatschappelijke kosten en impact van dijkversterkingen is het bestaande gebrek aan eenduidigheid op dit punt voor de waterkeringbeheerder soms ongemakkelijk wanneer beslissingen over noodzaak en omvang van dijkversterkingen moeten worden genomen. Dit artikel geeft een overzicht van de bestaande onduidelijkheid en gevolgen daarvan voor de beheerpraktijk. In het verlengde daarvan wordt, op basis van ervaringen uit het lopende programma regionale keringen bij het hoogheemraadschap van Rijnland, een praktische oplossingsrichting aangedragen om op korte termijn tot meer eenduidigheid te komen. Deze oplossingsrichting borduurt min of meer voort op het wat doodgelopen fitfactoren-onderzoek, waarmee het verschil in resultaten tussen celproef en triaxiaalproef werd beoogd te overbruggen. Onderliggende gedachte hierbij is dat het toetsen op macrostabiliteit geen exacte wetenschap is, maar deels ook een ritueel, waarbij op de praktijkervaring geijkte afspraken een belangrijk onderdeel zouden moeten vormen.

ringen nader ingegaan.

1. Stabiliteitsanalyse op basis van regionale celproevenverzameling

Celproevenverzamelingen zijn in den lande vanuit het verleden volop beschikbaar. Primaire keringen zijn tot in de jaren negentig, en vele zelfs tot op dit moment, op stabiliteit beoordeeld met schuifsterkteparameters uit celproeven. De celproef is in de jaren negentig vaarwel gezegd. De proevenverzameling is daarmee niet meer uitbreidbaar, en maatwerkanalyses op basis van dezelfde proef zijn niet meer mogelijk. Op termijn zal dit ertoe leiden dat de bestaande celproevenverzamelingen hun praktisch bruikbare waarde zullen verliezen, tenzij kan worden gekomen tot een voldoende eenduidig verband tussen celproefresultaten en triaxiaalproefresultaten (waarmee systematische verschillen kunnen worden versleuteld in zogenaamde fitfactoren).



Vanuit de praktijk van de waterkeringbeheerder Schuifsterkteparameters in de stabiliteitsanalyse van dijken

Figuur 1 Veenkade nabij Hazerswoude-Dorp.

Inleiding

Primaire waterkeringen worden sinds de jaren negentig periodiek getoetst op veiligheid. In de periode na de eeuwwisseling zijn daar op basis van provinciale verordeningen duizenden kilometers aan regionale waterkeringen bijgekomen. Keringen die niet blijken te voldoen aan de veiligheidsnorm moeten worden versterkt. Belangrijk aspect in de veiligheidsbeoordeling is de macrostabiliteit binnenwaarts. Afkeuren op dit aspect betekent dat het dijkprofiel moet worden versterkt, met vaak grote ruimtelijke consequenties. En dat kost vaak veel geld.

Indien de wijze van beoordeling van de stabiliteit ondubbelzinnig vast zou staan is dat een kwestie van accepteren, zo zijn dan eenmaal de vastgestelde spelregels. Het toetsresultaat of de voorafgestelde versterkingsmaatregel is dan, in ieder geval vanuit geotechnisch oogpunt, geen onderwerp meer van discussie.

Zover zijn we helaas nog niet. Een onderwerp van veel recente discussie in dit verband is de wijze van bepaling van de schuifsterkte van in de stabiliteitsanalyse onderscheiden grondlagen.

Verskillende benaderingen voor de schuifsterkte in de stabiliteitsanalyse

De 'juiste' wijze van stabiliteitsanalyse van waterkeringen en de 'juiste' wijze van bepaling van daarin te hanteren schuifsterkteparameters van met name veen en (humeuze) klei is nog volop onderwerp van ontwikkeling en discussie. In historisch perspectief kunnen grofweg drie benaderingen worden onderscheiden:

1. De stabiliteitsanalyse wordt uitgevoerd met de effectieve sterkteparameters uit bestaande proevenverzamelingen uit celproeven (de oude praktijk);
2. De stabiliteitsanalyse wordt uitgevoerd met de effectieve sterkteparameters uit triaxiaalproeven bij 2% tot 5% rek (de huidige praktijk);
3. De stabiliteitsanalyse wordt uitgevoerd met ongedraineerde schuifsterkteparameters (de mogelijk toekomstige praktijk).

In onderstaande wordt kort op deze drie benade-

2. Stabiliteitsanalyse op basis van triaxiaalproefresultaten bij 2% tot 5% rek

Sinds de triaxiaalproef als de standaard voor de bepaling van schuifsterkteparameters in de stabiliteitsanalyse is geïntroduceerd worden proevenverzamelingen op basis hiervan opgebouwd. De gemobiliseerde schuifsterkte van met name slappe grond blijkt zeer sterk afhankelijk van de rek waarbij deze wordt vastgesteld.

In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [1], alsmede het latere Addendum, is aangegeven dat de schuifsterkte bepaald mag worden bij een rek van 2% tot 5%. Dit introduceert een zekere mate van willekeur bij het vaststellen van de schuifsterkteparameters voor het uitvoeren van stabiliteitsberekeningen. Hoewel uit geotechnisch oogpunt niet de voorkeursmethodiek, wordt dan veiligheidshalve (alsmede uit praktische overwegingen) vaak maar uitgegaan van de schuifsterkteparameters bepaald uit de meertrapsproef bij 2% rek.

3. Stabiliteitsanalyse op basis van modellering van ongedraineerd materiaalgedrag

In de 'ongedraineerde stabiliteitsanalyse' wordt rekening gehouden met de wateroverspanningen die tijdens het bezwijkproces kunnen worden gegenereerd. Analyse op basis van modellering van ongedraineerd grondgedrag sluit daarmee beter aan op de fysische werkelijkheid, en sluit ook beter aan op de internationale praktijk [2]. Deze benadering is echter wel duidelijk anders dan de op dit moment gebruikelijke op basis van gedraineerde schuifsterkteparameters en het daarbij vastgestelde stelsel van partiële factoren. Dit houdt in dat nog de nodige doorontwikkeling nodig is alvorens deze benadering geschikt is voor brede toepassing in de praktijk, waarbij onder andere te denken aan het vaststellen van veldmeetmethoden en laboratoriumbepalingen op basis waarvan het grondgedrag te modelleren, alsmede het vaststellen van protocollen of voorschriften voor de uitvoering en interpretatie daarvan. Aangegeven is dat het nog wel enkele jaren kan duren voordat deze benadering als nieuwe aanpak uitontwikkeld is, zie 'Leidraad Rivieren en proevenverzameling met celproefresultaten' [3].

Gevolg voor de praktijk van het waterkeringenbeheer bij het hoogheemraadschap van Rijnland

Voor de waterkeringbeheerder die sinds de jaren negentig zijn primaire keringen moet toetsen op veiligheid en zonodig versterken en, voor zover in West Nederland beheerder, sinds 2007 voor zijn regionale keringen hetzelfde moet doen, maakt dit alles het er niet eenvoudiger op. Het hoog-

heemraadschap van Rijnland beheert enkele tientallen kilometers primaire categorie-c keringen en ca. 1.300 km regionale waterkeringen (boezemkaden en tussenboezem- of polderkaden). Het toetsen op veiligheid van al deze keringen kost enkele miljoenen euro's. Met het verbeteren, waarvan de kosten voor de regionale keringen door het hoogheemraadschap zelf moeten worden geïnd en gedragen, zijn naar verwachting honderden miljoenen euro's gemoeid, gezien de inschatting dat een kwart tot een derde van de totale kadelengete niet aan de stabiliteitsnorm zal blijken te voldoen. Het naast elkaar bestaan van de hiervoor beschreven benaderingen voor de bepaling van de schuifsterkte, de verschillen daartussen en de interpretatieruimte daarbinnen, kan leiden tot twijfel over de noodzaak en omvang van kostbare dijkversterkingsprojecten. Bijkomend gevolg is een gedurende de toetsing en verbeteringsprojecten regelmatig bediscussieerde aanpak wat op zichzelf ook geld en inspanning kost (ook in de aansturing van adviesbureau's die het inhoudelijke toets- en ontwerpwerk in opdracht onder regie uitvoeren). Laatstgenoemd probleem is het meest manifest

in geval van veenkaden. Deze worden bij het toetsen aan de norm grootschalig afgekeurd op stabiliteit, en de kosten van versterking tot de norm zijn in de regel enorm, dit als gevolg van de slappe ondergrond en de vaak grote kerende hoogte en daarmee samenhangende lange taluds, zie figuur 1.

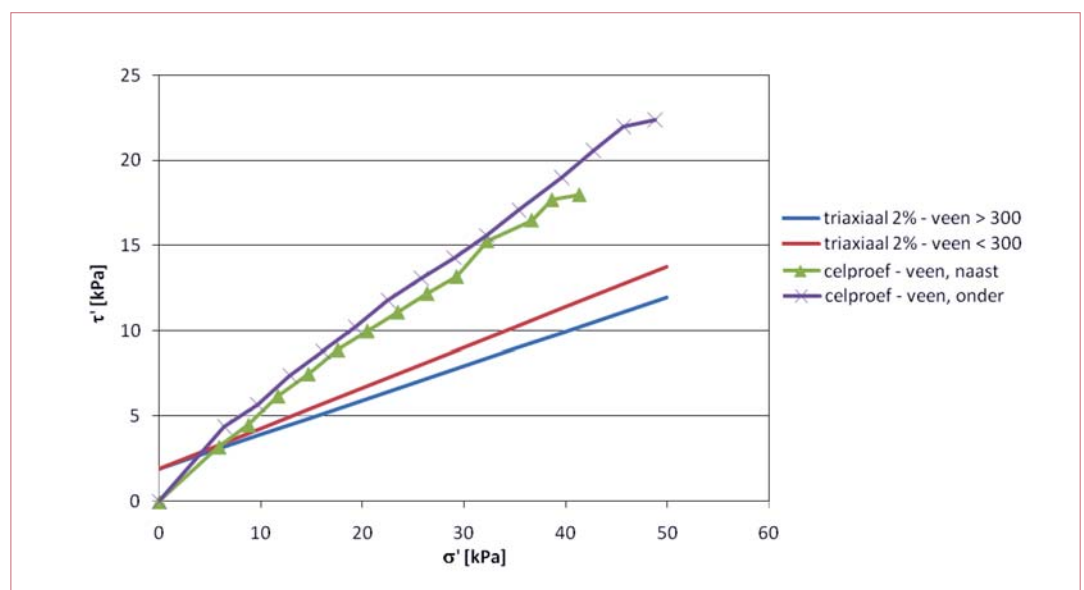
Ter indicatie: het op normsterkte brengen van een op binnenwaartse stabiliteit afgekeurde kleiige boezemkade met een kerende hoogte van 2 meter kost afhankelijk van de complexiteit maximaal 1 miljoen Euro per kilometer. Voor de veenkaden langs diepe droogmakerijen met een kerende hoogte van 4 meter loopt dit al gauw op tot meer dan 2 miljoen Euro per kilometer. Het hoogheemraadschap van Rijnland beheert ruim 150 km van dergelijke veenkaden.

Vergelijking van de oude met de huidige praktijk van schuifsterktebepaling

Voor de toets op veiligheid van de regionale keringen is medio 2007 door het hoogheemraadschap van Rijnland besloten een nieuwe proevenverzameling op te bouwen op basis van meer-

	Aantal proeven	c'_{kar} [kN/m ²]	$\Delta\phi'_{kar}$ [°]	$\geq g_{m;c}$ [-]	$\geq g_{m;\epsilon\Delta}$ [-]	c'_d [kN/m ²]	$\Delta\phi'_d$ [°]
Veen, w > 300%	112	2,6	13,0	1,35	1,15	1,9	11,4
Veen, w < 300%	38	2,6	15,3	1,35	1,15	1,9	13,4
Klei humeus 12,5-14,4 kN/m ³	54	2,8	16,9	1,2	1,15	2,3	14,8
Klei siltig 14,5-16,4 kN/m ³	53	3,2	20,4	1,2	1,15	2,7	17,9
Klei zandig > 16,4 kN/m ³	49	2,0	27,6	1,2	1,10	1,7	25,4

Tabel 1 Resultaten schuifsterktebepaling o.b.v. meertraps triaxiaalproeven bij 2% rek [4].



Figuur 2 Rekenwaarden uit meertraps triaxiaalproef op veen bij 2% rek versus rekenwaarden uit celproef.

traps triaxiaalproeven. Vanuit de combinatie van het zekere voor het onzekere te willen nemen en daarbij ook zo kostenefficiënt mogelijk te werk te gaan, is er daarbij voor gekozen om de schuifsterkte veen- en (humeuze) kleilagen te bepalen uit meertraps triaxiaalproeven bij 2% rek. De resultaten tot medio 2009, uitgaande van linearisatie van de s' - t' -relatie, lognormale verdeling van de c' en φ , en uitgaande van een spreidingsreductiefactor G van 0,5, zijn samengevat in *tabel 1*.

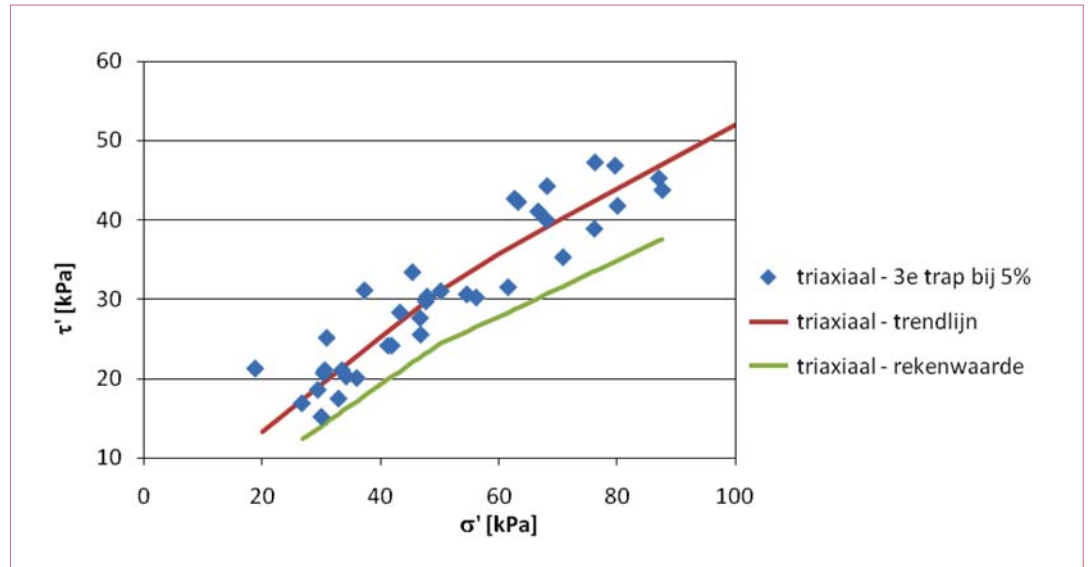
De resultaten lijken globaal gezien overeen te komen met de resultaten die in het beheergebied van het hoogheemraadschap van Amstel, Gooi en Vecht zijn gevonden [5], en passen globaal gezien ook redelijk over de representatieve waarden uit de NEN 6740. Niettemin lijken de resultaten 'laag' indien vergeleken met de resultaten uit het systematisch boezemkade-onderzoek, waarbij nog gebruik werd gemaakt van celproeven.

Om die reden is eind 2008 Deltares gevraagd een regionale proevenverzameling voor de schuifsterkte van veen in de regionale keringen van het hoogheemraadschap van Rijnland op te stellen op basis van de bestaande celproefresultaten uit dit systematisch boezemkade-onderzoek. In de uitwerking hiervan [6] zijn enkele honderden beschikbare celproefresultaten op veenmonsters beschouwd. Om onzekerheid samenhangend met regionale spreiding af te dekken is ook hier gerekend met een spreidingsreductiefactor G van 0,5. Het samengevatte resultaat is weer gegeven in *figuur 2*.

Figuur 2 laat zien dat in het grijze gebied met lage spanningen (tot ca. 10 kPa) de resultaten van de beide proevenverzamelingen elkaar kruisen. Bij hogere spanningen zijn de schuifsterkten uit de celproevenverzameling beduidend hoger.

Om een indruk te krijgen van het effect van het gebruik van de beide proevenverzamelingen op het resultaat van de stabiliteitsanalyse van een concreet dijkprofiel is voor een afgekeurd boezemkadeprofiel van de Aderpolder de stabiliteitsfactor berekend in zowel de actuele situatie als in de uitgeconsolideerde situatie na versterking met een kleiberm en een kleiaanvulling over het binnentalud. Het kadeprofiel is te karakteriseren als veenkade met een kerende hoogte van ca. 2 meter. De ondergrond ter plaatse van de kruin bestaat uit een 1 tot 2 meter dikke kleiige top-laag met daaronder een metersdik veenpakket. De resultaten zijn samengevat in *tabel 2*.

De gevonden stabiliteitsfactoren zijn karakteristiek voor veel slappe kaden. Bij toetsing ontlopen de resultaten elkaar niet veel. Dit is te verklaren uit het gegeven dat de terreinspanningen langs



Figuur 3 Triaxiaalproefresultaten op veen bij 5% rek in de derde trap.

de kritieke cirkel overwegend laag zijn, tot maximaal orde grootte 10 kPa. In de uitgeconsolideerde situatie na versterking liggen de terreinspanningen langs de kritieke cirkel hoger. Gevolg is dat berekening met schuifsterkten uit de regionale celproevenverzameling tot een beduidend minder zware benodigde versterking leidt dan berekening met schuifsterkten uit de triaxiaalproevenverzameling.

Schuifsterkten bepaald met celproeven worden algemeen als 'veilig' beschouwd. Uitgaande van deze veronderstelling levert het gebruik van schuifsterkten bepaald uit de triaxiaalproevenverzameling bij 2% rek dus onnodig zware ontwerpen op. Op basis van deze conclusie overweegt het hoogheemraadschap van Rijnland om bij het ontwerpen van kadeversterkingen voorlopig gebruik te maken van de regionale celproevenverzameling voor veen.

Nadere beschouwing van de celproef- en triaxiaalproefresultaten

Niettemin heeft de stap terug naar de oude celproefresultaten iets onbevredigends. Dit hangt mede samen met het niet meer uitbreidbaar zijn van deze proevenverzameling. Gerichte lokale aanscherping van de sterkteparameters van de ondergrond in een zekere dijkstrekking is daarmee niet mogelijk. Daarnaast speelt het meer formele (maar in de kern eenvoudig oplosbare) bezwaar dat voor de celproefresultaten in de vigerende leidraden geen materiaalfactoren meer zijn opgenomen, en deze dus strikt genomen niet meer zouden mogen worden gebruikt.

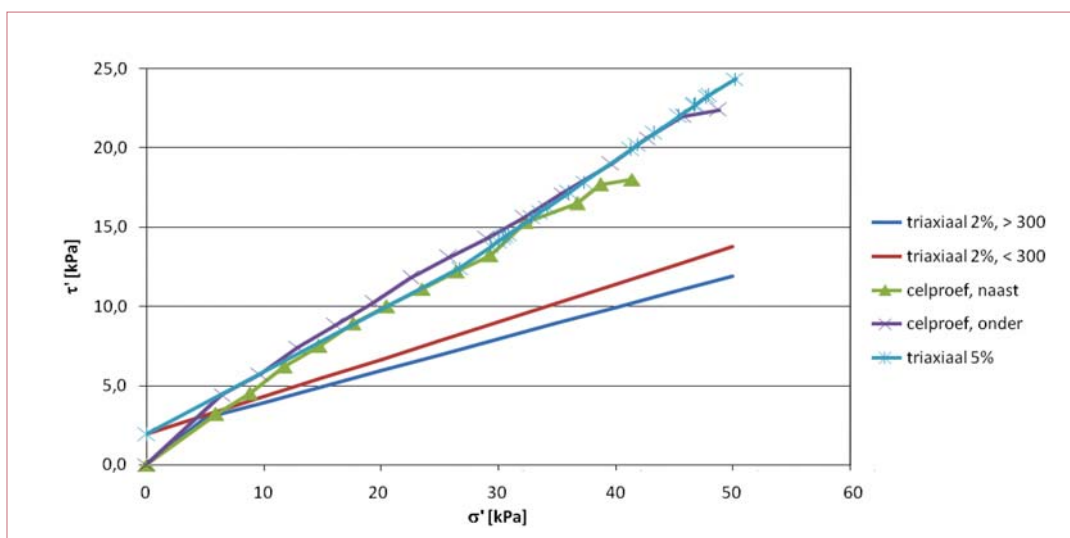
Een alternatief voor het terugvallen op de cel-

	Actueel profiel	Versterkt profiel
Triaxiaalproevenverzameling	0,42	0,58
Celproevenverzameling	0,39	0,88

Tabel 2 Vergelijking stabiliteitsfactor boezemkadeprofiel met triaxiaal- en celproevenverzameling.

proefresultaten is gebruik te maken van resultaten uit triaxiaalproeven bij hogere rek. Zoals eerder aangegeven is de rekgrens waarbij de schuifsterkte uit triaxiaalproeven moet worden bepaald niet scherp vastgelegd, maar gegeven als range van 2% tot 5%. Voor veen en klei wordt normaliter bij 5% rek een beduidend hogere schuifsterkte bepaald dan bij 2% rek. Omdat in het kader van het regionale keringenprogramma bij het hoogheemraadschap van Rijnland tot dusver vooral meertraps triaxiaalproeven bij 2% rek zijn uitgevoerd, bieden alleen de derde trappen uit deze proeven bruikbare gegevens. Het resultaat van analyse van een deelverzameling van 37 triaxiaalproefresultaten op veenmonsters bij 5% rek in de derde trap is weergegeven in *figuur 3*. Het zal duidelijk zijn dat hiermee alleen resultaten voor hogere spanningsniveau's worden gevonden, vanaf ca. 25 kPa. De spreiding in de triaxiaalresultaten ten opzichte van de 'trendlijn' lijkt werkbaar, de variatiecoëfficiënt van de schuifsterkte bedraagt ca. 0,10.

In *figuur 4* zijn de rekenwaarden van de schuifsterkte uit de triaxiaalresultaten bij 5% rek in de derde trap afgezet tegen de schuifsterkte



Figuur 4 Rekenwaarden uit triaxiaalproef op veen bij 5% rek versus triaxiaalresultaten bij 2% rek en celproefresultaten.

uit de celproevenverzameling en de triaxiaalproevenverzameling bij 2% rek. Daarbij is voor de triaxiaalresultaten bij 5% rek vanaf ca. 25kPa (ondergrens spanningsbereik) lineair teruggeëxtrapoleerd naar de gevonden rekenwaarde van de effectieve cohesie uit de triaxiaalresultaten bij 2% rek.

De overeenkomst tussen de sigma-tau-relatie uit de triaxiaalproefresultaten bij 5% rek en de sigma-tau-relaties uit de celproevenverzameling is opmerkelijk. Aangezien de stabiliteitsanalyse van dijken op basis van de schuifsterkten uit celproeven in het algemeen als veilig wordt beschouwd, lijkt deze constatering, althans tenminste voor veen, bruikbaar om op korte termijn op voort te borduren. Dit is wenselijk uit oogpunt van uitbreidbaarheid van de proevenverzamelingen en waar nodig kunnen uitvoeren van gerichte lokale maatwerk analyses waarbij de 'strafkorting' in de vorm van de term $t \cdot S \sqrt{(G^2 + 1)/N}$ in de berekening van de karakteristieke waarde zoveel mogelijk voorkomen moet worden.

Conclusies en aanbevelingen

Op basis van voorgaande beschouwing worden de volgende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan:

- Over de 'juiste' wijze van bepaling van de schuifsterkte van grond ten behoeve van stabiliteitsanalyse van dijken bestaat momenteel de nodige onduidelijkheid. Voor de beheerpraktijk is dit ongelukkig. Er moet in komende jaren veel gebeuren. Tot 2012 moeten in West Nederland bijvoorbeeld duizenden kilometers regionale kering worden getoetst, en voor

2015 moeten de meest risicovolle keringen worden verbeterd.

- De bestaande onduidelijkheid over de 'juiste' wijze van bepaling van de schuifsterkte van grond leidt tot discussies die de legitimiteit van noodzaak en omvang van dijkversterkingen van 'onvoldoende' getoetste keringen ondermijnen. Daarnaast leidt het, weliswaar secundair, tot miscommunicatie met adviesbureau's die voor toetsing of ontwerpen van dijkverbeteringen worden ingeschakeld. Vertraging in benodigde dijkversterkingsprogramma's is hiervan mede het gevolg.
- Gezien de opgave waar de waterschappen op korte termijn voor staan is het wenselijk deze onduidelijkheid op korte termijn, in ieder geval voorlopig, op praktische wijze op te lossen. Gedacht wordt aan een eenduidiger protocol dat voor iedereen voldoende duidelijkheid biedt en aansluit bij de praktijkervaring van 'voldoende veilig' en dus de celproefresultaten. De triaxiaalproefresultaten bij 2% rek lijken dan meer veiligheid dan nodig in zich te bergen. De ervaring leert dat voor slappe Nederlandse grond bij een hogere rek, tot maximaal 5%, altijd een hogere schuifsterkte wordt gevonden (met andere woorden strain softening speelt geen rol).
- De geconstateerde overeenkomst voor veen tussen triaxiaalproefresultaten bij 5% rek en de celproefresultaten lijkt een praktisch bruikbaar aanknopingspunt te bieden. Met oog op nadere uitwerking vanuit dit aanknopingspunt zal het hoogheemraadschap van Rijnland op

korte termijn ook eentrapsg triaxiaalproeven tot tenminste 5% rek laten uitvoeren. Resultaten hieruit kunnen worden gebruikt om de impliciete veronderstelling te verifiëren dat de invloed van de eerste twee belastingtrappen tot 2% rek op het resultaat van de derde trap bij 5% rek betrekkelijk gering is. Daarnaast moet dit aanvullende resultaten in het lagere spanningsbereik opleveren. De analyse zal daarnaast verder worden uitgebreid naar (humeuze) klei.

- Fundamenteel onderzoek en daaruit voortvloeiend voortschrijdend inzicht is wenselijk om de onderbouwing van al dan niet benodigde dijkversterkingen steviger te kunnen maken. Op korte en middellange termijn speelt dit nu concreet met betrekking tot de ontwikkeling van een duidelijk protocol voor uitvoering en gebruik van resultaten uit de DSS-proef op veen respectievelijk de ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Daarbij moeten echter de overige onzekerheden in het ritueel van stabiliteitsanalyses van dijken niet uit het oog worden verloren. Denk hierbij aan de subjectiviteit van de adviseur met betrekking tot met name ook de ondergrondschematisering en schematisering waterspanningen. Aanbevolen wordt een nieuwe benadering niet eerder dan na ontwikkeling van een duidelijk en breed toepasbaar protocol en opbouw van voldoende praktijkervaring te introduceren.

Referenties

- [1] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*, TAW, juni 2001.
- [2] *Ongedraineerde stabiliteitsanalyse*, E.J. den Haan, Geotechniek, juli 2006, 32-37.
- [3] *Leidraad Rivieren en proevenverzameling met celproefresultaten*, Deltares / T.A. van Duinen, rapportnr. 1001594-001-GEO-0007, augustus 2009.
- [4] *Regionale proevenverzameling Rijnland - versie 8 juli 2009*, Grontmij, juli 2009.
- [5] *Regionale proevenverzameling, schuifsterkteparameters voor boezemkeringen*, L. Golovanova, Geotechniek, oktober 2009, 42-46.
- [6] *Gebruik gegevens celproeven bij onderzoek veenkaden*, Deltares / J. Heemstra en H.M.G. Kruse, rapportnr. 1001587-001-GEO-0002-sr, oktober 2009. ■