

Memo

Aan
Bianca Hardeman (RWS WV)

Datum
11 juli 2014

Kenmerk
1209434-006-GEO-0007

Aantal pagina's
62

Van
Alexander van Duinen

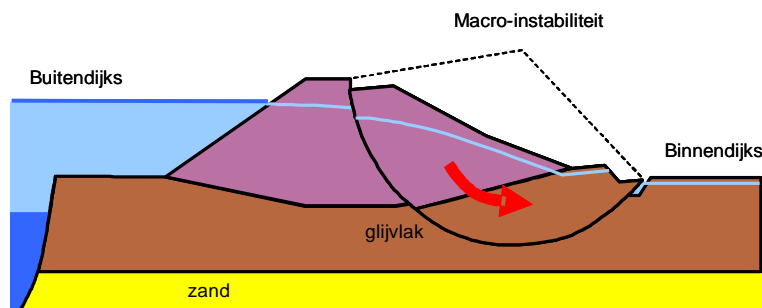
Doorkiesnummer
+088 335 720 1

E-mail
alexander.vanduin@deltares.nl

Onderwerp
Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostabiliteit in WTI 2017 - informatie voor besluitvormingsproces

Inleiding

In het programma WTI 2017 wordt onder meer gewerkt aan een nieuwe toetsmethode voor het toetsspoor macrostabiliteit. Macro-instabiliteit is een faalmechanisme dat de stabiliteit van een dijk of dam ernstig kan bedreigen. Als gevolg van een hoge (of juist lage) waterstand voor de waterkering of extreme neerslag (of juist droogte), in combinatie met andere belastingen, neemt de sterkte van de grond en de dijk af. Als de sterkte (ofwel de schuifweerstand van de grond) onvoldoende is, kunnen grote delen van het grondlichaam langs rechte en/of gebogen glijvlakken, afschuiven (zie Figuur 1). Dit zowel binnenwaarts als buitenwaarts, waarna de dijk of dam zijn waterkerende functie verliest.



Figuur 1 Macro-instabiliteit van een dijktalud.

In de eenvoudige toets (toetslaag 1) wordt met eenvoudige beslisregels getoetst of de kans op falen door macro-instabiliteit verwaarloosbaar klein is. De bestaande geometrische toets komt in het WTI 2017 te vervallen, omdat er twijfels zijn bij de onderbouwing hiervan. Hiervoor in de plaats komt een simpeler geometrische toets. Er zal vaker een gedetailleerde toets moeten worden uitgevoerd.

De bestaande geometrische toets komt in het WTI 2017 te vervallen en wordt vervangen door een simpeler geometrische toets. Hierdoor zal vaker een gedetailleerde toets moeten worden uitgevoerd.

In de gedetailleerde toets op macrostabiliteit (toetslaag 2) wordt de macrostabiliteit met een glijvlakanalyse beoordeeld. In het WTI 2017 wordt voorgesteld de glijvlakanalyse op de volgende onderdelen te verbeteren:

- Nieuw materiaalmodel voor het karakteriseren van de schuifsterkte van grond, waarbij voor grondsoorten met een lage doorlatendheid, zoals klei en veen, wordt uitgegaan van ongedraineerd grondgedrag en voor grondsoorten met een hoge doorlatendheid, zoals zand, wordt uitgegaan van gedraineerd grondgedrag. Hiermee hangt samen dat de bepaling van schuifsterkteparameters in het veld en in het laboratorium op een andere manier moet worden uitgevoerd. Op dit onderwerp wordt in de voorliggende notitie verder ingegaan.
- Nieuw schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij. Dit is een schuifvlakmodel, waarmee een vrije schuifvlakvorm kan worden berekend en wat rekening houdt met de horizontale krachten tussen de lamellen. Het huidige LiftVan-schuifvlakmodel blijft beschikbaar op de achtergrond om controle-berekeningen uit te voeren. Het Spencer-model berekent veelal stabiliteitsfactoren die enkele honderdsten lager liggen dan bij het LiftVan-model.
- Verbetering van de schematisering van waterspanningen. Dit betreft uniformering van de schematisering van waterspanningen in de gedetailleerde toets en de ontwikkeling van een grondwaterstromingsmodel voor de toets op maat (toetslaag 3). Voor de gedetailleerde toets wordt nauw aangesloten bij de bestaande kennis uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. Het schematiseren van waterspanningen is complex. De voorgestelde verbeteringen moeten leiden tot meer eenduidigheid en betrouwbaarheid bij het schematiseren van de waterspanningen bij het toetsen van macrostabiliteit.

De gedetailleerde toets voor macrostabiliteit wordt in het WTI 2017 verbeterd door het toepassen van een materiaalmodel uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte voor klei en veen, toepassen van het schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij en verbetering van de schematisering van de waterspanningen.

Naast de genoemde voorstellen voor verbetering van de toets op macrostabiliteit hebben uiteraard ook de algemene veranderingen in het WTI 2017, zoals de overstap op overstromingskansen, keuze voor nieuwe faalkansruimtefactoren, nieuwe partiële veiligheidsfactoren, nieuwe hydraulische randvoorwaarden en het stochastisch ondergrondmodel consequenties voor het toetsen van macrostabiliteit. Op deze punten wordt in de voorliggende notitie niet verder ingegaan. Deze punten worden in andere documenten toegelicht.

De voorliggende notitie gaat in op de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte. Dit is een heel wezenlijke aanpassing ten opzichte van de huidige toetspraktijk van macrostabiliteit. In juli 2014 zal DG RW een principe besluit nemen over de overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte in de gedetailleerde toets. In deze notitie wordt informatie aangedragen voor de besluitvorming.

Deze notitie is tot stand gekomen met medewerking van Ed Calle, Wijbren Epema, Bianca Hardeman, Ruben Jongejan, Jan Tigchelaar en Meindert Van.

Nieuw materiaalmodel

Het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte houdt in het kort het volgende in:

- Toepassing van het Critical State Soil Mechanics model en de SHANSEP techniek voor het karakteriseren van het gedrag van de grond (zowel zware klei, organische klei, veen en zand). Het Mohr-Coulomb model dat in het WTI 2006 wordt toegepast, zal in het WTI 2017 niet meer worden toegepast.
- Onderscheid maken tussen gedraineerd grondgedrag en ongedraineerd grondgedrag. Bij grondsoorten met een hoge doorlatendheid, zoals zand, kan drainage plaats vinden tijdens afschuiven (taludinstabiliteit) en is sprake van gedraineerd grondgedrag. Bij grondsoorten met een lage doorlatendheid, zoals klei en veen, vindt weinig of geen drainage plaats tijdens afschuiven en is sprake van ongedraineerd grondgedrag.
- De in situ toestand van de grond in rekening brengen via de grensspanning, waarmee onderscheid wordt gemaakt tussen normaal geconsolideerd grondgedrag en overgeconsolideerd grondgedrag.
- Rekenen met de bezwijksterkte van grond (ultimate state) in plaats van sterkte bij een kleine vervorming in laboratoriumproeven.
- Schuifsterkte van klei bepalen met eentraps anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven en voor veen met direct simple shear proeven met constante hoogte. De grensspanning wordt in het veld bepaald met sonderingen.

Deze punten worden in onderliggende notities (bijlagen 1 tot en met 4) verder toegelicht.

Onderdeel van het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zijn het toepassen van het Critical State Soil Mechanics model en de SHANSEP techniek, het onderscheid maken tussen normaal geconsolideerd gedrag en overgeconsolideerd gedrag, het rekenen met de bezwijksterkte van grond en het bepalen van de schuifsterkte van klei met eentraps anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven, voor veen met direct simple shear proeven met constante hoogte en het bepalen van de grensspanning met sonderingen.

Besluitvormingsproces

In 2014 zal door DG RW een besluit worden genomen over het al dan niet toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte voor het toetsen van macrostabiliteit binnen het WTI 2017. Hiervoor is een beslisdocument opgesteld. Dit beslisdocument is in vier fases tot stand gekomen.

Met DG RW en de WTI Coördinatiegroep is afgesproken dat het toepassen van het ongedraineerde schuifsterkte model bij het toetsen van macrostabiliteit binnen het WTI 2017 alleen wordt voorgeschreven indien:

1. De overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte aantoonbaar relevant is:
 - Waarom willen we rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?
 - Wat is het verschil met huidige voorschriften?
 - Welke is het effect op het veiligheidsbeeld?
2. De theorie correct en consistent is vertaald naar rekenregels:
 - Is de theorie achter het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voldoende onderbouwd?
 - Is de theorie op de juiste manier vertaald naar rekenregels?
 - Past de theorie in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie?

3. De rekenregels in de praktijk toepasbaar zijn:
 - Zijn er in de praktijk voldoende gegevens voor het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?
 - Welke is de inspanning om deze in het juiste format te verzamelen?
 - Is er voldoende kennis bij waterkeringbeheerders om te kunnen rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?
4. Nieuwe voorschriften beleidsmatig acceptabel zijn:
 - Wat zijn de financiële consequenties van implementatie?
 - Wat betekent de overgang voor lopende uitvoeringsprogramma's?
 - Wat is de relatie met andere ontwikkelingen (Dijken op Veen, STOWA – regionale waterkeringen).

Voor het nemen van een besluit over het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zal DG RW voor punt 1 en 2 advies vragen aan de ENW Voorbereidingsgroep en voor punt 3 aan de WTI Coördinatiegroep. Om te komen tot een besluit wordt het volgende proces gevolgd:

- In een eerste notitie is de relevantie van de overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte vastgelegd. Deze notitie zal worden toegelicht bij DG RW. Dit betreft deel 1 van een notitie, die later met andere aspecten verder is uitgebreid.
- In deel 2 van de notitie is aangegeven hoe de theorie is vertaald naar rekenregels. De inhoudelijke onderbouwing van de rekenregels en implementatie in de gedetailleerde toets wordt samen met deel 1 van de notitie voorgelegd aan de ENW Voorbereidingsgroep.
- In deel 3 van de notitie zijn de praktische consequenties van de overstap beschreven. Deel 1 en 3 van de notitie worden voorgelegd aan de WTI Coördinatiegroep. Deel 2 wordt ter informatie meegestuurd. Het agendapunt wordt door de linking pin en clusterleiders voorbereid.
- In deel 4 van de notitie wordt ingegaan op de beleidsmatige consequenties. Deze notitie wordt besproken met DG RW.
- Mede op basis van de adviezen uit de ENW Voorbereidingsgroep en de WTI Coördinatiegroep kan DG RW in juli 2014 een principe besluit nemen over de overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte in de gedetailleerde toets.

Samenvatting notities

De hiervoor genoemde punten op basis waarvan de besluitvorming over het toepassen van het nieuwe materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in het WTI 2017 plaats zal vinden, zijn in vier afzonderlijke notities behandeld. De notities 1 tot en met 3 zijn inmiddels voorgelegd aan de ENW Voorbereidingsgroep, ENW Techniek en aan de WTI Coördinatiegroep. De notities 1 tot en met 4 zijn als bijlagen bij de voorliggende notitie bijgevoegd. In de onderstaande tabel zijn de belangrijkste zaken uit de vier notities kort samengevat.

1. Is de overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte aantoonbaar relevant?	
a. Waarom rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?	Het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte doet recht aan het werkelijke grondgedrag van klei en veen in relatie tot taludstabiliteit. Dit aspect van het grondgedrag van klei en veen is tot op heden ten onrechte buiten beschouwing gelaten in de Nederlandse geotechnische praktijk.
b. Wat is het verschil met huidige voorschriften?	Een nieuw materiaalmodel wordt geïntroduceerd, waarvoor het grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek op een andere manier moet worden uitgevoerd en andere schuifsterkte parameters uit dit onderzoek zullen worden afgeleid. Het toetschema blijft op hoofdlijnen gelijk aan dat in het VTV 2006.
c. Welke is het effect op het veiligheidsbeeld?	In een consequentieanalyse met 167 dijkprofielen verdeeld over Nederland zijn de berekende stabiliteitsfactoren met de vigerende werkwijze en met het nieuwe materiaalmodel gemiddeld genomen ongeveer gelijk. Het nieuwe materiaalmodel is ongunstiger, maar dit wordt gecompenseerd door gunstiger materiaalfactoren. Per locatie zijn wel grote verschillen tussen beide methoden mogelijk. Door het toepassen van het nieuwe materiaalmodel wordt onterecht goed- of afkeuren terug gedrongen.
2. Is de theorie correct en consistent vertaald naar rekenregels?	
a. Is de theorie achter het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voldoende onderbouwd?	Internationaal is al sinds de 30-er jaren van de vorige eeuw veel kennis beschikbaar gekomen over het gedrag van grond; ook het ongedraineerd gedrag van grond. Deze kennis is ook gevalideerd met waarnemingen in het veld. In de internationale praktijk is het inmiddels al decennia lang gangbaar rekening te houden met ongedraineerd grondgedrag. De internationale kennis en ervaring zijn binnen het WTI vertaald voor de Nederlandse omstandigheden. De theorie is gevalideerd op basis van dijken met taludafschuivingen en dijken met overleefde waterstanden in Nederland.
b. Is de theorie op de juiste manier vertaald naar rekenregels?	Het WTI heeft gebruik gemaakt van de internationale kennis en ervaring en heeft dit vertaald naar rekenregels voor toepassing in Nederland. De resultaten zijn voorgelegd aan ENW-Techniek, Reviewteam Dijken, Werkgroep Evaluatie Grondmechanisch Onderzoek en experts uit Nederland, Engeland en Noorwegen.



<p>c. Past de theorie in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie?</p>	<p>Om het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte in te passen in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie worden de partiële veiligheidsfactoren opnieuw gekalibreerd. Onzekerheid over de schematisering van de ondergrondopbouw wordt in rekening gebracht met het stochastisch ondergrondmodel. Het aspect van de toelaatbare vervorming van waterkeringen wordt verder uitgewerkt.</p>
<p>3. Zijn de rekenregels in de praktijk toepasbaar?</p>	
<p>a. Zijn er in de praktijk voldoende gegevens voor het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?</p>	<p>Beschikbare laboratoriumproeven en proevenverzamelingen zijn veelal niet bruikbaar voor het nieuwe materiaalmodel. Sonderingen zijn bij het nieuwe materiaalmodel een belangrijk meetinstrument. Beschikbare sonderingen zijn veelal wel bruikbaar.</p>
<p>b. Welke is de inspanning om deze gegevens in het juiste format te verzamelen?</p>	<p>De toetsing kan worden gestart met standaard parameter waarden, die beschikbaar worden gesteld door het WTI, en met de beschikbare sonderingen. Waar verfijning van het toetsresultaat gewenst is, is aanvullend grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek nodig. Door kennis en ervaring van waterkeringbeheerders uit te wisselen kan het grondmechanisch onderzoek efficiënter worden uitgevoerd. Indien in 2017 wordt gestart met de toetsing kan deze in 2023 worden afgerond. Hierbij is van belang dat tijdig duidelijk is of de overstap naar het nieuwe materiaalmodel zal worden gemaakt. Marktpartijen moeten ook tijdig kunnen anticiperen op deze overstap.</p>
<p>c. Is er voldoende kennis bij waterkeringbeheerders om te kunnen rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?</p>	<p>Waterkeringbeheerders hebben opleiding nodig om de toets van macrostabiliteit met het nieuwe materiaalmodel uit te kunnen voeren. Met het inzetten van sonderingen om hiermee materiaalparameters te bepalen zal in de praktijk ervaring moeten worden opgebouwd. Daarnaast is tijdens het toetsproces een helpdesk nodig om waterkeringbeheerders te helpen bij het analyseren van veld- en laboratoriumonderzoek en het uitvoeren van de toetsing.</p>
<p>4. Zijn de nieuwe voorschriften beleidsmatig acceptabel?</p>	
<p>a. Wat zijn de financiële consequenties van implementatie?</p>	<p>De overstap naar het nieuwe materiaalmodel is gemiddeld genomen en op de wat langere termijn budgetneutraal. De consequentieanalyse laat zien dat de vigerende werkwijze en de werkwijze met het nieuwe materiaalmodel gemiddeld genomen ongeveer hetzelfde resultaat geven. Per locatie zijn wel grote verschillen tussen beide methoden mogelijk. Het kan daarom niet worden uitgesloten dat recent uitgevoerde dijkversterkingswerken bij de toetsing onvoldoende zullen blijken te zijn.</p> <p>Waterkeringbeheerders zullen kosten moeten maken voor grondmechanisch onderzoek om nieuwe parameters vast te stellen. Deze kosten zijn voor de primaire waterkeringen globaal geraamd op circa 10 miljoen euro voor alle waterkeringbeheerders samen.</p>

<p>b. Wat betekent de overgang voor lopende uitvoeringsprogramma's?</p>	<p>Het nieuwe materiaalmodel voor het beoordelen van macrostabiliteit is vooral relevant voor het HWBP. Het toepassen van het nieuwe materiaalmodel zal leiden tot een andere prioritering van dijkversterkingswerken en een gewijzigde scope binnen dijkversterkingswerken die al in het programma zijn opgenomen. Hierbij zijn ook de nieuwe overstromingskansnormen van belang.</p>
<p>c. Wat is de relatie met andere ontwikkelingen (Dijken op Veen en regionale waterkeringen)?</p>	<p>In het Dijken op Veen-project en WTI wordt op dezelfde manier omgegaan met het gedrag van veen. In het Dijken op Veen-project is de wijze waarop de parameters worden bepaald geavanceerder dan in toetslaag 2 van het WTI. De werkwijze van het Dijken op Veen-project kan in de toets op maat worden toegepast.</p> <p>Om de regionale waterkeringen op orde te brengen, wordt onder andere gewerkt aan een nieuw instrumentarium. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de ontwikkelingen bij de primaire waterkeringen.</p>

In de bijlagen 1 tot en met 4 zijn de punten uit de tabel verder uitgewerkt.

Bijlage(n)

1. Relevantie overstap naar ongedraineerde schuifsterkte
2. Vertaling theorie naar rekenregels
3. Toepasbaarheid in de praktijk
4. Consequenties voor beleid

Bijlage 1 Relevantie overstap naar ongedraineerde schuifsterkte¹

In deze notitie wordt ingegaan op de relevantie van de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte. Achtereenvolgens komen de volgende zaken aan de orde:

- I. Waarom willen we rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?
- II. Wat is het verschil met huidige voorschriften?
- III. Welke is het effect op het veiligheidsbeeld?

Ad I: Waarom rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?

De overstap op een materiaalmodel op basis van ongedraineerd grondgedrag voor het toetsen van macrostabiliteit van dijken is relevant voor de vigerende Nederlandse praktijk. Redenen hiervoor zijn:

- De huidige situatie is onduidelijk door het aanzienlijke verschil in schuifsterkte uit triaxiaalproeven (meestal meertraps procedure) en celproeven, die nog steeds beiden worden toegepast, hoewel nieuwe celproeven niet meer worden uitgevoerd en de celproef niet meer in de meest actuele ENW-documenten worden genoemd.
- De gangbare procedure voor het uitvoeren van triaxiaalproeven en de vigerende manier van interpretatie van deze proeven geven onbevredigende resultaten, die in ieder geval niet geschikt zijn voor het bepalen van de schuifsterkte van veen en organische klei.
- De schuifsterkte van grond voor het toetsen van de sterkte van dijken zou moeten worden bepaald bij bezwijken van grond en niet bij een kleine vervorming in laboratoriumproeven.
- Ongedraineerd grondgedrag is een belangrijk aspect van het werkelijke gedrag van klei en veen en dit aspect wordt in de vigerende Nederlandse praktijk ten onrechte buiten beschouwing gelaten.
- Het rekenen met de ongedraineerde schuifsterkte van grond is internationaal gangbaar, als het gaat om het gedrag van slappe grond.

De genoemde punten worden verder uitgewerkt in de volgende paragrafen.

Vigerende Nederlandse praktijk

Het onderzoek naar de karakterisering van de schuifsterkte is in het WTI-programma opgestart, omdat er in de geotechnische adviespraktijk veel vragen leven over de juiste bepaling van de schuifsterkte. Zo is in de 90-er jaren geconstateerd dat er een verschil bestaat tussen de schuifsterkte-eigenschappen uit celproeven en de schuifsterkte-eigenschappen uit triaxiaalproeven. Dit verschil werd onvoldoende afgedekt door het verschil in partiële veiligheidsfactoren (materiaalfactoren) voor beide typen proeven. Dit heeft geleid tot een 'grijs gebied' tussen celproeven en triaxiaalproeven in het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Nieuwe celproeven worden sinds 1998 niet meer uitgevoerd en de meest recente ENW-publicaties geven geen materiaalfactoren voor schuifsterkte-parameters uit celproeven, maar diverse beheerders passen de beschikbare schuifsterkte parameters uit celproeven nog wel toe.

¹ De tekst van deze bijlage komt overeen met de notitie 'Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostabiliteit in WTI 2017 – Relevantie overstap naar ongedraineerde schuifsterkte' met kenmerk 1209434-006-GEO-0001 van 7 maart 2014.

De triaxiaalproef is op dit moment de gangbare laboratoriumproef voor het bepalen van schuifsterkte parameters. Deze proef wordt veelal uitgevoerd volgens de meertraps procedure. Dat wil zeggen dat een grondmonster drie maal achtereenvolgend bij een steeds hogere belasting wordt beproefd. Bij de tweede en derde belastingtrap is het grondmonster van met name veen en organische klei al verstoord door de eerdere belastingtrappen (Den Haan, 2006). Deze proefprocedure komt een betrouwbare parameterbepaling uiteraard niet ten goede.

In de Nederlandse adviespraktijk is het gangbaar de schuifsterkte parameters uit triaxiaalproeven af te leiden bij een beperkte vervorming (axiale rek) van het grondmonster in de triaxiaalproef. De ENW-publicaties spreken over 2 tot 5% axiale rek. Deze werkwijze heeft geen degelijke fysische achtergrond en deze werkwijze is daarom inhoudelijk onbevredigend (Den Haan, 2006). Daarbij komt, dat in de praktijk enigszins willekeurig verschillende rekniveau's worden gekozen.

Cohesie is een van de schuifsterkte parameters die uit de triaxiaalproeven wordt afgeleid. De cohesie blijkt in de praktijk sterk wisselend in grootte. Deze cohesie blijkt het gevolg te zijn van de genoemde monsterverstoring, de keuze van de spanningen en de keuze van het rekniveau (Den Haan, 2006). De cohesie is dus naar de huidige inzichten het gevolg van de proefprocedure en is geen fundamentele parameter van de schuifsterkte van de grond.

Voor organische klei en vooral voor veen geeft de huidige werkwijze vaak irreëel lage schuifsterkteparameters. Door de plantenresten en de gelaagde structuur wijkt het gedrag van veen sterk af van het gedrag van zand en klei. Het is een belangrijke omissie in de vigerende praktijk dat laboratoriumproeven die geschikt zijn voor het bepalen van de schuifsterkte eigenschappen van veen niet kunnen worden toegepast. Daarom zullen voor de macrostabiliteitstoets in het WTI 2017 triaxiaalproeven worden uitgevoerd voor het bepalen van schuifsterkteparameters voor klei en direct simple shear proeven voor het bepalen van schuifsterkteparameters voor veen.

Uitgangspunten macrostabiliteitstoets WTI 2017

De hiervoor genoemde onduidelijkheden en tekortkomingen in de Nederlandse adviespraktijk waren aanleiding om binnen het WTI-programma een onderzoek op te starten naar een betrouwbare karakterisering van de schuifsterkte. In het kader van dit onderzoek is literatuuronderzoek verricht, is veel onderzoek gedaan in het veld en in het laboratorium en is een rekenprocedure opgesteld, die is gevalideerd aan de hand van zeven in Nederland opgetreden taludafschuivingen. Bij het literatuuronderzoek is er veel aandacht geweest voor de internationale state of the art op dit gebied. Het onderzoek heeft geleid tot de volgende voorstellen voor het toetsen van macrostabiliteit in het WTI 2017:

- Rekenen met de bezwijksterkte van grond in plaats van sterkte bij een kleine vervorming in laboratoriumproeven,
- Onderscheid maken tussen gedraineerd grondgedrag en ongedraineerd grondgedrag,
- De in situ toestand van de grond in rekening brengen via de grensspanning, waarmee onderscheid wordt gemaakt tussen normaal geconsolideerd grondgedrag en overgeconsolideerd grondgedrag,
- Schuifsterkte van klei bepalen met een traps anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven en voor veen met direct simple shear proeven.

Deze voorstellen betreffen dus niet alleen een overstap van gedraineerd grondgedrag naar ongedraineerd grondgedrag, maar een volledig andere aanpak, interpretatie en toepassing van



veld- en laboratoriumonderzoek en parameterbepaling. Daarbij is de grensspanning een nieuwe parameter bij het toetsen van macrostabiliteit. Later in deze notitie wordt verder op deze parameter ingegaan.

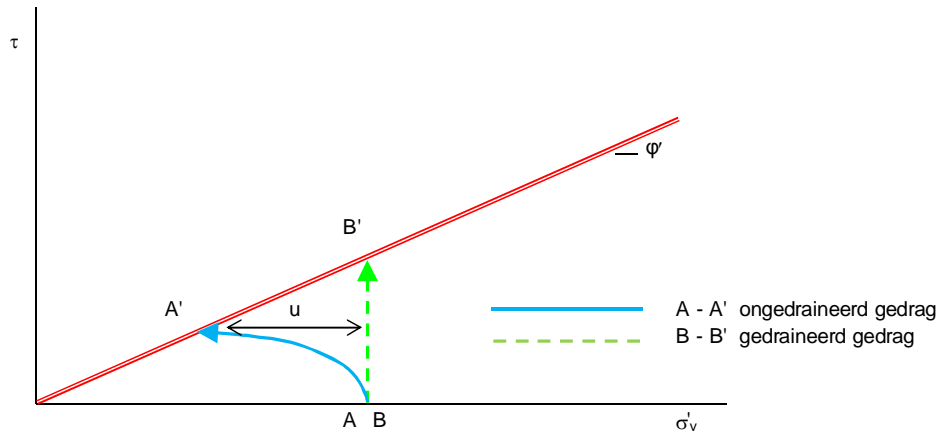
Met deze uitgangspunten wordt een antwoord gegeven op de onduidelijkheden en tekortkomingen van de huidige Nederlandse praktijk. Daarnaast zijn deze uitgangspunten in overeenstemming met het internationaal breed geaccepteerde *critical state soil mechanics* (CSSM) raamwerk (Schofield en Wroth, 1968) en het werk van Ladd (1991). De rekenprocedure voor het toetsen van macrostabiliteit voor het WTI 2017 staat dus niet op zichzelf, maar sluit aan bij de internationale kennis op het gebied van karakterisering van het gedrag van slappe grond.

Ongedraineerd grondgedrag

Het in rekening brengen van ongedraineerd gedrag ofwel het rekenen met de ongedraineerde schuifsterkte is een nieuw fenomeen voor de Nederlandse adviespraktijk als het gaat om de analyse van taludstabiliteit. In Nederland heeft zich een traditie ontwikkeld waarin bij stabiliteitsanalyses wordt uitgegaan van gedraineerd grondgedrag. Het rekenen met gedraineerd grondgedrag in stabiliteitsanalyses was rond de 50-er jaren van de vorige eeuw wereldwijd algemeen gangbaar. In Nederland is tot nu toe vastgehouden aan deze werkwijze, vanwege de empirische ervaring die met deze werkwijze is opgedaan. Dit geldt zowel voor taluds bij wegen en spoorwegen als bij waterkeringen. Rekenen met ongedraineerd grondgedrag is inmiddels internationaal wel gangbaar.

De essentie van ongedraineerd grondgedrag is dat waterspanningen in de grond worden gegenereerd wanneer de schuifweerstand van de grond wordt gemobiliseerd en de grond deformeert. In een ongedraineerde analyse van de macrostabiliteit van een talud worden deze waterspanningen in rekening gebracht. De door de grond gegenereerde waterspanningen reduceren de schuifsterkte van de grond. De generatie van waterspanningen door het mobiliseren van de schuifsterkte van de grond staat los van de waterspanningen in en onder de dijk die het gevolg zijn van grondwaterstroming. Beide zijn aspecten van waterspanning en doorlatendheid van de grond, maar deze beide aspecten moeten afzonderlijk worden beschouwd.

Wanneer een talud instabiel wordt en een afschuiving van het talud optreedt, dan is dit een snel proces. Bij de macrostabiliteitsproef bij de IJkdijk voltrok de afschuiving zich binnen een paar minuten (nadat de eerste deformatie visueel waarneembaar was). Bij de Bergambachtproef trad de grootste deformatie op binnen een uur. Bij de grote afschuiving bij Streefkerk in 1984 vond de grootste deformatie binnen ruim een dag plaats, waarna de deformatiesnelheid van het talud gedurende de volgende dagen langzaam af nam. Deze tijdsduur is kort in relatie tot de doorlatendheid van de grond. Door het mobiliseren van de schuifsterkte en de deformatie van de grond tijdens de afschuiving worden waterspanningen gegenereerd. Gezien de lage doorlatendheid van de grond in relatie tot de tijdsduur van een afschuiving kan hooguit gedeeltelijke dissipatie van de gegenereerde waterspanningen optreden.



Figuur 2 Relatie tussen spanning σ' en schuifsterkte τ . De rode lijn, gekarakteriseerd door de hoek van inwendige wrijving φ' , geeft de bezwijksterkte van de grond aan. De schuifsterkte bij punt B', uitgaande van gedraineerd grondgedrag, is duidelijk hoger dan de schuifsterkte bij punt A', uitgaande van ongedraineerd grondgedrag. De afstand u tussen de groene lijn en de blauwe lijn wordt veroorzaakt door de waterspanning.

Ongedraineerd gedrag is een bekend fenomeen vanuit laboratoriumonderzoek. Iedere geotechnicus kent het principe. De grond genereert waterspanning in een laboratoriumproef door het mobiliseren van schuifsterkte en deformatie van het korrelskelet en er is sprake van ongedraineerd gedrag als de wateroverspanning niet kan afstromen (zie Figuur 2). In laboratoriumproeven wordt de waterspanning gemeten. Zo kan de gemeten schuifsterkte in de proeven worden gecorrigeerd voor het effect van de gemeten waterspanning. Een analyse van de macrostabiliteit van een talud wordt in de Nederlandse praktijk vervolgens uitgevoerd uitgaande van gedraineerd grondgedrag op basis van parameters uit een ongedraineerde laboratoriumproef.

Validatie nieuwe toetsmethode

De binnen het WTI-onderzoek ontwikkelde rekenprocedure voor het toetsen van macrostabiliteit met ongedraineerde schuifsterkte is gevalideerd op basis van zeven opgetreden taludafschuivingen van dijken in Nederland (Van Duinen, 2010) en op basis van vier cases waar een hoge waterstand is overleefd (Van Duinen, 2013). Het gaat onder andere om afschuivingen van de Lekdijk bij Streefkerk en de Wolpherensedijk bij Gorinchem en de macrostabiliteitsproeven bij Bergambacht en de IJkdijk. De terug-analyses van bezweken taluds wijzen op een overschatting van de schuifsterkte van grond bij de huidige vigerende werkwijze. De mate waarin de schuifsterkte wordt overschat is gemiddeld een factor 1,4, maar kan oplopen tot een factor 2,0. De werkwijze met bezwijksterkte van grond en ongedraineerd grondgedrag geeft een realistische terug-analyse van de opgetreden afschuivingen.

De cases met de overleefde waterstanden zijn onder andere de Markermeerdijk met de storm van 1928, de Lekdijk bij Nieuw-Lekkerland met de storm van 1953 en de Lekdijk bij Bergambacht met de hoge waterstand van 1995. Uitgaande van beste schattingen van de ongedraineerde schuifsterkte is de schuifsterkte juist voldoende om de hoge waterstanden te keren. Met de vigerende werkwijze ligt de schuifsterkte ook in deze analyses gemiddeld een factor 1,4 hoger. Op basis van de terug-analyses van de overleefde waterstanden kan worden gesteld, dat de werkwijze met bezwijksterkte van grond en ongedraineerd grondgedrag niet conservatief is.

De praktijk leert dat de schuifsterkte uit triaxiaalproeven veelal wat hoger is dan de schuifsterkte uit celproeven. In de validatie studie was de referentie de schuifsterkte op basis van celproeven. Daarom mag worden verwacht dat de schuifsterkte uit triaxiaalproeven ook een overschatting van de schuifsterkte geeft.

Ad II: Verschil met huidige voorschriften

Het WTI 2011 gaat uit van gedraineerd grondgedrag, zoals dit gebruikelijk is in de Nederlandse praktijk. De schuifsterkte wordt gekarakteriseerd met de schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving. Deze parameters worden bepaald in het laboratorium. Dijkbeheerders beschikken veelal over een proevenverzameling van schuifsterkte parameters. Deze proevenverzameling kan bestaan uit resultaten van celproeven of triaxiaalproeven. Beide typen proeven zijn door de jaren heen uitgevoerd volgens verschillende procedures. Voor de triaxiaalproef is er een uitvoeringsnorm, maar deze geeft nog te veel ruimte voor eigen invulling. Soms worden macrostabiliteitsanalyses uitgevoerd met de standaard waarden van de schuifsterkte parameters uit NEN 6740.

Schuifsterkte parameters voor ongedraineerd grondgedrag

Bij ongedraineerd grondgedrag hoort een ander schuifsterktemodel met andere parameters. De ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald met de ongedraineerde schuifsterkte ratio, de grensspanning en de sterkte toename exponent. In formulevorm:

$$s_u = \sigma'_v \times S \times OCR^m \quad \text{met} \quad OCR = \sigma'_p / \sigma'_v$$

De parameters in deze formule zijn:

- De ongedraineerde schuifsterkte s_u .
- De effectieve spanning σ'_v . De effectieve spanning wordt, net als in de vigerende praktijk, bepaald op basis van het gewicht van de grond en de waterspanningen.
- De ongedraineerde schuifsterkte ratio S is min of meer vergelijkbaar met de hoek van inwendige wrijving bij de vigerende werkwijze. In de ongedraineerde schuifsterkte ratio is naast het effect van de wrijving tussen de gronddeeltjes ook het effect van de generatie van waterspanning bij ongedraineerd grondgedrag verdisconteerd. De ongedraineerde schuifsterkte ratio wordt bepaald met eentraps anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven voor klei en met direct simple shear proeven voor veen.
- De grensspanning σ'_p is een maat voor de in situ toestand van de grond. De verhouding van de grensspanning σ'_p en de in situ spanning σ'_v (de overconsolidatieratio OCR) zegt iets over de dichtheid van de grond en bepaalt mede de grootte van de generatie van waterspanningen bij het mobiliseren van schuifsterkte. Toepassing van de grensspanning in stabiliteitsanalyses is nieuw voor de Nederlandse praktijk. Voor een geotechnicus is de grensspanning wel een bekende parameter bij zettingsberekeningen. De grensspanning wordt het gemakkelijkst bepaald met samendrukkingsproeven in het laboratorium.
- De sterkte toename exponent m bepaalt de mate waarin de ongedraineerde schuifsterkte van de grond gevoelig is voor veranderingen in de effectieve spanning σ'_v als gevolg van veranderingen in de waterspanning. De sterkte toename exponent wordt het gemakkelijkst bepaald met samendrukkingsproeven in het laboratorium.

Deze verandering in schuifsterktemodel en parameters vraagt deels om andere laboratoriumproeven en in ieder geval om andere proefprocedures. Door Stowa en Deltares is in 2011 in samenspraak met geotechnische laboratoria en ingenieursbureaus een protocol opgesteld, waarin wordt aangegeven hoe laboratoriumproeven moeten worden uitgevoerd om alle genoemde grondparameters te bepalen. Dit protocol is door ENW Techniek goedgekeurd voor toepassing in de praktijk.

De ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m zijn goed te bepalen generiek voor Nederland op basis van geologische afzetting, grondsoortbeschrijving en volumegewicht. De grensspanning is een zeer variabele parameter. Deze dient in het veld of in het laboratorium te worden bepaald. Zonder geotechnisch onderzoek kan hier alleen een veilige waarde voor worden gegeven. De invloed van de spreiding van de grensspanning op het resultaat van stabiliteitsanalyses hangt erg af van de situatie. Bij primaire waterkeringen is de effectieve spanning σ'_v vaak hoog en is de invloed van de grensspanning relatief klein. Bij regionale keringen is de effectieve spanning σ'_v veelal laag (boezemkaden met veen). De grensspanning heeft dan een gunstig effect op de stabiliteit (Van Duinen en Van Hemert, 2013).

Consequenties voor het toetsen

Voor de gedetailleerde macrostabiliteitstoets (toetslaag 2) voor het WTI 2017 wordt een betrekkelijk eenvoudige werkwijze voorgesteld, waarbij in eerste instantie met standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte parameters wordt gerekend. Deze zullen in het WTI-onderzoek worden vastgesteld. Zonodig kan de gedetailleerde toetsing worden verfijnd door het uitvoeren van samendrukkingsproeven ter bepaling van de grensspanning of triaxiaalproeven en direct simple shear proeven ter bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte ratio. In toetslaag 3 kan maatwerk worden geleverd. Hierbij kan worden gedacht aan het inzetten van sonderingen en correlaties met laboratorium proeven. Dit geeft een gedetailleerd inzicht in de mogelijke variaties van de grensspanning. Een dergelijk onderzoek is ook nodig voor het ontwerpen van dijkversterkingen.

De huidige proevenverzamelingen van de waterkeringbeheerders zijn niet geschikt voor de gedetailleerde macrostabiliteitstoets voor het WTI 2017. Waterschappen zullen nieuwe gegevens moeten inwinnen. In overleg met de waterkeringbeheerders zal moeten worden nagegaan wat een geschikte aanpak is voor de datainwinning. Bij het inwinnen van nieuwe parameters is het van belang dat het bovengenoemde protocol van Stowa en Deltares wordt toegepast. Dit draagt er aan bij dat de toetsing met kwalitatief goede parameters met een zo beperkt mogelijke spreiding als gevolg van verschillen in uitvoeringswijze van het onderzoek kan worden uitgevoerd. Dit resulteert ook in uniformiteit binnen Nederland.

Geotechnici die de toetsing zullen uitvoeren hebben opleiding nodig om de toetsmethode op basis van ongedraineerde schuifsterkte te kunnen uitvoeren. De eerste fase van de gedetailleerde toets met standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte parameters is betrekkelijk eenvoudig en vraagt een beperkte opleiding. Wanneer verfijning van de gedetailleerde toetsing nodig is, vraagt dit om het uitvoeren en interpreteren van laboratoriumproeven, waarbij het deels gaat om andere typen proeven en deels om andere proefprocedures. Hiervoor is meer opleiding noodzakelijk.

Op de aspecten van data inwinning en opleiding wordt in fase 3 van het beslisdocument verder ingegaan.

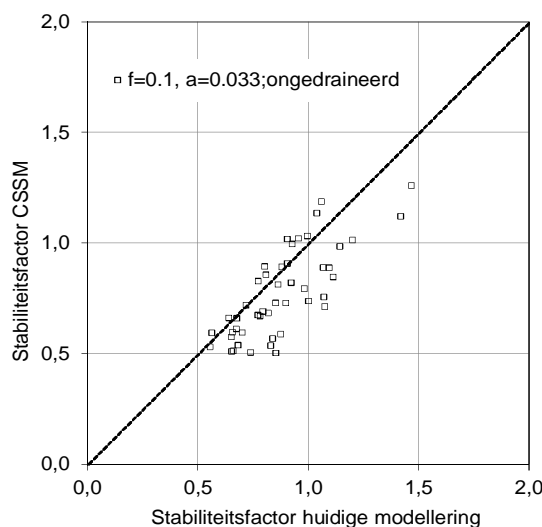
Ad III: Effect op het veiligheidsbeeld

Het in rekening brengen van ongedraineerd grondgedrag heeft voor de Nederlandse omstandigheden veelal een reducerend effect op de schuifsterkte. Door het mobiliseren van schuifsterkte en de deformatie van het korrelskelet bij een taludafschuiving wordt waterspanning gegenereerd. Deze waterspanning reduceert de schuifsterkte. Er zijn ook positieve effecten, zoals het rekenen met de bezwijksterkte van de grond en de positieve invloed van de grensspanning op de grootte van de gegenereerde waterspanningen. Echter in de uitgevoerde onderzoeken blijkt het effect van het ongedraineerd gedrag per saldo het grootste effect te hebben.

De eerder genoemde terug-analyse van bezweken taluds (Van Duinen, 2010) wijst op een overschatting van de schuifsterkte met de huidige werkwijze en dus op een ongunstige bijdrage van het ongedraineerd grondgedrag aan de schuifsterkte. De terug-analyses van de bezweken taluds en van de overleefde hoge waterstanden (Van Duinen, 2013) wijzen op een realistische schuifsterkte uitgaande van de bezwijksterkte van grond en ongedraineerd grondgedrag.

Met probabilistische stabiliteitsberekeningen leidt het rekenen met ongedraineerd grondgedrag veelal tot aanzienlijk grotere faalkansen (factor 10-100 of meer) dan de vigerende werkwijze met gedraineerde schuifsterkte parameters (Jongejan et al, 2013).

Een ander aspect is echter dat de partiële veiligheidsfactoren (materiaalfactoren voor semi-probabilistische stabiliteitsanalyses) voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters lager mogen zijn dan de vigerende materiaalfactoren voor gedraineerde schuifsterkte parameters. Dit volgt uit probabilistische stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte parameters (Jongejan et al, 2013). De bijdrage van de onzekerheid over de schuifsterkteparameters aan de faalkans blijkt kleiner dan tot nu toe altijd werd gedacht. Dit komt tot uitdrukking in relatief lage materiaalfactoren voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters.



Figuur 3 *Effect op het veiligheidsbeeld. Vergelijking stabiliteitsfactoren volgens huidige modellering en met ongedraineerde schuifsterkte (critical state soil mechanics raamwerk CSSM). De waarde 1,0 van de stabiliteitsfactor is de grens tussen goedkeuren en afkeuren.*

Per saldo geven semi-probabilistische stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte parameters en relatief lage materiaalfactoren gemiddeld genomen 10 tot 15% lagere stabiliteitsfactoren² dan de vigerende werkwijze met gedraineerde schuifsterkte parameters met de vigerende relatief hoge materiaalfactoren (zie Figuur 3). Per situatie kunnen er aanzienlijke verschillen zijn in de stabiliteitsfactor van beide methoden. Dit inzicht volgt uit lopend onderzoek binnen het WTI-onderzoeksprogramma. Het betreft de resultaten van een verkennende studie met een grove schatting van de veiligheidsfactoren. Een zorgvuldige kalibratie van de veiligheidsfactoren vindt plaats binnen het WTI-programma in 2015. Een ander belangrijk punt is dat de doorgerekende dijkdoorsneden afkomstig zijn van het VNK2-project. De dijkdoorsneden betreffen locaties die in het VNK2-project geselecteerd zijn, omdat deze een relevante bijdrage leveren aan de overstromingskansen van de betreffende dijkringen. Dit verklaart waarom een relatief groot deel van de berekeningsresultaten in Figuur 3 een stabiliteitsfactor kleiner dan 1,0 hebben.

Op dit moment zijn de resultaten van de verkennende studie bekend van 40 dijkdoorsneden verspreid over Nederland. In de komende maanden zullen daar nog ruim 100 doorsneden aan worden toegevoegd. Dit geeft een vollediger beeld van de consequenties van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte. De resultaten van de vergelijkende studie zullen in het beslisdocument fase 4 worden opgenomen.

De 10 tot 15% lagere stabiliteitsfactoren bij toepassing van de ongedraineerde schuifsterkte zijn beperkt te noemen in het licht van de overschatting van de schuifsterkte door de vigerende werkwijze met gemiddeld een factor 1,4, die is aangetoond in het bovengenoemde validatie-onderzoek (Van Duinen, 2010). Dit is met name het gevolg van de relatief lage partiële veiligheidsfactoren voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters, die zijn afgeleid uit probabilistische stabiliteitsanalyses (Jongejan et al, 2013). De benodigde maatregelen om een 10 tot 15% lagere stabiliteitsfactor te compenseren zijn in het bovenrivierengebied beperkt van omvang, maar in het benedenrivierengebied substantieel. Deze consequenties worden in fase 4 van het beslisdocument verder uitgewerkt.

Conclusies

Overstappen op de nieuwe methode voor het toetsen van de macrostabiliteit van dijken die uitgaat van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte is aantoonbaar relevant, omdat:

- Voor de Nederlandse geotechnische praktijk ontstaat duidelijkheid over de procedures voor het bepalen van schuifsterkte parameters van klei en veen.
- Het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte doet recht aan het werkelijke grondgedrag van klei en veen.
- Rekenen met ongedraineerde schuifsterkte sluit aan op de *state of the art* van de internationale geotechniek.

Het gevolg hiervan is, dat het toetsen van macrostabiliteit op basis van de ongedraineerde schuifsterkte geeft een betrouwbaarder beeld van de veiligheid van de dijken.

² De resultaten van deze voorlopige consequentie-analyse zijn niet meer actueel. In bijlage 4 worden de resultaten van een consequentie-analyse op basis van 167 dijkprofielen gerapporteerd. De consequentie-analyse in bijlage 4 geeft het beeld, dat de berekende stabiliteitsfactoren met de vigerende werkwijze en met het nieuwe materiaalmodel gemiddeld genomen ongeveer gelijk zijn. Het nieuwe materiaalmodel is ongunstiger, maar dit wordt gecompenseerd door gunstiger materiaalfactoren. Per locatie zijn wel grote verschillen tussen beide methoden mogelijk.

De nieuwe methode voor het toetsen van de macrostabiliteit van dijken die uitgaat van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte is gemiddeld 10 tot 15% ongunstiger dan de vigerende werkwijze. De nieuwe methode blijkt op basis van het uitgevoerde validatie onderzoek echter beter aan te sluiten bij het werkelijke grondgedrag bij opgetreden taludafschuivingen van dijken. Ook de macrostabiliteit bij overleefde hoge waterstanden kan betrouwbaar worden berekend. De ongunstiger resultaten van de nieuwe toetsmethode komen daarom te goede aan het veiligheidsniveau van de Nederlandse dijken. Dit heeft onvermijdelijk ook gevolgen voor investeringen in dijkversterkingswerken.

Als gevolg van het introduceren van de nieuwe toetsmethode zullen dijkbeheerders moeten investeren in parameterbepaling. In eerste instantie kan worden gewerkt met standaard waarden van de schuifsterkteparameters, maar als verfijning van de toetsing nodig blijkt, is het uitvoeren van veld- en laboratoriumonderzoek noodzakelijk. Met name de bepaling van de grensspanning in het veld of in het laboratorium kan essentieel zijn om optimaal gebruik te maken van de nieuwe toetsprocedure.

De introductie van de nieuwe toetsmethode vraagt ook om opleiding van medewerkers van dijkbeheerders en ingenieursbureaus. In eerste instantie is dit nog beperkt, omdat de toetsing kan worden gestart met parameters die vanuit het WTI-onderzoek beschikbaar zullen worden gesteld. Naarmate meer verfijning van de toetsing noodzakelijk is, zal ook investering in parameterbepaling en opleiding noodzakelijker worden.

Referenties

- Van Duinen, T.A. (2010). SBW Werkelijke sterkte van dijken - validatie WS15: Synthese resultaten stabiliteitsanalyses onderzoekslocaties. Deltares. Report 1202121-003-GEO-0022, Versie 1, 7 september 2010.
- Van Duinen, T.A. (2013). Back analyses of dikes that withstand a high water level. Deltares memo 1206015-000-GEO-0006. 18 March 2013.
- Van Duinen, T.A., en Van Hemert, H. (2013). Stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte voor regionale waterkeringen. Geotechniek. December 2013.
- Den Haan, E.J. (2006). Ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Geotechniek, juli 2006.
- Jongejan, R.B., Calle, E.O.F., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Kallen, M.J., Vastenburg, E., Van Duinen, A. (2012). Kalibratie semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor macrostabiliteit binnenwaarts. Deltares. 1206006-006-ZWS-0004.
- Jongejan, R.B., Van Duinen, A., Kuiper, B., Vastenburg, E. (2013). WTI2017: Beoordeling macrostabiliteit met ongedraineerd materiaalmodel: Probabilistische beschouwing en voorlopige veiligheidsfactoren. Deltares. 1207808-001-GEO-0004.
- Ladd, C.C. (1991). "Stability evaluation during staged construction: 22nd Terzaghi Lecture." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(4), 537-615.
- NEN 6740 (1991). Technische grondslagen voor bouwconstructies, TGB 1990, Geotechniek, Basiseisen en belastingen. Nederlands Normalisatie Instituut, 1e druk, december 1991, met verwerking van het correctieblad van september 1993.
- Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1968). Critical State Soil Mechanics. McGraw Hill, Maidenhead.
- TAW (2001). Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001.

Bijlage 2 Vertaling theorie naar rekenregels³

In deze notitie wordt ingegaan op de vertaling van de theorie naar rekenregels voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte. Achtereenvolgens komen de volgende zaken aan de orde:

- I. Is de theorie achter het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voldoende onderbouwd?
- II. Is de theorie op de juiste manier vertaald naar rekenregels?
- III. Past de theorie in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie?

Ad I: Is de theorie achter het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voldoende onderbouwd?

Internationale kennis

Al sinds de 30-er jaren van de vorige eeuw is ongedraineerd gedrag van grond een bekend fenomeen (Casagrande, 1939; Hvorslev, 1937; Rendulic, 1936; Terzaghi, 1938). Ook in de 40-er en 50-er jaren is het nodige onderzoek gedaan naar het gedrag van klei. Dit is het werk geweest van onder andere Bishop (1957), Henkel (1956), Skempton (1948, 1950 en 1954) en Taylor (1948). In deze onderzoeken kwamen effecten van overconsolidatie, watergehalte, stijfheid en mineralogie op de schuifsterkte van klei naar voren. Eenvoudige systematische trends werden met dit onderzoek gevonden. De publicatie van Roscoe et al (1958) laat al heel veel principes van het gedrag van klei zien, zoals deze nu nog steeds worden toegepast. Deze onderzoeken hebben in 1968 geresulteerd in de inmiddels internationaal breed geaccepteerde en breed toegepaste model Critical State Soil Mechanics CSSM (Schofield and Wroth, 1968). In essentie is CSSM een beschrijving van het grondgedrag die een koppeling legt tussen het gedrag bij compressie, zwelling, volumeverandering, afschuiven en poriënwaterrespons in termen van effectieve spanningen. Ook de SHANSEP techniek van Ladd et al (1974) sluit hierop aan.

Waar de genoemde onderzoeken vrijwel steeds werden uitgevoerd in het laboratorium op gehomogeniseerde kleimonsters richt het onderzoek zich de laatste tientallen jaren steeds meer op het gedrag van natuurlijke gestructureerde kleien. Natuurlijke kleien wijken af van gehomogeniseerde klei, omdat natuurlijke klei structuurvorming kent als gevolg van fysische, chemische en biologische processen in de grond. Met beperkte aanpassing blijken het CSSM model en de SHANSEP techniek het gedrag van natuurlijke klei goed te kunnen beschrijven (Burland, 1990, Cotecchia et al, 2000). Daarnaast wordt ook al enkele decennia gewerkt aan het gedrag van onverzadigde grond.

Inmiddels zijn er talloze publicaties beschikbaar waarin resultaten van onderzoek naar uiteenlopende aspecten van heel veel verschillende klei formaties over de hele wereld worden gepresenteerd. In deze onderzoeken wordt heel vaak gebruik gemaakt van de critical state soil mechanics theorie en de SHANSEP techniek. Ook ontwikkelen onderzoekers alternatieve materiaalmodellen, die in de kern veel aspecten van de critical state soil mechanics theorie bevatten, maar daarnaast speciale uitbreidingen hebben om specifieke aspecten van het grondgedrag te kunnen modelleren.

³ De tekst van deze bijlage komt overeen met de notitie 'Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostabiliteit in WTI 2017 – Vertaling theorie naar rekenregels' met kenmerk 1209434-006-GEO-0002 van 5 mei 2014.

Voor het gedrag van veen is de beschikbare kennis beperkter dan voor klei. Bekende onderzoekers van het gedrag van veen zijn Landva, Farrell, Mesri, Long en Yamaguchi. In de internationale literatuur wordt het gedrag van veen veelal volgens dezelfde theorieën beschreven als voor klei gebruikelijk is. Meestal leidt dit voor praktische toepassingen tot bruikbare resultaten. Parameterwaarden voor sterkte en stijfheid zijn wel duidelijk anders voor veen dan voor klei. Ten aanzien van het gedrag van veen zijn er nog diverse kennisleemtes. Het Dijken op Veen onderzoek dat gerelateerd is aan de dijkverbetering van de Markermeerdijk tussen Hoorn en Amsterdam is daarom een relevant onderzoek. Anderzijds is ook uit veldtesten van het Dijken op Veen-onderzoek gebleken dat het gedrag van veen zich voor praktische toepassingen afdoende laat beschrijven met modellen die oorspronkelijk zijn bedoeld voor klei.

In de achterliggende decennia zijn er veel ontwikkelingen geweest op het gebied van de karakterisering en modellering van het gedrag van klei en veen. Het onderzoek naar gedrag van grond is een doorgaand proces en de ontwikkelingen staan niet stil. De beoogde werkwijze voor het beoordelen van de macrostabiliteit van dijktaluds in het WTI 2017 is gebaseerd op de huidige internationale inzichten op het gebied van het gedrag van klei en veen. Door de overstap naar het materiaalmodel uitgaande van ongedraineerd grondgedrag te maken, wordt aangesloten op de huidige geotechnische kennis. Deze overstap maakt het ook mogelijk om in onderzoek en praktische toepassing mee gaan met toekomstige ontwikkelingen. De vigerende werkwijze met gedraineerd grondgedrag is onjuist en achterhaald en blokkeert de mogelijkheid om mee te gaan met internationale ontwikkelingen.

Toepassing in praktijk

Zoals in de vorige paragraaf al aangegeven is er internationaal veel literatuur beschikbaar over fundamenteel onderzoek naar het gedrag van klei en in mindere mate over het gedrag van veen. De internationaal beschikbare kennis van het gedrag van klei en veen is met name ontwikkeld in de academische wereld. Daarnaast zijn er diverse bekende geotechnische handboeken (Lambe et al (1969), Terzaghi et al (1996), Leroueil et al (1990), Burland et al (2012), waarin wordt aangegeven op welke manier praktisch moet worden omgegaan met het uitvoeren van stabiliteitsanalyses. Het ongedraineerd grondgedrag is hierbij een belangrijk aspect. Op basis van deze kennis worden in de geotechnische praktijk ontwerpberekeningen voor taluds gemaakt. De toepassing van deze kennis is veelal gericht op het ontwerpen van aardebannen voor wegen en spoorwegen. Toepassing ten aanzien van waterkeringen is minder algemeen. Het grondgedrag bij een waterkering is echter niet anders dan bij een aardebaan van een weg of spoorweg. Alleen de belastingsituaties zijn verschillend.

Het rekenen aan stabiliteit van taluds met ongedraineerde schuifsterkte is inmiddels internationaal heel gebruikelijk voor klei en veen bij normaal geconsolideerde en licht overgeconsolideerde situaties. In de 50-er jaren van de vorige eeuw was het nog gangbaar om taludstabiliteit te analyseren met effectieve spanningsanalyses (gedraineerd grondgedrag). In de decennia daarna is het rekening houden met ongedraineerd gedrag van zachte grond steeds algemener geworden. In de vorige notitie is al aangegeven, dat zich in Nederland een traditie heeft ontwikkeld, waarin bij stabiliteitsanalyses wordt uitgegaan van gedraineerd grondgedrag. In Nederland is tot nu toe vastgehouden aan deze werkwijze, vanwege de empirische ervaring die met deze werkwijze is opgedaan. Dit geldt zowel voor taluds bij wegen en spoorwegen als bij waterkeringen.

Ten aanzien van de praktische toepassing van de beschikbare kennis is het overigens ook zo dat er internationaal allerlei verschillen zijn in de praktische uitwerking. Deze verschillen

betreffen vooral de aanpak en procedures van veld- en laboratoriumonderzoek en analyses. Een voorbeeld hiervan is dat de ongedraineerde schuifsterkte kan worden uitgedrukt met een parameter waarin zowel de wrijvingseigenschap van de grond als de generatie van wateroverspanning zijn verdisconteert (zoals in de SHANSEP techniek), maar dat ook kan worden gewerkt met de hoek van inwendige wrijving als parameter om de wrijvingseigenschap van de grond te karakteriseren in combinatie met een afzonderlijke parameter om de wateroverspanning te beschrijven (zogenaamde Skempton A factor (Skempton, 1954)). Op detailniveau zijn er dus verschillende uitwerkingen mogelijk. De hoofdzaak is echter dat rekening houden met ongedraineerd gedrag essentieel is voor een realistische beschrijving van het gedrag van klei en veen.

Interessant is ook dat het US Army Corps of Engineers bezig is de eigen ontwerprichtlijn voor macrostabiliteitsanalyses aan te passen (Shewbridge et al, 2013). Bij de storm Katrina is er op enkele locaties rond New Orleans instabiliteit van taluds opgetreden. Uit terug-analyses van deze cases is gebleken dat de bestaande ontwerprichtlijnen te optimistisch waren. De aanpassingen van de ontwerprichtlijnen beogen een betere aansluiting van de ontwerprichtlijnen op de eerder genoemde critical state soil mechanics theorie (Schofield en Wroth, 1968) en de SHANSEP techniek (Ladd et al, 1974).

Praktische uitwerking voor Nederland

In de SBW- en WTI-onderzoeken is de internationale kennis van het gedrag van grond toepasbaar gemaakt voor de Nederlandse situatie en voor toepassing voor waterkeringen. Er is geen nieuwe fundamentele kennis ontwikkeld. Ook zijn geen nieuwe modellen ontwikkeld. De internationaal beschikbare kennis is praktisch uitgewerkt voor waterkeringen en voor Nederlandse grondsoorten (met veel aandacht voor veen en organische klei). Daarvoor is onderzocht wat internationaal gangbaar is. Vervolgens zijn keuzes gemaakt ten aanzien van de wijze van parameterbepaling in het veld en in het laboratorium, zodat kan worden aangesloten bij de eerder genoemde critical state soil mechanics theorie (Schofield en Wroth, 1968) en de SHANSEP techniek (Ladd et al, 1974). In de boogde rekenprocedures voor het WTI 2017 zijn dan ook geen fundamentele verschillen met wat internationaal wordt gedaan.

De ongedraineerde schuifsterkte is een complex fenomeen. Strikt genomen is de ongedraineerde schuifsterkte geen grondparameter, maar een waarde van de schuifsterkte die afhankelijk is van diverse factoren, waaronder de belastinggeschiedenis en de belastingcondities van de grond. Bij het rekenen met de ongedraineerde schuifsterkte is daarom het meten van de sterkte in het veld en het laboratorium belangrijk. Het rekenmodel voor het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte bij glijvlakanalyses voor het WTI 2017 (toetslaag 2) is een eenvoudig model. Het werken met dit model is voor de gebruiker niet complexer dan het vigerende Mohr-Coulomb model voor het rekenen met gedraineerde schuifsterkte. Essentieel voor de toepassing van het model is dat de bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte in het veld en in het laboratorium op een goede manier dient plaats te vinden. Het type veld- en laboratoriumproeven en de procedures voor deze proeven en interpretatie van de proefresultaten zijn daarom van groot belang.

Door Stowa en Deltares is in 2011 in samenspraak met geotechnische laboratoria en ingenieursbureaus een protocol opgesteld, waarin wordt aangegeven hoe laboratoriumproeven moeten worden uitgevoerd om alle genoemde grondparameters te bepalen. Dit protocol is door ENW Techniek goedgekeurd voor toepassing in de praktijk. Verder wordt in het WTI-project en het Dijken op Veen-project gewerkt aan een protocol voor het uitvoeren van direct simple shear proeven en is een vergelijkend onderzoek uitgevoerd naar monsterverstoring bij

boorsystemen. Hiermee wordt beoogd dat parameterbepaling voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zo eenduidig mogelijk door alle partijen wordt uitgevoerd.

Validatie

De binnen het WTI-onderzoek ontwikkelde rekenprocedure voor het toetsen van macrostabiliteit met ongedraineerde schuifsterkte is gevalideerd op basis van zeven opgetreden taludafschuivingen van dijken in Nederland (Van Duinen, 2010) en op basis van vier cases waar een hoge waterstand is overleefd (Van Duinen, 2013). Het gaat onder andere om afschuivingen van de Lekdijk bij Streefkerk en de Wolpherensedijk bij Gorinchem en de macrostabiliteitsproeven bij Bergambacht en de IJkdijk. De terug-analyses van bezweken taluds wijzen op een overschatting van de schuifsterkte van grond uitgaande van de huidige vigerende werkwijze. De werkwijze met bezwijksterkte van grond en ongedraineerd grondgedrag geeft een realistische terug-analyse van de opgetreden afschuivingen.

De cases met de overleefde waterstanden zijn onder andere de Markermeerdijk met de storm van 1928, de Lekdijk bij Nieuw-Lekkerland met de storm van 1953 en de Lekdijk bij Bergambacht met de hoge waterstand van 1995. Uitgaande van beste schattingen van de ongedraineerde schuifsterkte geven de berekeningen aan dat de schuifsterkte juist voldoende is om de hoge waterstanden te keren.

Ook internationaal zijn er studies gedaan om bezwijkgevallen te analyseren op basis van de ongedraineerde schuifsterkte van grond (Bjerrum, 1973; Ladd en Foot, 1974; Tavenas en Leroueil, 1980; Jardine en Hight, 1987). Op basis van de theoretische kennis, de internationale validatie-studies en de zojuist genoemde studies in het WTI-onderzoek kan worden gesteld, dat de werkwijze met bezwijksterkte van grond en ongedraineerd grondgedrag een realistische analyse van de macrostabiliteit van dijktaaluds mogelijk maakt en dat deze werkwijze niet conservatief is.

Ad II: Is de theorie op de juiste manier vertaald naar rekenregels?

Centraal in de nieuwe rekenregels voor macrostabiliteit in het WTI 2017 staat de nieuwe formulering waarmee de ongedraineerde schuifsterkte van de grond langs een schuifvlak wordt berekend. De formulering is gepresenteerd in deel 1 van deze notitie. De formulering is ontleend aan de eerder genoemde SHANSEP techniek (Ladd et al, 1974). De formulering sluit ook aan op het CSSM raamwerk (zie Wood, 2007). Praktische toepassing van deze berekeningsmethode is, zoals eerder aangegeven, eenvoudig en zeker niet complexer dan de vigerende werkwijze.

De parameters in deze berekening van de ongedraineerde schuifsterkte zijn de grensspanning, de ongedraineerde schuifsterkte ratio en de sterkte toename exponent. Voor de Nederlandse geotechnische praktijk zijn dit nieuwe parameters bij het uitvoeren van stabiliteitsanalyses. De bepaling van deze parameters vraagt deels om andere proeven in het veld en in het laboratorium en in ieder geval om een andere interpretatie van de proefresultaten. Essentieel bij de toepassing van de nieuwe rekenregels voor macrostabiliteit is de zorgvuldige bepaling van de benodigde parameters in het veld en in het laboratorium.

Aangezien in de praktische uitwerking voor het rekenen aan macrostabiliteit uitgaande van ongedraineerd grondgedrag wereldwijd verschillende keuzes worden gemaakt ten aanzien van parameterbepaling, heeft het SBW- en WTI-onderzoek zich vooral gericht op het meten van de ongedraineerde schuifsterkte in het veld en het laboratorium. Op basis van het literatuuronderzoek en eigen onderzoek in het veld en in het laboratorium en validatie in het

laboratorium en aan de hand van de terug-analyse van zeven opgetreden taludafschuivingen in Nederland zijn diverse praktische keuzen gemaakt. De keuze betreffen onder andere:

- Keuze voor triaxiaalproeven met anisotrope consolidatie voor de bepaling van de schuifsterkte van klei, Triaxiaalproeven zijn de meest gangbare proeven om de sterkte van grond in het laboratorium vast te stellen. Anisotrope consolidatie benadert de spanningsconditie in situ het beste,
- Keuze voor direct simple shear proeven met constante hoogte voor de bepaling van de schuifsterkte van veen. De direct simple shear proef geeft betrouwbare schuifsterkte parameters voor veen, doordat de bezwijkvorm in deze proef goed aansluit bij de structuur van veen. De proeven worden uitgevoerd met constante hoogte, omdat dit wordt gezien als een ongedraineerde proef.
- Keuze voor het bepalen van schuifsterkte bij grote rek (ultimate state), omdat bij toepassing van de pieksterkte gevaar van progressief falen van taluds bestaat. Bij grote rek is de schuifsterkte langs het gehele schuifvlak gemobiliseerd.
- Keuzes voor de verzadiging van de grondmonsters, keuze van consolidatiespanningen, snelheid van consolideren en afschuiven,
- Keuzes voor de procedures voor samendrukkingsproeven en constant rate of strain proeven voor het bepalen van de grensspanning.

In handleidingen en protocollen wordt vastgelegd hoe beheerders en ingenieursbureaus hiermee dienen om te gaan bij het toetsen van macrostabiliteit. De meeste van deze punten zijn al vastgelegd in het protocol dat in 2011 door Stowa en Deltares is opgesteld en door ENW Techniek is goedgekeurd.

De gemaakte keuzes zijn voorgelegd aan verschillende experts binnen en buiten Nederland. In de volgende paragrafen wordt hierop verder ingegaan.

De werkwijze met het nieuwe materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zal aansluiten bij het principe van de toetsing dat van grof naar fijn wordt gewerkt. In de eerste fase van de gedetailleerde toets (toetslaag 2) kan het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte worden toegepast met standaard waarden van de benodigde parameters. Als verfijning noodzakelijk is, zal veld- en laboratoriumonderzoek moeten worden uitgevoerd om de benodigde parameters nauwkeuriger te bepalen. Bij de toets op maat (toetslaag 3) kan met correlaties tussen veld- en laboratoriumtesten worden gewerkt. Daarmee kan de ongedraineerde schuifsterkte nog scherper worden bepaald. Door deze opzet kan de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte stap voor stap worden gemaakt. De investering in data en opleiding zal voor beheerders een geleidelijk proces zijn. In deel 3 van deze notitie zal verder op dit aspect worden ingegaan.

ENW en Reviewteam Dijken

Gedurende de looptijd van het onderzoek naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zijn de resultaten van het onderzoek enkele malen gepresenteerd in de ENW-werkgroep Techniek en in het Reviewteam Dijken. Het onderzoek naar het ongedraineerd grondgedrag is in 2005 van start gegaan binnen het toenmalige project Grensverleggend Toetsen. ENW-T heeft destijds positief geadviseerd om het onderzoek te starten. Naar aanleiding van de onderzoeksagenda van het ENW is het onderzoek vanaf 2007 voortgezet binnen het SBW-programma.

In november 2010 zijn de resultaten van de eerder genoemde validatie-studie (Van Duinen, 2010) gepresenteerd in ENW-T. Deze studie liet zien dat een aantal in Nederland opgetreden afschuivingen bij dijken niet kunnen worden verklaard met een stabiliteitsanalyse met gedraineerde schuifsterkte parameters volgens de vigerende praktijk. Met een stabiliteitsanalyse uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte kunnen deze afschuivingen wel worden verklaard. De stabiliteitsfactoren van de analyses met ongedraineerde schuifsterkte liggen gemiddeld circa 30% lager dan die van de analyses met gedraineerde schuifsterkte parameters. Naar aanleiding van de resultaten van deze studie heeft ENW-T aangegeven, dat de consequenties van de toepassing van het nieuwe materiaalmodel goed in beeld moeten worden gebracht en daarnaast is de vraag gesteld hoe de resultaten van het onderzoek omgezet worden in hanteerbare toetsregels.

In juni 2011 is zowel in ENW-T als in het RT-Dijken het eerder genoemde protocol voor het uitvoeren van laboratoriumproeven besproken. Zowel ENW-T als het RT-Dijken hebben ingestemd met dit protocol.

In december 2011 heeft het Reviewteam Dijken de resultaten van een consequentie-analyse (Rohe et al, 2010) en een rapport over parameterbepaling uit sonderingen (Van Duinen, 2011) beoordeeld. Naar aanleiding van de consequentie-analyse heeft het RT Dijken uitgesproken vertrouwen te hebben in de fysica (berekende verwachtingswaarden), maar de uitkomsten van de berekeningen met rekenwaarden (waarin onzekerheidsmarge in rekening is gebracht) worden betwijfeld, vanwege de grote spreiding in de parameters. Parameterbepaling op basis van sonderingen acht het RT-Dijken nog niet geschikt voor toepassing in de praktijk.

In mei 2012 zijn de genoemde consequentie-analyse en het rapport over parameterbepaling uit sonderingen ook voorgelegd aan ENW-T. ENW-T heeft gevraagd een werkgroep in te stellen om de onzekerheid van de grensspanning te onderzoeken. Deze werkgroep is samengesteld en is al verschillende malen bijeen geweest. Verderop in deze notitie wordt hierop nader ingegaan.

Vervolgonderzoek in het WTI-project heeft niet tot ander inzicht in de spreiding van de parameters geleid. Met name de grensspanning heeft een aanzienlijke spreiding (variatiecoëfficiënt circa 0,40). Deze spreiding is vergelijkbaar met de spreiding van de cohesie in de vigerende Nederlandse werkwijze. Ook vanuit de literatuur is bekend dat de grensspanning een aanzienlijke spreiding heeft (Harr, 1984; Lacasse en Nadim, 1997; Duncan, 2000). Daarnaast blijkt uit probabilistische analyses dat de ongedraineerde schuifsterkte ratio een grotere bijdrage aan de faalkans levert dan de grensspanning (Jongejan et al, 2013).

Wat de consequenties van het rekenen met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte betreft, blijkt inmiddels uit globale semi-probabilistische analyses met voorlopige partiële veiligheidsfactoren, dat deze werkwijze resulteert in gemiddeld circa 10 tot 15% lagere stabiliteitsfactoren dan de vigerende werkwijze. In deel 1 van deze notitie is hier op ingegaan. In deel 4 van deze notitie zullen de consequenties verder in beeld worden gebracht.

Werkgroep Evaluatie Grondmechanisch Onderzoek

Resultaten van het onderzoek zijn ook een enkele maal besproken met de Werkgroep Evaluatie Grondmechanisch Onderzoek. In deze werkgroep participeren diverse waterkeringbeheerders.

Op 12 maart 2012 zijn de resultaten van de eerder genoemde consequentie-analyse (Rohe et al, 2010) en het eerder genoemde rapport over parameterbepaling uit sonderingen (Van Duinen, 2011) met de werkgroep besproken. Ook in deze werkgroep is de discussie gevoerd over de grensspanning en de onzekerheid van deze parameter.

Discussies professor Jardine

Deltares heeft op verschillende momenten tijdens het onderzoek professor R.J. Jardine van Imperial College in Londen uitgenodigd om resultaten van het onderzoek te bediscussiëren. Professor Jardine is een expert op het gebied van onder andere geavanceerde laboratorium en veld meettechnieken, karakterisering van grond, taludstabiliteit en gedrag van slappe grond. Hij is op deze en andere onderwerpen internationaal actief in onderzoeks- en adviesprojecten. Verder is hij betrokken bij internationale geotechnische commissies en werkt hij als gasthoogleraar op diverse universiteiten.

Professor Jardine heeft inmiddels vier maal een bezoek gebracht aan Deltares. Op 7 december 2007 is onder andere gesproken over:

- Ervaring van Deltares met gedrag en eigenschappen van organische klei en veen,
- Numerieke simulaties van het gedrag van klei en veen,
- Laboratorium en veld testen voor het bepalen van sterkte eigenschappen van klei en veen.

Op basis van de discussies heeft prof. Jardine aangegeven het verstandig te vinden aansluiting te zoeken bij de internationale geotechnische werkwijzen. Hij onderschrijft dat het gedrag van organische klei en veen afwijkend is van het gedrag van zwaardere klei.

Tijdens het bezoek van prof. Jardine op 19 juni 2009 is onder andere gesproken over:

- Ontwikkeling van een schuifapparaat voor het onderzoek naar de schuifsterkte van veen,
- Resultaten van triaxiaalproeven en plaatdrukproeven op grote veenmonsters,
- Kruipgedrag bij ophogingen op veen.

Op 29 oktober 2010 heeft prof. Jardine Deltares opnieuw bezocht. In de context van de voorliggende notitie is dit bezoek het meest relevant. Besproken onderwerpen zijn:

- Protocol voor het uitvoeren van laboratoriumproeven,
- Ontwikkeling van een schuifapparaat voor het onderzoek naar de schuifsterkte van veen,
- Opzet voor veldproeven bij de Markermeerdijk (Dijken op Veen-project),
- Resultaten van centrifuge-proeven met organische klei,
- Resultaten van de validatie-studie met terug-analyses van zeven taludafschuivingen in Nederland.

Het protocol voor het uitvoeren van laboratoriumproeven is uitgebreid en in detail besproken. Het protocol is vooraf aan prof. Jardine toegestuurd, zodat een uitgebreide review plaats heeft kunnen vinden. Prof. Jardine ondersteunt de noodzaak van een protocol om de betrouwbaarheid van de parameterbepaling te vergroten en beter aan te sluiten bij internationale standaarden. Naar aanleiding van de opmerkingen van prof. Jardine is het protocol verder verbeterd en uitgewerkt, waarna in juli 2011 een tweede review door prof. Jardine heeft plaats gevonden. Het protocol is ook besproken met Nederlandse geotechnische laboratoria en ingenieursbureaus. Het protocol is door ENW-Techniek geaccordeerd.

Wat de validatie-studie betreft is prof. Jardine van mening dat dit een zeer nuttig overzicht geeft van relevante casuïstiek en proeven op organische klei en veen. Deze studie bevestigt dat de internationale *best practice* voor ongedraineerde schuifsterkte karakterisering verschillende voordelen biedt ten opzichte van de traditionele Nederlandse praktijk op basis van celproeven. Prof. Jardine heeft enkele voorstellen gedaan waarmee dit onderzoek verder kan worden uitgewerkt om nog duidelijker resultaten te geven en de spreiding verder kan worden verminderd. Dit betreft onder andere (1) het verbeteren van monsternametechnieken, (2) het uitvoeren van meerdere series triaxiaalproeven en direct simple shear proeven met verschillende spanningspaden, onder andere spanningspaden die de belastinggeschiedenis bij een dijk nabootsen en (3) het inzetten van sonderingen voor het bepalen van de grensspanning.

In 2013 is in het WTI-onderzoek en het Dijken op Veen-onderzoek een vergelijkend onderzoek uitgevoerd naar boortechnieken en is nagegaan wat het effect is van monsterverstoring op de schuifsterkte en de grensspanning. In 2011 en 2012 is in het WTI-onderzoek aandacht besteed aan het bepalen van de grensspanning uit sonderingen.

Het uitvoeren van meerdere series triaxiaalproeven en direct simple shear proeven met verschillende spanningspaden, onder andere spanningspaden die de belastinggeschiedenis bij een dijk nabootsen, is tot op heden niet uitgevoerd in het WTI-onderzoek. Omdat het hier om complex onderzoek gaat, is dit minder geschikt voor toepassing in de gedetailleerde toets (toetslaag 2).

Prof. Jardine heeft Deltares ook bezocht op 19 april 2013. Tijdens dit bezoek is gesproken over:

- Veldtesten van het Dijken op Veen-project,
- Effect van pre-shearing en spanningsrotatie op de schuifsterkte.

Met name het tweede punt is relevant voor het WTI-onderzoek. Op basis van de theorie en laboratoriumtesten uit de literatuur kan in stabiliteitsanalyses gebruik worden gemaakt van het effect van pre-shearing en spanningsrotatie. Dit onderwerp wordt naar aanleiding van de discussie met prof. Jardine in 2014 nader onderzocht.

Werkgroep ongedraineerde schuifsterkte

Naar aanleiding van het verzoek van de werkgroep Techniek van het ENW in mei 2012 is een werkgroep ingesteld om samen met Deltares te onderzoeken hoe de grensspanning kan worden bepaald en hoe de spreiding van deze parameter kan worden verkleind. Hiervoor zijn personen benaderd die buiten het werkgebied van de waterkeringen actief zijn en internationale ervaring hebben. De volgende personen maken deel uit van de werkgroep:

- Chris Dykstra (Boskalis / Hydronamic),
- Evert den Haan (Deltares),
- Flip Hoefsloot (Fugro),
- Arjen Kort (Norwegian Geotechnical Institute),
- Arny Lengkeek (Witteveen + Bos),
- Joost van der Schrier (Royal HaskoningDHV).
- Meindert Van (Deltares),
- Pieter Vermeer (Deltares).

De werkgroep is inmiddels vier maal bijeen geweest. Op 6 november 2012 is gesproken over de volgende onderwerpen:

- Geotechnische praktijk in Noorwegen,
- Modelvorming,
- Directe meting van de ongedraineerde schuifsterkte in situ met correlatie aan goed laboratoriumonderzoek,
- Database opzetten met correlaties tussen veld- en laboratoriumonderzoek,
- Laboratoriumproeven uitvoeren bij de werkelijke in situ spanning, rekening houdend met de belastinggeschiedenis en verwachte bezwijkspanning,
- Discussie over piek- en reststerkte en hoe om te gaan met rekniveaus,
- Uitvoeren van grote aantallen ongeconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproeven en Torvane proeven in verband met statistiek,
- Foutenboom om in kaart te brengen waar alle onzekerheden zitten.

Op 14 december 2012 is gesproken over:

- Invloed van spanningsrotatie op de ongedraineerde schuifsterkte,
- Procedure voor toepassing van veldmetingen en correlaties met laboratoriumonderzoek,
- Veldproeven Uitdam (Dijken op Veen-project),
- Discussie over semi-probabilistische aanpak en het niet onnodig statistiek toepassen op allerlei parameters,
- Discussie over directe toepassing van de ongedraineerde schuifsterkte uit sonderingen,
- Discussie over uitvoering van triaxiaalproeven voor de hoogwatersituatie.

Op 26 september 2013 is gesproken over:

- Twee scholen: directe bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte met in situ metingen en correlaties met laboratoriumonderzoek versus bepaling grensspanning en ongedraineerde schuifsterkte ratio afzonderlijk en berekenen van ongedraineerde schuifsterkte,
- Bepaling van de grensspanning uit sonderingen en correlaties met laboratoriumonderzoek en analyse van de bijbehorende onzekerheden,
- Terug-analyse van veldproeven Uitdam (Dijken op Veen-project).

Op 27 maart 2014 is gesproken over de bepaling van de grensspanning en de ongedraineerde schuifsterkte uit sonderingen en correlaties met laboratoriumonderzoek en analyse van de bijbehorende onzekerheden.

De werkgroep ondersteunt de overstap naar het analyseren van macrostabiliteit van dijktraluds op basis van de ongedraineerde schuifsterkte. Het overzicht van de besproken onderwerpen geeft aan dat de discussie zich heeft geconcentreerd op het inzetten van veldmetingen om de ongedraineerde schuifsterkte en de grensspanning te bepalen. Daarbij is laboratoriumonderzoek nodig om de veldmetingen te kunnen interpreteren. Ten aanzien van de toepassing van de veldmetingen zijn er twee scholen binnen de werkgroep. Een school is voorstander van het afleiden van de ongedraineerde schuifsterkte uit sonderingen en het rechtsreeks toepassen van de gemeten schuifsterkte in stabiliteitsberekeningen. De tweede school gaat uit van een berekende ongedraineerde schuifsterkte op basis van een afzonderlijke bepaling van de grensspanning uit veldmetingen en van de ongedraineerde schuifsterkte ratio uit laboratoriumproeven. Verder is veel discussie gevoerd over de uitvoering en interpretatie van veld- en laboratoriumonderzoek en de wijze waarop moet worden omgegaan met spreiding en onzekerheden.

Vanwege de complexiteit van het toepassen van veldmetingen en het opstellen van correlaties tussen veld- en laboratoriumonderzoek zal voor het WTI worden gekozen om voor de parameterbepaling van grof naar fijn te werken. In de eerste fase van de gedetailleerde toets wordt een eenvoudige werkwijze gevolgd met standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio en de grensspanning. Indien relevant kan de gedetailleerde toetsing worden verfijnd door de grensspanning en de ongedraineerde schuifsterkte ratio te bepalen uit laboratoriumproeven. Daarnaast kan de grensspanning ook worden afgeleid uit sonderingen met behulp van eenvoudige standaard correlaties. In de toets op maat kan waar nodig verder worden verfijnd en kunnen specifieke correlaties per dijkvak of project worden opgesteld. In deel 3 van deze notitie wordt hierop verder ingegaan.

Ad III: Past de theorie in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie?

In de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie worden zowel semi-probabilistische analyses als probabilistische analyses uitgevoerd. Dit geldt zowel voor het toetsen als voor het ontwerpen van waterkeringen. In het WTI 2017 zullen deze analyses zijn gebaseerd op de nieuwe normering op basis van overstromingskansen. De toelaatbare faalkans voor macrostabiliteit in een dwarsdoorsnede of een dijkstrekking is een nader te bepalen percentage van de overstromingskansen. Met een probabilistische analyse wordt de berekende faalkans getoetst aan de toelaatbare faalkans. In een semi-probabilistische analyse wordt het vereiste veiligheidsniveau gerealiseerd door het toepassen van partiële veiligheidsfactoren, namelijk de schadefactor, schematiseringsfactor, materiaalfactor en modelfactor. De partiële veiligheidsfactoren dienen te zijn afgeleid uit probabilistische analyses. Voor het WTI 2017 zullen nieuwe partiële veiligheidsfactoren worden afgeleid in 2015.

In de gedetailleerde toets op macrostabiliteit wordt de stabiliteit van taluds beoordeeld met glijvlakanalyses. Invoer voor deze glijvlakanalyses is de geometrie van de dijk, een grondlagenschematisatie, schematisatie van waterspanningen (freatisch vlak en stijghoogten) en een materiaalmodel met parameters voor de karakterisering van de schuifsterkte van de grond. Voor het ontwerpen van een dijkversterking worden dergelijke analyses ook uitgevoerd. In een probabilistische analyse is de invoer gedefinieerd met verwachtingswaarden en standaardafwijkingen of met scenario's en een kans van voorkomen. In een semi-probabilistische analyse wordt de onzekerheid over de invoer van een stabiliteitsanalyse in rekening gebracht met karakteristieke waarden van de schuifsterkte, een modelfactor voor de onzekerheid over het glijvlakmodel en een schematiseringsfactor voor de overige onzekerheden.

Met betrekking tot het onderwerp van de voorliggende notitie is de overstap naar een ander materiaalmodel in relatie tot de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie relevant. Verschillen met het vigerende materiaalmodel uitgaande van gedraineerde of effectieve sterkte parameters zijn:

- Ongedraineerd grondgedrag wordt in rekening gebracht, om het werkelijke grondgedrag goed te beschrijven,
- Uitgangspunt is de bezwijksterkte van de grond in plaats van de sterkte bij beperkte vervorming in laboratoriumproeven, omdat de kans op falen van het talud moet worden berekend en niet de kans op beperkte vervorming van het talud,
- Drie andere schuifsterkte parameters worden toegepast om de schuifsterkte te karakteriseren, namelijk de ongedraineerde schuifsterkte ratio, de grensspanning en sterkte toename exponent.

Voor semi-probabilistische analyses is de overstap naar een ander materiaalmodel aanleiding tot aanpassing van de materiaalfactoren en van de modelfactor. Een ander materiaalmodel brengt andere onzekerheden met zich mee. Deze onzekerheden moeten worden verdisconteerd in de partiële veiligheidsfactoren.

Voor probabilistische analyses vraagt de overstap naar een ander materiaalmodel aanpassing van de modelonzekerheidsfactor. De modelfactor is de rekenwaarde van de modelonzekerheidsfactor. De modelfactor en modelonzekerheidsfactor drukken uit hoe ver het rekenkundig falen en het daadwerkelijk falen van elkaar af liggen. Door de aanpassing van de modelonzekerheidsfactor veranderen de invloedscoëfficiënten van de probabilistische stabiliteitsanalyses. De invloedscoëfficiënten geven aan wat de bijdrage aan de faalkans is van de verschillende variabelen (stochasten) in een berekening.

Om de onzekerheid van de schuifsterkte te karakteriseren in de probabilistische analyses zal het Random average model worden gebruikt. In het VNK2-project worden zowel het Random average model (in combinatie met LiftVan-glijvlakmodel) als het Random field model (in combinatie met Bishop-glijvlakmodel) toegepast. Voor het WTI 2017 is vanuit praktische overwegingen de keuze gemaakt voor één glijvlakmodel (Spencer-Van der Meij met LiftVan voor controle doeleinden) in combinatie met één statistisch model (Random average) om onzekerheden te karakteriseren.

Wanneer de invloedscoëfficiënten van probabilistische analyses veranderen, heeft dit effect op de semi-probabilistische modelfactor en materiaalfactoren. De modelfactor en

materiaalfactoren worden afgeleid mede op basis van de invloedscoëfficiënten uit probabilistische analyses.

Voor het WTI 2017 worden de materiaalfactoren, modelfactor en modelonzekerheidsfactor opnieuw vastgesteld, rekening houdend met de nieuwe normering op basis van overstromingskansen en met het nieuwe materiaalmodel voor macrostabiliteit uitgaande van de ongedraineerde schuifsterkte. In 2013 is hier een begin mee gemaakt door het uitvoeren van probabilistische stabiliteitsanalyses op basis van ongedraineerde schuifsterkte (Jongejan et al, 2013). Met de uitkomsten van deze analyses zijn voorlopige materiaalfactoren voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters afgeleid. Uit deze studie blijkt dat de partiële veiligheidsfactoren (materiaalfactoren voor semi-probabilistische stabiliteitsanalyses) voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters aanmerkelijk lager mogen zijn (1,00 a 1,05) dan de vigerende materiaalfactoren voor gedraineerde schuifsterkte parameters. De bijdrage van de onzekerheid over de schuifsterkteparameters aan de faalkans blijkt kleiner dan tot nu toe altijd werd gedacht. Dit komt tot uitdrukking in relatief lage materiaalfactoren voor de ongedraineerde schuifsterkte parameters. In 2015 worden definitieve materiaalfactoren vastgesteld. Door het kalibreren van nieuwe partiële veiligheidsfactoren wordt het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte ingepast in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie.

Met de voorlopige materiaalfactoren wordt in 2014 een consequentie-analyse uitgevoerd. De eerste resultaten van deze consequentie-analyse zijn gepresenteerd in deel 1 van deze notitie. In deel 4 van deze notitie zal verder worden ingegaan op de consequentie-analyse.

Handhaven vigerende werkwijze

Wanneer zou worden overwogen de vigerende werkwijze met de gedraineerde schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving (conform WTI 2006) te handhaven, om trendbreuk te voorkomen, moet worden bezien hoe de semi-probabilistische toets en de probabilistische toets consistent met elkaar kunnen worden gemaakt. Op basis van de invloedscoëfficiënten uit probabilistische analyses zouden de partiële veiligheidsfactoren voor semi-probabilistische analyses substantieel lager mogen zijn dan nu het geval is (Jongejan et al, 2012). Bij het handhaven van de vigerende werkwijze ontstaat dan het probleem dat de vigerende partiële veiligheidsfactoren voor semi-probabilistische analyses niet aansluiten bij probabilistische analyses. Het naar beneden bijstellen van de vigerende partiële veiligheidsfactoren is niet mogelijk. Dit zou resulteren in een trendbreuk richting significant onveiligere dijken. Lagere partiële veiligheidsfactoren sluiten niet aan bij de empirische validatie van de vigerende werkwijze, die in de achterliggende decennia is opgebouwd. Daarnaast zou de vigerende werkwijze dan nog verder af komen te staan van een stabiliteitsanalyse met ongedraineerde schuifsterkte.

Wanneer de huidige partiële veiligheidsfactoren gehandhaafd blijven, kan de discrepantie tussen semi-probabilistische analyses en probabilistische analyses eventueel worden opgelost door de modelonzekerheidsfactor aan te passen. Het verdient niet de voorkeur deze aanpak te volgen, omdat een tekortkoming in het materiaalmodel dan wordt aangepakt met het aanpassen van een enkele factor. Dit zal resulteren in een grotere onbetrouwbaarheid van stabiliteitsanalyses.

Aansluitend op het voorgaande is het ook denkbaar dat de vigerende werkwijze inclusief de vigerende partiële veiligheidsfactoren worden gehandhaafd en dat de toets op macrostabiliteit

alleen semi-probabilistisch wordt uitgevoerd. De toets op macrostabiliteit wordt dan niet probabilistisch uitgevoerd. Dit past echter niet bij de scope van het WTI 2017.

In Tabel 1 zijn de voor- en nadelen van verschillende keuzes gegeven. Aan de overstap op het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte kleven enkele nadelen, maar dat geldt nadrukkelijk ook voor de beide andere keuzes.

	Ongedraineerd rekenen cf. WTI2017- uitgangspunten (WTI-ambitieniveau A)	Gedraineerd rekenen en WTI2006-voorschrift behouden (WTI-ambitieniveau C)	Gedraineerd rekenen cf. WTI2017-uitgangspunten (WTI-ambitieniveau A)
Essentiële kenmerken	Ongedraineerde schuifsterkte	Gedraineerde schuifsterkte	Gedraineerde schuifsterkte
	Probabilistische toets	Geen probabilistische toets	Probabilistische toets
	Veiligheidsfactoren met probabilistische onderbouwing ("gekalibreerde veiligheidsfactoren")	Huidige veiligheidsfactoren	Veiligheidsfactoren met probabilistische onderbouwing ("gekalibreerde veiligheidsfactoren")
Consistentie met WTI2017- veiligheidsfilosofie/ overstromingskans- benadering	+	--	+
Aansluiting op internationale geotechnische praktijk	+	--	--
Juistheid van de beschrijving van de fysica	+	--	--
Geschiktheid voor dijken op veen	+	--	--
Impact op databehoefte	-	+	+

	Ongedraineerd rekenen cf. WTI2017- uitgangspunten (WTI-ambitieniveau A)	Gedraineerd rekenen en WTI2006-voorschrift behouden (WTI-ambitieniveau C)	Gedraineerd rekenen cf. WTI2017-uitgangspunten (WTI-ambitieniveau A)
Bekendheid beheerders en bureaus met modellering	-	+	+
	Ongedraineerd rekenen zal voor velen nieuw zijn; cursussen zijn nodig	Huidige modellering blijft gehandhaafd	Huidige modellering blijft gehandhaafd (hooguit met andere veiligheidsfactoren)
Verandering aan de eisen aan de macrostabiliteit van taluds ("geen trendbreuk" is positief gewaardeerd)	-	+	-
	Trendbreuk onzeker; vermoedelijk enige verzwarende van de eisen: enerzijds geeft ongedraineerd rekenen lagere stabiliteitsfactoren, anderzijds worden de vereiste stabiliteitsfactoren ook lager door kleinere veiligheidsfactoren	Geen trendbreuk: eisen aan de macrostabiliteit van taluds blijven gelijk	Geen trendbreuk: probabilistische toets laten aansluiten op semi-probabilistische toets door modelonzekerheidsfactor aan te passen zodanig dat huidige veiligheidsfactoren kunnen worden gehandhaafd

Tabel 1 Drie keuzes met de bijbehorende voor- en nadelen (groen = positief, geel = negatief, rood = ongewenst).

Vervorming

Een belangrijk aspect is ook de vervorming van een waterkering tijdens hoog water of tijdens de levensduur. Het aspect vervorming is vooral van belang bij het ontwerpen van dijkversterkingen. Bij het toetsen is alleen de veiligheid (falen van de waterkering) van belang. Bij het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte wordt uitgegaan van de bezwijksterkte van de grond (schuifsterkte bij grote rek; ultimate state). In een macrostabiliteitsanalyse wordt met dit uitgangspunt het daadwerkelijk falen van de waterkering onderzocht. Bij het ontwerpen van een waterkering is naast de veiligheid ook de vervorming van de waterkering van belang. Met de bezwijksterkte van de grond als uitgangspunt in een macrostabiliteitsanalyse zal separaat de vervorming van een dijk moeten worden beschouwd in een dijkversterkingsontwerp. Hiervoor worden eindige elementen analyses uitgevoerd, waarmee het vervormingsgedrag van grondconstructies kan worden geanalyseerd. Het analyseren van de vervorming van dijken vraagt om criteria van toelaatbare vervorming. In de vigerende leidraden en technische rapporten is hierin nog onvoldoende voorzien. Om hier verder invulling aan te geven moet worden nagedacht over het veiligheidsniveau waarbij de vervorming wordt beoordeeld. Voor nevenfuncties van waterkeringen kan hiervoor de bruikbaarheidsgrenstoestand uit de Eurocode worden toegepast.

Samenhang ontwerpen en toetsen

Tenslotte is het van belang dat er samenhang is tussen ontwerpen en toetsen van waterkeringen. Een recent ontworpen en versterkte waterkering mag niet bij de eerstvolgende toetsing worden afgekeurd. Aanpak en uitgangspunten voor het toetsen en voor het ontwerpen dienen op elkaar aan te sluiten. Wanneer voor het toetsen van macrostabiliteit de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte wordt gemaakt, dient deze overstap ook te worden gemaakt bij het ontwerpen van dijkversterkingen.

Conclusies

In de voorliggende notitie is onderbouwd dat de theorie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte voor het toetsen van macrostabiliteit correct en consistent is vertaald naar rekenregels. Deze onderbouwing is gegeven aan de hand van de bovengenoemde drie vragen: (1) Is de theorie achter het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voldoende onderbouwd? (2) Is de theorie op de juiste manier vertaald naar rekenregels? En (3) past de theorie in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie?

De theorie achter het materiaalmodel uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte is goed onderbouwd. Internationaal is er veel onderzoek verricht naar het ongedraineerd gedrag van grond. Dit blijkt uit de vele wetenschappelijke publicaties die beschikbaar zijn over dit onderwerp.

Ook in de internationale geotechnische praktijk is het gangbaar om uit te gaan van ongedraineerd grondgedrag. Er zijn veel geotechnische handboeken die aangeven hoe moet worden omgegaan met het dimensioneren van taluds op basis van ongedraineerd grondgedrag. Ook het US Army Corps of Engineers is bezig de eigen richtlijnen voor stabiliteitsanalyses aan te passen, omdat men tot het inzicht is gekomen dat ongedraineerd gedrag in rekening moet worden gebracht.

Het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is in het WTI-project gevalideerd voor de Nederlandse situatie. Ook internationaal zijn er validatie-onderzoeken uitgevoerd op basis van ongedraineerde schuifsterkte van grond. Uit deze onderzoeken blijkt dat het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte leidt tot realistische beoordelingen van de macrostabiliteit van dijktaaluds. Tevens heeft het onderzoek aangetoond dat de stabiliteitsanalyses niet conservatief zijn.

Bij de vertaling van de theorie van het ongedraineerd grondgedrag naar rekenregels kan onderscheid worden gemaakt in het materiaalmodel en de parameterbepaling. Wat het materiaalmodel betreft, is in het WTI-project geen nieuw materiaalmodel ontwikkeld, maar dit is overgenomen van de internationaal zeer bekende SHANSEP techniek (Ladd et al, 1974), wat ook aansluit bij het Critical State Soil Mechanics model (Schofield en Wroth, 1968). Dit materiaalmodel is toegelicht in deel 1 van deze notitie. Dit is een praktisch rekenmodel waarin de theorie goed geïmplementeerd kan worden.

Ten aanzien van de parameterbepaling is in het WTI-project onderzocht hoe de verschillende parameters bepaald moeten worden. Internationaal worden bij de bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte in het veld en in het laboratorium verschillende keuzes gemaakt. In het WTI-onderzoek zijn op basis van de internationale literatuur keuzes gemaakt voor de werkwijze en de procedures voor de parameterbepaling. Deze keuzes zijn voor wat betreft het laboratoriumonderzoek vastgelegd in het protocol dat hiervoor door Stowa en Deltares is opgesteld. Een en ander zal voor het WTI 2017 verder worden uitgewerkt in schematiseringshandleidingen.

De resultaten van het WTI-onderzoek zijn voorgelegd aan de ENW-werkgroep Techniek, het Reviewteam Dijken, de Werkgroep Evaluatie Grondmechanisch Onderzoek en aan verschillende binnen- en buitenlandse experts. ENW-T en het RT-Dijken hebben aangegeven inhoudelijk akkoord te zijn met de theorie achter het materiaalmodel. Daarbij heeft men tevens aangegeven dat de consequenties van de toepassing van het nieuwe materiaalmodel goed in

beeld moeten worden gebracht. Verder is de vraag gesteld hoe de resultaten van het onderzoek worden omgezet in hanteerbare toetsregels.

Zowel in ENW-T als in het RT-Dijken als in de Werkgroep Evaluatie Grondmechanisch Onderzoek is veel discussie geweest over de grensspanning en het belang en de wijze van bepaling van de grensspanning. De grensspanning is voor Nederland een nieuwe parameter bij stabiliteitsanalyses. Deze parameter heeft veel spreiding. Bij de toetsing zal veel aandacht moeten worden besteed aan de bepaling van de grensspanning.

De resultaten van het WTI-onderzoek zijn ook voorgelegd aan binnen- en buitenlandse experts. Deze experts kunnen zich inhoudelijk op hoofdlijnen vinden in de resultaten van het WTI-onderzoek. Wel heeft men diverse suggesties voor aanscherping van de voorgestelde werkwijze en procedures gedaan. Dit betreft onder andere het uitvoeren van triaxiaalproeven met complexe belastingschema's en het uitvoeren van onderzoek in het veld (sonderingen) en proeven in het laboratorium en het opstellen van correlaties tussen het veld en laboratoriumonderzoek. Dit onderzoek is er op gericht de ongedraineerde schuifsterkte en de in situ toestand van de grond zo scherp mogelijk te bepalen.

De werkwijze met sonderingen en correlaties met laboratoriumonderzoek is complex voor routinematige toepassing in de praktijk. Dit blijkt uit de discussies met de experts. Ook het RT-Dijken heeft zich in deze zin hierover uitgesproken. Het toepassen van sonderingen en het opstellen van correlaties met laboratoriumonderzoek zal in het WTI 2017 worden ondergebracht in de toets op maat (toetslaag 3). Ditzelfde geldt voor het uitvoeren van triaxiaalproeven met complexe belastingschema's. In het WTI 2017 zullen in de gedetailleerde toets (toetslaag 2) zoveel mogelijk eenvoudige werkwijzen en procedures worden gevolgd. Waar nodig kunnen in de gedetailleerde toets eventueel wel sonderingen met eenvoudige standaard correlaties worden gebruikt om de grensspanning te bepalen. Deze keuze past bij het principe van het van grof naar fijn werken, zoals dit bij de toetsing gebruikelijk is. In deel 3 van deze notitie wordt verder ingegaan op het verzamelen van gegevens voor het toetsen van macrostabiliteit.

Het nieuwe materiaalmodel uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte zal worden ingepast in de Nederlandse waterveiligheidsfilosofie. Daarbij zijn zowel probabilistische als semi-probabilistische analyses mogelijk. Het rekenen met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte en de gegevens om de berekeningen uit te voeren staan een probabilistische benadering niet in de weg. Voor de semi-probabilistische analyses zullen de partiële veiligheidsfactoren (modelfactor en materiaalfactoren) opnieuw worden afgeleid. Een aandachtspunt is de vervorming van waterkeringen. Het nieuwe materiaalmodel gaat uit van de bezwijksterkte van de grond (grote rek). In een macrostabiliteitsanalyse wordt met dit uitgangspunt het daadwerkelijk falen van de waterkering onderzocht. Bij het toetsen van waterkeringen gaat het om de veiligheid en is dit een goede werkwijze. Bij het ontwerpen van een waterkering is naast de veiligheid ook de vervorming van de waterkering van belang. Met de bezwijksterkte van de grond als uitgangspunt in een macrostabiliteitsanalyse zal separaat de vervorming van een dijk moeten worden beschouwd in een dijkversterkingsontwerp.

In deze notitie zijn ook keuzes benoemd, waarbij de huidige werkwijze met gedraineerde schuifsterkte eigenschappen cohesie en hoek van inwendige wrijving (WTI 2006) wordt gehandhaafd. Deze keuzes hebben niet de voorkeur, omdat hierdoor een discrepantie ontstaat tussen probabilistische en semi-probabilistische analyses.

Referenties

- Bishop, A. W. and Henkel, D. J. (1957). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Arnold. London.
- Bjerrum, L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). Proc. 8th ICSMFE, Moscow, Vol.3, pp 111-159.
- Burland, J.B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* 40, 329-378.
- Burland, J., T. Chapman, H. Skinner, M. Brown. (2012). ICE manual of geotechnical engineering – Volume 1: Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation. ICE Publishing. Thomas Telford.
- Casagrande, A. (1939) Ueber die Scherfestigkeit von Boden. *Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau*. Zweite Folge. Berlin, Volk und Reich, 1939.
- Cotecchia, F. & Chandler, R.J. (2000). A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Géotechnique*, 50, No.4, 431-447.
- Van Duinen, T.A. (2010). SBW Werkelijke sterkte van dijken - validatie WS15: Synthese resultaten stabiliteitsanalyses onderzoekslocaties. Deltares. Report 1202121-003-GEO-0022, Versie 1, 7 september 2010.
- Van Duinen, T.A. (2011). SBW Macrostablieit: Parameters voor ongedraineerde stabiliteitsanalyses uit veldmetingen. Deltares. Report 1204203-002-GEO-0001, Versie 2, 25 november 2011.
- Van Duinen, T.A. (2013). Back analyses of dikes that withstand a high water level. Deltares memo 1206015-000-GEO-0006. 18 March 2013.
- Duncan, JM. (2000). "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4): 307-316.
- Harr, M.E. (1984). "Reliability-based design in civil engineering." Henry M. Shaw Lecture, Department of Civil Engineering, North Carolina State University.
- Henkel, D. J. (1956). The Effect of Overconsolidation on the Behaviour of Clays During Shear, *Géotechnique* 6, 139 – 150,
- Hvorslev, M.J. (1937) Ueber die Festigkeitseigenschaften gestorter bindiger Boden. *Ingeniorvidenskabelige Skrifter A, Nr. 45*, Kobenhavn 1937.
- Jardine, R.J. and Hight, D.W. (1987). Laboratory and Field Techniques for obtaining design parameters. Embankments on soft ground. Public Works Research Center, Athens, Chapter 4, pp 245-296.
- Jongejan, R.B., Calle, E.O.F., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Kallen, M.J., Vastenburg, E., Van Duinen, A. (2012). Kalibratie semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor macrostablieit binnenwaarts. Deltares. 1206006-006-ZWS-0004.
- Jongejan, R.B., Van Duinen, A., Kuiper, B., Vastenburg, E. (2013). WT12017: Beoordeling macrostablieit met ongedraineerd materiaalmodel: Probabilistische beschouwing en voorlopige veiligheidsfactoren. Deltares. 1207808-001-GEO-0004.
- Lacasse, S. and Nadim. F. (1997). "Uncertainties in characterizing soil properties." Norwegian Geotechnical Institute Publication, no. 201, pp. 49-75.
- Ladd, C.C., and Foott, R. (1974). "New design procedure for stability of soft clays." *J. of the Geotech. Eng. Div.*, 100(GT7), 763-786.
- Lambe, T.W. en Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Leroueil, S., J-P. Magnan, F. Tavenas. (1990). Embankments on soft clays. D.M. Wood (trans.), Ellis Horwood Series in Civil Engineering, Ellis Horwood, Chichester, England.
- Rendulic, L. (1936). Relation between voids ratio and effective principal stresses for a remoulded silty clay. Intern, confer, on soil mechanics, 1. Harvard 1936. Proceedings, vol. III.



Datum
11 juli 2014

Ons kenmerk
1209434-006-GEO-0007

Pagina
34/62

- Rohe, A. and T.A. van Duinen. (2010). Consequentieanalyse Macrostablieit. Vergelijking oude en nieuwe toetsmethode. Deltares report 1204203-005-GEO-0002, Version 3, 27 april 2012, definitief.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. en Wroth, C.P. (1958). On the Yielding of Soils. *Geotechnique* 8, No. 1, 22-53.
- Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. McGraw Hill, Maidenhead.
- Shewbridge, S. and Schaefer, J. (2013). SOME UNEXPECTED "MODERN" COMPLICATIONS IN SEEPAGE AND SLOPE STABILITY ANALYSIS: MODELING PORE PRESSURES AND STRENGTHS FOR FLOOD-LOADED STRUCTURES. Risk Management Center, Institute for Water Resources U.S. Army Corps of Engineers 12596 W. Bayaud Avenue, Suite 400, Lakewood, Colorado 80228.
- Skempton, A.W. (1948). The $\phi = 0$ analysis of stability and its theoretical basis. Intern, confer, on soil mechanics, 2. Rotterdam 1948. Proceedings, vol. I.
- Skempton, A.W. and Bishop, A.W. (1950). The Measurement of the Shear Strength of Soils. *Geotechnique* 2, No. 2, 90-108.
- Skempton, A.W. (1954). The pore pressure coefficients A and B. *Géotechnique* 4, 143-147.
- Tavenas, F. and Leroueil, S. (1980). The behaviour of embankments on clay foundations. *Canadian Geot. Journ.*, Vol. 17, No. 2, pp 237-260.
- Taylor, D.W. (1948). Shearing strength determinations by undrained cylindrical compression tests with pore pressure measurements. Intern, confer, on soil mechanics, 2. Rotterdam 1948. Proceedings, vol. V.
- Terzaghi, K. (1938). Einfluss des Porenwasserdruckes auf den Scherwiderstand der Tone. *Deutsche Wasserwirtschaft*, Nr. 8, 9, Berlin 1938.
- Terzaghi, K., R.B. Peck and G. Mesri. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Wood, D.M. (2007). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bijlage 3 Toepasbaarheid in de praktijk⁴

In deze notitie wordt ingegaan op de toepasbaarheid in de praktijk van de rekenregels voor het toetsen van macrostabiliteit met het materiaalmodel uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte. Achtereenvolgens komen de volgende zaken aan de orde:

- I. Zijn er in de praktijk voldoende gegevens voor het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?
- II. Welke is de inspanning om deze in het juiste format te verzamelen?
- III. Is er voldoende kennis bij waterkeringbeheerders om te kunnen rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?

Ad I: Zijn er in de praktijk voldoende gegevens voor het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?

Het vigerende WTI 2011 gaat uit van gedraineerd grondgedrag, zoals dit gebruikelijk is in de Nederlandse geotechnische praktijk. De schuifsterkte wordt hierbij gekarakteriseerd met de schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving. Deze parameters worden bepaald in het laboratorium. Dijkbeheerders beschikken veelal over een proevenverzameling van schuifsterkte parameters. Deze proevenverzameling kan bestaan uit resultaten van celproeven of triaxiaalproeven. Beide typen proeven zijn in de achterliggende decennia uitgevoerd volgens verschillende procedures. Voor de triaxiaalproef is er een uitvoeringsnorm (NEN 5117), maar deze norm geeft bijvoorbeeld niet aan hoe de consolidatiespanning dient te worden gekozen in relatie tot de in situ spanning en de grensspanning. Dit leidt tot spreiding in de proefresultaten. Soms worden macrostabiliteitsanalyses uitgevoerd met de standaard waarden van de schuifsterkte parameters uit NEN 6740. Deze tabel is ook in de Eurocode 7 (NEN 9997) overgenomen.

Benodigde gegevens

Bij ongedraineerd grondgedrag hoort een ander schuifsterktemodel met andere parameters. De wijze waarop de ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald en de parameters die daarbij een rol spelen zijn in deel 1 toegelicht. De ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald met de ongedraineerde schuifsterkte ratio, de grensspanning en de sterkte toename exponent:

- De ongedraineerde schuifsterkte ratio S is min of meer vergelijkbaar met de hoek van inwendige wrijving bij de vigerende werkwijze. In de ongedraineerde schuifsterkte ratio is naast het effect van de wrijving tussen de gronddeeltjes ook het effect van de generatie van waterspanning bij ongedraineerd grondgedrag verdisconteerd. De ongedraineerde schuifsterkte ratio wordt bepaald met eentrap anisotroop geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproeven voor klei en met direct simple shear proeven met constante hoogte voor veen. Met deze proeven en proefprocedures kan de schuifsterkte betrouwbaarder worden bepaald.
- De grensspanning σ'_p is een maat voor de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond. De verhouding van de grensspanning σ'_p en de in situ spanning σ'_v (de overconsolidatieratio OCR) zegt iets over de dichtheid van de grond en bepaalt mede

⁴ De tekst van deze bijlage komt overeen met de notitie 'Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsing macrostabiliteit in WTI 2017 – Toepasbaarheid in de praktijk' met kenmerk 1209434-006-GEO-0003 van 14 mei 2014.

de grootte van de generatie van waterspanningen bij het mobiliseren van schuifsterkte. Toepassing van de grensspanning in stabiliteitsanalyses is nieuw voor de Nederlandse praktijk. Voor een geotechnicus is de grensspanning wel een bekende parameter bij zettingsberekeningen. De grensspanning wordt het gemakkelijkst bepaald met samendrukkingsproeven in het laboratorium. De grensspanning kan ook met empirische correlaties worden afgeleid uit sonderingen. Deze correlaties zijn bekend vanuit de literatuur. In het WTI-onderzoek en het Dijken op Veen-project is hier ook aan gewerkt. Bij het toepassen van correlaties is het van belang de spreiding uit de correlaties ook in rekening te brengen.

- De sterkte toename exponent m bepaalt de mate waarin de ongedraineerde schuifsterkte van de grond gevoelig is voor veranderingen in de effectieve spanning σ'_v als gevolg van veranderingen in de waterspanning. De sterkte toename exponent wordt het gemakkelijkst bepaald met samendrukkingsproeven in het laboratorium. Daarnaast kan de sterkte toename exponent worden bepaald uit triaxiaalproeven en direct simple shear proeven.

Deze verandering in schuifsterktemodel en bijbehorende parameters vraagt deels om andere veld- en laboratoriumproeven en in ieder geval om andere proefprocedures en om een andere interpretatie van de proefresultaten.

Laboratoriumproeven

Waterkeringbeheerders beschikken, zoals hiervoor al is aangegeven, veelal over resultaten van triaxiaalproeven of celproeven. Uit deze proeven worden de cohesie en hoek van inwendige wrijving afgeleid. In deel 1 van deze notitie is al ingegaan op de tekortkomingen van de nu gangbare laboratoriumproeven en proefprocedures. Ook zijn de beschikbare proefresultaten niet altijd bruikbaar om hieruit de ongedraineerde schuifsterkte ratio S , de grensspanning σ'_p en de sterkte toename exponent m af te leiden. Bij het opnieuw gebruiken van bestaande proefresultaten om de ongedraineerde schuifsterkte ratio, de grensspanning en de sterkte toename exponent hieruit af te leiden, is het volgende aan de orde:

- Nieuwe celproeven worden sinds 1998 niet meer uitgevoerd en de meest recente ENW-publicaties geven geen materiaalfactoren voor schuifsterkte-parameters uit celproeven. Eerder is al door ENW aangegeven dat resultaten van celproeven in de toekomst niet meer zouden moeten worden toegepast (TAW, 2001). Diverse beheerders passen de beschikbare schuifsterkte parameters uit celproeven nu nog wel toe. Celproeven passen ook niet bij het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte.
- De triaxiaalproef (voor klei en veen met ongedraineerde afschuiffase) is op dit moment de gangbare laboratoriumproef voor het bepalen van schuifsterkte parameters. Deze proef wordt veelal uitgevoerd volgens de meertraps procedure. Dat wil zeggen dat een grondmonster drie maal achtereen bij een steeds hogere belasting wordt beproefd. Bij de tweede en derde belastingtrap is het grondmonster van met name veen en organische klei al verstoord door de eerdere belastingtrappen (Den Haan, 2006). Deze proefprocedure komt een betrouwbare parameterbepaling uiteraard niet ten goede. Voor zwaardere klei is de werkwijze wel aanvaardbaar.

- Bij het uitvoeren van triaxiaalproeven wordt in de huidige praktijk geen rekening gehouden met de belastinggeschiedenis van de grond. Bij de keuze van de consolidatiespanning voor de proeven wordt namelijk geen rekening gehouden met de grensspanning. Daardoor wordt geen onderscheid gemaakt tussen normaal geconsolideerd gedrag en overgeconsolideerd gedrag. Bij het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte dient dit onderscheid wel te worden gemaakt.
- Triaxiaalproeven worden gebruikelijk uitgevoerd tot 15% axiale rek (conform NEN 5117). Bij het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte wordt de schuifsterkte bij bezwijken (ultimate state) toegepast. Hiervoor dienen de triaxiaalproeven te worden doorgezet tot 25% axiale rek. Een grotere axiale rek geeft een lagere hoek van inwendige wrijving of ongedraineerde schuifsterkte ratio S . De beschikbare triaxiaalproeven zijn dus meestal niet voldoende ver doorgezet om in aanmerking te kunnen komen voor hergebruik van deze proeven.
- Triaxiaalproeven zijn niet geschikt voor het meten van de schuifsterkte van veen. Veen bestaat uit vezelig materiaal en heeft vaak een horizontale structuur. Voor het meten van de schuifsterkte van veen met deze specifieke structuur zijn direct simple shear proeven veel beter geschikt dan triaxiaalproeven. In het WTI 2017 zal de direct simple shear proef worden voorgeschreven voor het bepalen van de schuifsterkte eigenschappen van veen.
- In de bestaande praktijk worden triaxiaalproeven uitgevoerd met isotrope consolidatie. Dat wil zeggen dat de verticale spanning en de horizontale spanning aan het einde van de consolidatiefase en bij het begin van de afschuiffase gelijk zijn. Deze isotrope spanningstoestand komt niet overeen met de spanningstoestand in de grond. In de grond is de horizontale spanning veelal lager dan de verticale spanning (anisotrope spanningsconditie). Daarom wordt voor het WTI 2017 anisotrope consolidatie bij triaxiaalproeven voorgeschreven. Bij direct simple shear proeven speelt anisotropie van spanningen geen rol, omdat de consolidatiespanning alleen via de verticale spanning wordt opgelegd.

Vanwege de hiervoor genoemde punten zijn er beperkingen aan het opnieuw gebruiken van beschikbare proefresultaten. De mogelijkheden om beschikbare proefresultaten opnieuw te gebruiken zijn samengevat in Tabel 1.

Proeftype	Veen	Organische klei	Zware klei
Celproef	X	X	X
Triaxiaalproef meertraps	X	X	Ja mits
Triaxiaalproef eentraps	X	Ja mits	Ja mits
Direct simple shear proef (eentraps)	Ja mits	X	X

Tabel 1 Mogelijkheden om beschikbare proefresultaten opnieuw te gebruiken. De genoemde triaxiaalproeven zijn gangbaar isotroop geconsolideerd en de afschuiffase is ongedraineerd.

Hergebruik van bestaande proefresultaten is mogelijk, zoals weergegeven in Tabel 1. Daarbij moet de gevolgde proefprocedure in lijn zijn met het protocol voor het uitvoeren van laboratoriumonderzoek, dat is opgesteld door Stowa en Deltares (Deltares, 2011). Aandachtspunten hierbij zijn:

- De grensspanning moet bekend zijn, zodat voor de interpretatie van de proeven onderscheid kan worden gemaakt tussen overgeconsolideerd gedrag en normaal geconsolideerd gedrag. In de praktijk zal hiervoor vaak aanvullend geotechnisch onderzoek bestaande uit boringen met ongeroerde monsternamen en het uitvoeren van samendrukkingsproeven nodig zijn. Bij meertraps triaxiaalproeven zal de laatste belastingtrap veelal bij een consolidatiespanning hoger dan de grensspanning zijn uitgevoerd. Bij deze laatste belastingtrap zal de grond daardoor veelal normaal geconsolideerd gedrag vertonen.
- Triaxiaalproeven moeten zijn doorgezet tot 25% axiale rek, zodat de schuifsterkte bij bezwijken (ultimate state) kan worden bepaald. In NEN 5117 is 15% axiale rek voorgeschreven. In de praktijk zullen triaxiaalproeven daarom vrijwel altijd bij 15% axiale rek zijn gestopt.
- Direct simple shear proeven moeten zijn doorgezet tot 40% schuifrek, zodat de schuifsterkte bij bezwijken kan worden bepaald. De ASTM-norm D 6528 schrijft minimaal 20% schuifrek voor, maar het protocol van Stowa en Deltares schrijft 40% schuifrek voor. In Nederland zullen de direct simple shear proeven veelal conform het protocol zijn uitgevoerd.

Wanneer aan deze voorwaarden wordt voldaan, kunnen de proeven opnieuw worden geïnterpreteerd en kan de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en mogelijk ook de sterkte toename exponent m uit de proeven worden afgeleid.

Soms zullen ook samendrukkingsproeven of constant rate of strain proeven beschikbaar zijn. Deze proeven kunnen worden gebruikt om de grensspanning σ'_p en de sterkte toename exponent m te bepalen. Hergebruik van bestaande samendrukkingsproeven of constant rate of strain proeven is mogelijk, indien wordt voldaan aan de volgende voorwaarden:



- De gevolgde proefprocedure moet in lijn zijn met het protocol voor het uitvoeren van laboratoriumonderzoek, dat is opgesteld door Stowa en Deltares.
- De situatie van de dijk en de ondergrond ten tijde van het uitvoeren van de boringen waaruit de monsters voor de samendrukkingsproeven of constant rate of strain proeven zijn genomen, dient gelijk te zijn aan de huidige situatie.

Sonderingen

Bij het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zijn niet alleen laboratoriumproeven van belang voor de parameterbepaling, maar ook sonderingen. De grensspanning (en de ongedraineerde schuifsterkte) kunnen worden afgeleid uit sonderingen. Dijkbeheerders beschikken veelal over veel sonderingen. Sonderingen worden meestal alleen gebruikt om de gelaagdheid van de ondergrond in kaart te brengen. Het is daarnaast ook mogelijk om via correlaties de grensspanning (en de ongedraineerde schuifsterkte) uit sonderingen af te leiden. Beschikbare sonderingen kunnen worden gebruikt onder de volgende voorwaarden:

- De sonderingen dienen te zijn uitgevoerd volgens NEN 5140 of NEN-EN-ISO-22476-1.
- De kwaliteit van de sonderingen dient ten minste klasse 2 volgens NEN 5140 te zijn. Dit is de gangbare kwaliteit van sonderingen. Deze kwaliteitseisen komen overeen met klasse 3 van NEN-EN-ISO-22476-1. Bij het uitvoeren van nieuwe sonderingen ten behoeve van de in situ bepaling van de grensspanning moeten afhankelijk van de grondsoort sonderingen volgens klasse 1 of 2 van NEN-EN-ISO-22476-1 worden uitgevoerd, waarbij ook de waterspanning (u_2) wordt gemeten.
- De meetgegevens dienen in een digitaal bestand beschikbaar te zijn (bijvoorbeeld GEF).
- De situatie van de dijk en de ondergrond ten tijde van de uitvoering van de sonderingen dient gelijk te zijn aan de huidige situatie.

Bruikbaarheid beschikbare gegevens

Waterkeringbeheerders hebben veel gegevens voorhanden op basis waarvan grondmechanische parameters kunnen worden afgeleid. Deze gegevens zijn veelal niet bruikbaar voor het bepalen van parameters voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte, zoals hiervoor is aangegeven. Samenvattend geldt het volgende:

- Celproeven zijn niet geschikt. Eerder is al door ENW aangegeven dat deze proeven niet meer zouden moeten worden toegepast.
- Triaxiaalproeven met meertraps procedure zouden toegepast kunnen worden voor zware klei. In de praktijk zal dit veelal toch beperkingen hebben, omdat de grensspanning niet bekend is, waardoor interpretatie van de proef niet goed mogelijk is. Daarnaast is de afschuif fase van beschikbare triaxiaalproeven doorgezet tot 15% axiale rek, terwijl 25% axiale rek gewenst is.
- Triaxiaalproeven met eentraps procedure zouden toegepast kunnen worden voor organische klei en zware klei. In de praktijk zal dit veelal dezelfde beperkingen hebben als toepassing van meertraps triaxiaalproeven.

- Direct simple shear proeven kunnen worden toegepast voor veen. Bij deze proeven zal veelal ook de beperking zijn dat de grensspanning niet bekend is, zodat interpretatie van de proefresultaten niet goed mogelijk is.
- Samendrukkingsproeven of constant rate of strain proeven kunnen meestal wel worden toegepast om de grensspanning te bepalen. De belangrijkste voorwaarde is dat de in situ spanningscondities ten tijde van het uitvoeren van de proeven gelijk zijn aan de huidige in situ spanningscondities. Verder dienen de proeven van voldoende kwaliteit te zijn.
- Sonderingen kunnen meestal wel worden toegepast om de grensspanning of de ongedraineerde schuifsterkte te bepalen met behulp van correlaties. Ook hier is de belangrijkste voorwaarde dat de in situ spanningscondities ten tijde van het uitvoeren van de sonderingen gelijk moet zijn aan de huidige in situ spanningscondities. Uiteraard dienen ook de sonderingen van voldoende kwaliteit te zijn.

Met name samendrukkingsproeven, constant rate of strain proeven en sonderingen zullen in de praktijk in aanmerking komen om te worden toegepast voor het bepalen van parameters voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte.

Ad II: Welke is de inspanning om de gegevens in het juiste format te verzamelen?

De werkwijze met het nieuwe materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zal aansluiten bij het bekende principe van de toetsing dat van grof naar fijn wordt gewerkt. In de eerste fase van de gedetailleerde toets (toetslaag 2) kan het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte worden toegepast met standaard waarden van de benodigde schuifsterkte parameters. Deze standaard waarden zullen in het WTI-onderzoek worden vastgesteld. Voor de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m kunnen realistische schattingen (niet conservatief) worden gedaan op basis van de geologische afzetting, grondsoortbeschrijving en volumegewicht, die generiek voor Nederland kunnen worden toegepast. Deze standaard waarden van S en m zullen worden gekoppeld aan het stochastisch ondergrondmodel dat binnen het WTI-project wordt opgesteld. Het stochastisch ondergrondmodel geeft per geologisch gebied de mogelijke scenario's van de opbouw van de grondlagen met de daarbij behorende kans van voorkomen. Voor grondlagen waarvan de schuifsterkte in stabiliteitsanalyses met de gedraineerde schuifsterkte parameters moet worden gekarakteriseerd (zandige klei, stijve klei, dijksmateriaal), zal dit ook in het stochastisch ondergrondmodel worden aangegeven. Daarmee is voor beheerders meteen duidelijk welke parameters in welke situatie kunnen worden gebruikt.

Voor de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m worden standaard waarden aangeleverd vanuit het WTI voor de eerste fase van de gedetailleerde toets. Dit zijn realistische schattingen (niet conservatief) die zijn gerelateerd aan geologische afzetting, grondsoortbeschrijving en volumegewicht. Gegevens van waterkeringbeheerders zijn veelal niet bruikbaar om de parameters S en m hieruit af te leiden. De standaard waarden van S en m vanuit het WTI voorzien in deze leemte. Wanneer verfijning nodig is, moet geotechnisch veld- en laboratoriumonderzoek worden uitgevoerd.

De grensspanning kan niet zondermeer generiek worden bepaald. Zonder geotechnisch onderzoek kan voor de grensspanning alleen een veilige schatting worden gegeven. De grensspanning is een zeer variabele parameter. Deze parameter geeft uitdrukking aan de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond. In de grond vinden allerlei fysische,

chemische en biologische processen plaats. Deze processen beïnvloeden de toestand van de grond en daarmee ook de sterkte van de grond. De grensspanning dient daarom bij voorkeur lokaal te worden bepaald met veld- of laboratoriumonderzoek.

Het is niet zo dat de grensspanning op iedere locatie uniek is. Er zijn overeenkomsten in afzettingsmilieu's en belastinggeschiedenis van de grond. Bij geologen en bodemkundigen is hier veel van bekend. Deze kennis moet worden benut. Op basis daarvan kunnen typen situaties worden herkend uit sonderingen en boringen. In het eerder genoemde stochastisch ondergrondmodel zal per onderscheiden grondsoort en afzettingsmilieu vanuit het WTI-onderzoek een veilige waarde voor de grensspanning worden gegeven.

De sondering is een efficiënt middel om veel informatie te verzamelen over de grensspanning. Nadeel van het inzetten van sonderingen is dat met correlaties moet worden gewerkt. Door het toepassen van correlaties is er grotere onzekerheid over de werkelijke grootte van de grensspanning. Waterkeringbeheerders beschikken meestal over heel veel sonderingen. Dit maakt de inzet van sonderingen voor het bepalen van de grensspanning voor de hand liggend. Met hulp van software kan het afleiden van de grensspanning uit sonderingen eenvoudig en efficiënt worden uitgevoerd.

Voor de grensspanning worden voor de eerste fase van de gedetailleerde toets voorzichtige standaard waarden aangeleverd vanuit het WTI. Wanneer verfijning nodig is, kunnen beschikbare sonderingen van de waterkeringbeheerders worden gebruikt en kan met correlaties de grensspanning worden bepaald. Wanneer verdere verfijning nodig is, moet geotechnisch veld- en laboratoriumonderzoek worden uitgevoerd.

Wanneer de resultaten van de toetsing aanleiding geven voor verfijning van de gegevens, zal veld- en laboratoriumonderzoek moeten worden uitgevoerd om de benodigde parameters nauwkeuriger te bepalen. Hierbij gaat het om het uitvoeren van sonderingen of samendrukkingsproeven ter bepaling van de grensspanning of triaxiaalproeven en direct simple shear proeven ter bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte ratio. In toetslaag 3 kan maatwerk worden geleverd. Bij de toets op maat kan met specifieke correlaties tussen veld- en laboratoriumtesten worden gewerkt. Hiervoor zijn nauwkeurige sonderingen noodzakelijk. Dit onderzoek geeft een gedetailleerd inzicht in de mogelijke variaties van de grensspanning en de ongedraineerde schuifsterkte. Daarmee kan de ongedraineerde schuifsterkte nog scherper worden bepaald. Een dergelijk onderzoek is ook nodig voor het ontwerpen van dijkversterkingen.

Laboratoriumonderzoek moet worden uitgevoerd volgens het protocol dat door Stowa en Deltares in 2011 in samenspraak met geotechnische laboratoria en ingenieursbureaus is opgesteld (Deltares, 2011). In dit protocol wordt aangegeven hoe laboratoriumproeven moeten worden uitgevoerd om alle genoemde grondparameters te bepalen. Dit protocol is in 2011 door ENW Techniek goedgekeurd voor toepassing in de praktijk. In de schematiseringshandleiding voor macrostabiliteit, die in het WTI-project wordt opgesteld, zal uitvoerig worden ingegaan op de interpretatie van veld- en laboratoriumproeven en de bepaling van de parameters. Bij gebruik van het protocol en de schematiseringshandleiding zal de afleiding van parameters uit het geotechnisch onderzoek eenduidig en traceerbaar zijn. Toepassen van het protocol en de schematiseringshandleiding draagt er aan bij dat de toetsing met kwalitatief goede parameters met een zo beperkt mogelijke spreiding als gevolg van verschillen in uitvoeringswijze van het onderzoek kan worden uitgevoerd. Dit resulteert ook in uniformiteit binnen Nederland.

Door gefaseerd te werken van grof naar fijn kan de sterkte van de grond steeds nauwkeuriger worden bepaald voor de dijkvakken waar dit relevant is. Hierbij is de volgende fasering mogelijk, waarbij de complexiteit van de parameterbepaling steeds meer toe neemt:

- Standaardwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m en veilige waarden voor de grensspanning toepassen (gekoppeld aan stochastisch ondergrondmodel).
- Grensspanning afleiden uit beschikbare sonderingen met voorzichtige standaard correlaties.
- Uitvoeren van boringen met ongeroerde monsternamen en bepalen van de grensspanning uit samendrukkingsproeven of constant rate of strain proeven.
- Uitvoeren van boringen met ongeroerde monsternamen en bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S op basis van triaxiaal- en direct simple shear proeven.
- Grensspanning en ongedraineerde schuifsterkte afleiden uit nieuwe nauwkeurigere sonderingen met voorzichtige standaard correlaties. Daarbij de volgorde aanhouden om eerst te sonderen en op basis hiervan de zwakkere en sterkere locaties op te zoeken en vervolgens op een aantal locaties boringen met ongeroerde monsternamen en triaxiaal- en direct simple shear proeven uitvoeren.
- Grensspanning en/of ongedraineerde schuifsterkte afleiden uit nauwkeurige sonderingen met specifieke correlaties per dijkvak of project. Hierbij zijn ook boringen met ongeroerde monsternamen en triaxiaal- en direct simple shear proeven nodig.
- Grensspanning afleiden uit een analyse van het gedrag van een waterkering op basis van langdurige monitoring en geavanceerde rekenmodellen. Het gaat hier zowel om het gedrag tijdens de bouwfase als tijdens hogere waterstanden en over zakking en horizontale vervorming over de langere termijn.

Door deze opzet kan de parameterbepaling voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte stap voor stap worden uitgevoerd. De investering in gegevensverzameling en opleiding zal daardoor voor beheerders een geleidelijk proces zijn. De investering wordt ook alleen gedaan voor die dijkvakken waar dat nodig is.

Consequenties voor beheerders

Dat de mogelijkheden om beschikbare resultaten van laboratoriumproeven opnieuw te gebruiken beperkt zijn, heeft uiteraard consequenties voor dijkbeheerders. De overstap naar het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte betekent herinterpretatie van bestaande laboratoriumproeven waar mogelijk en ook het uitvoeren van nieuw geotechnisch onderzoek. Waterschappen zullen nieuwe gegevens moeten inwinnen. Voor de meeste waterschappen betekent dit dat in ieder geval de grensspanning zal moeten worden bepaald. Deze zal meestal niet bekend zijn vanuit beschikbaar geotechnisch onderzoek. De grensspanning dient te worden bepaald, omdat dit een belangrijke parameter is bij het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte, waarmee de in situ toestand van de grond wordt uitgedrukt. Daarnaast is deze parameter van belang om de beschikbare triaxiaalproeven en direct simple shear proeven opnieuw te kunnen interpreteren. De grensspanning kan worden bepaald met samendrukkingsproeven, constant rate of strain proeven of sonderingen. Wanneer de standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m vanuit het WTI niet toereikend blijken te zijn en

meertraps triaxiaalproeven beschikbaar zijn, dienen voor het bepalen van de schuifsterkte eigenschappen van veen en organische klei nieuwe direct simple shear proeven en eentrapsg triaxiaalproeven te worden uitgevoerd. De omvang van de consequenties hiervan variëren per beheerder:

- Waterschappen met een proevenverzameling met resultaten van celproeven moeten een nieuwe proevenverzameling opbouwen. Het ENW heeft eerder al aangegeven dat celproeven niet meer zouden moeten worden toegepast (TAW, 2001). Bij deze beheerders is al langer bekend dat het opbouwen van een nieuwe proevenverzameling noodzakelijk is.
- Waterschappen met een grote proevenverzameling met resultaten van meertraps triaxiaalproeven zullen deels de bestaande laboratoriumproeven opnieuw moeten interpreteren en deels ook nieuw onderzoek moeten uitvoeren, zoals hiervoor is aangegeven. Voor deze categorie waterschappen zijn de consequenties het grootst. Wanneer men een nieuwe proevenverzameling van dezelfde omvang wil opbouwen, is hiermee een grote inspanning gemoeid, met zowel organisatorische als financiële consequenties.
- Voor alle waterkeringbeheerders geldt dat de beschikbare sonderingen niet alleen voor het identificeren van de opbouw van de ondergrond, maar ook voor het bepalen van de grensspanning kunnen worden ingezet.

De overstap naar het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte betekent dus voor alle waterkeringbeheerders dat investeringen gedaan moeten worden om de benodigde parameters te bepalen.

Afstemming met beheerders

Om de consequenties van de overstap naar het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte helder in kaart te brengen en om hierover in gesprek te gaan met beheerders zijn er bijeenkomsten geweest met beheerders. Rijkswaterstaat WVL en Deltares hebben met de linking pin vanuit de WTI coördinatiegroep een workshop belegd voor beheerders. Daarnaast is er een bijeenkomst geweest van de WTI werkgroep datamanagement.

In de workshop (3 april 2014) hebben alle deelnemers open meegedacht met de naderende wijzigingen op het gebied van macrostabiliteitsanalyses. Er is zeer opbouwend meegedacht hoe de nieuwe werkwijze op een zo goed mogelijke wijze geïntroduceerd kan worden. Er zijn goede aanbevelingen gedaan voor het WTI. Een selectie uit de aanbevelingen is:

- Het is voor de verschillende partijen (beheerders, provincie, marktpartijen) van groot belang dat na de beslissing over het toepassen van ongedraineerde schuifsterkte in stabiliteitsanalyses in het WTI 2017 snel gecommuniceerd wordt wat er is besloten, waarom dit is besloten en wat de impact is.
- Vanaf dat moment zijn er snel protocollen, werkwijzers en opleidingen nodig om het benodigde veld- en laboratoriumonderzoek in te gaan plannen en uit te gaan voeren.
- Omdat de kans groot is dat veld- en laboratoriumonderzoek nodig is, zal het management van beheerders een kader moeten hebben waaruit blijkt dat dit onderzoek echt noodzakelijk is. Ook financiering zal dan snel geregeld moeten worden.

- Ook de marktpartijen zullen snel betrokken moeten worden, omdat zij al het benodigde onderzoek gaan uitvoeren. Hierbij zal ook gedacht moeten worden aan het noodzakelijke onderzoek voor regionale keringen.
- Een centrale regie en een helpdesk zijn van groot belang. Ook dit zal snel geregeld moeten worden.
- Bekijk heel erg goed welke gegevens uit vorige toetsrondes nog bruikbaar zijn.
- Zorg voor goede aansluiting met het HWBP/ontwerpen.
- De consequenties moeten duidelijk in beeld worden gebracht.

Samenvattend zijn het vooral het hergebruik van beschikbare gegevens en het goed sturen van het proces de zaken die beheerders belangrijk vinden. Na de besluitvorming zal invulling moeten worden gegeven aan deze punten.

In een bijeenkomst van de Werkgroep datamanagement (4 april 2014) is de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte en de consequenties voor het laboratoriumonderzoek ook gepresenteerd en besproken. In deze werkgroep kwamen de volgende punten aan de orde:

- Kunnen eentrapsges triaxiaalproeven worden hergebruikt, omdat eentrapsges triaxiaalproeven nu volgens de NEN norm tot 15% axiale rek worden uitgevoerd?
- Is de overstap op het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte alleen bedoeld voor slappe ondergronden of ook voor zandige gronden en stijve kleilagen? Kan voor zandige gronden en stijve kleilagen het huidige materiaalmodel met gedraineerde schuifsterkte toegepast blijven worden? Het verzoek is gedaan om in schematiseringshandleidingen duidelijk aan te geven hoe met de verschillende grondsoorten moet worden omgegaan.
- Er is gevraagd om een kaart waarin aangegeven wordt waar de slappe ondergronden en de zandige gronden en stijve kleilagen zich bevinden.
- Er is gevraagd om meer specifiek te maken welk laboratoriumonderzoek nu waar opnieuw moet worden uitgevoerd en welk onderzoek nog opnieuw te gebruiken is. Dit moet meer specifiek worden aangegeven dan in de tabel in de presentatie.
- De notitie over de toepasbaarheid van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte moet ook in de werkgroep datamanagement worden besproken.

Ook in deze bijeenkomst is het hergebruik van bestaande gegevens uitgebreid aan de orde geweest. In deze bijeenkomst lag het zwaartepunt van de discussie vooral op het hergebruik van bestaande gegevens en wanneer dit wel en niet mogelijk is. In schematiseringshandleidingen en andere WTI-documenten zal een en ander duidelijk moeten worden aangegeven. De voorliggende notitie geeft hiervoor al een aanzet.

In andere contacten met waterkeringbeheerders is aan de orde gekomen of het mogelijk is met fitfactoren een relatie te leggen tussen resultaten van beschikbare laboratoriumproeven en van proeven volgens de beoogde nieuwe procedure. Dit wordt niet als een reële mogelijkheid gezien. Door de verschillen tussen het huidige materiaalmodel en het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte en doordat er veel verschillen zijn tussen de proevenverzamelingen van de diverse beheerders lijkt dit een onbegaanbare weg. Voor

herinterpretatie van beschikbare laboratoriumproeven zijn eenduidige procedures mogelijk, wat de betrouwbaarheid van de parameterbepaling ten goede komt.

Ook is de suggestie gedaan om resultaten van stabiliteitsanalyses volgens de vigerende werkwijze te hergebruiken wanneer de beschikbare toetsresultaten een zekere overmaat hebben ten opzichte van de oude stabiliteitsnorm. Daarvoor moet de vraag worden beantwoord of het mogelijk is (al dan niet aan de hand van basale specifieke kenmerken van een dijktraject) een veilige bovengrens te geven van de mate van negatieve impact van de overstap op het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte op het stabiliteitsresultaat. Als dit mogelijk is dan kan de omvang van de benodigde hertoets op stabiliteit mogelijk al aardig worden ingeperkt. Aandachtspunt hierbij is dat ook de normen en de hydraulische randvoorwaarden zullen veranderen. Uit de tot nu toe uitgevoerde consequentie-analyse volgt dat de overmaat op de stabiliteitsfactor wel in de orde van 0,35 moet liggen om dit op een veilige manier te kunnen doen (zie ook deel 1 van deze notitie). Dit zal veelal een groot getal zijn in relatie tot de aanwezige overmaat in de stabiliteitsfactor, zodat het opnieuw uitvoeren van de toetsing vaak onontkoombaar zal zijn. Wellicht kan een dergelijke eenvoudige toets worden ondergebracht in toetslaag 1. In dat geval dient de kans op falen door macrostabiliteit verwaarloosbaar klein te zijn.

Ten aanzien van de gegevensinwinning is verder van belang dat de capaciteit van de Nederlandse geotechnische laboratoria beperkt is. Een ander aandachtspunt zijn de financiële mogelijkheden van waterkeringbeheerders. Mogelijk zijn dit beperkingen om tijdig voldoende gegevens voor de toetsing beschikbaar te krijgen. Het is niet ondenkbaar dat hierdoor voor 2023 niet alle gegevens volgens het juiste format op orde zijn. De eerste fase van de toetsing kan worden uitgevoerd met standaard parameter waarden, maar mogelijkheden van optimalisatie met veld- en laboratorium onderzoek zullen wellicht niet altijd volledig benut zijn.

Gezamenlijke aanpak

Gedurende het toetsproces kan blijken dat de standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m niet toereikend zijn of dat behoefte bestaat om correlaties tussen sonderingen en laboratoriumonderzoek aan te scherpen. Het is dan efficiënt om een landelijke gecoördineerde actie op te zetten voor het bepalen van parameters.

Nederland wordt onderverdeeld in een beperkt aantal geologische gebieden met verschillende afzettingmilieus. Binnen een geologisch gebied bevinden zich meerdere waterschappen. Wanneer meerdere waterschappen enkele boringen met nauwkeurige sonderingen en laboratoriumonderzoek uitvoeren op een aantal locaties in het eigen gebied en de resultaten van dit onderzoek bij elkaar worden gevoegd tot een landelijke dataset dan leidt dit heel snel tot een heel goede basis voor de toetsing. Met enkele boringen per waterschap kan een goed beeld van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m in een geologisch gebied worden verkregen. Door alle data samen te voegen ontstaat een grote proevenverzameling. De kosten voor elk waterschap zijn dan relatief beperkt. Later kan de gegevensverzameling in een rustig tempo verder worden uitgebreid voor dijkvakken waar dit nuttig is op basis van de toetsresultaten. Een gezamenlijke gecoördineerde actie bevordert ook de kwaliteit en eenduidigheid en vergelijkbaarheid van het onderzoek en de schuifsterkte parameters.

Voor onderzoek naar de grensspanning is altijd lokaal onderzoek nodig. Hier kan gebruik worden gemaakt van sonderingen, zoals eerder aangegeven. Voor een heel scherpe bepaling

van de grensspanning kan zonodig een specifieke correlatie tussen de sondeerweerstand en laboratoriumproeven worden gemaakt voor een dijktraject. In een dergelijk geval zijn lokale boringen met monsternamen en laboratoriumonderzoek noodzakelijk. Het opstellen van een specifieke correlatie kan plaats vinden bij de toets op maat of in geotechnisch onderzoek voor een dijkversterkingsproject.

Naar aanleiding van een studie van Stowa waarin de consequenties van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte aan de macrostabiliteit van regionale waterkeringen is onderzocht, is al een eerste aanzet gegeven voor een dergelijke landelijke proevenverzameling.

Ad III: Is er voldoende kennis bij waterkeringbeheerders om te kunnen rekenen met ongedraineerde schuifsterkte?

Het toepassen van het materiaalmodel op basis van ongedraineerde schuifsterkte zal voor veel medewerkers van waterschappen en ingenieursbureaus nieuw zijn. Veel van de medewerkers hebben geen ervaring met het uitvoeren en interpreteren van geotechnisch onderzoek gebaseerd op ongedraineerde schuifsterkte of het toepassen van ongedraineerde schuifsterkte in stabiliteitsanalyses. Er zijn ook geotechnici die deze ervaring wel hebben. Dit betreft in de eerste plaats medewerkers van ingenieursbureaus die aan buitenlandse projecten werken. Daarnaast zijn er medewerkers van waterschappen en ingenieursbureaus die betrokken zijn geweest bij de cases die zijn geanalyseerd voor het SBW-onderzoek en de consequentie-analyse voor regionale waterkeringen van Stowa. Van alle grote ingenieursbureaus zijn één of enkele medewerkers betrokken geweest bij deze studies. Ook bij de proefvoetsingen die door het WTI-project worden georganiseerd zal enige ervaring worden opgedaan met het toepassen van de ongedraineerde schuifsterkte.

Gezien de beperkte ervaring die beschikbaar is, hebben de geotechnici die de toetsing zullen uitvoeren opleiding nodig om de toetsmethode op basis van ongedraineerde schuifsterkte te kunnen uitvoeren. Wanneer in de eerste fase van de gedetailleerde toets met standaard waarden van de ongedraineerde schuifsterkte parameters wordt gewerkt is dit betrekkelijk eenvoudig en is een beperkte opleiding toereikend. Wanneer verfijning van de gedetailleerde toetsing nodig is, vraagt dit om het uitvoeren en interpreteren van laboratoriumproeven, waarbij het deels gaat om andere typen proeven en deels om andere proefprocedures. Hiervoor is meer opleiding noodzakelijk. Dit geldt ook voor het bepalen van parameters uit sonderingen. De waterkeringbeheerders zijn zich ervan bewust dat opleiding nodig is, gezien de discussie hierover tijdens de bovengenoemde workshop. Zowel opleiding als ondersteuning bij het uitvoeren van de toetsing zijn besproken.

Conclusie

Bij het nemen van een besluit over de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte voor het toetsen van macrostabiliteit is onder meer de toepasbaarheid van dit materiaalmodel in de praktijk een belangrijk aspect. De toepasbaarheid in de praktijk betreft (I) de beschikbaarheid van gegevens, (II) de benodigde inspanning om de gegevens te verzamelen en (III) de beschikbare kennis om het materiaalmodel toe te kunnen passen.

Ten aanzien van de beschikbaarheid van gegevens bij waterkeringbeheerders voor het rekenen met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte geldt dat deze op dit moment over het algemeen niet toereikend is. Alle waterschappen zullen een inspanning moeten leveren om de benodigde gegevens te verzamelen. Het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is voor Nederland een nieuw materiaalmodel en dit

materiaalmodel vraagt om andere schuifsterkte parameters. Voor het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is deels ander geotechnisch onderzoek nodig en in ieder geval andere proefprocedures en een andere manier van interpreteren van de proefresultaten. Beschikbare proefresultaten kunnen beperkt worden hergebruikt en opnieuw worden geïnterpreteerd. Deze beperking heeft voor een belangrijk deel te maken met tekortkomingen bij de huidige procedures bij het uitvoeren van laboratoriumproeven. Aan hergebruik van beschikbare proefresultaten zijn daarom enkele voorwaarden verbonden, zoals dat de laboratoriumproeven tot voldoende grote vervorming (axiale rek of schuifrek) moeten zijn doorgezet en dat de grensspanning bekend moet zijn. Het bepalen van de grensspanning is ook een aanzienlijke inspanning die moet worden geleverd, omdat deze parameter niet is opgenomen in de beschikbare proevenverzamelingen van de waterschappen. Voor het bepalen van de grensspanning kunnen sonderingen worden gebruikt, die bij de meeste waterschappen in grote aantallen beschikbaar zijn.

Om de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte te vereenvoudigen zullen realistische parameterwaarden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m worden aangeleverd door het WTI-project. Hiermee kan de eerste fase van de gedetailleerde toetsing worden uitgevoerd. De bij de waterschappen beschikbare sonderingen kunnen worden ingezet om de grensspanning te bepalen. De grensspanning is niet zo gemakkelijk generiek vast te stellen. Door het aanleveren van standaard waarden van enkele parameters is hergebruik van beschikbare laboratoriumproeven of het toepassen van fitfactoren minder dringend nodig. Wanneer de standaard waarden van de schuifsterkte parameters en de grensspanning uit sonderingen ontoereikend blijken, is aanvullend veld- en laboratoriumonderzoek nodig. Door van grof naar fijn te werken kan in een geleidelijk proces over meerdere jaren worden gewerkt aan het inwinnen van nieuwe gegevens voor het bepalen van schuifsterkte parameters. Verfijning in de parameterbepaling kan daarbij worden beperkt tot de dijkvakken waar dit noodzakelijk is. Het is daarbij denkbaar dat een gezamenlijke landelijke actie van beheerders wordt opgezet om een grote proevenverzameling op te bouwen. Dit is efficiënt en kostentechnisch gunstig en bevordert de kwaliteit en vergelijkbaarheid van de schuifsterkte parameters.

Bij het inwinnen van nieuwe parameters is het van belang dat het protocol van Stowa en Deltares voor het uitvoeren van laboratoriumproeven wordt toegepast. Voor het interpreteren van het geotechnisch onderzoek en het bepalen van de parameters dient de schematiseringshandleiding, die in het WTI-project wordt opgesteld, te worden gevolgd. Dit leidt tot eenduidige en traceerbare parameterwaarden. Dit draagt er aan bij dat de toetsing met kwalitatief goede parameters met een zo beperkt mogelijke spreiding als gevolg van verschillen in uitvoeringswijze van het onderzoek kan worden uitgevoerd. Dit resulteert ook in uniformiteit binnen Nederland.

De capaciteit van de geotechnische laboratoria en de financiële mogelijkheden van de keringbeheerders zijn aandachtspunten. Mogelijk geeft dit beperkingen om voor 2023 alle gegevens volgens het juiste format op orde te hebben. Door het beschikbaar stellen van standaard waarden van de schuifsterkte parameters kan de eerste fase van de gedetailleerde toetsing altijd worden uitgevoerd, maar mogelijkheden van optimalisatie met veld- en laboratoriumonderzoek zullen in 2023 wellicht niet altijd volledig zijn benut. Op dit moment is nog moeilijk in te schatten hoe dit zal verlopen.

Bij waterkeringbeheerders en ingenieursbureaus is onvoldoende kennis aanwezig om te kunnen rekenen met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte. Opleiding is



Datum
11 juli 2014

Ons kenmerk
1209434-006-GEO-0007

Pagina
48/62

daarom nodig. Tot nu toe is beperkte ervaring binnen Nederland opgebouwd door medewerkers van ingenieursbureaus door betrokkenheid bij SBW- en Stowa-onderzoek. Binnenkort kan ook ervaring worden opgedaan bij de proefvoetsing voor het WTI. Uiteraard zijn er medewerkers van ingenieursbureaus die wel kennis hebben van deze materie als gevolg van betrokkenheid bij projecten in het buitenland. Vanwege de bovengenoemde werkwijze van grof naar fijn kan gedurende meerdere jaren aan opleidingen worden gewerkt.

Referenties

- ASTM D 6528. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. ASTM D 6528-07. American Society for the Testing of Materials.
- Deltares (2011). Protocol voor het uitvoeren van laboratoriumproeven (versie 5). Deltares memo met kenmerk. 1204203-006-GEO-0003. 16 juni 2011.
- Den Haan, E.J. (2006). Ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Geotechniek, juli 2006.
- Ladd, C.C., and Foott, R. (1974). "New design procedure for stability of soft clays." J. of the Geotech. Eng. Div., 100(GT7), 763-786.
- NEN 5117. (1991). Bepaling van schuifweerstand- en vervormingsparameters van grond – Triaxiaalproef. Nederlandse norm NEN 5117, 1e druk, december 1991.
- NEN 5140. (1996). Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvingsweerstand van grond. Elektrische sondermethode. Nederlandse Norm NEN 5140, 1e druk, september 1996.
- NEN 6740. (1991). Technische grondslagen voor bouwconstructies, TGB 1990, Geotechniek, Basiseisen en belastingen. Nederlands Normalisatie Instituut, 1e druk, december 1991, met verwerking van het correctieblad van september 1993.
- NEN 9997-1. (2012). Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels. Nederlands Normalisatie Instituut.
- NEN-EN-ISO 22476-1. (2013). Geotechnisch onderzoek en beproeving – Veldproeven – Deel 1: Elektrische sondering. Nederlands Normalisatie Instituut.
- Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1968). Critical State Soil Mechanics. McGraw Hill, Maidenhead.
- TAW (2001). Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, juni 2001.

Bijlage 4 Consequenties voor beleid⁵

In deze notitie wordt informatie aangedragen ter beantwoording van de vraag of de nieuwe voorschriften voor het toetsen van macrostabiliteit met het materiaalmodel uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte beleidsmatig acceptabel zijn. Achtereenvolgens komen de volgende zaken aan de orde:

- I. Wat zijn de financiële consequenties van implementatie?
- II. Wat betekent de overgang voor lopende uitvoeringsprogramma's?
- III. Wat is de relatie met andere ontwikkelingen?

Ad I: Wat zijn de financiële consequenties van implementatie?

Consequentie-analyse

Om de financiële consequenties van de implementatie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in kaart te brengen is een consequentie-analyse uitgevoerd voor 167 dijkprofielen in 33 dijkringen. De dijkprofielen met de bijbehorende ondergrondinformatie zijn afkomstig van het VNK2-project. De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd met de bestaande software (D-Geo Stability). Daarnaast is de stabiliteit van vijf dijkprofielen berekend met de nieuwe WTI software (beta versie). De locaties van de dijkprofielen zijn weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Locaties van de dijkprofielen voor de consequentie-analyse.

⁵ De tekst van deze bijlage komt overeen met de notitie 'Ongedraineerde schuifsterkte bij toetsspoor macrostabiliteit in WTI 2017 – Beleidsmatige consequenties' met kenmerk 1209434-006-GEO-0006 van 11 juli 2014.



Datum
11 juli 2014

Ons kenmerk
1209434-006-GEO-0007

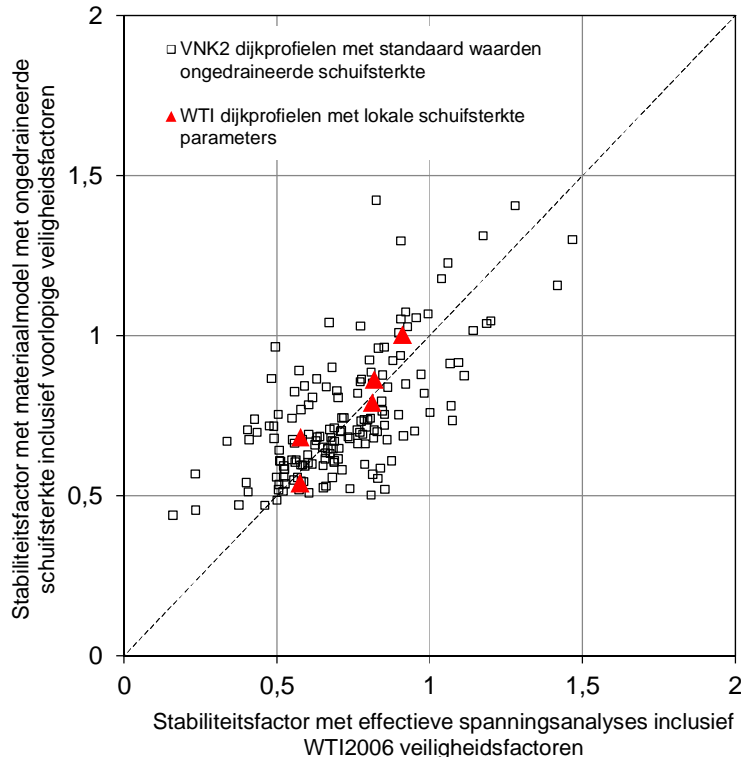
Pagina
50/62

In de VNK2-cases van de consequentie-analyse zijn uiteraard geen lokale gegevens over de ongedraineerde schuifsterkte beschikbaar. De benodigde ongedraineerde schuifsterkte parameters zijn gebaseerd op de ervaringen bij tien onderzoekslocaties van het SBW- en WTI-onderzoek. De consequentie-analyse geeft daarmee een beeld van wat gemiddeld genomen mag worden verwacht. Per locatie kunnen de werkelijke ongedraineerde schuifsterkte parameters afwijken van de aangenomen parameters, zodat de uitkomst van de stabiliteitsberekeningen op basis van lokaal onderzoek gunstiger of ongunstiger kan zijn.

Voor vijf dijkprofielen met lokaal uitgevoerd grondonderzoek uit het SBW- en WTI-onderzoek is de macrostabiliteit eveneens berekend. Hier zijn de ongedraineerde schuifsterkte parameters wel bekend. De berekeningen voor deze dijkprofielen zijn uitgevoerd met de nieuwe WTI software (beta versie). Het beeld van beide series berekeningen komt goed met elkaar overeen (zie Figuur 3).

De consequentie-analyse is gebaseerd op de huidige overschrijdingsfrequenties, faalkansruimteverdeling en partiële veiligheidsfactoren voor de vigerende werkwijze voor stabiliteitsanalyses. Op de ongedraineerde schuifsterkte parameters zijn voorlopige partiële veiligheidsfactoren toegepast. De definitieve kalibratie van de partiële veiligheidsfactoren voor het WTI volgt nog. De verwachting is dat de veranderingen ten opzichte van de voorlopige partiële veiligheidsfactoren beperkt zullen zijn. Invoering van de nieuwe normering op basis van overstromingskansen kan de veiligheidsbeoordeling ook veranderen. De nieuwe normering op basis van overstromingskansen is niet beschouwd. De consequentie-analyse beperkt zich tot alleen de consequenties van de implementatie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte.

Over de geanalyseerde dijkprofielen is van belang op te merken dat dit geen aselechte steekproef is. De dijkprofielen betreffen cases uit het VNK2-project. Het gaat om de ongunstigste locaties van alle dijkringen. De beschouwde dijkprofielen zijn door VNK2 geselecteerd uit resultaten van de toetsing op grond van de verwachte grootste bijdrage aan de overstromingskans. Uit de consequentieanalyse volgt dus wat de consequenties zijn bij de dijkprofielen die significant bijdragen aan de overstromingskans (aangenomen dat de overstromingskans, althans de bijdrage door macro-instabiliteit, te groot is).



Figuur 3 *Berekende stabiliteitsfactoren van de consequentie-analyse. Alle partiële veiligheidsfactoren zijn in de gepresenteerde stabiliteitsfactoren verwerkt. De waarde 1,0 op beide assen is daarom de grens tussen goedkeuren en afkeuren.*

In Figuur 3 zijn de berekende stabiliteitsfactoren van de consequentie-analyse gepresenteerd. De resultaten van de stabiliteitsanalyses geven een grote bandbreedte. Gemiddeld genomen is de stabiliteitsfactor voor de vigerende werkwijze en de werkwijze met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte ongeveer gelijk. Het aantal dijkprofielen waar wordt voldaan aan de stabiliteitseis is ook ongeveer gelijk. De consequentie-analyse laat ook zien dat de stabiliteit van een dijkprofiel veel gunstiger kan worden, maar ook veel ongunstiger. Als gevolg van een veel groter aantal dijkprofielen in deze consequentie-analyse is het beeld verschoven ten opzichte van de voorlopige consequentie-analyse, waarvan de resultaten zijn beschreven in deel 1 van het beslisdocument.

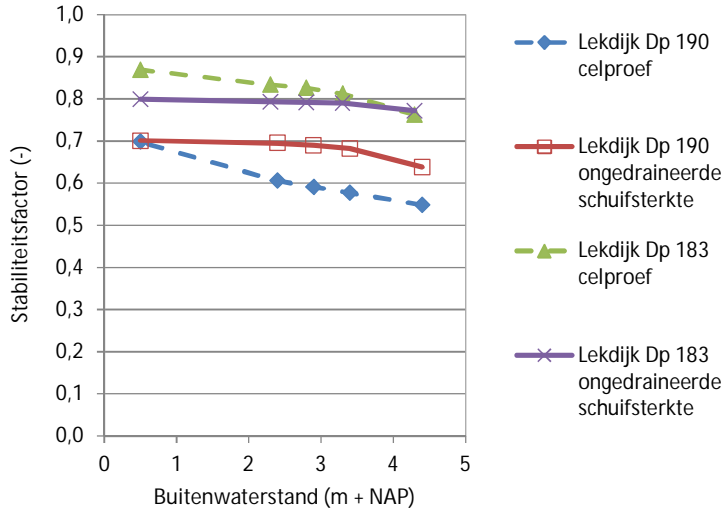
Het feit dat de stabiliteitsfactoren op basis van beide werkwijzen gemiddeld genomen ongeveer gelijk zijn, wordt veroorzaakt door de combinaties van de beide materiaalmodellen met de bijbehorende partiële veiligheidsfactoren. Het vigerende materiaalmodel met effectieve spanningsanalyses is een optimistisch materiaalmodel, omdat ongedraineerd grondgedrag niet wordt beschouwd. Zoals aangegeven in notitie 2 wordt dit optimisme gecompenseerd door relatief hoge partiële veiligheidsfactoren. Door het in rekening brengen van ongedraineerd grondgedrag wordt de schuifsterkte in de berekeningen veelal lager. Uit de voorlopige kalibratie van partiële veiligheidsfactoren voor het WTI volgt echter dat deze factoren lager mogen zijn dan de vigerende leidraden en technische rapporten voorschrijven. Een en ander blijkt in de consequentie-analyse te resulteren in stabiliteitsfactoren die gemiddeld genomen gelijk zijn voor beide werkwijzen.

Uit een analyse van de gevonden verschillen tussen de vigerende werkwijze en de berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte blijkt dat de verschillen in grote mate afhangen

van lokale omstandigheden. De stabiliteitsfactor wordt onder andere gunstiger in berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte, wanneer het veen in de ondergrond dominant is. Dit beeld past bij de resultaten van de Stowa consequentie-analyse voor boezemkaden (Van Duinen en Van Hemert, 2013). Trends in de berekeningsresultaten naar dijkkringgebied, opbouw van de ondergrond (geologie), dijkhoogte of dijktype zijn niet gevonden. Dat geen relatie met de geologie is gevonden ligt voor de hand, omdat geen lokale ondergrondgegevens zijn gebruikt, maar schattingen op basis van ervaringen uit SBW en WTI onderzoek, zoals hiervoor aangegeven. De gevonden verschillen zijn zo groot, dat waar de stabiliteit ongunstiger wordt, dit in extreme gevallen, met name bij een situatie met opdrijven van het achterland achter de dijk, een orde 20 à 30 meter brede stabiliteitsberm kan betekenen. Er zijn echter ook veel situaties waar de stabiliteit gunstiger zal worden en met een aanmerkelijk kleinere stabiliteitsberm of andere maatregel kan worden volstaan.

De uitgevoerde consequentie-analyse geeft voor macrostabiliteit een ander beeld dan de resultaten van het VNK2-project. In de consequentie-analyse zijn veel dijkprofielen die niet voldoen aan de semi-probabilistische veiligheidseis voor macrostabiliteit. Dit geldt voor beide werkwijzen in de consequentie-analyse. Bij VNK2 is macrostabiliteit in veel dijkringen geen dominant faalmechanisme. Veelal wordt een kleine faalkans voor macrostabiliteit berekend. VNK2 werkt met het huidige gedragsmodel met effectieve spanningsanalyses (gedraineerde schuifsterkte). Het huidige gedragsmodel is te optimistisch, omdat ongedraineerd grondgedrag niet wordt beschouwd. Daarnaast is een probabilistische analyse relatief gunstig ten opzichte van een semi-probabilistische analyse. De huidige semi-probabilistische partiële veiligheidsfactoren zijn relatief streng in vergelijking met wat op basis van probabilistische invloedscoëfficiënten nodig zou zijn (Jongejan et al, 2013). Daarentegen zijn de huidige semi-probabilistische veiligheidsfactoren afgeleid op basis van decennia lange empirie. De huidige relatief strenge veiligheidsfactoren compenseren het optimisme van een effectieve spanningsanalyse. Probabilistische analyses met het huidige gedragsmodel moeten daarom als te optimistisch worden gezien.

Een interessant punt bij ongedraineerd grondgedrag is dat de macrostabiliteit minder gevoelig is voor veranderingen in de buitenwaterstand en de waterspanningen. Bij een belasting van een dijk door hoog water zijn de veranderingen van de spanningen in de grond zodanig dat de grensspanning niet wordt beïnvloedt. Daardoor is het effect van hoog water op de mobiliseerbare schuifsterkte van klei- en veenlagen gering. Dit effect kan worden verklaard vanuit het materiaalmodel. Dit effect leidt tot een vlakkere relatie tussen de berekende stabiliteitsfactor en de buitenwaterstand. Alleen in situaties waar de schuifsterkte op het afschuifvlak wordt gedomineerd door de schuifsterkte van zand in de dijk of in de diepe zandlaag, wordt de macrostabiliteit van een talud ongunstig beïnvloedt door een hoge buitenwaterstand. Dit aspect komt niet tot uitdrukking in semi-probabilistische analyses, omdat wordt getoetst bij één buitenwaterstand (toetspeil), maar wel in probabilistische analyses, waar de stabiliteit wordt berekend rekening houdend met het optreden van verschillende buitenwaterstanden.



Figuur 4 Effect van de buitenwaterstand op de stabiliteitsfactor.

Het effect van de buitenwaterstand en de waterspanningen op de schuifsterkte en de stabiliteitsfactor is onderzocht voor twee locaties waar lokaal grondonderzoek beschikbaar is (zie Figuur 4). Hiervoor zijn stabiliteitsanalyses uitgevoerd met buitenwaterstanden tussen de dagelijkse waterstand en een waterstand van 1,0 meter boven het Toetspeil 2006. Voor de analyses met ongedraineerde schuifsterkte is de berekende stabiliteitsfactor vrijwel constant bij buitenwaterstanden tot het Toetspeil 2006. Bij extreem hoge buitenwaterstanden is de invloed van de buitenwaterstand op de stabiliteitsfactor groter. Bij de effectieve spanningsanalyses met gedraineerde schuifsterkte parameters neemt de stabiliteitsfactor sterker af bij een toenemende hoogte van de buitenwaterstand. De gevoeligheid van de macrostabiliteit van een dijk voor de buitenwaterstand kan wellicht in de toekomst naast de stabiliteitsfactor een criterium zijn in de beoordeling van de veiligheidstoestand van een dijk. In de faalkans is het effect van de buitenwaterstand op de mobiliseerbare schuifsterkte verdisconteerd.

Samenvattend komt uit de resultaten van de consequentie-analyse het volgende beeld naar voren:

- Gemiddeld genomen zijn de stabiliteitsfactoren voor de huidige werkwijze met effectieve spanningsanalyses en voor analyses met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte ongeveer gelijk. Het gaat vooral om verschuivingen in de stabiliteitsfactoren. De winst hiervan is dat onterecht goedkeuren of afkeuren terug wordt gedrongen.
- Per situatie zijn grote verschillen in berekende stabiliteitsfactoren voor beide typen analyses mogelijk. Hierbij is er geen relatie gevonden met dijkeringen of dijkgeometrie.
- De stabiliteitsfactor wordt met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte veel minder beïnvloedt door de buitenwaterstand. Dit kan naast de stabiliteitsfactor een belangrijk punt zijn bij de beoordeling van de veiligheidstoestand van een dijk.

Optimalisatie toetsresultaten

De consequentie-analyse geeft het beeld dat de stabiliteit gemiddeld genomen niet ongunstiger wordt dan op basis van de vigerende werkwijze. Lokaal zijn wel grote verschillen mogelijk tussen de vigerende werkwijze en een analyse met ongedraineerde schuifsterkte. Dit kan zowel in positieve als in negatieve zin zijn. De consequentie-analyse is uitgevoerd op basis van gemiddelde schattingen van de grensspanning. Lokaal kan de stabiliteit daardoor gunstiger of ongunstiger zijn dan de consequentie-analyse aangeeft. Hoe een en ander daadwerkelijk uit pakt, zal moeten blijken uit lokaal grondmechanisch onderzoek in het kader van de toetsing. Voor de vijf locaties in de consequentie-analyse waar lokaal onderzoek beschikbaar is, zijn de verschillen tussen de beide rekenmethoden relatief klein.

Waterkeringbeheerders hebben onvoldoende geschikte gegevens voor het uitvoeren van stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte. In notitie 3 is hier uitgebreid op ingegaan. De toetsing kan in eerste instantie worden uitgevoerd met standaard waarden van de benodigde parameters, die vanuit het WTI beschikbaar worden gesteld. Het beschikbaar zijn van standaard waarden zorgt er voor dat de toetsing meteen in 2017 kan starten. Beschikbare sonderingen van keringbeheerders zijn een belangrijke aanvulling op de standaard waarden. Met de sonderingen kan de grensspanning in het veld worden bepaald. Afhankelijk van de eerste tussenresultaten van de toetsberekeningen kan vervolgens waar nodig worden geïnvesteerd in goede grondmechanische gegevens.

De uitgevoerde consequentie-analyse betreft semi-probabilistische stabiliteitsanalyses (niveau 2a) met standaard waarden van de schuifsterkte parameters. Ten opzichte van deze consequentie-analyse zijn er in toetslaag 2b en 3 verschillende mogelijkheden voor optimalisatie van het toetsoordeel:

- Probabilistische stabiliteitsanalyses in toetslaag 2b.
- Geavanceerd grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek, onder andere specifieke correlaties tussen sondeerweerstand en schuifsterkte parameters per dijktraject, partieel gedraineerd grondgedrag en meerdere typen veld- en laboratorium onderzoek naast elkaar inzetten voor een beter inzicht in de spreiding van parameters.
- Monitoren van het gedrag van de dijk en optimaliseren van de schuifsterkte-eigenschappen op basis van het gedrag van de dijk met behulp van eindige elementen modellen.
- Bewezen sterkte analyse op basis van overleefde waterstanden.

Probabilistische analyses geven een nauwkeuriger en ook scherper resultaat dan semi-probabilistische analyses. Partiële veiligheidsfactoren voor semi-probabilistische analyses zijn afgeleid uit probabilistische analyses. Daarbij worden relatief zware veiligheidsfactoren afgeleid, omdat de veiligheidsfactoren voor alle situaties tot een veilige analyse moeten leiden. Daarnaast wordt bij een semi-probabilistische toets gewerkt met een vaste faalkansruimteverdeling. Bij een probabilistische toets wordt de werkelijke faalkans berekend en kan ook worden afgeweken van de standaard faalkansruimteverdeling. Dit resulteert in scherpere analyses. Het uitvoeren van probabilistische stabiliteitsanalyses kan daarom zinvol zijn.

Gebruik maken van monitoren past beter bij het nieuwe materiaalmodel dan bij het vigerende materiaalmodel. Het nieuwe materiaalmodel beschrijft het grondgedrag beter. Waarnemingen aan het gedrag van dijken zijn daardoor beter te analyseren met het nieuwe materiaalmodel.

Uitgaande van ongedraineerd grondgedrag is een dijk minder gevoelig voor verschillen in de buitenwaterstand, zoals eerder aangegeven (zie Figuur 4). Monitoren van het gedrag van een dijk en optimaliseren van de schuifsterkte eigenschappen op basis van het gedrag van de dijk met behulp van eindige elementen modellen is uitgaande van ongedraineerd grondgedrag relevant. Het gedrag van een dijk bij niet heel extreme waterstanden kan veel inzicht geven in de schuifsterkte parameters en in het te verwachten gedrag bij extreem hoge waterstanden.

Bewezen sterkte analyses zijn eveneens zinvol. Het feit dat een dijk al enkele decennia goed functioneert en enkele niet heel extreme waterstanden heeft kunnen keren, is informatie die kan worden gebruikt om de kans te berekenen dat een hogere waterstand ook kan worden gekeerd. Bij de vigerende gedraineerde analyses zijn bewezen sterkte analyses veelal niet succesvol. Dit komt doordat het feit dat een niet heel extreme waterstand is gekeerd bij een gedraineerde analyse niet veel zegt over het al dan niet zullen kunnen keren van een hogere waterstand.

Door deze mogelijkheden voor optimalisatie te benutten voor situaties waar het nieuwe materiaalmodel ongunstig uitwerkt, kan de potentiële opgave voor dijkversterkingswerken als gevolg van de introductie van het nieuwe materiaalmodel naar verwachting aanzienlijk worden beperkt. Dit brengt uiteraard wel een inspanning bij het uitvoeren van de toetsing met zich mee.

Bij een start van de toetsing in 2017 kan de toetsing naar verwachting volledig zijn uitgevoerd in 2023. Voor monitoring is meer tijd nodig.

Financiële consequenties

Gemiddeld genomen resulteert een stabiliteitsanalyse op basis van ongedraineerde schuifsterkte ongeveer in een zelfde stabiliteitsfactor als een traditionele effectieve spanningsanalyse. Door het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte zal meer een verschuiving in toetsresultaten optreden dan een verslechtering.

Voor het grootste deel van de locaties in de consequentie-analyse waar de macrostabiliteit nu onvoldoende is, wordt de macrostabiliteit beter door toepassing van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte, maar de stabiliteitsfactor blijft meestal onder de eis. De meeste dijkvakken van deze categorie zijn waarschijnlijk al afgekeurd bij de derde toetsronde en al op lijst van het HWBP geplaatst. Het introduceren van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte brengt in deze gevallen geen extra versterkingskosten met zich mee.

In een beperkt aantal dijkprofielen waar de macrostabiliteit in de consequentie-analyse goed is op basis van de vigerende werkwijze, is de macrostabiliteit op basis van de ongedraineerde schuifsterkte onvoldoende. Dit betreft 6 van de 167 geanalyseerde dijkprofielen. Na introductie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zal dit leiden tot afkeuring van dijkvakken en tot het moeten uitvoeren van dijkversterkingswerken. Dit brengt kosten met zich mee. Anderzijds wordt onterecht goedkeuren van dijkvakken terug gedrongen.

Verder volgt uit de consequentie-analyse dat er ook een ongeveer even groot aantal dijkvakken is die met de vigerende werkwijze worden afgekeurd en die op basis van de ongedraineerde schuifsterkte zouden worden goedgekeurd. Dit voorkomt het onterecht afkeuren van dijken en onnodige dijkversterkingen. Dit is een potentiële besparing.



Gemiddeld genomen voor heel Nederland zal het introduceren van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte geen extra kosten voor dijkversterkingswerken met zich mee brengen. Op de korte termijn kan het nog voorkomen dat een recent versterkte dijk opnieuw moet worden versterkt. Op de langere termijn bezien zal de overstap naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte gemiddeld genomen budget neutraal zijn.

Door de invoering van de nieuwe overstromingskansnormen met strengere eisen voor macrostabiliteit zijn op termijn waarschijnlijk ook veel dijkverbeteringen noodzakelijk. Daarom is het raadzaam het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte gelijktijdig te implementeren. Hierdoor kunnen de consequenties van het introduceren van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte en de consequenties van het invoeren van de nieuwe normering gelijktijdig worden aangepakt. Dit voorkomt dat door verschillende veranderingen kort na elkaar dijkversterkingen voor een zelfde dijktraject nodig zijn. Tevens wordt voorkomen dat maatregelen in verband met een wijziging kleiner hadden kunnen zijn als gevolg van de andere wijziging.

Per saldo zal het invoeren van stabiliteitsanalyses op basis van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte niet leiden tot een grotere versterkingsopgave en de daarmee gemoeide financiële consequenties. Door het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte zal meer een verschuiving in toetsresultaten optreden dan een verslechtering. Door de betere gedragsbeschrijving van de grond worden onterechte goedkeuringen en afkeuringen van dijken terug gedrongen. Hierdoor is sprake van een doelmatiger inzet van de financiële middelen.

Kosten veld- en laboratoriumonderzoek

Het introduceren van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte brengt met zich mee dat moet worden geïnvesteerd in grondmechanisch onderzoek. De schuifsterkteparameters waarover de waterkeringbeheerders beschikken zijn veelal niet geschikt voor toepassing bij het nieuwe materiaalmodel. In deel 3 van het beslisdocument is hierop uitgebreid ingegaan.

Bij het inwinnen van nieuwe schuifsterkteparameters is het van belang efficiënt te werken. Dit kan door de toetsing te beginnen met standaard waarden voor de schuifsterkteparameters die door het WTI beschikbaar zullen worden gesteld en vervolgens grondmechanisch onderzoek te doen waar dit nodig blijkt te zijn. Op basis van de eerste tussenresultaten van de toetsing kan worden bezien voor welke dijkvakken grondmechanisch onderzoek moet worden uitgevoerd. Bij het uitvoeren van nader onderzoek kan van grof naar fijn worden gewerkt, zoals bij de toetsing gebruikelijk is en zoals in deel 3 van het beslisdocument is aangegeven met betrekking tot het inwinnen van schuifsterkteparameters.

Een andere mogelijkheid om efficiënt te werken bij het inwinnen van nieuwe schuifsterkteparameters is het samen werken met andere waterkeringbeheerders. Tot nu toe is het gebruikelijk dat waterkeringbeheerders zelfstandig alle benodigde grondmechanische gegevens verzamelen. Voor regionale waterkeringen is STOWA recent begonnen een dergelijke samenwerking op te zetten. Door samen te werken kan de omvang van het grondmechanisch onderzoek worden beperkt. Nederland bestaat uit een aantal geologische deelgebieden (o.a. kust, rivierengebied, Maasdal en veenweidegebied). Binnen deze geologische deelgebieden komen overal dezelfde typen afzettingen en grondsoorten voor. In elk van deze deelgebieden liggen meerdere waterschappen. Deze waterschappen kunnen gezamenlijk een proevenverzameling van schuifsterkteparameters opbouwen, die in alle



dijkkringgebieden binnen het geologische deelgebied kan worden toegepast. Als het gaat om het opstellen van correlaties tussen de sondeerweerstand en resultaten van laboratoriumonderzoek (zie deel 3) kunnen ervaringen die hiermee worden opgedaan ook worden uitgewisseld. Bij het samenwerken van waterkeringbeheerders is het uiteraard van groot belang dat alle betrokkenen dezelfde procedures en kwaliteitseisen toepassen. Alleen onder deze voorwaarde kan informatie worden uitgewisseld en gecombineerd en zal de samenwerking kunnen slagen. Voor grondmechanisch laboratoriumonderzoek is door STOWA en Deltares een protocol opgesteld, dat hierbij behulpzaam is. Dit protocol is door ENW-Techniek geaccordeerd in 2011.

Op basis van de resultaten van de consequentie-analyse is de inschatting dat voor enkele honderden kilometers primaire waterkering grondmechanisch onderzoek nodig is om de toetsing met het nieuwe materiaalmodel volledig te kunnen uitvoeren. De kosten van dit grondmechanisch onderzoek zullen in de orde van grootte van 10 miljoen euro bedragen voor alle waterkeringbeheerders samen. Hierbij is er van uitgegaan dat de keringbeheerders informatie uitwisselen. De kosten voor het grondmechanisch onderzoek kunnen een factor twee of meer hoger liggen wanneer geen informatie wordt uitgewisseld tussen beheerders.

De genoemde kosten voor het benodigde grondmechanisch onderzoek zijn beperkt te noemen. De kosten zijn slechts een fractie van de kosten van dijkversterkingswerken of de economische schade van een overstroming. Daarnaast is het inwinnen van nieuwe grondmechanische gegevens ook een goede gelegenheid om kwalitatief goede gegevens te verzamelen. Dat vergroot de betrouwbaarheid van de stabiliteitsanalyses en zorgt ervoor dat toetsresultaten van verschillende keringbeheerders vergelijkbaar zijn. Dit zal zeker het geval zijn wanneer keringbeheerders samenwerken bij het uitvoeren van grondmechanisch onderzoek.

Ad II: Wat betekent de overgang voor lopende uitvoeringsprogramma's?

De introductie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is ook van belang voor de diverse lopende uitvoeringsprogramma's, zoals Ruimte voor de Rivier, Maaswerken en HWBP.

Ruimte voor de Rivier

In het kader van het Ruimte voor de Rivier-project krijgen de grote rivieren op meer dan 30 plaatsen meer ruimte. Binnen dit project worden ook dijken verbeterd en verlegd. Dit project moet in 2015 worden afgerond. Dit project is al in een ver gevorderd stadium, zodat de introductie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte niet meer inpasbaar is in het project. Het is als gevolg hiervan niet uit te sluiten dat enkele dijkvakken die in het kader van het Ruimte voor de Rivier-project zijn versterkt, op korte of middellange termijn zullen worden afgekeurd bij de toetsing. Dit zal voor een belangrijk deel ook afhangen van de nieuwe overstromingskansnorm die voor de betreffende dijkvakken zal gaan gelden.

Maaswerken

Rijkswaterstaat werkt met het project Maaswerken tot 2020 aan de Maas. In totaal vinden 52 projecten plaats. Op een aantal locaties is door de aanleg en verhoging van kaden een betere bescherming gerealiseerd. Deze deelprojecten zijn al afgerond. Aanpassing van de plannen op basis van analyses met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is binnen dit project niet meer mogelijk. Ook voor dit project kan niet worden uitgesloten dat recent gerealiseerde kadeversterkingen op korte of middellange termijn moeten worden afgekeurd bij

de toetsing. Ook voor deze kadevakken zal de nieuwe overstromingskansnorm echter in belangrijke mate medebepalend zijn voor het goed- of afkeuren bij de toetsing.

HWBP-2

In het kader van HWBP-2 vinden een groot aantal dijkversterkingswerken plaats. De verwachting is dat 84 van de 88 projecten van het HWBP-2 in 2017 afgerond zijn. Voor vijf projecten is meer tijd nodig. Een van deze projecten is het dijktraject Hoorn – Amsterdam, waar het project Dijken op Veen wordt uitgevoerd. In de volgende paragraaf wordt hierop ingegaan. De Rijksoverheid en waterkeringbeheerders houden de planning van de HWBP-2 projecten nauwlettend in de gaten en spannen zich in om de waterkeringen zo snel mogelijk op orde te brengen. Aanpassing van de dijkversterkingsplannen op basis van analyses met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte is voor enkele dijktrajecten wellicht nog mogelijk, maar zal ernstige consequenties hebben voor de planning van het project HWBP-2. Gevolg van het niet in rekening brengen van ongedraineerd grondgedrag bij de dijkversterkingsontwerpen kan zijn dat deze dijkvakken op korte of middellange termijn moeten worden afgekeurd bij de toetsing. Of dit daadwerkelijk nodig zal zijn, hangt ook af van de nieuwe overstromingskansnorm die voor de betreffende dijkvakken zal gaan gelden.

(n)HWBP

De huidige opgave voor het (nieuwe) Hoogwaterbeschermingsprogramma bestaat uit het treffen van maatregelen aan 731 kilometer primaire waterkering (dijken). Het aantal dijkvakken dat in het kader van het nieuwe HWBP programma moet worden versterkt vanwege onvoldoende sterkte voor macrostabiliteit is omvangrijk. Binnen de totale opgave van het HWBP speelt het faalmechanisme macrostabiliteit bij 287 kilometer waterkering. Aan een flink deel van deze waterkeringen is een hoge urgentie toegekend. Deze dijkvakken zullen als eerste worden aangepakt. Dit betreft een aantal dijkvakken met een totale lengte van 69,5 kilometer. De kosten hiervan bedragen 815,5 miljoen euro.

Onderzoek voor het ontwerpen van de dijkversterkingen start in 2014 en 2015. Dit betekent dat er nog tijd is om nieuwe kennis toe te passen.

Er wordt over gesproken om een Projectoverstijgende Verkenning (POV) Macrostabiliteit op te starten. De POV Macrostabiliteit kan worden benut om de nieuwe kennis over macrostabiliteit toe te passen bij het ontwerpen van dijkversterkingen en om de aanpak voor het benodigde grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek verder uit te werken samen met de betrokken waterschappen. Verder kan in het kader van de POV Macrostabiliteit de scope van de projecten worden aangescherpt op basis van de nieuwe kennis. Hierbij kan worden gedacht aan het inzetten van onder andere veld- en laboratoriumonderzoek, probabilistische analyses en bewezen sterkte analyses. Het nader bepalen van de scope op basis van de nieuwe kennis is gewenst om onnodige dijkverbeteringswerken te voorkomen en voldoende maatregelen te nemen waar het meer nodig is.

Voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma kan de overstap op het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte grote gevolgen hebben. Naar aanleiding van de resultaten van de consequentie-analyse betreft dit naar verwachting niet in de eerste plaats de kosten, maar vooral de scope van de dijkversterkingsprojecten. De overstap op het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte kan ook leiden tot een andere prioritering van dijktrajecten. De omvang van de versterkingsmaatregelen zal naar verwachting gemiddeld genomen vergelijkbaar zijn met wat op basis van de huidige rekenmethode nodig is, maar per locatie

kunnen er verschillen zijn. Een en ander zal ook afhangen van de nieuwe overstromingskansnorm die voor de betreffende dijkvakken zal worden vastgesteld.

Wanneer het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte in het WTI 2017 wordt geïmplementeerd, is het van belang dat deze rekenmethode ook wordt toegepast bij HWBP-projecten. Dit voorkomt eventuele afkeuringen van recent versterkte dijktrajecten bij de toetsing.

Ad III: Wat is de relatie met andere ontwikkelingen?

De introductie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in het WTI 2017 heeft ook een relatie met andere ontwikkelingen.

Dijken op Veen

'Dijken op Veen' is een onderzoeksproject dat Deltares in opdracht van en in samenwerking met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en Rijkswaterstaat uitvoert. Het onderzoek heeft als doel om een aangepaste rekenmethodiek te ontwikkelen, specifiek voor het dijkversterkingstraject Hoorn – Amsterdam van de Markermeerdijken. In dit dijkversterkingsproject is macrostabiliteit het belangrijkste faalmechanisme. Het onderzoek naar het gedrag van veen in relatie tot macrostabiliteit zal mogelijk leiden tot goedkopere en minder ingrijpende maatregelen.

In het Dijken op Veen project en voor WTI macrostabiliteit wordt op dezelfde manier omgegaan met de karakterisering van het gedrag van veen. In de praktische uitwerking van de parameterbepaling zijn er verschillen. Bij het Dijken op Veen project wordt de ongedraineerde schuifsterkte bepaald op basis van sonderingen en correlaties met laboratoriumonderzoek. Bij WTI macrostabiliteit wordt de grensspanning bepaald op basis van sonderingen en correlaties met laboratoriumonderzoek. Daarnaast wordt de ongedraineerde schuifsterkte ratio bepaald uit laboratoriumonderzoek. De werkwijze van het Dijken op Veen project betreft geavanceerd onderzoek dat in het WTI in de toets op maat kan worden toegepast. De getrapte aanpak die in het WTI wordt toegepast, past bij het werken van grof naar fijn, dat bij toetsen gebruikelijk is.

Regionale waterkeringen

In de vierde Nota Waterhuishouding heeft het Rijk vastgelegd dat provincies en waterschappen de regionale waterkeringen 'op orde' moeten brengen. Dit betekent dat de keringen in 2020 moeten voldoen aan vooraf opgestelde veiligheidsnormen. Om de provincies en waterschappen te helpen de gestelde doelen te bereiken hebben het Interprovinciaal Overleg (IPO) en de Unie van Waterschappen het Ontwikkelingsprogramma Regionale Waterkeringen (ORK) gestart. STOWA voert de regie over de uitvoering van dit programma. In het ORK-programma ontwikkelt STOWA praktische leidraden en handreikingen voor het normeren, toetsen, verbeteren en beheren van de keringen.

In het kader van het ORK-programma heeft STOWA in 2013 de consequenties van het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in macrostabiliteitsanalyses voor boezemkaden onderzocht. Hiervoor zijn door zes waterschappen case-studies gedaan. De uitwerking van de cases is verzorgd door de betrokken waterschappen, met ondersteuning van diverse ingenieursbureaus. Deltares heeft het onderzoek begeleid. Ten opzichte van primaire keringen is bij boezemkaden vaak sprake van betrekkelijk lage effectieve spanningen. Vanwege dit verschil zijn de consequenties van het toepassen van deze nieuwe toetsmethode voor macrostabiliteit specifiek voor boezemkaden onderzocht.

De consequentie-analyse geeft aan dat de macrostabiliteit van boezemkaden veelal gunstiger wordt beoordeeld met het nieuwe materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte (Van Duinen en Van Hemert, 2013). Bij toepassing van dit materiaalmodel zijn daardoor in de toekomst wellicht minder kadeversterkingen nodig. Een en ander wordt nog nader uitgewerkt door STOWA, waarbij ook rekening wordt gehouden met de ontwikkelingen bij de primaire waterkeringen.

Het huidige ORK-programma loopt tot eind 2014 en dit jaar wordt gebruikt worden om de lopende onderzoeken af te ronden en energie te steken in het opstellen van een nieuwe leidraad Toetsen op veiligheid regionale waterkeringen.

Conclusies

In de voorliggende notitie is ingegaan op de vraag of de nieuwe voorschriften van het WTI onderdeel macrostabiliteit met betrekking tot het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte beleidsmatig acceptabel zijn. Daarbij zijn achtereenvolgens de volgende punten aan de orde gesteld:

- I. Wat zijn de financiële consequenties van implementatie?
- II. Wat betekent de overgang voor lopende uitvoeringsprogramma's?
- III. Wat is de relatie met andere ontwikkelingen?

Ten aanzien van de financiële consequenties van de implementatie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte wordt op basis van de resultaten van de consequentie-analyse verwacht dat de beoordeling van het faalmechanisme macrostabiliteit met dit materiaalmodel gemiddeld genomen ongeveer tot dezelfde uitkomsten zal leiden als de vigerende werkwijze met effectieve spanningsanalyses. Per locatie zijn wel grote verschillen tussen beide werkwijzen mogelijk. Dit betekent dat dijken die met de vigerende werkwijze zijn goedgekeurd met het nieuwe materiaalmodel in sommige situaties zullen worden afgekeurd. In andere gevallen zullen dijken die met de vigerende werkwijze zijn afgekeurd met het nieuwe materiaalmodel kunnen worden goedgekeurd. Gemiddeld genomen is de overstap budget neutraal.

Door het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte wordt het werkelijke grondgedrag beter benaderd. Door het introduceren van het nieuwe materiaalmodel wordt onterecht goedkeuren of afkeuren van dijken terug gedrongen. Dit leidt tot meer veiligheid op de plaatsen waar het echt nodig is. Dit betekent een afname van de kans op overstroming. De opbrengst van het voorkomen van een potentiële overstroming is groot, omdat de economische schade als gevolg van een overstroming heel groot is. Daarnaast voorkomt het onterecht afkeuren van dijken onnodige dijkversterkingen. Per saldo zal het invoeren van stabiliteitsanalyses op basis van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte leiden tot een doelmatiger inzet van de financiële middelen. Door de kwalitatief betere beoordelingen van macrostabiliteit van dijken door het toepassen van kennisontwikkelingen, neemt de kwaliteit van de waterkeringen toe, terwijl de kwantiteit van dijkversterkingswerken gemiddeld genomen niet zal toenemen.

Hierbij kan nog worden opgemerkt dat er in toetslaag 2b en 3 verschillende mogelijkheden voor optimalisatie van de beoordeling van de macrostabiliteit zijn ten opzichte van de consequentie-analyse. Voor dijken waar een stabiliteitsbeoordeling met het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in eerste instantie tot afkeuring leidt, kan vervolgonderzoek



tot een scherpere beoordeling leiden. Hierbij kan worden gedacht aan grondmechanisch onderzoek met lokale correlaties tussen de sondeerweerstand en laboratoriumresultaten, probabilistische stabiliteitsanalyses, bewezen sterkte analyses en monitoring van het gedrag van de waterkering om het gedrag en de sterkte van de waterkering scherper vast te stellen. Naar verwachting leidt dit onderzoek tot een gunstiger beeld dan de consequentie-analyse geeft. Een groot deel van het hier genoemde onderzoek kan voor 2023 worden afgerond, indien de toetsing wordt opgestart in 2017. Voor monitoring is meer tijd nodig.

Implementatie van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte heeft wel financiële consequenties vanwege het inwinnen van nieuwe grondmechanische gegevens. De beschikbare gegevens zijn veelal niet geschikt voor toepassing bij het nieuwe materiaalmodel. De kosten voor het inwinnen van nieuwe gegevens voor het toetsen van de primaire waterkeringen zijn geraamd op 10 miljoen euro voor alle waterkeringbeheerders samen. Deze kosten kunnen relatief laag worden gehouden door van grof naar fijn te werken en door samen te werken met andere waterkeringbeheerders.

De overgang naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte heeft gevolgen voor lopende uitvoeringsprogramma's. Dit betreft met name het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Gemiddeld genomen wordt geen grotere opgave aan dijkversterkingswerken verwacht, gezien de resultaten van de consequentie-analyse. Vanwege de implementatie van het nieuwe materiaalmodel is het wel te overwegen de scope van het lopende programma opnieuw te bepalen. Hierbij zullen de nieuwe overstromingskansnormen uiteraard ook zeer bepalend zijn. Het opnieuw bepalen van de scope kan grote organisatorische en bestuurlijke consequenties hebben. Het aanscherpen van de scope zal echter leiden tot investeringen in dijkversterkingen op die locaties waar het vanuit het oogpunt van veiligheid meer nodig is. Wanneer het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte in het WTI 2017 wordt geïmplementeerd, is het van belang dat deze rekenmethode ook wordt toegepast bij HWBP-projecten. Dit voorkomt eventuele afkeuringen van recent versterkte dijktrajecten bij de toetsing.

Bij de overgang naar het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte zijn er raakvlakken met het Dijken op Veen project en met het Ontwikkelingsprogramma Regionale Waterkeringen (ORK). In het Dijken op Veen project wordt in essentie met hetzelfde materiaalmodel gewerkt als voor WTI macrostabiliteit. In de wijze van parameterbepaling zijn er verschillen. Het Dijken op Veen project volgt een geavanceerdere werkwijze. Deze werkwijze van Dijken op Veen kan ook in de Toets op maat worden toegepast.

In het ORK-programma ontwikkelt STOWA praktische leidraden en handreikingen voor het normeren, toetsen, verbeteren en beheren van de keringen. In het kader van dit programma heeft STOWA in 2013 de consequenties van het toepassen van het materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte in macrostabiliteitsanalyses voor boezemkaden onderzocht. De consequentie-analyse resulteerde in het beeld dat de macrostabiliteit van boezemkaden veelal gunstiger kan worden beoordeeld met het nieuwe materiaalmodel met ongedraineerde schuifsterkte. Een en ander wordt nog nader uitgewerkt door STOWA, waarbij ook rekening wordt gehouden met de ontwikkelingen bij de primaire waterkeringen.



Datum
11 juli 2014

Ons kenmerk
1209434-006-GEO-0007

Pagina
62/62

Referenties

Duinen, T.A. Van, en Van Hemert, H. (2013). Stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte voor regionale waterkeringen. Geotechniek. December 2013.

Jongejan, R.B., Van Duinen, A., Kuiper, B., Vastenburg, E. (2013). WT12017: Beoordeling macrostabiliteit met ongedraineerd materiaalmodel: Probabilistische beschouwing en voorlopige veiligheidsfactoren. Deltares. 1207808-001-GEO-0004.