



ir. Niels Walrave
Royal HaskoningDHV



ing. Rimmer Koopmans
Arcadis



dr. Inge van Gelder
Inpijn Blokpoel ingenieurs



dr. ir. Cor Zwanenburg
TU Delft/Deltares

EEN EXPERIMENTELE STUDIE NAAR DE INVLOED VAN INITIEEL ONVERZADIGDE KLEI OP DE MACROSTABILITEIT VAN RIVIERDIJKEN

Inleiding & Probleemstelling

In Nederland wordt momenteel bij de stabiliteitsbeoordeling van dijken geen rekening gehouden met onverzadigd grondgedrag. Volgens de vigerende ontwerprichtlijn wordt er voor het gedeelte van het dijklichaam boven de grondwaterstand geen positieve, maar ook geen negatieve waterspanning meegenomen in de beoordeling. Als grond niet volledig verzadigd is, kan er negatieve waterspanning optreden. Hoewel in de volksmond hiervoor geregeld de term zuigspanning gebruikt wordt, zal in dit artikel voor de Nederlandse vertaling van 'matric suction' negatieve waterspanning worden gebruikt. Zowel in het gedeeltelijk verzadigde dijklichaam als in de top van de deklaag kunnen negatieve waterspanningen aanwezig zijn. De sterkte van de ondergrond kan hierdoor toenemen en dit verbetert de stabiliteit van de dijk. Door seizoensinvloeden zou dit effect in de zomer sterker kunnen zijn dan in de winter. Daarnaast kan de infiltratie van rivierwater gedurende een hoogwatersituatie een reducerend effect hebben op de aanwezige negatieve waterspanning. Geotechnisch veldonderzoek voor de beoordeling van geotechnische parameters wordt

over het algemeen uitgevoerd in de zomer, wanneer de negatieve waterspanningen hoog kunnen zijn, wat kan leiden tot een overschatting van de sterkte van de grond tijdens hoogwatercondities. De afgelopen jaren zijn de zomers in Nederland relatief droog geweest en die zouden dit effect als zodanig kunnen versterken. Lopend onderzoek naar de initieel onverzadigde zone in Oost-Nederland (Van Duinen, 2020; Buiten, 2020) heeft uitgewezen dat dit onverzadigde effect mogelijk pas in het volgende voorjaar volledig verdwijnt. Als gevolg hiervan zou het mogelijk zijn dat tijdens een maatgevende gebeurtenis extra sterkte, geleverd door de negatieve waterspanningen als gevolg van onverzadigde omstandigheden, aanwezig blijft.

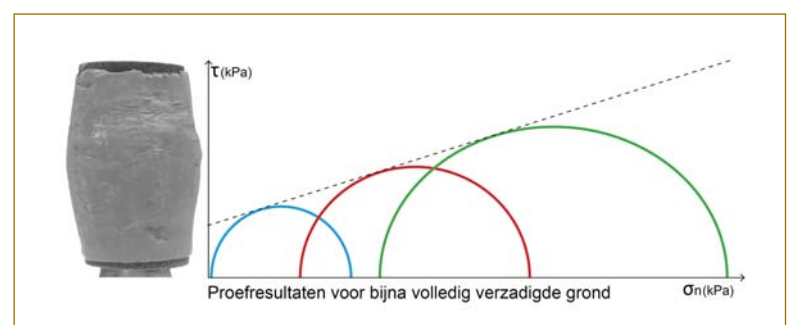
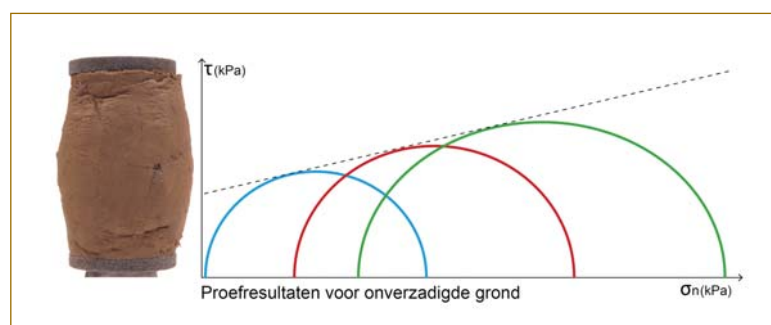
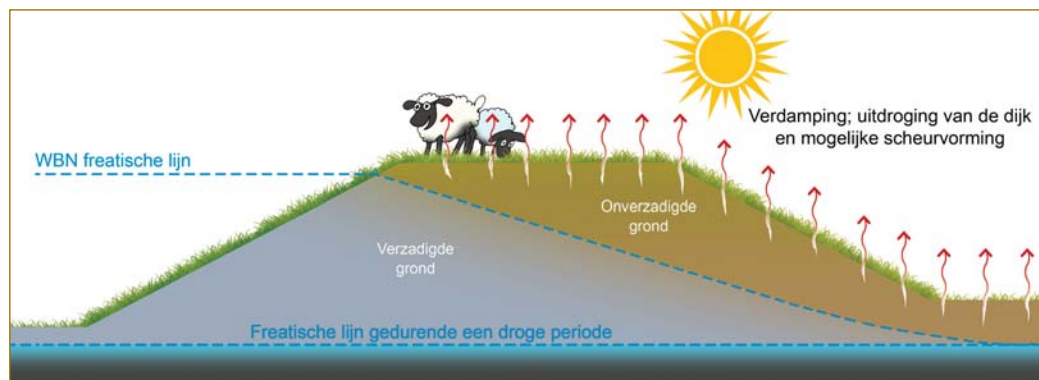
Dit artikel gaat dieper in op bovenstaand probleem en tracht dit op te lossen:

1. door het bepalen van onverzadigde geotechnische sterkteparameters met behulp van conventionele laboratoriumproeven die beschikbaar en gangbaar zijn in Nederland, en
2. door te laten zien welke orde van grootte het onverzadigd gedrag op de stabiliteit van dijken heeft.

Dit artikel focust zich op de beantwoording van deze vragen voor de initieel onverzadigde zone van een kleiige rivierdijk in Oost-Nederland in het traject Ravenstein-Lith, maar in principe kan het overal met een vergelijkbare bodemopbouw toegepast worden.

Laboratoriumproeven op onverzadigde grond

Normaliter zouden voor het uitvoeren van onverzadigde geotechnische laboratoriumproeven aanpassingen nodig zijn aan de proefopstelling om het verloop van de luchtdruk en het luchtvolume te kunnen meten. Dit is nodig om de ontwikkeling van de negatieve waterspanning gedurende de proef in kaart te kunnen brengen. In Nederlandse geotechnische laboratoria zijn deze aanpassingen momenteel niet voorhanden. De Suction Stress Characteristic Curve (SSCC), zoals geformuleerd door Lu en Likos (2006) en nader toegelicht in de volgende paragraaf, is in dit onderzoek toegepast om met conventionele geotechnische laboratoriumproeven onverzadigde sterkteparameters te bepalen. Het belangrijkste voordeel van het gebruik van dit concept is dat er relatief weinig aanpassingen nodig zijn aan de huidige proefprocedures (NEN-EN-ISO 17892-9, 2018; Greeuw et al., 2016) voor geotechnisch onderzoek naar sterkteparameters van dijken in Nederland. Tot op heden is dit concept in de internationale literatuur niet toegepast op de in Nederland veelgebruikte conventionele geotechnische laboratoriumproef voor dijkontwerp: de K0-Consolidated Anisotropic Undrained (K0-CAU) triaxiaalproef. Met deze proef wordt geprobeerd de in-situ spannings-toestand in een dijk het best te benaderen.



Figuur 1 – Conceptueel overzicht van de verzadigde en de (deels) onverzadigde zone gedurende een WBN situatie.

Dit artikel beschrijft het resultaat van een experimentele studie naar de invloed van de initieel onverzadigde zone op de macrostabiliteit van een kleiige rivierdijk in het kader van een masterscriptie aan de TU Delft. Door middel van de Suction Stress Characteristic Curve is het mogelijk om onverzadigde K0-CAU proeven uit te voeren op de gangbare triaxiaalproefopstellingen in Nederlandse geotech-

nische laboratoria. Dit draagt bij aan de kennis over de onverzadigde zone en in de toekomst zou er wellicht extra sterkte toegekend kunnen worden aan deze zone, die nu nog niet benut wordt, en zou het kunnen leiden tot meer grip op de actuele sterkte van een dijk gedurende een hoogwatersituatie.

Theoretische achtergrond van de SSCC

Voor verzadigde grond geldt de klassieke definitie van effectieve spanning van Terzaghi (effectieve spanning = totaalspanning – waterspanning); $\sigma' = \sigma - u_w$. In onverzadigde grond zijn de poriën niet alleen gevuld met water, maar ook deels met lucht. Om het effect van de onverzadigde toestand te beschrijven is er een variabele nodig die hier iets over zegt. Bishop heeft dit gedaan met een factor die afhangt van de verzadigingsgraad. Het is echter niet eenvoudig om deze factor te bepalen, aangezien deze niet uniek is. Dit komt omdat er een hysteresis effect zit in de karakteristieke curve van het bodemwater, bekend als de Soil Water Characteristic Curve (SWCC). De SWCC beschrijft de relatie tussen het volumetrische watergehalte en de negatieve waterspanning in de grond.

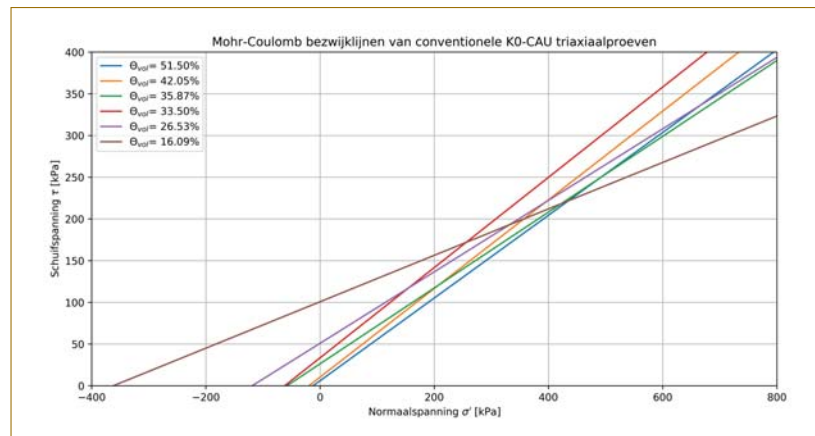
Onverzadigde geotechnische laboratoriumproeven op cohesief materiaal, zoals klei, zijn tijdrovend, omdat er een evenwichtstoestand moet worden bereikt tussen de water- en de luchtdruk voor een gegeven negatieve waterspanning. Lu en Likos (2006) introduceerden met het SSCC concept een effectieve spanningsframework die geldt voor variabel verzadigde grond. De variërende spanning tussen de deeltjes kan worden beschreven met behulp van het concept van suction stress (in dit artikel zal hiervoor de term zuigspanning worden aangehouden). Deze spanning is volgens Lu en Likos (2006) het resultaat van zowel fysieke als chemische verschijnselen:

1. Van der Waals aantrekking,
2. elektrochemische dubbel-laagse afstoting en aantrekking,
3. oppervlaktespanning,
4. negatieve poriewaterdruk en
5. chemische binding.

De SSCC maakt het mogelijk om een conventionele laboratorium-opstelling te gebruiken om de onverzadigde sterkte van een grondsoort te karakteriseren als een functie van de zuigspanning. Daarnaast is dit concept gevalideerd door middel van echte onverzadigde testresultaten tot 15 MPa aan matric suction (Lu et al., 2010).

De SSCC is gebaseerd op de Van Genuchten-Mualem vergelijking van de SWCC en het verschil tussen beiden ligt in de negatieve waterspanning. Lu en Likos (2006) hebben de vergelijking van Bishop aangepast zodat de effectieve spanningsrelatie beschreven kan worden als volgt:

Figuur 2 – Mohr-Coulomb lijnen bepaald voor monsters beproefd met verschillende volumetrische watergehaltes waarbij het monster van nature volledig verzadigd is bij watergehalte, $\theta = 51.50\%$.



$$\sigma' = \sigma - u_a - \sigma^s \quad (1)$$

Waarin σ' de effectieve spanning is, σ de totaal spanning, u_a de luchtdruk in de poriën en σ^s de negatieve waterspanning. Volgens Lu en Godt (2013) kan de zuigspanning die hoort bij een bepaald watergehalte bepaald worden met de effectieve cohesie, c' , en de effectieve wrijvingshoek, ϕ' , zoals die bepaald kan worden met behulp van Mohr cirkels (zie vergelijking 2). Dit houdt in dat er geen plaats is voor intrinsieke cohesie van een grondsoort.

$$\sigma^s = -\frac{c'}{\tan\phi'} \quad (2)$$

Het Mohr-Coulomb criterium kan hierdoor herschreven worden tot:

$$\tau_f = \sigma' \tan\phi' = (\sigma - u_a - \sigma^s) \tan\phi' \quad (3)$$

Met deze vergelijkingen kan de zuigspanning bepaald worden. De zuigspanning wordt bepaald door het snijpunt van de lijn met de negatieve x-as in figuur 2. Merk op dat indien een virtuele lijn geplot wordt bij $x=0$, de effectieve cohesie conform de theorie inderdaad toeneemt bij steeds drogere monsters. Elke lijn is bepaald op basis van 3 tot 6 proeven afhankelijk van het volumetrisch watergehalte.

Voor de bovenstaande methode is een groot aantal proeven benodigd. Echter is er ook een expliciete relatie van de SSCC geformuleerd door Lu et al. (2010). Daardoor is het mogelijk om de juistheid van de K0-CAU proefresultaten te verifiëren op basis van alleen de Van Genuchten-Mualem parameters van de grondsoort:

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} \left(S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{voor } 0 \leq S_e \leq 1 \quad (4)$$

In deze vergelijking is S_e de effectieve verzadigingsgraad, α en n zijn de empirisch bepaalde Van Genuchten-Mualem parameters. De effectieve verzadigingsgraad kan bepaald worden door:

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

Hierin zijn θ_w het volumetrisch watergehalte, θ_r het residuele watergehalte (waarbij de grote, relevante poriën leeg zijn, maar de microporiën nog gevuld zijn) en θ_s het verzadigde watergehalte. In dit artikel zijn voor $\theta_r = 8,6216 \cdot 10^{-11}$ en $\theta_s = 0,5266$ aangehouden.

Resultaten van de K0-CAU proeven

In de tweede fase van dit onderzoek is geotechnisch laboratoriumonderzoek uitgevoerd op relatief siltige kleimonsters, ook bekend als 'zware klei' en 'transitional soil' (i.e. Ponzoni et al, 2014; IenW, 2019), uit het dijktraject Ravenstein-Lith in het noordoosten van de provincie Noord-Brabant. In de literatuur zijn testprocedures met het SSCC-concept nauwelijks gepubliceerd en daarom moest voor dit type proef een testprocedure worden ontwikkeld en geverifieerd. Er is vastgesteld dat dit concept, bij het bepalen van sterkteparameters, met behulp van strain compatibility met succes kan worden toegepast op K0-CAU triaxiaalproeven en goede resultaten oplevert. Voor dit type klei toonde strain compatibility aan dat geotechnische sterkteparameters kunnen worden bepaald bij 10% axiale rek in plaats van bij 25% zoals voorgeschreven door de richtlijnen voor het beoordelen van macrostabiliteit (IenW, 2019). Vergelijken met een conventionele K0-CAU triaxiaalproef, dient de verzadigingsfase overgeslagen te worden. De te beproeven monsters dienen lucht gedroogd te zijn onder laboratoriumomstandigheden tot een

voorgescreven volumetrisch watergehalte. De resultaten van deze proeven zijn te zien in figuur 2. In dit figuur zijn de Mohr-Coulomb lijnen afgebeeld zoals die bepaald zijn voor elke set proeven met een uniek volumetrisch watergehalte. Voor elke lijn worden de Mohr Cirkels geplott zoals weergegeven in figuur 3 en vervolgens wordt hier de Mohr-Coulomb lijn aan bepaald.

Het volumetrisch watergehalte kan vervolgens gekoppeld worden aan een mate van negatieve waterspanning met behulp van de SWCC. Om deze bewering verder te onderbouwen dat het SSCC-concept met succes kan worden toegepast op K0-CAU triaxiaalproeven, werden de experimentele resultaten vergeleken met de resultaten die verwacht werden op basis van de gesloten vorm van de SSCC (Lu et al., 2010). Deze resultaten zijn te zien in figuur 4 en de resultaten komen goed overeen met de experimenteel bepaalde waarden uit de triaxiaalproeven. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat onverzadigde geotechnische sterkteparameters bepaald kunnen worden met behulp van de conventionele K0-CAU laboratoriumapparatuur in samenwerking met het SSCC-concept en rekcompatibiliteit.

In Nederland is de veiligheidsfilosofie voor de beoordeling van waterkeringen gebaseerd op

'Critical State Soil Mechanics' (CSSM). Volgens CSSM kan cohesie alleen optreden als een monster overgeconsolideerd is. Dit betekent dat het nog niet voldoende rek heeft ondergaan om de critical state te bereiken. In de SSCC is de effectieve cohesie gedefinieerd als de som van de schijnbare cohesie (ten gevolge van negatieve waterspanningen) en de cohesie die aanwezig is bij volledig verzadigde toestand. De proefresultaten op monsters bij critical state bij 10% rek zijn weergegeven in figuur 5. Daaruit kan echter geobserveerd worden dat er een cohesie van 4,8 kPa optreedt in volledig verzadigde toestand. Alhoewel dit mogelijk een aanknopingspunt is voor een discussie over de positie van transitional soils in het CSSM framework, is hier op dit moment geen eenvoudige verklaring voor te vinden in de literatuur (i.e. Ponzoni et al., 2014; Ponzoni et al., 2017). Om de proefresultaten consistent te houden met CSSM (en dus toegepast kunnen worden in D-Stability) wordt de curve in figuur 5 gecorrigeerd met de cohesie die optreedt in volledig verzadigde toestand. Dit resulteert in figuur 6 waar de schijnbare cohesie ten gevolge van uitdroging is weergegeven. Tevens is hier het volumetrisch watergehalte, θ_w , omgerekend naar een gravimetrisch watergehalte, w , door middel van $\theta_s = w * \frac{\rho_d}{\rho_w}$ waarbij ρ_d de bulkdichtheid (massa van de droge stof/de originele dichtheid) en ρ_w

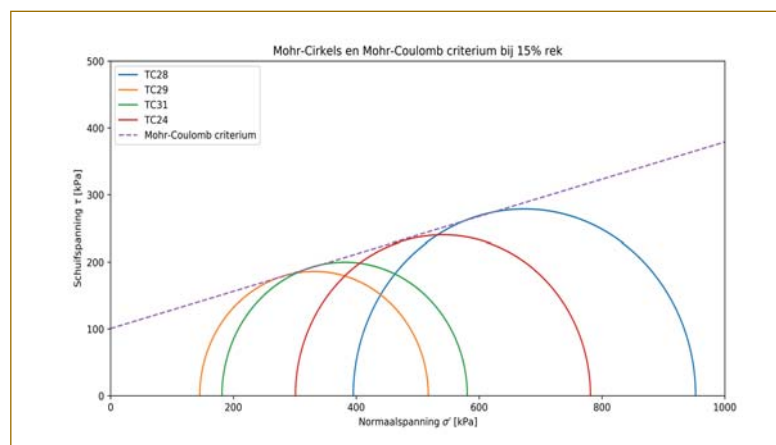
de dichtheid van water is. Dit is gedaan omdat het relatief eenvoudig is om in het veld en in het laboratorium een gravimetrisch watergehalte te bepalen via metingen en daardoor zou deze figuur als ontwerpgrafiek kunnen dienen.

In figuur 5 en 6 is een stippelijntje geplott. Deze lijn komt overeen met de maximaal gemeten waarde in het veld in dit dijktraject door Van Duinen (2020). Er dient opgemerkt te worden dat dit de maximale waarde was wat de meetapparatuur kon registreren. Het is niet ondenkbaar dat de daadwerkelijke negatieve waterspanning in een gedeelte van de dijk hoger had kunnen zijn.

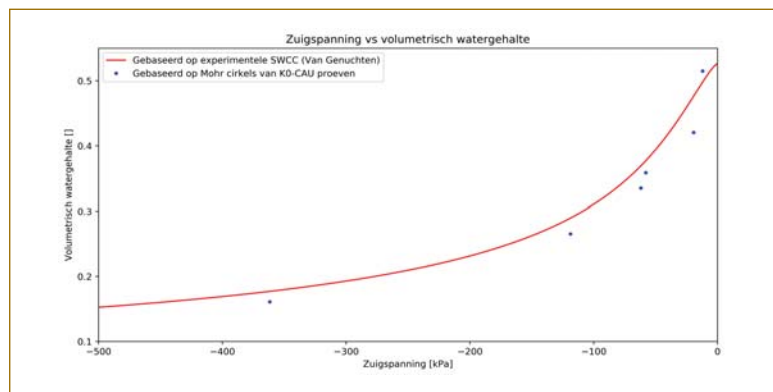
De invloed van de initieel onverzadigde zone op de stabiliteit van een dijk

In het kader van een casus zijn de verkregen proefresultaten verwerkt in een representatieve doorsnede uit het dijktraject Ravenstein-Lith. De doorsnede die hiervoor gebruikt is (zie figuur 7), is gemaakt voor het lopende dijkversterkingsprogramma conform de huidige ontwerprijlijnen. Indien rekening wordt gehouden met de extra sterkte door de initieel onverzadigde zone, kan dit een positief effect hebben op de veiligheidsfactor.

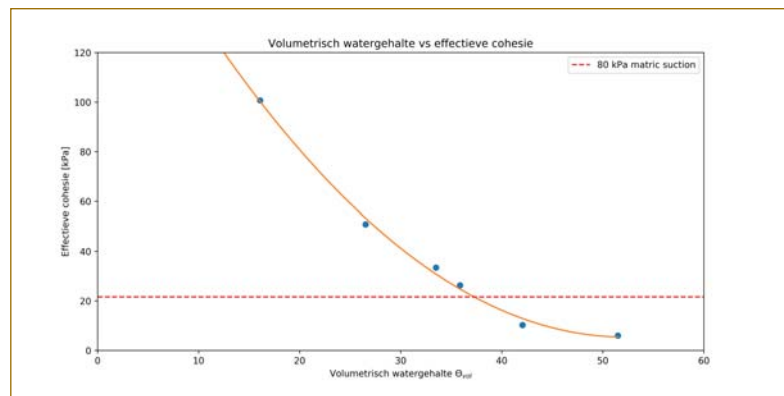
Op basis van de veldmetingen van Van Duinen (2020) en Calabresi et al. (2013), is een conserva-



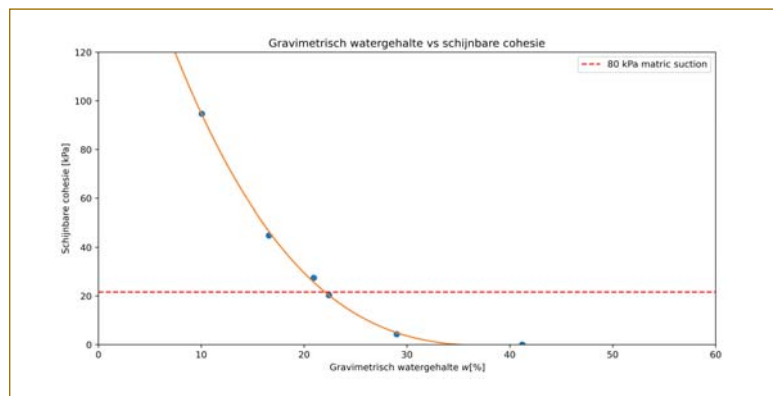
Figuur 3 – Voorbeeld van de Mohr-Coulomb lijn die aan de proefresultaten van K0-CAU triaxiaalproeven gefit is bij de proeven die uitgevoerd zijn bij een volumetrisch watergehalte van 16,09%.



Figuur 4 – SSCC gebaseerd op basis van de triaxiaalproefresultaten (in blauw) en de SSCC gebaseerd op de SWCC parameters (in rood). N.B. 1 blauw datapunt is de resultante van alle individuele proeven op hetzelfde volumetrische watergehalte weergegeven in figuur 3. Tevens vormt figuur 3 de basis voor 1 lijn in figuur 2.

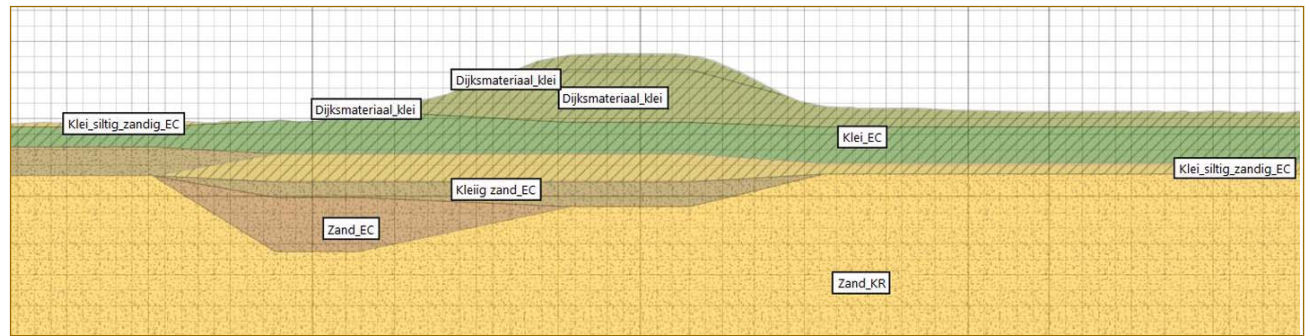


Figuur 5 – Relatie tussen volumetrische watergehalte en effectieve cohesie.



Figuur 6 – Relatie tussen volumetrische watergehalte en effectieve cohesie.

Figuur 7 – Grondopbouw representatieve doorsnede dijktraject Ravenstein-Lith.

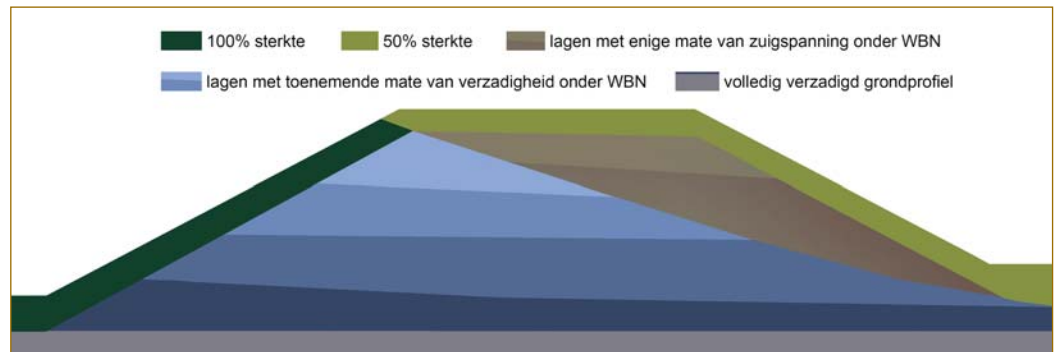


tieve schatting van de extra sterkte gemodelleerd op basis van de K0-CAU triaxiaalproeven. Daarnaast is rekening gehouden met vermindering van de sterkte ten gevolge van uitdrogings scheuren. Op basis van onderzoek door Molenaar (2020) is hiervoor 50% reductie van de geotechnische sterkteparameters in de bovenste meter van de dijk en de deklaag aangehouden, omdat de zuigsterkte in onderliggende grondlagen gecorreleerd is aan de scheurvorming in bovenliggende grondlagen. De aangehouden bodemopbouw van de kern van de dijk is weergegeven in figuur 8. Hierin is onderscheid gemaakt tussen het gedeelte boven de freatische lijn bij een Waterstand Bij Norm (WBN), de twee bruine grondlagen, en 4 grondlagen hieronder, de blauwe grondlagen in figuur 8. Ten slotte is aangenomen, dat het linker gedeelte van de dijk dat zich onder de WBN waterstand bevindt (het donkergroene gedeelte) niet verandert ten opzichte van de originele situatie. Dus geen sterktereductie door scheurvorming, maar ook geen extra sterkte ten gevolge van negatieve waterspanningen.

Dit leidt tot een verhoging van de veiligheidsfactor van minimaal 1,7% in het meest conservatieve geval en 5,0% in een scenario wat ondersteund wordt door veldmetingen (Van Duinen, 2020). Echter dient opgemerkt te worden dat dit berekend is met karakteristieke waarden en zijn hier nog geen partiële factoren op toegepast. Om een beter beeld te krijgen op de invloed van zuigspanningen op de macrostabiliteit wordt geadviseerd om meer veldmetingen uit te voeren, zodat de initieel onverzadigde zone in een kleiige rivierdijk effectief én met een hoge mate van betrouwbaarheid kan worden gemodelleerd.

Discussie en aanbevelingen

Het SSCC concept kan succesvol toegepast worden op K0-CAU proeven die uitgevoerd worden met behulp van een conventionele triaxiaalproefopstelling. Door het SSCC concept toe te passen blijkt dat er extra sterkte toegeschreven zou kunnen worden aan kleiige rivierdijken in Nederland wanneer men rekening houdt met de initieel onverzadigde zone. In de toekomst biedt dit een mogelijkheid om conservatisme te reduceren en dijken efficiënter te ontwerpen. Hiervoor is het



Figuur 8 – Geschematiseerde laagopbouw voor het modelleren van de initieel onverzadigde zone.

belangrijk om velddata te kunnen interpreteren en een indruk te verkrijgen van de actuele, tijdsafhankelijke stabiliteit van dijken. Door middel van figuur 6 wordt het mogelijk om de lokale empirische conusfactor, N_{kt} , voor het onverzadigde gedeelte te bepalen. Hiervoor dient tijdens een sondering ook het watergehalte van de grond bepaald te worden zodat de gemeten conusweerstand gecorrigeerd kan worden op basis van de SSCC resultaten.

Het meenemen van de sterkte in de initieel onverzadigde zone in een dijk kan in de toekomst dus wellicht een waardevolle bijdrage worden aan de gereedschapskist van geotechnische ingenieurs in Nederland.

Dankwoord

Deze scriptie is tot stand gekomen in samenwerking met Arcadis en Inpijn Blokpoel ingenieurs. Geotechnische proeven zijn uitgevoerd in het laboratorium van Inpijn Blokpoel ingenieurs, TU Delft en Deltares. Naast de auteurs van dit artikel, zijn de volgende personen betrokken geweest bij de begeleiding van dit onderzoek: dr. ir. Anne-Catherine Dieudonné, dr. ir. Rodriaan Spruit, dr. ir. Robert Lanzafame en dr. ir. Mark van der Krogt.

Literatuur

– Buiten, H. W. (2020). The influence of suction on the shear strength of a clay dike. – Calabresi, G., Colleselli, F., Danese, D., Giani, G., Mancuso, C., Montrasio, L., Nocilla, A., Pagano, L., Reali, E., & Sciotti, A. (2013). Research study of the hydraulic behaviour of the Po river embankments. Canadian

Geotechnical Journal, 50 (9), 947–960.

– Greeuw, G., Essen, H. M., van, & Van Duinen, T. A. (2016). Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen. Deltares report 1230090-0190GEO-0002.

– Lu, N., & Godt, J. W. (2013). Hillslope hydrology and stability. Cambridge University Press.

– Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. Water Resources Research, 46(5).

– Lu, N., & Likos, W. J. (2006). Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 132(2), 131–142.

– Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), (2019). Schematiseringshandleiding macrostabiliteit - WBI2017 v3.0.

– Molenaar, F. (2020). Numerical analysis of the influence of desiccation cracks on the stability of Dutch river dykes.

– NEN. (2018). Nen-en-iso 17892-9:2018 geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil– part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soils.

– Ponzoni, E., Nocilla, A., & Coop, M. (2017). The behaviour of a gap graded sand with mixed mineralogy. Soils and foundations, 57 (6), 1030–1044.

– Ponzoni, E., Nocilla, A., Coop, M., & Colleselli, F. (2014). Identification and quantification of transitional modes of behaviour in sediments of venice lagoon. Géotechnique, 64 (9), 694–708.

– Van Duinen, T.A. (2020). Shear strength for initially unsaturated soil – intermediate results measurements Oijen and Westervoort. Deltares report 11204453-002-GEO-0001. ●