

Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone

COLOFON

Titel	Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone
Opdrachtgever	HWBP De Innovatieversneller
Auteur(s)	Alexander van Duinen
Foto omslag	
Kenmerk	2021061861
Inhoudelijke kwaliteitsborging	Peter Kraaijenbrink, Goaitske de Vries
Datum	12 november 2021
Status	definitief

Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone




Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Contactpersoon	Govert Heijn
Referenties	2021061861/2021098199
Trefwoorden	Macrostabiliteit, onverzadigde zone, schuifsterkte, veldonderzoek, laboratoriumonderzoek

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-11-2021
Projectnummer	11207253-002
Document ID	11207253-002-GEO-0002
Pagina's	33
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Alexander van Duinen	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Alexander van Duinen	Peter Kraaijenbrink	Goaitske de Vries	
				

Samenvatting

Dit handelingsperspectief is gericht op het beoordelen en ontwerpen van macrostabiliteit van waterkeringen, voor situaties waar de schuifsterkte van de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde zone een relevante invloed heeft op de faalkans door macro-instabiliteit. Met dit handelingsperspectief worden beheerders geholpen bij het opzetten van grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek naar de schuifsterkte van deze zones. Tevens wordt in dit handelingsperspectief aangegeven hoe de schuifsterkte van deze zones kan worden gemodelleerd voor het uitvoeren van macrostabiliteitsanalyses. Daarbij wordt aangesloten op de WBI 2017 schematiseringshandleiding macrostabiliteit (I&M, 2021).

In een samenwerking van De Innovatieversneller (DIV) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) en het project Kennis voor Keringen (KvK) van Rijkswaterstaat wordt onderzoek gedaan naar de schuifsterkte in de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde zone van dijken en de ondergrond. Hiervoor worden op twee locaties (Oijen en Westervoort) metingen in het veld en het laboratorium verricht. Dit onderzoek wordt uitgevoerd om de bepaling van schuifsterkte parameters van de onverzadigde zone voor het beoordelen en ontwerpen van dijken op macrostabiliteit te verbeteren.

Door meerdere waterkeringbeheerders wordt de gedraineerde schuifsterkte (met alleen hoek van inwendige wrijving conform de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit) toegepast voor de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde kleiige grondlagen. Uit het uitgevoerde onderzoek blijkt de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde kleiige grondlagen hoger te zijn dan de gedraineerde schuifsterkte. Onder relatief natte omstandigheden, als de verzadigingsgraad relatief hoog is, blijkt de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. Onder relatief droge omstandigheden, als de zuigspanning hoog is, blijkt tot enkele meters onder maaiveld (in de bruine geoxideerde klei) een hogere schuifsterkte dan de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd.

Uit een door Arcadis (Arcadis, 2020) uitgevoerde consequentie-analyse blijkt dat door verschillen in modellering van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone verschillen in berekende stabiliteitsfactor tot een factor 1,5 kunnen ontstaan. Uitgedrukt in de kans op het optreden van macro-instabiliteit kan dit gaan om een afname van deze kans met een factor 10 tot 10.000. Op korte termijn zal deze consequentie-analyse worden geactualiseerd, op basis van de inzichten uit dit handelingsperspectief.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	(Initieel) onverzadigde grond	6
1.3	Schuifsterkte van (initieel) onverzadigde grond	7
1.4	Relevantie (initieel) onverzadigde grond voor beheerders	8
1.5	Doelgroep en scope	9
1.6	Leeswijzer	10
2	Achtergrond (initieel) onverzadigde zone	11
2.1	Capillaire werking	11
2.2	Capillaire werking bij verschillende grondsoorten	12
2.3	Invloed van neerslag en verdamping	13
2.4	Invloed van watergehalte en zuigspanning op grond	15
3	Modellering schuifsterkte met toepassingsgebied	17
3.1	Schuifsterktemodellen	17
3.2	Schuifsterktemodel voor onverzadigde grond	18
3.3	Toepassing schuifsterktemodellen in (initieel) onverzadigde grond	20
4	Metten in veld en laboratorium	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Meetmethoden	23
4.3	Strategie	25
5	Toepassing in macrostabiliteitsberekeningen	28
6	Witte vlekken	30
7	Referenties	32

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Dit handelingsperspectief is opgesteld voor waterkeringbeheerders om onderzoek naar de schuifsterkte van de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde zone te kunnen opzetten en de schuifsterkte van deze zones te kunnen schematiseren voor het beoordelen en ontwerpen van macrostabiliteit.

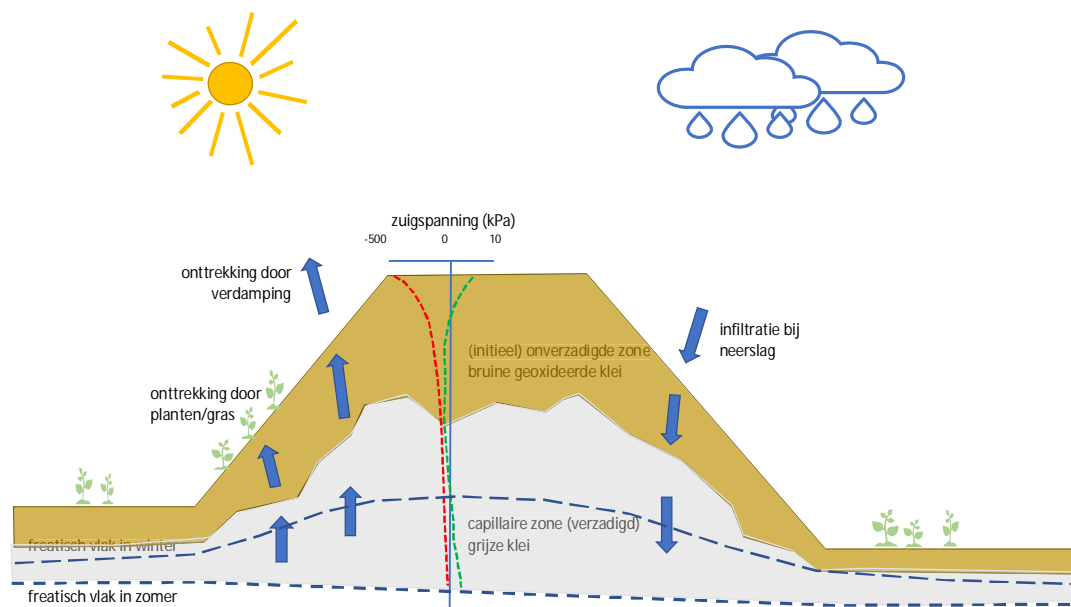
In een samenwerking van De Innovatieversneller (DIV) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) en het project Kennis voor Keringen (KvK) van Rijkswaterstaat wordt onderzoek gedaan naar de schuifsterkte in de capillaire zone en (initieel) onverzadigde zone van dijken en de ondergrond. Dit onderzoek wordt uitgevoerd om de bepaling van schuifsterkte parameters van de onverzadigde zone voor het beoordelen en ontwerpen van dijken op macrostabiliteit te verbeteren. Dit onderzoek is gestart met een literatuurstudie (Deltares, 2019). Voor dit onderzoek worden sinds najaar 2019 op de meetlocaties Oijen langs de Maas en Westervoort langs de IJssel metingen in het veld van het vochtgehalte, zuigspanning en schuifsterkte uitgevoerd. In het laboratorium worden proeven gedaan om de schuifsterkte te meten op grondmonsters en diverse andere proeven die bedoeld zijn om de veld- en laboratoriummetingen te kunnen interpreteren. Een rapport met een analyse van deze data is inmiddels beschikbaar (Deltares, 2021). Op basis van de resultaten uit dit onderzoek tot nu toe is dit handelingsperspectief opgesteld.

1.2 (Initieel) onverzadigde grond

In Nederland wordt voor grondmechanische berekeningen vrijwel altijd uitgegaan van volledig met water verzadigde grond of van volledig droge grond. Onder het normale gemiddelde freatisch vlak wordt de grond volledig met water verzadigd verondersteld. Boven het normale gemiddelde freatisch vlak wordt voor de beschrijving van de schuifsterkte van de grond uitgegaan van volledig droge grond. Ook voor waterkeringen is dat altijd de gangbare aanpak geweest. De WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit (I&M, 2021) volgt deze aanpak ook. Daarbij wordt er wel van uitgegaan dat de grond snel verzadigd raakt als het freatisch vlak stijgt bij hoogwater. Met andere woorden: de grond onder het freatisch vlak tijdens hoogwater wordt ook volledig verzadigd verondersteld.

De werkelijkheid is echter dat boven het normale gemiddelde freatisch vlak de grond niet volledig droog is, maar dat daar ook vocht aanwezig is. Tussen het freatisch vlak en het maaiveld neemt het vochtgehalte in de grond af en neemt het gehalte lucht in de grond toe. Het vochtgehalte varieert in de tijd onder invloed van neerslag, verdamping en grondwaterfluctuaties. Dit zorgt er ook voor dat het niveau van het freatisch vlak variabel is in de tijd. De zone boven het freatisch vlak wordt de onverzadigde zone genoemd, hoewel in deze zone ook deels nog sprake kan zijn van volledige verzadiging (capillaire zone). Klei kan tot enkele meters boven het freatisch vlak volledig met water verzadigd zijn.

Wat de onverzadigde zone bijzonder maakt is de negatieve waterspanning (capillaire spanning of zuigspanning) in deze zone. Dit geeft de grond extra sterkte. Deze extra sterkte kan aanzienlijk zijn. Vanwege de variatie van het vochtgehalte in de tijd is deze extra sterkte echter ook variabel. Onder invloed van het variërende vochtgehalte en zuigspanning zwelt en krimpt de klei in de onverzadigde zone voortdurend. Hierbij treedt structuurvorming of aggregaatvorming op: er ontstaat een systeem van kluiten (aggregaten) en scheuren. In deze zone vindt ook oxidatie van klei plaats, waardoor de klei een bruinige kleur krijgt. In Figuur 1.1 is één en ander schematisch weergegeven.

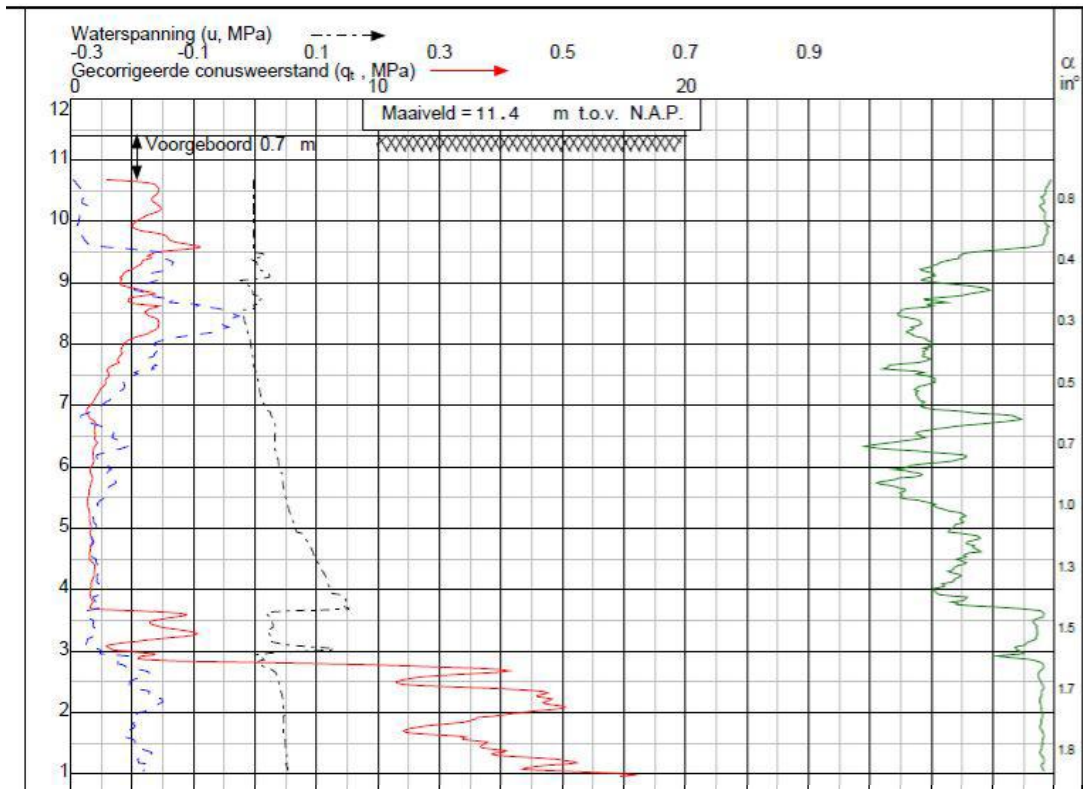


Figuur 1.1 Schematische doorsnede van een dijk met zones boven het gemiddelde freatisch vlak en de processen die daar optreden en het verloop van de zuigspanning beïnvloeden. Het verloop van de zuigspanning is schematisch aangegeven met een rode onderbroken lijn voor een droge situatie en met een groene onderbroken lijn voor een natte situatie.

1.3 Schuifsterkte van (initieel) onverzadigde grond

Sinds de introductie van het rekenen met ongedraineerde schuifsterkte voor het analyseren van macrostabiliteit in het WBI 2017 is er discussie over het toepassen van de ongedraineerde schuifsterkte voor kleiige grondlagen die boven het gemiddelde freatisch vlak liggen en dus als (initieel) onverzadigd worden gezien. De nu gangbare manier van interpreteren van sonderingen en triaxiaalproeven voor het afleiden van schuifsterkte parameters, uitgaande van ongedraineerd grondgedrag, leidt vaak tot onverwachte of ongeloofwaardige resultaten. In Figuur 1.2 is een voorbeeld gegeven van een sondering met een hoge conusweerstand (rode lijn in de figuur) vanaf NAP +7,0 m tot het maaiveld. De invloed van de genoemde zuigspanning speelt hierbij waarschijnlijk een rol.

In de praktijk wordt daarom door meerdere waterkeringbeheerders meestal de gedraineerde schuifsterkte (met alleen hoek van inwendige wrijving conform de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit) toegepast voor (initieel) onverzadigde kleiige grondlagen. Dat het om kleiig materiaal gaat, zou volgens de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit een reden zijn om uit te gaan van ongedraineerd grondgedrag voor het beoordelen van macrostabiliteit. Omdat het echter om (initieel) onverzadigde grond gaat, is vaak de gedachte dat dit kleiige materiaal toch goed doorlatend kan zijn vanwege de eerder genoemde structuurvorming en krimpscheuren en dat derhalve de aanname van gedraineerd grondgedrag daarom een verdedigbare keuze is. Ook het relatief hoge zandgehalte in klei in Oost-Nederland wordt als argument genoemd om de gedraineerde schuifsterkte toe te passen.



Figuur 1.2 Voorbeeld van een sondering. De rode lijn betreft de gemeten sondeerweerstand (conusweerstand, q_t). Boven NAP +7,0 m is de sondeerweerstand hoog, waarschijnlijk onder invloed van zuigspanning, aangezien de gemeten waterspanning u circa 0 MPa is.

Uit de resultaten van het onderzoek bij Westervoort en Oijen volgt dat de keuze om de gedraineerde schuifsterkte toe te passen in de (initieel) onverzadigde zone een conservatieve keuze is. Op beide meetlocaties blijkt de schuifsterkte hoger te zijn dan de gedraineerde schuifsterkte. Onder relatief natte omstandigheden, als de verzadigingsgraad relatief hoog is, blijkt de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. Onder relatief droge omstandigheden, als de zuigspanning hoog is, blijkt tot enkele meters onder maaiveld een hogere schuifsterkte dan de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd.

1.4 Relevantie (initieel) onverzadigde grond voor beheerders

Met name in West-Nederland ligt het gemiddelde niveau van het freatisch vlak vaak dicht bij het maaiveld en relatief hoog in een dijklichaam. De onverzadigde zone speelt dan een beperkte rol in de analyse van macrostabiliteit. In Oost-Nederland kan het freatisch vlak behoorlijk diep liggen ten opzichte van het maaiveld. Het komt vaak voor dat de volledige dijk en de Holocene kleiige deklaag geheel boven het gemiddelde niveau van het freatisch vlak liggen. De hele dijk en deklaag bevinden zich dan in de onverzadigde zone.

Uit een door Arcadis (Arcadis, 2020) uitgevoerde consequentie-analyse blijkt dat door verschillen in modellering van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone verschillen in berekende stabiliteitsfactor tot een factor 1,5 kunnen ontstaan. Uitgedrukt in de kans op het optreden van macro-instabiliteit kan dit gaan om een afname van deze kans met een factor 10 tot 10.000. Uit de analyse van Arcadis volgt ook dat dit het verschil kan maken tussen het wel of niet moeten aanbrengen van een stabiliteitsberm of een verschil in benodigde berm lengte tot circa 20 meter. Deze consequentie-analyse is uitgevoerd voor zeven dijkprofielen van vijf waterschappen in Oost-Nederland. Op korte termijn zal deze

consequentie-analyse worden geactualiseerd, op basis van de inzichten uit dit handelingsperspectief.

Zoals aangegeven laten de resultaten van het onderzoek bij Westervoort en Oijen zien, dat een schematisering van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde grond met het gedraineerde schuifsterktemodel op basis van alleen een hoek van inwendige wrijving conservatief is. Bij een hoge verzadigingsgraad blijkt de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. Bij een lage verzadigingsgraad blijkt, als gevolg van zuigspanning, een hogere schuifsterkte dan de gedraineerde schuifsterkte en de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. Zuigspanning blijkt tot ver in de winter relevant te zijn voor de schuifsterkte, wanneer de zomer langdurig droog is geweest.

De resultaten van het onderzoek bij Westervoort en Oijen kunnen ook worden toegepast in andere situaties, voor zover de omstandigheden vergelijkbaar zijn met de omstandigheden bij Westervoort en Oijen. Relevant hierbij is:

- Bij Westervoort gaat het om de schuifsterkte in de top van de Holocene kleideklaag. Bij Oijen betreft het een dijk die in de 50-er jaren van de vorige eeuw is aangelegd en waarbij de klei, naar het zich laat aanzien, goed is verdicht.
- Bij Westervoort en Oijen gaat het om klei met een percentage kleideeltjes (lutumgehalte, < 2 µm) tussen 20% en 50%. Het organische stof gehalte is 2 tot 5% en de plasticiteitsindex is 0,10 tot 0,35.
- De grens tussen grijze klei en bruine geoxideerde klei ligt bij Westervoort circa 1,5 meter beneden maaiveld en bij Oijen is dat circa 2,5 meter.
- Omdat Oijen een relatief recent aangelegde dijk betreft, kunnen andere situaties met oudere dijken mogelijk meer variatie in de klei-eigenschappen hebben en kunnen ook minder goed verdicht zijn.

Wanneer op een andere locatie de situatie afwijkt van de situatie in Westervoort en Oijen, dan is lokaal onderzoek nodig.

1.5 Doelgroep en scope

Dit handelingsperspectief is gericht op het beoordelen en ontwerpen van macrostabiliteit van waterkeringen, voor situaties waar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone een relevante invloed heeft op de faalkans door macro-instabiliteit. Met dit handelingsperspectief worden beheerders geholpen bij het opzetten van grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone. Tevens wordt in dit handelingsperspectief aangegeven hoe de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone kan worden gemodelleerd voor het uitvoeren van macrostabiliteitsanalyses. Daarbij wordt aangesloten op de WBI 2017 schematiseringshandleiding macrostabiliteit.

Dit handelingsperspectief beoogt om zowel technisch managers, projectleiders als specialisten inzicht te geven in de specifieke aspecten van de (initieel) onverzadigde zone. Het onderwerp wordt daarom stap voor stap uitgewerkt, te beginnen bij algemene natuurkundige verschijnselen. In de opeenvolgende hoofdstukken wordt steeds meer inhoudelijke verdieping aangebracht. Voor een goed begrip van de latere hoofdstukken is daarom affiniteit met grondmechanica, met het uitvoeren van grondmechanisch veld- en laboratoriumonderzoek en met de WBI 2017 schematiseringshandleiding macrostabiliteit veronderstelt.

1.6 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden verschillende aspecten van de (initieel) onverzadigde zone toegelicht. Vanuit het principe van de capillaire werking en de waterhuishouding in de onverzadigde zone wordt toegelicht wat de invloed hiervan is op de schuifsterkte. In Hoofdstuk 3 wordt de modellering van de schuifsterkte in de onverzadigde zone verder uitgewerkt, met de bijbehorende parameters. In Hoofdstuk 4 wordt aangegeven welk veld- en laboratoriumonderzoek kan worden ingezet om de benodigde parameters voor de schuifsterktemodellen in te winnen. Het inwinnen van de gegevens wordt ingestoken vanuit het werken van eenvoudig naar geavanceerd voor die situaties waar dat nodig is. In Hoofdstuk 5 wordt de toepassing van de schuifsterktemodellen en de parameters in de macrostabiliteitsanalyses besproken. In Hoofdstuk 6 worden de witte vlekken benoemd. Dit mede vanwege het feit dat vanuit het onderzoek bij Westervoort en Oijen verschillende onzekerheden zijn benoemd. Daarnaast kunnen in andere situaties de omstandigheden anders zijn, zodat lokaal onderzoek nodig is om de inzichten vanuit het onderzoek bij Westervoort en Oijen in andere situaties toe te kunnen passen.

Voor aanvullende informatie over het onderwerp wordt verwezen naar de literatuurstudie (Deltares, 2019) en het onderzoeksrapport (Deltares, 2021).

2 Achtergrond (initieel) onverzadigde zone

2.1 Capillaire werking

Grond bestaat uit een stapeling van gronddeeltjes van verschillende afmetingen en vormen. Tussen deze gronddeeltjes bevinden zich kleinere en grotere poriën. Onder de grondwaterstand zijn alle poriën gevuld met water. De waterdruk neemt toe met de diepte ten opzichte van de grondwaterstand. In de zone tussen de normale gemiddelde grondwaterstand en het maaiveld neemt het watergehalte in de poriën af. Dat er boven de grondwaterstand toch water in de poriën aanwezig is, heeft te maken met het natuurkundige verschijnsel van de capillaire werking. Een bekend voorbeeld waarmee capillaire werking kan worden gedemonstreerd zijn een aantal buisjes van verschillende diameter, waarvan de onderkant in een met water gevulde bak staan (zie Figuur 2.1). De grootste capillaire opstijging (h) vindt plaats in het buisje met de kleinste diameter (r). De capillaire opstijging in de buisjes is het krachtenevenwicht van de adhesie tussen het water en de buisjes, de cohesie tussen de waterdeeltjes onderling en de zwaartekracht op de waterkolom in de buisjes. Op het grensvlak van water en lucht in de buisjes is de negatieve waterdruk (u) groter naarmate de capillaire opstijging groter is. Deze capillaire opstijging is er ook in grond boven het freatisch vlak.

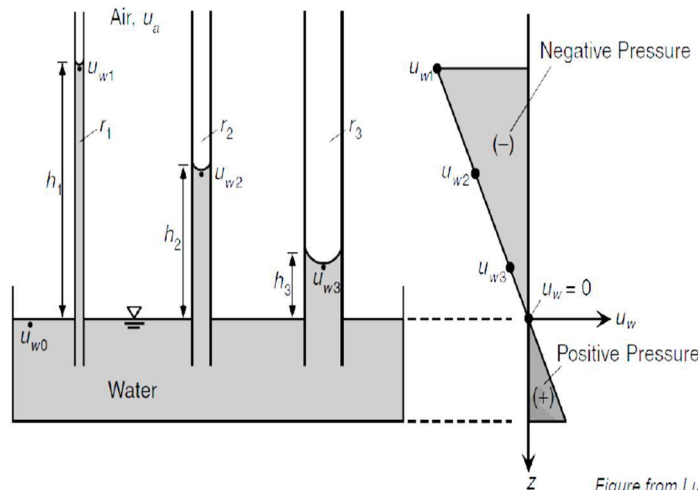
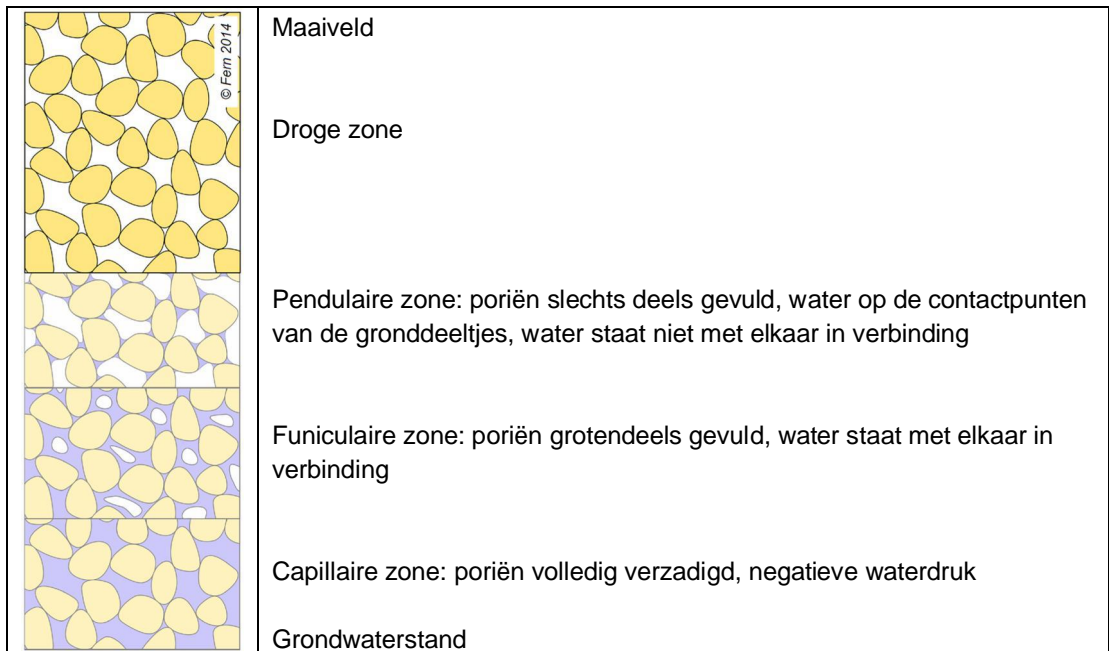


Figure from Lu & Likos (2004)

Figuur 2.1 Capillaire werking in buisjes van verschillende diameter. De diameter van de buisjes bepaalt de mate van capillaire opstijging van water in de buisjes. Het drukverloop in de buisjes neemt hydrostatisch af met de hoogte ten opzichte van de waterstand in de bak.

De zone tussen het freatisch vlak en het maaiveld wordt in de bodemkunde onderverdeeld in verschillende zones, waarin het watergehalte in de poriën geleidelijk afneemt (Figuur 2.2). Vanaf het freatisch vlak naar het maaiveld bevindt het water in de poriën zich steeds meer rondom de gronddeeltjes en de contactpuntjes tussen de gronddeeltjes. Dit is het gevolg van de adhesiekrachten tussen de waterdeeltjes en de gronddeeltjes. In de kleinste poriën is de capillaire opstijging het grootst. Daardoor zijn kleinere poriën tot dicht bij het maaiveld gevuld met water.



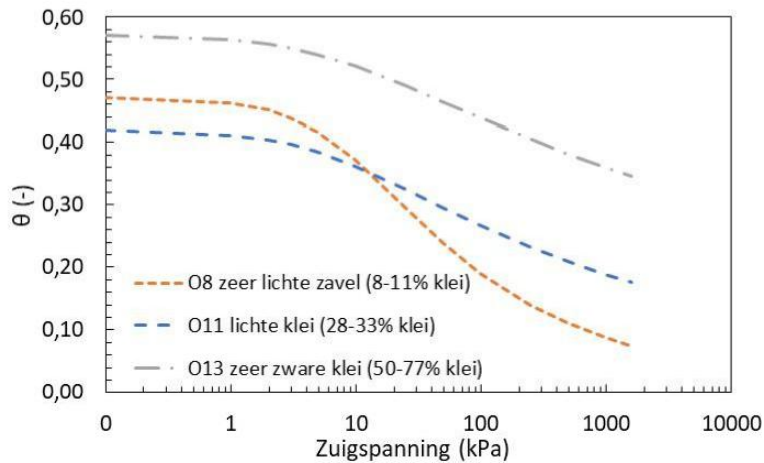
Figuur 2.2 Opeenvolgende zones boven de grondwaterstand waarin de verzadigingsgraad afneemt.

De mate waarin de poriën zijn gevuld met water wordt uitgedrukt met de verzadigingsgraad S_r . De verzadigingsgraad is het volume water ten opzichte van het volume poriën. In verzadigde grond is de verzadigingsgraad 1 en in volledig droge grond is de verzadigingsgraad 0.

Het genoemde krachtenevenwicht van de adhesiekrachten tussen gronddeeltjes en water en de cohesiekrachten tussen de waterdeeltjes onderling zorgt er voor dat de gronddeeltjes naar elkaar toe worden getrokken. De zuigspanning of capillaire spanning is een maat voor deze krachten tussen de gronddeeltjes. Deze zuigspanning of capillaire spanning vergroot de effectieve spanning in de grond en daarmee ook de schuifsterkte.

2.2 Capillaire werking bij verschillende grondsoorten

Zoals aangegeven bij het verschijnsel van de capillaire opstijging is er een relatie tussen de diameter van de buisjes waarin het water zich bevindt en de mate van capillaire opstijging in deze buisjes. Dit principe is ook in grond aan de orde. In kleinere poriën is de capillaire opstijging groter. Dit zorgt ervoor dat de relatie tussen het watergehalte in de grond en de zuigspanning of capillaire spanning afhankelijk is van de grondsoort. Dit laten de waterretentiecurves in Figuur 2.3 zien. Met de waterretentiecurves wordt de relatie tussen het volumetrisch watergehalte θ en zuigspanning s aangegeven. Het volumetrisch watergehalte is het volume water ten opzichte van het volume vaste deeltjes. De zuigspanning is weergegeven tot 1500 kPa. Dit is het zogenaamde verwelkingspunt. Bij het watergehalte wat hoort bij dit verwelkingspunt zijn planten niet meer in staat water aan de grond te onttrekken. Als het gras geel wordt, is in de wortelzone dus een zeer hoge zuigspanning aanwezig.



Figuur 2.3 Relatie tussen volumetrisch watergehalte θ en zuigspanning voor verschillende grondsoorten volgens de Staring-reeks (Wösten et al., 2001).

De waterretentiecurves maken duidelijk dat bij verzadigde omstandigheden, dus bij zuigspanningen nabij 0 kPa, het volumetrisch watergehalte afhankelijk is van de grondsoort. Ook de afname van het volumetrisch watergehalte bij toenemende zuigspanning is afhankelijk van de grondsoort. Verder blijkt dat bij de hoogste weergegeven zuigspanning van 1500 kPa het volumetrisch watergehalte nog niet nul is. De verzadigingsgraad is daarom ook niet nul. De achtergrond hiervan is dat een deel van het water in de poriën door adsorptiekrachten gebonden is aan de kleideeltjes. Bij een toenemend aandeel kleideeltjes in de grond is het volumetrisch watergehalte wat in de grond aanwezig is bij hoge waarden van de zuigspanning steeds groter. Dit is een belangrijk aspect, omdat water dat door adhesiekrachten gebonden is aan de kleideeltjes geen bijdrage levert aan de zuigspanning die de gronddeeltjes naar elkaar toe trekt. Bij een toenemende zuigspanning is het aandeel water dat door adhesie aan de kleideeltjes is gebonden relatief steeds groter. Bij toenemende zuigspanning zijn daardoor in toenemende mate de kleinere poriën nog met water verzadigd en de grotere poriën raken steeds leger. Dit effect wordt uitgedrukt met de effectieve verzadigingsgraad. Dit is de verzadigingsgraad met een correctie vanwege het aandeel kleine poriën, waarin het water met adhesiekrachten aan de kleideeltjes zijn gebonden. In de literatuur wordt dit ook wel aangeduid als de verzadigingsgraad van de macroporiën. De gedachte hierbij is dat het water in de macroporiën bijdraagt aan de aantrekkingskracht tussen de gronddeeltjes. Het water in de microporiën is door adhesiekrachten gebonden aan de kleideeltjes. Door het relatief steeds grotere aandeel van gebonden water is de aantrekkingskracht tussen de kleideeltjes bij toenemende zuigspanning relatief steeds minder sterk. De aantrekkingskracht tussen de gronddeeltjes wordt dus bepaald door de zuigspanning en de effectieve verzadigingsgraad.

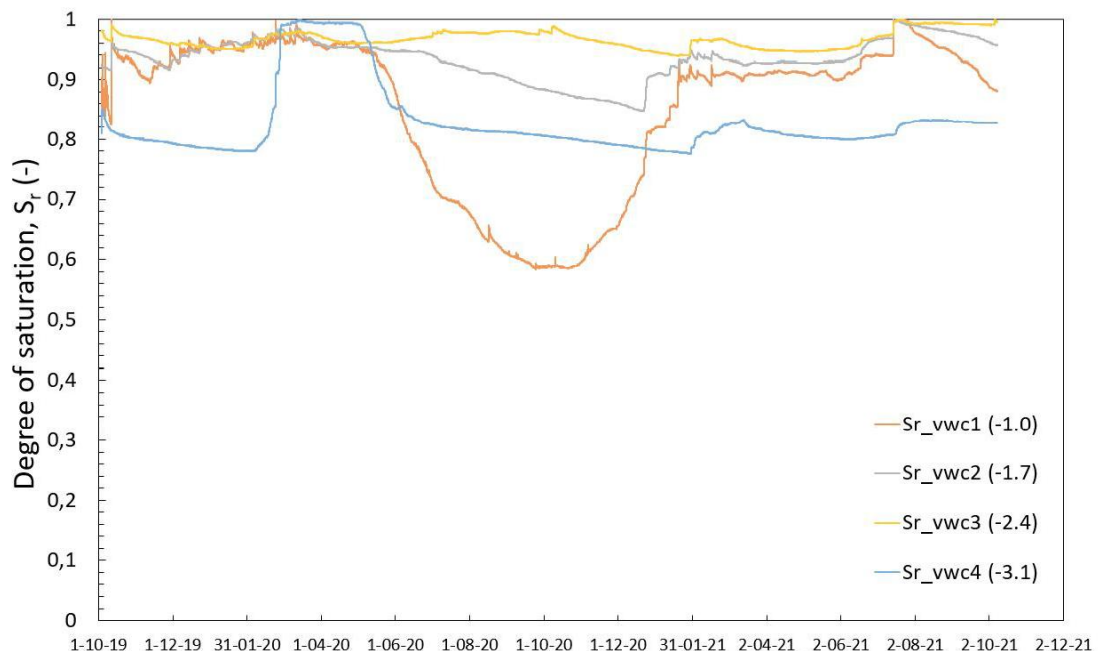
2.3 Invloed van neerslag en verdamping

Naast het fenomeen van de capillaire opstijging is er ook de invloed van neerslag, verdamping en vochtonttrekking door plantenwortels op de onverzadigde zone. Deze aspecten samen bepalen het verloop van het watergehalte en de verzadigingsgraad tussen het freatisch vlak en het maaiveld. In de onverzadigde zone vindt ook grondwaterstroming plaats. Bij neerslag een neerwaarts gerichte stroming. Omgekeerd wordt water dat verdampt, of door plantenwortels wordt onttrokken, vanaf het freatisch vlak weer aangevuld. Het verloop van het watergehalte en de verzadigingsgraad in de onverzadigde zone varieert daardoor in de tijd. Daardoor is er in de onverzadigde zone geen hydrostatisch drukverloop van de capillaire spanning, zoals bij de capillaire spanning in de buisjes in Paragraaf 2.1. Met andere woorden: wanneer het freatisch vlak zich 2 meter onder het maaiveld bevindt, kan de

capillaire spanning aan maaiveld toch (veel) groter zijn dan 2 meter waterkolom (ongeveer 20 kPa). Zoals eerder opgemerkt, is het geel worden van gras een aanwijzing dat de capillaire spanning zelfs circa 1500 kPa bedraagt.

Naast de invloed van neerslag en verdamping kan er bij dijken ook invloed op het watergehalte en de verzadigingsgraad zijn in een hoogwatersituatie. Dat kan zijn door infiltratie bij het buitentalud door een hoge buitenwaterstand. In situaties met overslag of overloop is er ook infiltratie via de kruin en het binnentalud. Afhankelijk van de duur van het hoogwater en de duur en grootte van het overslag- of overloopdebiet zullen het watergehalte en de verzadigingsgraad in het dijklichaam toenemen, waarbij het dijklichaam vanaf het maaiveld richting de kern in toenemende mate verzadigd raakt. De capillaire spanning neemt daarbij af.

Figuur 2.4 geeft het verloop van de verzadigingsgraad in de tijd op de meetlocatie Oijen. Sensor vwc_1 staat 1,0 meter beneden maaiveld en sensor vwc_4 staat 3,1 meter beneden maaiveld. De afstanden, in diepte, tussen de sensoren bedraagt 0,7 meter. De sensoren laten een duidelijke afhankelijkheid zien van het neerslagtekort in de verschillende seizoenen en de opeenvolgende jaren. Door het KNMI wordt het neerslagtekort gerapporteerd. Dat is het cumulatieve verschil tussen neerslag en verdamping in een jaar, met als startpunt 1 april. Dit neerslagtekort kan elk jaar heel verschillend zijn. Zo is in 2021 het gemiddelde neerslagtekort niet boven 90 mm geweest, terwijl in 2019 en 2020 het neerslagtekort respectievelijk ruim 200 mm en circa 250 mm is geweest. Met name in de zomer van 2020 geeft de sensor vwc_1 en in mindere mate de sensor vwc_2 een duidelijke respons op de droge zomer met het relatief hoge neerslagtekort. De invloed van de droge zomer is zelfs merkbaar tot ver in de winter. Door de relatief natte zomer van 2021 is de verzadigingsgraad in 2021 duidelijk hoger dan in 2020. In grote lijnen neemt de verzadigingsgraad met de diepte vanaf maaiveld toe. De sensor vwc_4 is daarop een uitzondering, waarschijnlijk doordat er wat zandige laagjes in de buurt van deze sensor aanwezig zijn.



Figuur 2.4 Verloop van de verzadigingsgraad in de tijd op vier dieptes in de Maasdijk te Oijen. Sensor 1 staat op 1,0 meter diepte en sensor 4 staat op 3,1 meter diepte beneden maaiveld.

2.4 Invloed van watergehalte en zuigspanning op grond

De capillaire spanning of zuigspanning heeft duidelijk invloeden op de grond. Zoals aangegeven zorgt de zuigspanning voor aantrekkingskracht tussen gronddeeltjes. Deze aantrekkingskracht zorgt voor een verhoging van de effectieve spanning (korrelspanning) van de grond. Deze hogere effectieve spanning heeft invloed op de schuifsterkte van de grond. Deze hogere effectieve spanning en schuifsterkte zijn variabel in de tijd, doordat watergehalte en zuigspanning variëren in de tijd. De aantrekkingskracht tussen de gronddeeltjes zorgt ook voor compactie van grond. Hierdoor ontstaan kluiten (aggregaten) en scheuren. Uit literatuur blijkt dat scheurvorming door uitdroging van klei met name leidt tot smalle en ondiepe scheuren tot 0,3 à 0,5 meter beneden maaiveld (TAW, 1996 en Ciria, 2013). Aaneengesloten lange scheuren komen meestal niet dieper dan tot maximaal 1,0 meter voor en niet-aaneengesloten scheuren kunnen tot 1,5 meter onder maaiveld worden waargenomen (Blight, 2013). De klimatologische omstandigheden spelen hierbij een rol. De vorming van kluiten en scheuren heeft invloed op de doorlatendheid van de grond. De scheuren kunnen ook leiden tot een verminderde schuifsterkte (Deltares, 2019). Gezien de diepte van de intensieve scheurvorming betreft dit vooral ondiepere schuifvlakken.

Omdat watergehalte en zuigspanning variëren in de tijd, is er een repeterend proces van krimpen en zwellen van grond. De compactie van de grond is echter deels onomkeerbaar. Compactie zorgt dus ook voor een blijvende afname van het poriënvolume van de grond. In de bodemkunde wordt dit proces fysische rijping genoemd. Bij rijping van grond zijn er niet alleen fysische processen, maar ook chemische en biologische processen die een rol spelen op de verandering van de structuur van de grond. Daarbij gaat het onder andere om het toetreden van zuurstof tot de grond en de oxidatieprocessen die daarvan het gevolg zijn. Dit zorgt voor een bruinige kleur van de ondiepe gerijpte ondergrond en een grijzige kleur voor de diepere niet gerijpte ondergrond. De afname van het poriënvolume door compactie heeft ook invloed op de schuifsterkte van de grond. Als gevolg van zuigspanning zijn er dus twee effecten op de schuifsterkte, namelijk:

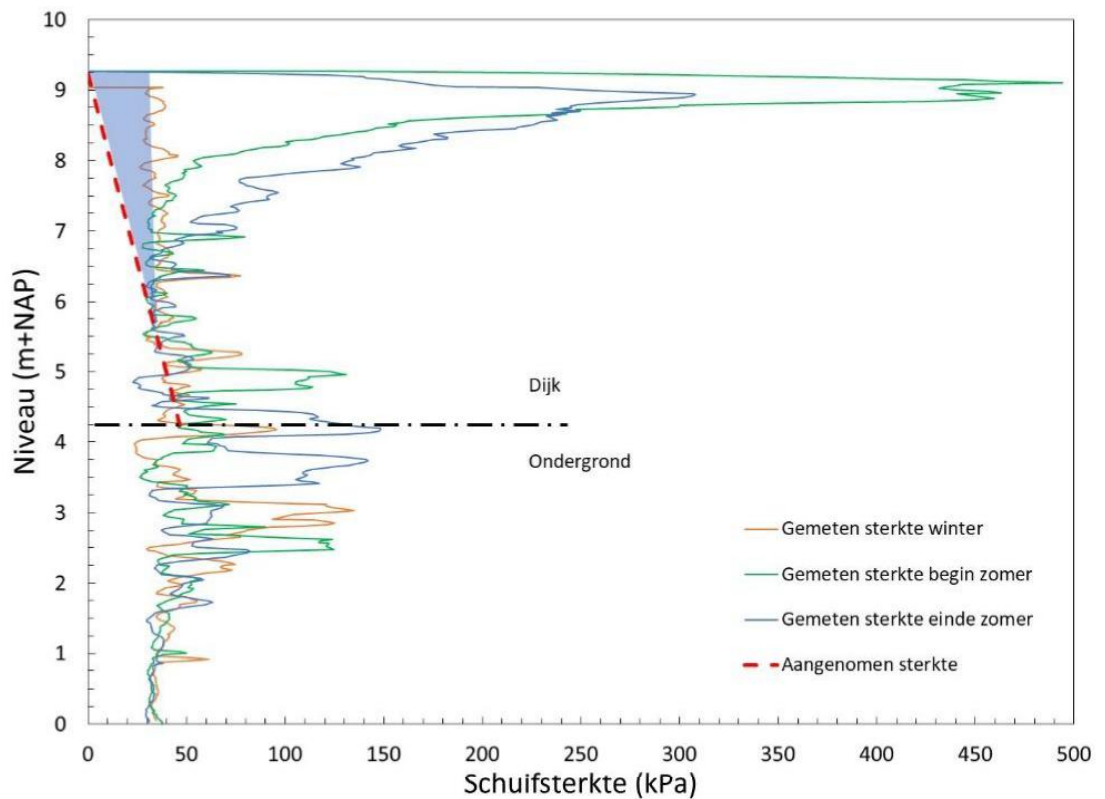
1. Via verhoging van de effectieve spanning .
2. Via afname van het poriënvolume.

Het eerste effect varieert in de tijd. Het tweede effect is blijvend.

Figuur 2.5 laat de schuifsterkte van de meetlocatie Oijen zien, zoals deze is afgeleid uit enkele sonderingen. De sonderingen zijn op korte afstand van elkaar uitgevoerd. De dijk is een relatief homogene dijk die midden vorige eeuw is aangelegd (Deltares, 2020). De fluctuaties in de schuifsterkte in de bovenste meters van de dijk kunnen daarom worden toegeschreven aan fluctuaties in vochtgehalte en zuigspanning in de onverzadigde zone. De variaties in de schuifsterkte vanaf NAP +5,0 m en dieper betreffen waarschijnlijk variaties in de schuifsterkte eigenschappen van de grond. Dit kan waarschijnlijk worden toegeschreven aan een opvulling van een oude dijkdoorbraak (Deltares, 2020).

De schuifsterkte in de bovenste meters van de dijk, zoals weergegeven in Figuur 2.5, blijkt zeer hoge waarden te kunnen hebben. Voor het begin van de zomer is een schuifsterkte afgeleid van bijna 500 kPa. Aan het einde van de zomer is de maximale schuifsterkte lager (circa 300 kPa). Het effect van neerslag en verdamping op vochtgehalte en zuigspanning is dan echter tot dieper in de dijk doorgedrongen en daardoor is tot dieper in de dijk een hogere schuifsterkte aanwezig. De schuifsterkte in de winter met minimale waarden van de zuigspanning bedraagt circa 35 kPa. Vanuit de sonderingen die bij Westervoort zijn uitgevoerd, komt een vergelijkbaar beeld naar voren.

Als referentie is ook de schuifsterkte uitgaande van gedraineerd materiaalgedrag, op basis van alleen een hoek van inwendige wrijving, in Figuur 2.5 weergegeven (rode onderbroken lijn). Dit is de schuifsterkte die door de meeste beheerders bij het beoordelen van macrostabiliteit tot nu toe werd toegepast in de (initieel) onverzadigde zone. Volgens literatuur is dit ook de minimale schuifsterkte in de onverzadigde zone wanneer geen zuigspanning aanwezig is; zie hiervoor de literatuurstudie (Deltares, 2019).



Figuur 2.5 Schuifsterkte afgeleid uit sondeerweerstand op drie momenten in het jaar. De in de huidige adviespraktijk, zonder de kennis over de onverzadigde zone, vaak aangenomen sterkte volgens het Mohr-Coulomb model met een hoek van inwendige wrijving is aangegeven met een rode onderbroken lijn.

Het blauwe vlak in Figuur 2.5 geeft het verschil in schuifsterkte tussen wat door de meeste beheerders tot nu toe werd toegepast (gedraineerde schuifsterkte) en de laagste in het veld gemeten schuifsterkte in de winterperiode. Deze laagste schuifsterkte in de winterperiode is fors lager dan de schuifsterkte in de zomer, maar toch nog substantieel hoger dan de gedraineerde schuifsterkte. Van belang is om op te merken dat de hoge schuifsterkte, zoals gepresenteerd in Figuur 2.5, zich niet alleen laat verklaren door de gemeten zuigspanningen. Ook als de zuigspanning laag of afwezig is, kan de schuifsterkte hoog zijn. De verdichting (compactie) van de klei door rijping en bij aanleg van de dijk speelt hierin een belangrijke rol. In hoofdstuk 3 wordt hier verder op ingegaan.

3 Modelling schuifsterkte met toepassingsgebied

3.1 Schuifsterktemodellen

In het vorige hoofdstuk is ingegaan op (initieel) onverzadigde grond, de capillaire werking die daarin aanwezig is en de invloed daarvan op het gedrag en de schuifsterkte van onverzadigde grond. Een ander belangrijk aspect van grondgedrag is het ontwikkelen van wateroverspanning of wateronderspanning bij het optreden van een taludinstabiliteit. Afhankelijk van de snelheid waarmee een taludinstabiliteit zich voltrekt, in relatie tot de doorlatendheid van de grond, kunnen zich wateroverspanningen of wateronderspanningen in de grond ontwikkelen. Bij een taludafschuiving die langzaam optreedt in relatie tot de doorlatendheid van de grond kan deze waterover- of -onderspanning die in de grond ontstaat weer wegstromen. Dan is sprake van gedraineerd grondgedrag. Ongedraineerd grondgedrag is aan de orde wanneer de waterover- of -onderspanning, die ontstaat tijdens het optreden van een afschuiving, niet snel kan afstromen als gevolg van de relatief lage doorlatendheid van de grond.

Een belangrijke bevinding van het onderzoek naar de schuifsterkte van de onverzadigde zone is dat in de onverzadigde zone (inclusief de capillaire zone, die wel volledig verzadigd is) ook ongedraineerd gedrag kan optreden. Voor de capillaire zone is dat aannemelijk, omdat de verzadigingsgraad 1 is. Ook in de onverzadigde zone kan echter ongedraineerd gedrag optreden, op voorwaarde dat de verzadigingsgraad voldoende groot is. Voor Westervoort en Oijen ligt de verzadigingsgraad waarboven ongedraineerd gedrag optreedt op circa 0,7 à 0,8.

In de grondmechanica zijn er verschillende modellen om de schuifsterkte van grond te beschrijven. Er zijn modellen voor gedraineerd en ongedraineerd grondgedrag en modellen voor verzadigde en voor onverzadigde grond. Bij het rekenen aan macrostabiliteit met glijvlakmodellen, zoals voor het beoordelen van macrostabiliteit volgens het WBI 2017 wordt gedaan, worden relatief eenvoudige schuifsterktemodellen toegepast, die slechts één van deze condities van de grond kunnen beschrijven. Tabel 3.1 geeft daarvan een overzicht. Geavanceerdere schuifsterktemodellen, die voor numerieke analyses worden ingezet, kunnen het gedrag van grond vollediger beschrijven.

In Paragraaf 3.2 wordt nader ingegaan op het schuifsterktemodel voor onverzadigde grond. Met dit model kan de invloed van zuigspanning op de schuifsterkte in rekening worden gebracht. Voor verdere uitleg over de modellen voor gedraineerde en ongedraineerde schuifsterkte wordt verwezen naar de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit.

Tabel 3.1 Schuifsterkte-modellen ingedeeld naar toepassing bij verschillende verzadigingsgraden en drainage-condities

Verzadigingsgraad	Drainage-conditie	Schuifsterkte-model	Toepassing
Verzadigd ($S_r = 1$): onder de gemiddelde grondwaterstand en in de capillaire zone	Gedraineerd: geen wateroverspanning of wateronderspanning als gevolg van bezwijken	Mohr-Coulomb	Alle grondsoorten
		Mohr-Coulomb met toevoeging voor invloed van zuigspanning en verzadigingsgraad	Alle grondsoorten. Ongedraineerd gedrag is in deze zone meer relevant.
	Ongedraineerd: wateroverspanning of wateronderspanning als gevolg van bezwijken	SHANSEP	Slecht doorlatende klei en veen. Ongedraineerde schuifsterkte heeft relatie met overconsolidatieratio.
		Transitional soils (su-tabel in D-Stability)	Slecht doorlatende klei met veel zand en silt (volumegewicht >17 kN/m ³). Ongedraineerde schuifsterkte heeft relatie met hoge pakkingsdichtheid als gevolg van samenstelling van de grond
Onverzadigd ($S_r < 1$): (initieel) onverzadigde zone	Gedraineerd: geen wateroverspanning of wateronderspanning als gevolg van bezwijken ($S_r \ll 1$)	Mohr-Coulomb met toevoeging voor invloed van zuigspanning en verzadigingsgraad	Alle grondsoorten
		SHANSEP	Slecht doorlatende klei en veen. Ongedraineerde schuifsterkte heeft relatie met overconsolidatieratio.
	Ongedraineerd: wateroverspanning of wateronderspanning als gevolg van bezwijken ($S_r < 1$)	SHANSEP	Slecht doorlatende klei en veen. Ongedraineerde schuifsterkte heeft relatie met overconsolidatieratio.
		Transitional soils (su-tabel in D-Stability)	Slecht doorlatende klei met veel zand en silt (volumegewicht >17 kN/m ³). Ongedraineerde schuifsterkte heeft relatie met hoge pakkingsdichtheid als gevolg van samenstelling van de grond

3.2 Schuifsterktemodel voor onverzadigde grond

Zoals aangegeven in Hoofdstuk 2 is de verzadigingsgraad een belangrijke parameter die van invloed is op de mate waarin de zuigspanning of capillaire spanning effect heeft op de effectieve spanning en de schuifsterkte van onverzadigde grond. De verzadigingsgraad S_{rM} die een maat is voor de invloed van de zuigspanning op de effectieve spanning en de schuifsterkte is de verzadigingsgraad met correctie voor het fenomeen dat een deel van het water in de poriën door adhesiekrachten is gebonden aan de kleideeltjes (zie Paragraaf 2.2). Daarom wordt het totale poriënvolume onderverdeeld in macroporiën en microporiën. De aanname is dat het water in de microporiën volledig door adhesiekrachten is gebonden aan de kleideeltjes en daarom geen bijdrage levert aan de capillaire spanning (Deltares, 2019 en Deltares, 2020). Het water in de macroporiën draagt wel bij aan de capillaire spanning. Daarom wordt de verzadigingsgraad van de macroporiën toegepast om de invloed van de capillaire spanning op de effectieve spanning en de schuifsterkte te berekenen. De verzadigingsgraad van de macroporiën S_{rM} wordt als volgt bepaald:

$$S_{rM} = \left(\frac{e_w - e_{wm}}{e - e_{wm}} \right) \quad (3.1)$$

waarin:

e	[-]	Poriëngetal (volume poriën per volume vaste deeltjes)
e_w	[-]	Poriëngetal van met water gevulde poriën (volume water per volume vaste deeltjes)
e_{wm}	[-]	Poriëngetal van met water gevulde microporiën (volume water in de microporiën per volume vaste deeltjes)

Op basis van deze definitie van de verzadigingsgraad van de macroporiën is de invloed van de zuigspanning op de effectieve spanning als volgt:

$$\sigma'_n = (\sigma_n + sS_{rM}) \quad (3.2)$$

waarin:

σ'_n	[kPa]	Effectieve spanning loodrecht op het schuifvlak
σ_n	[kPa]	Totaalspanning loodrecht op het schuifvlak
s	[kPa]	Zuigspanning
S_{rM}	[-]	Verzadigingsgraad van de macroporiën

De schuifsterkte van onverzadigde grond en grond in de capillaire zone is dan afhankelijk van de zuigspanning s evenredig met de verzadigingsgraad van de macroporiën S_{rM} , zo lang als gedraineerd grondgedrag aan de orde is. Volgens het Mohr-Coulomb faalcriterium en rekening houdend met de invloed van zuigspanning kan bezwijken van onverzadigde grond worden berekend met:

$$\tau = c' + (\sigma_n + sS_{rM}) \cdot \tan(\phi') \quad (3.3)$$

waarin:

τ	[kPa]	De schuifsterkte volgens het Mohr-Coulomb model
c'	[kPa]	Cohesie.
σ'_n	[kPa]	Effectieve spanning loodrecht op het schuifvlak
ϕ'	[°]	Hoek van inwendige wrijving

Wanneer grond zich in de 'critical state' bevindt, is de 'echte' cohesie (c') nul; zie WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit (I&M, 2021). Voor de 'critical state' ($c' = 0$ kPa) van de grond en uitgaande van niet-associatief grondgedrag, in overeenstemming met de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit, wordt het faalcriterium:

$$\tau = (\sigma_n + sS_{rM}) \cdot \sin(\phi') \quad (3.4)$$

De term van de zuigspanning en de verzadigingsgraad kan worden geschreven als cohesie ('schijnbare' cohesie):

$$(sS_{rM}) \cdot \sin(\phi') = c' \quad (3.5)$$

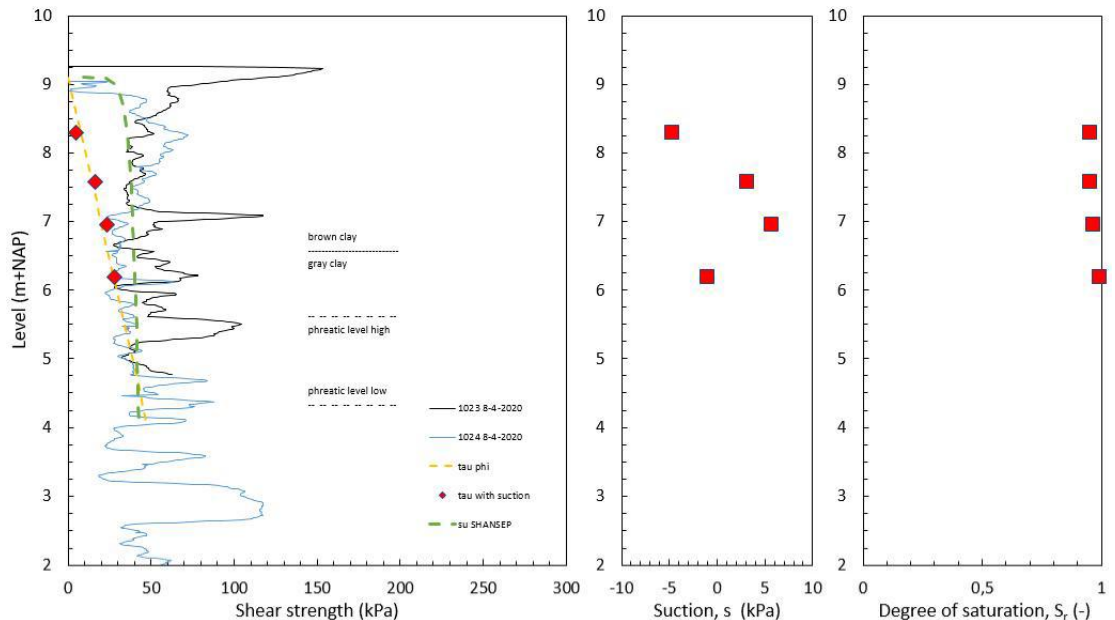
Het effect van zuigspanning op de schuifsterkte van de grond kan via de 'schijnbare' cohesie in rekening worden gebracht bij toepassing van het Mohr-Coulomb schuifsterktemodel. Beperking van deze aanpak is dat de zuigspanning afneemt met de diepte. De 'schijnbare'

cohesie neemt daardoor ook af met de diepte. In de huidige implementatie van het Mohr-Coulomb model in D-Stability is dit lastig toeepasbaar.

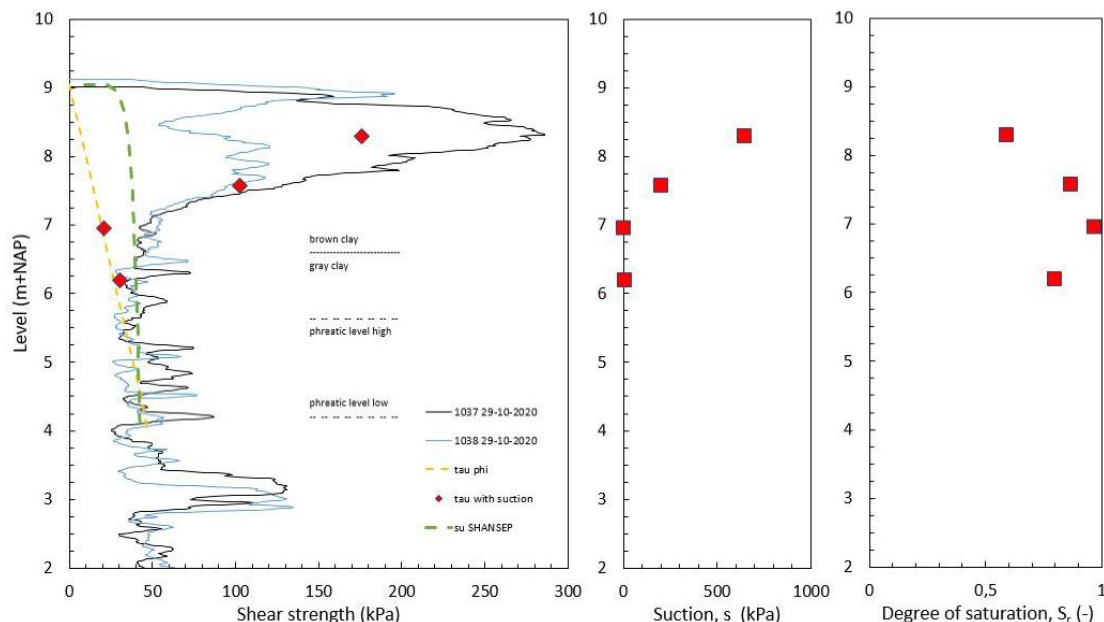
3.3 Toepassing schuifsterktemodellen in (initieel) onverzadigde grond

In deze paragraaf worden de verschillende schuifsterktemodellen nader toegelicht aan de hand van meetgegevens van de Maasdijk bij Oijen. In Figuur 3.1 en Figuur 3.2 is de gemeten schuifsterkte op basis van sonderingen en de berekende schuifsterkte met drie schuifsterktemodellen weergegeven. De schuifsterkte die uit de sonderingen is afgeleid, is gekalibreerd met resultaten van veldvintesten en triaxiaalproeven. Figuur 3.1 betreft een situatie in het vroege voorjaar (2020) met een lage zuigspanning, hoge verzadigingsgraad en relatief lage gemeten schuifsterkte. Figuur 3.2 betreft een situatie eind oktober (2020), na een droge zomer. De schuifsterkte in de bovenste 2 meter van de dijk is erg hoog, in vergelijking met de situatie in het vroege voorjaar. De zuigspanning is eveneens hoog. De verzadigingsgraad verloopt van bijna 1,0 op 2,4 meter diepte naar 0,6 op 1,0 meter diepte.

De toegepaste schuifsterktemodellen zijn het Mohr-Coulomb model met cohesie van 0 kPa (gele onderbroken lijn), het SHANSEP-model (groene onderbroken lijn) en het Mohr-Coulomb model voor onverzadigde grond (rode vierkantjes). De schuifsterkte volgens het Mohr-Coulomb model voor onverzadigde grond is alleen berekend voor de vier niveau's waar sensoren staan. Op deze niveau's kunnen de zuigspanning en de verzadigingsgraad worden bepaald. Deze berekende waarden zijn ook in de figuren weergegeven.



Figuur 3.1 Gemeten schuifsterkte en berekende schuifsterkte met drie schuifsterkte-modellen voor natte situatie met hoge verzadigingsgraad. De gemeten zuigspanning en verzadigingsgraad, op basis waarvan de schuifsterkte met het effect van zuigspanning is berekend, zijn weergegeven.



Figuur 3.2 Gemeten schuifsterkte en berekende schuifsterkte met drie schuifsterkte-modellen voor droge situatie met lage verzadigingsgraad. De gemeten zuigspanning en verzadigingsgraad, op basis waarvan de schuifsterkte met het effect van zuigspanning is berekend, zijn weergegeven.

Beide figuren laten zien dat de berekende schuifsterkte volgens het Mohr-Coulomb model tot een diepte van ruim 4 meter lager is dan de gemeten schuifsterkte met de sonderingen. De berekende schuifsterkte met het SHANSEP-model ligt voor de verzadigde situatie in het vroege voorjaar behoorlijk goed in lijn met de gemeten schuifsterkte. Voor de situatie van einde oktober stemt het SHANSEP-model alleen overeen met de gemeten schuifsterkte in de zone waar de verzadigingsgraad 1 is. Dit is tevens de zone waarin de klei een grijzige kleur heeft. Het Mohr-Coulomb schuifsterktemodel voor onverzadigde grond geeft voor de situatie in het vroege voorjaar een heel lage berekende schuifsterkte. Deze schuifsterkte komt overeen met de berekende schuifsterkte volgens het gedraineerde Mohr-Coulomb model, omdat de gemeten zuigspanning heel laag is. De berekende schuifsterkte volgens het Mohr-Coulomb model voor onverzadigde grond komt voor de situatie van einde oktober goed overeen met de gemeten schuifsterkte in de bovenste 2 meter van de dijk. Dit is tevens de zone waarin de klei een bruine kleur heeft. In de grijze klei waar de zuigspanning laag is, is de berekende schuifsterkte lager dan de gemeten schuifsterkte. Voor de IJsseldijk te Westervoort zijn overeenkomstige resultaten gevonden.

Uit deze resultaten kan worden afgeleid dat het gedraineerde Mohr-Coulomb model resulteert in een te lage schuifsterkte. Het ongedraineerde SHANSEP-model geeft een goede benadering van de gemeten schuifsterkte in de grijze klei en in de bruine klei in de situatie met een hoge verzadigingsgraad (bij Westervoort en Oijen > 0,7 à 0,8) en een lage zuigspanning. In die situatie is het grondgedrag ongedraineerd. Bij het ongedraineerde grondgedrag speelt de compactie van de grond als gevolg van rijping en als gevolg van de verdichting van de klei bij de aanleg van de dijk een belangrijke rol. Het Mohr-Coulomb schuifsterktemodel voor onverzadigde grond geeft een goede benadering van de gemeten schuifsterkte in de bruine klei in de situatie met een lage verzadigingsgraad en een hoge zuigspanning. Tabel 3.2 geeft een en ander schematisch weer.

Een ander aspect dat moet worden benoemd, is de invloed van scheurvorming door uitdroging van klei in de onverzadigde zone op de mobiliseerbare schuifsterkte. In Paragraaf 2.4 is aangegeven dat scheurvorming plaats vindt in de onverzadigde zone tot een diepte van 1,0 tot maximaal 1,5 meter beneden maaiveld, waarbij de scheurvorming het meest

intensief is in de bovenste 0,3 tot 0,5 meter. Door deze scheurvorming kan de mobiliseerbare schuifsterkte van met name ondiepere schuifvlakken 25% tot 50% (Leroueil et al., 1990 en Jardine et al., 2004) zijn van de schuifsterkte in niet-gescheurde grond.

Tabel 3.2 Zones met afnemende verzadigingsgraad met bijbehorend grondgedrag voor het analyseren van macrostabiliteit. De aanwezigheid van scheurvorming in de klei in de verschillende zones en de invloed daarvan is ook aangegeven.

Zone	Grondgedrag bij klei	Scheurvorming in klei
(Initieel) onverzadigde zone tot maximaal 1,0 à 1,5 m beneden maaiveld ($S_r < 1$)	Ongedraineerd bij relatief hoge S_r en gedraineerd met invloed zuigspanning bij relatief lage S_r	Diepe en brede scheuren in klei reduceren de mobiliseerbare schuifsterkte (schuifsterkte van gescheurde klei is 25% tot 50% van de schuifsterkte van niet-gescheurde klei)
(Initieel) onverzadigde zone dieper dan 1,0 à 1,5 m beneden maaiveld ($S_r < 1$)	Ongedraineerd bij relatief hoge S_r en gedraineerd met invloed zuigspanning bij relatief lage S_r	Kleine en smalle scheuren hebben geen invloed op mobiliseerbare schuifsterkte
Capillaire zone ($S_r = 1$)	Ongedraineerd	In principe geen scheuren aanwezig
Onder de dagelijkse gemiddelde grondwaterstand ($S_r = 1$)	Ongedraineerd	Geen scheuren aanwezig

Deze indeling geldt voor kleiig materiaal met 20 tot 50% kleideeltjes (lutum < 2 μm). De verzadigingsgraad waarboven ongedraineerd gedrag optreedt in de (initieel) onverzadigde zone bij Westervoort en Oijen is 0,7 à 0,8. Voor klei met een ander percentage kleideeltjes en daardoor ander waterretentie-eigenschappen kunnen deze waarden anders zijn. Een belangrijke kanttekening bij de genoemde verzadigingsgraad van de (initieel) onverzadigde zone is dat deze resultaten geldig zijn voor het grondgedrag wat is vastgesteld op basis van de analyse van de resultaten van de sonderingen en veldvintesten. Bij het optreden van een taludafschuiving gaat het bezwijken van de grond langzamer dan bij deze in-situ testen. Dat zou kunnen betekenen dat bij een taludafschuiving ongedraineerd grondgedrag pas optreedt bij een hogere verzadigingsgraad.

4 Meten in veld en laboratorium

4.1 Inleiding

Vanuit de voorgaande hoofdstukken volgt dat meerdere gegevens en parameters moeten worden bepaald om de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone accuraat te kunnen modelleren. Het gaat om:

- Het percentage klei en organische stof in het dijksmateriaal en de Holocene kleideklaag
- De zone waarin het freatisch vlak varieert.
- De overgang tussen grijze klei en bruine geoxideerde klei.
- De ongedraineerde schuifsterkte in de capillaire zone ($S_r = 1$).
- Het representatieve watergehalte, de verzadigingsgraad, de zuigspanning in de (initieel) onverzadigde zone voor hoog water situatie / wintersituatie.
- De representatieve schuifsterkte in de (initieel) onverzadigde zone voor hoog water situatie / wintersituatie.
- De mate van scheurvorming en diepte van scheuren (in toplaag, bovenste 1,0 à 1,5 meter).
- De invloed van scheuren op de schuifsterkte.

Een deel van deze gegevens en parameters zijn relatief eenvoudig in te winnen en worden vaak ook al bij regulier grondmechanisch onderzoek ingewonnen en/of bepaald. Het inwinnen van alle genoemde gegevens en parameters vraagt een aanzienlijke inspanning. Met name het karakteriseren van de schuifsterkte in de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) kan ingewikkeld zijn. Daarom wordt aanbevolen om van grof naar fijn te werken en nut en noodzaak van de in te winnen gegevens en parameters te onderbouwen met gevoeligheidsanalyses.

4.2 Meetmethoden

Voor het vaststellen van de bovengenoemde parameters zijn verschillende bepalingsmethoden voorhanden. De verschillende methoden worden hier per parameter kort opgesomd. Voor uitgebreidere informatie over de bepalingsmethoden, verschillen in type sensoren, uitvoeringsaspecten en interpretatie van meetgegevens wordt verwezen naar de literatuurstudie (Deltares, 2019) en het onderzoeksrapport (Deltares, 2021). Voor zover er voor een parameter meerdere bepalingsmethoden worden genoemd, zijn deze geordend van eenvoudig naar geavanceerd.

Percentage kleideeltjes en organische stof gehalte:

- Handboringen of mechanische boringen met monsternamen en het uitvoeren van korrelverdelingen (klei-, silt- en zandfracties) en bepaling van het gloeiverlies.

Ligging van het freatisch vlak en overgang van grijze naar bruine geoxideerde klei:

- Boringen met boorbeschrijvingen en boorfoto's.

Schuifsterkte:

- Sonderingen. Sondeerklassen 1 of 2 toepassen voor een goede meetnauwkeurigheid. In de capillaire zone geeft een sondering de ongedraineerde schuifsterkte. In de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) geeft een sondering alleen de ongedraineerde

schuifsterkte, indien de verzadigingsgraad van de klei voldoende hoog is. Gestart kan worden met een default waarde voor de correlatiefactor N_k . De correlatiefactor kan worden geoptimaliseerd door het uitvoeren van veldvintesten of triaxiaalproeven.

- Veldvintesten. Kunnen worden gebruikt voor rechtstreekse bepaling van de schuifsterkte in het veld. In de (initieel) onverzadigde zone gelden dezelfde restricties als voor sonderingen ten aanzien van het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte. Veldvintesten kunnen ook worden gebruikt voor bepaling van de correlatiefactor N_k .
- Boringen met ongeroerde monsternamen en triaxiaalproeven. Op basis van de proefresultaten van CU triaxiaalproeven kan een regionale proevenverzameling worden opgesteld. De proevenverzameling is in dat geval representatief voor volledig verzadigde grondcondities. Boringen met ongeroerde monsternamen en triaxiaalproeven kunnen ook worden uitgevoerd voor het bepalen van de correlatiefactor N_k . De triaxiaalproeven worden verzadigd uitgevoerd (CU procedure) voor het bepalen van de schuifsterkte voor volledig verzadigde condities of de triaxiaalproeven worden onverzadigd met in situ watergehalte uitgevoerd (UU procedure) voor het bepalen van de N_k -waarde voor condities met verschillende verzadigingsgraden. De CU triaxiaalproeven worden uitgevoerd conform het protocol (Deltares, 2016).

Watergehalte en verzadigingsgraad:

- Boringen met bepaling van het watergehalte en de verzadigingsgraad in het laboratorium. Voor een nauwkeurige bepaling is het wenselijk om ook het volumegewicht van de vaste stof te bepalen (G_s).
- Sonderingen met bepaling van de diëlektrische constante (RCPT). Met dit meetapparaat kan op elke gewenste locatie het watergehalte en de verzadigingsgraad worden bepaald. De diëlektrische constante hangt af van het percentage klei, organische stof en watergehalte. Daarom is per project altijd een kalibratie nodig. Hiervoor dienen een aantal boringen met bepalingen van het watergehalte te worden uitgevoerd.
- Sensoren voor het meten van het watergehalte in het veld. Met dit type meetapparaat kan het verloop van watergehalte en verzadigingsgraad in de tijd worden gevolgd. Sensoren op basis van de time domain reflectometry (TDR) hebben de voorkeur (Deltares, 2019). Ook bij dit type metingen geldt dat boringen met bepaling van het watergehalte in het laboratorium wenselijk zijn voor kalibratie van de metingen.

Zuigspanning:

- Via een waterretentiecurve uit de Staring-reeks (Wösten et al., 2001). Voor een gegeven grondsoort, waarvan de percentages klei en organische stof bekend zijn, kan op basis van het watergehalte de zuigspanning worden bepaald.
- Via waterretentiecurves die specifiek voor een project zijn bepaald in het laboratorium.
- Sensoren (tensiometers) voor het meten van zuigspanning in het veld. Met een tensiometer kan het verloop van de zuigspanning in de tijd worden gevolgd. Klassieke tensiometers met een meetbereik tot 80 kPa hebben in droge zomers onvoldoende meetbereik in de bovenste circa 2 meter beneden maaiveld (Deltares, 2019 en Deltares, 2021).

Effectieve verzadigingsgraad (om invloed van zuigspanning op schuifsterkte te kunnen berekenen):

- Poriëngetal van met water gevulde microporiën bepalen met correlatie van Romero et al. (2011) op basis van specifiek oppervlak van de klei (zie ook Deltares, 2019 en Deltares, 2021).

- Poriëngetal van met water gevulde microporiën bepalen met waterretentiecurve, die is doorgezet tot zeer hoge waarden van de zuigspanning.
- Poriëngetal van met water gevulde microporiën bepalen met op basis van de verdeling van het poriënvolume op basis van een Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test.

Mate van scheurvorming en diepte van scheuren (in toplaag, bovenste 1,0 à 1,5 meter):

- Visuele inspectie van de dijk met opmeten van de breedte en diepte van scheuren aan het maaiveld.
- Maken van een inspectiekuil en inspecteren en inmeten van scheurvorming beneden maaiveld (in geval van substantiële scheurvorming aan het maaiveld).

Invloed van scheuren op de schuifsterkte:

- Toepassen van literatuurwaarden (zie Paragraaf 3.3).
- Schuifsterkte bepalen op grondmonsters van grote afmetingen, waarin recht wordt gedaan aan de schaal van aggregaten en scheuren.

4.3 Strategie

Permanent verzadigde capillaire zone (grijze klei)

Voor de permanent verzadigde capillaire zone (grijze klei) is de schuifsterkte relatief eenvoudig te bepalen met standaard sonderingen (klasse 1 of 2), veldvintesten of laboratoriumproeven of een combinatie hiervan. Omdat de grond permanent verzadigd is, zal de grond ongedraineerd gedrag vertonen bij het uitvoeren van sonderingen (geldt alleen voor kleilig materiaal met voldoende lage doorlatendheid). Ter indicatie: bij Westervoort en Oijen gaat het om klei met een percentage kleideeltjes tussen 20% en 50% en de plasticiteitsindex is 0,10 tot 0,35. De aanpak en interpretatie van het veld- en laboratoriumonderzoek is dan identiek aan de aanpak en interpretatie die wordt gevolgd voor de grond onder het normale gemiddelde freatisch vlak.

Er kan worden gekozen voor een aanpak met een regionale proevenverzameling van schuifsterkte parameters op basis van triaxiaalproeven (CU procedure) of voor schuifsterkte parameters op basis van sonderingen. Nadeel van een aanpak met een proevenverzameling op basis van triaxiaalproeven is dat het aantal boringen en triaxiaalproeven dan in de praktijk vaak beperkt blijkt te zijn, terwijl dijksmateriaal (antropogene grond ook buitendijks en binnendijks) uitermate heterogeen kan zijn. Die heterogeniteit is er vaak ook op korte afstanden. Deze heterogeniteit komt vaak minder goed tot uiting in een proevenverzameling van triaxiaalproeven.

Het toepassen van sonderingen heeft het voordeel dat deze heterogeniteit wel relatief eenvoudig inzichtelijk kan worden gemaakt. De sondeerweerstand zal in de capillaire zone naar verwachting niet worden beïnvloed door de zuigspanning, omdat deze meestal vrij gering is. De schuifsterkte in de capillaire zone wordt bij ongedraineerd grondgedrag bepaald door de mate van compactie van de grond en de invloed daarvan op de ongedraineerde schuifsterkte. Voor het bepalen van de correlatiefactor N_k kunnen triaxiaalproeven of veldvintesten worden ingezet. Voor het uitwerken van de sonderingen tot schuifsterkte parameters wordt verwezen naar de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit.

Aangezien dit veld- en laboratoriumonderzoek en de analyse ervan voor de capillaire zone vergelijkbaar is met de manier van werken voor de grond onder het normale gemiddelde freatisch vlak ligt het voor de hand het genoemde onderzoek voor elk project uit te voeren.

(Initieel) onverzadigde zone (bruine klei)

Voor de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) is het bepalen van de schuifsterkte ingewikkelder. Onder normale omstandigheden zal de verzadigingsgraad in deze zone laag zijn en wordt de schuifsterkte mede bepaald door de zuigspanning. Voor een situatie met hoog water is het aannemelijk dat de verzadigingsgraad hoger zal zijn dan onder normale omstandigheden. De zuigspanning en de schuifsterkte zijn dan lager dan onder normale omstandigheden. Als de verzadigingsgraad voldoende hoog is, kan worden uitgegaan van ongedraineerd grondgedrag. Dit geldt met name wanneer overslag aan de orde is. Bij dijken waar overslag alleen met een zeer kleine kans optreedt, is het wellicht ook mogelijk dat de verzadigingsgraad in een situatie met hoog water relatief laag blijft en dat zuigspanning ook onder deze omstandigheden een bijdrage aan de schuifsterkte geeft. Ter indicatie: bij Westervoort en Oijen is sprake van ongedraineerd grondgedrag bij een verzadigingsgraad groter dan 0,7 à 0,8. Verder is voor de bovenste 1,0 à 1,5 meter van deze zone de reductie van de mobiliseerbare schuifsterkte als gevolg van scheurvorming van de klei van belang (zie Paragraaf 3.3).

Ook voor de (initieel) onverzadigde zone is er de keuze voor een aanpak met een regionale proevenverzameling van schuifsterkte parameters op basis van triaxiaalproeven of voor schuifsterkte parameters op basis van sonderingen. Ook hier is het voordeel van het toepassen van sonderingen ten opzichte van een proevenverzameling van schuifsterkte-waarden op basis van triaxiaalproeven dat meer inzicht in de heterogeniteit van het dijksmateriaal wordt verkregen. Bij het inzetten van sonderingen in de (initieel) onverzadigde zone is er echter de moeilijkheid dat de verzadigingsgraad op een willekeurig tijdstip in het jaar laag kan zijn en dat in dat geval bij het sonderen geen ongedraineerd gedrag optreedt. Bij een lage verzadigingsgraad zal de sondeerweerstand worden beïnvloed door de zuigspanning. Deze schuifsterkte is waarschijnlijk niet representatief voor de sterkte in de winter. Het is daarom van belang om de sonderingen uit te voeren wanneer de verzadigingsgraad van de klei voldoende hoog is. De periode die het meest voor de hand ligt om de sonderingen uit te voeren is februari-maart. Bij een normaal jaar met een normaal verloop van neerslag en verdamping is dit de periode waarin de verzadigingsgraad in de bruine klei het hoogst is. In andere perioden in het jaar kan de verzadigingsgraad ook voldoende hoog zijn, wanneer er voldoende lang een neerslagoverschot is. Bij het opzetten van een onderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone is het daarom belangrijk om dit onderzoek op een geschikt moment uit te voeren. Of de verzadigingsgraad voldoende hoog is om te kunnen sonderen onder ongedraineerde grondcondities, kan worden vastgesteld met boringen met bepaling van het watergehalte, met sonderingen met meting van de diëlektrische constante of met sensoren die het water gehalte meten. In principe is het mogelijk om de sondeerweerstand te corrigeren voor de zuigspanning. Dit kan met het schuifsterktemodel, zoals beschreven in Paragraaf 3.2. Echter, wanneer de verzadigingsgraad laag is en tijdens sonderen geen ongedraineerd gedrag optreedt, heeft de mate van compactie van de grond, die onder ongedraineerde condities de schuifsterkte bepaalt, geen invloed op de sondeerweerstand. De ongedraineerde schuifsterkte kan dan niet worden vastgesteld.

Om de correlatiefactor N_k te bepalen voor de (initieel) onverzadigde klei kunnen veldvintesten of triaxiaalproeven (CU procedure) worden ingezet. Voor een veldvintest geldt echter ook dat deze alleen de ongedraineerde schuifsterkte kan meten wanneer ongedraineerd grondgedrag optreedt. Daarvoor dient de verzadigingsgraad voldoende hoog te zijn.

Het voordeel van het toepassen van een proevenverzameling op basis van resultaten van triaxiaalproeven is, dat de monsters voor het uitvoeren van deze proeven volledig kunnen worden verzadigd (CU procedure). De schuifsterkte die dan wordt gemeten, is representatief voor de verzadigde situatie in de winter. Zoals eerder genoemd, is het nadeel van het

opzetten van een proevenverzameling dat de heterogeniteit van het dijksmateriaal minder goed voor het voetlicht komt.

Gevoeligheidsberekeningen

Vanwege de complexiteit van het bepalen van de schuifsterkte parameters van de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei), is het raadzaam met gevoeligheidsberekeningen vast te stellen wat de bijdrage van de schuifsterkte van deze zone is aan de stabiliteitsfactor of de faalkans. Op basis van dit inzicht kan dan de aanpak voor het onderzoek naar de (initieel) onverzadigde zone worden opgezet.

Het belang van de (initieel) onverzadigde zone zal groter zijn naarmate de overgang van bruine geoxideerde klei naar grijze klei dieper in de dijk en de Holocene deklaag ligt. Deze overgang kan worden ontleend aan boorbeschrijvingen en boorfoto's. De verwachting is dat de diepte van deze overgang ten opzichte van maaiveld sterk varieert afhankelijk van de kleisoort, de mate van compactie van de klei en de hydrologische situatie in en rondom de dijk. Uiteraard bepaalt ook de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone de mate waarin deze zone belangrijk is voor de stabiliteitsfactor of de faalkans.

Een ongedraineerde schuifsterkte van 20 kPa kan als richtwaarde voor de (initieel) onverzadigde zone worden gebruikt. Voor dijken waarvan kan worden vastgesteld dat de klei goed is verdicht, kan een ongedraineerde schuifsterkte van 40 kPa als richtwaarde worden toegepast. Voor de (initieel) onverzadigde zone met scheurvorming kan 25% van de genoemde waarden worden aangehouden. De mate van reductie van de schuifsterkte door scheurvorming hangt uiteraard sterk af van het type klei en de verzadigingsgraad. Informatie van inspecties in het veld kan worden gebruikt om een onderbouwing te geven van de mate van reductie van de schuifsterkte, die wordt toegepast in de stabiliteitsanalyses. Wanneer is vastgesteld dat er weinig scheurvorming is, kan worden overwogen een reductie van 50% op de schuifsterkte toe te passen. Deze waarden kunnen worden gebruikt bij een verkennend onderzoek om na te gaan of onderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone meerwaarde zou kunnen hebben om een analyse van de macrostabiliteit aan te scherpen. De genoemde waarden zijn nadrukkelijk niet bedoeld als default waarde, omdat deze waarden alleen zijn gebaseerd op de ervaringen bij Oijen en Westervoort.

Afhankelijk van de resultaten van de gevoeligheidsberekeningen kan het gewenste veld- en laboratoriumonderzoek worden opgezet. Wanneer het belang van de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) beperkt is, kan worden gekozen voor het uitvoeren van mechanische boringen, met ongeroerde monsternamen en het uitvoeren van triaxiaalproeven (CU procedure). Op basis hiervan kan een regionale proevenverzameling worden opgesteld. Wanneer de (initieel) onverzadigde zone een belangrijke bijdrage aan de stabiliteitsfactor of faalkans geeft, kan worden gekozen voor een diepgaander onderzoek. In dat geval kan worden gekozen voor het inzetten van sonderingen en het bepalen van een N_k waarde. Daarbij hoort dan ook het bepalen van de verzadigingsgraad tijdens het sonderen en het uitvoeren van sonderingen bij een voldoende hoge verzadigingsgraad.

5 Toepassing in macrostabiliteitsberekeningen

Uitgaande van kleiig materiaal, met 20 tot 50% kleideeltjes (lutum < 2 μm), zoals bij Westervoort en Oijen, met een hoge tot zeer hoge verzadigingsgraad (in de verzadigde zone 1,0 en in de (initieel) onverzadigde zone > 0,7 à 0,8) in de winter en bij een hoogwater-situatie, worden zowel de capillaire zone als de (initieel) onverzadigde zone in een stabiliteitsanalyse beschouwd als grondlagen met ongedraineerd materiaalgedrag. Daarbij kan het grondgedrag worden gemodelleerd met het SHANSEP-schuifsterktemodel of met het 'su-tabel-model' (in D-Stability). Het SHANSEP-model wordt toegepast wanneer de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de relatie tussen de ongedraineerde schuifsterkte en de overconsolidatieratio eenduidig kunnen worden bepaald. Is dit niet het geval dan is sprake van 'transitional soil' en kan het 'su-tabel-model' worden toegepast. De manier waarop de schuifsterkte-parameters voor het SHANSEP-model en voor het 'su-tabel-model' kunnen worden bepaald, uitgaande van verzadigde grond, is aangegeven in de WBI schematiseringshandleiding macrostabiliteit (I&M, 2021). Voor de (initieel) onverzadigde zone moet de kanttekening worden gemaakt, dat als gevolg van het relatief langzame bezwijken van grond bij een taludafschuiving ongedraineerd grondgedrag mogelijk pas optreedt bij een hogere verzadigingsgraad dan de bovengenoemde waarden (zie ook Paragraaf 3.3).

Het is aannemelijk dat er situaties zullen zijn waarin de (initieel) onverzadigde zone (bruine geoxideerde klei) in een deel van de winter en bij een hoogwater-situatie niet volledig verzadigd raakt. Dat kan het geval zijn na een droge zomer met een langdurig groot neerslagtekort. Ook bij dijken waar de kans op overslag klein is, is een niet-verzadigde bovenkant van een dijk voorstelbaar. Voor deze situaties kan het Mohr-Coulomb schuifsterktemodel worden toegepast voor de (initieel) onverzadigde grond. De zuigspanning kan in dat geval worden omgerekend naar een 'schijnbare cohesie'. In Paragraaf 3.2 is aangegeven hoe deze berekening wordt uitgevoerd. Zoals opgemerkt in Paragraaf 3.2 zal de zuigspanning met de diepte afnemen. De 'schijnbare cohesie' neemt dan ook met de diepte af. Op dit moment kan een afnemende cohesie met de diepte niet worden gemodelleerd in D-Stability.

Het kan ook worden overwogen om bij de modellering van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone met scenario's te werken. Aangezien de verzadigingsgraad van de klei afhankelijk is van het neerslagtekort zou op basis van de statistiek van het neerslagtekort een kans op een lage verzadigingsgraad kunnen worden geschat. Bij deze geschatte kans op een lage verzadigingsgraad hoort dan het scenario van gedraineerd grondgedrag met een 'schijnbare cohesie' als gevolg van zuigspanning. Het andere scenario is een hoge verzadigingsgraad met ongedraineerd grondgedrag.

In verband met scheurvorming in de bovenste 1,0 à 1,5 meter van de dijk moet worden uitgegaan van gereduceerde waarden van de schuifsterkte-parameters om de invloed van de scheuren op de mobiliseerbare schuifsterkte in rekening te brengen. Voor het beoordelen van bestaande waterkeringen lijkt het vooralsnog voldoende om de reductie van de schuifsterkte in verband met scheurvorming van klei te beperken tot de bovenste meter. Voor het ontwerpen van waterkeringen kan het in verband met de te verwachten effecten door klimaatverandering gedurende de planperiode raadzaam zijn om rekening te houden met scheurvorming tot een diepte van 1,5 meter.

Voor het uitvoeren van gevoeligheidsberekeningen kan een ongedraineerde schuifsterkte van 20 kPa als richtwaarde voor de (initieel) onverzadigde zone worden toegepast. Voor dijken waarvan is vastgesteld, dat de klei goed is verdicht, kan een ongedraineerde

schuifsterkte van 40 kPa als richtwaarde worden toegepast. Voor de (initieel) onverzadigde zone met scheurvorming kan 25% van deze waarden worden aangehouden, waarbij de schuifsterkte vanaf maaiveld toeneemt tot de volledige schuifsterkte van de niet-gescheurde klei op 1,0 à 1,5 meter diepte. Wanneer op basis van informatie uit veldinspecties aannemelijk kan worden gemaakt dat de klei weinig gescheurd is, zou van een reductie van de schuifsterkte van 50% kunnen worden uitgegaan. De genoemde waarden kunnen worden gebruikt bij een verkennend onderzoek om na te gaan of nader onderzoek naar de schuifsterkte van de onverzadigde zone meerwaarde zou kunnen hebben om een analyse van de macrostabiliteit aan te scherpen.

De betreffende waarden zijn nadrukkelijk niet bedoeld al default waarden, omdat deze waarden alleen zijn gebaseerd op de ervaringen bij Oijen en Westervoort en op literatuur.

6 Witte vlekken

Ten aanzien van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone zijn er enkele witte vlekken. Het onderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone op de meetlocaties Westervoort en Oijen heeft verschillende nieuwe inzichten opgeleverd. De analyse van alle meetdata heeft echter ook enkele onzekerheden aan het licht gebracht.

Verzadigingsgraad waarbij ongedraineerd grondgedrag optreedt

Een belangrijke witte vlek is de combinatie van kleisoort (percentage klei-, silt- en zanddeeltjes en organische stof) met bijbehorende doorlatendheid, verzadigingsgraad en snelheid van het optreden van een taludinstabiliteit waarbij ongedraineerd grondgedrag aannemelijk is. Voor de situaties bij Westervoort en Oijen, met de daar aangetroffen kleisoorten, is op basis van veld- en laboratoriumonderzoek aangetoond, dat ongedraineerd grondgedrag optreedt bij een verzadigingsgraad van 0,7 à 0,8. Omdat de snelheid waarmee een taludafschuiving optreedt en de schaal waarop de deformaties van de grond plaatsvinden anders zijn dan bij veld- en laboratoriumonderzoek moet de vraag worden gesteld of de genoemde waarden van de verzadigingsgraad ook van toepassing zijn voor een taludinstabiliteit. Daarnaast zal de verzadigingsgraad, waarboven ongedraineerd grondgedrag optreedt, ook verschillend zijn voor verschillende kleisoorten. Om hierin meer inzicht te krijgen, kunnen numerieke simulaties worden uitgevoerd. In deze simulaties kan worden gevarieerd met de klei-eigenschappen en kan de respons van de grond bij het uitvoeren van een sondering worden vergeleken met de respons van de grond bij een taludafschuiving. Over dit aspect kan ook meer inzicht worden verkregen door veld- en laboratoriumonderzoek uit te voeren op andere meetlocaties. Locaties met een oude dijk, die heterogeen is en weinig verdicht, een dijk met zandiger klei of een dijk met een dikkere (initieel) onverzadigde zone (bruine geoxideerde klei) zijn locaties waar aanvullende nieuwe inzichten kunnen worden opgedaan. Aangezien deze onzekerheid over de samenhang tussen kleisoort, doorlatendheid, verzadigingsgraad en grondgedrag een belangrijke onzekerheid is, is validatie van de onderzoeksresultaten met een in situ bezwijkproef essentieel. Deze onzekerheid betreft alleen de (initieel) onverzadigde zone en niet de capillaire zone. De mate waarin deze onzekerheid belangrijk is voor de analyse van de macrostabiliteit van een dijk, hangt dus sterk af van de ligging van de overgang tussen de grijze klei en de bruine geoxideerde klei.

Invloed scheurvorming op schuifsterkte

Een fenomeen van de bovenkant van de (initieel) onverzadigde zone is het zwellen en krimpen van de klei als gevolg van het vernatten en uitdrogen van de klei. Dit proces gaat gepaard met het ontstaan van aggregaten en scheuren in de klei. De scheuren kunnen zorgen voor afname van de mobiliseerbare schuifsterkte. Op basis van literatuur zijn in dit rapport enkele richtwaarden genoemd om de afname van de mobiliseerbare schuifsterkte van klei door krimpscheuren mee te nemen in de macrostabiliteitsanalyses. De bandbreedte van de mogelijke reductie van de schuifsterkte door scheuren is aanzienlijk (factor 2 tot 4). Daarbij is er op dit moment geen inzicht in een mogelijke relatie tussen de mate van reductie van de schuifsterkte en de hoeveelheid scheuren en de diepte en breedte van scheuren. Met onderzoek naar de schuifsterkte van grote grondmonsters, waarin de samenwerking tussen aggregaten en scheuren goed tot uitdrukking kan komen, kunnen deze richtwaarden worden aangescherpt. Ook de bovengenoemde in situ bezwijkproef geeft de mogelijkheid om de invloed van scheurvorming op de mobiliseerbare schuifsterkte van (initieel) onverzadigde klei te onderzoeken.

Sneller uitvoeren sonderingen en veldvintesten

Grondmechanisch veldonderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone (bruine geoxideerde klei) binnen een regulier grondmechanisch onderzoek is lastig uitvoerbaar, omdat een hoge verzadigingsgraad nodig is om met de reguliere in situ testen (sondering en veldvintest) de ongedraineerde schuifsterkte in deze zone te kunnen bepalen. De maanden februari of maart komen hiervoor het meest in aanmerking. Dit is echter grotendeels gesloten seizoen voor werk in en bij waterkeringen. Wellicht is het mogelijk om met (substantieel) sneller uitgevoerde sonderingen of veldvintesten ook bij lagere verzadigingsgraden ongedraineerde testen uit te voeren. De haalbaarheid hiervan kan ook worden onderzocht met de bovengenoemde numerieke simulaties. Mocht het uitvoeren van snelle sonderingen en veldvintesten kansrijk zijn, dan kan deze werkwijze vervolgens in het veld verder worden uitgewerkt.

Bepalen watergehalte en verzadigingsgraad via sondeerconus

De sondeerconus met module voor het bepalen van de diëlektrische constante (RCPT) is een ander relevant hulpmiddel voor het onderzoek naar de initieel onverzadigde zone. Met deze conus kan in situ het watergehalte en de verzadigingsgraad worden vastgesteld. Van dit al wat oudere type conus zijn er bij de Nederlandse grondonderzoeksbureaus slechts twee beschikbaar. Op dit moment is dit type conus niet meer leverbaar bij de Nederlandse conusfabrikanten. Bij voldoende belangstelling van waterkeringbeheerders kan wellicht een nieuwe conus voor het bepalen van de diëlektrische constante worden ontwikkeld.

7 Referenties

- Arcadis. (2020). Consequentieanalyse initieel niet verzadigde zone. Projectnummer c03011.000471. Referentie 084039777 0.1. 28 april 2020.
- Blight, G. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- CIRIA. (2013). *The International Levee handbook*, C731, CIRIA 2013, RP957, ISBN: 978-0-86017-734-0.
- Deltares. (2016). Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen. Deltares rapport 1230090-019-GEO-0002, Versie 03, 25 mei 2016, definitief.
- Deltares. (2019). Shear Strength of Initially Unsaturated Soil - Literature Study and Research Proposal. Deltares report 11202560-020-GEO-0001, January 16, 2019.
- Deltares. (2020). Shear Strength of Initially Unsaturated Soil - Results measurements Oijen and Westervoort. 11204453-002-GEO-0001, Version 3.0, November 30, 2020, draft.
- Deltares. (2021). Shear Strength of Initially Unsaturated Soil. 11207253-002-GEO-0001, Version 0.1. October 29, 2021. Draft.
- I&M. (2021). Schematiseringshandleiding macrostabiliteit - WBI 2017. Versienummer 4.0. Datum 28 mei 2021. Status Definitief.
- Jardine, R., Gens, A., Hight, D., & Coop, M. (2004). *Developments in Understanding Soil Behaviour*. *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference* (pp. 103-206). London: Thomas Telford.
- 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.
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique* 61, No. 4. 313-328.
- TAW. (1996). *Technisch rapport klei voor dijken*. Delft.
- Wösten, J., Veerman, G., de Groot, W., & Stolte, J. (2001). *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks*. Alterra rapport 153. Wageningen: Alterra.

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

Deltares

www.deltares.nl