

Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone

COLOFON

Titel	Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone
Opdrachtgever	HWBP De Innovatieversneller (DIV)
Auteur(s)	Alexander van Duinen (DIV/Deltares), Ben Rijnveld (DIV/Fugro)
Foto omslag	
Kenmerk	11207253-002-GEO-0002-v2.0
Inhoudelijke kwaliteitsborging	Helle Larssen (DIV/HWBP), Renger van de Kamp (DIV/KvK/RWS-WVL), Arny Lengkeek (DIV/Witteveen+Bos), Herman-Jaap Lodder (DIV/HHSK), Thom Olsthoorn (DIV/WSRL), Meindert Van (DIV/Deltares)
Datum	28 november 2025
Status	Definitief

Samenvatting

Dit handelingsperspectief is gericht op het beoordelen en ontwerpen ten aanzien van de geotechnische stabiliteit van waterkeringen, voor situaties waar de schuifsterkte van de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde zone een relevante invloed heeft op de faalkans door geotechnische instabiliteit. Met dit handelingsperspectief worden beheerders en ontwerpers 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 analyseren van de geotechnische instabiliteit. Daarbij wordt aangesloten op de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl).

In een samenwerking van De Innovatieversneller (DIV) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) en het project Kennis voor Keringen (KvK) van Rijkswaterstaat is onderzoek gedaan naar de schuifsterkte in de capillaire zone en de (initieel) onverzadigde zone van dijken en de ondergrond. Hiervoor zijn op twee locaties (Oijen en Westervoort) metingen in het veld en het laboratorium verricht. Dit onderzoek is uitgevoerd om de bepaling van schuifsterkte parameters van de onverzadigde zone voor het beoordelen en ontwerpen van dijken op geotechnische instabiliteit te verbeteren. Sinds einde 2024 loopt een vervolgonderzoek samen met Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOD). In dit vervolgonderzoek wordt gewerkt aan de kennisleemtes, die zijn geformuleerd naar aanleiding van het onderzoek voor Oijen en Westervoort. Voor dit vervolgonderzoek is een derde meetlocatie bij Paddenpol ingericht, met eenzelfde opzet als het eerdere onderzoek bij Oijen en Westervoort. Ook zijn er zeven meetlocaties, op een aantal locaties verspreid in het land, waar iedere twee maanden sonderingen worden uitgevoerd.

Door meerdere waterkeringbeheerders wordt de gedraineerde schuifsterkte, met alleen hoek van inwendige wrijving conform de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) 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.

Het onderzoek naar de sterkte in de initieel onverzadigde zone (SIOZ) is nog niet afgerond. In dit handelingsperspectief worden handvatten gegeven om de kennis die tot dusver is opgedaan toe te passen in de beoordeling of het ontwerp. In dit handelingsperspectief worden ook de witte vlekken benoemd waar nog onderzoek naar plaatsvindt. Uit het voorbeeld wat in dit handelingsperspectief is opgenomen blijkt dat de invloed van de sterkte in de initieel onverzadigde zone zeer groot kan zijn, waarbij de stabiliteitsfactor kan verdubbelen en de faalkans met meerdere ordes af kan nemen.

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	(Initieel) onverzadigde grond	7
1.3	Schuifsterkte van (initieel) onverzadigde grond	8
1.4	Relevantie (initieel) onverzadigde grond voor beheerders	9
1.5	Doelgroep en scope	10
1.6	Leeswijzer	11
2	Handelingsperspectief	12
2.1	Stap 1: Uitvoeren van verkennende analyses	12
2.2	Stap 2: Toepassen standaardwaarden	14
2.3	Stap 3: Uitvoeren van nader onderzoek	14
2.3.1	Aanpak grijze- versus bruine klei	15
2.3.2	Toepassingsgebied	15
2.3.3	Gedraineerd of ongedraineerd bezwijkgedrag	15
2.3.4	Rekenen met zuigspanningen	16
2.3.5	Afleiden sterkteparameters	17
2.3.6	Modellering (gestructureerde) toplaag	18
2.3.7	Probabilistische analyses	18
2.3.8	Heterogeniteit	18
2.3.9	Duiding van resultaten	19
2.4	Stap 4: Uitvoeren van uitgebreid onderzoek	20
3	Achtergrond (initieel) onverzadigde zone	21
3.1	Capillaire werking	21
3.2	Capillaire werking bij verschillende grondsoorten	22
3.3	Invloed van neerslag en verdamping	23
3.4	Invloed van watergehalte en zuigspanning op grond	25
4	Modellering schuifsterkte	28
4.1	Schuifsterktemodellen	28
4.2	Schuifsterktemodel voor onverzadigde grond	29
4.3	Toepassing schuifsterktemodellen in (initieel) onverzadigde grond	30
4.4	Effect scheurvorming	32
5	Metten in veld en laboratorium	34
5.1	Inleiding	34

5.2	Meetmethoden per parameter	34
5.2.1	Grondsamenstelling en plasticiteit	34
5.2.2	Ligging van het freatisch vlak en overgang van grijze naar bruine geoxideerde klei	34
5.2.3	Schuifsterkte	35
5.2.3.1	Boringen met ongeroerde monsternamen en triaxiaalproeven.	35
5.2.3.2	Sonderingen.	36
5.2.3.3	Veldvintesten	36
5.2.4	Watergehalte en verzadigingsgraad	36
5.2.4.1	Laboratorium	36
5.2.4.2	Sonderingen met bepaling van de permittiviteit en/of elektrische geleidbaarheid	37
5.2.4.3	Sensoren voor het meten van het watergehalte in het veld	38
5.2.5	Zuigspanning	38
5.2.5.1	Tensiometers	38
5.2.5.2	Bepaling waterretentiecurve in het laboratorium	38
5.2.5.3	Gebruik van 'standaard' waterretentiecurve	38
5.2.6	Effectieve verzadigingsgraad	39
5.2.6.1	Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test	39
5.2.6.2	Waterretentiecurve	39
5.2.6.3	Correlatie o.b.v. specifiek oppervlak van de klei	39
5.2.7	Mate van scheurvorming en diepte van scheuren (in toplaag, bovenste 1,0 à 1,5 meter)	40
5.2.8	Invloed van scheuren op de schuifsterkte	40
5.2.9	Heterogeniteit	40
5.2.9.1	Archiefinformatie	40
5.2.9.2	Sonderingen en boringen	40
5.2.9.3	Geofysica	40
5.3	Schuifsterktebepaling per zone	41
5.3.1	Permanent verzadigde capillaire zone (grijze klei)	41
5.3.2	(Initieel) onverzadigde zone (bruine klei)	41
6	Witte vlekken	43
6.1	Verzadigingsgraad waarbij ongedraineerd grondgedrag optreedt	43
6.2	Invloed scheurvorming op schuifsterkte	43
6.3	Bepaling ongedraineerde sterkte van niet verzadigd materiaal	44
6.4	Bepalen watergehalte en verzadigingsgraad via sondeerconus	44
6.5	Sterkte uit zuigspanningen	44
6.6	Sterkte bij lage spanningen	45
6.7	Testprocedures en interpretatie	45
6.8	Toepassingsgebied	46
6.9	Veiligheidsformat	46
6.10	Heterogeniteit	46
7	Referenties	48
A	Rekenvoorbeeld	50
A.1	Beschrijving doorsnede	50
A.2	Stap 1: Verkennende analyse	50

A.3	Stap 2: Toepassen standaardwaarden	51
A.4	Stap 3: Nader onderzoek	52
A.4.1	Toepassingsgebied	52
A.4.2	Invloed testprocedure	52
A.4.3	Afleiden sterkteparameters	52
A.4.4	Heterogeniteit	54
A.4.5	Semi-probabilistische berekeningsresultaten	54
A.4.6	Probabilistische analyses	55
A.4.7	Afwijkende situaties	56
A.4.8	Duiding resultaten	58
A.5	Stap 4: Uitvoeren uitgebreid onderzoek	58

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 geotechnische instabiliteit.

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 geotechnische instabiliteit 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, 2024). Op basis van de resultaten uit dit onderzoek tot nu toe is dit handelingsperspectief opgesteld.

Sinds einde 2023 is er een derde meetlocatie bij Paddenpol langs de IJssel, ten zuiden van Zwolle. De opzet van het veld- en laboratoriumonderzoek is vergelijkbaar met die voor Oijen en Westervoort. Daarnaast wordt onderzoek uitgevoerd gericht op de 'witte vlekken', die er vanuit dit onderzoek zijn; zie Hoofdstuk 6. Vanuit dit onderzoek naar de 'witte vlekken' vindt ook onderzoek plaats op een aantal 'light locaties' verspreid over Nederland. Dit onderzoek wordt uitgevoerd met Waterschap Drents Overijsselse Delta (WDOD) in het kader van de K&I-agenda van het HWBP.

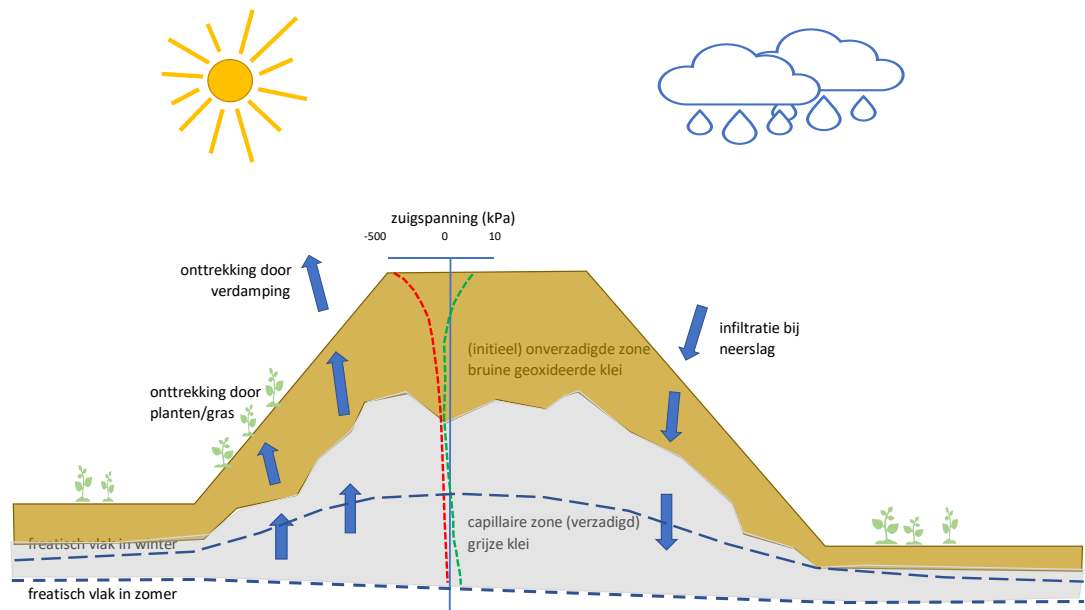
1.2 (Initieel) onverzadigde grond

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 BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) 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.



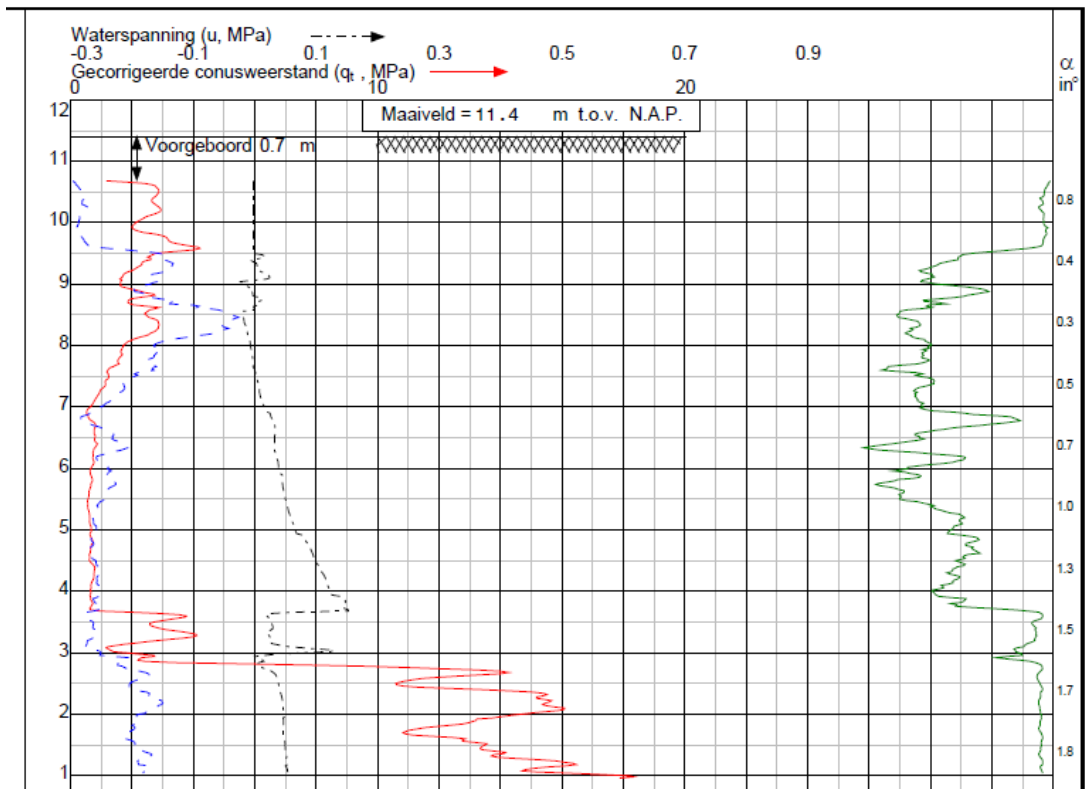
Figuur 1.1 Schematische doorsnede van een dijk met zones boven het gemiddelde freatisch vlak en de processen die daar optreden en het verloop van de zuigspanning beïnvloeden. Het verloop van de zuigspanning is schematisch aangegeven met een rode onderbroken lijn voor een droge situatie en met een groene 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 geotechnische instabiliteit 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 BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) toegepast voor (initieel) onverzadigde kleiige grondlagen. Dat het om kleiig materiaal gaat, zou volgens de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) een reden zijn om uit te gaan van ongedraineerd grondgedrag voor het beoordelen van geotechnische instabiliteit. 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 meestal een beperkte rol in de analyse van geotechnische instabiliteit. 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, 2022) uitgevoerde consequentie-analyse blijkt dat door verschillen in modellering van de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone verschillen in berekende stabiliteitsfactor tot een factor 1,4 kunnen ontstaan. Uitgedrukt in de kans op het optreden van geotechnische instabiliteit kan dit gaan om een afname van deze kans met

een factor 100 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 bermlengte tot circa 10 meter. Deze consequentie-analyse is uitgevoerd voor zeven dijkprofielen van vijf waterschappen in Oost-Nederland.

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. In hoeverre dit lokaal onderzoek nodig of nuttig is, is specifiek voor een project. In de context van beoordelen kan een scherpere beoordeling leiden tot uitstel van dijkverbetering. In de context van het ontwerpen van een dijkverbetering kan een onderzoek naar de sterkte van de onverzadigde zone aanleiding zijn tot een aanzienlijke reductie van de opgave of van een ontwerp met een kleiner ruimtebeslag. Anderzijds kunnen beperkte tekorten op het veiligheidsniveau soms ook eenvoudig worden 'weggeengineerd'.

1.5 Doelgroep en scope

Dit handelingsperspectief is gericht op het beoordelen en ontwerpen van geotechnische instabiliteit van waterkeringen, voor situaties waar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone een relevante invloed heeft op de faalkans door geotechnische 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 analyseren van de geotechnische instabiliteit. Daarbij wordt aangesloten op de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl).

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 BOI Technische Leidraden (IPLO.nl) verondersteld.

1.6 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt het handelingsperspectief uiteengezet, waarbij een aanpak van grof naar fijn wordt gevolgd. In hoofdstuk 3 t/m 5 worden de achtergronden omtrent de sterkte in de initieel onverzadigde zone toegelicht. In Hoofdstuk 6 worden de witte vlekken benoemd. In bijlage A is een voorbeeld opgenomen waarin het handelingsperspectief voor een fictief voorbeeld is toegepast.

Voor aanvullende informatie over het onderwerp wordt verwezen naar de literatuurstudie (Deltares, 2019) en het onderzoeksrapport (Deltares, 2024).

De eerste versie van dit handelingsperspectief is uitgebracht in 2021. In 2024 is er door het Adviesteam Dijkontwerp een Rode Draad geschreven met suggesties en aandachtspunten AD (2024). In deze tweede versie van het handelingsperspectief zijn deze suggesties en aandachtspunten verwerkt, alsmede de sinds 2021 opgedane kennis in het SIOZ onderzoek en de ervaringen met het toepassen van de eerste versie van het handelingsperspectief. De belangrijkste wijzigingen ten opzichte van de eerste versie van dit Handelingsperspectief betreffen:

- De ervaringen die binnen het onderzoeksproject SIOZ zijn opgedaan sinds de eerste versie van het handelingsperspectief zijn meegenomen, maar de wijzigingen zijn vooral tekstueel van aard, aangezien dit tot dusver niet heeft geleid tot andere inzichten.
- In hoofdstuk 2 is een handelingsperspectief toegevoegd. Dit is in principe een zelfstandig leesbaar hoofdstuk, waarmee projecten aan de slag kunnen. De andere hoofdstukken geven achtergronden en nadere toelichting op de inhoud van dit hoofdstuk. In dit handelingsperspectief zijn ook de opmerkingen uit de Rode Draad van het Adviesteam Dijkontwerp AD (2024) verwerkt en deze nieuwe versie is door het Adviesteam Dijkontwerp gereviewed.
- In hoofdstuk 6 zijn witte vlekken die naar boven zijn gekomen op basis van reacties van gebruikers aangevuld/toegevoegd.
- In bijlage A is een rekenvoorbeeld toegevoegd.

Bij vragen over het toepassen van deze memo, het delen van ervaringen en/of bij tips voor verbetering of uitbreiding, kan contact worden opgenomen met DIV (div@wsrl.nl).

2 Handelingsperspectief

Uit het uitgevoerde onderzoek volgt dat de keuze om de gedraineerde schuifsterkte toe te passen in kleiig materiaal in de (initieel) onverzadigde zone een (te) conservatieve keuze is. Onder relatief natte omstandigheden, als de verzadigingsgraad relatief hoog is, blijkt de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. Deze ongedraineerde schuifsterkte blijkt hoger te zijn dan de gedraineerde schuifsterkte op basis van alleen een hoek van inwendige wrijving. Onder drogere omstandigheden, als de zuigspanning hoog is, blijkt tot enkele meters onder maaiveld een hogere schuifsterkte dan de ongedraineerde schuifsterkte te worden gemobiliseerd. De exacte bepaling van de schuifsterkte in de initieel onverzadigde zone is nog onderwerp van onderzoek. Aangezien de impact van de resultaten van dit onderzoek groot kunnen zijn, is in dit hoofdstuk een handelingsperspectief opgesteld wat als doel heeft om projecten handvatten te bieden om met de onzekerheden/witte vlekken om te gaan. Hierin wordt geadviseerd om van grof naar fijn te werken. Deze aanpak is in dit hoofdstuk nader ingevuld door 4 stappen te onderscheiden, welke hierna nader worden toegelicht. Hierbij wordt opgemerkt dat de meest efficiënte volgorde en precieze invulling van de verschillende stappen per project kunnen verschillen. Zo kan het bijv. efficiënter zijn om stap 1 en 2 om te draaien of samen te voegen. Het is aan projecten om hier invulling aan te geven.

2.1 Stap 1: Uitvoeren van verkennende analyses

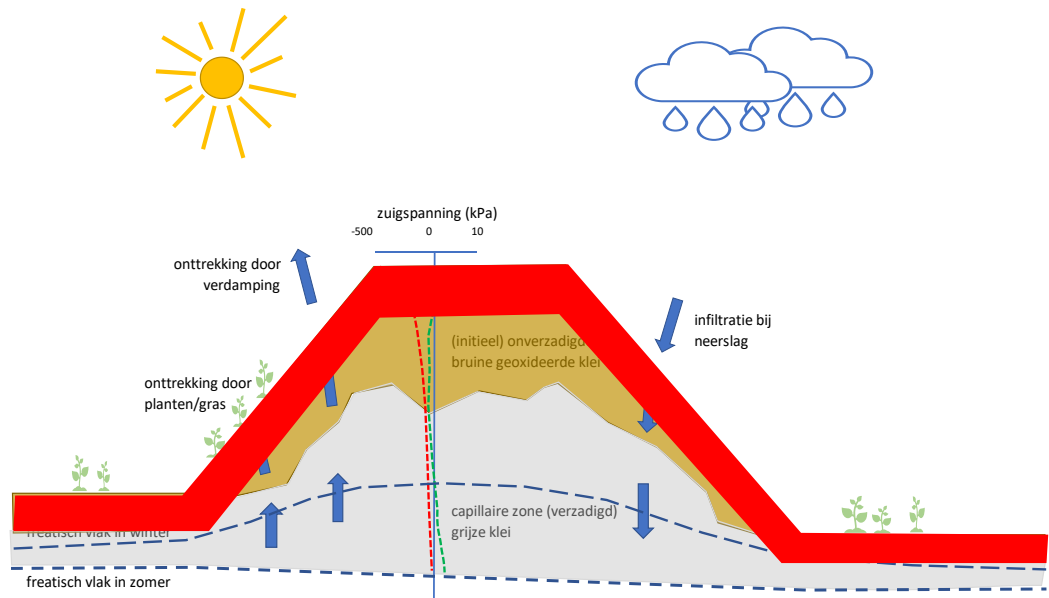
In de eerste stap worden verkennende analyses uitgevoerd, met als doel om de relevantie van het toepassen van de resultaten uit het onderzoek naar de sterkte in de initieel onverzadigde zone vast te stellen.

Enkele indicatoren dat de sterkte van de initieel onverzadigde zone relevant is, zijn:

- Het belang van de initieel onverzadigde zone zal groter zijn naarmate de hoogte van deze zone groter is, ofwel naarmate de overgang tussen de bruine en grijze klei dieper in de dijk of deklaag ligt. De ligging van deze overgang hoeft niet overeen te komen met de freatische lijn, ten eerste omdat de freatische lijn in de tijd fluctueert en ten tweede omdat de grond boven de freatische lijn (vrijwel) permanent verzadigd kan zijn. Er zal in veel gevallen wel een relatie bestaan: bij een diepe ligging van de freatische lijn onder dagelijkse omstandigheden zal de ligging van de overgang tussen bruine en grijze klei over het algemeen ook dieper liggen.
- Het belang van de initieel onverzadigde zone zal groter zijn naarmate de dikte van de cohesieve deklaag dunner is en daardoor de sterkte van het dijksmateriaal meer bepalend is voor de stabiliteit.

Als de sterkte van de initieel onverzadigde zone potentieel een grote invloed heeft op het veiligheidsbeeld of versterkingsopgave, wordt geadviseerd om verkennende berekeningen uit te voeren. Hierbij kan een ongedraineerde schuifsterkte van 20 kPa als eerste inschatting voor de initieel onverzadigde zone worden gebruikt, deze zone is met lichtblauw weergegeven in Figuur 2.1. Voor dijken waarvan kan worden vastgesteld dat de klei goed is verdicht, kan een ongedraineerde schuifsterkte van 40 kPa als eerste inschatting worden toegepast. Voor de initieel onverzadigde zone met scheurvorming kan 25% van deze waarden worden aangehouden, waarbij voor de dikte van deze zone 1,5m (haaks op het talud) kan worden aangehouden, deze zone is met rood weergegeven in Figuur 2.1. Opgemerkt wordt dat de mate van structuurvorming met de diepte af zal nemen. Gezien het verkennende karakter van de analyses is dit effect niet meegenomen. In Figuur 2.1 is ook de

permanent verzadigde zone met donkerblauw aangegeven, deze is geen onderdeel van dit handelingsperspectief.



Figuur 2.1 Te onderscheiden zones voor verkennende analyses: grijs is de grijze klei (permanent verzadigde zone), bruin is de initieel onverzadigde zone en rood de gestructureerde zone

Om te bepalen of nader onderzoek naar de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone nuttig/nodig is, kan gebruik worden gemaakt van de volgende vragen:

- 1 Hoe belangrijk is de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone in relatie tot andere uitgangspunten en onzekerheden?
- 2 Hoe belangrijk is de sterkte van (initieel) onverzadigde zone in relatie tot de beslissing die moet worden genomen?
- 3 Staat de grootte van de benodigde onderzoeksinspanning om de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone vast te stellen in verhouding met de potentiële aanscherping van de veiligheidsopgave of versterkingsopgave?

Ad 1) De onzekerheden in sterkte in de (initieel) onverzadigde zone moeten worden gezien in het licht van alle andere onzekerheden die van invloed zijn op de stabiliteitsanalyse. Als er bijvoorbeeld veel onzekerheid is over de bodemopbouw onder de dijk en deze onzekerheid heeft een grotere invloed dan de sterkte van het dijksmateriaal, ligt het voor de hand om eerst die onzekerheid te reduceren met behulp van geconsolideerde kennis.

Ad 2) Op basis van de gevoeligheidsanalyse kan de potentiële invloed van de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone worden vastgesteld. Indien bijvoorbeeld blijkt dat in alle gevallen een versterking nodig is (beoordelingssituatie), is verdere aanscherping wellicht niet nodig/nuttig.

Hierbij kan ook het verschil tussen beoordelen en ontwerpen relevant zijn:

- Bij een beoordeling gaat het om het onderbouwen van een realistische overstromingskans, waarbij in principe geen onrealistische stapeling van conservatieve uitgangspunten en behoudende keuzes passen. Met een scenario analyse en/of kansverdelingen kunnen onzekerheden in rekening worden gebracht.

Om de onzekerheden te reduceren is het monitoren van de verzadigingsgraad en het effect op de sterkte over langere tijd een voor de hand liggende optie.

- In een ontwerpsituatie ligt het maken van meer behoudende keuzen wellicht meer voor de hand. Bijvoorbeeld om te voorkomen dat een versterking zijn levensduur niet haalt en/of de meerkosten relatief beperkt zijn, zeker als adaptief ontwerpen of uitstel niet mogelijk zijn. De omgang met onzekerheden zal dan echter behoudender zijn, ook omdat deze betrekking hebben op een langere zichtperiode.

Ad 3) Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse kan ingeschat worden wat de kostenbesparing (vermeden versterking of verkleining versterkingsomvang) kan zijn als een hogere sterkte kan worden onderbouwd. Tevens kan de kans worden ingeschat dat een bepaalde hogere sterkte doormiddel van aanvullend onderzoek onderbouwd kan worden en wat de kosten van dit aanvullend onderzoek zijn. Op basis hiervan kan een afweging worden gemaakt of het 'loont' om nader onderzoek uit te voeren.

Naast kosten kan ook de factor tijd de afweging beïnvloeden. Als een versterkingsproject al in een relatief vergevorderd stadium is, kan de doorlooptijd van het nadere onderzoek problematisch zijn.

2.2 Stap 2: Toepassen standaardwaarden

In de aanpak van grof naar fijn worden in de tweede stap standaardwaarden toegepast. Hiervoor kunnen de waarden uit de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) worden gehanteerd welke zijn aangegeven voor 'Dijkmateriaal (klei)'. Het onderzoek is op dit moment nog niet voldoende ver gevorderd om deze standaardwaarden aan te passen. Vooralsnog moeten hogere waarden echter met nader/uitgebreid onderzoek onderbouwd worden, zie stap 3 en 4.

Als op basis van de standaardwaarden blijkt dat de beslisvraag beantwoord kan worden, kan na deze stap gestopt worden. Hierbij moet wel bedacht worden dat de standaardwaarden behoudende waarden zijn en dus alleen als 'stopcriterium' gehanteerd kunnen worden als er voldoende geotechnische stabiliteit onderbouwd kan worden, maar niet als hieruit volgt dat de geotechnische stabiliteit te laag is.

2.3 Stap 3: Uitvoeren van nader onderzoek

Als blijkt dat de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone van belang is om nader te onderzoeken wordt geadviseerd om dit gefaseerd op te pakken. Hoe dit nadere onderzoek eruitziet is sterk afhankelijk van welke informatie al beschikbaar is. Op hoofdlijnen wordt geadviseerd om het volgende onderzoek uit te voeren (indicatief):

- Archiefonderzoek naar opbouw dijk (type en herkomst materiaal).
- Sonderingen (h.o.h. ca. 100m) om de horizontale variaties in dijkopbouw in kaart te brengen. Geadviseerd wordt om de sonderingen in een natte periode uit te voeren, zodat deze ook gebruikt kunnen worden om de sterkte af te leiden. Daarom wordt geadviseerd om eerst op een aantal locaties de verzadigingsgraad te bepalen, voordat de rest van de sonderingen worden uitgevoerd.
- Boringen (h.o.h. ca. 500m, minimaal 3 stuks) met continue monsternamen in het dijkmateriaal om (1) de laagscheiding tussen bruine en grijze klei te bepalen (2) bepalen verticale heterogeniteit (variaties in typen klei en zandinsluitingen/zandlenzen) (3) monsterclassificatie inclusief bepaling lutum-, silt- en zandgehalte, volumiek gewicht, watergehalte, verzadigingsgraad en Atterbergse grenzen.
- In kenmerkende dwarsprofielen (hand)boringen in de buiten-, binnenkruinlijn en op de taluds om de opbouw van de dijk in kaart te brengen (bijv. zandscheggen, wegcunetten, dikte bekledingslagen etc.).

- Sterktesten (ca. 3-5 per boring) op het dijksmateriaal. Hiervoor kunnen verzadigde geconsolideerde triaxiaal compressieproeven worden uitgevoerd bij in-situ spanning in combinatie met een set DSS proeven om de invloed van anisotropie het opgelegde spanningspad vast te stellen (zie par. 5.2.3.1).

Bij de interpretatie van de resultaten en toepassing in gevoeligheidsberekeningen zijn in de volgende subparagrafen aandachtspunten genoemd. Door de nadere informatie uit de verkennende onderzoeken kan de bandbreedte omtrent het effect van het toepassen van de sterkte in de (initieel) onverzadigde zone worden verkleind. Indien de bandbreedte nog dermate groot is dat dit de beslissing kan beïnvloeden, kan doorgedaan worden naar stap 3 waarin uitgebreid onderzoek wordt uitgevoerd om de resterende kennisleemtes nog verder te reduceren. Als het nader onderzoek al voldoende inzicht heeft opgeleverd om de beslissing vast te stellen, is het uiteraard niet nodig om stap 4 nog te doorlopen.

Hierbij is het van belang om de onzekerheden in samenhang te beschouwen. Hiermee wordt bedoeld dat er mogelijk ook andere onzekerheden zijn die een grote invloed hebben (zie ook punt 1 in stap 1). Dit betekent enerzijds dat het effectiever kan zijn om die onzekerheden te reduceren bijvoorbeeld als de impact daarvan groter is, of het een kleinere inspanning vergt. Anderzijds kan in de keuzes die gemaakt worden omtrent de onzekerheden een afweging worden gemaakt waarin deze gezamenlijk worden beschouwd. Als bijvoorbeeld voor andere onzekerheden al een erg conservatieve keuze is gemaakt, kan voor een andere onzekerheid wellicht een minder conservatief uitgangspunt worden gekozen om stapeling van onzekerheden te voorkomen.

2.3.1 Aanpak grijze- versus bruine klei

Voor de permanent verzadigde capillaire zone (grijze klei) kan de schuifsterkte op vergelijkbare wijze worden afgeleid als voor de grond onder het normale gemiddelde fretisch vlak; zie hiervoor de BOI Technische Leidraden (IPLO.nl). Wel geldt hier het aandachtspunt dat de heterogeniteit van antropogeen materiaal anders is dan voor natuurlijke grondlagen.

Voor de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) is het bepalen van de schuifsterkte ingewikkelder. De specifieke aandachtspunten die hier spelen zijn onderwerp van het lopende onderzoek, op basis waarvan dit handelingsperspectief is opgesteld.

2.3.2 Toepassingsgebied

Een eerste stap bij het analyseren van het veld- en laboratoriumonderzoek is om na te gaan of het materiaal binnen het toepassingsgebied valt waarvoor inmiddels enige ervaring is opgedaan. Dit betreft klei met de volgende eigenschappen: goed verdichte klei met een percentage kleideeltjes (lutumgehalte, < 2 µm) tussen 20% en 50%, organische stof gehalte tussen 2 en 5% en plasticiteitsindex 0,10 tot 0,35.

Indien de klei hier niet aan voldoet, leidt dit tot extra onzekerheid. Dit wil echter niet zeggen dat de kennis uit dit onderzoek helemaal niet toepasbaar is. In die gevallen zal er echter relatief veel onderzoeksinspanning nodig zijn, zodat het raadzaam is om aan te sluiten bij het lopende onderzoek naar de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone.

2.3.3 Gedraineerd of ongedraineerd bezwijkgedrag

Om te bepalen of het materiaal in de initieel onverzadigde zone gedraineerd of ongedraineerd bezwijkt kunnen de criteria uit de BOI Technische Leidraden (IPLO.nl) worden gebruikt. Als uit kan worden gegaan van ongedraineerd bezwijkgedrag leidt dit voor de initieel onverzadigde zone over het algemeen tot een hogere sterkte. Daarom is het belangrijk om vast te stellen of gedraineerd of ongedraineerd bezwijkgedrag wordt verwacht.

Voor situaties waar de klei in de initieel onverzadigde zone contractant bezwijkgedrag vertoont, is de aanname van ongedraineerde bezwijkgedrag een behoudende keuze, omdat de gedraineerde sterkte dan over het algemeen hoger of in dezelfde orde grootte ligt. Over het algemeen vertoont grond in de onverzadigde zone echter dilatant bezwijkgedrag, waardoor de aanname van ongedraineerd bezwijkgedrag over het algemeen juist tot een hogere sterkte leidt. Bij gedraineerd bezwijken, speelt voor deze grondsoorten echter de rol van resterende zuigspanningen een rol, wat resulteert in een schijnbare cohesie. Hierdoor kan de sterkte aanzienlijk hoger zijn dan de gedraineerde sterkte op basis van alleen de hoek van inwendige wrijving, zie ook Deltares (2019).

Uit het onderzoek blijkt dat de conusweerstand in verzadigde condities lager is dan in onverzadigde condities, zodat het bepalen van de sterkte bij verzadigde condities op basis van die constatering een conservatieve keuze is. De vraag is echter of de verhouding tussen belastingssnelheid en (bulk)doorlatendheid van de ondergrond vergelijkbaar is als tijdens het sonderen, zie ook paragraaf 6.1. Om die reden wordt vooralsnog voorgesteld om de sterkte uit laboratoriumproeven te begrenzen op eenmaal de verticale effectieve spanning onder dagelijkse omstandigheden. Overweging bij de keuze voor deze waarde is dat bij een gedraineerd spanningspad in een isotroop geconsolideerde triaxiaalproef en een hoek van inwendige wrijving van ca. 30 graden een sterkte van éénmaal de verticale effectieve consolidatiespanning wordt gevonden. Uiteraard is het ook mogelijk dat de hoek van inwendige wrijving hoger is of de gronddrukcoëfficiënt hoger of lager is dan 1 en tevens kan in bijv. een DSS proef een andere sterkte worden gevonden, maar dit geeft een indicatie van de sterkte die gemobiliseerd kan worden zonder dat op wateronderspanningen tijdens bezwijken wordt gerekend en wordt voor nu als een praktische begrenzing van de sterkte gezien in het licht van deze onzekerheid.

2.3.4 Rekenen met zuigspanningen

In de zone boven de freatische waterstand bij extreme omstandigheden kan voor slecht doorlatend materiaal met de ongedraineerde sterkte worden gerekend als de verzadigingsgraad voldoende hoog is of met de gedraineerde sterkte met zuigspanningen als de verzadigingsgraad lager is. Met het toekennen van schuifsterkte in de zone boven de freatische waterstand (bij hoogwateromstandigheden) als gevolg van capillaire werking (zuigspanningen) is nog weinig ervaring, met name of deze ook tijdens hoogwater condities aanwezig zullen zijn (capillaire werking) en/of zullen ontstaan bij een afschuiving (dilatant gedrag). Het verwaarlozen van het effect van zuigspanningen in de zone boven de freatische waterstand is een behoudende keuze. Dit kan er echter tevens toe leiden dat bij een stijgende freatische lijn de stabiliteitsfactor toeneemt, omdat de zone met de hogere ongedraineerde schuifsterkte in de glijvlakanalyse groter wordt.

Als pragmatische aanpak wordt geadviseerd om voor slecht doorlatende lagen zowel onder als boven de freatische lijn ongedraineerde sterkteparameters toe te passen, ook als de verzadigingsgraad lager is dan waarbij volledig ongedraineerd gedrag kan worden verwacht. Op deze manier wordt voorkomen dat bij een stijgende freatische lijn de berekende stabiliteitsfactor toeneemt. Tevens is dit naar verwachting alsnog een behoudende keuze, omdat uit het onderzoek tot dusver is gebleken dat de gedraineerde sterkte met zuigspanningen hoger is dan de (verzadigde) ongedraineerde sterkte: de sondeerweerstand bij verzadigde condities zijn de laagste gemeten waarden in de reeks sonderingen die over de seizoenen zijn uitgevoerd. Een openstaande witte vlek is nog wel of (1) dit voor alle kleisoorten geldt en (2) of een langzaam afschuifproces (bij een relatief lange belastingduur) tot een lagere (ongedraineerde of partieel gedraineerde) sterkte leidt dan de ongedraineerde sterkte uit sonderingen en laboratoriumtesten met standaard

belastingssnelheid. Deze witte vlek is nader toegelicht in paragraaf 6.1. Om deze reden wordt voorsnog geadviseerd om de sterkte uit proefresultaten te begrenzen op eenmaal de verticale effectieve consolidatiespanning, zie ook paragraaf 2.3.3.

Bedacht moet worden dat het niet meenemen van zuigspanningen ervoor kan zorgen dat onder dagelijkse omstandigheden de berekende stabiliteitsfactor onderschat wordt. Hierdoor kan de fragility curve horizontaler lopen dan in werkelijkheid het geval is. Hierdoor zou (onterecht) geconcludeerd kunnen worden dat bijvoorbeeld de buitenwaterstand of neerslag (waardoor de verzadigingsgraad toeneemt) slechts een beperkt effect op de stabiliteit van de kering heeft.

Voor lagen die gedraineerd bezwijken wordt geadviseerd geen zuigspanningen mee te nemen, aangezien dit materiaal weinig capillaire werking heeft.

2.3.5 Afleiden sterkteparameters

Omdat er nog beperkt ervaring is met het bepalen van de sterkte van initieel onverzadigde zone op de manier uit dit handelingsperspectief, wordt geadviseerd om van grof naar fijn te werken.

Eerste stap is om het grondgedrag van het materiaal goed te begrijpen. Bijvoorbeeld of sprake is van ongedraineerd of gedraineerd gedrag bij bezwijken (zie par. 2.3.3) en wat de invloed van de testprocedure (bijv. TX of DSS proeven) is op de gevonden sterkte (zie par. 5.2.3.1).

De tweede stap is het bepalen hoe om te gaan met heterogeniteit, hier wordt in paragraaf 2.3.8 nader op ingegaan.

De derde stap is het kiezen van een geschikt model en het bepalen van de parameters (incl. spreiding) voor dit model. 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'. Voor deze grond kan zowel het 'su-tabel-model', als het SHANSEP-model (met gefitte SHANSEP-parameters) worden toegepast. In par. 5.2.3.1 wordt nader ingegaan op het uitvoeren van laboratoriumproeven en in par. 5.3 op de schuifsterktebepaling. Voor de parameterbepaling kan gebruik worden gemaakt van de spreadsheets uit DIV (2025).

In stap 2 wordt geadviseerd om de sterktetesten verzadigd uit te voeren, waarbij deze isotroop geconsolideerd worden onder dagelijkse spanningscondities.

Wanneer de sterkte van de grond uit correlaties met de sondeerweerstand wordt bepaald, is het van belang om vast te stellen of bij het sonderen sprake is geweest van ongedraineerd of dat sprake is geweest van (partieel) gedraineerd gedrag. Als uit bepalingen van het watergehalte en de verzadigingsgraad blijkt dat de verzadigingsgraad dicht bij 1,0 is, kan voor slecht doorlatende grond uit worden gegaan van ongedraineerd gedrag. Als deze waarde lager is, is dit niet zeker. Om te bepalen bij welke verzadigingsgraad sprake is van ongedraineerd gedrag is het nodig om op verschillende momenten te sonderen en dan ook de verzadigingsgraad te bepalen. Boven een bepaalde verzadigingsgraad (voor Westervoort en Oijen ca. 0,85 à 0,9) verandert de sondeerweerstand niet substantieel meer en kan ongedraineerd gedrag worden verondersteld. Beneden deze verzadigingsgraad neemt de sondeerweerstand toe bij afnemende verzadigingsgraad ten gevolge van het effect van zuigspanningen. Dit maakt de interpretatie van de sonderingen lastiger, waarbij de

correlatiefactor mogelijk afhankelijk is van de verzadigingsgraad. Overigens bleek de correlatiefactor bij Ooijen en Westervoort niet afhankelijk van de verzadigingsgraad.

Over het algemeen zijn er relatief veel sonderingen beschikbaar. Het kan dan een pragmatische aanpak zijn om de variaties in schuifsterkte met sonderingen in kaart te brengen en dan op basis van de aangetroffen variaties gericht sterkte testen te doen op representatieve locaties.

2.3.6 Modelling (gestructureerde) toplaag

Uit literatuur blijkt dat ten gevolge van structuurvorming in de toplaag de schuifsterkte met een factor 2 tot 4 kan reduceren. De dikte van deze zone is over het algemeen ca. 1,0-1,5m, waarbij de scheurvorming het meest intensief is in de bovenste 0,3 tot 0,5 meter. Omdat de mate van scheurvorming afneemt met de diepte, moet ook de reductiefactor op de schuifsterkte afnemen met de diepte.

Als pragmatische aanpak wordt geadviseerd om voor de bovenste 1,5m onder maaiveld de POP met een factor 7 te reduceren. Dit resulteert in een reductie van de sterkte die ca. een factor 4 aan maaiveld bedraagt tot circa een factor 1,5 op 1,5m diepte. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het materiaal met het SHANSEP-model wordt gemodelleerd.

Bovenstaande geldt voor 'normale' structuurvorming, waarbij scheuren onder natte condities weer dicht zwellen. Voor situaties waar permanent scheuren aanwezig zijn en dus sprake is van losse aggregaten, kan de reductie groter zijn. Die situaties worden echter over het algemeen door zorgvuldige uitvoering voorkomen en/of in het beheer en onderhoud hersteld.

Over het algemeen heeft een dijk een aparte bekledingslaag. Deze bekledingslaag is vaak opgebouwd uit klei met afwijkende eigenschappen ten opzichte van de kern. Hierdoor kan het grondgedrag en de sterkte afwijkend zijn van de sterkte van de kern. Daarom wordt geadviseerd om te verifiëren of de eigenschappen van de klei in de toplaag (lutumgehalte, plasticiteitsindex etc.) te vergelijken zijn met het materiaal in de kern van de dijk. Tevens wordt geadviseerd om ook sterkteproeven op materiaal uit deze bekledingslaag uit te voeren bij het spanningsniveau bij dagelijkse omstandigheden, dus bij spanningsniveaus van ca. 10-25kPa.

2.3.7 Probabilistische analyses

De standaard kalibratie relatie voor semi-probabilistische stabiliteitsanalyses is niet per se passend als de sterkte van de initieel onverzadigde zone op de wijze uit dit handelingsperspectief wordt bepaald, zie ook par. 6.9. Daarom is het raadzaam om probabilistische analyses uit te voeren. Als gebruik wordt gemaakt van een semi-probabilistische aanpak, wordt geadviseerd om te verifiëren of de 'standaard' semi-probabilistische kalibratierelatie passend is. Afwijkingen kunnen optreden omdat de bandbreedte van de sterkte van de lagen in de initieel onverzadigde zone bepaald met de aanpak uit dit handelingsperspectief groter kan zijn dan in de kalibratierelatie is aangenomen. Ook is het effect van het toepassen van de aanpak uit dit handelingsperspectief over het algemeen groot in gebieden met dunne deklagen, waardoor het voor kan komen dat er minder grondlagen worden doorsneden dan de cases waaruit de kalibratierelatie is afgeleid, waardoor de standaard kalibratierelatie niet passend kan blijken. Voor meer handvatten omtrent het uitvoeren van probabilistische analyses wordt verwezen naar Deltares (2023).

2.3.8 Heterogeniteit

Dijksmateriaal kan sterk heterogeen zijn. Zo kan er variatie zijn in de verdichtingsgraad, kunnen er verschillende typen klei zijn toegepast, kunnen er zandlenzen of insluitingen aanwezig zijn en is er sprake van 'natuurlijke' variaties binnen 'homogene' op vergelijkbare

wijze verdichte klei. De invloed hiervan op de sterkte kan zeer groot zijn. Het is daarom van belang om deze heterogeniteit in kaart te brengen en mee te nemen in de modellering. Dit betreft zowel heterogeniteit in langsrichting van de dijk (hier is het vaak de vraag of de dijk overal met vergelijkbaar materiaal is opgebouwd of dat partijen met verschillende herkomst/eigenschappen zijn toegepast en/of er langs het dijktraject gevarieerd is met het versterkingsontwerp) als in de dwarsdoorsnede van de dijk (hier is vaak de vraag of de dijk wanneer, hoe en met welk materiaal de dijk bij verschillende versterkingsrondes is uitgebouwd).

Zandige insluitingen vragen hierbij speciale aandacht. Deze zullen in de basis gedraineerd bezwijkgedrag vertonen, waar rekening mee zal moeten worden gehouden in de sterkte modellering. Bijvoorbeeld door deze laagjes apart te modelleren of een 'bulk' sterkte af te leiden, waarin dit verdisconteerd is. Daarnaast kunnen deze zandlaagjes echter ook effect hebben op de verzadigingsgraad en de snelheid waarmee de waterspanningen reageren op een verhoogde buitenwaterstand en/of overslag. Ook kunnen deze laagjes relatief snel verzadigen en zelfs verweken als de druk in deze laagjes op kan lopen bijvoorbeeld ten gevolge van golfoverslag. Deze aspecten kunnen een grote invloed hebben op de sterkte van deze zandlenzen die dan zelfs lager kan worden dan de 'normale' gedraineerde sterkte.

Voor een dijkverbeteringsproject geldt uiteraard dat niet elke 50 of 100 meter een ander ontwerp kan worden gemaakt. Hierbij blijft echter gelden dat afwijkingen in de opbouw van een dijk relevant kunnen zijn voor de mechanismen die kunnen optreden. Hier zal in het ontwerp of beoordeling rekening mee moeten worden gehouden. Hierbij is het van belang of er sprake is van 'bekende' of 'onbekende' heterogeniteit. Als precies bekend is hoe de heterogeniteit van de dijk eruitziet, kan hier gericht rekening mee worden gehouden in de beoordeling of het ontwerp. Er is dan duidelijk onderscheid in 'sterke' en 'zwakke' doorsneden. Als de heterogeniteit niet goed in kaart te brengen is (of gebracht is), is het uiteraard het meest wenselijk om dit alsnog te doen. Mocht dit niet mogelijk zijn, dan moet deze onzekerheid in rekening worden gebracht. Dit kan bijvoorbeeld door scenario's met een kans van voorkomen te definiëren en deze mee te nemen in de beoordeling of het ontwerp (schematiseringsfactor). In veel gevallen zullen de scenario's waarin meer zand(ig) gedrag wordt aangenomen al snel dominant worden als gevolg van de aanmerkelijk lagere gedraineerde schuifsterkte.

Een pragmatische benadering om heterogeniteit mee te nemen is om voor de zone waar zandinsluitingen aanwezig (kunnen) zijn dezelfde reductiefactor op de POP toe te passen als in de gestructureerde zone. Als de zandinsluitingen in de initieel onverzadigde zone gezamenlijk een dikte van meer dan circa 0,5m hebben, wordt geadviseerd deze als aparte lagen te modelleren. Voor de kleilagen tussen de zandinsluitingen wordt geadviseerd om dezelfde sterkte als de gestructureerde zone toe te passen, vanwege de ongunstigere drainagecondities. Onder het niveau van de onderste zandinsluiting kan de sterkte uit de niet gestructureerde zone toe worden gepast.

Voor ondiepe glijvlakken en/of stabiliteit van de bekleding kunnen (doorgaande) zandige lagen van een dikte van ca. 10cm al een grote invloed op de stabiliteit hebben. Daarom wordt voor die mechanismen geadviseerd zandige lagen met een dikte vanaf circa 10cm als aparte laag te modelleren. Hierbij moet bedacht wordt dat als de kern van de dijk uit goed verdichte klei bestaat er na een initiële afschuiving over het algemeen nog aanzienlijke reststerkte aanwezig is.

2.3.9 Duiding van resultaten

Het is belangrijk om de resultaten van de stabiliteitsanalyses te duiden in relatie met het verhaal van de kering en praktijkervaringen.

Bij praktijkervaringen kan worden gedacht aan ervaringen die zijn opgedaan bij het beheer en onderhoud, tijdens het grondwerk bij uitvoering van een dijkversterking of bij het graven van proefsleuven of sleuven voor de aanleg van kabels en leidingen. Als bijvoorbeeld steile taluds rekenkundig stabiel zijn en in praktijk vergelijkbare taluds juist instabiliteiten laten zien, is de vraag of de schuifsterkte juist is ingeschat en/of de opbouw van de dijk voldoende nauwkeurig in kaart is gebracht.

2.4 Stap 4: Uitvoeren van uitgebreid onderzoek

Met behulp van het verkennende onderzoek (zie stap 2) kan beter ingeschat worden of de modeleerwijze van de sterkte van de (initieel) onverzadigde zone inderdaad substantieel bijdraagt aan de sterkte van de dijk en kan de bandbreedte in deze sterkte gereduceerd worden. Als blijkt dat de bandbreedte nog steeds groot is en aanscherping gewenst is, kan uitgebreid onderzoek worden uitgevoerd. Hierbij kan gedacht worden aan:

- Verdichten van het sondeonderzoek. Bijvoorbeeld door op een aantal locaties een reeks sonderingen met een kleinere sondeerafstand (ca. 10m) uit te voeren om meer inzicht in de heterogeniteit van het materiaal te verkrijgen. Deze sonderingen kunnen ook gebruikt worden om de variabiliteit van de schuifsterkte op de schaal van een potentieel schuifvlak af te leiden.
- Meten van aanvullende parameters tijdens het sonderen, zoals bijv. de permittiviteit (diëlektrische constante) en/of elektrische geleidbaarheid (RCPT).
- Verdichten booronderzoek en uitbreiden laboratoriumonderzoek. Bijvoorbeeld om de heterogeniteit in samenstelling van de klei vast te stellen of de proeven met sterktetesten uit te breiden.
- Uitvoeren van 2-3 sonderingen naast de boringen om de variabiliteit op korte afstand vast te stellen, met name als de correlatiefactor N_k wordt afgeleid.
- Geofysisch onderzoek om zandlenzen, wegcunetten of zandscheggen in kaart te brengen.
- Veldvinproeven als cross check op de gevonden in situ sterkte.
- In situ metingen van het watergehalte inclusief kalibratie in het laboratorium
- Bepaling waterretentiecurve in het laboratorium, eventueel inclusief bepaling van met water gevulde microporiën
- In situ metingen van de zuigspanningen met tensiometers
- Bepalen poriëngetal van met water gevulde microporiën, bijvoorbeeld met correlaties, Mercury Intrusion Porosimetry test of waterretentiecurve die is doorgezet tot zeer hoge waarden van de zuigspanning.
- Bepalen scheurvorming in het veld, bijvoorbeeld visuele inspectie of graven van inspectiekuilen.
- Bepalen invloed scheurvorming op schuifsterkte door sterkteproeven op grondmonsters met grote afmetingen.

Voor meer achtergronden per meetmethode wordt verwezen naar hoofdstuk 5. Met een aantal onderzoekstechnieken is beperkte praktijkervaring. Daarom wordt in dat geval ook geadviseerd om aansluiting te zoeken bij het lopende onderzoek, zodat de laatste kennis en ervaring meegenomen wordt.

3 Achtergrond (initieel) onverzadigde zone

3.1 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 krachterevenwicht 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.

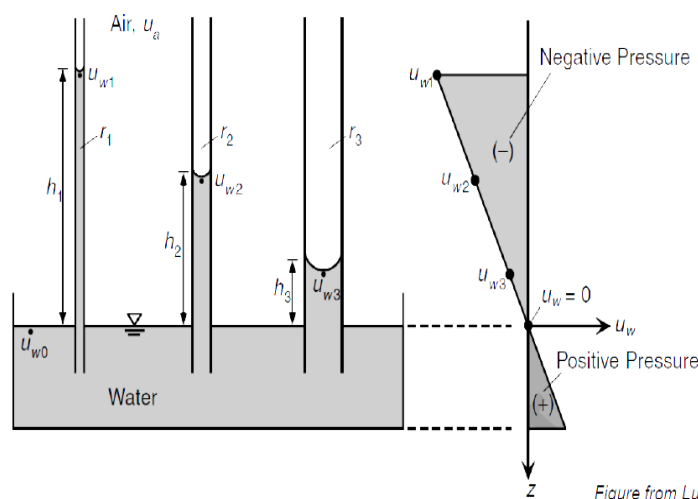
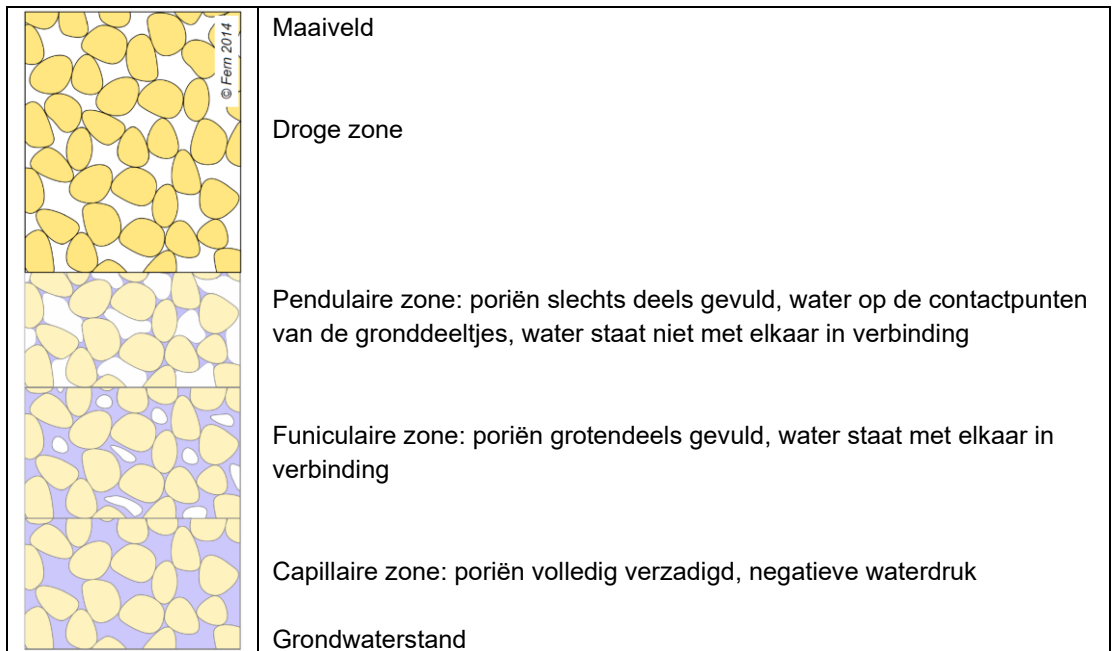


Figure from Lu & Likos (2004)

Figuur 3.1 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 3.2 Opeenvolgende zones boven de grondwaterstand waarin de verzadigingsgraad afneemt.

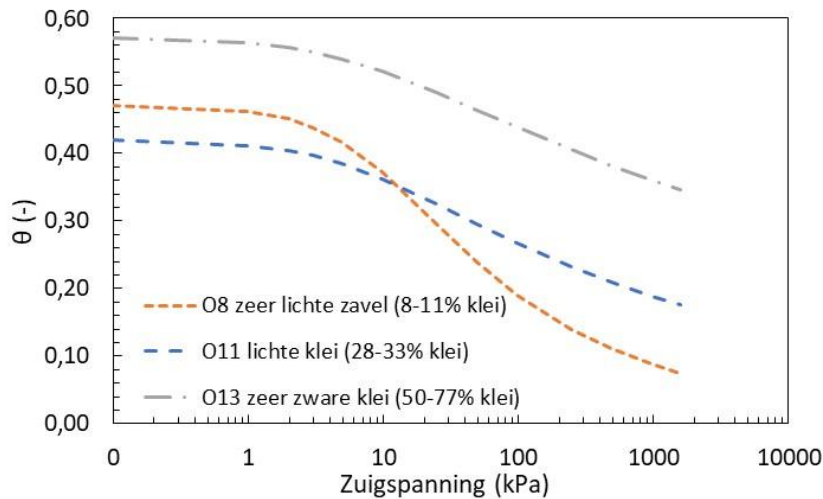
De mate waarin de poriën zijn gevuld met water wordt uitgedrukt met de verzadigingsgraad S_r . De verzadigingsgraad is het volume water ten opzichte van het volume poriën. In verzadigde grond is de verzadigingsgraad 1 en in volledig droge grond is de verzadigingsgraad 0.

Het genoemde krachtenevenwicht van de adhesiekrachten tussen gronddeeltjes en water en de cohesiekrachten tussen de waterdeeltjes onderling zorgt ervoor 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.

3.2 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 3.3 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.

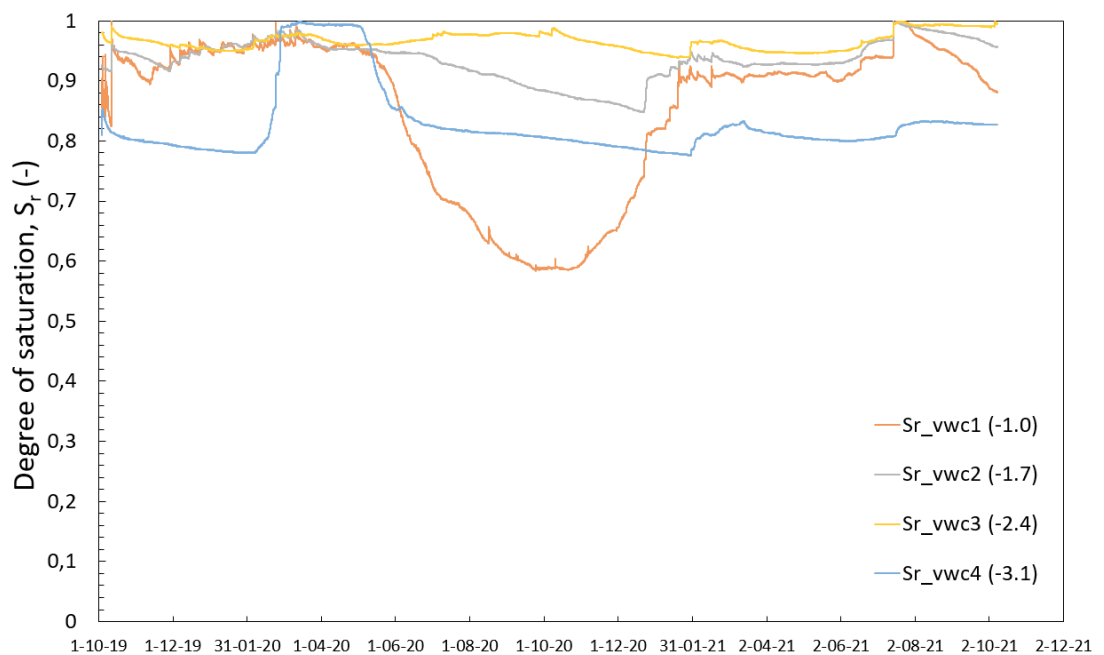
3.3 Invloed van neerslag en verdamping

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 door het buitentalud of verticaal door de deklaag ten gevolge van 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.



Figuur 3.4 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.

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.

3.4 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 kunnen kluiten (aggregaten) en scheuren ontstaan. 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.

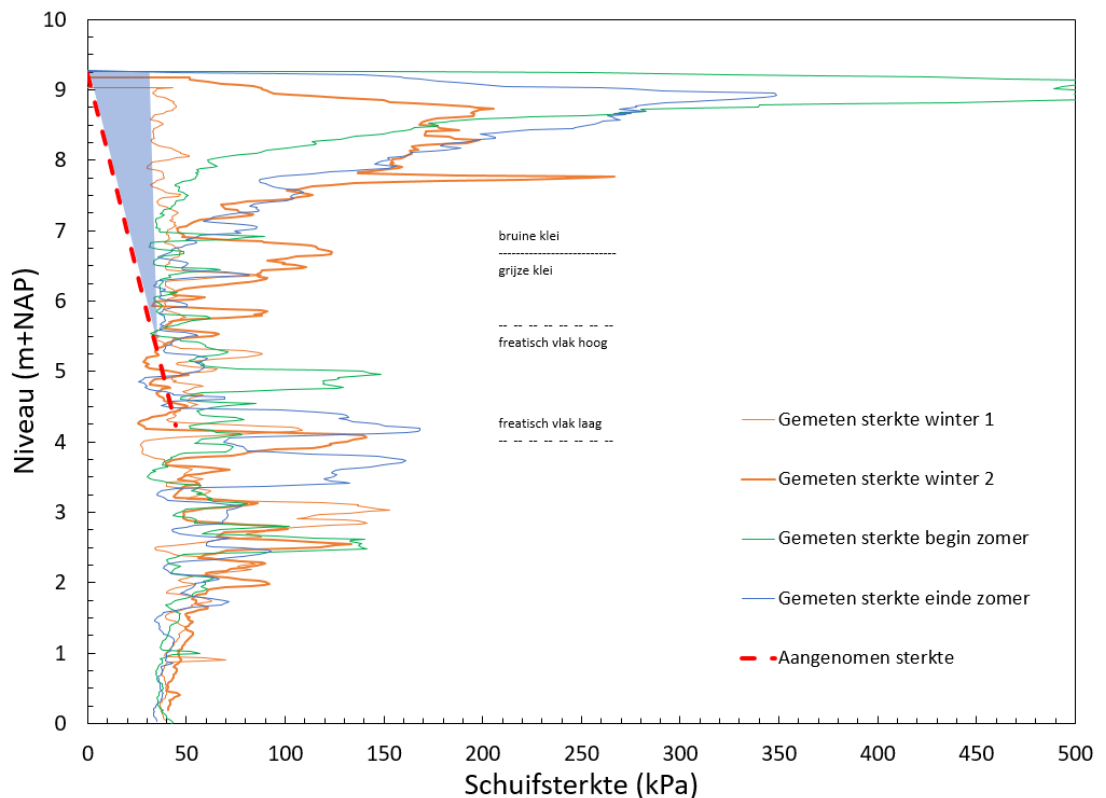
Figuur 2.5 laat de schuifsterkte van de meetlocatie Oijen zien, zoals deze is afgeleid uit enkele sonderingen. De sonderingen zijn op korte afstand van elkaar uitgevoerd. De dijk is een relatief homogene dijk die midden vorige eeuw is aangelegd (Deltares, 2024). De fluctuaties in de schuifsterkte in 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, 2024).

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 kan ook aanzienlijk variëren. Deze variatie is het gevolg van het neerslagtekort in de voorafgaande zomer en nazomer. Na een natte zomer is de schuifsterkte relatief laag met minimale waarden van de zuigspanning en bedraagt circa 35 kPa. Na een droge zomer bedraagt de schuifsterkte tot 200 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 geotechnische instabiliteit 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 3.5 Schuifsterkte afgeleid uit sondeerweerstand op verschillende tijdstippen. 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.

4 Modelling schuifsterkte

4.1 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 0,85 à 0,9. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat het aandeel met lucht gevulde poriën zodanig beperkt is, dat transport van lucht in het korrelskelet slechts zeer beperkt mogelijk is Vo et al., (2022).

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 geotechnische instabiliteit met glijvlakmodellen, zoals voor het beoordelen van geotechnische instabiliteit volgens de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) wordt gedaan, worden relatief eenvoudige schuifsterktemodellen toegepast, die slechts één van deze condities van de grond kunnen beschrijven. Geavanceerdere schuifsterktemodellen, die voor numerieke analyses worden ingezet, kunnen het gedrag van grond vollediger beschrijven.

In Paragraaf 4.2 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 BOI Technische Leidraden (IPL0.nl).

4.2 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, 2024). 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)

Voor Westervoort en Oijen is $e_{wm} = 0,14$. Hierdoor is S_{rM} tot 20% lager dan S_r bij $S_r = 0,6$.

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 BOI Technische Leidraden (IPL0.nl). Voor de 'critical state' ($c' = 0$ kPa) van de grond en uitgaande van niet-associatief grondgedrag, in overeenstemming met de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl), 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):

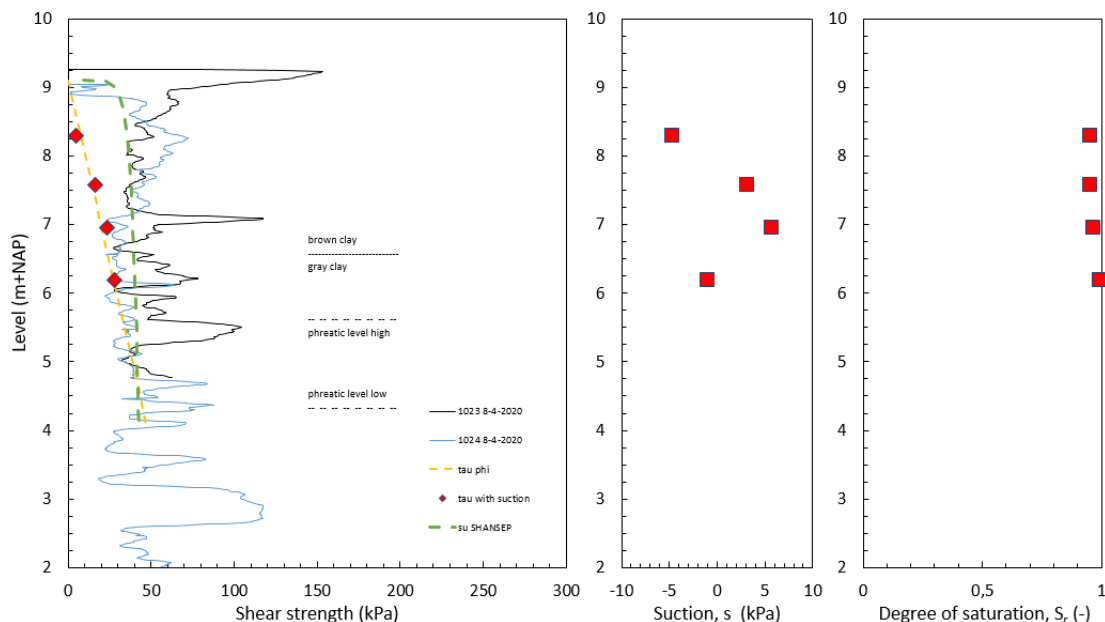
$$(sS_{rM}) \cdot \sin(\phi') = c' \quad (3.5)$$

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 toepasbaar.

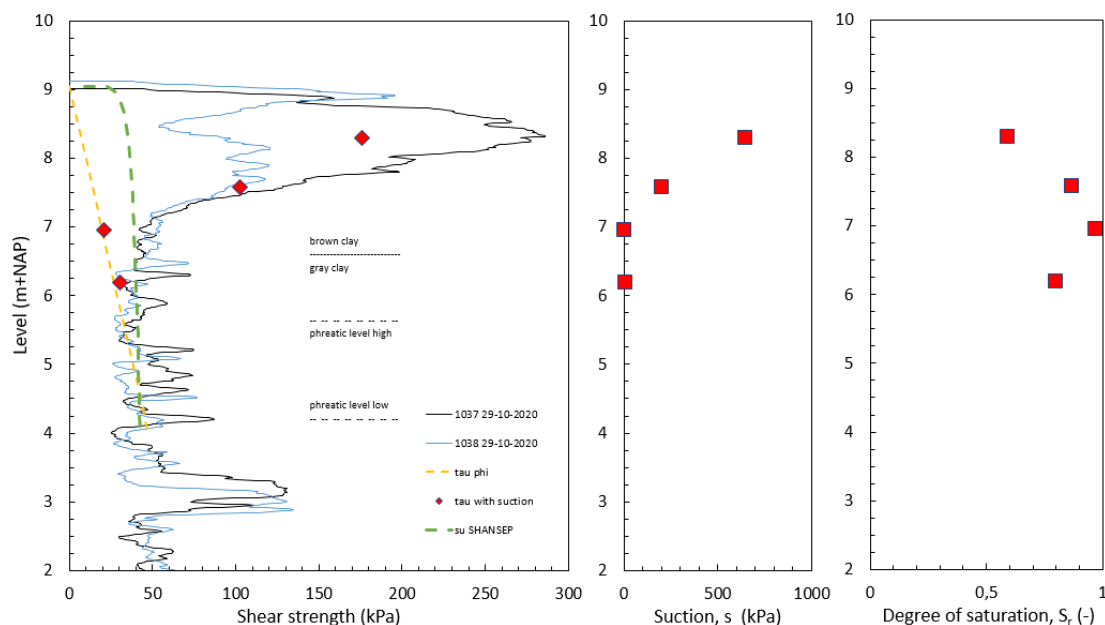
4.3 Toepassing schuifsterktemodellen in (initieel) onverzadigde grond

In deze paragraaf worden de verschillende schuifsterktemodellen nader toegelicht aan de hand van meetgegevens van de Maasdijk bij Oijen. In Figuur 4.1 en Figuur 4.2 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 4.1 betreft een situatie in het vroege voorjaar (2020) met een lage zuigspanning, hoge verzadigingsgraad en relatief lage gemeten schuifsterkte. Figuur 4.2 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 4.1 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 4.2 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 ($S = 0,35$ en grensspanning $\sigma'_{vy} = 145$ kPa) 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 > 0,85 à 0,9) 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.

In Tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de schuifsterktemodellering voor verschillende grondsoorten en verzadigingsgraden.

Tabel 4.1 *Schuifsterkte-modellen ingedeeld naar toepassing bij verschillende verzadigingsgraden en drainage-condities*

Grondsoort	Verzadigingsgraad	Schuifsterktemodellering
Goed doorlatend (zand)	S=1	Mohr-Coulomb
	S<1	Mohr-Coulomb met toevoeging voor invloed van zuigspanning en verzadigingsgraad
Transitional (klei met veel silt/zand)	S>0,85 ¹⁾²⁾	Su-tabel of gefitte SHANSEP-parameters
	S<0,85 ¹⁾²⁾	Mohr-Coulomb met toevoeging voor invloed van zuigspanning en verzadigingsgraad
Slecht doorlatend (klei/veen)	S>0,85 ¹⁾²⁾	SHANSEP
	S<0,85 ¹⁾²⁾	Mohr-Coulomb met toevoeging voor invloed van zuigspanning en verzadigingsgraad

¹⁾ Dit is naar verwachting een veilige waarde. Indien deze waarde bepalend is in de beoordeling of het ontwerp, kan deze project specifiek afgeleid worden.

²⁾ Dit is niet de grens tussen grijze en bruine klei, deze ligt bij een verzadigingsgraad van S=1. Hierboven komt een zone met bruine klei met S>0,85 en daarboven een zone met bruine klei met S<0,85.

4.4 Effect scheurvorming

Een ander aspect dat moet worden benoemd, is de invloed van scheurvorming door uitdroging van klei (krimpscheuren) in de onverzadigde zone op de mobiliseerbare schuifsterkte. Scheurvorming vindt over het algemeen plaats in de onverzadigde zone tot een diepte van 0,5 tot 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 in ondiepe schuifvlakken afnemen tot 25% tot 50% van de schuifsterkte in niet-gescheurde grond (Leroueil et al., 1990 en Jardine et al., 2004).

In sommige leidraden en handboeken (USACE, 2004; Ciria, 2013) wordt aanbevolen om in glijvlakanalyses een verticale trekscheur te modelleren in de kruin van ophogingen. Achtergrond hiervan is de actieve gronddruk in de kruin van ophogingen. De actieve gronddruk zorgt ervoor dat de horizontale spanning laag is. Nabij de kruin is de verticale spanning ook laag. Hierdoor zou in deze zone slechts een lage schuifsterkte kunnen worden gemobiliseerd. Om dit effect in rekening te brengen, zou voor grond met cohesie een aanzienlijke verticale scheur moeten worden geschematiseerd. Merk op dat door deze aanpak een deel van het aandrijvend gewicht buiten de glijvlakanalyse wordt gehouden. Daardoor is niet op voorhand duidelijk wat de meest kritische berekening is (Leroueil et al., 1990). In Nederland is het niet gebruikelijk om een dergelijke verticale scheur te modelleren in glijvlakanalyses. Vooralsnog wordt ervan uitgegaan dat de hiervoor genoemde reductie van de schuifsterkte vanwege krimp-scheuren over het algemeen afdoende is. Voor dijken met heel steile taluds van 1:1 à 1:1½ is mogelijk meer reductie van de schuifsterkte nodig, als gevolg van de genoemde lage horizontale gronddruk; zie hierover ook POVM (2016).

Tabel 4.2 geeft het bovenstaande schematisch weer. 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 0,85 à 0,9. 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. In Tabel 4.2 is ook schematisch aangegeven hoe het effect van scheurvorming in de modellering van de schuifsterkte kan worden meegenomen.

Tabel 4.2 Zones met afnemende verzadigingsgraad met bijbehorend grondgedrag voor het analyseren van geotechnische instabiliteit. 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

5 Meten in veld en laboratorium

5.1 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.

5.2 Meetmethoden per parameter

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, 2024). Voor zover er voor een parameter meerdere bepalingsmethoden worden genoemd.

5.2.1 Grondsamenstelling en plasticiteit

Met behulp van handboringen of mechanische boringen met monsternamen kunnen in het laboratorium de klei-, silt-, zandfracties en het organische stofgehalte worden bepaald. Daarnaast kunnen in het laboratorium de Atterbergse grenzen en daarmee de plasticiteitsindex worden bepaald.

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

Op basis van boringen met boorbeschrijvingen en boorfoto's kan de overgang tussen grijze en bruine klei worden vastgesteld. Tevens kan op deze wijze een inschatting van de freatische grondwaterstand worden verkregen, maar deze heeft een lage mate van betrouwbaarheid, omdat toestroming van water naar het boorgat lang kan duren en het gebruik van boorwater de 'grond'waterstand in het boorgat beïnvloed. Voor een betrouwbare vaststelling van de ligging van het freatisch vlak wordt daarom geadviseerd om in klei

waterspanningsmeters te plaatsen, bij voorkeur onder het niveau van de dagelijkse grondwaterstand. Het plaatsen van peilbuizen is ook een optie, maar dan moet bedacht worden dat snelle fluctuaties niet goed gemeten kunnen worden, omdat aanpassing van het niveau in de peilbuis tijd kost i.v.m. de langzame toestroming/afstroming van water in klei naar de peilbuis.

5.2.3 Schuifsterkte

5.2.3.1 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 bij in situ (dagelijks) watergehalte uitgevoerd (UU procedure) voor het bepalen van de N_k -waarde voor in-situ (dagelijkse) condities. De CU triaxiaalproeven worden uitgevoerd conform het protocol (Deltares, 2016a).

Triaxiaal compressieproeven voor waterkeringen worden volgens het genoemde protocol met anisotrope consolidatie uitgevoerd, de zogenaamde CAU-procedure. De K_0 -waarde voor de consolidatiefase is dan ongelijk aan 1,0 en wordt bepaald op basis van de overconsolidatiegraad OCR . Voor dijksmateriaal geldt dat dit vaak zandige en siltige klei is, met "transitional soil"-gedrag. Dat houdt onder andere in dat de grensspanning vaak niet eenduidig is te bepalen, als gevolg van een doorgaand gekromde samen-drukkingscurve. De keuze voor een K_0 -waarde voor de consolidatiefase van een triaxiaal compressieproef is dan arbitrair. Het toepassen van isotrope consolidatie, dus $K_0 = 1,0$, de zogenaamde CIU-procedure, is dan een pragmatische oplossing. Voor grondsoorten die geen "transitional soil"-gedrag hebben, kan K_0 worden bepaald op basis van de overconsolidatiegraad OCR volgens het protocol (Deltares, 2016a).

Triaxiaal compressieproeven op dijksmateriaal met dilatant gedrag tijdens ongedraineerd afschuiven kunnen heel hoge waarden van de ongedraineerde schuifsterkte opleveren. Ook dit is een aspect van "transitional soil"-gedrag. Deze hoge ongedraineerde schuifsterkte is dan deels het gevolg van wateronderspanning. In welke mate deze wateronderspanning zich tijdens afschuiven kunnen ontwikkelen in veldcondities hangt af van de doorlatendheid en 'containment' van het materiaal. Voor sterk zandige klei en klei met zandlaagjes kan niet zondermeer op deze hoge ongedraineerde schuifsterkte worden vertrouwd. Zorgvuldige grondsoortclassificatie is daarom van groot belang. Geadviseerd wordt om voor deze materialen naast triaxiaal compressieproeven ook Direct Simple Shear (DSS) proeven uit te voeren. Hiermee kan meer inzicht worden verkregen in de ongedraineerde schuifsterkte van het dijksmateriaal. In het BOI is het uitgangspunt dat bij grote rekken de sterkte uit triaxiaalproeven en DSS proeven naar elkaar toe tendeert. In de praktijk geven de resultaten van DSS proeven regelmatig lagere sterktes dan triaxiaal compressieproeven. Dit kan enerzijds veroorzaakt worden door anisotropie en anderzijds door het opgelegde spanningspad. Omdat materiaal in de initieel onverzadigde zone vaak geroerd materiaal is, wat kunstmatig in -niet perse horizontale- lagen is aangebracht, en de belastingsituatie bij hoogwater gepaard gaat met een afname van de effectieve spanning en niet met een toename zoals in een triaxiaalcompressieproef, zal de sterkte tussen die van een triaxiaalcompressie proef en een DSS proef inliggen. De resultaten van een DSS proef kunnen dan als veilige benadering worden toegepast. Als de verschillen in gevonden schuifsterktes tussen beide proeven beperkt zijn, is nadere analyse omtrent de interpretatie

van de proeven niet nodig. Als er wel grote verschillen geconstateerd worden, kan dit aanleiding zijn om de resultaten van de triaxiaalproeven nader te analyseren en bijvoorbeeld de rekgrens waarbij de sterkte wordt bepaald zorgvuldig te kiezen. Naast een 'cross-check' met DSS proeven, is het ook raadzaam om een 'cross check' met in-situ proeven, zoals veldvintesten of sonderingen, uit te voeren.

Ongedraineerde sterkteproeven op initieel onverzadigd materiaal kunnen sterk dilatant gedrag vertonen, waardoor heel hoge waarden van de ongedraineerde schuifsterkte wordt gevonden, welke soms veel hoger zijn dan de initiële effectieve verticale spanning. Of in het veld ook dergelijke hoge schuifsterktes kunnen optreden is niet evident. Daarom wordt geadviseerd om de gevonden ongedraineerde schuifsterkte in laboratoriumproeven vooralsnog te begrenzen op de initiële effectieve verticale spanning in het veld. Op basis van grootschalige bezwijkproeven kan deze begrenzing in de toekomst mogelijk komen te vervallen.

5.2.3.2 Sonderingen.

Aanbevolen wordt om sondering met klasse 1 of 2 toe te passen om een hoge meetnauwkeurigheid te bereiken en deze uit te voeren volgens het protocol (Deltares, 2016b). In de capillaire zone kan de ongedraineerde schuifsterkte worden afgeleid uit correlatie met de sondeerwaarden. In de (initieel) onverzadigde zone (bruine klei) is deze correlatie alleen geldig als de verzadigingsgraad van de klei voldoende hoog is. De correlatiefactor kan worden bepaald door het uitvoeren van triaxiaalproeven eventueel aangevuld met veldvintesten.

5.2.3.3 Veldvintesten

Ook veldvintesten kunnen gebruikt worden voor 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 worden uitgevoerd conform ISO-22476-9: 2020. Om effecten als anisotropie, verschil in bezwijkmodus tussen de veldvinproef enerzijds en afschuiven langs een langgerekt glijvlak anderzijds en het verschil in bezwijksnelheid te verdisconteren moet een correctiefactor worden toegepast. Deze is niet in de norm opgenomen. Voor Westervoort en Oijen gaf de volgende correctie goede resultaten (Deltares, 2021):

$$s_u = \mu \cdot s_{u;FVT}$$

Waarin:

$$\mu = 1.05 - 0,03417(I_p)^{0,5} \times (0,43/w_l)^{0,45}$$

$s_{u;FVT}$ = in het veld bepaalde ongedraineerde schuifsterkte met de veldvintest

I_p = plasticiteitsindex (%)

w_l = vloeigrens (%)

Geadviseerd wordt echter om de resultaten op projectbasis te kalibreren op laboratoriumtesten.

5.2.4 Watergehalte en verzadigingsgraad

5.2.4.1 Laboratorium

De traditionele methode om het watergehalte en verzadigingsgraad te bepalen is door boringen uit te voeren en het watergehalte en de verzadigingsgraad in het laboratorium te bepalen. Voor een nauwkeurige bepaling is het wenselijk om ook het volumegewicht van de

vaste stof te bepalen (G_s). Aandachtspunt is dat de monsters tijdens transport niet mogen uitdrogen.

5.2.4.2 Sonderingen met bepaling van de permittiviteit en/of elektrische geleidbaarheid

Met deze techniek wordt tijdens het sonderen aanvullend de permittiviteit (dielektrische constante, dimensieloos) of elektrische geleidbaarheid (eenheid mS/m) gemeten. Vervolgens kan op basis hiervan tijdens het sonderen het watergehalte en de verzadigingsgraad worden ingeschat. De permittiviteit en elektrische geleidbaarheid hangen namelijk af van het percentage klei, organische stof en watergehalte. Daarom is per project altijd een kalibratie nodig. Hiervoor dienen eerst een aantal boringen met bepalingen van het watergehalte te worden uitgevoerd, waarnaast de sonderingen worden uitgevoerd om de kalibratie uit te kunnen voeren.

Voor Westervoort en Ooijen is de relatie tussen vochtgehalte en dielektrische constante als volgt gefit (Deltares, 2021):

$$\Theta = a.K + b$$

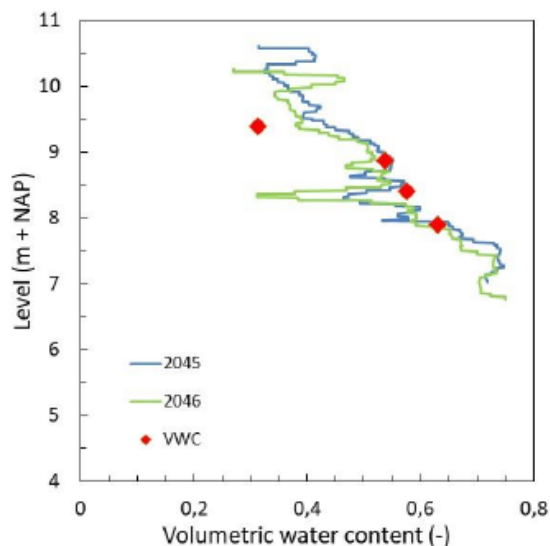
Waarin:

Θ = Vochtgehalte (volume verhouding)

K = dielektrische constante

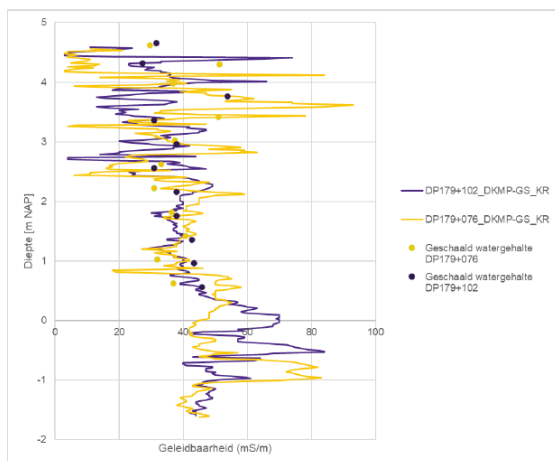
a = fitfactor, a=0,00645 voor Westervoort en 0,00455 voor Ooijen

b = fitfactor, 0,25 voor Westervoort en Ooijen



Figuur 5.1 Voorbeeld kalibratie vochtgehalte o.b.v. dielektrische constante bij Westervoort (Deltares, 2021)

Het meten van de elektrische geleidbaarheid met een sondeerconus is wel een gangbare meettechniek. Een voorbeeld waar het watergehalte is gerelateerd aan de elektrische geleidbaarheid is weergegeven Figuur 5.2. Hierbij is voor het betreffende project (SAS) fitfactor van 1,4 gehanteerd.



Figuur 5.2 Voorbeeld relatie watergehalte en elektrische geleidbaarheid bij SAS (HDSR (2023))

In het lopende onderzoek naar de schuifsterkte van de onverzadigde zone wordt nog verder onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid en wijze van interpretatie van deze metingen.

5.2.4.3 Sensoren voor het meten van het watergehalte in het veld

Met dit type meetapparaat kan het verloop van watergehalte en verzadigingsgraad in de tijd op één vaste locatie 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 nodig zijn voor kalibratie van de metingen.

5.2.5 Zuigspanning

5.2.5.1 Tensiometers

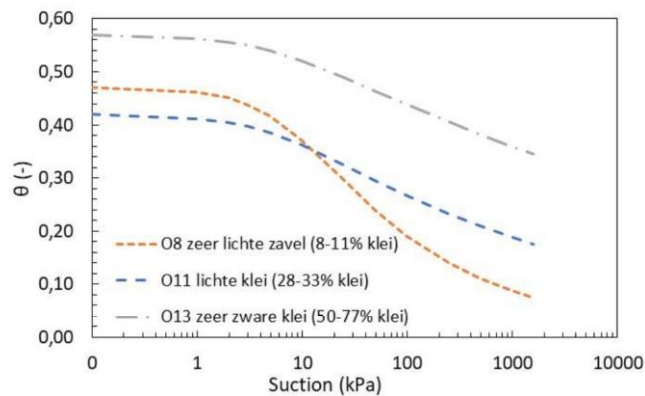
Met een tensiometer kan het verloop van de zuigspanning op één vaste locatie in de tijd worden gevolgd. Aandachtspunt is het meetbereik van de sensoren, met name in droge zomers, omdat dan de zuigspanningen heel hoog kunnen worden (Deltares, 2019 en Deltares, 2024).

5.2.5.2 Bepaling waterretentiecurve in het laboratorium

Een inschatting van de zuigspanning kan worden verkregen via een zogenaamde waterretentiecurve. Deze curve geeft het verband tussen vochtgehalte (vol. %) en zuigspanning weer en kan in het laboratorium worden bepaald, bijv. met behulp van een Hyprop apparaat. Door het meten van het vochtgehalte in het veld kan met behulp van de waterretentiecurve de zuigspanning worden bepaald. Opgemerkt moet worden dat deze curves over het algemeen relatief grote spreidingen laten zien en de testen lang kunnen duren (enkele weken).

5.2.5.3 Gebruik van 'standaard' waterretentiecurve

Bij een indirecte inschatting van de zuigspanning via een zogenaamde waterretentiecurve kan ook een 'standaard' curve worden gebruikt, bijv. 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 vochtgehalte (vol. %) de zuigspanning worden bepaald. Aandachtspunt is dat bij deze curves over het algemeen het vochtgehalte (vol. %) wordt gehanteerd en niet het watergehalte (gew. %), wat in de geotechniek een gebruikelijkere parameter is. Een voorbeeld van dergelijke curves zoals gebruikt bij Westervoort en Oijen is weergegeven in Figuur 5.3. Opgemerkt wordt dat in (Wösten et al., 2001) ook bandbreedtes worden gegeven, waardoor ook rekening met onzekerheden kan worden gehouden.



Figuur 5.3 Voorbeeld standaard waterretentiecurves zoals gebruikt bij Westervoort en Oijen (Deltares, 2021)

5.2.6 Effectieve verzadigingsgraad

De effectieve verzadigingsgraad is benodigd om de invloed van zuigspanning op de schuifsterkte te kunnen berekenen. Om de effectieve verzadigingsgraad te kunnen bepalen, moet het poriëngetal van met water gevulde microporiën bekend zijn. Deze laatste parameter kan op een aantal manieren worden bepaald.

5.2.6.1 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test

Met behulp van een Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) test kan de poriengrootte verdeling (PSD = pore size distribution) worden bepaald. De PSD geeft het volume van de poriën voor verschillende poriëndiameters. Hieruit kan het poriëngetal van de microporiën worden afgeleid, waaruit vervolgens de effectieve verzadigingsgraad kan worden bepaald. Voor meer achtergronden wordt verwezen naar (Deltares, 2021).

5.2.6.2 Waterretentiecurve

Het is ook mogelijk om het poriëngetal van met water gevulde microporiën te bepalen met de waterretentiecurve, die is doorgezet tot zeer hoge waarden van de zuigspanning. De aanname hierbij is dan dat het water wat nog in de poriën aanwezig is bij de zeer hoge waarden van de zuigspanning zich bevindt in de microporiën. De verzadigingsgraad bij de zeer hoge waarden van de zuigspanning is dan gelijk aan de verzadigingsgraad van de microporiën. Het extra water wat zich bij lagere waarden van de zuigspanning in de poriën bevindt, bevindt zich dan in de macroporiën. Op basis hiervan kan de verzadigingsgraad van de macroporiën bij lagere waarden van de zuigspanning, oftewel de effectieve verzadigingsgraad, worden vastgesteld.

5.2.6.3 Correlatie o.b.v. specifiek oppervlak van de klei

Het poriëngetal van met water gevulde microporiën kan ingeschat worden op basis van correlaties met het specifiek oppervlak van de klei. Het specifiek oppervlak betreft het oppervlak van de kleiplaatjes, dat gerelateerd is aan het type kleimineralen. Klei met een groot specifiek oppervlak kan veel water aan zich binden. Het specifiek oppervlak kan bijv. bepaald worden met de N₂ BET methode. Met deze methode wordt bepaald hoeveel stikstof wordt geadsorbeerd op het oppervlak van de kleiplaatjes. Door Romero et al. (2011) is een relatie bepaald tussen het specifiek oppervlak en het poriëngetal van de microporiën. Voor meer achtergronden wordt verwezen naar (Romero et al. 2011), (Deltares, 2019), (Deltares 2021) en (Deltares, 2024).

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

De mate van scheurvorming en de diepte van scheuren kan worden vastgesteld door een visuele inspectie van de dijk, waarbij de breedte en diepte van scheuren aan het maaiveld worden ingemeten. Beperking hiervan is dat alleen de scheuren die vanaf maaiveld zichtbaar zijn in kaart worden gebracht. Door het maken van een inspectiekuil en het vervolgens inspecteren en inmeten van scheurvorming beneden maaiveld kan een vollediger beeld van de structuurvorming van de toplaag worden verkregen.

5.2.8 **Invloed van scheuren op de schuifsterkte**

Het bepalen van de invloed van scheuren op de schuifsterkte is complex. Een eerste inschatting van het effect hiervan kan worden gebaseerd op literatuurwaarden (zie Paragraaf 3.3). Daarnaast is er de mogelijkheid om de schuifsterkte te bepalen op grondmonsters van grote afmetingen, waarin recht wordt gedaan aan de schaal van aggregaten en scheuren.

5.2.9 **Heterogeniteit**

De initieel onverzadigde zone bestaat vaak uit antropogeen materiaal. Hierdoor kan de opbouw van de dijk en de materiaalsamenstelling op korte afstand sterk verschillend zijn. Dit geldt daarmee ook voor de schuifsterkte en de waterspanningen in de dijk.

5.2.9.1 **Archiefinformatie**

Om de heterogeniteit in kaart te brengen kan allereerst gebruik worden gemaakt van archiefinformatie, zoals as-buit tekeningen en beheerinformatie.

5.2.9.2 **Sonderingen en boringen**

Ook met sonderingen en boringen kan de heterogeniteit in beeld worden gebracht. In langsrichting van de dijk kan steekproefsgewijs op een aantal locaties in een dijktraject een raai sonderingen met een sondeerafstand van circa 10 m worden uitgevoerd. Hieruit kan inzicht over de variabiliteit van de schuifsterkte op de schaal van een potentieel schuifvlak worden afgeleid. Ook in de dwarsdoorsnede kan de opbouw van een dijk variabel zijn. Dit kan het gevolg zijn van eerdere dijkversterkingen, waarbij verschillende kleisamenstellingen of zand kunnen zijn toegepast.

Om de heterogeniteit op korte afstand in kaart te brengen kan ook overwogen worden om op locaties waar boringen worden uitgevoerd, op korte afstand (orde 1m) ook 2 of 3 sonderingen rondom de boring uit te voeren. Met name als de correlatiefactor N_k afgeleid wordt uit de sonderingen kan het meerwaarde hebben om de variabiliteit op korte afstand te bepalen, om zo een passende uitmiddeling hiervan toe te kunnen passen.

5.2.9.3 **Geofysica**

Met geofysische technieken kan in raaien een continu beeld van de ondergrond worden verkregen en kan daarmee een goede aanvulling zijn om zandlenzen, wegcunetten of zandscheggen in kaart te brengen.

Gangbare technieken zijn elektromagnetische (EM) en grondradar (GPR) metingen, welke rijdend kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast kunnen Electrical Resistivity Tomography (ERT) metingen worden uitgevoerd, waarbij met behulp van pennen in een dwars- of lengteprofiel metingen worden uitgevoerd.

5.3 Schuifsterktebepaling per zone

5.3.1 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; zie hiervoor de BOI Technische Leidraden (IPLO.nl).

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 BOI Technische Leidraden (IPLO.nl).

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.

5.3.2 (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.

Ter indicatie: bij Westervoort en Oijen is sprake van ongedraineerd grondgedrag bij een verzadigingsgraad groter dan 0,85 à 0,90. 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).

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.

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.

Vanwege de afhankelijkheid van het veldonderzoek voor de verzadigingsgraad van de grond kan het verstandig zijn om het veldonderzoek gefaseerd uit te voeren. In een eerste fase kan een eerste verkenning met boringen en sonderingen worden gedaan op enkele locaties. Afhankelijk van de bevindingen, kan het veldonderzoek worden uitgesteld tot een nattere periode. Een andere mogelijkheid is om aanvullend onderzoek te doen, zodat de in-situ metingen kunnen worden gecorrigeerd voor het effect van de capillaire spanningen.

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 tijdens het uitvoeren van de test 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.

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.

6.1 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 vanaf een verzadigingsgraad van 0,85 à 0,9.

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, medium scale bezwijkproeven en/of een full scale bezwijkproef worden uitgevoerd. Hierbij kan de respons van de grond bij het uitvoeren van een kleine schaal veld- of laboratoriumtest vergeleken met de respons van de grond bij een taludafschuiving op ware schaal.

Voor dit aspect is het ook nodig om meer inzicht te verkrijgen op andere locaties, bijv. 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).

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 geotechnische stabiliteit van een dijk, hangt dus sterk af van de ligging van de overgang tussen de grijze klei en de bruine geoxideerde klei.

6.2 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 analyse van de geotechnische instabiliteit. 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.

Complicerende factor hierbij is dat de scheurvorming ook invloed kan hebben op de mate van drainage condities die op kunnen treden tijdens het afschuiven en ook op de mate van 'horizontale opsluiting' van de grond. Wellicht dat hiertoe ook andere type laboratoriumproeven, bijv. 'gedraineerde' proeven met een lagere belastingsnelheid en/of lagere horizontale consolidatiespanning benodigd zijn. Dit is nog onderwerp van nader onderzoek.

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.

6.3 Bepaling ongedraineerde sterkte van niet verzadigd materiaal

Het is niet altijd mogelijk om grondmechanisch veldonderzoek naar de schuifsterkte van de (initieel) onverzadigde zone (bruine geoxideerde klei) binnen een regulier grondmechanisch onderzoek bij een hoge verzadigingsgraad uit te voeren. De maanden februari of maart komen hiervoor het meest in aanmerking. Dit is echter grotendeels gesloten seizoen voor werk in en bij waterkeringen en tevens is dit slechts een beperkte periode van het jaar, terwijl onderzoekscampagnes over het algemeen meer tijd in beslag nemen of op andere periodes in het jaar uitgevoerd moeten worden in verband met bijv. een ontwerpplanning. 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.

6.4 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.

Er is inmiddels ook ervaring opgedaan met het inschatten van het watergehalte en verzadigingsgraad door meting van de elektrische geleidbaarheid. Deze sonderingen zijn in de markt beschikbaar. De resultaten hiervan zijn veelbelovend, maar hier zal meer ervaring mee op moeten worden gedaan. Vooralsnog is daarom in ieder geval per project een kalibratie nodig.

6.5 Sterkte uit zuigspanningen

De mate waarin zuigspanningen ook tijdens hoogwater condities aanwezig zullen zijn (capillaire werking) en/of zullen ontstaan bij een afschuiving (dilatant gedrag) is relatief

onzeker. De verwachting is dat de onzekerheid in zuigspanning aanzienlijk is mede door de afhankelijkheid van seizoenen (watergehalte variaties), bodemprocessen en korrelspanningsniveau. Daarnaast zullen zuigspanningen met name effect hebben in de meer oppervlakkige onverzadigde zone waar de korrelspanning bij verzadiging klein is. Ook de vraag of de mobilisatiecurves (hardening, rek bij bezwijken, softening) voor onverzadigde grond compatibel zijn met die van verzadigde grond is een aandachtspunt. Daarom wordt in dit handelingsperspectief terughoudend omgegaan met het meenemen van zuigspanningen.

6.6 Sterkte bij lage spanningen

Omdat grond geen trekspanning kan opnemen, is er een maximale horizontale spanning en daarmee ook een maximaal mobiliseerbare schuifsterkte. In sommige internationale voorschriften wordt daarom in het bovenste deel van het dijklichaam de sterkte verwaarloosd. In POVM (2016) is een minder conservatieve werkwijze uitgewerkt, waarbij de sterkte in het dijklichaam in de bovenste meters begrensd wordt tot de helft van de verticale effectieve spanning. Gezien de resultaten van laboratoriumproeven op dijksmateriaal wordt verwacht dat dit een conservatieve aanpak is en dat optimalisatie mogelijk is. Vooralsnog wordt geadviseerd om de gevonden schuifsterkte in laboratoriumproeven te begrenzen op de initiële effectieve verticale spanning in het veld. Op basis nader onderzoek op dit punt kan deze begrenzing in de toekomst mogelijk komen te vervallen.

6.7 Testprocedures en interpretatie

Met verschillende onderzoeksmethodes en proeven is beperkte ervaring bij toepassing in de initieel onverzadigde zone van Nederlandse dijken. Dit geldt zowel voor de uitvoering, als bij de interpretatie van de resultaten. Voorbeelden hiervan zijn:

- Veldvinproeven: Om effecten als anisotropie, verschil in bezwijkmodus tussen de veldvinproef enerzijds en afschuiven langs een langgerekt glijvlak anderzijds en het verschil in bezwijksnelheid te verdisconteren, moet de uit de veldvinproef afgeleide ongedraineerde sterkte worden gecorrigeerd, zie bijvoorbeeld CROW-CUR (2022). Tevens is er onderscheid tussen de piek als de post-piek sterkte uit een vinproef. Omgang met deze aspecten kan op verschillende manieren plaatsvinden. Daarom wordt geadviseerd om de resultaten van vinproeven naast de resultaten van sonderingen en sterktetesten in het laboratorium te leggen.
- In-situ bepalingen van watergehalte en verzadigingsgraad: Met de in dit rapport genoemde methoden (RCPT, diëlektrische constante, TDR) is nog beperkt ervaring opgedaan. Daarom is per project kalibratie van de metingen nodig.
- UU Triaxiaalproeven: Het bepalen van de in situ onverzadigde sterkte met triaxiaalproeven (UU procedure) is een relatief grove methode om de sterkte te bepalen. Voordeel van de proef is dat het een relatief snelle proef is (er is geen consolidatiefase nodig) en het één van de weinige methoden is om met een laboratoriumproef de sterkte van onverzadigde monsters te bepalen. Echter, naast het effect van monsterverstoring (bijv. ontspanning, volumeverandering, uitdroging), is de spanningssituatie tijdens de proef niet bekend (waterspanningen worden bijv. niet gemeten). Voor een goede proefinterpretatie is daarom nog een extra proef nodig om de relatie tussen watergehalte en zuigspanningen te bepalen.
- CU Triaxiaalproeven. In triaxiaal compressieproeven op dijksmateriaal worden vaak heel hoge waarden van de ongedraineerde schuifsterkte gemeten als gevolg van wateronderspanning (dilatant gedrag). In welke mate deze wateronderspanning zich tijdens afschuiven kunnen ontwikkelen in veldcondities hangt af van de doorlatendheid, het spanningspad en 'containment' van het materiaal. Voor sterk zandige klei, klei met zandlaagjes en gestructureerde klei kan niet zondermeer op deze hoge ongedraineerde schuifsterkte worden vertrouwd.

6.8 Toepassingsgebied

Er is op dit moment nog beperkt ervaring met het toepassen van de kennis uit het SIOZ onderzoek, alhoewel dit wel in steeds meer projecten wordt toegepast. Een belangrijke ervaringsbasis vormt het onderzoek bij Westervoort en Oijen, onder de volgende omstandigheden:

- 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, $< 2 \mu\text{m}$) 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.

Indien de klei hier niet aan voldoet, leidt dit tot extra onzekerheid.

6.9 Veiligheidsformat

Het beoordelen en ontwerpen van dijken gebeurt in veel gevallen op semi-probabilistische wijze. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een schadefactor om de relatie tussen faalkans en stabiliteitsfactor te bepalen. Indien de sterkte van de initieel onverzadigde zone een belangrijke bijdrage aan de stabiliteit levert, is deze kalibratierelatie niet per se meer passend. Dit omdat (1) de ongedraineerde sterkte en/of gedraineerde sterkte met zuigspanningen een grotere bandbreedte heeft dan de gedraineerde sterkte en (2) voor situaties waar de bijdrage van de initieel onverzadigde zone groot is, vaak relatief weinig grondlagen worden doorsneden (gebieden met relatief dunne deklagen).

Daarnaast is bij de kalibratie van de modelfactor de gehanteerde sterkte van het materiaal in de initieel onverzadigde zone op een afwijkende wijze bepaald. Dit kan een effect hebben op de kalibratie van de modelfactor.

6.10 Heterogeniteit

Heterogeniteit kan verschillende oorzaken hebben. De initieel onverzadigde zone bestaat vaak uit antropogeen materiaal, wat een grote invloed kan hebben op de heterogeniteit van het materiaal. Aan de ene kant kan het materiaal heel uniform zijn, omdat het op dezelfde manier is verwerkt, uit dezelfde partij grond komt en aan dezelfde eisen heeft moeten voldoen. Aan de andere kant kan het materiaal juist heterogener zijn dan natuurlijk afgezet materiaal, bijv. omdat in het verleden niet altijd strikte materiaaleisen gehanteerd werden bij het opbouwen van de dijk, maar vaak gebruik is gemaakt van het beschikbare materiaal. Tevens kan er sprake zijn van verschillende partijen grond en verschillende (weers)condities bij het verwerken. Heterogeniteit kan met archief, veld- en laboratoriumonderzoek in kaart worden gebracht. Desondanks kunnen lokale afwijkingen soms moeilijk te detecteren zijn.

Om ruimtelijke variabiliteit in rekening te brengen wordt voor natuurlijke grondlagen over het algemeen gebruik gemaakt van de variantiereductiefactor (I^2), zie ook de Technische Leidraden (IPL0.nl), waarbij over het algemeen een standaardwaarde wordt toegepast. In welke mate deze standaardwaarde ook geldt voor antropogeen dijksmateriaal is nog niet systematisch onderzocht.

Een andere witte vlek wordt gevormd door het effect van dunne zandlenzen en/of zandinsluitingen. In sommige dijken is -vanwege beperkte beschikbaarheid van klei- zand door de klei gemengd, waarbij de menging niet tot een homogeen mengsel heeft geleid, maar geresulteerd heeft in zandlensjes/lenzen die door de klei zijn gemengd. Deze zandlezen kunnen effect hebben op het gedrag van het dijksmateriaal. Zo kan de consolidatieperiode aanzienlijk korter zijn dan voor schone klei, waardoor tijdens bezwijken/afschuiven (partieel) gedraineerd gedrag kan optreden. Eenduidige criteria wanneer van (partieel) gedraineerd gedrag uit moet worden gegaan zijn (nog) niet beschikbaar.

Daarnaast kunnen bij voorgaande dijkversterkingen zandscheggen/zandlenzen zijn toegepast. Dit kan een versterkingsoplossing zijn geweest die over hele dijkstrekkings is toegepast, maar ook een oplossing die op korte stukken als herstelwerk is toegepast. Met name in het tweede geval is dit lastiger op te sporen, terwijl de invloed -met name voor ondiepe glijvlakken- groot kan zijn. Een voorbeeld hiervan is te vinden in POVM (2017).

7 Referenties

- AD (2024). Rode draad 7 – Suggesties en aandachtspunten ten aanzien van omgang met onzekerheden bij Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone, Adviesteam Dijkontwerp, april 2024
- Arcadis. (2022). Consequentieanalyse sterkte onverzadigde zone - Update 2022. RWS – WVL. Rapport WHW3KCEH7HUN-90428322-1359:1.0 - Datum: 6 april 2022.
- Blight, G. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- BOI (2022). Handleiding Overstromingskansanalyse. Rijkswaterstaat. Juli 2022. Versie 0.8. Concept.
- BOI Technische Leidraden. www.IPLO.nl.
- CIRIA. (2013). *The International Levee handbook*, C731, CIRIA 2013, RP957, ISBN: 978-0-86017-734-0.
- CROW-CUR (2022). CROW-CUR rapport 162 Construeren met grond, 2022
- Deltares (2016a). Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen. Deltares rapport 1230090-019-GEO-0002, Versie 03, 25 mei 2016, definitief.
- Deltares (2016b). Protocol sonderen voor Su-bepaling. Deltares rapport 1220083-010-GEO-0006, Versie 3, juni 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 (2021). *Shear Strength of Initially Unsaturated Soil – Results measurement sites Westervoort and Oijen*. Deltares report 11207253-002-GEO-0001, 27 december 2021
- Deltares (2023). *Handreiking faalkansanalyse Macrostabieliteit*, Deltares rapport 11209051-007-GEO-0001, versie 4.0, 09-11-2023
- Deltares (2024). *Shear Strength of Initially Unsaturated Soil - Factual report measurement sites Westervoort and Oijen, update 2024*. 11210371-016-GEO-0001, Version 1.0, 20 December 30, 2024.
- DIV (2025). Spreadsheets voor parameterbepaling, versie 1.0, 8 juli 2025
- HDSR (2023). Stappenplan uitwerking STBI-3 o.b.v. beschikbaar onderzoek bij SAS, HDSR memo, 5-9-2023
- ISO 22467-9 (2020). *Geotechnical investigation and testen – Field testing – Part 9: Field vane test (FVT and FVT-F)*, 2020
- 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.
- POVM (2016). POV-M Ongedraineerd rekenen, Ondersteuning referentieprojecten; Invloed TCO bij stabiliteitsberekeningen, Deltares juni 2016, Referentie 201510439/332802.
- POVM (2017). POV-M Beter benutten actuele sterkte KIJK Analyse infiltratieproeven IJsseldijk, rapport nr. 11200643-002-GEO-0002, versie 3, 29 november 2017.
- 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.
- USACE (2003). *Slope Stability, engineering and design*, United States Army Corps of Engineers. Doc. Nr. EM 1110-2-1902.
- Vo, T. et al. (2022). The fall cone test in unsaturated soil and tailings pastes. *Géotechnique* 72, No. 3, 274–281

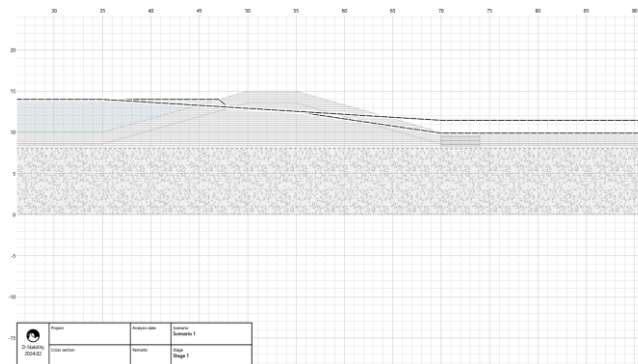
Wösten, J., Veerman, G., de Groot, W., & Stolte, J. (2001). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Alterra rapport 153. Wageningen: Alterra.

A Rekenvoorbeeld

In deze bijlage wordt een voorbeeld voor een fictieve dijkbeoordeling gepresenteerd. Hierin wordt ingegaan op de beoordeling van één representatieve doorsnede. De beslisvraag die voorligt is of de doorsnede een substantiële bijdrage aan de overstromingskans van het dijktraject heeft.

A.1 Beschrijving doorsnede

De situatie betreft een kleidijk van 5m hoog op een klei deklaag van 2m. Onder de deklaag is een watervoerende zandlaag aanwezig. De dijk heeft 1v:3h taluds en geen berm. De waterstand bij de norm (WBN) ligt 1m onder het niveau van de kruin. Het intredepunt is aangenomen bij de buitenteen en voor de stijghoogte in het watervoerend pakket is bij de binnenteen uitgegaan van grenspotential. Onder dagelijkse omstandigheden ligt de freatische grondwaterstand op de overgang tussen de deklaag en het watervoerend pakket. De doorsnede is schematisch weergegeven in Figuur 7.1.



Figuur 7.1 Schematische weergave rekenvoorbeeld

A.2 Stap 1: Verkennende analyse

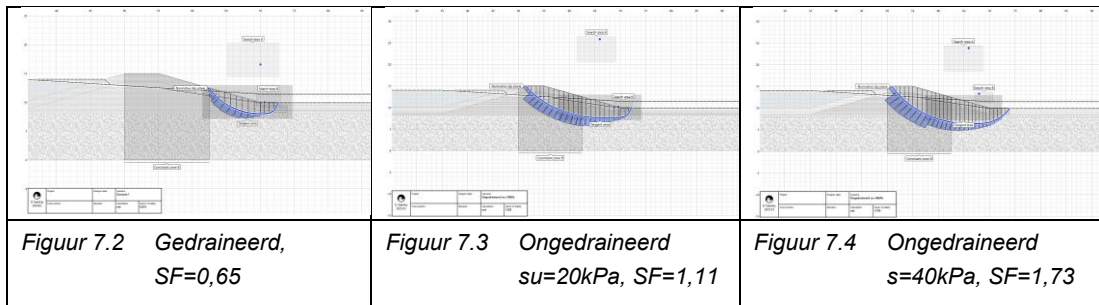
In de eerste stap wordt verkend of de wijze waarop de sterkte van de initieel onverzadigde zone wordt gemodelleerd bepalend is voor het veiligheidsbeeld.

Om de gevoeligheid voor sterkte van de initieel onverzadigde zone te bepalen zijn 3 varianten beschouwd:

- Gedraineerde sterkte, $\phi' = 30^\circ$.
- Ongedraineerde sterkte, $s_u = 20\text{kPa}$ in de kern en 5kPa in de gestructureerde toplaag (indicatieve waarde volgens paragraaf 2.1)
- Ongedraineerde sterkte, $s_u = 40\text{kPa}$ in de kern en 10kPa in de gestructureerde toplaag (indicatieve waarde volgens paragraaf 2.1)

De sterkte in de opbarstzone is in dit voorbeeld verwaarloosd. Merk op dat dit op basis van het Praktijkonderzoek Opbarsten bij Dijken (POD) conservatief is.

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.2 t/m Figuur 7.4.

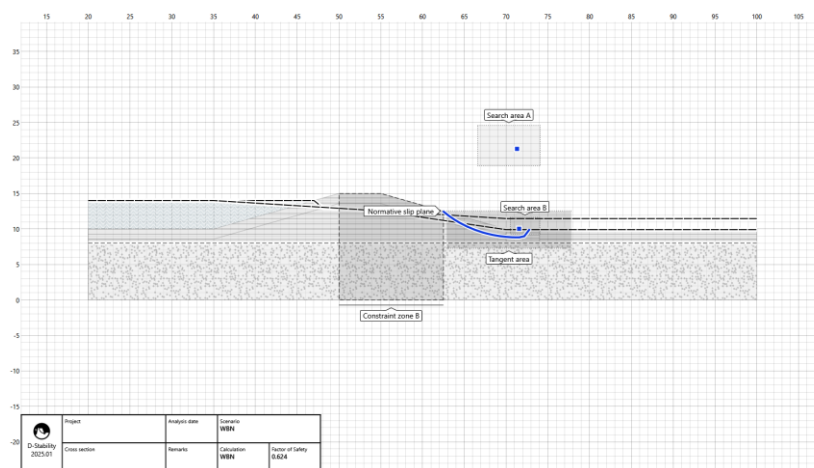


Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat de sterkte van de initieel onverzadigde zone bepalend is voor het veiligheidsbeeld. Dit sluit ook aan op de verwachting, omdat de dikte van de initieel onverzadigde zone groot is en de dikte van de cohesieve deklaag relatief beperkt is.

A.3 Stap 2: Toepassen standaardwaarden

Wellicht dat bij het toepassen van standaardwaarden voor de sterkte van de initieel onverzadigde zone al een antwoord op de beslisvraag kan worden gegeven. Daarom is een stabiliteitsanalyse uitgevoerd met deze standaardwaarden. Hierbij is het van belang dat er al wel een basisset aan informatie (bijv. archieftekeningen, sonderingen, boringen, identificatie/classificatietesten) beschikbaar is. In dit voorbeeld wordt er van uitgegaan dat dit aanwezig is en dat hieruit kan worden opgemaakt dat de dijk uit klei is opgebouwd en de deklaag ook uit klei bestaat. Daarom is voor de standaardwaarden op basis van de waarden uit de BOI Technische Leidraden (IPL0.nl) uitgegaan van een karakteristieke waarde van S, m en POP van respectievelijk S=0,2, m=0,7 en POP=7kPa. Voor de toplaag tot een diepte van 1,5m onder maaiveld is de POP waarde met een factor 7 gereduceerd tot een waarde van 1kPa.

De resultaten van deze stabiliteitsanalyse zijn weergegeven in Figuur 7.5. Hieruit volgt een stabiliteitsfactor van F.S. = 0,62.



Figuur 7.5 Resultaat stabiliteitsanalyse met standaardwaarden

Uit de berekeningsresultaten volgt een relatief lage stabiliteitsfactor, zodat hiermee niet te onderbouwen is dat de bijdrage van deze doorsnede aan de overstromingskans van het dijktraject verwaarloosbaar is. Uit de resultaten van de verkennende analyse blijkt echter dat de sterkte van de initieel onverzadigde zone ook aanzienlijk hoger kan zijn. Op basis van de analyse met standaardwaarden kan daarom geen antwoord op de beslisvraag gegeven worden, zodat vervolgd wordt met stap 3.

A.4 Stap 3: Nader onderzoek

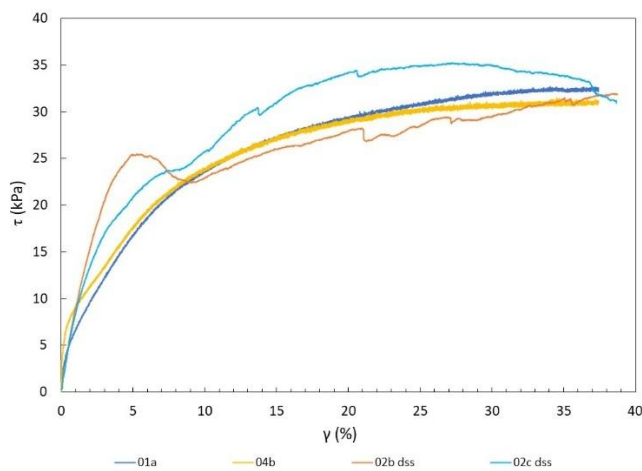
Op basis van de verkennende analyses is een nader onderzoek uitgevoerd. Hieruit zijn de volgende resultaten verkregen.

A.4.1 Toepassingsgebied

- De aangetroffen klei is overwegend bruine klei, wat aansluit op het uitgangspunt dat de klei initieel onverzadigd is.
- Het lutumgehalte van de klei zit tussen de 20 en 30%, de plasticiteitsindex bedraagt 15 tot 25% en het organische stof gehalte bedraagt 2 tot 3%. De betreffende klei bevindt zich dus binnen het toepassingsgebied van het onderzoek.

A.4.2 Invloed testprocedure

Om de invloed van de testprocedure te bepalen zijn naast triaxiaalcompressie ook een aantal DSS proeven uitgevoerd. Hierbij zijn monsters uit 1 bus beproefd bij een vergelijkbare consolidatiespanning (in-situ spanning). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.6.

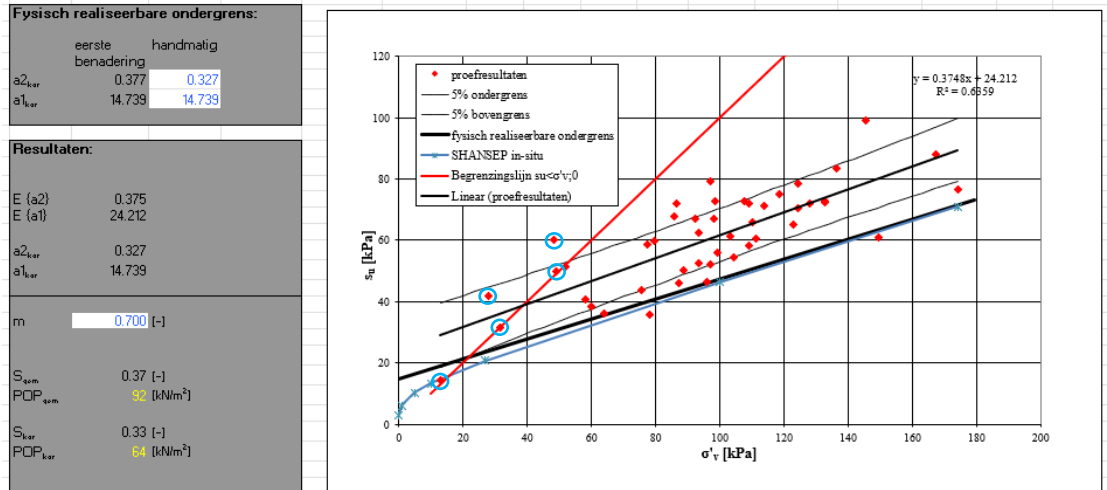


Figuur 7.6 Schuifsterkte versus schuifrek voor triaxiaalproeven en direct simple shear proeven

Uit Figuur 7.6 blijkt dat de testprocedure geen grote invloed heeft op de gevonden schuifsterkte. Derhalve worden de triaxiaalcompressieproeven gebruikt voor het afleiden van de sterkte.

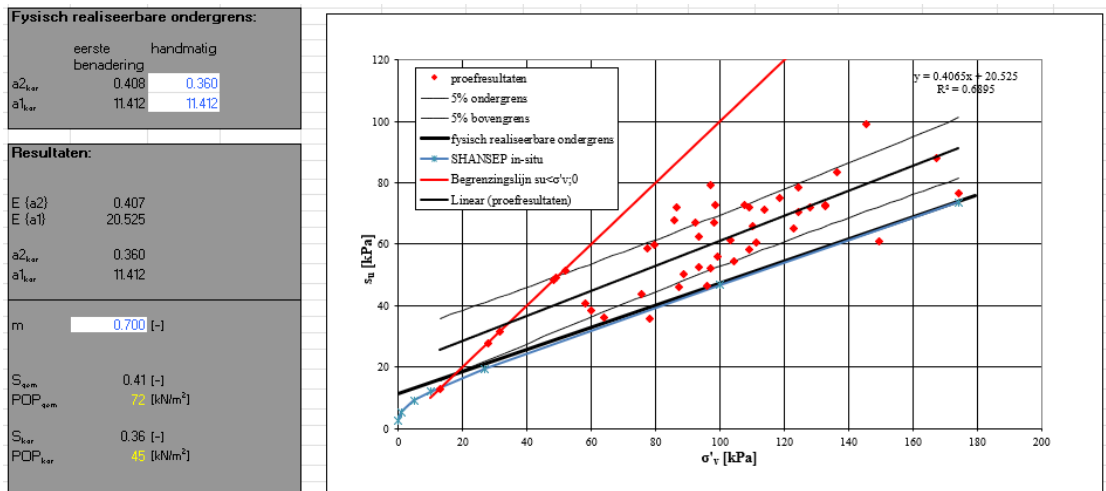
A.4.3 Afleiden sterkteparameters

Voor het bepalen van de sterkteparameters zijn verzadigde isotroop geconsolideerde triaxiaalcompressieproeven uitgevoerd. De monsters zijn geconsolideerd bij de in-situ effectieve spanning onder dagelijkse (onverzadigde) omstandigheden. Vervolgens zijn de sterkteparameters voor het SHANSEP-model afgeleid, waarbij is uitgegaan van een kental voor de sterkte toename exponent van $m=0,7$. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.7.



Figuur 7.7 Statistische analyse proefresultaten, zonder begrenzing

Uit Figuur 7.7 blijkt dat er in 2 proeven een sterkte ruim boven de verticale effectieve consolidatiespanning (in situ spanning onder dagelijkse omstandigheden) is gevonden. Voor 3 andere proeven ligt de gevonden sterkte net iets boven de verticale effectieve consolidatiespanning. Voor deze 5 punten wordt de sterkte begrenst op de verticale effectieve consolidatiespanning. Het resultaten hiervan is weergegeven in Figuur 7.8.



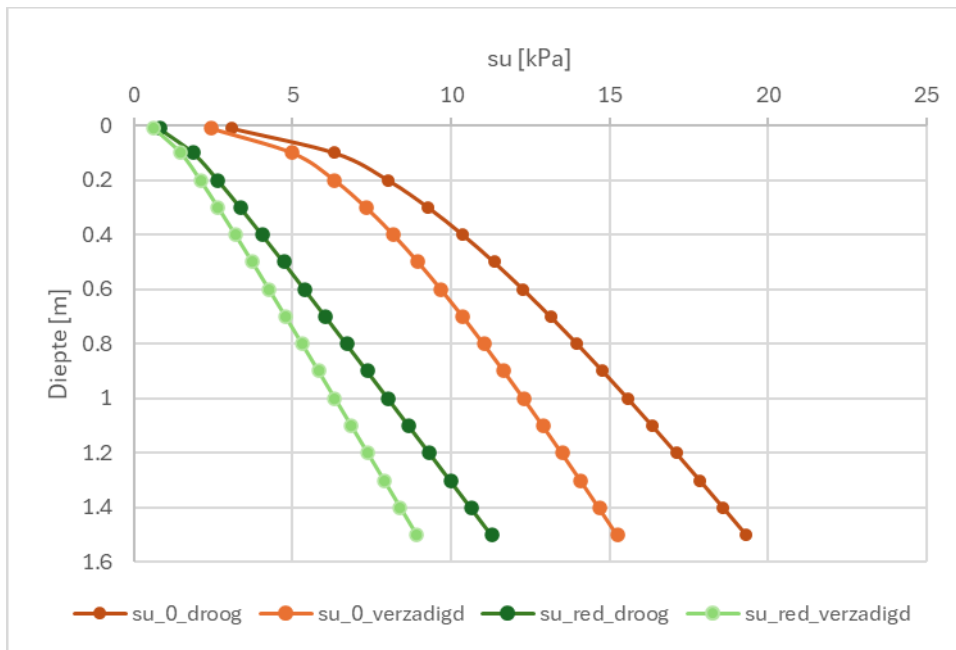
Figuur 7.8 Statistische analyse proefresultaten, inclusief begrenzing

Uit Figuur 7.7 en Figuur 7.8 blijkt dat door het begrenzen van de sterkte een wat lagere karakteristieke POP en een wat hogere S gevonden wordt. Opgemerkt wordt dat de karakteristieke waarde van de S handmatig wat verlaagd is, om een realistischere spreiding van deze (gefite) parameter S te verkrijgen, waarbij deze nog steeds goed bij de gevonden dataset past.

Voor de toplaag tot een diepte van 1,5m onder maaiveld is de POP waarde met een factor 7 gereduceerd tot een waarde van 6,4kPa. Ter illustratie is het verloop van de ongedraineerde schuifsterkte met de diepte weergegeven in Figuur 7.9. Hierin zijn 4 lijnen weergegeven:

- De initiele ongedraineerde sterkte boven de freatische lijn ($s_{u_0_droog}$)
- De initiele ongedraineerde sterkte onder de freatische lijn ($s_{u_0_verzadigd}$)
- De ongedraineerde sterkte boven de freatische lijn incl. reductie van de POP ($s_{u_red_droog}$)

- De ongedraineerde sterkte onder de freatische lijn incl. reductie van de POP (su_red_droog)



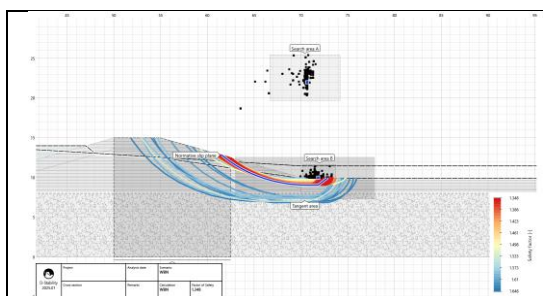
Figuur 7.9 Verloop ongedraineerde schuifsterkte met de diepte o.b.v. hydrostatisch drukverloop (rode lijnen o.b.v. POP=45kPa en groene lijnen incl. reductie voor scheurvorming o.b.v. POP=6,4kPa

A.4.4 Heterogeniteit

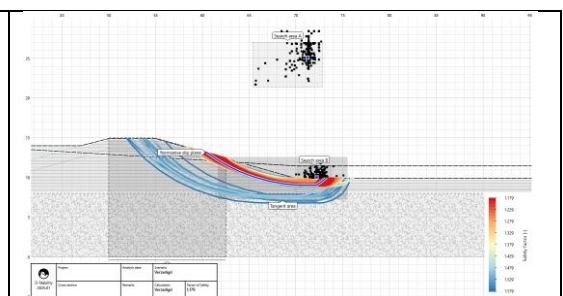
Uit het grondonderzoek blijkt dat de kern van de dijk homogeen is, maar er is slecht beperkt grondonderzoek op de taluds uitgevoerd. Er is daarom wel een kans op een gemiste zandscheg/lens op het binnentalud. Dit is als scenario meegenomen, waarbij een zandscheg van 20cm dik onder de bekledingslaag is aangenomen. De kans op dit scenario is ingeschat op 10%.

A.4.5 Semi-probabilistische berekeningsresultaten

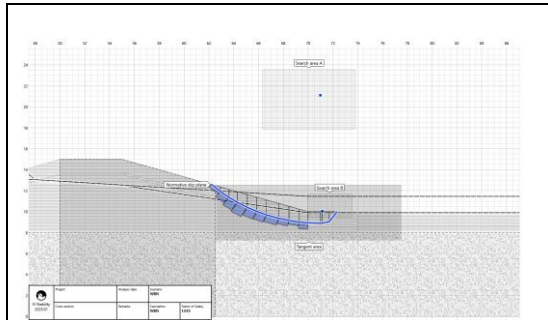
Op basis van bovenstaande uitgangspunten is een stabiliteitsanalyse uitgevoerd voor de WBN situatie en de situatie waarbij de dijk volledig verzadigd is. Dit is gedaan voor zowel het scenario zonder als met zandlens. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.10 t/m Figuur 7.13 en Tabel 7.1. Hierbij is zowel het maatgevende, als een diep glijvlak beschouwd.



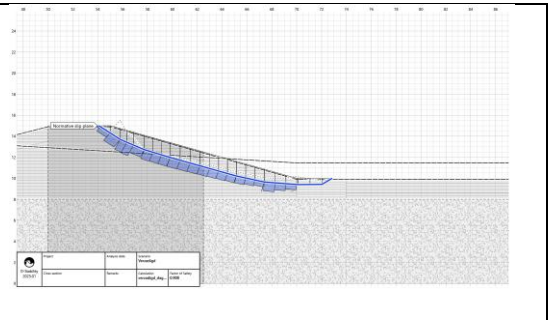
Figuur 7.10 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, zonder zandlens (SF=1,35)



Figuur 7.11 Resultaat stabiliteitsanalyse verzadigde situatie, zonder zandlens (SF=1,18)



Figuur 7.12 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, met zandlens (SF=1,05)



Figuur 7.13 Resultaat stabiliteitsanalyse verzadigde situatie, met zandlens (SF=0,91)

Tabel 7.1 Resultaten semi-probabilistische stabiliteitsanalyses

Berekening	Zandlens	Situatie	SF_ondiep	SF_diep
1a	Nee	Dagelijks	1,55	2,16
1b	Nee	WBN	1,35	1,52
1c	Nee	Verzadigd	1,18	1,48
2a	Ja	Dagelijks	1,61	2,17
2b	Ja	WBN	1,05	1,54
2c	Ja	Verzadigd	0,91	1,47

Uit Tabel 7.1 is op te maken dat de zandlens een grote invloed heeft op de berekende stabiliteitsfactor voor ondiepe glijvlakken. Voor diepe glijvlakken is er (conform verwachting) nauwelijks effect.

A.4.6 Probabilistische analyses

In deze paragraaf zijn een aantal indicatieve probabilistische analyses uitgevoerd. Hierbij is de kans op instabiliteit *gegeven* een bepaald waterstand en freatische bepaald. Deze is niet uitgeïntegreerd over de waterstand om de kans op instabiliteit te bepalen, maar is slechts bedoeld om een indruk te krijgen van het effect van het probabilistisch rekenen.

Hierbij zijn de volgende parameters gehanteerd:

- Gemiddelde S van de kleilaag gelijk aan 0,41 en standaardafwijking 0,03
- Gemiddelde POP toplaag gelijk aan 10,3kPa en standaardafwijking 2,8kPa
- Gemiddelde POP kern gelijk aan 72kPa en standaardafwijking 19,5kPa
- Gemiddelde hoek van inwendige wrijving van het zand van 32° en een standaardafwijking van 1,25°

De berekeningen zijn uitgevoerd met FORM voor het maatgevende glijvlak uit de semi-probabilistische analyses. Uit steekproefsgewijze vergelijkende berekeningen met MCIS volgen vergelijkbare resultaten. De resultaten zijn samengevat in Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Resultaten probabilistische stabiliteitsanalyses

Berekening	Zandlens	Situatie	P _{inst} [-]
1a	Nee	Dagelijks	Verwaarloosbaar
1b	Nee	WBN	3,1E-8
1c	Nee	Verzadigd	5,4E-5
2a	Ja	Dagelijks	Verwaarloosbaar

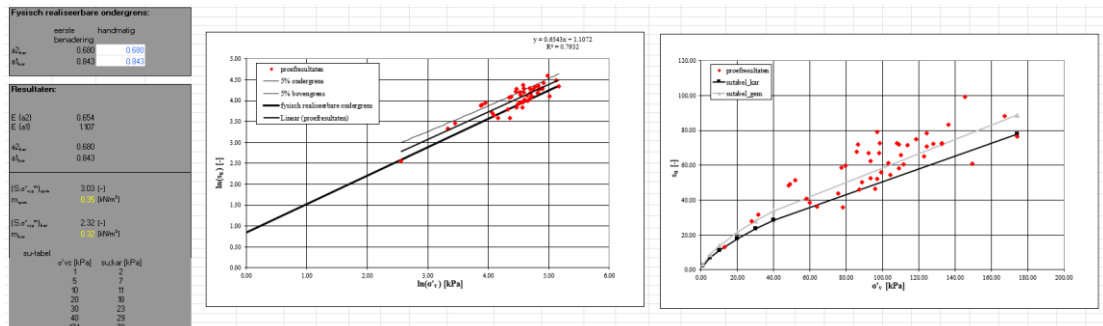
2b	Ja	WBN	1,4E-3
2c	Ja	Verzadigd	0,35

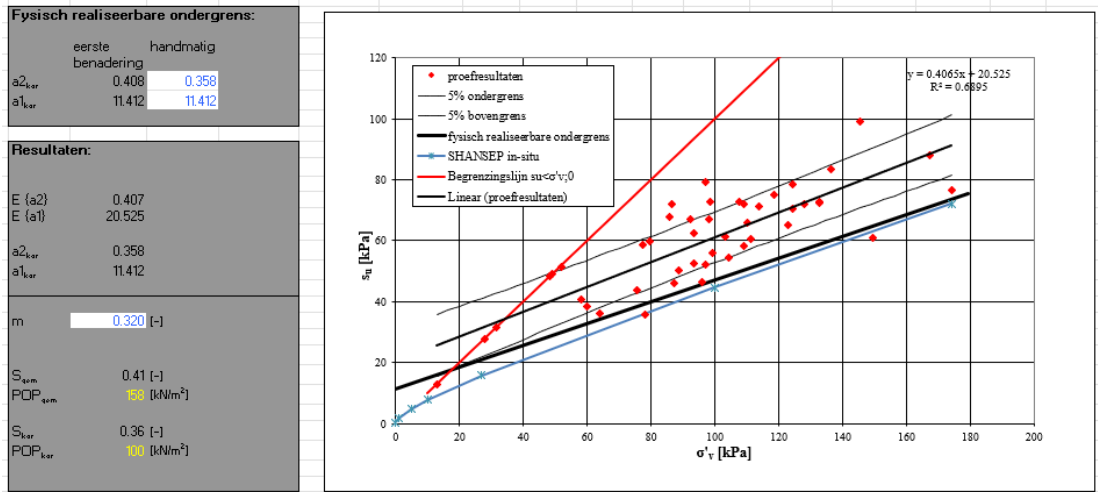
Uit Tabel 7.2 blijkt dat de kans op instabiliteit voor de dijk die volledig uit klei bestaat zeer klein is. Voor de dijk met zandlens neemt deze kans sterk toe wanneer de verzadiging toeneemt. De gewogen kans op instabiliteit gegeven verzadiging bedraagt $0,9 \cdot 5,4 \cdot 10^{-5} + 0,1 \cdot 0,35 = 0,04$. Voor de situatie gegeven WBN bedraagt deze kans ca. $1,4 \cdot 10^{-4}$.

A.4.7 Afwijkende situaties

Ter illustratie zijn nog 3 afwijkende situaties beschouwd:

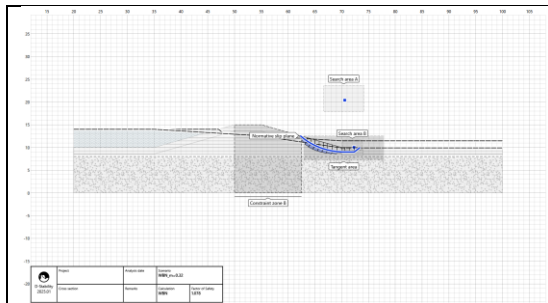
- De dijk bestaat uit 'transitional soil', waarbij ervoor is gekozen om een lagere m toe te passen, welke is afgeleid uit de dataset conform DIV (2025). De op deze wijze afgeleide parameters zijn weergegeven in Figuur 7.14 De POP in de toplaag van 1,5m dikte is met een factor 7 gereduceerd. Merk op dat de methodes om 'transitional soils' vast te stellen en te modelleren nog onderwerp van kennisontwikkeling is. De hier gepresenteerde modelleerwijze is daarom 'slechts' een voorbeeld van hoe 'transitional soils' gemodelleerd kunnen worden, andere keuzes kunnen ook passend zijn, afhankelijk van het gedrag van de betreffende 'transitional soil'. Geadviseerd wordt om de laatste stand van zaken omtrent deze kennisontwikkeling te volgen. Bij vragen hierover kan contact worden opgenomen met DIV (div@wsrl.nl).
- De kern van de dijk bevat verschillende dunne zandlaagjes. Daarom is in de kern van de dijk een reductie van de POP toegepast met een factor 7.
- Onder de dijk is een slappe lagen pakket van 8m dik aanwezig die permanent verzadigd is, onder de kruin van de dijk is een opbolling van 1m van de freatische lijn. De S van deze kleilaag bedraagt 0,3 gemiddeld en 0,25 karakteristiek, de POP bedraagt 27kPa gemiddeld en 15kPa karakteristiek, de m bedraagt 0,8 en het volumiek gewicht bedraagt 15 kN/m^3 .



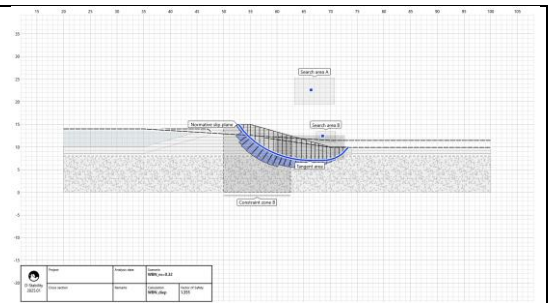


Figuur 7.14 Afgeleide dataset voor 'transitional soil'

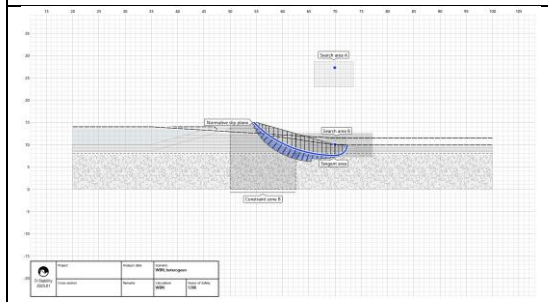
De resultaten voor deze drie afwijkende situaties zijn weergegeven in Figuur 7.15 t/m Figuur 7.18.



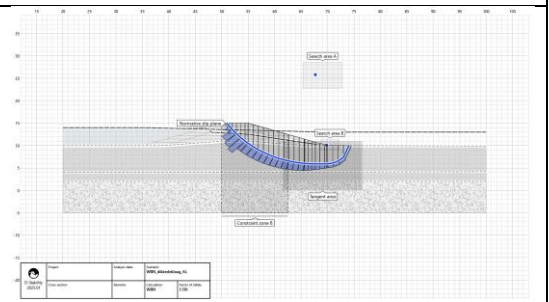
Figuur 7.15 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, 'transitional soil', ondiep glijvlak (SF=1,08)



Figuur 7.16 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, 'transitional soil', diep glijvlak (SF=1,36)



Figuur 7.17 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, heterogene kern (SF=1,19)



Figuur 7.18 Resultaat stabiliteitsanalyse WBN situatie, dik slappe lagen pakket (SF=1,14)

Voor deze drie situaties zijn ook probabilistische analyses uitgevoerd voor de situatie gegeven WBN. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 7.3.

Tabel 7.3 Resultaten afwijkende situaties

Berekening	Situatie	Situatie	Ondiep glijvlak		Diep glijvlak	
			S.F. [-]	$P_{inst WBN}$ (FORM) [-]	S.F. [-]	$P_{inst WBN}$ (FORM)

						[-]
1b	Basis	WBN	1,35	3,1E-8	1,52	Verw.
3	'Transitional soil'	WBN	1,08	7,0E-4	1,36	Verw.
4	Heterogene dijkkern	WBN	n.m.	n.m.	1,19	5,3E-6
5	Dik slappe lagen pakket	WBN	n.m.	n.m.	1,14	1,7E-5

1) Verw. = verwaarloosbaar

2) n.m. = niet maatgevend

A.4.8 Duiding resultaten

Uit het nader onderzoek blijkt dat als de dijk helemaal uit klei bestaat de stabiliteit hoog is, zelfs onder het uitgangspunt dat de sterkte in de opbarstzone verwaarloosbaar is. Dit is in lijn met praktijkervaringen waarbij sprake is van een relatief dunne deklaag en een talud wat niet steil is.

Met name de mogelijke aanwezigheid van een zandlens is bepalend voor de kans op instabiliteit. Dit sluit eveneens aan op praktijkervaringen, waar instabiliteit van ondiepe glijvlakken vaak veroorzaakt wordt door zandinsluitingen of andere inhomogeniteiten.

Als de kern van de dijk dunne horizontale zandlaagjes bevat (totale dikte <0,5m), neemt de stabiliteitsfactor af, maar de kans op instabiliteit gegeven WBN blijft verwaarloosbaar. De ligging van de zandlaagjes is dus van groot belang voor de stabiliteit.

Uit analyses voor een dijk op een dik verzadigd slappe lagen pakket blijkt dat de stabiliteitsfactor sterk afneemt. Het effect van de sterkte van de initieel onverzadigde zone neemt dan af. Dit is ook conform verwachting, aangezien dan de relatieve invloed van de sterkte van de initieel onverzadigde zone afneemt.

A.5 Stap 4: Uitvoeren uitgebreid onderzoek

Uit het onderzoek uit stap 3 blijkt dat met name de mogelijke aanwezigheid van een zandlens/zandinsluiting van grote invloed is op de stabiliteit, in ieder geval voor ondiepe glijvlakken. In relatie tot de beslisvraag die voorligt heeft de doorsnede alleen een substantiële bijdrage aan de overstromingskans van het dijktraject als er zandlensen aanwezig zijn. Op basis hiervan is het aan te bevelen om ook een gevoeligheidsanalyse te doen naar het effect van de ligging van deze zandlaagjes, zodat vastgesteld kan worden tot welke diepte deze zandlaagjes de stabiliteit bepalen en aanvullend grondonderzoek hierop afgestemd kan worden.

Opgemerkt wordt dat na een eventuele ondiepe instabiliteit er nog aanzienlijke reststerkte aanwezig is in de kern van de dijk. Het is derhalve mogelijk dat het effect van deze zandlensen op de overstromingskans uiteindelijk beperkt blijkt, ook hier is echter de ligging van deze laagjes van belang. Om tot een aanscherping te komen kan daarom een afweging gemaakt worden om meer onderzoek te doen naar de reststerkte van de dijk, bijv. bij een overslagsituatie, of er kan onderzoek worden uitgevoerd om de aan-/afwezigheid van zandlensen uit te sluiten (of aan te tonen), de kans hierop nauwkeuriger te bepalen en/of de ligging van deze zandlaagjes vast te stellen.

In dit voorbeeld zijn relatief weinig onzekerheden benoemd. In de praktijk zullen over het algemeen meer onzekerheden zijn, waarop het uitgebreide onderzoek nader kan worden toegespitst.