



Meetstrategieën voor dijken

Meetstrategieën voor het efficiënt en accuraat meten van verschillende soorten dijken om de gevoeligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit te kunnen bepalen

Luuk van Weeghel | 21 december 2017

**UNIVERSITEIT
TWENTE.**



BZ Ingenieurs & Managers

MEETSTRATEGIEËN VOOR DIJKEN

Meetstrategieën voor het efficiënt en accuraat meten van verschillende soorten dijken om de gevoeligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit te kunnen bepalen

Datum: 21 december 2017

Plaats: Deventer

Auteur: dhr. L. van Weeghel

Opdrachtgevers: BZ Ingenieurs & Managers
Zutphenseweg 51
Postbus 445
7400 AK, Deventer

Universiteit Twente
Faculteit CTW, Civiele Techniek
Postbus 217
7500 AE, Enschede

Afstudeercommissie:	Dr. J.J. Warmink	(Universiteit Twente vakgroep WEM)
	Ing. W.S. Zomer MSc	(BZ Ingenieurs & Managers)
	Anika Boelhouwer MSc	(Universiteit Twente vakgroep VVR)

Foto op omslag: Hoogwater IJssel: Kampen – Deventer (Ruben Schipper, 2011)

Voorwoord

De Bachelor Eindopdracht vormt de laatste fase en is daarmee ook de afronding van de bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Gedurende tien weken heb ik extern onderzoek gedaan om meetstrategieën voor dijken te ontwikkelen. De resultaten van mijn inspanningen staan beschreven in het rapport dat nu voor u ligt.

Ik heb de opdracht uit gevoerd bij BZ Ingenieurs & Managers, gevestigd te Deventer. BZ is een bedrijf dat al geruime tijd actief is in de watersector en vanuit een onafhankelijke positie opereert op het snijvlak van techniek en organisatorische vraagstukken (BZ Ingenieurs & Managers, n.d.).

Een doel van het uitvoeren van een externe Bachelor Eindopdracht is het gebruiken van reeds opgedane kennis en vaardigheden om deze vervolgens zelfstandig in praktijk te brengen. Door het doen van onderzoek naar bepaalde civieltechnische aspecten wordt deze kennis niet alleen gebruikt maar ook verbreed en verdiept. Mijn persoonlijke leerdoelen waren voornamelijk het volledig zelfstandig werken en het opbrengen van de discipline om gedurende vijf dagen per week, acht uur per dag serieus bezig te zijn met een onderzoek. Daarnaast vond ik het belangrijk om kennis te maken met het werkveld om zo te kunnen kijken waar ik later wel of juist niet terecht zou willen komen: wat past bij mij?

Ik verwachtte verder mijn vaardigheden omtrent het vergaren en combineren van (nieuwe) informatie naar een hoger niveau te kunnen tillen en ik denk dat ik wel mag zeggen dat dat gelukt is. Tot slot ben ik erg benieuwd naar de meerwaarde van mijn onderzoek. Ik hoop dat mijn onderzoek een bijdrage levert aan de inzichten omtrent het meten van dijken en als handreiking kan dienen voor het formuleren van een locatie specifieke meetstrategie.

Op de eerste plaats bedank ik mijn collega's van BZ Ingenieurs & Managers. Wouter Zomer, Sander Bakkenist, Jan Gert Rinsema en Caspar ter Brake zorgden altijd voor een gemoedelijke en gezellige (werk)sfeer op kantoor waarbij ik mij altijd thuis heb gevoeld. Ook wil ik hen bedanken voor alle tips en feedback die ik heb mogen ontvangen.

Daarnaast wil ik graag Jord Warmink, mijn begeleider namens de Universiteit Twente, bedanken. Hij heeft mij geholpen bij het opzetten van dit onderzoek en ik heb in een latere fase van mijn onderzoek veel gehad aan zijn feedback. Op deze plek ook nog speciale dank naar Wouter Zomer die, ondanks zijn overvolle werkschema, toch steeds de tijd vond om mij van uitgebreide feedback te voorzien.

Ik hoop dat dit rapport u enig inzicht geeft in het proces omtrent het meten van dijken en het daarvoor ontwikkelen van meetstrategieën.

Veel leesplezier!

Luuk van Weeghel
November 2017, Deventer

Inhoud

Lijst met gebruikte tabellen	2
Lijst met gebruikte figuren.....	3
Samenvatting	4
1. Inleiding	5
1.1 Achtergrond	5
1.2 Probleemstelling	5
1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen	6
1.3.1 Doelstelling	6
1.3.2 Hoofdvraag	6
1.3.3 Deelvragen	6
1.4 Leeswijzer	6
2. Methodiek	7
2.1 Macrostabiliteit	7
2.1.1 Beoordeling.....	7
2.1.2 Berekening	8
2.2 Inventarisatie meettechnieken	9
2.3 Samenstelling van een dijk en de ondergrond.....	9
2.4 Eigenschappen van verschillende meettechnieken	10
2.5 Verschillende meettechnieken ten aanzien van verschillende soorten dijken en ondergronden..	11
2.6 Combinaties van meettechnieken	11
3. Resultaten.....	13
3.1 Parameters macrostabiliteit.....	13
3.1.1 Het faalmechanisme macrostabiliteit.....	13
3.1.2 Benodigde parameters macrostabiliteit.....	16
3.2 Verschillende meettechnieken	18
3.3 Samenstelling van een dijk en de ondergrond.....	18
3.3.1 Algemeen	18
3.3.2 Samenstelling van de dijk.....	19
3.3.3 Samenstelling van de ondergrond	20
3.3.4 Parameters per dijk/ondergrond samenstelling.....	20

3.4	Eigenschappen van verschillende meettechnieken	21
3.4.1	Eigenschappen van puntmeettechnieken	21
3.4.2	Eigenschappen van geofysische meettechnieken.....	23
3.4.3	Eigenschappen van remote sensing technieken.....	25
3.4.4	Eigenschappen van laboratoriumproeven.....	25
3.5	Verskillende meettechnieken voor een parameter	26
3.5.1	Samenvatting meettechnieken	27
3.6	Het combineren van meettechnieken	29
3.6.1	Combinaties van meettechnieken	29
3.6.2	Meetstrategieën	31
4.	Discussie.....	34
5.	Conclusie en aanbevelingen	35
5.1	Conclusie	35
5.2	Aanbevelingen.....	35
	Bibliografie.....	37
	Bijlage A	40
	Bijlage B	44
	Bijlage C	48
	Bijlage D	55

Lijst met gebruikte tabellen

Tabel 1. Belangrijke parameters voor het faalmechanisme macrostabiliteit.....	16
Tabel 2. Verschillende meettechnieken	18
Tabel 3. Benodigde parameters per dijk/ondergrond type.....	20
Tabel 4. Eigenschappen van de verschillende puntmeettechnieken.	22
Tabel 5. Eigenschappen van de verschillende geofysische meettechnieken.....	24
Tabel 6. Eigenschappen van verschillende remote sensing technieken.	25
Tabel 7. Eigenschappen van de verschillende laboratoriumproeven.....	25
Tabel 8. Meettechnieken per parameter	26
Tabel 9. Alle meettechnieken en bijbehorende eigenschappen/toepassingen.....	28
Tabel 10. Combinaties van meettechnieken uiteengezet per dijk/ondergrond type.....	29

Lijst met gebruikte figuren

Figuur 1. Verschillende faalmechanismen voor een dijk (Dijkverbetering Waterschap Rivierenland, 2014)	5
Figuur 2. Schematische weergave van het glijvlak op basis van methode Bishop (Zwanenburg et al., 2013).	8
Figuur 3. Relatie tussen de spanning (s') en schuifsterkte (t) (van Duinen, 2014).	14
Figuur 4. Schematische weergave van een dijk met een zandkern en een kleidek (TAW, 1996).	19
Figuur 5. Mogelijke ruisbronnen weergegeven per geofysische methode (Reynolds, 2011).	24
Figuur 6. Voorbeeld van twee EM-metingen (doorgetrokken en gestreepte lijnen) gecombineerd met boringen (cirkels) en een sondering (driehoek) en het daaruit afgeleide bodemprofiel (Coelho et al., 2015).	32
Figuur 7. Specifieke meettechnieken per dijk/ondergrond type. Een groene pijl staat voor een positief antwoord op de vraag en een rode pijl voor een negatief antwoord.	33
Figuur 8. Schematisatie van de methode Bishop (Zwanenburg et al., 2013)	40
Figuur 9. Schematische weergave van lamellen in de glijcirkel (Allsop et al., 2007)	40
Figuur 10. Schematische weergave van een voorbeeld van het glijvlak bij de methode LiftVan (Zwanenburg et al., 2013)	41
Figuur 11. Dijk met voorland en ondergrond; Stijghoogte in zandlaag, grenspotentiaal en opdrijfzone (Zwanenburg et al., 2013)	42
Figuur 12. Voorbeeld van een glijvlak op basis van de methodes Bishop (boven), LiftVan (midden) en Spencer-Van der Meij (onder) (Van der Meij, 2012).	43
Figuur 13. Karakterisering van de schuifsterkte (t) in relatie tot de spanning (s') volgens het Critical State Soil Mechanics (van Duinen, 2014)	44
Figuur 14. Relatie tussen de spanning (s') en schuifsterkte (t) (van Duinen, 2014)	45
Figuur 15. Gedraineerd (normale lijn) en ongedraineerd gedrag (stippellijn) in het CSSM-model weergegeven in verschillende mate van consolidatie (van Duinen, 2014)	46
Figuur 16. Bepaling grondsoort op basis van de verhouding tussen de conusweerstand en de kleefweerstand (TAW, 2001)	48
Figuur 17. Een in situ-vane met vinnen van verschillende afmetingen (van der Valk & van Seters, 2010)	49
Figuur 18. Schematische weergave van een seismische meting (Coelho et al., 2015)	51
Figuur 19. Schematische weergave van de stroompaden bij een ERT-meting (Coelho et al., 2015)	51
Figuur 20. Schematische weergave van het afschuiven van het grondmonster bij een Direct Simple Shear proef (TAW, 2001).	53

Samenvatting

Dijken moeten regelmatig worden getoetst op het mogelijk optreden van verschillende faalmechanismen. Voor het uitvoeren van deze toetsen zijn gegevens nodig over de dijk en de ondergrond, zoals de geometrie, de grondsoort en de waterspanning in de grond. Echter, deze parameters kunnen op meerdere manieren gemeten worden en er is niet duidelijk wat de contributie van iedere meettechniek is op de inschatting van de gevoeligheid van een dijk voor macrostabiliteit. Ook is er niet duidelijk welke meettechnieken samen een goede combinatie vormen voor het, met een bepaald doel, meten van een dijk. Het doel van dit onderzoek is om deze beide aspecten inzichtelijk te maken en om meetstrategieën te ontwikkelen om een dijk te kunnen meten voor de gevoeligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

Om dit doel te bereiken is het faalmechanisme macrostabiliteit onderzocht. Op welke schaal speelt het zich af, hoe wordt het veroorzaakt en welke parameters zijn daarbij van belang? Vervolgens is er gekeken naar de in Nederland veel gebruikte meettechnieken en de parameters die zij kunnen meten. Er is in Nederland namelijk niet zoiets als een standaard dijk. Hierom zijn er in dit onderzoek vier soorten dijken gekozen in combinatie met twee soorten ondergronden. Te weten: een dijk van zand, klei, veen en zand met klei op een cohesieve en op een zand ondergrond. Zodoende levert dit samen acht mogelijke combinaties van dijk/ondergrond op.

De in Nederland veel gebruikte meettechnieken zijn onderzocht aan de hand van vijf criteria (accuratesse, betrouwbaarheid, dieptebereik, duur en overig) om zo in kaart te brengen wat de sterke en zwakke punten van een meettechniek zijn. Ook is het functioneren van meettechnieken in verschillende omstandigheden en grondsoorten geanalyseerd. Dit vond plaats aan de hand van de acht geformuleerde dijk/ondergrond combinaties.

Op basis van deze informatie en de benodigde macrostabiliteit parameters is er gezocht naar accurate en betrouwbare meettechnieken die samen op een efficiënte wijze de benodigde parameters kunnen meten voor iedere dijk/ondergrond combinatie.

Iedere strategie heeft een eigen meetdoel. Door de levenscyclus van een dijk te beschouwen en de meetdoelen hiervoor duidelijk te maken, zijn er meettechnieken aan de combinaties van meettechnieken toegevoegd zodat ieder doel bereikt wordt met een bepaalde strategie. De geformuleerde meetstrategieën zijn zodoende specifiek voor ieder dijctype én meetdoel. Er is gebleken dat sommige meettechnieken altijd ingezet kunnen worden terwijl andere specifiek zijn voor een bepaalde grondsoort. Hierom heeft het dijk/ondergrond type maar beperkte invloed.

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

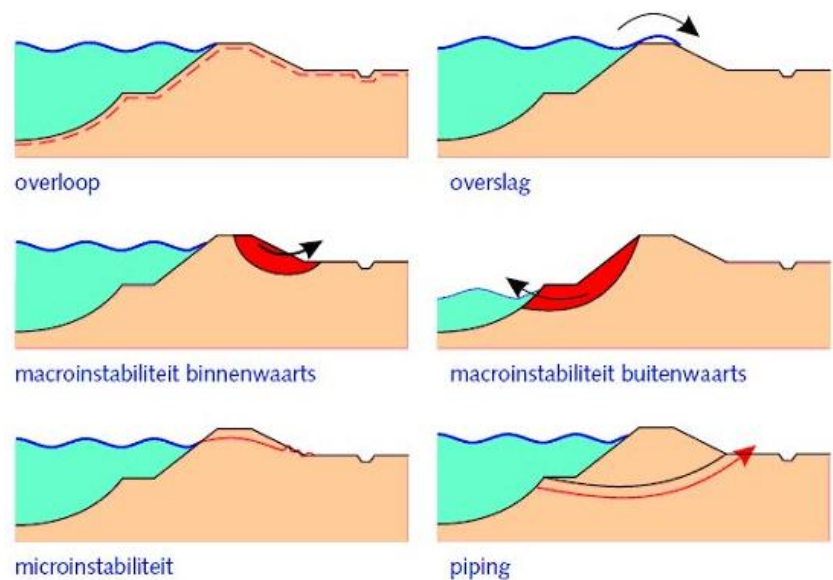
Beheerders van primaire waterkeringen moeten volgens de Waterwet tenminste eens in de twaalf jaar beoordelen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen (Ministerie Infrastructuur en Waterstaat, 2009). De manier waarop deze beoordeling moet worden uitgevoerd is beschreven in het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI). Iedere toetsronde actualiseert Rijkswaterstaat dit instrumentarium, dit gebeurt op basis van nieuwe kennis, inzichten en ervaringen met het vorige instrumentarium. Voor het WBI 2017 is het instrumentarium echter ingrijpender gewijzigd dan andere jaren. De reden hiervoor is de nieuwe veiligheidsnormering die per 1 januari 2017 van kracht is. Het WBI 2017 gaat dan ook volledig uit van de nieuwe normering.

Tijdens zo'n beoordeling dienen de beheerders de dijk te beoordelen op meerdere mogelijke faalmechanismen van een waterkering. Faalmechanismen zijn eigenlijk de verschillende manieren waarop een dijk kan 'falen'. De verschillende faalmechanismen zijn weergegeven in Figuur 1. Eén van de faalmechanismen is macro-instabiliteit. Dit kan zowel binnenwaarts van de dijk als buitenwaarts optreden, zie Figuur 1.

Om een dijk op macrostabiliteit te toetsen is input nodig. De eerste stap van het vergaren van deze input bevindt zich eigenlijk nog voor het doen van metingen, dat is namelijk het inventariseren van reeds bestaande gegevens over de dijk en/of de ondergrond. Op basis van deze inventarisatie wordt normaal gesproken een grondonderzoeksplan opgesteld om de ontbrekende parameterwaardes te meten. In de loop der jaren zijn er namelijk vele technieken ontwikkeld om (de samenstelling van) de grond onder een dijk te meten en te testen. Enkele voorbeelden zijn een vinproef, boringen of grondradar (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-d). Het is wenselijk om deze verschillende technieken op een dusdanige manier te gebruiken zodat ze elkaar aanvullen en er geen 'hiaten' in de kennis over de dijk achterblijven zonder dat er onnodig veel technieken worden ingezet.

1.2 Probleemstelling

Voldoende metingen van goede kwaliteit zijn essentieel om te kunnen bepalen of een dijk veilig genoeg is voor het faalmechanisme macrostabiliteit (Rijkswaterstaat, 2017). Om te berekenen of een dijk veilig genoeg is, moeten namelijk alle benodigde inputparameters, met een hoge mate van accuratesse, bekend zijn. Wellicht zijn sommige parameters al bekend vanuit vorig onderzoek, maar voor anderen zal er daadwerkelijk gemeten moeten worden. Echter, het daadwerkelijke effect van de verschillende technieken op de



Figuur 1. Verschiede faalmechanismen voor een dijk (Dijkverbetering Waterschap Rivierenland, 2014)

inschatting van de gevoeligheid van de dijk voor macrostabiliteit is niet bekend. Daarnaast is het probleem dat er veel verschillende meettechnieken beschikbaar zijn en dat iedere meettechniek maar in staat is om één of enkele parameters te meten. Dit heeft tot gevolg dat iedere meettechniek zijn eigen voor- en nadelen heeft. Het is daarom wenselijk, of wellicht noodzakelijk, om een combinatie van meettechnieken te formuleren die de (samenstelling van de) dijk efficiënt meet maar daarbij wel alle parameters accuraat in beeld brengt.

Het is zodoende nog onduidelijk wat de bijdrage van verschillende meettechnieken is op de beoordeling van een dijk voor het faalmechanisme macrostabiliteit. Ook is nog onduidelijk welke technieken, of combinatie van technieken, een efficiënte en accurate meetstrategie kunnen vormen om de waardes van alle benodigde inputparameters te vergaren teneinde een specifieke dijk te meten voor een bepaald meetdoel.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

1.3.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is: het formuleren van accurate en efficiënte strategieën voor het inzetten van verschillende meettechnieken, om de gevoeligheid voor het faalmechanisme macrostabiliteit voor verschillende dijken in te kunnen schatten, door de eigenschappen en toepassingen van veel gebruikte meettechnieken te onderzoeken.

1.3.2 Hoofdvraag

Om dit doel te bereiken, is de volgende hoofdvraag opgesteld:

Wat zijn accurate en efficiënte strategieën voor het inzetten van verschillende meettechnieken om de gevoeligheid van verschillende dijken voor het faalmechanisme macrostabiliteit te bepalen?

1.3.3 Deelvragen

De deelvragen die nodig zijn om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, zijn de volgende:

1. Welke parameters zijn van belang bij een macrostabiliteitsberekening?
2. Wat zijn in Nederland veel gebruikte meettechnieken om de benodigde parameters voor macrostabiliteit te meten?
3. Wat voor samenstellingen kan een dijk in combinatie met de ondergrond in Nederland hebben?
4. Wat zijn de eigenschappen van de verschillende meettechnieken in relatie tot het meten van de macrostabiliteitsparameters?
5. Welke meettechnieken zijn geschikt voor welke parameters?
6. Welke meettechnieken leveren, alleen of in combinatie, efficiënt accurate informatie op over de gevoeligheid van een bepaalde dijksamenstelling voor het faalmechanisme macrostabiliteit?

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de methodiek van dit onderzoek. De resultaten worden gepresenteerd aan de hand van bovenstaande deelvragen in Hoofdstuk 3 en in Hoofdstuk 4 worden deze bediscussieerd. Als afsluiting worden er in Hoofdstuk 5 conclusies getrokken en enkele aanbevelingen gegeven.

2. Methodiek

Uit de probleemstelling volgt dat het niet bekend is wat de bijdrage is van een bepaalde meettechniek aan een stabiliteitsberekening voor het faalmechanisme macrostabiliteit. Samen met het gegeven dat er veel meettechnieken beschikbaar zijn, maakt het dat het lastig kan zijn om te bepalen welke meettechnieken ingezet zouden moeten worden. Dit is onderzocht aan de hand van de in dit Hoofdstuk beschreven methodiek.

2.1 Macrostabiliteit

Om meer inzichten te krijgen in de bijdrage van meettechnieken aan een macrostabiliteitsberekening, zal eerst duidelijk moeten worden wat macrostabiliteit is, hoe het berekend wordt en wat belangrijke parameters zijn. Om dit duidelijk te krijgen, is er een literatuuronderzoek gedaan naar het fenomeen macrostabiliteit.

Macro-instabiliteit is een faalmechanisme dat de stabiliteit van een dijk ernstig kan bedreigen. Macro-instabiliteit betekent dat een dijk niet bestand is tegen grootschalig afschuiven van een grondlichaam. Dit afschuiven kan optreden langs rechte of gebogen glijvakken of door het optreden van plastische zones (Zwanenburg, van Duinen, & Rozing, 2013). Macro-instabiliteit kan zowel binnenwaarts als buitenwaarts optreden, dit onderzoek focust zich op de binnenwaartse variant

2.1.1 Beoordeling

De beoordeling op macrostabiliteit gaat sinds het nieuwe WBI via een 'getrapte procedure' De drie stappen in deze beoordeling zijn (Rijkswaterstaat, 2017):

1. Eenvoudige toets
2. Gedetailleerde toets
3. Toets op maat

In de *eenvoudige toets* wordt nagegaan of de waterkering voldoet aan algemene kenmerken, dat wil zeggen kenmerken van de geometrie van de waterkering of van de opbouw van de ondergrond. Deze toets is vooral bedoeld voor dijken die inherent veilig zijn (Rijkswaterstaat, 2017). Dit zijn dijken met een flauw talud en/of een hele brede kruin (zoals boulevards). Uitgangspunt hierbij is dat de buitenwaterstand maximaal $\frac{2}{3}$ van de dijkhoogte mag zijn (De Bruijn, de Vries, & 't Hart, 2017). Als de dijk niet veilig genoeg wordt bevonden op basis van de *eenvoudige toets*, volgt er een *gedetailleerde toets*. In de *gedetailleerde toets* wordt het falen van de dijk gedefinieerd als het afschuiven van een grondmoot waardoor de kruin van de dijk wordt verlaagd en functieverlies van de waterkering zal optreden (De Bruijn et al., 2017). Deze toets wordt gedaan aan de hand van een berekende stabiliteitsfactor. Op basis van de schematisatie van de dijk wordt deze stabiliteitsfactor met behulp van een rekenmodel uitgerekend. Deze kan vervolgens weer worden omgerekend naar een faalkans. Als de dijk deze *gedetailleerde toets* niet 'doorstaat', zijn er verschillende mogelijkheden (Rijkswaterstaat, 2017):

- Verbeteren schematisatie

- Opnieuw een *gedetailleerde toets* maar dan met een meer nauwkeurige schematisatie zodat tenminste een deeldijkvak kan worden goedgekeurd.
- Aanvullend (grond)onderzoek doen om de parameters van de ondergrond beter te beschrijven, aan te vullen of uit te sluiten of om parameters nauwkeuriger vast te stellen, en opnieuw beoordelen
- Verder beoordelen
 - Een volledig probabilistische gedetailleerde toets per dijkvak uitvoeren
 - Uitvoeren een *toets op maat*

Indien er voor de laatste optie wordt gekozen, wordt er een locatie-specifieke toets gedaan. Voor deze *toets op maat* is alleen het proces beschreven. Dit proces bestaat uit de volgende drie stappen (Rijkswaterstaat, 2017):

1. Inventariseren mogelijkheden nadere analyse
2. Beoordelen effectiviteit analyses (kosten-baten analyse)
3. Uitvoeren nadere (locatie specifieke) analyse.

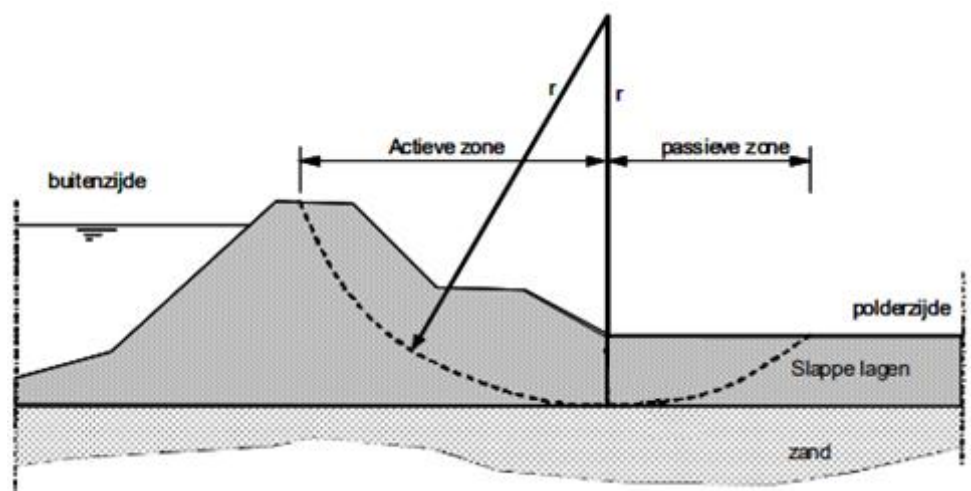
Daarnaast heeft de beheerder de vrijheid om deze toets in te vullen met behulp van zijn eigen kennis. Dit kan dus afwijken van de gedetailleerde toets (bijvoorbeeld door het uitvoeren van een bezwijkingsproef).

Mocht de dijk ook bij de *toets op maat* niet als 'veilig' beoordeeld worden tegen het faalmechanisme macrostabiliteit, dan zal deze moeten worden versterkt.

2.1.2 Berekening

De berekening van het faalmechanisme macrostabiliteit bestaat eigenlijk uit twee delen. Allereerst de werking en de locatie van het glijvlak en als tweede de maximale schuifsterkte van de grond op de locatie van het glijvlak. Deze zullen hier beide relatief kort besproken worden. Voor de meer uitgebreide uitleg wordt verwezen naar Bijlage A (glijvlak) en Bijlage B (schuifsterkte).

Er zijn meerdere methoden mogelijk om de locatie en de vorm van het glijvlak (zie Figuur 2) te bepalen. Dit zijn respectievelijk de methode Bishop, LiftVan en Spencer-Van der Meij. De methode Bishop vormt de basis voor macrostabiliteitsberekeningen, de methode LiftVan wordt op het mo-



Figuur 2. Schematische weergave van het glijvlak op basis van methode Bishop (Zwanenburg et al., 2013).

ment veel gebruikt, maar de methode Spencer-Van der Meij zou volgens de vigerende normen eigenlijk gebruikt moeten worden (De Bruijn et al., 2017; Helpdesk water, n.d.-b; Zwanenburg et al., 2013). Deze methoden worden uitgewerkt in Bijlage A.

In het WBI 2017 zijn enkele elementen om de schuifsterkte van de grond ten aanzien van macrostabiliteit te berekenen veranderd ten opzichte van het oude toets-instrumentarium. De methode die in dit onderzoek is meegenomen, is op basis van de nieuwe normen. De basis voor het model om de schuifsterkte van de grond te berekenen is het Critical State Soil Mechanics (CSSM) model (van Duinen, 2014). Dit model beschrijft (correlaties tussen) de grondeigenschappen en is zodoende verwerkt in bovenstaande glijvlak modellen om de locatie van het glijvlak te bepalen. Het CSSM-model kan echter breder worden toegepast dan alleen macrostabiliteitsberekeningen omdat het een koppeling legt tussen het gedrag bij compressie, zwellen, volumeverandering, afschuiven en poriënwaterrespons in termen van effectieve spanning. In het CSSM-model wordt onderscheid gemaakt tussen meerdere eigenschappen van de grond: normaal geconsolideerd gedrag versus overgeconsolideerd gedrag en gedraineerd versus ongedraineerd gedrag. Voor de verdere uitwerking van het CSSM-model wordt verwezen naar Bijlage B.

Het fenomeen macrostabiliteit en de parameters die voor het inschatten van de gevoeligheid daarvan van belang zijn, zijn besproken in paragraaf 3.1.

2.2 Inventarisatie meettechnieken

Om tot een accurate meetstrategie te komen, dienen eerst beschikbare meettechnieken geïnventariseerd te worden. Vervolgens wordt de toepassing van deze technieken in Nederland geïnventariseerd. Dit is ook gedaan op basis van een literatuurstudie. Er is gebruik gemaakt van meerdere bronnen om een breed beeld te krijgen van de beschikbare meettechnieken. Welke technieken de *in Nederland veel gebruikte meettechnieken* zijn, is vooral gebaseerd op Moser & Zomer (2006), Coelho et al. (2015). In deze rapporten staan de ‘actuele’ en de ‘meest gebruikte’ meettechnieken. Die informatie is gecombineerd met de websites www.dijkmonitoring.nl en www.bodemrichtlijn.nl en met veelgenoemde meettechnieken in de rapporten omtrent het WBI. Deze rapporten werden voornamelijk gevonden op www.helpdeskwater.nl. Door al deze bronnen te combineren, ontstond er vanuit verschillende invalshoeken een breed van de *in Nederland veel gebruikte meettechnieken*.

Bij het zoeken naar informatie omtrent de gekozen technieken zijn voornamelijk de werking en de te meten parameter(s) van belang. Hierbij is ook gebruikt gemaakt van andere (techniek specifieke) literatuur die gevonden werd op het internet. De relevante meettechnieken zijn besproken in paragraaf 3.2.

2.3 Samenstelling van een dijk en de ondergrond

Het is van belang om op hoofdlijnen een beeld te hebben uit welke grondsoorten dijken in Nederland bestaan. Daarbij is ook de samenstelling en/of opbouw van de ondergrond belangrijk. Bij deze deelvraag is literatuur op het internet gezocht omtrent het ontwerpen, bouwen of toetsen van dijken. Voornamelijk op basis van TAW (2001) en het Macrostabiliteitsexperiment zijn enkele typische dijk/ondergrond samenstellingen geformuleerd. Er is gekozen voor vier typen dijken en twee soorten ondergronden. Deze vier typen dijken hebben allemaal verschillende eigenschappen wat betreft doorlatendheid, gevoeligheid voor zetting, cohesie en structuur. Door deze vier typen dijken mee te nemen in dit onderzoek, worden de uitersten

(zand-, klei-, veendijk) meegenomen alsmede een representatieve situatie (zandkern met kleidek). Alle in de praktijk voorkomende situaties bestaan zodoende uit één, of een combinatie, van deze vier typen.

Een basis voor het bepalen van de ondergrond is de Stochastische Ondergrond Schematisatie (SOS). Dit is een bestand met daarin rekenwaarden voor de eigenschappen van de ondergrond voor alle primaire waterkeringen in Nederland. Bij het opstellen van SOS zijn, op basis van bekende informatie over de ondergrond, alle primaire keringen opgedeeld in segmenten. In zo'n segment komen één of meerdere SOS-scenario's voor met een bepaalde kans op aantreffen (Rijkswaterstaat, 2017). Op basis van SOS kan zodoende een voorzichtige inschatting gemaakt worden van de samenstelling van de ondergrond. De SOS-gegevens dienen wel aangevuld en/of gevalideerd te worden met gegevens verkregen uit metingen.

Het WBI onderscheidt voor de *eenvoudige toets* een cohesieve grond van een zandondergrond. Daarom is het van belang om te weten of de ondergrond uit zand of uit cohesieve lagen (klei of veen) bestaat. Dit zodat ook de inputparameters van de ondergrond bijdragen aan een juiste inschatting van de gevoeligheid van een dijk op macrostabiliteit. In dit onderzoek zijn ook deze twee soorten ondergrond onderscheiden.

Omdat de grond in Nederland van nature heterogeen is (Spoorenberg, 2009), geldt voor de ondergrond hetzelfde als voor het dijklichaam; deze bestaat vrijwel nooit alleen maar uit zand, klei of veen. In een *gedetailleerde toets* of een *toets op maat* zal de bodem dusdanig in kaart gebracht moeten worden dat alle zwakke plekken en risico's ingeschat kunnen worden.

De acht dijk/ondergrond samenstellingen zijn besproken in paragraaf 3.3.

2.4 Eigenschappen van verschillende meettechnieken

Het feit dat er veel meettechnieken beschikbaar zijn en iedere techniek andere parameters meet, heeft tot gevolg dat iedere techniek andere voor- en nadelen heeft. De toepasbaarheid van verschillende technieken verschilt daarom per locatie en per situatie. Om technieken optimaal in te zetten, is het eerst noodzakelijk om van de desbetreffende techniek te weten wat deze sterke en zwakke punten zijn. Hiervoor is de literatuur omtrent de meettechnieken verder bestudeerd en zijn de eigenschappen van de verschillende technieken aan de hand van vijf criteria kwalitatief (hoog, redelijk, laag) en waar mogelijk kwantitatief besproken. Op basis van deze criteria kan inzicht verkregen worden in de eventuele bijdrage van de meettechniek aan een *accurate en efficiënte* manier om dijken te meten. Deze criteria zijn (op volgorde van de voor dit onderzoek gekozen importantie): accuratesse, betrouwbaarheid, dieptebereik, tijdsduur en overig. Deze criteria zijn gebaseerd op verschillende rapporten over meettechnieken, zo besproken Coelho et al. (2015), ENW (2012) en Spoorenberg (2009) meettechnieken onder andere aan de hand van dezelfde eigenschappen.

Accuratesse (of resolutie) is de mate van precisie. Wat is de resolutie van de techniek of hoe precies is de techniek in staat om de bodem in kaart te brengen. *Betrouwbaarheid* geeft aan hoe betrouwbaar de gemeten resultaten zijn. Moeten de gemeten parameters bijvoorbeeld nog geëxtrapoleerd worden of kan het zijn dat de resultaten beïnvloed kunnen worden door de aanwezigheid van (zout) grondwater? *Dieptebereik* geeft aan tot welke diepte de meettechniek in staat is om te meten. Bij *tijdsduur* (of afstand per dag) wordt besproken hoe lang de inzet techniek én de interpretatie van de gegevens duurt of welke afstand er per dag

gemeten kan worden met desbetreffende techniek. Als laatste worden de verdere relevant geachte eigenschappen besproken bij *overig*. Hier kan bijvoorbeeld aangegeven worden dat de techniek in Nederland gestandaardiseerd is of dat de techniek ook in het laboratorium uitgevoerd kan worden.

De gekozen volgorde is tot stand gekomen door de volgende overwegingen in acht te nemen: aangezien het doel van dit onderzoek is om een accurate meetstrategie te ontwikkelen, wordt *accuratesse* als meest belangrijk criterium gezien. Daarbij is de *betrouwbaarheid* ook belangrijk voor een accurate strategie. Een meettechniek kan wel heel precies zijn, maar als deze niet betrouwbaar is zijn de, weliswaar precieze, resultaten onverhoopt waardeloos. Ook het *dieptebereik* is hierbij relevant. Een meting moet namelijk wel wat kunnen zeggen over alle relevante diepten. Als vijfde is ook de *tijdsduur* van de techniek relevant. Het doel van dit onderzoek is namelijk ook om een efficiënte strategie te ontwikkelen. Een techniek die weken nodig heeft om resultaten te verkrijgen is minder efficiënt dan een techniek die dezelfde resultaten ook in enkele uren kan verkrijgen. Wellicht heeft een bepaalde techniek nog specifieke voor- en/of nadelen die niet te generaliseren zijn of zijn er andere eigenschappen waarvan het nodig geacht werd deze te noemen. Deze zijn besproken bij *overig*. Deze volgorde van importantie is gebruikt om de keuze tussen de in te zetten technieken te vergemakkelijken door eerst te kijken naar welke technieken een hoge *accuratesse* hebben en bij gelijke score door te gaan naar *betrouwbaarheid* enzovoort.

Deze eigenschappen zijn per meettechniek uitgezet in tabellen in paragraaf 3.4

2.5 Verschillende meettechnieken ten aanzien van verschillende soorten dijken en ondergronden

In paragraaf 3.5 is het verband gelegd tussen de benodigde parameters en de daarvoor toepasbare meettechnieken. Hierin zijn ook de samenstelling van de dijk en de ondergrond meegenomen. Sommige technieken zijn bijvoorbeeld alleen maar toepasbaar in zand en zijn dus niet in te zetten bij een kleidijk op een cohesieve ondergrond. Dit is per parameter uitgezet in een tabel waarin de geschikte meettechnieken voor die parameter staan alsmede een korte toelichting op deze meettechniek.

In deze paragraaf is ook een samenvattende tabel opgenomen waarin de toepasbaarheid én alle eigenschappen van de verschillende meettechnieken systematisch zijn opgenomen.

2.6 Combinaties van meettechnieken

In de laatste deelvraag worden combinaties van verschillende meettechnieken gemaakt die als basis dienen om accurate strategieën te formuleren, dit is te zien in paragraaf 3.6.1. Bij het maken van deze combinaties is gekeken naar de antwoorden op de vorige deelvragen om zo alle sterke eigenschappen van meettechnieken te combineren. Er is ook gelet op de zwakke punten van een meettechniek, deze zwakte moet namelijk opgevangen worden door een andere techniek. Deze combinaties zijn samengesteld aan de hand van de benodigde parameters per dijk/ondergrond combinatie. Per parameter is de beste techniek, op basis van de toepasbaarheid en de eigenschappen, gezocht. De meettechnieken die samen alle parameters meten vormen zodoende de in te zetten combinatie.

Een meetstrategie is meer dan alleen een combinatie van technieken die de juiste parameters meten. Een strategie begint bij een bepaalde invalshoek en zodoende zijn er verschillende strategieën te formuleren vanuit verschillende invalshoeken. Een invalshoek komt op zijn beurt weer voort uit de levensfase van een dijk. De verschillende levensfasen (levenscyclus) van een dijk zien er als volgt uit (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-b):

1. Beheer
2. Afkeur/beoordeling
3. Ontwerp
4. Realisatie/versterking

Omdat volgens de zorgplicht de beheerder verantwoordelijk is voor het noodzakelijke preventieve beheer en onderhoud om de waterkering aan de veiligheidseisen te laten voldoen, inspecteert de beheerder de waterkering regelmatig (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-f). Er wordt dan beoordeeld of de fysieke toestand van de kering nog in overeenstemming is met de vigerende norm. Deze plicht geldt in wezen tijdens de gehele levensduur van een dijk maar wordt in dit onderzoek gekoppeld aan de levensfase *beheer*, dit levert zodoende het *zorgplicht-perspectief* op. Het *beoordelings-perspectief* komt voort uit de levensfase *afkeur/beoordeling*. In deze levensfase wordt beoordeeld of de dijk nog voldoet aan de vigerende normen. Voor deze beoordeling is input nodig, deze kan vergaard worden door de meettechnieken uit het *beoordelings-perspectief* in te zetten. Als de dijk bij de beoordeling wordt afgekeurd, volgt de levensfase *realisatie/versterking*. In deze levensfase wordt de dijk versterkt zodat deze weer voldoet aan de norm

De in paragraaf 3.6.2 geformuleerde strategieën zijn dus specifiek voor een dijk/ondergrond combinatie én voor een meetdoel.

3. Resultaten

In dit Hoofdstuk zijn de resultaten van dit onderzoek beschreven aan de hand van de deelvragen. Allereerst worden in paragraaf 3.1 de parameters besproken die van belang zijn voor het inschatten van de gevoeligheid van een dijk voor macrostabiliteit. In paragraaf 3.2 zijn vervolgens de in Nederland veel gebruikte meettechnieken weergegeven. Paragraaf 3.3 gaat in op de in Nederland voorkomende typen dijken en ondergronden. De eigenschappen van de besproken meettechnieken komen aan de orde in paragraaf 3.4 en deze zijn toegespitst op de verschillende dijk/ondergrond typen in paragraaf 3.5. Hier is ook een samenvattende tabel te vinden die alle eigenschappen van een meettechniek kort weergeeft. Als laatste zijn in paragraaf 1.1 eerst combinaties van meettechnieken en vervolgens meetstrategieën gemaakt om de verschillende dijk/ondergrond typen accuraat en efficiënt te kunnen meten teneinde een inschatting te kunnen maken van de gevoeligheid voor macrostabiliteit.

3.1 Parameters macrostabiliteit

In deze paragraaf is ingegaan op het faalmechanisme macrostabiliteit en de parameters die van belang zijn om de gevoeligheid van een dijk daarvoor in te kunnen schatten. Daarvoor is allereerst het fenomeen macrostabiliteit uitgewerkt alvorens de parameters besproken zijn.

3.1.1 Het faalmechanisme macrostabiliteit

3.1.1.1 Glijvlak

Om de parameters die van belang zijn om de gevoeligheid van een dijk voor het faalmechanisme macrostabiliteit in te kunnen schatten, moet dit faalmechanisme eerst onderzocht worden. De resultaten hiervan staan in deze paragraaf.

Zoals aangegeven zijn er meerder methoden om (de locatie van) het glijvlak te berekenen. Het principe achter al deze methoden is gelijk; het gewicht van de grond in de actieve zone moet worden tegengehouden door het gewicht in de passieve zone samen met de schuifweerstand over het glijvlak. Voor een duiding van deze begrippen, zie Figuur 2 op pagina 8. Voor al deze methoden geldt zodoende dat voor de berekening informatie nodig is over de eigenschappen van de grond. De volgende gegevens van de grond zijn noodzakelijk om te weten (Rijkswaterstaat, 2017):

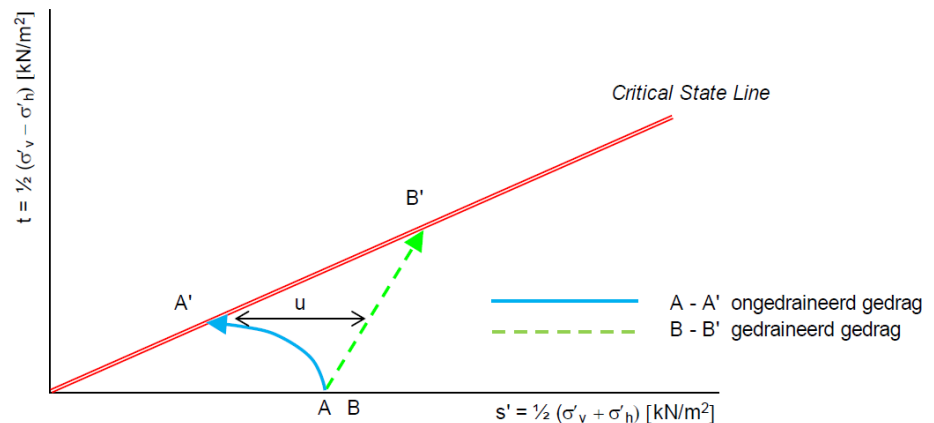
- Geometrie, dat wil zeggen het ingemeten dwarsprofiel van de waterkering en aanliggend maaiveld
- Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam
- Volumetrische gewichten van de grondlagen
- Sterkte-eigenschappen voor elke laag
- Ligging van de freatische lijn
- Waterspanningsverloop in de ondergrond

3.1.1.2 Schuifsterkte

Voor de bepaling van de schuifsterkte, gebruikt men het Critical State Soil Mechanics (CSSM) model. Indien de grond overgeconsolideerd is, vertoont de grond een vorm van cohesie. Bij toenemende grensspanning (= een toenemende overconsolidatie) wordt de cohesie (c') steeds groter. Overconsolidatie wordt in

het CSSM-model uitgedrukt in de grensspanning (σ'_p), de overconsolidatieratio (OCR) of de pre-overburden pressure (POP). Het betekent dat de grensspanning groter is dan de verticale effectieve spanning (σ'_v) (van Duinen, 2014). Grensspanning is namelijk de spanning waarbij het grondgedrag overgaat van stijf en voorbelast naar slap en niet-voorbelast. Als de grensspanning gelijk is aan de verticale effectieve spanning, spreekt men van normaal geconsolideerde grond (OCR = 1). De onzekerheden ten aanzien van de grootte van de grensspanning zijn echter groot (van Duinen, 2014).

Een belangrijke overweging bij het uitvoeren van een beoordeling op macrostabiliteit is de **afweging tussen een gedraineerde of een ongedraineerde analyse** (Rijkswaterstaat, 2017). Deze keuze hangt vooral af van de doorlatendheid van de grond. De doorlatendheid van klei is 10 tot 1000 keer zo klein als de doorlatendheid van zand (TAW, 2001). Bij een lage doorlatendheid duurt het relatief lang voordat excessieve waterspanningen (=hoger dan hydrostatische druk) zijn verdwenen omdat de doorstroming binnen de grondsoort relatief laag is. Een grondsoort wordt ongedraineerd genoemd als deze excessieve waterspanningen nog niet hebben kunnen wegvloeien. Omdat de doorlatendheid van klei vele malen minder is dan die van zand, duurt dat afvloeien bij klei ook vele malen langer dan bij zand. Om deze reden wordt in de regel bij de berekening van klei (en veen) met ongedraineerde schuifsterkte gerekend en bij zand met gedraineerde schuifsterkte (Rijkswaterstaat, 2017). Echter, bij OCR > 3 is de gedraineerde schuifsterkte ongunstiger dan de ongedraineerde (van Duinen, 2014). Het toepassen van de gedraineerde schuifsterkte is dan de veilige keuze, omdat ervan uitgegaan moet worden dat de grond bezwijkt bij de laagste mobiliseerbare schuifsterkte.



Figuur 3. Relatie tussen de spanning (s') en schuifsterkte (t) (van Duinen, 2014).

Zoals in Figuur 3 te zien is, is de schuifsterkte bij gedraineerd grondgedrag hoger dan de schuifsterkte bij ongedraineerd grondgedrag. De afstand tussen de groene en de blauwe lijn (u) wordt veroorzaakt door het hierboven beschreven optreden van waterspanning.

De gedraineerde schuifsterkte wordt als volgt berekend (Rijkswaterstaat, 2017):

$$t_{max} = s' \sin \varphi'_{cs} \quad (1)$$

Hierin is:

t_{max} = maximaal mobiliseerbare schuifsterkte ($(\sigma'_v - \sigma'_h) / 2$ met verticale effectieve spanning σ'_v en horizontale effectieve spanning σ'_h) [kN/m²]

s' = gemiddelde hoofdspanning ($(\sigma'_v + \sigma'_h) / 2$) [kN/m²]

φ'_{cs} = hoek van inwendige wrijving (critical state line) [°]

De ongedraineerde schuifsterkte is een wat meer complex fenomeen dan de gedraineerde schuifsterkte. Strikt genomen is de ongedraineerde schuifsterkte namelijk geen grondparameter maar een waarde van de schuifsterkte die afhankelijk is van diverse factoren, waaronder de belastinggeschiedenis en de -condities van de grond (van Duinen, 2014). Om deze te bepalen zijn metingen in het veld en in het laboratorium van belang.

Uitgaande van het CSSM en de SHANSEP (Stress History And Normalized Soil Engineering Properties) methode, wordt de ongedraineerde schuifsterkte van de grond als volgt bepaald (van Duinen, 2014):

$$s_u = \sigma'_{vi} * S * OCR^m \quad (2)$$

Met: $OCR = \sigma'_{vy} / \sigma'_{vi} \quad (3)$

$$S = s_u / \sigma'_{vc} \quad (4)$$

Hierin is:

s_u = de ongedraineerde schuifsterkte die door de grond kan worden gemobiliseerd [kN/m²]

σ'_{vi} = de effectieve spanning in de grond [kN/m²]

S = de ongedraineerde schuifsterkte ratio. Is de verhouding van de ongedraineerde schuifsterkte en de spanning waarbij het grondmonster is geconsolideerd. S is min of meer vergelijkbaar met de hoek van inwendige wrijving. In de ongedraineerde schuifsterkte ratio is naast het effect van de wrijving tussen de gronddeeltjes ook het effect van de generatie van waterspanning bij ongedraineerd grondgedrag verdisconteerd [-]

m = de sterkte toename exponent. Bepaalt de mate waarin de ongedraineerde schuifsterkte van de grond gevoelig is voor veranderingen in de effectieve spanning als gevolg van veranderingen in de waterspanning [-]

OCR = de verhouding tussen de grensspanning en de in situ spanning [-]

σ'_{vy} = de grensspanning. Is een maat voor de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond [kN/m²]

σ'_{vc} = de consolidatiespanning in de grond [kN/m²]

Samenvattend zijn de uitgangspunten voor de *gedetailleerde toets* voor macrostabiliteit bij alle belastingen door hoogwater als volgt (van Duinen, 2014):

- Voor licht overgeconsolideerde klei, organische klei en veen ($OCR < 3$) wordt de ongedraineerde schuifsterkte toegepast, omdat deze materialen slecht waterdoorlatend zijn.
- Voor grondsoorten die hoofdzakelijk kleiig zijn (klei met zandlaagjes of zandige klei) wordt ook de ongedraineerde schuifsterkte toegepast, omdat voorzichtigheid nodig is bij de aanname dat bezwijken niet optreedt onder ongedraineerde condities.
- Voor grondsoorten die hoofdzakelijk zandig zijn wordt gedraineerde schuifsterkte toegepast.

- Voor sterk overgeconsolideerde grond ($OCR > 3$) wordt de gedraineerde schuifsterkte toegepast, omdat de gedraineerde schuifsterkte bij hoge OCR-waarden ongunstiger is dan de ongedraineerde schuifsterkte.

Noot: Als dit voorkomt onder een licht overgeconsolideerde, slecht doorlatende laag dan wordt alsnog de ongedraineerde schuifsterkte toegepast, omdat een afschuiving zich dan snel zal voltrekken.

3.1.2 Benodigde parameters macrostabiliteit

Deze parameters die van belang zijn om de gevoeligheid van een dijk voor het faalmechanisme macrostabiliteit in te kunnen schatten, zijn verdeeld in twee categorieën:

1. Parameters die nodig zijn voor het bepalen van de belasting
2. Parameters die nodig zijn bij het bepalen van de schuifweerstand

Deze parameters zijn eerst weergegeven in Tabel 1 en zijn daarna toegelicht.

Tabel 1. Belangrijke parameters voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

Belasting	Schuifsterkte	
	Grondsoort	
	Effectieve spanning (σ_{vi})	
	Grensspanning (σ_{vy})	
	Gedraineerd	Ongedraineerd
Geometrie van het dijklichaam	De gemiddelde hoofdspansing (s')	De effectieve spanning (σ_{vi})
Volumetrisch gewicht (γ) van de verschillende grondsoorten	Hoek van de inwendige wrijving (ϕ'_{cs})	De consolidatiespanning (σ_{vc})
De doorlatendheid (k)		De grensspanning (σ_{vy})
Waterspanningsverloop (u)		De sterkte toename exponent (m)
(Eventueel extra belasting)		

3.1.2.1 Belasting parameters

Voor het kunnen uitvoeren van modelberekeningen zijn de volgende parameters nodig (ENW, 2012; Rijkswaterstaat, 2017):

- Geometrie van het dijklichaam en het achterland. Dat wil zeggen het ingemeten dwarsprofiel van de waterkering en aanliggend maaiveld
- Volumetrisch gewicht (γ) [kN/m^3] van de verschillende grondsoorten in de dijk, de ondergrond en het achterland
- De doorlatendheid (k) van de verschillende grondlagen, mede van belang om de hoogte van de freatische lijn en de waterspanningen te bepalen
- Waterspanningsverloop (u) in de ondergrond in een dwarsdoorsnede van de dijk
- Eventueel extra belasting op de dijk in de vorm van verkeer of bebouwing

3.1.2.2 *Schuifsterkte parameters*

Er zijn twee verschillende schuifsterktes (zie paragraaf 3.1.1.2); de gedraineerde schuifsterkte en de ongedraineerde schuifsterkte. Beide hebben andere parameters nodig om te worden berekend en worden daarom afzonderlijk behandeld.

De eerste stap is om te bepalen op welke manier de schuifsterkte zou moeten worden berekend. Hiervoor zijn de volgende parameters nodig (van Duinen, 2014):

- Grondsoort van de dijk en van de ondergrond. Is er klei of veen aanwezig?
- De effectieve spanning (σ_{vi})
- De grensspanning (σ_{vy})

Indien de grondlagen een korrelgrootte tussen $63 \mu\text{m}$ en 2 mm hebben, wordt dit gezien als zand en als goed doorlatende laag (Bodemrichtlijn, n.d.-b). Indien de grondlagen een korrelgrootte hebben $< 2 \mu\text{m}$ wordt dit gezien als klei en als een slecht doorlatende laag. Hiertussen is wordt het gezien als silt. Of het dijklichaam en de ondergrond uit een goed of slecht doorlatende lagen bestaat, bepaalt mede of er gerekend dient te worden met de gedraineerde of de ongedraineerde schuifsterkte. Ook de overconsolidatieratio (OCR) is hierbij van belang. Deze is te berekenen door de grensspanning (σ_{vy}) te delen door de effectieve spanning (σ_{vi}). Voor een meer uitgebreide uitleg over de keuze tussen gedraineerde of ongedraineerde schuifsterkte wordt verwezen naar paragraaf 3.1.1.2.

Voor het bepalen van de **gedraineerde schuifsterkte** zijn daarbij van iedere grondlaag de volgende parameters nog nodig (Rijkswaterstaat, 2017):

- De gemiddelde hoofdspanning (s') ($(\sigma'_v + \sigma'_h) / 2$ met daarin de verticale effectieve spanning σ'_v en horizontale effectieve spanning σ'_h)
- Hoek van de inwendige (ϕ'_{cs})

Deze parameters zijn ook terug te zien in vergelijking (1) op pagina 14.

Voor het bepalen van de **ongedraineerde schuifsterkte** zijn daarbij van iedere grondlaag nog de volgende parameters nodig (van Duinen, 2014):

- De effectieve spanning (σ_{vi})
 - Hiervoor is het volumetrisch gewicht van de grond (γ) nodig alsmede de heersende water-spanning (u).
- De ongedraineerde schuifsterkte ratio (S)
 - Hiervoor is de ongedraineerde schuifsterkte (s_u) nodig alsmede de consolidatiespanning (σ_{vc})
- De grensspanning (σ_{vy})
- De sterkte toename exponent (m)

Deze parameters zijn ook terug te zien in vergelijking (2), (3) en (4) op pagina 15

3.2 Verschillende meettechnieken

Om de benodigde parameterwaarden te bepalen, zullen metingen moeten worden verricht. Er zijn verschillende meettechnieken om deze parameters te bepalen:

Allereerst dient er onderscheid gemaakt te worden tussen technieken die specifiek meten op één punt, de zogeheten puntmetingen, de technieken waarbij een groter gebied in wezen gescand wordt door het uitzenden en weer ontvangen van stralingen of golven, de zogeheten geofysische meettechnieken, of de technieken waarmee van een afstand kan worden gemeten, de zogeheten remote sensing technieken. Maar niet alle benodigde parameters kunnen met deze soorten technieken in het veld bepaald worden. Om de waarden hiervoor toch te kunnen bepalen dienen er proeven in een laboratorium gedaan te worden. Ook deze proeven zijn in dit onderzoek meegenomen. De in Nederland veel gebruikte meettechnieken die in dit onderzoek worden meegenomen zijn weergegeven in Tabel 2. In Bijlage C staan alle meettechnieken uit Tabel 2 toegelicht.

Tabel 2. Verschillende meettechnieken ¹

Puntmeettechnieken	Geofysische meettechnieken	Remote sensing meettechnieken	Laboratoriumproeven
Boring	Seismisch	Laseraltimetrie	Triaxiaal
Sondering	ERT (elektrisch)	InSAR	Direct Simple Shear
Vinproef	IP (elektrisch)	Glasvezel ²	Samendrukking
Peilbuis	GPR (elektromagnetisch)		Constant Rate of Strain
Bourdon waterspanningsmeter	EM (elektromagnetisch)		Constant Head (doorlatendheid)
Elektrische waterspanningsmeter			Faling Head (doorlatendheid)
Pompproef			
Boorgatmethoden			
Speciale conussen			

3.3 Samenstelling van een dijk en de ondergrond

3.3.1 Algemeen

Het WBI onderscheidt in eerste instantie twee soorten dijken; de zand- en de kleidijk. Een groot verschil tussen deze twee grondsoorten is de doorlatendheid. Direct of indirect beïnvloedt dit namelijk aantal parameters en/of keuzes die invloed hebben op de stabiliteit en meegenomen worden in de stabiliteitsanalyse. Hierom is het van belang om onderscheid te maken tussen verschillende soorten dijken.

¹ Op basis van Moser & Zomer (2006), Coelho et al. (2015), www.dijkmonitoring.nl, www.bodemrichtlijn.nl en verschillende WBI-rapporten

² Is strikt gezien geen remote sensing techniek omdat er contact met de grond vereist is. Voor het gemak wordt deze hier wel bij gerekend in dit onderzoek

Om ook in dit onderzoek rekening te houden met de verschillende mogelijkheden van grondsoorten in een dijk en in de ondergrond, zijn er enkele typen dijken en ondergronden beschreven. Een combinatie van deze levert dan een voor Nederland reële situatie op.

3.3.2 Samenstelling van de dijk

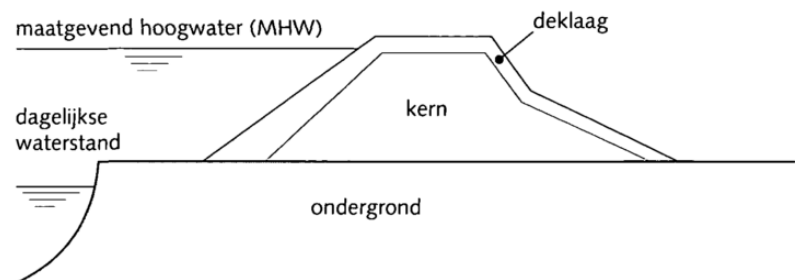
Er zijn twee typen dijken die onderscheiden worden in het WBI; de zand- en de kleidijk. Verder komt de veendijk ook veel voor in Nederland (Deltaproof, n.d.), daarom wordt deze ook meegenomen in dit onderzoek. Het laatste type is een middenweg tussen een zand- en een kleidijk; dit dijktype bestaat uit een zandkern met een kleidek. Deze tussenweg is ook gebruikt in het Macrostabiliteitsexperiment van de IJkdijk en in de All-in-one Sensor Validatie Test en is representatief voor situaties die in de praktijk voorkomen (G. de Vries et al., 2013; Weijers, Elbersen, Koelewijn, & Pals, 2009).

Een **zanddijk** bestaat volledig uit zand. Zand is waterdoorlatend vanwege de relatief grote korrels en is weinig tot niet samendrukbaar (Bodemrichtlijn, n.d.-a). Ook kent zand vrijwel geen cohesie. Een zanddijk is derhalve relatief goed waterdoorlatend en weinig onderhevig aan zetting.

Een **kleidijk** bestaat volledig uit klei. Klei is slecht water doorlatend (Rijkswaterstaat, 2017) en cohesief als gevolg van de bindingskrachten tussen zeer fijne gronddeeltjes, deze krachten zijn groot ten opzichte van het gewicht van de deeltjes (TAW, 1996). Klei is zeer samendrukbaar en heeft daardoor een hoger volumetrisch gewicht dan zand (TAW, 2001). In een kleidijk ligt de freatische grondwaterstand vaak hoger dan een dijk met een zandkern, omdat de capillaire werking in de klei de grondwaterstand verhoogt.

Veendijken komen vooral voor in het westen en noorden van Nederland (Deltaproof, n.d.). Veen is zeer samendrukbaar en cohesief (TAW, 2001) en bestaat niet uit korrels (zoals zand en klei) maar is een overblijfsel van afgestorven planten. Vanwege verweering van het veen is op deze dijken in de loop der tijden een kleiige afdekking ontstaan (Zwanenburg et al., 2013).

Veendijken kunnen ook bezwijken door droogte. Door droogte verdampt het water uit de veendijk waardoor de dijk uitdroogt. Door dit uitdrogen neemt én het volume én het gewicht van de dijk af (Deltaproof, n.d.). Als er na een periode van droogte een hevige regenbui valt en het boezempeil weer stijgt, is de belasting op de dijk derhalve hoog en de sterkte laag. Hierdoor neemt het risico op het afschuiven van een grondmoot toe.



Figuur 4. Schematische weergave van een dijk met een zandkern en een kleidek (TAW, 1996).

Een **zanddijk met kleidek** bestaat uit een zandlichaam dat wordt afgedekt door een laag klei, zie Figuur 4. Deze klei is vaak aangebracht om de waterdoorlatendheid van de dijk te verminderen (TAW, 1996). Een kleideklaag vertraagt de reactie van de freatische grondwaterstand (Zwanenburg et al., 2013).

3.3.3 Samenstelling van de ondergrond

In Nederland wordt de opbouw van de grond gekarakteriseerd door verschillende grondlagen waarvan de eigenschappen tussen beperkte grenzen variëren (De Bruijn et al., 2017). Er zijn binnen deze grenzen eigenlijk twee soorten ondergrond te onderscheiden: een cohesieve ondergrond en een zand ondergrond. Dit zijn dezelfde soorten als dat het WBI onderscheidt. Vandaar de keuze om in dit onderzoek ook onderscheid te maken tussen deze twee ondergronden.

Een **cohesieve ondergrond** wordt gekenmerkt door een samendrukbaar pakket. Volgens TAW (2001) zijn met name de eigenschappen van de slappe lagen, bestaande uit klei of veen, van grote invloed op de stabiliteit van een dijk.

Een **zand ondergrond** is weinig samendrukbaar en biedt meer stevigheid tegen afschuiven (De Bruijn et al., 2017). De waterspanningen zijn wel hoger bij een zandondergrond vanwege de doorlatende eigenschappen.

3.3.4 Parameters per dijk/ondergrond samenstelling

De parameters waarvan de waarde vervolgens bepaald dient te worden om de gevoeligheid van een dijk voor macrostabiliteit in te kunnen schatten, staan per dijk/ondergrond type weergegeven in Tabel 3. Hierin is het verband gelegd tussen de grondsoorten die zich in de dijk/ondergrond combinatie bevinden, de manier waarop de schuifsterkte van deze grondsoorten bepaald dient te worden (gedraineerd of ongedraineerd) en de parameters die daarvoor nodig zijn. De eerste stap gaat hier echter nog aan vooraf; het bepalen van de grondsoort in de dijk en de ondergrond. Dit is nodig om te kunnen kiezen van welk dijk/ondergrond type er sprake is. Hiervoor kan men bijvoorbeeld het waterschap raadplegen of oude onderzoeken bestuderen.

Tabel 3. Benodigde parameters per dijk/ondergrond type.

Dijktype	Ondergrondtype	Typenaam	Benodigde schuifsterkte parameters van de verschillende grondlagen	Benodigde ³ belasting parameters
Zanddijk	Cohesief	ZC	- Gemiddelde hoofdspanning - Hoek van inwendige wrijving - Effectieve spanning - Consolidatiespanning - Grensspanning - Sterkte toename exponent	- Geometrie van het dijklichaam - Volumetrisch gewicht van de verschillende grondlagen - Doorlatendheid van de verschillende grondlagen - Waterspanningsverloop
	Zand	ZZ	- Gemiddelde hoofdspanning - Hoek van inwendige wrijving	
Kleidijk	Cohesief	KC	- Effectieve spanning - Consolidatiespanning - Grensspanning - Sterkte toename exponent	
	Zand	KZ	Gemiddelde hoofdspanning	

³ Eventueel aanwezige extra belasting is hierin niet meegenomen omdat dit geen deel uitmaakt van het grondonderzoek.

Dijktype	Onder-grondtype	Typenaam	Benodigde schuifsterkte parameters van de verschillende grondlagen	Benodigde ³ belasting parameters
			• Hoek van inwendige wrijving • Effectieve spanning • Consolidatiespanning • Grensspanning • Sterkte toename exponent	
Veendijk	Cohesief	VC	• Effectieve spanning • Consolidatiespanning • Grensspanning • Sterkte toename exponent	
	Zand	VZ	• Gemiddelde hoofdspansing • Hoek van inwendige wrijving • Effectieve spanning • Consolidatiespanning • Grensspanning • Sterkte toename exponent	
Zandkern met kleidek	Cohesief	ZKC	• Gemiddelde hoofdspansing • Hoek van inwendige wrijving • Effectieve spanning • Consolidatiespanning • Grensspanning • Sterkte toename exponent	
	Zand	ZKZ	• Gemiddelde hoofdspansing • Hoek van inwendige wrijving • Effectieve spanning • Consolidatiespanning • Grensspanning • Sterkte toename exponent	

3.4 Eigenschappen van verschillende meettechnieken

In deze paragraaf worden de eigenschappen van de meettechnieken uit paragraaf 3.2 besproken. Dit is op basis van vaste criteria gedaan. De criteria die zijn meegenomen, zijn (op volgorde van importantie):

1. Accuratesse (of resolutie)
2. Betrouwbaarheid
3. Dieptebereik
4. Tijdsduur (of afstand per dag)
5. Overig

3.4.1 Eigenschappen van puntmeettechnieken

Puntmetingen geven alleen informatie over een specifiek punt waarbij de situatie een meter verderop sterk kan verschillen (Coelho, Diaferia, Kruiver, & Venmans, 2015). Puntmetingen zijn, in het algemeen, wel erg accuraat (TAW, 2001). Een nadeel voor puntmetingen in het algemeen is dat deze technieken ‘destructief

zijn. Dat wil zeggen dat ze sporen achter laten in de grond. Deze sporen kunnen, mits niet goed verholpen, negatief zijn voor de sterkte van een dijk. Zo kan een niet goed dichtgemaakt boorgat bijvoorbeeld een mogelijke kwellocatie worden voor piping (Förster, van den Ham, Calle, & Kruse, 2012). Verder zijn hier de eigenschappen uiteengezet op basis van de bovenstaande criteria. Dit is weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Eigenschappen van de verschillende puntmeettechnieken.

Meettechniek	Parameter	Accuratesse	Betrouwbaarheid	Dieptebereik	Tijdsduur	Overig
Boring	Doorlatendheid, grensspanning, sterkte toename exponent, schuifsterkte ratio, volumetrisch gewicht	Zeer hoog (Spoorenberg, 2009)	Hoog (mits voldaan aan de normen) (Rijkswaterstaat, 2017).	20 - 30 m (Bodemrichtlijn, 2008b; Moser & Zomer, 2006)	Tijdrovend (Spoorenberg, 2009)	Is de basis van grondonderzoek (Moser & Zomer, 2006)
Sondering	Grensspanning, schuifsterkte	Hoog (Spoorenberg, 2009)	Redelijk (boven grondwaterniveau) (Spoorenberg, 2009)	25 - 40 m (Spoorenberg, 2009)	Snel (Moser & Zomer, 2006)	Dit betreft een standaard CPT-sondering
Vinproef	Schuifsterkte ratio	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	Hoog (van der Valk & van Seters, 2010)	25 - 40 m	1 uur per meting (van der Valk & van Seters, 2010)	Kan ook in het laboratorium
Peilbuis	Waterspanning, effectieve spanning, hoogte freatisch vlak	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	20 - 30 m (Bodemrichtlijn, 2008b; Moser & Zomer, 2006)	Continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de waterspanning en hydraulische belasting te vinden (Rijkswaterstaat, 2017).
Bourdon waterspanningsmeter	Waterspanning, effectieve spanning, hoogte freatisch vlak	Redelijk (Moser & Zomer, 2006)	Laag (Moser & Zomer, 2006)	20 - 30 m (Bodemrichtlijn, 2008b; Moser & Zomer, 2006)	Continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de waterspanning en hydraulische belasting te vinden (Rijkswaterstaat, 2017).
Elektrische waterspanningsmeter	Waterspanning, effectieve	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	Redelijk (Moser & Zomer, 2006)	20 - 30 m (Bodemrichtlijn,	Continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de

Meettechniek	Parameter	Accuratesse	Betrouwbaarheid	Dieptebereik	Tijdsduur	Overig
	spanning, hoogte freatisch vlak			2008b; Moser & Zomer, 2006)		waterspanning en hydraulische belasting te vinden (Rijkswaterstaat, 2017).
Pompproef	Doorlatendheid	Ligt aan uitvoering (Bodemrichtlijn, 2008a; Thijssen, 2010)	Ligt aan uitvoering (Bodemrichtlijn, 2008a; Thijssen, 2010)	50 m (Bodemrichtlijn, 2008a)	Max enkele dagen (Bodemrichtlijn, 2008a)	Kan ook in laboratorium (Zwanenburg et al., 2013)
Boorgatmethoden	Ligt aan gekozen methode	Ligt aan gekozen methode	Ligt aan gekozen methode	20 - 30 m	Ligt aan uitvoering	
Speciale conussen	Ligt aan gekozen conus	Ligt aan gekozen conus	Ligt aan gekozen conus	25 - 40 m	Iets langer dan gewone sondering	

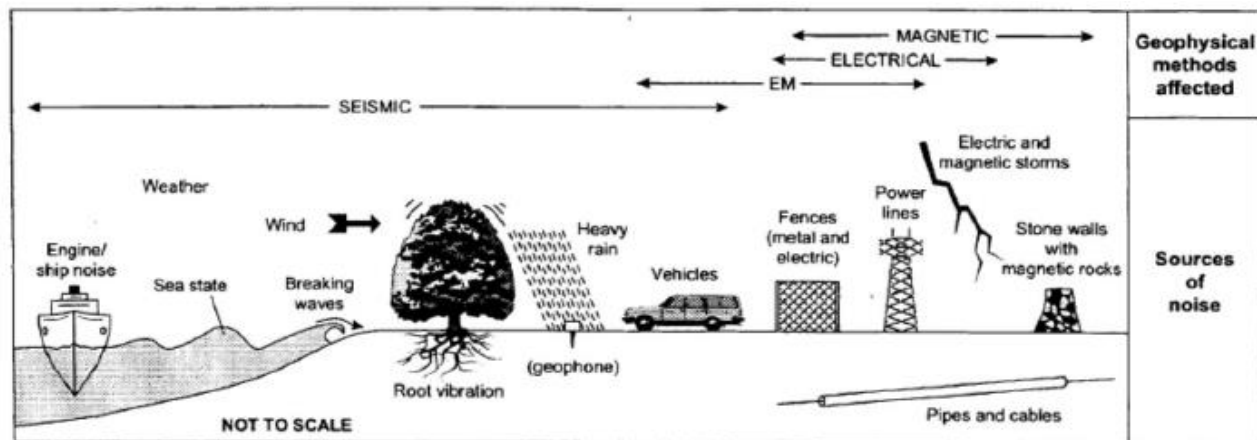
De eigenschappen van puntmeettechnieken zijn aanvullend toegelicht in Bijlage D.

3.4.2 Eigenschappen van geofysische meettechnieken

Geofysische meettechnieken zijn, in tegenstelling tot puntmetingen, lijn-, vlak- of volumedekkend. Deze technieken leveren derhalve informatie over een gebied in plaats van een punt. Mede hierom hebben deze technieken een aantal voordelen ten opzichte van puntmetingen. De grootste voordelen van geofysische methoden ten opzichte van puntmetingen zijn (Coelho et al., 2015):

- Snelle uitvoering
- Gebiedsdekkend
- De grond wordt niet (meer) verstoord
- Driedimensionale verkenning
- Herhaalbaarheid in de tijd

Geofysische meettechnieken hebben echter ook nadelen, zij kunnen namelijk ruis ondervinden. De ruis kan veroorzaakt worden door de aanwezigheid van verschillende objecten, dit is weergegeven in Figuur 5. Daarnaast levert geofysisch onderzoek soms geen unieke oplossing op (equivalentie) (Coelho et al., 2015). Dit betekent dat er verschillende theoretische ondergrondmodellen zijn die de gemeten geofysische resultaten kunnen verklaren. Om te bepalen welk ondergrond model het dichtst bij de werkelijkheid komt, zijn er nog andere meettechnieken nodig die voor extra informatie zorgen. Ook zijn deze technieken minder accuraat. Mede hierom zijn geofysische methoden geen vervanging voor de meer traditionele methoden, ze zijn slechts een aanvulling of een indicatie.



Figuur 5. Mogelijke ruisbronnen weergegeven per geofysische methode (Reynolds, 2011).

De geofysische meettechnieken hebben ook allemaal hun eigen eigenschappen. Deze zijn hieronder beschreven aan de hand van dezelfde criteria als gedaan is bij de puntmetingen, zie Tabel 5.

Tabel 5. Eigenschappen van de verschillende geofysische meettechnieken.

Meet-techniek	Para-meter	Resolutie	Betrouwbaar-heid	Dieptebereik	Afstand per dag	Overig
Seismisch	Lagen-struc-tuur	10% van diepte (Coelho et al., 2015)	Redelijk ⁴ Wel last van equivalentie (Coelho et al., 2015)	30 - 50 m (Coelho et al., 2015)	Enkele honderden meters (Bodemrichtlijn, 2011d)	Meting in boorgat mogelijk, hogere resolutie (Coelho et al., 2015).
ERT (elek-trisch) ⁵	Lagen-struc-tuur	20 % van diepte (Coelho et al., 2015)	Redelijk ⁴ . Wel last van equivalentie (Coelho et al., 2015)	20 - 30 m (Coelho et al., 2015)	3 weken (Bodemrichtlijn, 2011a)	
IP (elek-trisch) ⁵	Aanwe-zigheid van klei	10% van diepte (Coelho et al., 2015)	Redelijk ⁴ . Wel last van equivalentie (Coelho et al., 2015)	20 - 30 m (Coelho et al., 2015)	3 weken (Bodemrichtlijn, 2011a)	Beter in het detecteren van klei dan ERT (Coelho et al., 2015)
GPR (elektro-magne-tisch) ⁵	Lagen-struc-tuur, grond-water-spiegel	Hoog (< 20 cm) (Coelho et al., 2015)	Redelijk ⁴ (Coelho et al., 2015)	3 - 10 m (20 m in ideale omstandigheden) (Bodemrichtlijn, 2011c; Coelho et al., 2015)	0,2 - 10 km (Bodemrichtlijn, 2011c)	
EM (elektromagne-tisch) ⁵	Porosi-teit	Ligt aan uitvoering (Bodemrichtlijn, 2011b)	Redelijk ⁴ (Coelho et al., 2015)	3 - 6 m (Coelho et al., 2015)	Enkele honderden meters (Bodemrichtlijn, 2011b)	

⁴ Eventuele ruis is niet meegewogen

⁵ Er dient hier rekening gehouden te worden met de eventuele aanwezigheid van zout grondwater. Dit kan de resultaten namelijk beïnvloeden vanwege de geleidende eigenschappen van zout water

De eigenschappen van geofysische meettechnieken zijn aanvullend toegelicht in Bijlage D.

3.4.3 Eigenschappen van remote sensing technieken

Remote sensing technieken hebben als geheel voordeel dat deze van een afstand ingezet en/of uitgelezen kunnen worden (G. de Vries et al., 2013). De eigenschappen van de remote sensing technieken zijn weer-gegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Eigenschappen van verschillende remote sensing technieken.

Meettech- niek	Parameter	Accuratesse	Betrouwbaar- heid	Dieptebereik	Tijds- duur	Overig
Laseralti- metrie	Geometrie	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	Hoog (Swart, Flos, & Zomer, 2008)	o m	Zeer kort	Oppervlakteme- ting
InSAR	Geometrie	Redelijk (Moser & Zomer, 2006)	Hoog (Moser & Zomer, 2006)	o m	Continu meting	Oppervlakteme- ting
Glasvezel	Deformatie, temperratuur	Hoog (Weijers et al., 2009)	Hoog (Weijers et al., 2009)	nvt	Continu meting	Moet in de grond worden aange- bracht

De eigenschappen van remote sensing technieken zijn aanvullend toegelicht in Bijlage D.

3.4.4 Eigenschappen van laboratoriumproeven

Er zijn meerdere laboratoriumproeven mogelijk om de grondparameters te bepalen. Deze laboratoriumproeven worden allen uitgevoerd op opgeboorde grondmonsters. In deze paragraaf staan de eigenschappen van deze verschillende proeven kort weergegeven, zie Tabel 7.

Tabel 7. Eigenschappen van de verschillende laboratoriumproeven.

Meettech- niek	Parameter	Accuratesse / resolutie	Betrouwbaarheid	Tijdsduur	Overig
Triaxiaal	Cohesie, hoek van inwendige wrijving, OCR, schuifspannings-ratio, sterkte toe-name exponent	Redelijk	Hoog (cohesie vereist enige voorzichtigheid) (Greeuw, van Essen, & van Duinen, 2016; van Duinen, 2014)	24 - 48 uur (van Duinen, 2014)	Gestandaardiseerd (Greeuw et al., 2016)
DSS	Cohesie, hoek van inwendige wrijving, OCR, schuifspannings-ratio, sterkte toe-name exponent	Redelijk	Redelijk (cohesie vereist enige voorzichtigheid) (Greeuw et al., 2016; van Duinen, 2014)	16 uur (van Duinen, 2014)	Geen Nederlandse normen (Greeuw et al., 2016)
Samen- drukking	OCR, grensspanning, sterkte toe-name exponent	Redelijk (van Duinen, 2014)	Redelijk (van Duinen, 2014)	9 - 18 dagen (Greeuw et al., 2016)	

Meettechniek	Parameter	Accuratesse / resolutie	Betrouwbaarheid	Tijdsduur	Overig
CRS	OCR, grensspanning, sterkte toename exponent, horizontale spanning	Hoog (van Duinen, 2014)	Hoog (van Duinen, 2014)	Enkele dagen	Geen Nederlandse normen (Greeuw et al., 2016)
Constant Head (doorlatendheid)	Doorlatendheid	Redelijk	Laag	Minimaal 48 uur (Callstate Fullerton, 2008)	Kan beter met pompproef (Greeuw et al., 2016)
Faling Head (doorlatendheid)	Doorlatendheid	Redelijk	Laag	Minimaal 48 uur (Callstate Fullerton, 2008)	Kan beter met pompproef (Greeuw et al., 2016)

De eigenschappen van laboratoriumproeven zijn aanvullend toegelicht in Bijlage D.

3.5 Verschillende meettechnieken voor een parameter

In deze paragraaf zijn voor alle parameters uit paragraaf 3.1 weergegeven welke meettechnieken in staat zijn om die parameters te meten en is hier kort uitleg bij gegeven. Ook is er vermeld voor welke grondsoorten deze meettechniek toepasbaar is. Indien dit niet vermeld staat, is de meettechniek voor alle grondsoorten geschikt. Dit is allemaal weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8. Meettechnieken per parameter

Parameter	Meettechniek	Opmerking
Geometrie	Laseraltimetrie	Accuraat
	InSAR	Continu meting, minder accuraat
Volumetrisch gewicht	Boring	
Doorlatendheid	Pompproef	Betrouwbaarder dan de anderen
	Falling Head proef	In lab, voor klei en veen
	Constant Head proef	In lab, voor zand
Waterspanningsverloop	Peilbuis	Hoge accuratesse en betrouwbaarheid. Voor zand.
	Bourdon waterspanningsmeter	Redelijke accuratesse en lage betrouwbaarheid
	Elektrische waterspanningsmeter	Hoge accuratesse en redelijke betrouwbaarheid.
Grondsoort / lagenstructuur	Boring	
	Seismisch	Minder accuraat dan de overige, wel een dieper bereik
	ERT (elektrisch)	Rekening houden met zout grondwater
	IP (elektrisch)	Meet de aanwezigheid van klei
	GPR (elektromagnetisch)	Zeer accuraat. Rekening houden met zout grondwater
Effectieve spanning	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
	CRS	Hoge accuratesse en betrouwbaarheid
Grensspanning	Sondering	In situ
	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
	CRS	Hoge accuratesse en betrouwbaarheid

Parameter	Meettechniek	Opmerking
Hoofdspanning	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
	CRS	Hoge accuratesse en betrouwbaarheid
Hoek van inwendige wrijving	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
Schuifspanning	Vinproef	Handig bij zeer slappe grond
Consolidatiespanning	Sondering	In situ
	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
Sterkte toename exponent	Triaxiaal	Bij zand of klei
	DSS	Bij veen
	CRS	Hoge accuratesse en betrouwbaarheid
Deformatie	Glasvezel	Contact met de grond vereist
	InSAR	Vanuit satelliet

3.5.1 Samenvatting meettechnieken

Hierna volgt een tabel met daarin alle meettechnieken en bijbehorende eigenschappen/toepassingen, zie Tabel 9. Deze tabel kan derhalve worden gezien als samenvatting van paragraaf 3.2, 3.4 en 3.5.

Tabel 9. Alle meettechnieken en bijbehorende eigenschappen/toepassingen

Eigenschap → Meettechniek ↓	Punt-/ lijn-/ gebieds- / volumedekkend?	Parameter(s)	Accuratesse / resolutie	Betrouwbaarheid	Dieptebereik	Duur / afstand per dag	Overig	Zand/ veen/ klei	Cohesief / zand
Boring	punt	Bepaling grondsoort, volumetrisch gewicht	zeer hoog	hoog (mits voldaan aan de normen)	20 - 30 m	tijdrovend	Nodig voor alle laboratoriumproeven	alles	alles
Sondering	punt	grensspanning, consolidatiespanning	hoog	redelijk (boven grondwaterniveau)	25 - 40 m	snel		alles	alles
Vinproef	punt	schuifsterkte ratio	hoog	hoog	25 - 40 m	1 uur per meting	kan ook in lab	veen / klei	cohesief
Peilbuis	punt	waterspanning	hoog	hoog	nvt	continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de waterspanning en hydraulische belasting te vinden	zand	zand
Bourdon waterspanningsmeter	punt	waterspanning	redelijk	laag	nvt	continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de waterspanning en hydraulische belasting te vinden	alles	alles
Elektrische waterspanningsmeter	punt	waterspanning	hoog	redelijk	nvt	continu meting	Wordt gemeten over tijd om verband tussen de waterspanning en hydraulische belasting te vinden	alles	alles
Pompproef	punt	doorlatendheid	ligt aan uitvoering	ligt aan uitvoering	50 m	max enkele dagen	kan ook in lab	alles	alles
Boorgatmethoden	punt	ligt aan gekozen methode	ligt aan gekozen methode	ligt aan gekozen methode	20 - 30 m	ligt aan uitvoering		alles	alles
Sepciale conussen	punt / lijn *	ligt aan gekozen conus	ligt aan gekozen conus	ligt aan gekozen conus	25 - 40 m	iets langer dan gewone sondering		alles	alles
Seismisch	gebied	lagenstructuur	10% van diepte	redelijk**. Wel last van equivalentie	30 - 50 m	enkele honderden meters	Meting in boorgat mogelijk, hogere resolutie	alles	alles
ERT (elektrisch)	volume	lagenstructuur	20 % van diepte	redelijk**. Wel last van equivalentie	20 - 30 m	3 weken		alles	alles
IP (elektrisch)	volume	aanwezigheid van klei	10% van diepte	redelijk**. Wel last van equivalentie	20 - 30 m	3 weken		klei	klei
GPR (elektromagnetisch)	lijn	lagenstructuur, grondwaterspiegel	hoog (< 20cm)	redelijk**	3 - 10 m (20 m in ideale omstandigheden)	0,2 - 10 km		alles, bij veen/klei alleen minder bereik	alles, bij cohesief alleen minder bereik
EM (elektromagnetisch)	gebied	porositeit	ligt aan uitvoering	redelijk**	3 - 6 m	enkele honderden meters		alles	alles
Laseraltimetrie	gebied	geometrie	hoog	hoog	nvt	kort		nvt	nvt
InSAR	gebied	geometrie	redelijk	hoog	nvt	continu meting		nvt	nvt
Glasvezel	volume	deformatie	hoog	hoog	nvt	continu meting	Moet in de grond worden aangebracht	alles	alles
Triaxiaal	punt	cohesie, hoek van inwendige wrijving, OCR, schuifsterkteratio, sterkte toename exponent	redelijk	hoog (cohesie vereist enige voorzichtigheid)	nvt	24 - 48 uur	gestandaardiseerd	zand / klei	klei
DSS	punt	cohesie, hoek van inwendige wrijving, OCR, schuifsterkteratio, sterkte toename exponent	redelijk	redelijk (cohesie vereist enige voorzichtigheid)	nvt	16 uur	geen Nederlandse normen	veen	veen
Samendrukking	punt	OCR, grensspanning, sterkte toename exponent	redelijk	redelijk	nvt	9 - 18 dagen		alles	alles
CRS	punt	OCR, grensspanning, sterkte toename exponent, horizontale spanning	hoog	hoog	nvt	enkele dagen	geen Nederlandse normen	alles	alles
Constant Head	punt	doorlatendheid	redelijk	laag	nvt	Minimaal 48 uur	kan beter met pompproef	zand	zand
Faling Head	punt	doorlatendheid	redelijk	laag	nvt	Minimaal 48 uur	kan beter met pompproef	klei / veen	cohesief

* afhankelijk van gebruikte conus
** eventuele ruis is niet meegewogen

3.6 Het combineren van meettechnieken

In deze paragraaf zijn verschillende meettechnieken gecombineerd om tot een meetstrategie te komen. Dit is gedaan door eerst voor iedere parameters een meettechniek te kiezen en deze te combineren. Vervolgens zijn deze combinaties gekoppeld aan een meetdoel om zo een meetdoel-specifieke strategie te formuleren.

3.6.1 Combinaties van meettechnieken

In deze paragraaf zijn de combinaties van meettechnieken weergegeven om de, voor ieder dijk/ondergrond type, benodigde parameters te bepalen. Deze combinaties zijn allereerst samengesteld op basis van de meettechnieken die de desbetreffende parameter kunnen meten (zie daarvoor Tabel 8) en daarbinnen is vervolgens gelet op de eigenschappen van iedere techniek om zo een inzicht te geven in welke parameters samen een dijk op een *efficiënte wijze accuraat* in beeld brengen. Zie Tabel 10 voor deze combinaties.

Tabel 10. Combinaties van meettechnieken uiteengezet per dijk/ondergrond type.

Dijk/on-dergrond type	Te meten schuifsterkte parameter	Benodigde meettechniek	Te meten belasting parameter	Benodigde meettechniek
ZC	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	Ongedraineerde schuifsterkte ratio	Vinproef (bij zeer slappe grond)	Waterspanning	Peilbuis (in dijklichaam)
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef (voor klei/zand)	Waterspanning	Elektrische waterspanningsmeter (in ondergrond)
	Consolidatiespanning	Direct Simple Shear proef (eventueel voor veen uit ondergrond)		
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
ZZ	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef		Peilbuis
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
KC	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	Consolidatiespanning	Vinproef (bij zeer slappe grond)		Elektrische waterspanningsmeter
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef (voor klei)		
	Consolidatiespanning	Direct Simple Shear proef (eventueel voor veen uit ondergrond)		
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
KZ	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef

Dijk/on-dergrond type	Te meten schuifsterkte parame-ter	Benodigde meettech-niek	Te meten belas-tig parameter	Benodigde meettech-niek
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef		Peilbuis (in ondergrond)
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		Elektrische waterspanningsmeter (in dijklichaam)
VC	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	Consolidatiespanning	Vinproef (bij zeer slappe grond)		Elektrische waterspanningsmeter
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef (voor klei)		
	Ongedraineerde schuifsterkte ratio	Direct Simple Shear proef (voor veen uit dijklichaam)		
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
VZ	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	Consolidatiespanning	Vinproef (bij zeer slappe grond)		Peilbuis (in ondergrond)
	Consolidatiespanning	Direct Simple Shear proef (voor veen uit dijklichaam)		Elektrische waterspanningsmeter (in dijklichaam)
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef (voor zand)		
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
ZKC	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	Consolidatiespanning	Vinproef (bij zeer slappe grond)		Peilbuis (in zand)
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef (voor klei/zand)		Elektrische waterspanningsmeter (in klei/veen)
	Consolidatiespanning	Direct Simple Shear proef (eventueel voor veen uit ondergrond)		Laseraltimetrie
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		
ZKZ	Grondsoort	Boring	Geometrie	Laseraltimetrie
	Grensspanning	Sondering	Doorlatendheid	Pompproef
	• Hoek van inwendige wrijving • Consolidatiespanning	Triaxiaalproef		Peilbuis (in zand)
	• OCR • Sterkte toename exponent	Constant Rate of Strain proef		Elektrische waterspanningsmeter (in klei)

3.6.2 Meetstrategieën

3.6.2.1 Meetstrategie vanuit het zorgplicht-perspectief

Indien de fysieke toestand van de waterkering niet meer voldoet aan de vigerende normen, dient de beheerder onderhouds- of herstelwerk uit te voeren zodat de dijk weer gaat voldoen aan de norm (Helpdesk water, n.d.-c). Om te bepalen of de dijk nog voldoet aan de eisen, kan de beheerder gebruik maken van enkele meet- en monitoringstechnieken.

Voor het meten en monitoren van de fysieke toestand van een dijk worden in dit onderzoek de geometrie en de waterdoorlatendheid gemeten. Indien de geometrie verandert (door zetting of erosie etc.), kan het krachten evenwicht in het glijvlak verstoord raken waardoor een grondmoot kan afglijden. De doorlatendheid kan de waterspanning sterk beïnvloeden, dit kan gebeuren als bijvoorbeeld de afdekkende kleilaag (deels) weggeërodeerd is. Hierdoor kan de waterspanning in het dijklichaam stijgen waardoor het krachtenevenwicht ook verandert. Voor het *zorgplicht-perspectief* zijn in dit onderzoek dus alleen de geometrie en het waterspanningsverloop van belang.

Om *efficiënt en accuraat* de fysieke toestand van een dijk te kunnen bepalen én monitoren, staan hieronder de te gebruiken meettechnieken genoemd. Dit is voor ieder dijk/ondergrond type nagenoeg hetzelfde, alleen de waterspanningsmeter varieert:

- Laseraltimetrie
- Waterspanningsmeter
 - Peilbuis voor zand
 - Elektrische waterspanningsmeter voor klei of veen.
- InSAR
- Glasvezel (aanbrengen tijdens dijkversterking)
- Visuele inspectie door de beheerder

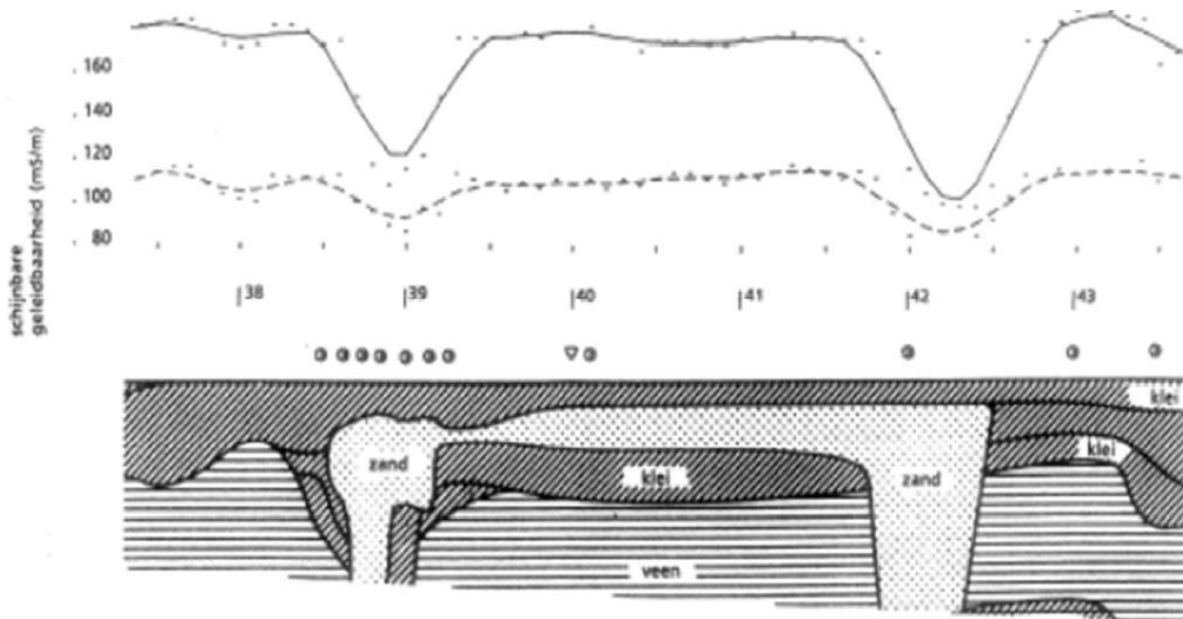
Visuele inspectie is hierboven niet genoemd als meettechniek maar is ook erg belangrijk. Door regelmatig de dijk visueel te inspecteren kan de beheerder beoordelen of de fysieke toestand van de kering nog in overeenstemming is met de norm (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-f).

3.6.2.2 Meetstrategie vanuit het beoordelings-perspectief

Bij een beoordeling wordt er gekeken naar of een waterkering nog voldoet aan de normen door de stabiliteit van dwarsdoorsneden uit te rekenen. Een dijk is echter zo veilig als het zwakste deel en daarom moet er eerst gezocht worden naar de zwakste dwarsdoorsnede. Het is echter praktisch onhaalbaar om van iedere meter dijk een dwarsdoorsnede te maken en uit te rekenen of deze voldoet aan de veiligheidseisen of niet. In plaats daarvan worden enkele normatieve dwarsdoorsneden gemaakt en worden deze doorgerekend. Als er slechts puntmetingen worden gebruikt en aan de grond daartussen parameterwaarden worden toegekend op basis van schattingen en/of aannames, is er niet te zeggen of daadwerkelijk de zwakste doorsnede is gevonden. Dit kan beter door gebruik te maken van gebieds- of volumedekkende meettechnieken

zodat verschillen in bodemopbouw globaal gemeten kunnen worden. Vervolgens kunnen deze verschillende samenstellingen onderworpen worden aan puntmetingen om te kijken wat de bodemopbouw precies is op zo'n punt.

Zie Figuur 6 voor een voorbeeld van zo'n gecombineerde aanpak. De boringen en sondering zijn uitgevoerd op de plekken waar, volgens de resultaten van de EM-metingen, de bodemopbouw verschilde. Op deze manier is snel te achterhalen uit wat voor grond de gehele bodem bestaat zonder 'lukraak' puntmetingen te doen en de grond daartussen maar te schatten.



Figuur 6. Voorbeeld van twee EM-metingen (doorgetrokken en gestreepte lijnen) gecombineerd met boringen (cirkels) en een sondering (driehoek) en het daaruit afgeleide bodemprofiel (Coelho et al., 2015).

De meettechnieken die voor het *beoordelings-perspectief* voor ieder dijk/ondergrond type nodig zijn om de dijk op *efficiënt en accuraat* te meten, zijn:

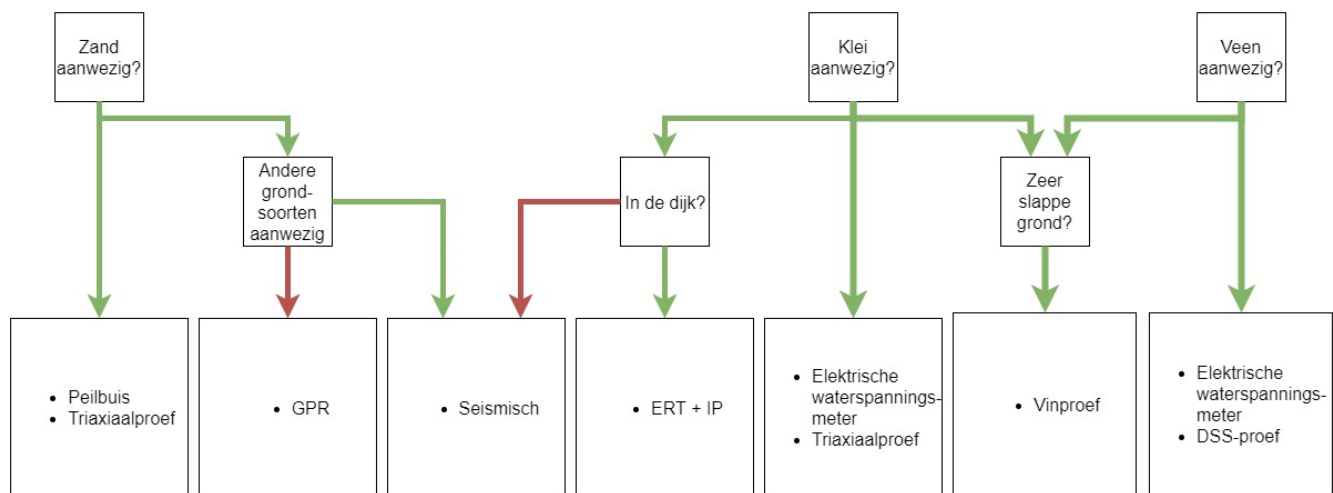
- Laseraltimetrie
- Sonderingen (op 'opvallende' locaties, zie Figuur 6)
- Boringen (op 'opvallende' locaties, zie Figuur 6)
- Pompproef
- CRS-proef

De meettechnieken die specifiek zijn voor ieder dijk/ondergrond type, zijn:

- Waterspanningsmeter
 - Peilbuis voor zand
 - Elektrische waterspanningsmeter voor klei of veen

- Laboratoriumproeven
 - Triaxiaalproef voor zand of klei
 - DSS-proef voor veen
- Vinproef alleen bij zeer slappe grond
- De geofysische technieken
 - GPR alleen in een zanddijk op zandondergrond (in verband met het dieptebereik)
 - ERT + IP bij aanwezigheid van klei in de dijk
 - Overig: seismisch

De keuze voor de specifieke meettechnieken per dijk/ondergrond type is schematisch weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7. Specifieke meettechnieken per dijk/ondergrond type. Een groene pijl staat voor een positief antwoord op de vraag en een rode pijl voor een negatief antwoord.

Het is daarbij handig om eerst een gebieds- of volumdedekkende meting te doen om vervolgens gericht puntmetingen in te kunnen zetten, zoals is weergegeven in Figuur 6. De laboratoriumproeven kunnen logischerwijs pas uitgevoerd worden nadat de boring is gedaan aangezien deze proeven op de opgeboorde monsters worden uitgevoerd. Ook is het aan te raden om de pompproef en het meten van de waterspanning pas te doen na de sondering en de boring, zodat deze gaten hiervoor gebruikt kunnen worden. Verder is de volgorde van het inzetten van de meettechnieken niet van belang.

4. Discussie

De selectie van meettechnieken vond plaats op basis van enkele bronnen waarin ‘de meest gebruikte’ of ‘actuele’ meettechnieken werden besproken. Dit is aangevuld met technieken die in de stukken omtrent het nieuwe WBI veelvuldig werden genoemd of anderzijds relevant geacht werden voor dit onderzoek. Dit betreft slechts een selectie en zijn, omwille van de tijd en de praktische haalbaarheid niet alle meettechnieken besproken. Het is daarom mogelijk dat er technieken bestaan die erg nuttig zijn maar niet in dit onderzoek zijn meegenomen.

De beoordeling van de meettechnieken is gedaan op basis van verschillende bronnen. Dit betreffen voornamelijk WBI-stukken, handreikingsites, literatuur en handleidingen over de besproken technieken. Een eenduidige beoordeling is daarom praktisch onmogelijk omdat er altijd een mate van subjectiviteit in verwerkt zit. Wat de ene auteur bijvoorbeeld ‘zeer betrouwbaar’ vindt, kan de ander ‘matig’ vinden, hierdoor is het mogelijk dat de beoordelingen niet eenduidig zijn. Ik heb dit geprobeerd op te vangen door de verschillende beoordelingen te vertalen naar gelijke begrippen om het enigszins gelijk te trekken.

De mogelijke samenstellingen van de dijk/ondergrond zijn in dit onderzoek meegenomen zijnde geheel van dezelfde grondsoort. Een dijk bestaat in dit onderzoek namelijk geheel uit zand, klei, veen of zand met klei en een ondergrond uit zand of klei/veen. In de praktijk bestaan hier natuurlijk talloze combinaties van die zich niet altijd laten karakteriseren als een dijk/ondergrond type zoals die in dit onderzoek zijn meegenomen. Er is echter gebleken dat de samenstelling van de dijk/ondergrond maar een beperkte invloed heeft op de in te zetten technieken.

Hoe meer metingen gedaan worden die informatie opleveren over de dijk en de ondergrond, hoe preciezer/betrouwbarder de informatie is over de dijk en hoe preciezer de gevoeligheid voor macrostabiliteit ingeschat kan worden. Er hoeft echter niet meer gemeten te worden dan nodig is, aangezien het doel van dit onderzoek is om een dijk, naast accuraat, ook op een efficiënte manier te meten. Dit onderzoek biedt inzichten in de eigenschappen van de verschillende meettechnieken zodat er een keuze gemaakt kan worden tussen de in te zetten technieken om de gevoeligheid voor macrostabiliteit in te schatten. Echter, hoe meer er van de dijk bekend is, hoe beter deze inschatting gemaakt kan worden.

Dit onderzoek is uitgevoerd met als doel om *efficiënte en accurate* meetstrategieën te formuleren. Zoals in paragraaf 3.6 besproken, zijn de meettechnieken, op basis van hun eigenschappen, geselecteerd met dit doel voor ogen. Bij een ander doel, zoals bijvoorbeeld ‘snel’ of ‘goedkoop’, zouden zeer waarschijnlijk andere meettechnieken naar voren komen en zou dus meetstrategie zodoende ook anders zijn.

Mede om bovenstaande discussiepunten zijn de in dit onderzoek geformuleerde meetstrategieën niet per definitie de juiste. Het betreft hier een handreiking om inzicht te verschaffen in mogelijke beweegredenen en/of situaties om een meettechniek wel/niet in te zetten en om de correlatie tussen verschillende technieken duidelijk te maken. De meetstrategieën kunnen derhalve slechts als richtlijn worden beschouwd en er dient vooraf altijd nagedacht te worden over de in te zetten meettechnieken.

5. Conclusie en aanbevelingen

Na onderzoek kwamen er verschillende parameters naar voren die van invloed zijn op het wel of niet optreden van het faalmechanisme macrostabiliteit. Deze zijn onder te verdelen in de parameters voor het bepalen van de belasting en voor het bepalen van de schuifsterkte. Voor de schuifsterkte zijn er twee subcategorieën; gedraineerd en ongedraineerd. Deze twee subcategorieën vereisen beide andere parameters, zie paragraaf 3.1.2. De meettechnieken die in Nederland veel gebruikt worden, of anderzijds relevant geacht werden voor dit onderzoek, zijn weergegeven in paragraaf 3.2. Omdat er in Nederland niet zoiets bestaat als een stereotype dijk, is er in dit onderzoek rekening gehouden met vier typen dijken (zand, klei, veen en zand met klei) en twee typen ondergronden (zand en cohesief). Voor een toelichting wordt verwezen naar paragraaf 3.3. De beoordeling van alle meettechnieken is aan de hand van verschillende criteria gedaan in paragraaf 3.4. In paragraaf 3.5 zijn voor iedere parameter de geschikte meettechnieken weergegeven zodat er duidelijk wordt waarvoor de meettechnieken ingezet kunnen worden. In paragraaf 3.6 zijn allereerst meettechnieken gecombineerd om alle benodigde parameters te dekken, om vervolgens een meetdoel aan deze combinaties toe te voegen zodat er meetstrategie ontstaat. Deze meetdoelen zijn afgeleid van de levenscyclus van een dijk: het *zorgplicht-perspectief* en het *beoordelingsperspectief* van respectievelijk de levensfasen *beheer* en *afkeur/beoordeling*.

5.1 Conclusie

Vanuit de levenscyclus van een dijk zijn er verschillende invalshoeken om een strategie voor te formuleren. Omdat iedere invalshoek andere belangen nastreeft, zijn deze strategieën dan ook van elkaar verschillend. Dit maakt dat er niet 'een strategie' is om dijken te meten voor het faalmechanisme macrostabiliteit maar dat de strategie, naast de samenstelling van de dijk en de ondergrond, ook afhangt van het doel van het meetonderzoek. Voor de verschillende meetstrategieën voor ieder dijk/ondergrond type vanuit de verschillende invalshoeken wordt verwezen naar paragraaf 3.6.2.

Echter, de in te zetten technieken in een strategie hangen maar ten dele af van het dijk/ondergrond type. Zo is er een aantal technieken dat voor iedere dijk gebruikt kan worden en zijn er specifieke technieken voor een dijk/ondergrond combinatie, zie hiervoor paragraaf 3.6.2. Zodoende kan geconcludeerd worden dat het dijk/ondergrond type maar een beperkte invloed heeft op de uiteindelijke meetstrategie.

Het *accuraat* bepalen van de grondparameters berust nog grotendeels op de 'traditionele' meettechnieken. Deze zijn namelijk veel accurater dan de nieuwere, geofysische technieken. Die zijn echter wel relevant in het *efficiënt* meten van de dijk. Omdat er relatief snel een groot deel van de dijk 'gescand' kan worden, kunnen zodoende de punttechnieken gericht en dus efficiënter ingezet worden.

5.2 Aanbevelingen

Verschiedende meettechnieken, met name in de hoek van de remote sensing, zijn nog volop in ontwikkeling. De kans is doordoor aanwezig dat er inmiddels/binnenkort nieuwe of betere remote sensing technieken beschikbaar zijn die makkelijker te gebruiken of kwalitatief beter zijn dan de meer traditionele technieken. Het is zodoende aanbevolen om in de nabije toekomst dit onderzoek uit te breiden met de verschillende remote sensing technieken die dan op de markt zijn.

Het is ook aanbevolen om te kijken naar de kosten. Voor dit onderzoek werd er gekeken naar een *efficiënte en accurate* meetstrategie maar er is niet duidelijk gemaakt of dit financieel aantrekkelijk is. Wellicht leveren extra inzichten juist wel een dusdanige reductie van de geplande versterking op zodat extra meten ook financieel aantrekkelijk wordt. Dan gaat het echter niet meer om het *efficiënt* meten.

Dit onderzoek heeft zich uiteraard alleen gericht op het maalmechanisme macrostabiliteit maar er zijn nog andere faalmechanismen (bijvoorbeeld piping) waar een dergelijk onderzoek relevant voor kan zijn. Een andere aanbeveling is daarom om een dergelijk onderzoek uit te voeren voor andere faalmechanismen. Hetzelfde geldt voor de doelstelling voor dit onderzoek, naast *efficiënt en accuraat* zijn er nog meer doelstellingen waar meetstrategieën voor kunnen worden geformuleerd.

Bibliografie

- Allsop, W., Kortenhaus, A., & Morris, M. (2007). *Failure Mechanisms for Flood Defence Structures*.
- Bodemrichtlijn. (n.d.-a). Materiaaleigenschappen zand. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/zand/materiaaleigenschappen-zand>
- Bodemrichtlijn. (n.d.-b). Zand. Retrieved October 13, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/zand>
- Bodemrichtlijn. (2008a). Onderzoekstechniek: Pompproef. Retrieved October 26, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechniek-pompproef>
- Bodemrichtlijn. (2008b). Onderzoekstechnieken, Plus/Min-tabel: Boor- en sondeertechnieken. Retrieved October 26, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechnieken-plus-min-tabel-boor-en-sondeertechnieken>
- Bodemrichtlijn. (2011a). Onderzoekstechniek: Elektrische weerstandstomografie (ERT). Retrieved October 30, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechniek-elektrische-weerstandstomografie-ert>
- Bodemrichtlijn. (2011b). Onderzoekstechniek: Elektromagnetische metingen. Retrieved October 30, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechniek-elektromagnetische-metingen>
- Bodemrichtlijn. (2011c). Onderzoekstechniek: Grondradar – GPR. Retrieved October 30, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechniek-grondradar-gpr>
- Bodemrichtlijn. (2011d). Onderzoekstechniek: Seismiek. Retrieved October 30, 2017, from <https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/onderzoekstechniek-seismiek>
- BZ Ingenieurs & Managers. (n.d.). BZ Ingenieurs & Managers. Retrieved November 21, 2017, from <http://www.bzim.nl/>
- Callstate Fullerton. (2008). *Constant head and falling head permeability test*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.03.014>
- Coelho, B. Z., Diaferia, G., Kruiver, P., & Venmans, A. (2015). *Geofysische methoden*.
- De Bruijn, H., de Vries, G., & 't Hart, R. (2017). *Voorschrift Toetsen op Voorschrift Toetsen op Veiligheid , Technisch Deel*.
- de Vries, G., ter Brake, C. K. E., de Bruijn, H., Koelewijn, A. R., van Lottum, H., Langius, E. A. F., & Zomer, W. S. (2013). *Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen Eindrapport*.
- Deltaproof. (n.d.). *Stabiliteit veenkade m.o. klimaatverandering*. Retrieved from http://www.deltaproof.nl/Publicaties/deltafactIframe/Stabiliteit_veenkade_m_o_klimaatverandering.aspx?rId=19
- Dijkverbetering Waterschap Rivierenland. (2014). Faalmechanismen. Retrieved October 12, 2017, from <http://www.dijkverbetering.waterschaprivierenland.nl/common/dijkverbetering/faalmechanismen.html>
- ENW. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*.
- Förster, U., van den Ham, G., Calle, E., & Kruse, G. (2012). *Zandmeevoerende Wellen*. <https://doi.org/1202123-003>

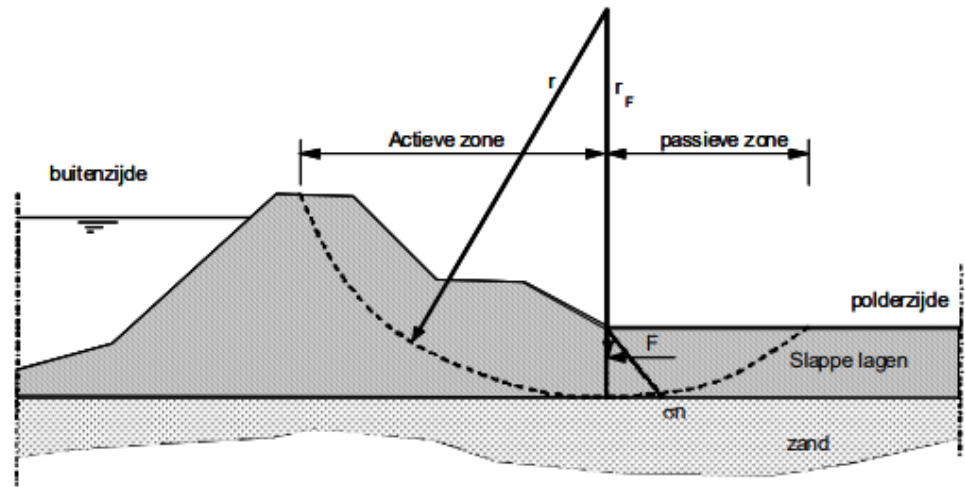
- Greeuw, G., van Essen, H. M., & van Duinen, T. A. (2016). *Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen*.
- Helpdesk water. (n.d.-a). Omgaan met onzekerheden. Retrieved October 10, 2017, from [https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-\(wbi\)/beoordelingsproces/voorbereiding/omgaan-onzekerheden/](https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-(wbi)/beoordelingsproces/voorbereiding/omgaan-onzekerheden/)
- Helpdesk water. (n.d.-b). Wat gaat er veranderen in WBI voor wat betreft macrostabiliteit? Retrieved October 11, 2017, from [https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-\(wbi\)/vragen/macrostabiliteit/macrostabiliteit/gaat-veranderen-wti/](https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-(wbi)/vragen/macrostabiliteit/macrostabiliteit/gaat-veranderen-wti/)
- Helpdesk water. (n.d.-c). Zorgplicht. Retrieved November 27, 2017, from <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/zorgplicht/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-a). Boringen. Retrieved October 18, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/technieken/meettechnieken/boringen/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-b). Levenscyclus dijken. Retrieved November 27, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/filosofie/levenscyclus-dijken/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-c). Sondering. Retrieved October 18, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/technieken/meettechnieken/sonderingen/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-d). Technieken per faalmechanisme. Retrieved October 12, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/technieken/per-faalmechanisme/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-e). Waterspanningmeter. Retrieved October 18, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/technieken/meettechnieken/waterspanningsmeter/>
- Kennisplatform Dijkmonitoring. (n.d.-f). Zorgplicht. Retrieved November 23, 2017, from <http://www.dijkmonitoring.nl/filosofie/governance/zorgplicht/>
- Ministerie Infrastructuur en Waterstaat. (2009). Waterwet. Retrieved November 28, 2017, from <http://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2017-01-01>
- Moser, G. M., & Zomer, W. S. (2006). *Inspectie van waterkeringen*. STOWA.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley-Blackwell.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit*.
- Ruben Schipper. (2011). Hoogwater IJssel: Kampen - Deventer. Retrieved November 27, 2017, from <https://kampen.online/grootste-crisis oefening-rivierdijken-sinds-hoogwater-1995/>
- Spoorenberg, C. C. M. (2009). *Grondonderzoek t.b.v. schematiseren geotechnische faalmechanismen bij dijken*.
- Swart, L. M. T. (2007). *Remote sensing voor inspectie van waterkeringen*.
- Swart, L. M. T., Flos, S. J., & Zomer, W. S. (2008). *Laseraltimetrie voor waterkering- beheer*. STOWA.
- TAW. (1996). *Technisch Rapport Klei Voor Dijken*. TAW.
- TAW. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*. TAW.
- Thijssen, H. W. (2010). Bemalingen: bron van geo hydrologische parameters. *Geotechniek*, 34-37.
- Van der Meij, R. (2012). Afschuiving langs een vrij glijvlak. *Geotechniek*, 34-37.
- van der Valk, M., & van Seters, A. (2010). De sterkte van slappe grond. *Civiele Techniek*, 35-36.
- van Duinen, A. (2014). *Handreiking voor het bepalen van schuifsterkte parameters*. WTI 2017 Toetsregels Stabiliteit.
- Vries, S. de, Koster, B., & Koomans, R. L. (2016). Geofysisch bodemonderzoek voor beter toetsing dijkveiligheid. *Land En Water*, (11), 20-22.
- Weijers, J., Elbersen, G. T., Koelewijn, A. R., & Pals, N. (2009). *Macrostabiliteit IJkdijk: Sensor- en meettechnologie*.
- Wiertsema & Partners. (n.d.-a). Samendrukkingsproef. Retrieved October 20, 2017, from <http://www.wiertsema.nl/?module=webshop&cid=3&sid=11&pid=50&lang=nl>

Wiertsema & Partners. (n.d.-b). Triaxiaalproef. Retrieved October 20, 2017, from <http://www.wiertsema.nl/?module=webshop&cid=3&sid=11&pid=51&lang=nl>
Zwanenburg, C., van Duinen, A., & Rozing, A. (2013). *Technisch rapport macrostabiliteit*.

Bijlage A

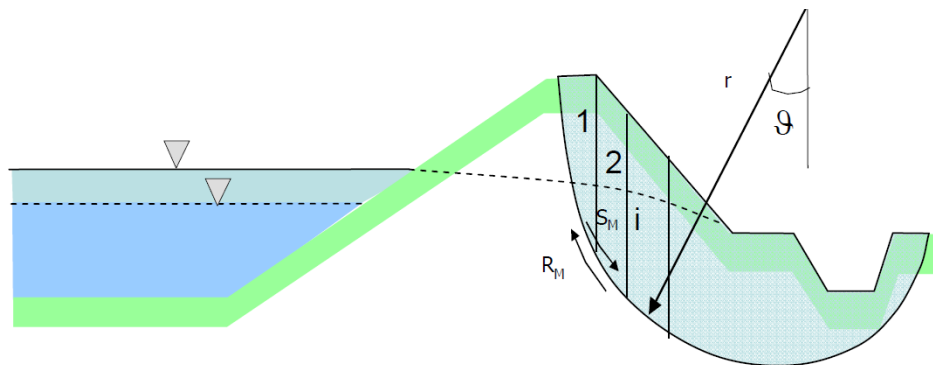
Methode Bishop

De methode Bishop gaat ervan uit dat het volumege-
wicht van de grond in de ac-
tieve zone (zie Figuur 8)
naar beneden drukt (samen
met eventueel aanwezige ex-
tra belasting op de dijk) en
dat dit wordt tegengehou-
den door het gewicht in de
passieve zone + de schuif-
weerstand over de gehele
glijcirkel (de stippellijn in
Figuur 8).



Figuur 8. Schematisatie van de methode Bishop (Zwanenburg et al., 2013)

Om dit uit te rekenen wordt
de glijcirkel in zogeheten
'lamellen' verdeeld. Een la-
mel is een verticale strook
vanaf het maaiveld tot de
hoogte van de glijcirkel die
bestaat uit meerdere grond-
soorten (zie lamel 1 en 2 in
Figuur 9). Van zo'n lamel
kan dan het moment bere-
kend worden dat gegene-
reerd wordt door het volume-
gewicht van de grond versus het moment van de optredende schuifweerstand.
De stabiliteitsfactor (F_s) is te berekenen door het moment van de schuifweerstand te delen door het mo-
ment van de belasting (Allsop, Kortenhaus, & Morris, 2007).



Figuur 9. Schematische weergave van lamellen in de glijcirkel (Allsop et al., 2007)

$$F_s = \frac{\sum R_m}{\sum S_m} \quad (5)$$

Hierin is:

$\sum R_m$ = de som van het moment van de schuifweerstand in één lamel [kNm/m]

$\sum S_m$ = de som van het moment van de belasting in één lamel [kNm/m]

Noot: Omdat de werkelijkheid driedimensionaal is maar er gebruik gemaakt wordt van een tweedimensi-
onaal model, wordt er gerekend met het moment per strekkende meter. Vandaar dat de eenheid kN/m is.

Om deze berekening uit te kunnen voeren is er informatie nodig over de eigenschappen van de grond. De volgende gegevens van de grond zijn dan ook noodzakelijk om te weten:

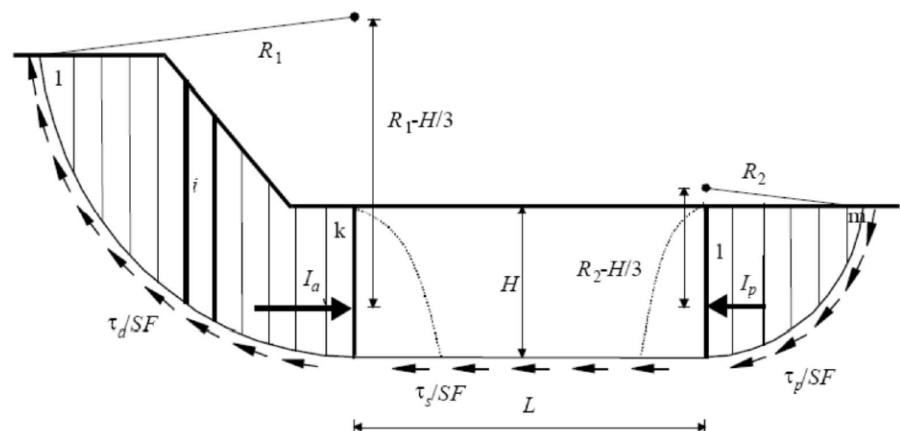
- Geometrie, dat wil zeggen het ingemeten dwarsprofiel van de waterkering en aanliggend maaiveld
- Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam
- Volumetrische gewichten van de grondlagen
- Sterkte-eigenschappen voor elke laag
- Ligging van de freatische lijn
- Waterspanningsverloop in de ondergrond

(Rijkswaterstaat, 2017)

Echter, niet de hele dijk valt te meten en omdat in en onder de dijk heterogeen is (van Duinen, 2014) zal de schematisatie van de dijk van plek tot plek verschillen. Om deze reden worden geologische eigenschappen aangenomen of wordt er een rekenwaarde gebruikt. Op basis van deze gegevens wordt een schematisatie van de dijk gemaakt zodat de beoordeling, zoals uitgelegd in paragraaf 2.1.1 uitgevoerd kan worden. Echter, waar aannames gedaan worden, ontstaat er een verschil van de werkelijkheid. En in dit geval is er dan een verschil tussen de schematisatie en de werkelijke grondeigenschappen in die doorsnede van de dijk. In het WBI worden twee manieren gebruikt om dit uit te rekenen; semi-probabilistisch en probabilistisch (Helpdesk water, n.d.-a). Bij de semi-probabilistische methode worden de karakteristieke waarde gebaseerd op de kans op voorkomen samen met een veiligheidsfactor. Bij de probabilistische methode wordt alleen de kans op voorkomen meegenomen.

Methode LiftVan

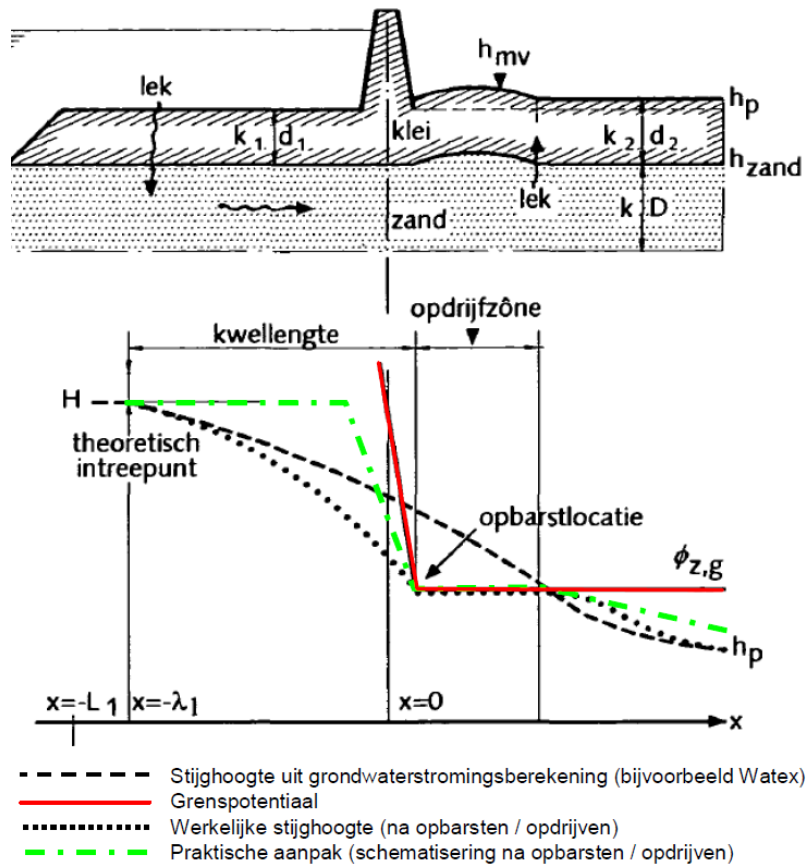
Op het moment wordt er veel gebruik gemaakt van de methode LiftVan (De Bruijn et al., 2017). Deze methode is ontwikkeld om ook het opdrijven van de grond mee te nemen in de berekening (Van der Meij, 2012).



Figuur 10. Schematische weergave van een voorbeeld van het glijvlak bij de methode LiftVan (Zwanenburg et al., 2013)

Daarbij kan het voorkomen dat het afschuiven over een cirkelvormig glijvlak niet als het meest ongunstigste geval kan worden aangemerkt. Indien er in de ondergrond een grondlaag van beperkte dikte en met relatief geringe sterkte-eigenschappen aanwezig is, zal de stabiliteit niet alleen moeten worden gecontroleerd op een cirkelvormige afschuiving maar ook op een gedeeltelijk horizontaal glijvlak door de genoemde relatief slappe grondlaag (Zwanenburg et al., 2013). Een voorbeeld van zo'n schuifvlak is te zien in Figuur 10. Het horizontale deel met lengte L wordt de drukstaaf genoemd. Voor deze drukstaaf wordt een horizontaal evenwicht

De formule voor opdrijven/opbarsten is:



Figuur 11. Dijk met voorland en ondergrond; Stijghoogte in zandlaag, grenspotential en opdrijfzone (Zwanenburg et al., 2013)

noemd. Op het moment dat de grenspotential bereikt wordt, zal de slecht doorlatende laag gaan opdrijven (Rijkswaterstaat, 2017). Als deze lagen relatief dun zijn, bestaat de kans dat deze scheuren. Dit heet opbarsten.

$$\Phi_{z,g} = h_p + d ((\gamma_{nat} - \gamma_w) / \gamma_w \quad (6)$$

(Zwanenburg et al., 2013)

Hierin is:

$\Phi_{z,g}$ = de grenspotential [m ± NAP] h_p = het niveau van de vrije waterspiegel binnendijks [m ± NAP]

$$d$$
 = de dikte van de afdeklaag [m]

γ_{nat} = het volumegewicht van de afdekkende grondlaag [kN/m³]

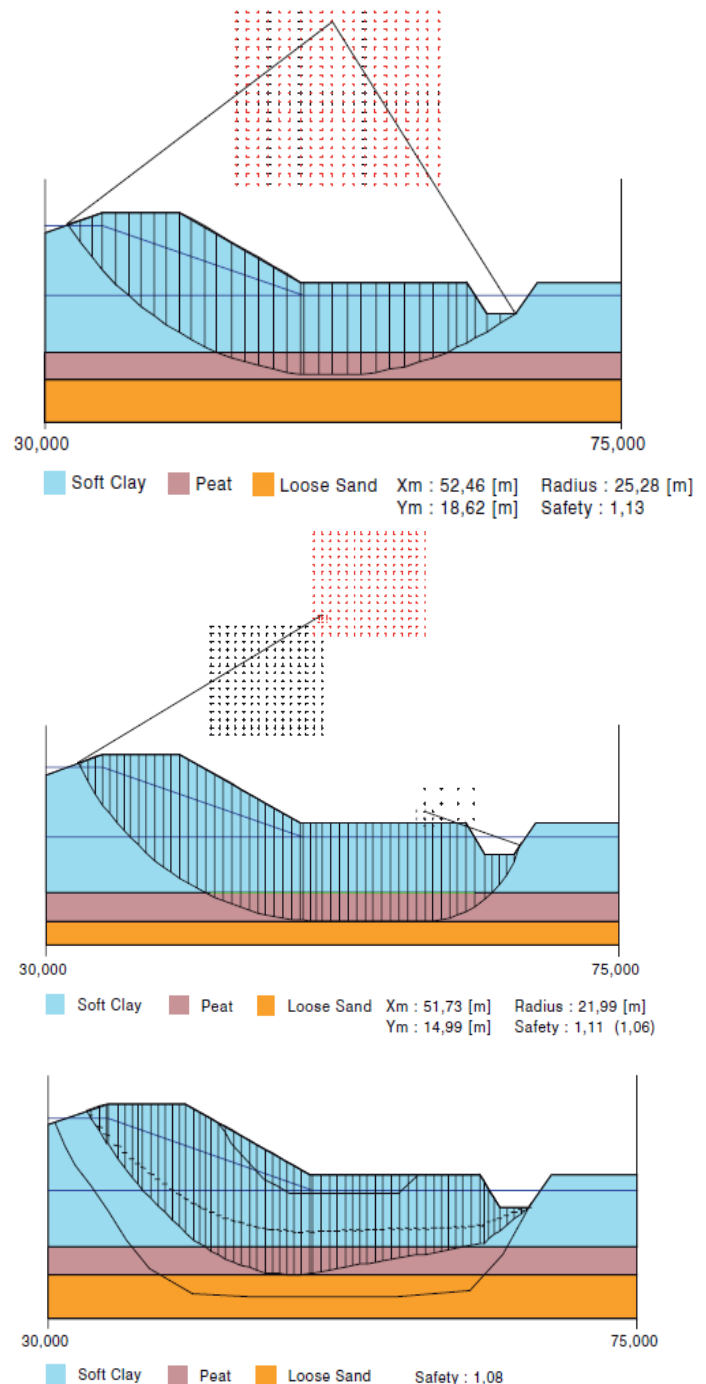
$$\gamma_w = \text{het volumegewicht van het water [kN/m}^3\text{]}$$

Methode Spencer-Van der Meij

Echter, volgens het WBI 2017 dient men te rekenen met de Spencer-Van der Meij methode (Helpdesk water, n.d.-b). Bij de twee bovenstaande methodes, wordt er een 'grid' gebruikt om alle mogelijke glijcirkels en/of glijvlakken te analyseren. Bij de methode Spencer-Van der Meij wordt slechts een zoekruimte gedefinieerd, een Genetisch Algoritme gaan dan op zoek naar de weg van de minste weerstand binnen de gegeven ruimte. De methode wordt daarom ook wel de Spencer GA methode genoemd, naar het Genetisch Algoritme achter de verbeterde Spencer methode.

GA bleek een snel, robuust en accuraat zoekalgoritme te zijn. De precisie van het resultaat wordt groter naarmate er langer wordt gezocht maar binnen tien seconden levert het algoritme al een resultaat met maximaal een paar procent afwijking (Van der Meij, 2012). Deze foutmarge neemt nog af naarmate er langer gezocht wordt. Echter, omdat de rekentijd met de huidige rekenkracht van computer niet meer maatgevend is, werd deze zoekmethode gecombineerd met de methode Spencer. De methode Spencer is een volledige evenwichtsbeschouwing die, in tegenstelling tot de methode Bishop, ook horizontale componenten meeneemt.

Omdat de Spencer-van der Meij methode zelf in staat is om de weg van de minste weerstand te berekenen, zal de berekende veiligheidsfactor volgens dit model (bijna) altijd lager liggen dan met de andere modellen, als er puur gekeken wordt naar de vorm van het glijvlak. Een voorbeeld van de verschillende vormen van een glijvlak is te zien in Figuur 12. Er is duidelijk verschil te zien tussen de perfecte (delen van een) cirkel in Figuur 12a en b en Figuur 12c dat volledig 'willekeurig' is. Ook zijn in Figuur 12a en b de grids (vierkant van rode/zwarte stippen) te zien die de methodes gebruiken om het glijvlak te zoeken. In Figuur 12c zijn daarentegen de grenzen van de zoekruimte te zien (gekromde lijnen bovenin en onder het glijvlak).

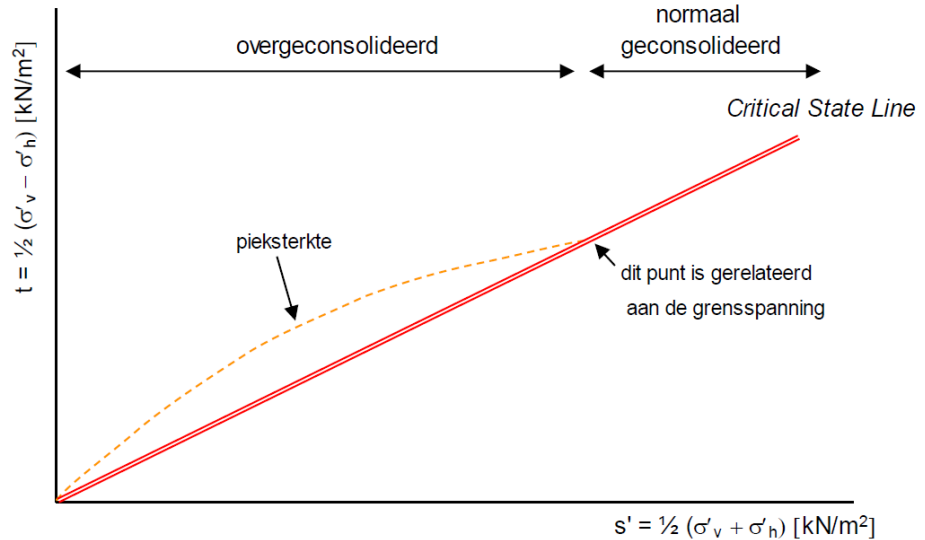


Figuur 12. Voorbeeld van een glijvlak op basis van de methodes Bishop (boven), LiftVan (midden) en Spencer-Van der Meij (onder) (Van der Meij, 2012).

Bijlage B

Critical State Soil Mechanics

De basis voor het model om de schuifsterkte van de grond te berekenen is het Critical State Soil Mechanics (CSSM) model (van Duinen, 2014). Het CSSM-model kan echter breder worden toegepast dan alleen macrostabiliteitsberekeningen omdat het een koppeling legt tussen het gedrag bij compressie, zwelling, volumeverandering, afschuiven en poriënwaterrespons in termen van effectieve spanning. In het CSSM-model wordt onderscheid gemaakt tussen meerdere eigenschappen van de grond: normaal geconsolideerd gedrag versus overgeconsolideerd gedrag en gedraineerd versus ongedraineerd gedrag.



Figuur 13. Karakterisering van de schuifsterkte (t) in relatie tot de spanning (s') volgens het Critical State Soil Mechanics (van Duinen, 2014)

De critical state van de grond is een goede maat voor de weerstand van de grond tegen taludinstabiliteit (van Duinen, 2014). De richtingscoëfficiënt van de Critical State Line (de rode lijn in Figuur 13) is gelijk aan de sinus van de hoek van inwendige wrijving ϕ'_{cs} . Deze lijn wordt namelijk als volgt gedefinieerd:

$$t_{max} = s' \sin \phi'_{cs} \quad (7)$$

Hierin is:

t_{max} = maximaal mobiliseerbare schuifsterkte $((\sigma'_v - \sigma'_h) / 2)$ met verticale effectieve spanning σ'_v en horizontale effectieve spanning σ'_h) [kN/m²]

s' = gemiddelde hoofdspanning $((\sigma'_v + \sigma'_h) / 2)$ [kN/m²]

ϕ'_{cs} = hoek van inwendige wrijving (critical state line) [°]

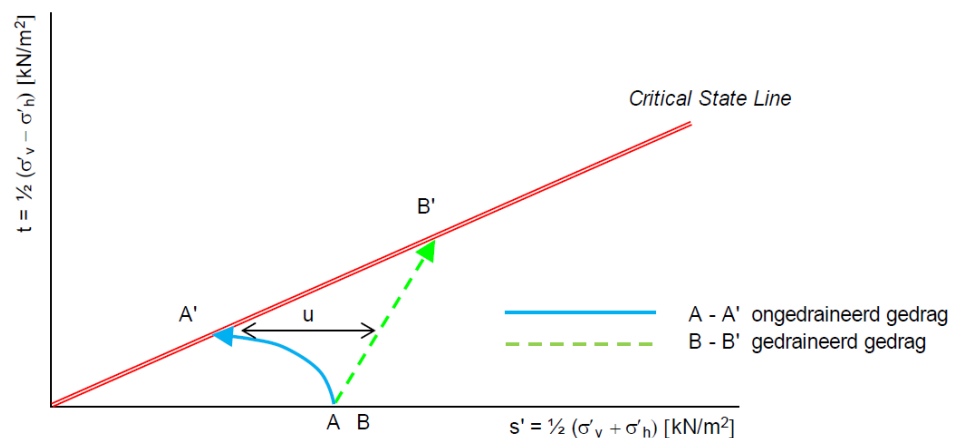
(Rijkswaterstaat, 2017)

Overconsolidatie betekent dat de grensspanning (σ'_p) groter is dan de verticale effectieve spanning (σ'_v) (van Duinen, 2014). Grensspanning is namelijk de spanning waarbij het grondgedrag overgaat van stijf en voorbelast naar slap en niet-voorbelast. Als de grensspanning gelijk is aan de verticale effectieve spanning, spreekt men van normaal geconsolideerde grond. De onzekerheden ten aanzien van de grootte van de grensspanning zijn echter groot (van Duinen, 2014).

Indien de grond overgeconsolideerd is, vertoont de grond een vorm van cohesie (de stippellijn in Figuur 13). Bij toenemende grensspanning (= een toenemende overconsolidatie) wordt de cohesie (c') steeds groter.

Gedraineerd versus ongedraineerd gedrag

Een belangrijke overweging bij het uitvoeren van een beoordeling op macrostabiliteit is de afweging tussen een gedraineerde of een ongedraineerde analyse (Rijkswaterstaat, 2017). De essentie van ongedraineerd grondgedrag is dat waterspanningen in de grond worden gegenereerd wanneer de schuifweerstand van de grond wordt gemobiliseerd en de grond deformeert (van Duinen, 2014). In een ongedraineerde analyse van de macrostabiliteit van een talud worden deze waterspanningen in rekening gebracht. Deze waterspanningen laten de schuifsterkte van de grond afnemen. Echter, de generatie van waterspanningen door het mobiliseren van de schuifsterkte van de grond staat los van waterspanningen die ontstaan door grondwaterstroming. Deze beide aspecten dienen afzonderlijk te worden beschouwd.



Figuur 14. Relatie tussen de spanning (s') en schuifsterkte (t) (van Duinen, 2014)

Zoals in Figuur 14 te zien is, is de schuifsterkte bij gedraineerd grondgedrag hoger dan de schuifsterkte bij ongedraineerd grondgedrag. De afstand tussen de groene en de blauwe lijn (u) wordt veroorzaakt door het hierboven beschreven optreden van waterspanning.

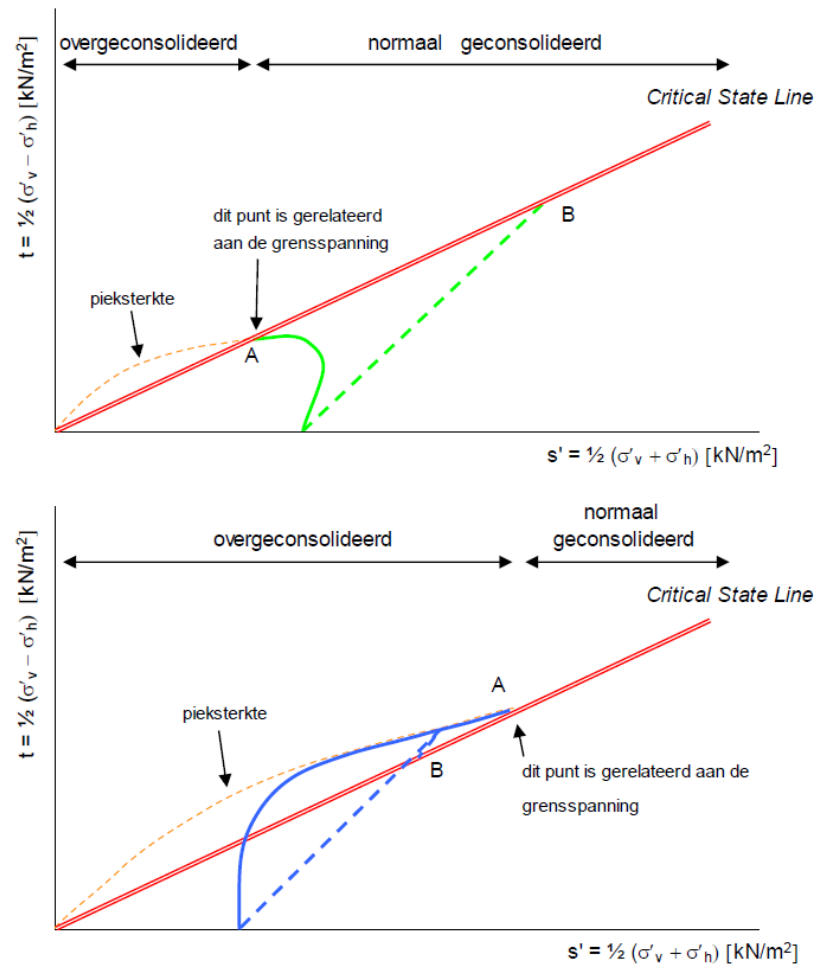
Ongedraineerde stabiliteitsanalyses zijn alleen relevant voor slecht waterdoorlatende lagen zoals klei en veen, bij het optreden van afschuivingen in waterkeringen zal in de eventueel aanwezige zandlagen namelijk geen ongedraineerd gedrag optreden (van Duinen, 2014). Ook in ongedraineerde stabiliteitsanalyses worden voor goed doorlatende lagen (zoals zand) gedraineerde sterkte-eigenschappen toegepast.

In Figuur 15 is het gedraineerde (stippellijn) en ongedraineerde (normale lijn) gedrag van de grond weergegeven binnen het CSSM-raamwerk. Duidelijk is te zien dat het verloop van de schuifsterkte (t) bij een bepaalde spanning (s') voor ongedraineerde grond afhangt van de mate van consolidatie. Het grondgedrag bij ongedraineerd afschuiven wordt bepaald door de mate van consolidatie van de grond, deze wordt uitgedrukt in de grensspanning, de overconsolidatieratio (OCR) of de pre-overburden pressure (POP) (Rijkswaterstaat, 2017). In Figuur 15a is de grond normaal geconsolideerd en heeft zodoende een OCR van 1. In Figuur 15b daarentegen is de grond overgeconsolideerd en heeft de grond een $OCR > 3$.

Er kunnen vier verschillende gevallen onderscheiden worden voor ongedraineerd grondgedrag:

- Normaal geconsolideerd ($OCR = 1$) *contractant* grondgedrag. De actuele verticale spanning is gelijk aan de grensspanning. De ongedraineerde schuifsterkte (punt A in Figuur 15a) is ongeveer de helft van de gedraineerde schuifsterkte (punt B in Figuur 15a)
- Licht overgeconsolideerd ($1 < OCR < 2$) met *contractant* gedrag. De actuele effectieve spanning is kleiner dan de grensspanning.
- Overgeconsolideerd met $OCR \approx 2$. Hier zijn de gedraineerde en de ongedraineerde schuifsterkte aan elkaar gelijk.
- Overgeconsolideerd met $OCR > 3$ met *dilatant* grondgedrag. De ongedraineerde schuifsterkte (punt A in Figuur 15b) is groot in verhouding tot de effectieve spanning in de grond en groter dan de gedraineerde schuifsterkte (punt B in Figuur 15b) bij dezelfde effectieve spanning.

(van Duinen, 2014)



Figuur 15. Gedraineerd (normale lijn) en ongedraineerd gedrag (stippellijn) in het CSSM-model weergegeven in verschillende mate van consolidatie (van Duinen, 2014)

Een gedraineerde spanningsanalyse met één van de bovenstaande glijvlakmodellen is alleen geldig voor situaties waar zowel het grondlichaam als de ondergrond uit goed doorlatende grond bestaat of voor situaties waar geen wateroverspanningen worden gegenereerd als gevolg van belastingverandering

(Rijkswaterstaat, 2017). In deze situaties wordt vergelijking (7) gebruikt om de schuifsterkte te bepalen. Hierbij is alleen de hoek van inwendige wrijving relevant.

Echter, bij $OCR > 3$ is de gedraineerde schuifsterkte ongunstiger dan de ongedraineerde (van Duinen, 2014). Het toepassen van de gedraineerde schuifsterkte is dan de veilige keuze, omdat ervan uitgegaan moet worden dat de grond bezwijkt bij de laagste mobiliseerbare schuifsterkte.

De ongedraineerde schuifsterkte is een wat meer complex fenomeen. Strikt genomen is de ongedraineerde schuifsterkte geen grondparameter maar een waarde van de schuifsterkte die afhankelijk is van diverse factoren, waaronder de belastinggeschiedenis en de -condities van de grond (van Duinen, 2014). Om deze te bepalen zijn metingen in het veld en in het laboratorium van belang.

Uitgaande van het CSSM en de SHANSEP (Stress History And Normalized Soil Engineering Properties) methode, wordt de ongedraineerde schuifsterkte van de grond als volgt bepaald:

$$s_u = \sigma'_{vi} * S * OCR^m \quad (8)$$

Met: $OCR = \sigma'_{vy} / \sigma'_{vi} \quad (9)$

Hierin is:

s_u = de ongedraineerde schuifsterkte die door de grond kan worden gemobiliseerd [kN/m²]

σ'_{vi} = de effectieve spanning [kN/m²]

S = de ongedraineerde schuifsterkte ratio. Is de verhouding van de ongedraineerde schuifsterkte en de spanning waarbij het grondmonster is geconsolideerd. S is min of meer vergelijkbaar met de hoek van inwendige wrijving. In de ongedraineerde schuifsterkte ratio is naast het effect van de wrijving tussen de gronddeeltjes ook het effect van de generatie van waterspanning bij ongedraineerd grondgedrag verdisconteerd [-]

m = de sterkte toename exponent. Bepaalt de mate waarin de ongedraineerde schuifsterkte van de grond gevoelig is voor veranderingen in de effectieve spanning als gevolg van veranderingen in de waterspanning [-]

OCR = de verhouding tussen de grensspanning en de in situ spanning [-]

σ'_{vy} = de grensspanning. Is een maat voor de in situ toestand en de belastinggeschiedenis van de grond [kN/m²]

(van Duinen, 2014)

Bijlage C

Boring

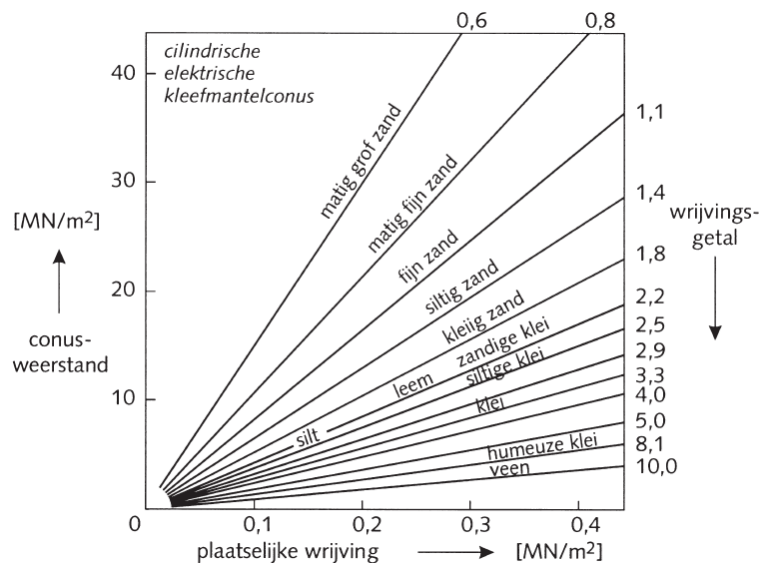
Bij een boring wordt er, zoals de naam al zegt, grond opgeboord. Een goed uitgevoerde boring haalt ongeroerde monsters uit verschillende grondlagen naar boven (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-a). Deze grondmonsters kunnen worden gebruikt voor laboratoriumproeven. Hierom vormen boringen de basis voor de grondmechanische analyse (Moser & Zomer, 2006). Het WBI schrijft voor dat de boring uitgevoerd dient te worden met één van de volgende boorsystemen:

- Piston Sampler met dunwandige steekbuis met een diameter van minimaal 100 mm. Dit boorsysteem is zeer geschikt voor ongestoorde monsternamen in veen (geringe monsterverstoring en nauwelijks steekverlies).
 - Holle Avegaar met een diameter van minimaal 100 mm. De snijrand van de Holle Avegaar dient een scherpe hoek en een scherpe snijrand te hebben.
 - Ackermann steekapparaat(pulsboring) met gedrukte steekbussen. Het slaan van de bussen is niet toegestaan om monsterverstoring te beperken.
 - Begemann boring (continue steekboring) met gelijke binnendiameter voor steekmond en pvc-liner.
- (van Duinen, 2014)

De meest gebruikte van deze boringen zijn de Ackermann boring en de Begemann boring (Spoorenberg, 2009).

Sondering

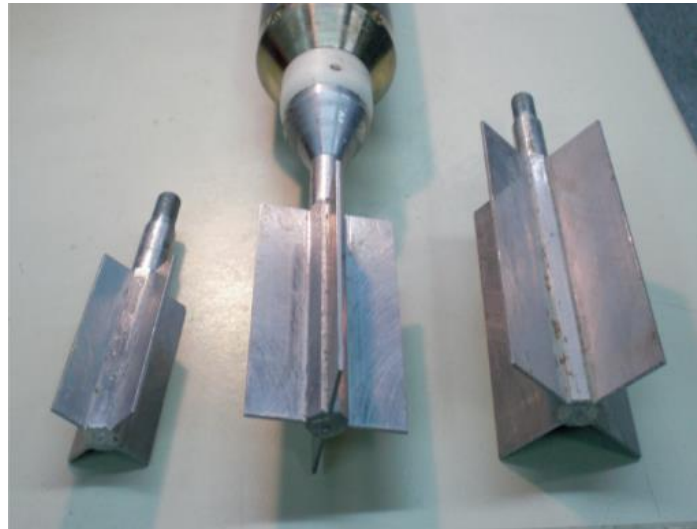
Bij het uitvoeren van een sondering wordt een staaf met een kegelvormige punt, ook wel conus, de grond in gedrukt. De standaard sondering wordt ook wel een CPT-test genoemd (naar Cone Penetration Test in het Engels). In deze conus zitten sensoren die de conusweerstand meten. In de schacht van de conus zitten verder nog sensoren die de kleefweerstand van de grond meten (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-c). Op basis van deze weerstanden kunnen de grensspanning en de ongedraineerde schuifsterkte van de grond bepaald worden (van Duinen, 2014). Ook geeft de verhouding tussen de conusweerstand en de kleefweerstand een indicatie van de grondsoort, zie Figuur 16.



Figuur 16. Bepaling grondsoort op basis van de verhouding tussen de conusweerstand en de kleefweerstand (TAW, 2001)

Vinproef

Bij zeer slappe grond bestaat er een grote kans op verstoring van het boormonster (van der Valk & van Seters, 2010) indien dit naar het laboratorium wordt verplaatst. Om toch betrouwbare resultaten te hebben, zijn er meettechnieken ontwikkeld om de sterkte van de grond in situ te bepalen. Eén daarvan is de vinproef. Bij de vinproef wordt er een in situ-vane (zie Figuur 17) de grond ingedrukt. Op basis het torsiemoment om de vin om zijn verticale as te laten draaien, kan de ongedraineerde schuifsterkte van klei-, leem- en veengrond direct worden gemeten (van der Valk & van Seters, 2010).



Figuur 17. Een in situ-vane met vinnen van verschillende afmetingen (van der Valk & van Seters, 2010)

Waterspanningsmeter

De waterspanning is de waterdruk op een willekeurige locatie in de ondergrond (Rijkswaterstaat, 2017). De grootte van de waterdruk op een willekeurige locatie wordt gekenmerkt door de stijghoogte ($m + \text{NAP}$) op deze locatie. De stijghoogte is de hoogte die het water zou krijgen in een pijlbuis.

Om de waterspanning te meten kan gebruikt worden gemaakt van een waterspanningsmeter of een piëzometer. De term piëzometer wordt gebruikt om een sensor aan te duiden die afgedicht geplaatst is in de ondergrond, zodanig dat deze alleen reageert op het omringende grondwater en niet op het grondwater-niveau op andere diepten (Kennisplatform Dijkmonitoring, n.d.-e). Er zijn verschillende manieren om de waterspanning te meten, de meest gangbare zijn:

- De open peilbuis
- De Bourdon waterspanningsmeter
- De elektrische waterspanningsmeter

(Moser & Zomer, 2006)

Het is noodzakelijk dat de waterspanning gedurende een langere tijd gemeten wordt omdat de waterspanning wordt beïnvloed door belastingen van buitenaf (Zwanenburg et al., 2013). Het is daarom van belang om fluctuaties te meten zodat ook het (tijdsafhankelijke) verband tussen de belasting en de waterspanning in de dijk duidelijk wordt. Het is hierbij ook nodig om een inschatting te maken van de periode van deze fluctuaties. Voor waterkeringen in het getijdengebied zijn namelijk hogere meetfrequenties vereist omdat de invloed van het getij niet op te maken is uit metingen met een frequentie van bijvoorbeeld 1/dag (Spoorenberg, 2009). De waterspanning kan ook gemeten worden met een piëzosondering maar dit betreft slechts een momentopname (Moser & Zomer, 2006).

De waterspanning is van belang om volgende elementen/parameters te bepalen:

- Berekenen opdrijvende kracht
- De effectieve spanning (effectieve spanning = volumetrisch gewicht van de grond – waterspanning)
- Hoogte freatisch vlak
- Leklengte (= de horizontale afstand waarover een stijghoogte verloopt in een watervoerende zandlaag)
- Indringingslengte (= de verticale afstand aan de onderzijde van de slecht doorlatende deklaag waarover de waterspanning in de deklaag verandert bij waterspanningsvariaties in de watervoerende zandlaag)

(Rijkswaterstaat, 2017)

Pompproef

Bij een pompproef wordt door middel van één of meer putten water onttrokken aan één of meer watervoerende lagen. Tijdens het pompen en enige tijd daarna wordt de verandering in waterspanning gemeten in zoveel mogelijk punten op verschillende afstanden van de put(ten). Met behulp van de dalingslijnen kunnen dan het doorlaatvermogen, de bergingscoëfficiënt en de weerstand tegen verticale stromen in een slecht doorlatende laag worden bepaald (Moser & Zomer, 2006).

Boorgatmethoden

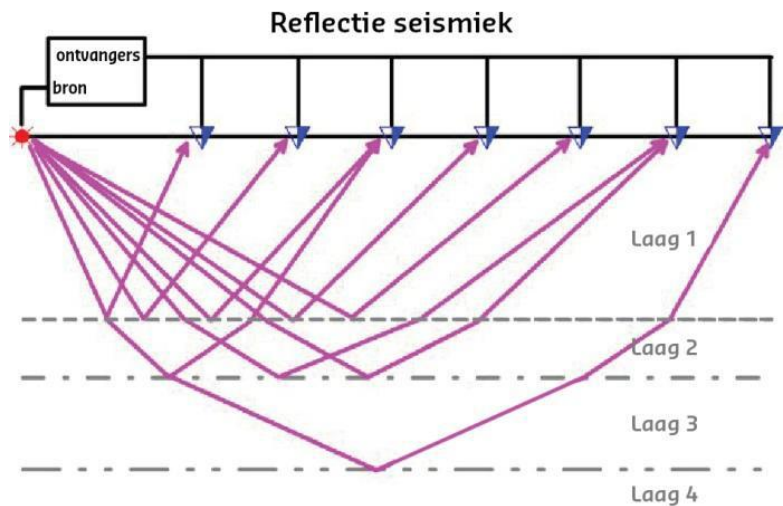
In een boorgat kunnen ook verschillende metingen gedaan worden. Afhankelijk van de sonde kan elektrische weerstand, spontaan potentiaal, natuurlijke gammastraling (geeft informatie over de grondsoort), temperatuur, elektromagnetische inductie en/of spectrale gammastraling (geeft informatie over de korrelgrootteverdeling) gemeten worden (Coelho et al., 2015). Met deze methode kunnen bovenstaande metingen worden uitgevoerd op een exact gekozen diepte.

Speciale conussen

Zoals hierboven beschreven, meet een standaard CPT-conus de conusweerstand, de kleefweerstand en optioneel de waterspanning. Echter, op of in een conus kunnen nog meer extra sensoren geplaatst worden. Voorbeelden zijn de seismische conus, de ERT-conus, de magneto-conus of de al eerder genoemde piëzoconus (Coelho et al., 2015). De seismische conus werkt als geofon om de seismische golven op te vangen. De ERT-conus meet de geleidbaarheid van de grond in de directe omgeving van de conus en kan gebruikt worden om de ERT- of EM-metingen mee te kalibreren. De magneto-conus fungeert als metaaldetector en kan bijvoorbeeld voorkomen worden dat er tijdens het sonderen leidingen worden geraakt.

Seismische methode

Er zijn verschillende seismische methoden die gebaseerd zijn op verschillende soorten golven. Echter is de basis voor al deze technieken hetzelfde. De seismische techniek is namelijk gebaseerd op het feit dat seismische energie bij een contrast in akoestische impedantie voor een deel gereflecteerd wordt (Coelho et al., 2015). Het overige deel gaat door en reflecteert op een dieper gelegen contrast. Zie Figuur 18 voor een schematische weergave van het terugkaatsen van seismische golven. Als de golfsnelheid binnen een bepaalde grondsoort bekend is, kan vervolgens het verschil in tijd tussen het versturen en weer ontvangen van het signaal omgerekend worden naar een diepte.

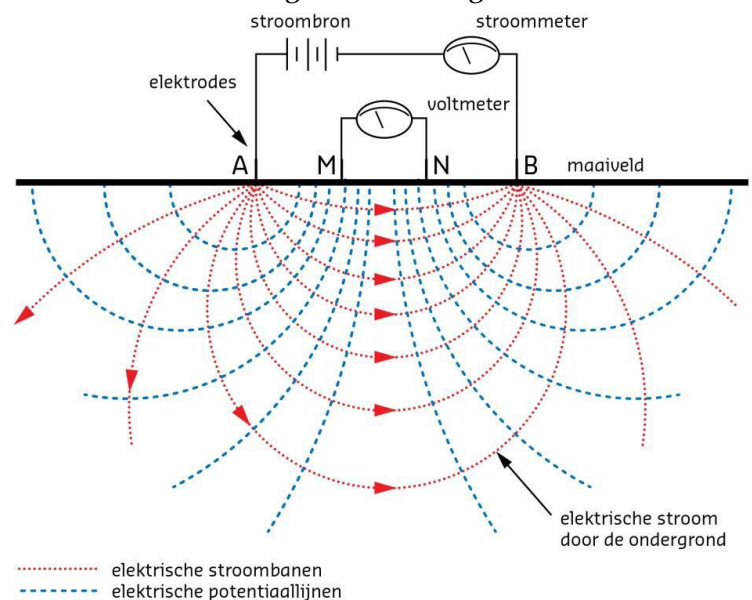


Figuur 18. Schematische weergave van een seismische meting (Coelho et al., 2015)

Behalve dat het signaal op het maaiveld verstuurd en ontvangen wordt, zijn er ook seismische technieken waarbij de (bron en de) ontvangers diep in de grond geplaatst worden. Bij de zogeheten down-hole methode bevindt de bron zich nog op het maaiveld maar zijn de ontvangers in een boorgat geplaatst en bij de cross-hole methode worden beide in een (afzonderlijk) boorgat geplaatst. De down-hole methode geeft meer informatie over de gelaagdheid terwijl cross-hole meer laterale informatie over de bodemlagen kan geven. Over het algemeen is de resolutie van deze beide methoden groter dan bij de seismische methoden vanaf het maaiveld (Coelho et al., 2015). Deze methoden worden vooral ingezet om de lagenstructuur van de grond te bepalen.

Elektrische methoden

De elektrische weerstand methode (ERT) meet het contrast in elektrische weerstand. Door het plaatsen van twee stroomelektroden en twee potentiaal-elektroden kan deze weerstand gemeten worden (Coelho et al., 2015). Deze elektroden kunnen in verschillende configuraties geplaatst worden. Hoe verder de elektroden uit elkaar staan, hoe dieper de ERT kan meten. Door het patroon en de afstand tussen de elektroden de variëren kan inzicht verkregen worden in de laterale en verticale verdeling. Deze methode wordt vooral ingezet om de stabiliteit van hellingen te meten en het inschatten van in situ grondeigenschappen (Coelho et al., 2015).



Figuur 19. Schematische weergave van de stroompaden bij een ERT-meting (Coelho et al., 2015)

Geïnduceerde polarisatie (IP) werkt vanuit het principe dat er stroom opgeslagen kan worden in kleimineralen (Coelho et al., 2015). Als bijvoorbeeld via de ERT-methode stroom de grond in wordt gestuurd, kan een deel van deze elektrische lading worden opgeslagen in de aanwezige klei. Deze achtergebleven lading komt langzaam vrij totdat er weer een evenwicht is bereikt. IP wordt vooral gebruikt bij de detectie van klei in de ondergrond.

Elektromagnetische methoden

Het principe achter grondradar (GPR) is hetzelfde als bij de seismische methoden, namelijk dat een deel van de straling reflecteert en een deel doorgaat en op diepere lagen reflecteert. Echter, de reflecties van grondradar worden veroorzaakt door een ander fysisch contrast, namelijk de mate waarin een medium elektrische lading vast kan houden in de ondergrond (Coelho et al., 2015). Dit varieert door vochtverschillen en door het type ondergrond. GPR wordt ingezet om informatie te krijgen over de lagenstructuur en de grondwaterspiegel in de ondergrond.

Elektromagnetisch meten (EM) is gebaseerd op inductie van elektromagnetische signalen. Er wordt door een zendspoel een elektromagnetisch veld opgewekt dat in de ondergrond wervelstromen induceert (Coelho et al., 2015). Het opgewekt magnetisch veld en de geïnduceerde stromen wordt gemeten met een ontvangstspoel. Omdat er voor EM geen contact met de grond nodig is, is er snelle data-acquisitie mogelijk (Coelho et al., 2015). EM kan worden gebruikt om de mineralogische samenstelling van de grond in kaart te brengen maar ook (onder bepaalde omstandigheden) om de porositeit van de grond te bepalen.

Laseraltimetrie

Laseraltimetrie is een actieve remote sensing techniek waarbij laserstralen naar het aardoppervlak worden gezonden en de looptijd wordt gemeten tussen het moment van zenden en ontvangst (Moser & Zomer, 2006). Deze looptijd kan worden omgerekend naar afstand. Deze techniek kan onder een vliegtuig of een helikopter gehangen worden. Bij het inmeten van dijken wordt vooral voor de laatste optie gekozen vanwege de benodigde resolutie. De voornaamste toepassing is het maken van digitale terreinmodellen waaruit de geometrie van de dijk bepaald kan worden (Moser & Zomer, 2006).

InSAR

Net als bij laseraltimetrie berust het principe van Interferometrische Synthetic Aperture Radar (InSAR) op het uitzenden en ontvangen van een signaal naar het aardoppervlak en de looptijd te meten. Hiermee wordt de hoogte van de grond gescand vanuit een vliegtuig of satelliet. Op basis hiervan is de geometrie te bepalen. Als er langere tijd gemeten wordt is ook de deformatie te bepalen.

Glasvezel

Met glasvezelkabels kan de deformatie van de grond bepaald worden. Dit is vooral bruikbaar als waarschuwingssysteem aangezien het begin van het grootschalig afschuiven van een grondmoot als waargenomen kan worden (Weijers et al., 2009). Hierom is het mogelijk om maatregelen te nemen om verdere schade te voorkomen.

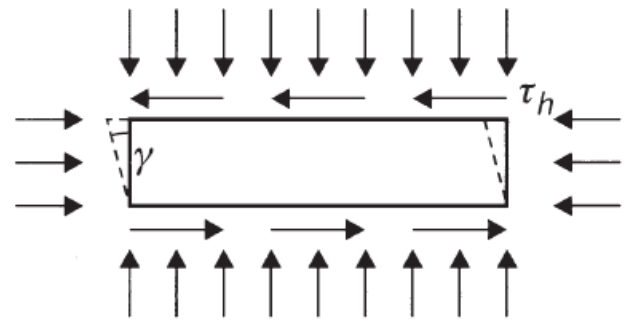
Om goed te kunnen functioneren dient een doorlatend geotextiel met geïntegreerde optische glasfibers in het dijklichaam/ondergrond aangebracht te worden (Weijers et al., 2009). Het licht dat door de kabels reist, zal verstrooid worden indien de kabel uitrekt. De locatie en de mate van de deformatie kunnen vervolgens bepaald worden.

Triaxiaalproef

Bij een triaxiaalproef wordt een grondmonster geprepareerd in de verhouding 1:2 (hoogte 2 maal de diameter). Dit monster wordt met een rubbervlies omhuld en in een perspex cel geplaatst. De cel kan op druk worden gezet door water (de consolidatiefase). Tijdens de triaxiaalproef worden alle drukveranderingen, welke plaatsvinden in en rondom het monster, vastgelegd. Het monster wordt tijdens de belasting met een constante snelheid axiaal vervormd totdat het bezwijkt (Wiertsema & Partners, n.d.-b).

Met triaxiaalproeven kunnen de schuifsterkte- en vervormingsparameters van de grond bepaald worden (Greeuw et al., 2016). Dit zijn onder andere de cohesie (c), hoek van inwendige wrijving (ϕ), de OCR, de ongedraineerde schuifspanningsratio (S) en de sterkte toename exponent (m).

Noot: Het betreft hier een eentraps triaxiaalproef. Meertraps triaxiaalproeven zijn namelijk niet geschikt voor het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte (van Duinen, 2014).



Figuur 20. Schematische weergave van het afschuiven van het grondmonster bij een Direct Simple Shear proef (TAW, 2001).

Direct Simple Shear (DSS) proef

Bij de DSS-proef wordt het grondmonster belast door een verticale kracht. Na consolidatie van het monster wordt het monster afgeschoven, waarbij afschuivingsvervorming in één richting mogelijk is (TAW, 2001), zie Figuur 20. Het afschuiven vindt plaats door het boven- en ondervlak van het monster onderling te verschuiven, met een constante snelheid.

Met een DSS-proef kunnen dezelfde schuifsterkte- en vervormingsparameters worden bepaald als met een triaxiaalproef.

Samendrukkingsproef

Bij de samendrukkingsproef wordt een ongeroerd grondmonster zijdelings opgesloten en verticaal belast. Vervorming in horizontale richting is daarom niet mogelijk. De wijze van vervorming en belasten komt bij benadering overeen met het ophogen van terreinen over een groot oppervlak (Wiertsema & Partners, n.d.-a). Door de belasting op het monster tijdens een samendrukkingsproef in een aantal stappen te verhogen en het zettingsverloop in het monster continu te registreren kunnen de OCR, de grensspanning (σ_{vy}) en de sterkte toename exponent (m) worden bepaald (Greeuw et al., 2016; van Duinen, 2014).

Constant Rate of Strain (CRS) proef

Een CRS-proef lijkt op de samendrukkingsproef waarbij het monster binnen een stijve ring met constante snelheid wordt vervormd. Met een CRS-proef kunnen dezelfde parameters worden bepaald alsmede de horizontale spanning (Greeuw et al., 2016).

Doorlatendheidsproeven

Om de doorlatendheid te bepalen zijn er twee verschillende proeven in gebruik. De Constant Head proef wordt gebruikt bij goed doorlatende, weinig samendrukbare grond (zoals zand). Hierbij wordt het volume aan water dat door de grond stroomt bijgehouden en wordt met behulp van de wet van Darcy de doorlatendheid berekend (TAW, 2001).

De Falling Head proef daarentegen wordt toegepast op slecht doorlatende, goed samendrukbare grond (zoals veen en klei). Bij deze grondsoorten is het poriëngehalte, en dus de doorlatendheid, namelijk sterk afhankelijk van de mate van samendrukking. Hierom wordt deze proef uitgevoerd bij verschillende bovenbelastingen op de grond. De doorlatendheid wordt berekend door de zakking van een waterkolom in een verticale buis, die aangesloten is op de onderzijde van het grondmonster (TAW, 2001). Dit water stroomt aan de bovenkant vervolgens weer vrij af.

Echter, de doorlatendheid kan beter met worden bepaald met veldproeven zoals de pompproef of de infiltratieproef (Zwanenburg et al., 2013). Dan worden namelijk ook invloeden in de grond meegenomen zoals scheuren of wormgaten.

Bijlage D

Boring

- De grondlaagindeling is zeer nauwkeurig vast te stellen (Spoorenberg, 2009), de accuratesse is voldoende zeer hoog.
- Omdat het van groot belang is dat de opgeboorde monsters ongeroerd is het laboratorium komen is de betrouwbaarheid afhankelijk van de manier van uitvoeren van de boring en het transport van het monster. De kwaliteit van het monster dient namelijk hoog te zijn om betrouwbare parameterbepaling mogelijk te maken (Rijkswaterstaat, 2017). Hierom dient de uitvoering van de boring, het transport en de opslag van het monster te gebeuren volgende vigerende richtlijnen.
- Met een Akkerman en een Begemann boring kan respectievelijk tot 30 meter en tot 20 meter diep geboord worden (Bodemrichtlijn, 2008b; Moser & Zomer, 2006). Handmatig boren kan echter maar tot een diepte van 5 meter (Spoorenberg, 2009).
- Het uitvoeren van een boring is relatief tijdrovend (Spoorenberg, 2009)
- Overig: een boring is bijna noodzakelijk om uit te voeren omdat dit de enige manier is om grond naar boven te halen en te onderwerpen aan ex-situ onderzoek (lees: laboratoriumonderzoek). Hiermee staat het aan de basis van de grondmechanische analyse (Moser & Zomer, 2006).

Sondering

- Voldoende nauwkeurig. Methode is ook gestandaardiseerd (Spoorenberg, 2009)
- Gezien het overvloedige gebruik van sonderingen en de standaardisatie, wordt ervan uitgegaan dat een sondering (mits alle richtlijnen in acht zijn genomen) voldoende betrouwbaar is. Echter, boven het grondwaterniveau zijn de metingen niet betrouwbaar (Spoorenberg, 2009).
- Een sondering kan tot grote diepten (25 tot 40 meter beneden maaiveld) meten (Spoorenberg, 2009)
- Een sondering gaat relatief snel (Moser & Zomer, 2006)
- Overig: Bovenstaande punten betreffen een standaard sondering (CPT-sondering). Er kunnen ook speciale conussen worden gebruikt om extra grondeigenschappen te meten. Deze worden besproken bij 'Speciale conussen'.

Vinproef

- De modernste apparaten meten het torsiemoment alsmede de hoekverdraaiing dicht bij de vin, hierdoor is een nauwkeurige meting mogelijk (Moser & Zomer, 2006).
- Een vinproef is een betrouwbare meting voor de sterkte en stijfheid van slappe klei en veen (van der Valk & van Seters, 2010)
- Aangezien een vinproef wordt uitgevoerd met een sondeerapparaat, is het dieptebereik hetzelfde als met een sondering; 25 tot 40 meter
- Het meten van één vinproef op één diepte duurt ongeveer 1 uur (van der Valk & van Seters, 2010).
- Overig: een vinproef kan ook in een laboratorium uitgevoerd worden op opgeboorde grond

Waterspanningsmeter

Zoals in 'Bijlage C, Waterspanningsmeter' al besproken, zijn er verschillende waterspanningsmeters. Er is hier per criterium onderscheid gemaakt tussen deze verschillende waterspanningsmeters:

- De accuratesse van een peilbuis, bourdon waterspanningsmeter en een elektrische waterspanningsmeter is respectievelijk goed, redelijk en goed (Moser & Zomer, 2006).
- De betrouwbaarheid van een peilbuis, bourdon waterspanningsmeter en een elektrische waterspanningsmeter is respectievelijk goed, slecht en redelijk (Moser & Zomer, 2006).
- Het dieptebereik is niet van toepassing, een waterspanningsmeter meet namelijk de waterspanning op één bepaalde diepte. Om de waterspanning op meerdere diepten te meten zijn derhalve meerdere waterspanningsmeters nodig.
- Ook de duur is niet echt van toepassing gezien een waterspanningsmeter het verloop van de waterspanning tegen de tijd meet. Dit is nodig om bepaalde verbanden te vinden tussen bijvoorbeeld de heersende waterspanning en de hydraulische belasting op de dijk (Rijkswaterstaat, 2017). De waterspanning moet zodoende enige tijd gemonitord worden om dit verband te kunnen vinden.
- Overig:
 - Door middel van een piëzosondering kan de waterspanning ook bepaald worden. Hiermee kan de waterspanning over de gehele diepte gemeten worden maar dit betreft wel een momentopname (Moser & Zomer, 2006).
 - De stijghoogte in een peilbuis kan ook elektronisch worden opgemeten (Spoorenberg, 2009). Dit is erg praktisch voor hoogfrequente metingen bij bijvoorbeeld een hoogwatergolf.

De pompproef

- De nauwkeurigheid van de pompproef ligt sterk aan de uitvoering (Bodemrichtlijn, 2008a; Thijssen, 2010).
- De betrouwbaarheid van een pompproef ligt aan de uitvoering (Bodemrichtlijn, 2008a; Thijssen, 2010).
- De pompproef heeft een dieptebereik van 50 meter (Bodemrichtlijn, 2008a).
- Een pompproef neemt maximaal enkele dagen in beslag, afhankelijk van de geohydrologische situatie (Bodemrichtlijn, 2008a).
- Overig: de doorlatendheid kan ook gemeten worden met laboratoriumproeven. Deze zijn echter minder betrouwbaar dan een pompproef in het veld (Zwanenburg et al., 2013).

Boorgatmethoden

In een reeds bestaand boorgat, kunnen vervolgens weer andere metingen uitgevoerd worden. Omdat er een grote verscheidenheid is aan metingen die uitgevoerd kan worden in zo'n boorgat, kunnen deze niet allemaal besproken en uitgewerkt worden. Enkele voorbeelden van toepassingen zijn: het bepalen van optimale filterinstellingen in waterdoorlatende pakketten en de bepaling van de kwaliteit en het zoutgehalte van het grondwater (Coelho et al., 2015). Ook kan een bestaand boorgat worden gebruikt voor een pompproef of het meten van de waterspanning. Het voordeel hiervan is dat je een bijkomstigheid van een boring nuttig gebruikt om meer specifieke informatie over de ondergrond in te winnen.

Speciale conussen

Het inzetten van speciale conussen kan een relatief makkelijke manier zijn om meer informatie van de grond te verkrijgen dan met een standaard CPT-sondering. Zo kan er, naast de grensspanning en de onge-draineerde schuifsterkte, ook bijvoorbeeld de waterspanning of de elektrische geleidbaarheid op iedere diepte bepaald worden door het gebruiken van respectievelijk een piëzoconus of een ERT-conus in plaats van een 'normale' conus. Het nadeel hiervan is alleen dat de sondering wat langer duurt omdat er steeds gestopt moet worden om een meting uit te voeren.

Seismische methode

- De resolutie van seismisch meten is ongeveer 10% van de maximale onderzoeksdiepte (Coelho et al., 2015).
- Equivalentie speelt hier geen rol. Het omzetten van tijd (gemeten) naar diepte (relevante output) is niet altijd betrouwbaar. Daarnaast kan het voorkomen dat twee verschillende grondlagen niet van elkaar onderscheiden kunnen worden als deze weinig verschillen in akoestische impedantie (Coelho et al., 2015). Ook zijn er ruisbronnen.
- Afhankelijk van de grond en de gebruikte golven is het dieptebereik 30 tot 50 meter (Coelho et al., 2015).
- Per dag kunnen op het land enkele honderden meters meetlijn worden opgenomen (Bodemrichtlijn, 2011d)
- Overig: bovenstaande eigenschappen gelden voor de oppervlakte seismiek. Zoals besproken in 'Bijlage C, Boorgatmethoden' zijn er ook seismische metingen mogelijk in een boorgat. Deze methoden hebben een hogere resolutie dan de oppervlakte seismiek (Coelho et al., 2015). Daarentegen speelt bij de boorgatmethoden wel het equivalentieprobleem en dient er een boorgat voorhanden te zijn.

Elektrische methoden

Omdat er meerdere elektrische methoden zijn (zie 'Bijlage C, Elektrische methoden') maar deze met dezelfde apparatuur uitgevoerd kunnen worden (Coelho et al., 2015), zijn deze samen besproken.

- De resolutie bedraagt ongeveer 20% van het dieptebereik voor ERT en 10% voor IP, (Coelho et al., 2015).
- Er dient voldoende verschil te zijn in elektrische geleidbaarheid tussen de verschillende grondlagen om deze als verschillend te detecteren. Ook treedt hier het equivalentieprobleem op (Coelho et al., 2015). Verder hebben deze elektrische technieken ook te maken met mogelijke ruis. In het westen, waar het grondwater vaak zout is, kan de meting beïnvloed worden door de aanwezigheid van dit zout aangezien zout water geleidend is (Coelho et al., 2015).
- Het dieptebereik hangt af van de gekozen configuratie van de elektroden. Een vuistregel die gehanteerd kan worden is dat het dieptebereik ongeveer $1/3$ is van de afstand tussen de elektroden (Coelho et al., 2015). Voor geotechnische toepassingen kan een dieptebereik van 20 tot 30 meter behaald worden.
- Van installatie tot rapportage duurt circa drie weken (Bodemrichtlijn, 2011a).

- Overig: IP is vanwege het gebruikte principe sterker in het detecteren van klei dan ERT (Coelho et al., 2015).

Elektromagnetische methoden

Omdat er meerdere elektromagnetische methoden zijn (zie 'Bijlage C, Elektromagnetische methoden') en deze dusdanig van elkaar verschillen, is er besloten om deze hier apart te bespreken:

Grondradar (GPR)

- De accuratesse hangt af van de gekozen golflengte. Hoe hoger de frequentie (= een kortere golflengte), hoe hoger de resolutie. De resolutie is op zijn best enkele decimeters (Coelho et al., 2015). Grondradar is uitermate geschikt om verschillende relatief dunne lagen (< 20 cm) te detecteren (S. de Vries, Koster, & Koomans, 2016)
- Ook de GPR heeft last van ruis. Verder kan een slechte koppeling van de antenne met de grond ervoor zorgen dat het signaal niet de bodem in gaat maar door de lucht (Coelho et al., 2015).
- Het dieptebereik varieert sterk over de gekozen golflengte, de korrelgrootte van de ondergrond en de kwaliteit van het grondwater. In ideale omstandigheden (een golf met een lage frequentie in droog zand) kan tot circa 20 meter diep gemeten worden (Coelho et al., 2015). Typisch Nederlands bereik is echter 3 tot 10 meter (Bodemrichtlijn, 2011c) . Het dieptebereik neemt namelijk over het algemeen af van droog zand via nat zand naar veen/klei.

Elektromagnetisch meten (EM)

- De resolutie is erg sterk afhankelijk van de spoelafstand, de meetfrequentie en de configuratie van de spoelen (Bodemrichtlijn, 2011b)
- EM heeft last van ruis van geleidende objecten in de omgeving of in de ondergrond (Coelho et al., 2015)
- Het dieptebereik hangt af van de afstand en de oriëntatie van de spoelen. Het veel gebruikte EM31 instrument heeft (afhankelijk van de oriëntatie) een dieptebereik tussen de 3 en de 6 meter, dit dieptebereik neemt echter toe naarmate de ondergrond slechter geleidt. (Coelho et al., 2015).
- De meetsnelheid is afhankelijk van de benodigde datadichtheid en het terrein, echter kunnen in de regel enkele honderden meters profiel per dag gemeten worden (Bodemrichtlijn, 2011b)

Laseraltimetrie

- De nauwkeurigheid varieert van enkele centimeters tot 15 centimeter (Moser & Zomer, 2006)
- Soms moet er op de ruwe metingen veel vereffening worden toegepast en dit duurt enige tijd. Meer vereffening betekent minder betrouwbare resultaten. Vandaar de stelregel: hoe sneller, hoe beter (Swart et al., 2008).
- Het dieptebereik is 0 meter omdat het alleen het oppervlak betreft.
- Er is geen informatie gevonden die duidt op de meetduur. Er wordt echter aangenomen dat dit relatief kort is gezien het vanuit een helikopter of vliegtuig gebeurt.

InSAR

- De nauwkeurigheid van InSAR is minder goed dan die van laseraltimetrie (Moser & Zomer, 2006)
- De betrouwbaarheid van InSAR is hoog (Swart, 2007)
- Het dieptebereik is 0 meter omdat het alleen het oppervlak betreft.
- Het betreft een continu meting (Moser & Zomer, 2006)

Glasvezel

- De nauwkeurigheid van het bepalen van de deformatie bedraagt 1 meter in de lengterichting van de dijk en $< 0,01\%$ van de relatieve rek (Weijers et al., 2009)
- De betrouwbaarheid is hoog (Weijers et al., 2009)
- Het dieptebereik is hierbij niet van toepassing omdat het aangelegd moet worden. Dit kan op iedere gewenste diepte.
- Het betreft een continuumeting

Triaxiaalproef

De schuifsterkte parameters van klei wordt in het laboratorium bepaald met een eentraps anistroop geconsolideerde triaxiaalproef (van Duinen, 2014).

De diameter van het triaxiaalmonster is nu op minimaal 50 mm gesteld maar de verwachting is dat grotere monsters (65 – 100 mm) een nauwkeurigere uitkomst opleveren, hier is echter aanvullend onderzoek voor nodig (Greeuw et al., 2016).

Ook is de triaxiaalproef niet geheel betrouwbaar bij het bepalen van de cohesie. Deze wordt namelijk bepaald door extrapolatie van de metingen naar het punt $\sigma' = 0$ in een grafiek van schuifsterkte τ (y-as) tegen effectieve spanning σ' (x-as) (van Duinen, 2014).

De duur van de triaxiaalproef is niet eenduidig. Het volume dient uitgezet te worden tegen de tijd, als de asymptoot duidelijk zichtbaar is na 24 uur kan er gestopt worden, anders moet er nog een dag doorgezet worden (van Duinen, 2014).

Direct Simple Shear (DSS) proef

De DSS-proef geeft betrouwbare schuifsterkte parameters voor veen, dit komt omdat de bezwijkvorm in deze proef goed aansluit bij de structuur van veen (van Duinen, 2014).

Voor een het uitvoeren van een DSS-proef zijn geen Nederlandse normen of richtlijnen voorhanden (Greeuw et al., 2016). Dit komt de betrouwbaarheid niet ten goede.

Voor het bepalen van de cohesie door middel van een DSS-proef geldt hetzelfde als voor de triaxiaalproef (van Duinen, 2014); voorzichtigheid is hierbij geboden.

Het consolideren duurt bij een DSS-proef korter dan bij een triaxiaalproef, meestal zal 16 uur voldoende zijn (van Duinen, 2014).

Samendrukkingsproef

De samendrukkingsproef is de makkelijkste manier om in het laboratorium de sterkte toename exponent (m) te bepalen (van Duinen, 2014). Ook kan met de samendrukkingsproef de grensspanning bepaald worden, de bepaalde grensspanning is hierbij wel afhankelijk van de keuze van de belastingstappen. Het is echter efficiënter om de grensspanning te bepalen met sonderingen (van Duinen, 2014).

Deze belastingstappen duren allemaal minimaal 24 uur maar als er in de grafiek nog geen duidelijk rechte kruiptak geconstateerd kan worden, mag dit worden opgerekt tot 48 uur (Greeuw et al., 2016). Een samendrukkingsproef kan derhalve maximaal $9 \cdot 48 = 432$ uur = 18 dagen duren.

Constant Rate of Strain (CRS) proef

Voor een het uitvoeren van een CRS-proef zijn geen Nederlandse normen of richtlijnen voorhanden (Greeuw et al., 2016). Dit kan de betrouwbaarheid aantasten. Echter, volgens Greeuw et al. (2016) verdient deze proef wel de voorkeur boven de standaard samendrukkingsproef vanwege de meer nauwkeurig grensspanning bepaling en omdat deze proef gecombineerd kan worden met meting van de horizontale spanning. Bovendien biedt een CRS-opstelling een betere mogelijkheid tot volledige verzadiging van het monster. Het is echter efficiënter om de grensspanning te bepalen met sonderingen (van Duinen, 2014).

Doorlatendheidsproeven

Met de Constant Head proef en de Falling Head proef kan de doorlatendheid gemeten van de grond worden, voor het verschil hiertussen zie 'Bijlage C, Doorlatendheidsproeven'.

Echter, de doorlatendheid kan beter met worden bepaald met veldproeven zoals de pompproef (zie Bijlage C, Pompproef) (Zwanenburg et al., 2013). Dan worden namelijk ook invloeden in de grond meegenomen zoals scheuren of wormgaten.