



1-7-2016

Invloed van meetkwantiteit op de stabiliteitsbeoordeling van primaire waterkeringen

De gevoeligheid van de gedetailleerde
toetsing van macrostabiliteit voor
meetkwantiteit en het effect hiervan op de
stabiliteitsbeoordeling van dijktrajecten.



D.S.G. Barmentloo

UNIVERSITY OF TWENTE.



BZ Innovatiemanagement

COLOFON

INVLOED VAN MEETKWANTITEIT OP DE STABILITEITSBEOORDELING VAN PRIMAIRE WATERKERINGEN

De gevoeligheid van de gedetailleerde toetsing van macrostabiliteit voor meetkwantiteit en het effect hiervan op de stabiliteitsbeoordeling van dijktrajecten.

Datum: 1 juli 2016

Plaats: Deventer

Auteur: D.S.G. Barmentloo

Stagebedrijf: BZ-Innovatiemanagement
Zuthpenseweg 51,
7418 AH, Deventer

Onderwijsinstelling: Universiteit Twente
Drienerlolaan 5
7522 NB, Enschede

Begeleider (extern): W.S. Zomer MSc

Begeleider (onderwijsinstelling): Dr. M.S. Krol

VOORWOORD

Dit verslag is het eindproduct van mijn bachelor opdracht en vormt de afronding van mijn bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. De bachelor opdracht is extern uitgevoerd, bij BZ-Innovatiemanagement te Deventer. Gedurende 12 weken heb ik hier kennis mogen maken met het werkveld en heb ik kunnen werken aan mijn eigen opdracht. Het onderwerp van de opdracht is de invloed van meetkwantiteit op de stabiliteitsbeoordeling van primaire waterkeringen.

In de periode waarin ik aan mijn bachelor opdracht werkte, bleek hoe actueel het onderwerp waterveiligheid is. Hevige regenval heeft gezorgd voor hoge waterstanden in de rivieren in Nederland, zeker voor de tijd van het jaar. Over de grens in Duitsland zijn enige dijktrajecten (tijdelijk) versterkt om overstromingen te voorkomen. Ook is in Limburg een talud langs de A74 weggespoeld door verzadiging met water.

Tijdens de opdracht heb ik het kennis uit verschillende onderdelen van de bacheloropleiding toegepast. Het toepassen hiervan heeft me meer zelfvertrouwen gegeven over de opgedane kennis en vaardigheden in de bacheloropleiding.

Als eerste wil ik graag mijn extern begeleider, Wouter Zomer, bedanken voor de mogelijkheid om bij BZ-Innovatiemanagement een stage te lopen. Ook wil ik hem, evenals mijn begeleider vanuit de universiteit, Maarten Krol, bedanken voor de fijne begeleiding die ze mij hebben gegeven. Jullie feedback gaf mij nieuwe inzichten en wees mij op sommige belangrijke verbeterpunten. Daarnaast bedank ik Julius van Stokkum voor de productieve discussies die we gehad hebben en het meedenken bij belangrijke keuzes.

Tenslotte ben ik Raymond Van der Meij van Deltares dank verschuldigd voor het verstrekken van het programma D-Geo Stability en het ondersteunen met technische problemen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Deventer, 1 juli 2016

David Barmmentloo

INHOUDSOPGAVE

Colofon	1
Voorwoord	2
Inhoudsopgave	3
Samenvatting	5
1. Theoretisch kader	6
1.1 Toetsing macrostabiliteit	7
1.2 De Bishop methode	8
1.3 Grondonderzoek	9
1.4 Onzekerheden in stabiliteitsberekeningen	9
2. Probleemstelling	11
2.1 Onderzoeksdoel	12
2.2 Onderzoeksvragen	12
3. Methode	13
3.1 Dijkgeometrie en grondsoorten	14
3.2 Fluctuatie parameters	16
3.2.1 Gemiddelde en standaardafwijking	16
3.2.2 Correlatielengte	17
3.2.3 Simuleren van fluctuaties	17
3.3 referentiesterkte en sterkte uit metingen	18
3.3.1 Referentiesterkte	18
3.3.2. Sterkte uit metingen	20
4. Resultaten	21
4.1 Betrouwbaarheidsinterval van veiligheidsfactor	21
4.2 Accuraatheid van de toets	22
4.2.1. Effect van de gelaagdheid op accuraatheid	23
4.3 Correlatie referentiesterkte en veiligheidsfactor meetresultaten	24
4.4 Resultaten in het toetsingsprogramma	25
5 Discussie, conclusie en aanbevelingen	26

5.1 Discussie	26
5.2 Conclusie	27
5.3 Aanbevelingen.....	28
Verwijzingen.....	29
Bijlage A: Triaxiaalproef	31
Bijlage B: Verkrijgen van simulaties	32
Bijlage C: Statistische gegevens simulaties	34
Homogene kleilaag.....	34
Effect gelaagde kleilaag.....	35
Begrippenlijst	36

SAMENVATTING

In de stabiliteitsbeoordeling van macrostabiliteit van een dijktraject worden de schuifsterkteparameters cohesie en hoek van inwendige wrijving met behulp van grondmonsters uit het dijktraject bepaald. Laboratoriumproeven van deze grondmonsters worden uitgevoerd om sterkte-eigenschappen te bepalen voor een bepaalde grondlaag. Doordat de monsters puntmetingen betreffen in een heterogene grondlaag, is er onzekerheid in de representativiteit van deze grondmonsters. Om de onzekerheid te verdisconteren worden in grondonderzoek karakteristieke laaggemiddelden en bepaald. Deze karakteristieke laaggemiddelden worden gedeeld door een partiële materiaalfactor. Deze partiële factoren worden toegepast om de karakteristieke waarden om te vormen tot conservatievere rekenwaarden.

Om het effect van de meetkwantiteit op het stabiliteitsoordeel zijn dijktrajecten van 1 kilometer in de lengterichting gesimuleerd. De kern van de dijk betreft een kleilaag. Van deze kleikern variëren de schuifsterkteparameters. Dit leidt ertoe dat in de gesimuleerde dijk de sterkte-eigenschappen (en dus ook de stabiliteit) overal in het dijktraject anders is. Uit de kleikern van de dijk worden fictief grondmonsters genomen, waarmee daadwerkelijk grondonderzoek wordt nagebootst. Door de meetkwantiteit van deze fictieve grondmonsters aan te passen kan de invloed van meetkwantiteit op het toetsingsoordeel worden bepaald. Om dit te bepalen zijn er per meetkwantiteit 100 dijktrajecten van 1 kilometer gesimuleerd. Meetkwantiteiten van 4 tot 60 metingen per kilometer zijn onderzocht.

Ten eerste is de spreiding in de uitkomst van de macrostabiliteitstoets geanalyseerd voor de verschillende meetkwantiteiten. Uit het onderzoek blijkt dat de grootte van het 95% betrouwbaarheidsinterval waarbinnen de stabiliteitsfactor van dijktrajecten valt, afneemt naarmate er meer metingen worden uitgevoerd. Dit komt doordat gemiddelden en standaardafwijkingen van de grondparameters beter bepaald kunnen worden naarmate de kwantiteit van het onderzoek wordt verhoogd. Hierdoor zijn de geobserveerde gemiddelden en standaardafwijkingen constanter. Dit resulteert ook in een constanter stabiliteitsoordeel, die gerepresenteerd wordt door een veiligheidsfactor. Het 95% interval waarbinnen metingen in een dijktraject vallen neemt stapsgewijs af van 40 tot 9% ten opzichte van het gemiddelde toetsingsoordeel bij het verhogen van de meetkwantiteit van 4 naar 60 meetpunten. Het gemiddelde stabiliteitsoordeel neemt door de verlaagde waarde van de student t-factor 10% toe bij het verhogen van de meetkwantiteit van 4 naar 60 meetpunten.

Wanneer deze stabiliteitsbeoordelingen worden vergeleken met de daadwerkelijke sterkte van de dijken, blijkt dat de stabiliteit van een dijktraject niet nauwkeurig kan worden bepaald. Bij 4 meetpunten is er een gemiddelde onderschatting 19%, maar er zijn gevallen van onderschattingen van meer dan 40%. Tegelijkertijd wordt de stabiliteit van de dijk soms ook met een aantal procenten overschat. Het 95% interval van het verschil tussen beide sterktes ligt tussen 0 en 38%. De stabiliteit kan nauwkeuriger bepaald worden door meer metingen te doen. Dit heeft effect tot 20 metingen per kilometer. De onzekerheid in de juistheid van het stabiliteitsoordeel blijft echter groot. Gemiddeld is de berekende sterkte bij deze meetkwantiteit 10% lager dan de daadwerkelijke sterkte. Het 95% interval van het verschil tussen beide waarden ligt tussen de 0 en 20%. Echter zijn er ook uitschieters, die zorgen voor overschatting of een grotere onderschatting.

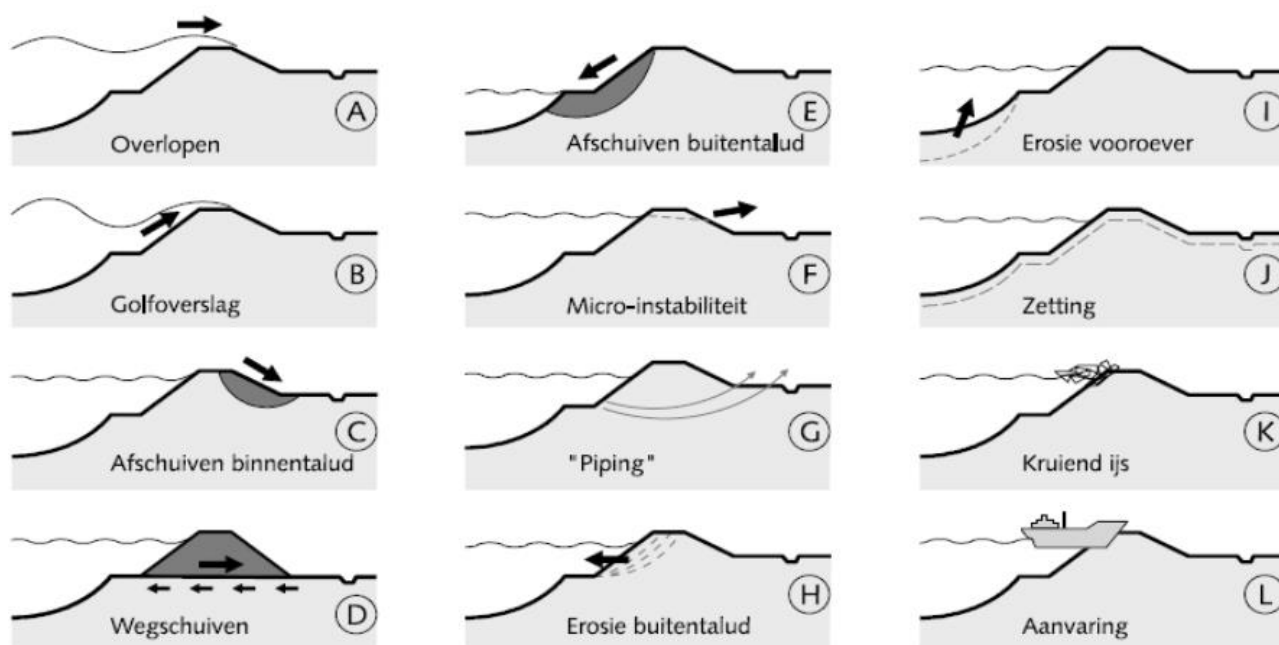
Verder is uit het onderzoek gebleken dat er maar een kleine correlatie aanwezig is tussen de daadwerkelijke sterkte en de berekende sterkte (stabiliteitsoordeel). Hierdoor worden zwakke dijken relatief vaak op sterkte overschat, terwijl erg stabiele dijken juist worden onderschat. Puntmetingen kunnen zwakke plekken in een dijktraject, of juist het ontbreken hiervan, niet goed waarnemen. Dit is bij alle onderzochte meetkwantiteiten het geval.

De macrostabiliteitsbeoordeling op deze manier is discutabel. Zelfs praktisch onhaalbare meetkwantiteiten leiden niet tot een accurate benadering van de daadwerkelijke sterkte. Wanneer wel realistische waarden voor meetkwantiteit worden aangenomen, is de onzekerheidsmarge van het toetsingsoordeel erg groot.

1. THEORETISCH KADER

Nederland heeft 3750 kilometer aan primaire dijken die het land beschermen tegen water van zee en rivieren. Sinds de watersnoodramp van 1953 en de hoogwaterstanden in de Rijn, Waal en de Maas in 1993 en 1995, ontstond er bewustzijn dat er meer gedaan moest worden aan onderzoek en waterveiligheid. Er kwam een nationale dijktoetsing, met voorschriften waaraan dijken in Nederland moeten voldoen. Sinds 1995 zijn er drie nationale toetsingsrondes voor de stabiliteit van dijken geweest. Tijdens de laatste toetsingsronde (2006-2011), voldeed 1302 van de 3750 kilometer niet aan de eisen gesteld in het Wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI) (Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2013). Deze dijken moeten worden versterkt. Voor 39 kilometer is verder onderzoek nodig.

In toetsingsrondes worden dijken getest op verschillende manieren van falen. Een manier van falen wordt een faalmechanisme genoemd. In Figuur 1 (STOWA 2012) zijn de faalmechanismen weergegeven.



Figuur 1: Faalmechanismen (Stowa, 2012)

Een van de faalmechanismen is het afschuiven van het binnentalud, zie C in Figuur 1. Dit faalmechanisme wordt ook wel verlies van macrostabiliteit of macro-instabiliteit genoemd. In geval van macro-instabiliteit schuift een grondmoot van de dijk af langs een meestal cirkelvormig glijvlak (Zwanenburg, Van Duinen en Rozing 2013). Dit gebeurt wanneer het weerstandsmoment tegen verschuiving kleiner is dan het aandrijvende moment. De weerstand tegen afschuiven wordt onder andere bepaald door de schuifsterkte van de bodem. Het aandrijvende moment wordt grotendeels door het gewicht van de grond gevormd. De sterkte van de dijk wat betreft macrostabiliteit binnenwaarts is indirect afhankelijk van de hoogte van het oppervlaktewater. Het oppervlaktewater zorgt voor een verandering van het waterpeil in de dijk. Dit waterpeil wordt de freatische lijn genoemd. Beneden de freatische lijn in het dijklichaam is de grond verzadigd met water. In verzadigde gronden is het totale volumegewicht hoger, dit kan resulteren in een groter aandrijvend moment (Deltares 2016). Ook zorgt de verhoging van de waterspanning voor een afname van de aanwezige schuifsterkte, waardoor het weerstandsmoment verminderd. (Deltares 2012).

Macro-instabiliteit komt in de praktijk in Nederland minder voor dan enkele andere faalmechanismen. De kans op piping of overloop in een karakteristieke rivierdijk is groter dan de kans op macro-instabiliteit (Jonkman en Ter Horst 2004). Dit neemt niet weg dat macrostabiliteit een van de dominante faalmechanismen is (Veiligheid Nederland in Kaart 2016). De invloed van meetgegevens op de toetsing van het faalmechanisme 'piping' wordt op dit moment onderzocht door Van Stokkum. Voor overloop, zijn op de hoogte van de dijk na weinig gegevens benodigd.

De volgende gegevens zijn benodigd voor het doen van een macrostabiliteitsanalyse (Zwanenburg, Van Duinen en Rozing 2013):

- De geometrie van een dwarsdoorsnede van de dijk.
- De opbouw van grondlagen in het dijklichaam.
- Het volumegewicht en sterkte-eigenschappen van elke grondlaag.
- Belasting van het dijklichaam en het verloop van de freatische lijn.

1.1 TOETSING MACROSTABILITEIT

Het faalmechanisme macrostabiliteit kan op verschillende detailniveaus worden getoetst. Vanaf 2017 gaan de formele toetsingsprocedures uit van de onderstaande detailniveaus (Deltares 2016). Deze toetsingslagen verschillen lichtelijk van het huidige toetsingsproces uit 2006. De verschillende stappen worden trapsgewijs doorlopen. Indien een dijktraject voldoet aan een van de toetsen wordt de dijk als veilig beoordeeld. Hiermee is het toetsingsproces afgerond. Indien de toetsing niet voldoet wordt naar de volgende stap overgegaan. Indien de kans van slagen voor een bepaalde toets erg laag wordt geacht, kan een toetsingslaag worden overgeslagen.

1. Eenvoudige toets

De geometrie van een dijk is de basis voor het uitvoeren van een eenvoudige toets. Indien de waterkering flauwe taluds heeft en afschuiven niet mogelijk wordt geacht, kan het dijktraject voldoen aan de eenvoudige toets. Ook in het geval van een brede kruin kan de dijk voldoen aan de toets. Het criterium hierbij is dat in geval van afschuiving de restbreedte van de kruin van de dijk nog groot genoeg is.

2. Gedetailleerde toets

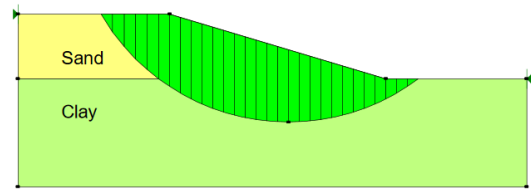
In de gedetailleerde toets wordt een stabiliteitsanalyse uitgevoerd met een glijvlakmodel. Een maatgevende dwarsdoorsnede van de dijk wordt geanalyseerd met een glijvlakmodel in combinatie met een rekenmethode, bijvoorbeeld Bishop. De stabiliteitsberekening met Bishop resulteert in een veiligheidsfactor. De veiligheidsfactor bepaalt of de dijk voldoet aan de toetsing. Invoer in de stabiliteitsberekening zijn, naast de grondgeometrie en de freatische lijn, parameterwaarden die eigenschappen van de grond representeren. Voorbeelden van deze parameters zijn hoek van inwendige wrijving, cohesie en volumegewicht. De gedetailleerde toets wordt in beginsel eerst semi-probabilistisch uitgevoerd. Dit houdt in dat onzekerheden zowel met kansen (probabilistisch) als met partiële factoren zijn gedefinieerd, zie *1.4 Onzekerheden in stabiliteitsberekeningen*. Indien er geen bevredigend resultaat uit de semi-probabilistische benadering komt, kan ervoor worden gekozen de toetsing volledig probabilistisch uit te voeren (Deltares 2016).

3. Toets op maat

Indien eerdergenoemde toetslagen niet tot het oordeel 'voldoet' leiden, kan ervoor worden gekozen om een toets op maat te doen. Deze keuze wordt gebaseerd op schattingen van de kans op succes met een toets op maat en een afweging van de schattingen van kosten van de toets op maat (Deltares 2012). Voorheen werd de toets op maat ook wel de geavanceerde toetsmethode genoemd. Er wordt geanalyseerd welke toets kan worden gebruikt om de dijk beter te testen. Dit kan per dijktraject verschillend zijn. Een voorbeeld van een geavanceerde toetsmethode is een stabiliteitsberekening met de eindige elementen methode (Ministerie van Verkeer en Waterstaat 2007).

1.2 DE BISHOP METHODE

Bishop is een methode om de taludstabiliteit van een dijk te berekenen met behulp van een dwarsprofiel van de dijk. Een softwareprogramma, D-Geo Stability kan worden gebruikt voor het uitvoeren van een Bishop analyse. Bishop maakt in de stabiliteitsberekening gebruik van lamellen; het talud wordt onderverdeeld in verticale plakken, zie Figuur 2 (GEO-SLOPE International 2012).



Figuur 2: Lamellenmethode

De lamellen zijn gebaseerd op een cirkelvormig glijvlak (Deltares 2016). De basis van de methode van Bishop is dat er sprake is van stabiliteit als de som van aandrijvende momenten lager is dan de som van de weerstandsmomenten. Cohesie (c'), hoek van inwendige wrijving (φ) en het volumegewicht (γ) zijn invoerparameters die van belang zijn voor een Bishops stabiliteitsberekening. Het volumegewicht, waterdruk en eventuele externe belastingen bepalen het aandrijvende moment. Cohesie en de hoek van inwendige wrijving beïnvloeden de schuifsterkte(τ). De schuifsterkte is maximale toelaatbare schuifspanning, zonder dat er deformatie van de grond optreedt. De schuifsterkte langs een glijvlak bepaalt het weerstandsmoment. Het weerstandsmoment wordt in D-Geo Stability berekend met de volgende formule (Deltares 2016).

$$M_{R;soil} = R * \sum_{i=1}^n \tau_i * l_i \quad (1)$$

En:

$$\tau_i = \frac{c_i + \sigma'_{v;i} * \tan \varphi_i}{1 + \tan \alpha_i * \frac{\tan \varphi_i}{F_s}} \quad (2)$$

Waarin:

τ_i	[kN/m ²]	Schuifspanning aan onderkant van lamel i
R	[m]	Radius van de glijcirkel
l_i	[m]	Lengte van de boog langs onderkant van lamel i
c_i	[kN/m ²]	Cohesie aanwezig in bodem van lamel i
$\sigma'_{v;i}$	[kN/m ²]	Verticale effectieve spanning op bodem van lamel i
φ_i	[graden]	Hoek van inwendige wrijving op bodem van lamel i
α_i	[graden]	Hoek van de bodem van de lamel
F_s	[-]	Veiligheidsfactor

Van 2006 tot 2017 is het Mohr-Coulomb model een standaardmethode om de schuifsterkte te bepalen. De teller uit formule (2) is in overeenstemming met de bepaling van de schuifsterkte aan de hand van het Mohr-Coulomb model. Vanaf 2017 zal er voor de bepaling van de schuifsterkte gebruik worden gemaakt van het Critical State Soil Mechanics model. De schuifsterkte wordt hierin zo gedefinieerd dat hij alleen van de hoek van inwendige wrijving, en niet van cohesie, afhankelijk is.

1.3 GRONDONDERZOEK

Parameters van een grondlaag kunnen bepaald worden met behulp van (on)geroerde grondmonsters van een grondlaag in een dijklichaam. Op basis van sonderingen kan de gelaagdheid in de grond worden bepaald en kunnen de te bemonsteren grondlagen worden aangegeven. Sonderingen worden ter plaatse van de kruin en ter plaatse van de binnenteen uitgevoerd. Alleen van de grondlagen waarin de glijcirkel zou kunnen optreden hoeft de schuifsterkte voor macrostabiliteit te worden bepaald. Deze grondmonsters worden met behulp van boringen verkregen. Uit de boringen worden (on)geroerde monsters toegewezen om met behulp van triaxiaalproeven de schuifsterkteparameters cohesie en hoek van inwendige wrijving te bepalen. Voor een toelichting hoe met een triaxiaalproef de schuifsterkteparameters worden bepaald, zie Bijlage A: Triaxiaalproef. Bij het doen van boringen dient te worden gelet op de locatie in het dwarsprofiel in relatie tot de meest waarschijnlijke locatie van de maatgevende cirkel (ENW Expertisenetwerk waterveiligheid 2012).

Voor het aantal triaxiaalproeven per boring en het aantal boringen bestaan geen toetsingsvereisten. De kwantiteit van meting mag door de dijkmeester zelf bepaald worden. Wel wordt geadviseerd om minimaal 4 triaxiaalproeven te doen per grondlaag (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001). Ook wordt er geadviseerd om ongeveer 3 triaxiaalproeven per boring uit te voeren. Een boring kan meerdere grondlagen doorkruisen. Per grondlaag kan worden gekozen welk deel van de boring wordt gebruikt als monster voor triaxiaalproeven. Dit kan worden gedaan aan de hand van visuele beoordeling (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001).

1.4 ONZEKERHEDEN IN STABILITEITSBEREKENINGEN

De gedetailleerde toetsing van macrostabiliteit is belast met onzekerheden. Deze onzekerheden worden verdisconteerd in de stabiliteitsberekening. Dit wordt gedaan om onterecht goedkeuring van een dijktraject te voorkomen. Onterechte goedkeuring kan ernstige schade toebrengen aan de samenleving. Het is daarom aan de uitvoerders van de stabiliteitstoets om te bewijzen dat dit niet versterking niet nodig is. Deze bewijslast, ook wel het voorzorgsprincipe of 'precautionary principle' genaamd, zorgt voor conservatisme in de stabiliteitstoetsing.

Voor onzekerheden in juistheid van schematisering, een eventuele modelfout en de mogelijke gevolgen van macro-instabiliteit zijn partiële factoren toegepast. De veiligheidsfactor, grofweg gezegd het weerstandsmoment gedeeld door het aandrijvende moment, moet voldoen aan het product van de schadefactor (Y_n), de schematiseringsfactor (Y_b) en de modelfactor (Y_d). De schematiseringsfactor en modelfactor zijn in praktijk factoren met een waarde boven de 1.0. De schadefactor kan ook een lagere waarde hebben dan 1. Indien de kritische glijcirkel het waterkerend vermogen niet aantast, kan een partiële van minimaal 0.9 worden gebruikt (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001).

$$FS \geq Y_b * Y_n * Y_d \quad (3)$$

Naast deze onzekerheden, zijn er ook onzekerheden over de heterogeniteit van de sterkte-eigenschappen in een grondlaag. De meetresultaten van triaxiaalproeven betreffen puntmetingen in grondlagen. Puntmetingen geven informatie over een punt in een heterogeen veld, hierdoor ontbreekt een volume dekkend inzicht. Om deze onzekerheid te compenseren worden van meetresultaten van triaxiaalproeven karakteristieke laaggemiddelden verkregen en gedeeld door een partiële materiaalfactor om een rekenwaarde te verkrijgen. Deze rekenwaarde is invoer in een stabiliteitsanalyse.

Een karakteristieke waarde is een waarde die in de meerderheid van de gevallen (meestal 95%) wordt overtroffen, volgens een statistische analyse (Zwanenburg, Van Duinen en Rozing 2013). Bij macrostabiliteit wordt uitgegaan van een karakteristiek laaggemiddelde. Een karakteristiek laaggemiddelde is de waarde waarbij de kans 95% is dat het daadwerkelijke gemiddelde van de laag hoger ligt. De manier van bepalen van het karakteristieke laaggemiddelde is afhankelijk van de schaal van het dijkonderzoek. Als onderzoek lokaal wordt uitgevoerd, worden er meerdere metingen gedaan in een klein dijktraject (100-150 meter), waarbinnen grondeigenschappen naar verwachting nauwelijks fluctueren (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001). Ruimtelijke variabiliteit van parameters op grotere schaal is om deze reden niet meegenomen in de berekening van een karakteristieke waarde.

Indien grondonderzoek regionaal wordt gedaan, met een dijk lengte in de ordergrote van kilometers, wordt ruimtelijke variabiliteit wel meegenomen. In dit geval kunnen de gemiddelde karakteristieke waarden voor invoerparameters worden berekend met behulp van de volgende formule (Calle, et al. 2008) (Deltares 2016):

$$C_{av, kar} = C_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} s_c \sqrt{\Gamma^2 + \frac{1}{n}} \quad (4)$$

Waarin:

$C_{av, kar}$ Karakteristieke waarde van laaggemiddelde

C_{gem} = Gemiddelde waarde van de regionale meetgegevens

$t_{N-1}^{0,95}$ = De student T-factor, behorend bij een 5% karakteristieke ondergrens en N-1 waarnemingen, Tabel 1

s_c = Standaardafwijking van de regionale meetgegevens

Γ = Waarde die de verhouding tussen de lokale en regionale variantie representeert. $\Gamma^2 = 0.25$ is een standaardwaarde (E. Calle 2008).

n = Aantal waarnemingen

Tabel 1: Waarden student t-factor voor in onderzoek gebruikte aantal waarnemingen

N	4	6	8	10	12	16	20	24	30	36	44	52	60
$t_{N-1}^{0,95}$	2.353	2.015	1.895	1.833	1.796	1.753	1.729	1.714	1.699	1.690	1.681	1.675	1.671

Indien $\Gamma^2 = 0$, dan zou de karakteristieke waarde van het lokale laaggemiddelde gelijk zijn aan het 5% regionale laaggemiddelde van de dijk. Omdat er door fluctuatie onzekerheden ontstaan in het laaggemiddelde in (lokale) secties in het dijktraject, moet dit met een factor verdisconteerd worden. Over de waarde van Γ^2 zijn op basis van beschikbare proevenverzamelingen geen eenduidige statistisch onderbouwde uitspraken te doen. Deze parameter is onzeker (E. Calle 2008). In het Leidraad voor ontwerpen van Rivierdijken deel 2 is uitgegaan van een Γ^2 waarde van 0.25.

De karakteristieke waarde van een parameter wordt gedeeld door een partiële materiaalfactor om een rekenwaarde te verkrijgen die gebruikt wordt als invoer in de stabiliteitsberekening (Deltares 2016) (van Korlaar 2011). De materiaalfactor is afhankelijk van het bodemtype, de parameter en de variatiecoëfficiënt. Veelgebruikte waarden voor materiaalfactoren voor cohesie en hoek van inwendige wrijving liggen tussen de 1.15 en 1.5 (Technische adviescommissie van de waterkeringen 2001). In dit onderzoek wordt, conform Addendum A bij het Technisch rapport van Waterkerende Grondconstructies, een waarde van de partiële materiaalfactor van 1.25 voor cohesie en 1.2 voor hoek van inwendige wrijving aangehouden (Technische adviescommissie van de waterkeringen 2001).

2. PROBLEEMSTELLING

Er is een onzekerheid in het resultaat van de macrostabiliteitstoets omdat er geen volume dekkend inzicht kan worden verkregen met behulp van puntmetingen in een heterogeen dijktraject. Naarmate meer metingen in een dijktraject worden uitgevoerd stijgt het inzicht in samenstelling van de dijk, maar zekerheid krijgen over deze samenstelling van de gehele heterogene ondergrond is onmogelijk. Het is niet duidelijk in welke mate de onzekerheid voortkomend uit de heterogeniteit van bodem in een dijktraject verband houdt met de meetkwantiteit.

Naarmate meer metingen in een dijktraject worden uitgevoerd, kan het gemiddelde en de standaardafwijking van parameters nauwkeuriger bepaald worden. Hierdoor daalt de statistische onzekerheid in de resulterende veiligheidsfactor; indien een stabiliteitsberekening met hoge meetkwantiteit nogmaals zou worden uitgevoerd met nieuwe meetlocaties is het aannemelijk dat de rekenwaarden en de veiligheidsfactor niet veel van elkaar verschillen.

Bij een lage meetkwantiteit is het gemiddelde en de standaardafwijking afhankelijk van minder waarnemingen. Hierdoor kunnen deze waarden minder nauwkeurig bepaald worden. Een nieuwe stabiliteitsberekening kan resulteren in andere rekenwaarden en een andere veiligheidsfactor. Het gevolg is een hoge onzekerheid in de veiligheidsfactor. Deze onzekerheid wordt gecompenseerd met een hoge student t-factor. De hoge student t-factor zorgt ervoor dat de karakteristieke waarde van een parameter waarde minder gunstig wordt. De bedoeling hiervan is dat een onterechte goedkeuring van de dijk vermeden wordt. De student t-factor neemt af naarmate er meer metingen worden uitgevoerd.

Door de kosten van grondonderzoek is het aantal meetpunten in beginsel beperkt (Vrouwenvelder en Calle 2003). De hoeveelheid grondonderzoek wordt niet voorgeschreven in een toetsingsvoorschrift, wel worden er handreikingen gegeven (Deltares 2016). In de Nederlandse praktijk wordt meestal meerdere ingenieursbureaus gevraagd om grondonderzoek uit te voeren. Vanwege concurrentie wordt zo scherp mogelijk geoffreerd. In veel gevallen wordt de goedkoopste offerte gekozen (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001), alhoewel de afweging van prijs en onderzoekskwaliteit, de economische meest voordelige inschrijving (EMVI), tegenwoordig ook wordt toegepast (Stowa 2014). Aangezien meetkwantiteiten voor dijktoetsingen verschillen, is het interessant wat de gevolgen van deze meetkwantiteit is op de resulterende stabiliteitsfactor.

Indien voor de goedkoopste offerte wordt gekozen, wordt er over het algemeen weinig grondonderzoek gedaan. De onzekerheden die ontstaan door het minimaliseren van het grondonderzoek kan door middel van een hoge bijbehorende student t-factor leiden tot (te) lage rekenwaarden. Dit neemt niet weg dat (te) lage rekenwaarden ook voor kunnen komen in geval van een hogere meetkwantiteit. Het gevolg hiervan is dat de dijk onterecht kan worden afgekeurd. Deze afkeuring kan extra grondonderzoek of dijkversterking tot gevolg hebben. Indien besloten wordt om de dijk te versterken, gebeurt dit terwijl dit niet noodzakelijk is. Kostbare overdimensionering van waterkeringen is hiervan het gevolg.

Meetgegevens kunnen er ook toe leiden dat de stabiliteit van een dijk onterecht wordt goedgekeurd. Het gevolg hiervan kan veel groter zijn dan onterechte afkeuring van een dijktraject. Indien toevallig alleen grond met gunstige sterkte-eigenschappen met behulp van bemonstering wordt geanalyseerd, kan de resulterende rekenwaarde te hoog zijn. Het gevolg hiervan is dat de dijk onterecht kan worden goedgekeurd. Deze kans van onterechte goedkeuring van een dijk wordt beïnvloed door de meetkwantiteit. Het is niet bekend in welke mate deze rekenwaarden bij verschillende meetkwantiteiten tot over- of onderschatting van de dijkstabiliteit leiden.

2.1 ONDERZOEKSDOEL

Vanuit de probleemstelling kan de het onderzoeksdoel worden afgeleid.

Het doel van het onderzoek is het analyseren van de gevoeligheid van de gedetailleerde macrostabiliteitstoets voor meetkwantiteit en de gevolgen hiervan op de accuraatheid van de stabiliteitsbeoordeling van een dijktraject.

Het onderzoeksdoel kan worden verdeeld in twee deel-doelen

1. Het bepalen van het effect van meetkwantiteit op de onzekerheid van de resulterende veiligheidsfactor.
2. Het onderzoeken in welke mate stabiliteitsanalyses met verschillende meetkwantiteiten, leiden tot over- of onderschatting van de stabiliteit van een dijktraject.

2.2 ONDERZOEKSVRAGEN

De hoofdonderzoeksvraag komt voort uit het onderzoeksdoel:

Wat is de gevoeligheid van de gedetailleerde macrostabiliteitstoets voor meetkwantiteit en wat zijn de gevolgen hiervan op de accuraatheid van de stabiliteitsbeoordeling?

1. Wat is het effect van de meetkwantiteit op de bandbreedte waarbinnen resulterende veiligheidsfactoren vallen?
2. Hoe verhoudt de veiligheidsfactor voortkomende uit verschillende meetkwantiteiten zich tot de stabiliteit van een dijk?

3. METHODE

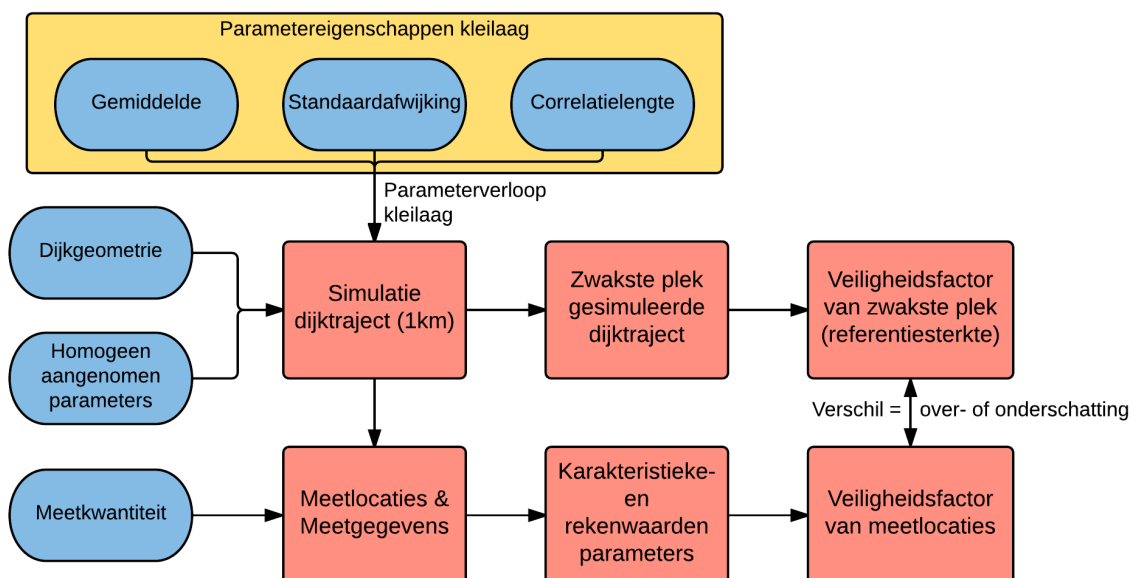
Uit de probleemstelling volgt dat er een verschil is tussen de daadwerkelijke stabiliteit van een dijk en de stabiliteit voortkomend uit metingen. Dit kan zowel een onderschatting als overschatting van het dijktraject als gevolg hebben. Door middel van simulatie van dijktrajecten en het doen van fictieve metingen in dit gesimuleerde dijktraject wordt dit verschil onderzocht zie, Figuur 3.

Er is per vergelijkingssituatie een dijk, grotendeels bestaande uit klei, gesimuleerd. Hierin is fluctuatie van de parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving op de kleilaag in de dijk toegepast. Met behulp van fluctuatie wordt nagestreefd om werkelijke verloop van sterkte-eigenschappen in een dijk na te bootsen. Deze fluctuatie is zowel in de lengterichting als in de hoogterichting toegepast. Deze fluctuatie is afhankelijk van een gemiddelde verwachte waarde, standaardafwijking en een correlatielengte.

Uit de gesimuleerde dijk, met fluctuerende parameters, worden trekkingen gedaan voor grondmonsters die in praktijk triaxiaalproeven zouden ondergaan. In triaxiaalproeven kunnen waarden voor cohesie en hoek van inwendige wrijving worden bepaald met behulp van een grondmonsters van de dijk. In de simulatie zijn eventuele meetfouten die ontstaan bij het uitvoeren van triaxiaalproeven niet meegenomen.

Vervolgens worden met behulp van de uitkomsten van de fictieve grondmonsters karakteristieke laaggemiddelden en rekenwaarden van cohesie en hoek van inwendige wrijving bepaald. Met rekenwaarden voortkomend uit de laaggemiddelden wordt een stabiliteitsberekening uitgevoerd. Bij stabiliteitsberekeningen voortkomend uit metingen wordt de onderzochte grondlaag in D-Geo stability homogeen ingevoerd. In deze stabiliteitsberekeningen is de kleikern van de dijk dus homogeen. Met de Bishop-methode wordt een stabiliteitsanalyse gedaan met een veiligheidsfactor als uitkomst. Met het bovengenoemde proces wordt de veiligheidsfactor voortkomende uit metingen zo realistisch mogelijk gesimuleerd.

Omdat de dijk fictief is en sterkte-eigenschappen overal bekend zijn, is het mogelijk om voor elk punt in de dijk een sterkteberekening uit te voeren. Hiermee kan de daadwerkelijke sterkte van de dijk berekend worden. De daadwerkelijke sterkte van deze gesimuleerde dijk wordt berekend met de Bishop methode. Het punt waar de daadwerkelijke stabiliteit van de dijk het zwakst is, met de laagste bijbehorende veiligheidsfactor, vormt de referentiesterkte van een dijktraject.



Figuur 3: Methode

Vervolgens worden de waarden van de veiligheidsfactor voortkomend uit metingen en de referentiesterkte vergeleken. Indien de referentiesterkte hoger is dan de waarde voortkomend uit metingen, is er sprake van onderschatting van de stabiliteit van het dijktraject. Als de referentiesterkte lager is dan de waarde voortkomend uit metingen, dan is de dijk op een bepaald punt zwakker dan de metingen aantonen. In dit geval is de stabiliteit van de dijk overschat.

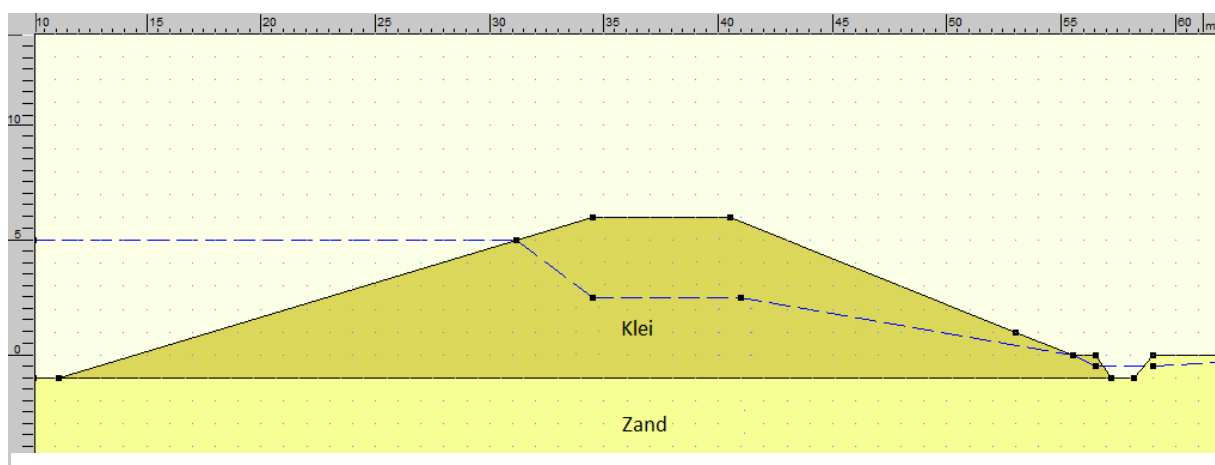
Dit vergelijkingsproces wordt per meetkwantiteit 400 keer uitgevoerd. Hierbij wordt het een dijktraject 100 keer gesimuleerd gebaseerd op dezelfde parametereigenschappen (gemiddelde, standaardafwijking en correlatielengte). Er zijn 100 verschillende dijktraject gesimuleerd om het effect van eventuele beïnvloeding door toevallig uitzonderlijke verlopen in simulaties te minimaliseren. Per simulatie worden er vier verschillende reeksen van meetlocaties toegewezen. Hierbij wordt telkens een gelijke afstand tussen de meetlocaties aangehouden. Dit is gedaan omdat op deze manier verwacht wordt dat de ruimtelijke fluctuaties het beste kunnen worden waargenomen. Dit proces wordt uitgevoerd voor 13 verschillende meetkwantiteiten tussen 2 en 30 boringen per kilometer, met per boring twee fictieve triaxiaaltesten. In totaal loopt de maatkwantiteit, het aantal fictief uitgevoerde triaxiaaltesten, van 4 tot 60 puntbronnen per dijktraject.

Uit het vergelijkingsproces worden twee dingen gebuikt om de onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. De spreiding van veiligheidsfactoren per meetkwantiteit. Met de gegevens over 400 simulaties per meetkwantiteit kan uit statistische analyse een 95% betrouwbaarheidsinterval van de veiligheidsfactor worden gegeven. Hiermee kan de onzekerheid in de veiligheidsfactor per meetkwantiteit worden aangetoond. Hiermee wordt deelvraag 1 beantwoord.
2. Het verschil tussen de veiligheidsfactor voortvloeiend uit rekenwaarden per meetkwantiteit en de referentiesterkte. Hiermee wordt deelvraag 2 beantwoord.

3.1 DIJKGEOMETRIE EN GRONDSOORTEN

In het onderzoek is een kleidijk op zand onderzocht, zie Figuur 4. De geometrie van de dijk is gebaseerd op een dijkdoorsnede van dijkkring 16 en vereenvoudigd aan de hand van voorbeeld 1 van de gebruikshandleiding van D-Geo Stability. Het schematiseren als een enkele kleilaag is niet onrealistisch gezien in de werkelijke toetsingsprocessen de dijk ook geschematiseerd kan worden met een of enkele grondsoorten (Witteveen+Bos 2013), (Arcadis 2010). De kritische glijcirkel kan de zandlaag voor een deel doorkruisen. Voor het bepalen van het effect van rekenwaarden en meetkwantiteit op het toetsingsresultaat is alleen de cohesie en hoek van inwendige wrijving in kleigronden als onzeker aangenomen. De grondeigenschappen van de zandlaag zijn dus constant.



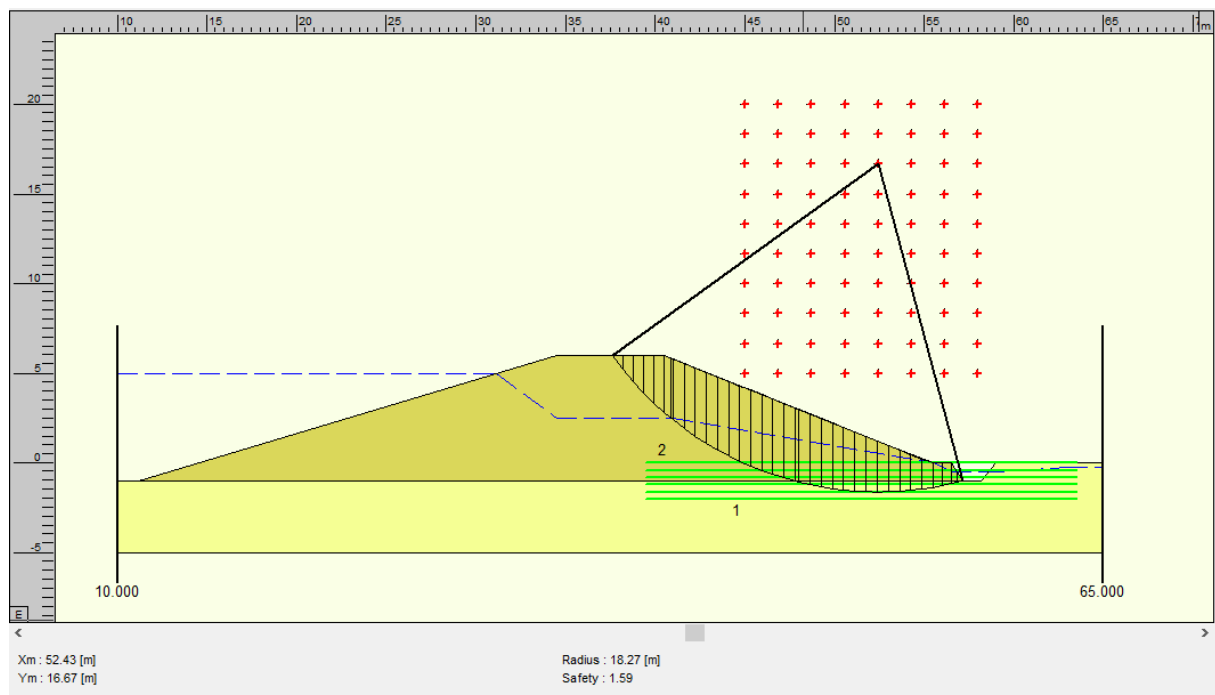
Figuur 4: Aangenomen dijk

Er is gekozen voor een kleidijk omdat hiervoor in de sterkteberekening twee parameters belangrijk zijn voor de schuifsterkte in de dijk. Indien de dijk volledig uit zand was opgebouwd, speelt cohesie geen rol. De cohesie in zand is zo laag dat hier geen rekening mee wordt gehouden in de stabiliteitsberekening. Ruimtelijke fluctuaties en onzekerheid van één parameter is minder interessant dan gecombineerde fluctuaties en onzekerheden. Bij meerdere parameters kunnen ongunstige eigenschappen samenvallen op of kunnen ze elkaar uitmiddelen. Dit kan inzicht in worden verkregen door middel van simulering van ruimtelijke simulatie. Wanneer er maar één parameter onzeker is, kunnen parameters elkaar niet in negatieve zin versterken. Dit heeft waarschijnlijk als gevolg de afhankelijkheid van meetgegevens op de onzekerheid kleiner wordt.

De freatische lijn in het dijktraject is, gegeven een maatgevende hoogwaterstand van 5 meter, geschematiseerd in Figuur 4. Dit is gedaan met behulp van figuur b1.7 van 'Technisch Rapport Waterspanningen' (TAW 2004). Doordat klei minder permeabel is dan zand, stijgt de waterdruk in de zandlaag onder het dijklichaam sneller in geval van hoogwater. Hierdoor ontstaat er waterdruk op de onderkant van de kleilaag. Dit zorgt ervoor dat de freatische lijn in de kern van de dijk vlak verloopt.

Op 1 meter van de binnenteen van de dijk bevindt zich een sloot. Dit maakt de dijk extra gevoelig voor macro-instabiliteit. Indien er geen sloot zou zijn, zou de op deze plek aanwezige grond weerstand bieden tegen afglijden. Door het ontbreken hiervan is de kans van het optreden van macro-instabiliteit groter.

De helling van het binnentalud is vrij steil, de hellingshoek is 21,8 graden. Dit zorgt ook voor extra gevoeligheid voor macrostabiliteit. Bij het uitvoeren van een stabiliteitstest van de dijk met de verwachte gemiddelde waarden voor parameters heeft de veiligheidsfactor van de dijk een waarde van 1.59, zie Figuur 5.



Figuur 5: Veiligheidsfactor dijkdoorsnede

3.2 FLUCTUATIE PARAMETERS

Op basis van een gemiddelde, standaardafwijking en een correlatielengte zijn fluctuaties van parameters gesimuleerd. Van de invoerparameters zijn alleen cohesie en hoek van inwendige wrijving in de kleilaag van de dijk met fluctuatie gesimuleerd.

De overige parameters, zoals het volumegewicht en de alle grondeigenschappen van de zandlaag zijn in het gehele dijktraject als constante waarde gesteld. Het volumegewicht is niet variërend in de gesimuleerd omdat het volumegewicht geen grote invloed heeft op het toetsingsresultaat van macrostabiliteit (Deltares 2016). De zandlaag is vanuit haalbaarheidsperspectief homogeen aangenomen. Omdat de kritische glijcirkel de zandlaag maar voor een deel kan doorkruisen, is er een effect van het homogeen aannemen op de resultaten. Indien de zandlaag ook als onzeker en fluctuerend zou worden meegenomen zal dit naar verwachting leiden tot grotere uitschieters in de resulterende stabiliteit, zowel positief als negatief.

3.2.1 GEMIDDELDE EN STANDAARDAFWIJKING

De parameterwaarden die constant zijn aangenomen zijn in Tabel 2 vermeld. De parameterwaarden zijn conform typische waarden voor deze bodemtypen (Molenaar en Houben 2003). In geval van het volumegewicht boven freatisch vlak is de bovengrens van de range van het droge volumegewicht genomen. Bij het volumegewicht onder het freatisch vlak is uitgegaan van typische waarde voor verzadigde gronden.

Tabel 2: Constante parameterwaarden

Bodemtype	Parameter [eenheid]	Waarde
Zand	Hoek van inwendige wrijving φ [°]	35
Zand	Volumegewicht boven freatisch vlak [kN/m ³]	18
Zand	Volumegewicht onder freatisch vlak [kN/m ³]	19.5
Klei	Volumegewicht boven freatisch vlak [kN/m ³]	13
Klei	Volumegewicht onder freatisch vlak [kN/m ³]	17

In Tabel 3 zijn gebruikte waarden van gemiddelde en standaardafwijking weergegeven. Het gemiddelde is met behulp van representatieve waarden voor de grondsoort bepaald (Molenaar en Houben 2003).

De variatiecoëfficiënt is eveneens met behulp van representatieve waarden verkregen. Verschillende bronnen gebruiken 0.1 als variatiecoëfficiënt voor hoek van inwendige wrijving. Dit is ook een waarde waargenomen bij grondonderzoek voor de aanleg van de Noord-Zuid lijn in Amsterdam (Korff 2013). Molenaar en Houben noemen 0.2 een typische waarde voor de variatiecoëfficiënt van cohesie. Met een gemiddelde van 10 [kN/m²] leidt dit tot een standaardafwijking van 2 [kN/m²].

Tabel 3: Fluctuerende parametereigenschappen

Bodemtype	Parameter [eenheid]	Gemiddelde	Variatiecoëfficiënt	Standaardafwijking
Klei	φ [°]	17.5	0.1	1.75
Klei	c' [kN/m ²]	10	0.2	2

3.2.2 CORRELATIELENGTE

De correlatielengte geeft een indicatie van de afstand waarover er correlatie is in de waarde van een parameter tussen twee punten (Wipfler, Veling en Maas 1994). De correlatielengte bepaald samen met het gemiddelde en de standaardafwijking de ruimtelijke fluctuatie. De mate van ruimtelijke variatie heeft grote invloed op de probabilistische stabiliteitsanalyse (Vrouwenvelder en Calle 2003). In Tabel 4 zijn advieswaarden voor horizontale en verticale correlatielengte weergegeven.

Tabel 4: Correlatielengtes

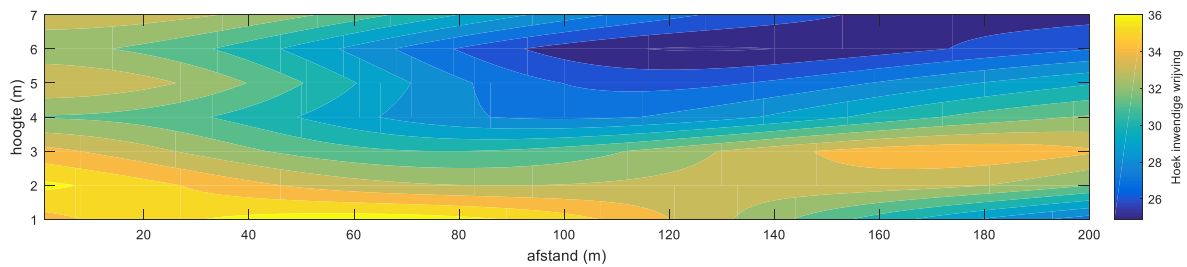
Parameter	Horizontale correlatielengte (m)	Verticale correlatielengte (m)	Bron
Algemeen	25-100	0.1-3	D-Geo Stability manual (Deltares 2016)
Cohesie	50	0.25	PC Ring User manual (TNO 1999)
Hoek van inwendige wrijving	50	0.25	PC Ring User manual (TNO 1999)

Voor de horizontale correlatielengte wordt in dit onderzoek voor zowel cohesie als hoek van inwendige wrijving een horizontale correlatielengte van 100 meter gebruikt. De horizontale correlatielengte geldt alleen longitudinaal. Horizontale fluctuatie in de dwarsrichting is niet meegenomen. De gebruikte verticale correlatielengte voor beide parameters is 2 meter.

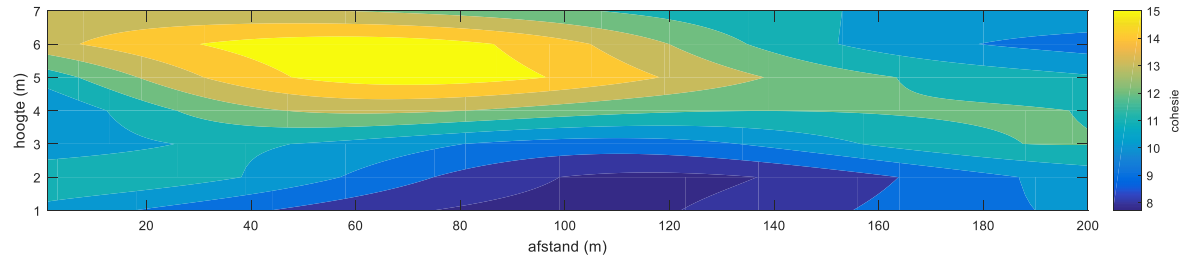
Tussen beide parameters is aangenomen dat de fluctuatievelden niet gecorreleerd zijn. De waarde van de cohesie heeft dus geen invloed de hoek van inwendige wrijving en vice versa. In werkelijkheid is er een kleine negatieve correlatie tussen beide parameters. Dat wil zeggen dat wanneer cohesie een ongunstige waarde zou hebben dat door de correlatie de kans iets toeneemt dat de hoek van inwendige wrijving geen ongunstige waarde heeft. Het aannemen van geen correlatie is lichtelijk conservatief (Deltares 2016), de gesimuleerde dijktrajecten zijn hierdoor gemiddeld genomen een fractie onstabielere dan daadwerkelijke dijktrajecten.

3.2.3 SIMULEREN VAN FLUCTUATIES

Voor het simuleren van parameters zijn Cholesky transformaties gebruikt. Op basis van een standaardafwijking, gemiddelde en een correlatieafstand zijn met Cholesky transformaties correlatiematrices aangemaakt. Deze correlatiematrices zijn vermenigvuldigd met matrices van willekeurige normaal verdeelde getallen. In *Bijlage B: Verkrijgen van simulaties*, wordt hier verder op ingegaan. Voorbeelden van resultaten van simulaties van de hoek van inwendige wrijving en cohesie zijn weergegeven in Figuur 6 en Figuur 7. Deze figuren betreffen de verdeling parameters in de kern van de dijk, en volgen hierna de gelaagdheid van de dijk zoals weergegeven in Figuur 8. De stapgrootte van de simulatie is 1 meter. Verticaal gezien bestaat de simulatie uit zeven waarden geldend voor 1 meter. Voor de inzichtelijkheid van de figuren is alleen de eerste 200 meter van de simulatie weergegeven in plaats van het gehele dijktraject (1000 meter).



Figuur 6: Voorbeeld van fluctuatie van hoek van inwendige wrijving (in de langs-richting)



Figuur 7: Voorbeeld van fluctuatie cohesie (in de langs-richting)

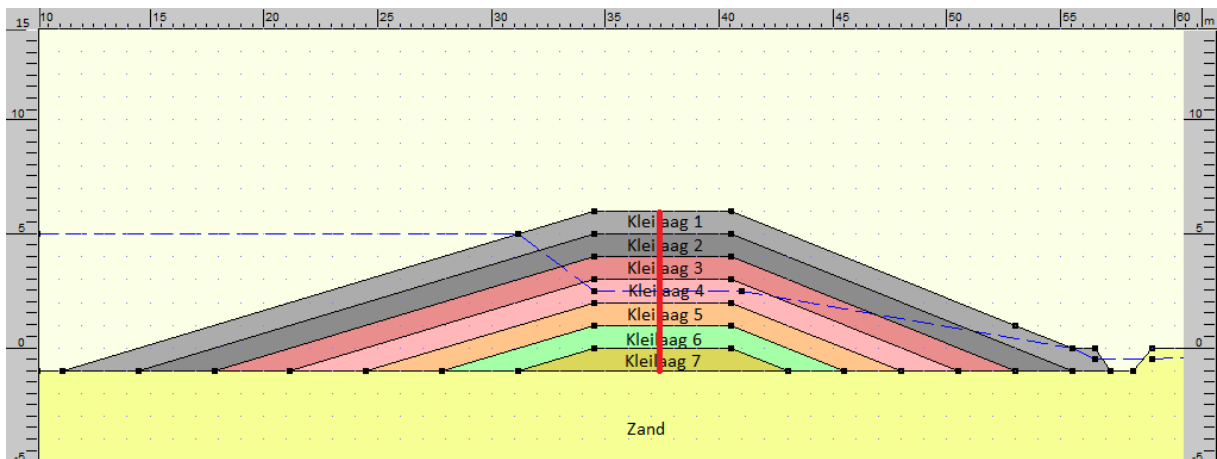
3.3 REFERENTIESTERKTE EN STERKTE UIT METINGEN

De berekende sterkte voortkomend uit metingen wordt vergeleken met de referentiesterkte van de gesimuleerde dijk. Het verschil tussen de berekende sterkte en de referentiesterkte zit voornamelijk in twee aspecten:

1. De sterkte voortkomend uit metingen is belast met onzekerheden in de vorm van karakteristieke waarden en rekenwaarden, zoals omschreven in 1.4 Onzekerheden in stabiliteitsberekeningen. De referentiesterkte is de veiligheidsfactor van het zwakste punt in het gesimuleerde dijktraject.
2. In de berekende sterkte wordt uitgegaan van homogene grondlagen, hierin is verticale fluctuatie binnen een grondlaag niet meegenomen in de schematisering. Voor de benadering van de werkelijke sterkte is de kleikern opgedeeld in zeven lagen.

3.3.1 REFERENTIESTERKTE

De referentiesterkte is de veiligheidsfactor van het zwakste punt in het gesimuleerde dijktraject. Van de simulaties van parameters in een dijktraject, waarvan voorbeelden zijn weergegeven in Figuur 6 en Figuur 7 wordt per 10 meter lengtesectie een veiligheidsfactor uitgerekend. Wanneer de sterkte uit meetpunten wordt bepaald, wordt de kleilaag beschouwd als één homogene laag. In werkelijkheid is er verticale fluctuatie

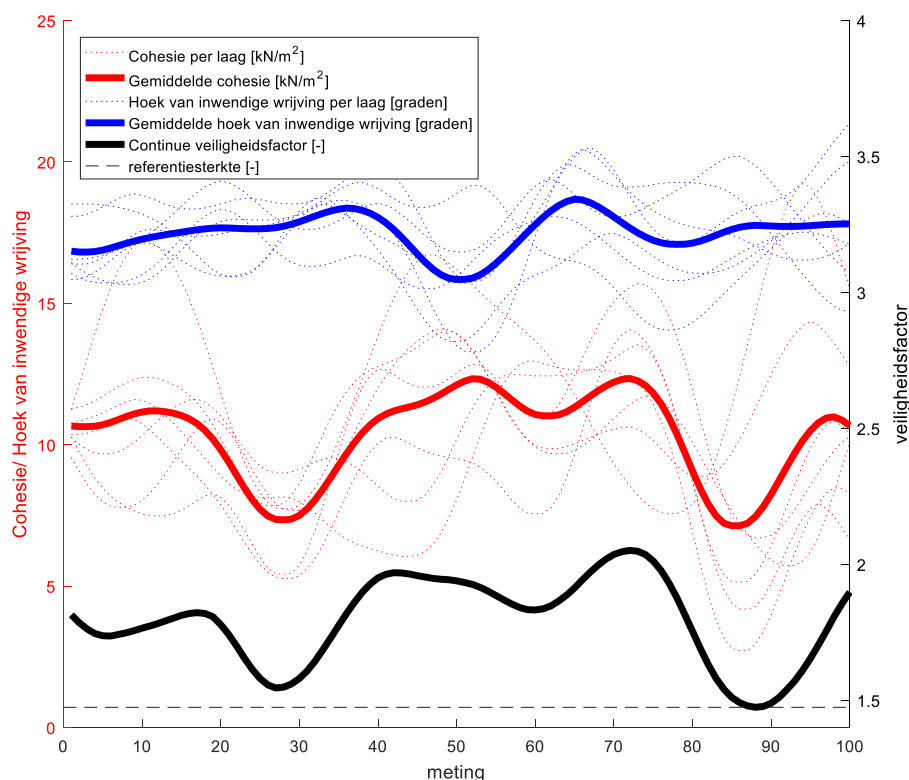


Figuur 8: Dijkdoorsnede voor bepaling van de referentiesterkte

aanwezig. Om de gevolgen van deze verticale fluctuatie te kunnen doorreken is de dijk onderverdeeld in zeven verschillende kleilagen, zie Figuur 8. De bovenste laag van Figuur 6 en Figuur 7 komt overeen met kleilaag 1 in Figuur 8.

De maatgevende waarde van een parameter in een kleilaag wordt per 10 meter lengte bepaald. De maatgevende waarde voor elke kleilaag is de gemiddelde waarde die voorkomt in een 10 meter lengtesectie van de desbetreffende laag. Door voor elke 10 meter stabiliteitsberekeningen uit te voeren is de stabiliteit van het gehele dijktraject van 1 kilometer onderzocht. Gevolg is dat er per dijktraject 100 stabiliteitsberekeningen voor de referentiesterkte uitgevoerd. De minimale veiligheidsfactor voortkomend uit de stabiliteitsberekeningen is de referentiesterkte, zie Figuur 9. Voor de sterkteberekening is gebruik gemaakt van de zeven afzonderlijke parameterwaarden in elke kleilaag. De gemiddelden weergegeven in Figuur 9 zijn slechts voor de inzichtelijkheid van het figuur. De stabiliteit wordt berekend aan de hand van de waarden per laag, die met stippellijnen zijn weergegeven.

De lengte van een afschuivende grondmoot voor macrostabiliteit is in praktijkgevallen ongeveer 50-100 meter. Een zwaktezone in de dijk is aanleiding voor het starten van het afschuiven. Deze zwaktezone heeft over het algemeen een kleinere afstand, enige tientallen meters (Deltares 2015). Door correlatie hebben de omliggende gebieden van de zwaktezone ook zwakke sterkte-eigenschappen. De zwaktezone die de aanleiding van macrostabiliteit vormt trekt het overige gebied als het ware mee tijdens het afschuiven. Dit zorgt voor het verschil tussen de lengte van de aandrijvende zwakke zone en de lengte van de grondmoot. Om de lengte van de zwaktezone te benaderen is de afstand van 10 meter als stapgrootte gebruikt voor het bepalen van de referentiesterkte.

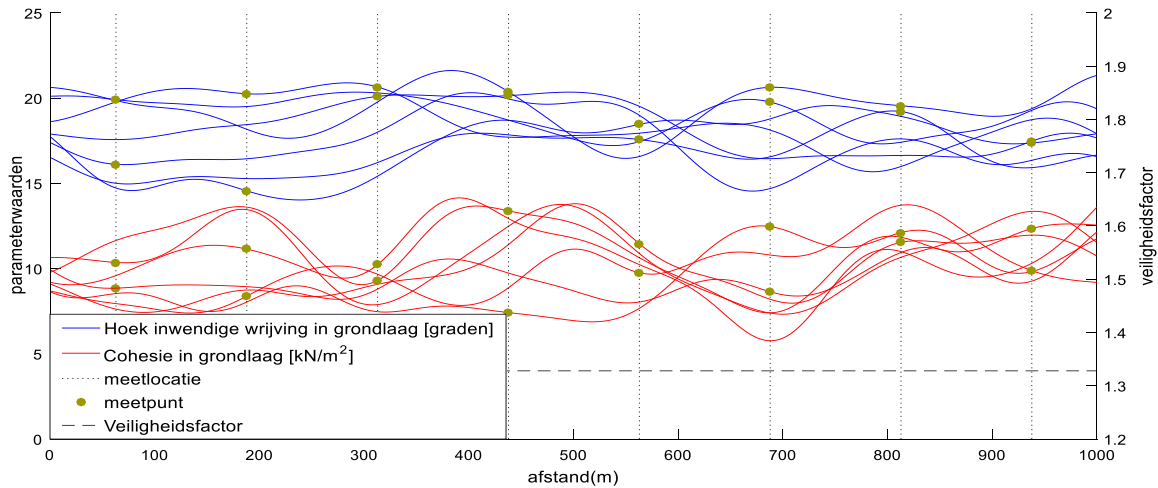


Figuur 9: Bepaling referentiesterkte

3.3.2. STERKTE UIT METINGEN

In de simulatie voor de sterkte voortkomend uit metingen is getracht het werkelijk meetproces na te bootsen.

Er zijn locaties toegewezen waar de gesimuleerde parameters gemeten worden. Uit de zeven verschillende lagen worden per meetlocatie willekeurig twee lagen uitgekozen. In deze lagen wordt fictief van een grondmonster een triaxiaaltest uitgevoerd. Uit elke triaxiaaltest komt een waarde van cohesie en een waarde van hoek van inwendige wrijving. Meetfouten van triaxiaaltesten zijn niet meegenomen. In Figuur 10 is dit weergegeven voor een meetkwantiteit van 16 metingen (8 boringen) per dijktraject van een kilometer.



Figuur 10: Voorbeeld van nabootsing metingen

De waarden van de parameters in deze gesimuleerde punten wordt gebruikt als gemeten sterkten afkomstig uit triaxiaalproeven.

Vervolgens worden karakteristieke waarden van de sterkteparameters bepaald aan de hand van formule (1). Hierbij is de standaardwaarde van $F^2 = 0.25$ voor de verhouding tussen locale en regionale variantie gebruikt. De karakteristieke waarden wordt gedeeld door een partiële materiaalfactor van 1.25 van cohesie en 1.2 voor hoek van inwendige wrijving, conform met addendum A van Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 2001). De verkregen rekenwaarden zijn geldig voor de gehele kleilaag (alle zeven verschillende lagen) in het dijktraject.

4. RESULTATEN

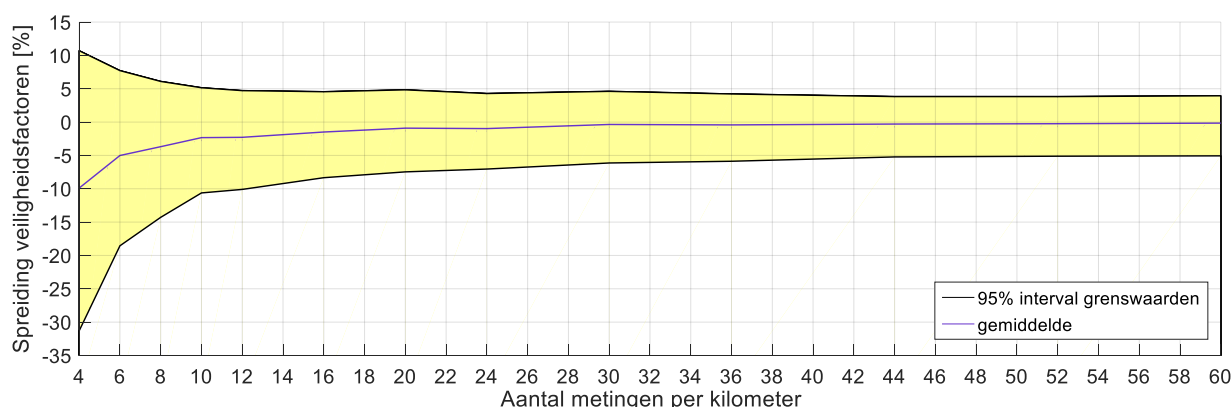
De resultaten bestaan uit verschillende uitkomsten van de simulatie, die antwoord op onderzoeksvragen geven. Ten eerste is in 4.1 *Betrouwbaarheidsinterval van veiligheidsfactor* het betrouwbaarheidsinterval van de veiligheidsfactor weergegeven. Hierin wordt de spreiding van veiligheidsfactoren per meetkwantiteit aangetoond.

Vervolgens zijn in 4.2 *Accuraatheid van de toets* veiligheidsfactoren van verschillende meetkwantiteiten vergeleken met de veiligheidsfactor van het zwakste punt in de gesimuleerde dijktrajecten, de referentiesterkte. Hiermee wordt de accuraatheid van de toets voor verschillende meetkwantiteiten beschreven.

Ook is de correlatie tussen de referentiesterkte en de veiligheidsfactor uit metingen onderzocht. Dit is gedaan in 4.3 *Correlatie referentiesterkte en veiligheidsfactor meetresultaten*. Tenslotte zijn de gevolgen van de resultaten gegeven in 4.4 *Resultaten in het toetsingsprogramma*

4.1 BETROUWBAARHEIDSINTERVAL VAN VEILIGHEIDSFACITOR

In Figuur 11 is het verloop van het 95% betrouwbaarheidsinterval van de veiligheidsfactor weergegeven. Dit figuur geeft de bandbreedte aan waarbinnen 95% van de stabiliteitsoordelen vallen, gegeven een bepaalde meetkwantiteit. In totaal zijn per meetkwantiteit 400 veiligheidsfactoren uitgerekend. De spreiding van de veiligheidsfactoren is weergegeven ten opzichte van de verwachte gemiddelde convergentiewaarde van de veiligheidsfactor van 1.235. Dit is de gemiddelde waarde van de veiligheidsfactor bij een zeer hoog aantal meetpunten.



Figuur 11: Betrouwbaarheidsinterval veiligheidsfactor

Uit het figuur valt op te maken dat de spreiding van veiligheidsfactoren vooral bij het verhogen van het aantal metingen tussen 4 en 10 metingen per kilometer sterk afneemt. De bandbreedte wordt smaller doordat de waarnemingen bij een hogere meetkwantiteit een constanter gemiddelde en een constantere standaardafwijking hebben. Het gevolg is dat ook de rekenwaarden en de voortvloeiende veiligheidsfactoren constanter zijn.

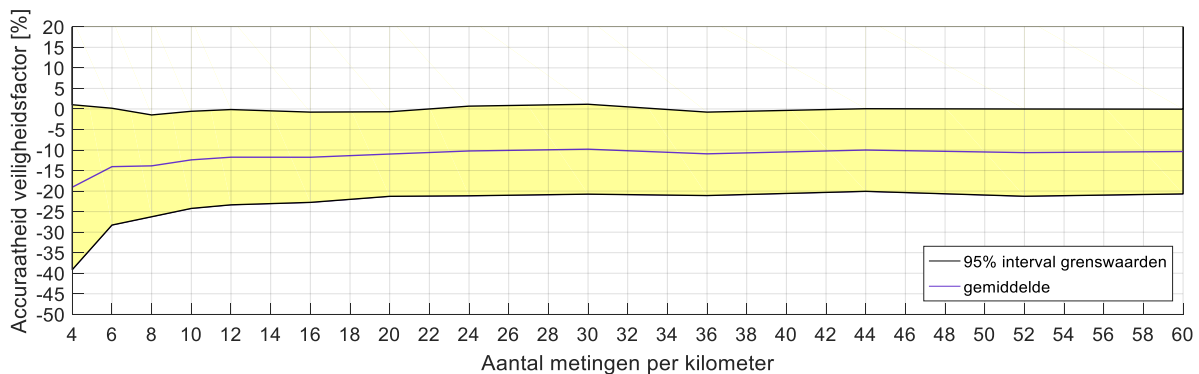
Bij het doen van een sterkteberekening van een dijktraject met 4 meetpunten is de kans 95% dat het in het interval -31% tot plus 11% procent van de convergentiewaarde ligt. De totale bandbreedte is dus 42% van de convergentiewaarde. Dit komt in het geval van de simulatie neer op een 95% interval van 0.85 tot 1.37 en een bandbreedte van in totaal 0.52. Het interval wordt kleiner naarmate er meer metingen worden uitgevoerd. Bij tien metingen in het dijktraject van een kilometer is de bandbreedte nog 15% met een 95% interval van -10% tot plus 5% ten opzichte van de convergentiewaarde. In de simulatie geeft dat een veiligheidsfactor van 1.11

tot 1.31. Bij twintig metingen is dit verder verminderd tot een bandbreedte van 12%. Bij 60 metingen is de bandbreedte nog 9%.

Vooraf de ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval neemt af. Dit wordt naast de verkleining van de bandbreedte veroorzaakt door de stijging van het gemiddelde van de veiligheidsfactor. Het gemiddelde van de veiligheidsfactor neemt toe omdat de student t-factor verminderd naarmate er meer metingen uitgevoerd worden. Deze student t-factor heeft negatieve invloed op de veiligheidsfactor. Hierdoor is de gemiddelde veiligheidsfactor bij 4 meetpunten 10% lager dan bij 60 meetpunten.

Dit betrouwbaarheidsinterval geeft alleen informatie over de range waarbinnen dijktrajecten met de gegeven meetkwantiteit waarschijnlijk zullen vallen. Dit zegt nog niet iets over de benadering van de daadwerkelijke sterkte in het dijktraject. In 4.2 Accuraatheid van de toets is de sterkte uit metingen uit het gesimuleerde dijktraject vergeleken met de referentiesterkte.

4.2 ACCURAAATHEID VAN DE TOETS



Figuur 12 a: Accuraatheid stabiliteitsfactoren

In de accuraatheid van de toets is zowel bij een lage als hoge meetkwantiteit sprake van een grote spreiding, zie Figuur 12 a. Dit betekent dat het verschil tussen de referentiesterkte en de sterkte voortkomend uit metingen varieert. Bij 4 meetpunten in het dijktraject wijkt de berekende sterkte in 95% van de gevallen tussen de 0 en -38% af van de daadwerkelijke sterkte. De gemiddelde berekende veiligheidsfactor is 19% lager dan de daadwerkelijke sterkte.

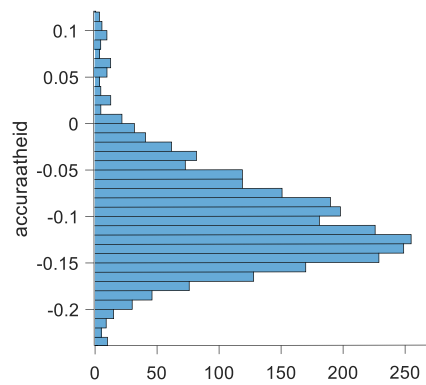
De gemiddelde accuraatheid van de toetsing neemt toe tot 20 meetpunten per kilometer. Bij deze meetkwantiteit ligt het 95% betrouwbaarheidsinterval van het verschil tussen de referentie- en berekende sterkte tussen 0 en -11%. Vanaf dit punt neemt het betrouwbaarheidsinterval niet meer af.

Dit betekent dat meten tot 20 meetpunten zin heeft om tot betere (accurate) toetsingsresultaten te komen. Bij het verhogen van de meetkwantiteit tot dit aantal wordt er vooral voorkomen dat een dijktraject onterecht wordt afgekeurd. De bovengrens van het interval verandert namelijk nauwelijks. Bij meer dan 20 meetpunten verbetert het inzicht in de daadwerkelijke veiligheidsfactor niet.

De bovenkant van het 95% betrouwbaarheidsinterval schommelt rondom 0. Op dit punt is de referentiesterkte gelijk aan de berekende sterkte. Dit betekent dat naar verwachting in ongeveer 2.5% de sterkte van het dijktraject overschat werd door de veiligheidsfactor. De meetkwantiteit heeft weinig tot geen invloed op dit percentage.

In Figuur 12b is de distributie van de accuraatheden bij meetkwantiteiten hoger dan 20 weergegeven. Vanaf 20 metingen is blijft de bandbreedte gelijk. Om een vloeiender beeld te krijgen van de distributie in de bandbreedte zijn voor verschillende meetkwantiteiten de verschillen bij elkaar opgeteld.

De distributie in Figuur 12b is rechtsscheef. Er zijn relatief veel uitbijters aan de bovenkant van de distributie. Dit betekent dat overschattingen in een iets grotere mate plaatsvinden in vergelijking met de normaal verdeelde vergelijking. De uitbijters in de distributie zijn zorgelijk, aangezien grotere overschattingen ook tot grotere inschattingsfouten van de stabiliteit leiden.



Figuur 12b: Distributie accuraatheid

4.2.1. EFFECT VAN DE GELAAGDHEID OP ACCURAATHEID

Het verschil tussen de referentiesterkte en de berekende sterkte komt voort uit twee zaken:

1. Het verschil tussen daadwerkelijke (laagste)waarden van parameters in het gesimuleerde dijktraject en de rekenwaarden van grondmonsters uit de dijk.
2. Het verschil tussen een homogene dijkstructuur en een gelaagde dijkstructuur. Wanneer de sterkte uit metingen wordt bepaald wordt er gebruik gemaakt van een homogene dijkstructuur. De gelaagde dijkstructuur, waarbij de dijk is opgedeeld in 7 lagen is gebruikt voor het berekenen van de referentiesterkte. Dit opdelen in zeven lagen is gedaan om de effecten van variatie in de grondeigenschappen door te rekenen.

Het is niet geheel duidelijk hoe de twee punten meewegen in het ontstaan van het verschil. Figuur 12 a is namelijk resultaat van de combinatie van de twee oorzaken.

In *Bijlage C*: wordt verder ingaan op statistieken die het verschil tussen de homogene dijkstructuur en de gelaagde dijkstructuur duiden. Hieruit blijkt dat de sterktes uit een gelaagde dijk gemiddeld 0.02 lager uitvallen dan in de homogene dijsimulatie, met de verwachtingswaarden als parameterwaarden. Ook zijn meer uitbijters aan de onderkant van de distributie van veiligheidsfactoren. Juist deze waarden bepalen relatief vaak de referentiesterkte. Het ontstaan van deze uitbijters aan de onderkant van de distributie heeft twee oorzaken:

1. Een negatieve afwijking van een parameter een groter effect heeft op de afwijking van de stabiliteitsfactor dan een positieve parameterafwijking.
2. Door de gelaagdheid zal de kritische glijcirkel eerder door zwakke lagen lopen. Sterke lagen worden vermeden, waardoor het effect van deze sterke lagen op de stabiliteit gering is. Zwakke lagen bepalen grotendeels de locatie van de glijcirkel.

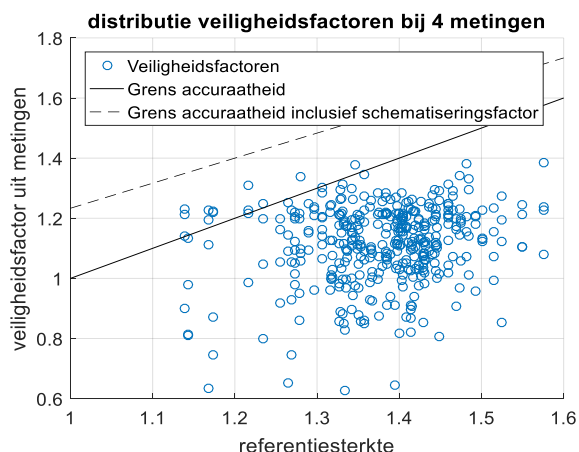
In *Bijlage C*: wordt geconcludeerd dat de gelaagdheid ervoor zorgt dat de referentiesterkte gemiddeld met ongeveer 0.05 afneemt t.o.v. een dijk met een homogene kern.

Indien ook voor de referentiesterkte de dijk homogeen zou worden aangenomen zal voor de accuraatheid van de stabiliteitsbeoordeling het gemiddelde ongeveer 0.05 lager liggen. De accuraatheid is immers de sterkte voortkomend uit metingen minus de referentiesterkte. De referentiesterkte zal 0.05 hoger komen te liggen indien de dijk voor de referentiesterkte ook homogeen zou zijn. De stabiliteit dijk zou als voor de referentiesterkte ook gebruik was gemaakt van een homogene dijk in grotere mate onderschat worden.

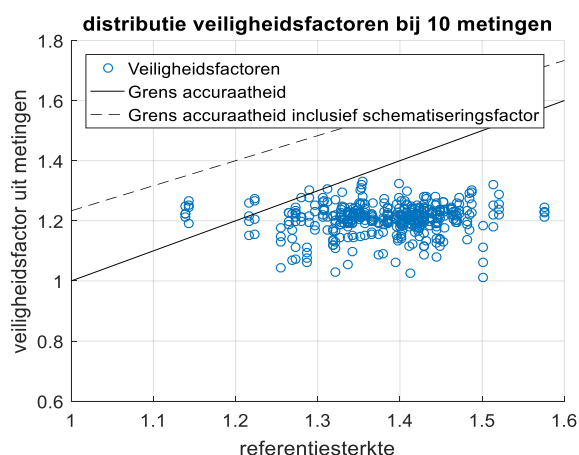
4.3 CORRELATIE REFERENTIERSTERKTE EN VEILIGHEIDSFACITOR MEETRESULTATEN

In onderstaande figuren is voor verschillende meetkwantiteiten de referentiesterkte afgezet tegen de veiligheidsfactor voortvloeiend uit metingen. Conform Figuur 11 is er te zien dat de spreiding in veiligheidsfactoren afneemt bij een hogere meetkwantiteit.

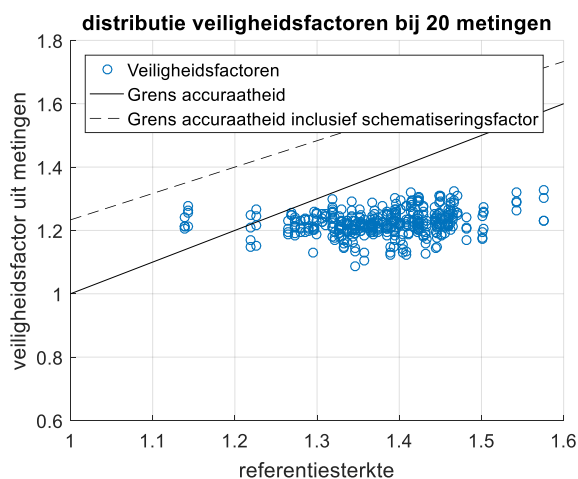
De veiligheidsfactor uit metingen is maar in kleine mate gecorreleerd met de daadwerkelijke referentiesterkte. Dit betekent dat zwakke plekken, of juist de afwezigheid van zwakke plekken, nauwelijks gedetecteerd worden met de puntmetingen in de gesimuleerde dijktrajecten. Dit is verband is aanwezig bij alle meetkwantiteiten.



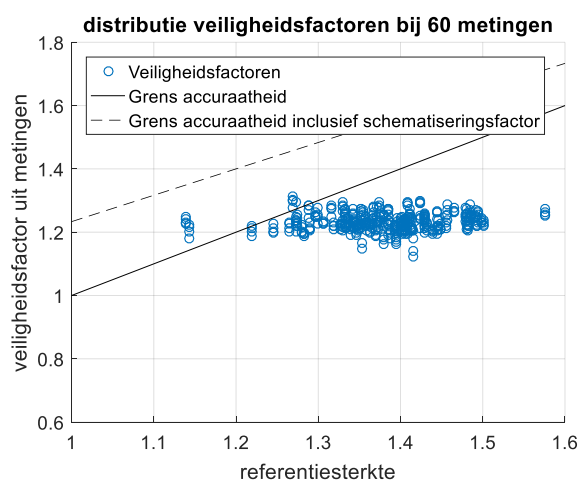
Figuur 13 a: Distributie veiligheidsfactoren 4 meetpunten



Figuur 13 b: Distributie veiligheidsfactoren 10 meetpunten



Figuur 13 c: Distributie veiligheidsfactoren 20 meetpunten



Figuur 13 d: Distributie veiligheidsfactoren 60 meetpunten

Bij elke meetkwantiteit zijn ongeveer 10 van de 400 (2.5%) veiligheidsfactoren uit metingen hoger dan de referentiesterkte. Dit komt overeen met het schommelen van de bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval in Figuur 12 a. In deze gevallen wordt de sterkte van het dijktraject overschat. Deze overschatting van de sterkte vindt over het algemeen plaats wanneer de referentiesterkte zwak is. Verontrustend is dat juist in deze gevallen overschatting grote gevolgen kan hebben.

Wanneer met correlatiecoëfficiënten wordt gezocht naar een correlatie tussen de referentiesterkte en de berekende sterkte is dit voor elke meetkwantiteit kleiner dan 0.0001. Wanneer de totalen worden van alle meetkwantiteiten worden opgeteld en gemiddeld is er wel een klein verband waar te nemen, zie Tabel 5.

Tabel 5: Correlatie referentiesterkte en berekende sterkte

Referentiesterkte	<1.2	>= 1.2 & < 1.3	>= 1.3 & < 1.4	>= 1.4 & < 1.5	>1.5
Gemiddelde berekende sterkte	1.214	1.216	1.222	1.231	1.243

Opvallend is dat zwakke dijktrajecten, met referentiesterkten lager dan 1.2, gemiddeld genomen overschat worden. Het verschil tussen de gemiddelde berekende sterkte van dijken met een referentiesterkte lager dan 1.2 scheelt 0.029 van dijken met een referentiesterkte hoger dan 1.5.

De afwezigheid van deze correlatie kan deels worden verklaard doordat bij het bepalen van een rekenwaarde van een parameter alleen de standaardafwijking en het gemiddelde van invloed zijn op het karakteristiek laaggemiddelde. Dit karakteristiek laaggemiddelde is, omdat het een karakteristieke waarde voor het gemiddelde van de hele laag betreft, niet heel gevoelig voor enkele individuele lage waarnemingen. De onzekerheid met betrekking tot heterogeniteit wordt vooral met de materiaalfactor verdisconteerd. Deze factor is niet direct afhankelijk van de waarnemingen.

4.4 RESULTATEN IN HET TOETSINGSPROGRAMMA

De stabiliteit wordt in ongeveer 2.5% van de gevallen overschat. Er is echter nog een andere factor die van invloed is bij de vergelijking tussen de daadwerkelijke sterkte en de berekende sterkte; de schematiseringsfactor. Bij het aannemen van een homogene dijkstructuur wordt in werkelijkheid een schematiseringsfactor toegepast om eventuele fouten in de gelaagdheid, freatische lijn en geometrie te verdisconteren. In geval van de gelaagde referentiesterkte, dat als de daadwerkelijke dijkdoorsnede wordt aangenomen, is deze factor niet van toepassing.

Door het toepassen van een schematiseringsfactor zal waarschijnlijk de overschatting van het dijktraject teniet worden gedaan. De vereiste veiligheidsfactor is het product van de schematiserings-, schade- en modelfactor. De schematiseringsfactor, vooral bij het schematiseren van een dijkdoorsnede als een homogene grondlaag, is hoog. Een factor van 1.3 wordt in praktijk vaak gebruikt als basisschematiseringsfactor. Een lagere factor mag alleen gebruikt worden als het gebruik hiervan onderbouwd kan worden (Niemeijer 2010). Dit is naar alle waarschijnlijkheid niet het geval bij de gebruikte schematisering. Indien een schematiseringsfactor van 1.3 wordt toegepast, wordt geen enkele dijk onterecht goedgekeurd. Hierbij moet wel worden vermeld dat de schematiseringsfactor ook onzekerheden in de freatische dijkgeometrie verdisconteerd. Er kan dus niet zomaar beoordeeld worden met de schematiseringsfactor van 1.3. De laagopbouw betreft maar een deel van deze schematiseringsfactor.

Rekening houdend met een schematiseringsfactor wordt deze onderschatting van de stabiliteit groter. De grootte van de bandbreedte waarbinnen deze resultaten vallen blijft wel gelijk. Wanneer de schematiseringsfactor wordt meegenomen in de vereiste stabiliteitsfactor, voldoet bijna geen enkele dijk aan de stabiliteitsnorm van 1.3 of hoger. Dit terwijl de referentiesterkten, bijvoorbeeld bij een meetkwantiteit van tien meetpunten per kilometer, gemiddeld 1.38 bedragen. De bandbreedte loopt hierbij van 1.14 tot 1.58.

Indien een dijktraject overschat wordt zal dit in praktijk betekenen dat de dijk zwakker is dan de uitkomst uit de toetsing. Als uit de toetsing blijkt dat de faalkans van de dijk voor macrostabiliteit 1/4000 jaar is, dan kan het in het geval van overschatting wel het geval zijn dat de daadwerkelijke faalkans hoger is (bijvoorbeeld 1/3500 jaar). Gemiddeld genomen zorgt de toetsing voor een relatief grote onderschatting van de stabiliteit. Voor deze dijktrajecten is het aannemelijk dat als ze goedgekeurd met voor een faalkans van bijvoorbeeld 1/4000 jaar in werkelijkheid een faalkans van 1/5000 jaar hebben.

5 DISCUSSIE, CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

5.1 DISCUSSIE

Het onderzoek is gebaseerd op simulaties van dijktrajecten. De kennis over ruimtelijke variaties van grondeigenschappen in dijktrajecten is beperkt. Met behulp van correlatielengtes en andere grondeigenschappen zijn de dijktrajecten gesimuleerd. De gebruikte fluctuatielengtes hebben uit bronnen onderbouwde waarden, waardoor de simulaties dijktrajecten representeren. Een nadeel is dat over de daadwerkelijke variabiliteit van dijkparameter erg weinig bekend is. Hierdoor kunnen de simulaties niet worden getoetst op juistheid of representativiteit. Bovendien is het waarschijnlijk dat deze grondeigenschappen variëren afhankelijk van het type dijk. Er is niet een juiste waarde voor een correlatieafstand, standaardafwijking of gemiddelde. Hierdoor kan de bandbreedte met andere parametereigenschappen (bijvoorbeeld een korte correlatielengte) anders zijn.

In dit onderzoek is uitgegaan van een berekening aan de hand van het Mohr-Coulomb model, waarbij de schuifsterkte wordt berekend aan de hand van een cohesiewaarde en een hoek van inwendige wrijving. Vanaf 2017 wordt de schuifsterkte anders bepaald, namelijk met het Critical State Soil Mechanics model. Hierbij is de cohesie geen directe factor meer in de berekening van de schuifsterkte. Ondanks dat de schuifsterkte op een andere manier bepaald zal gaan worden, zal de schuifsterkte nog wel worden bepaald met puntbronnen. Dat wil zeggen, met behulp van grondmonsters en laboratoriumtesten. Hierdoor wordt verwacht dat het beeld wat zal ontstaan bij de nieuwe schuifsterkebepaling hetzelfde zal zijn als de resultaten uit dit onderzoek. De methodiek is immers hetzelfde, alleen de onderzochte parameters zijn anders.

In de methode wordt gebruikt gemaakt van een referentiesterkte, dit is de veiligheidsfactor van het zwakste punt in een dijktraject. Deze referentiesterkte wordt als uitgangspunt genomen voor de daadwerkelijke sterkte in de gesimuleerde dijk. De referentiesterkte heeft echter ook onzekerheden, zoals de lengte waarover parameters ongunstig moeten zijn voor het aandrijven van macro-instabiliteit en de Bishop berekening zelf. De referentiesterkte hoeft hierdoor nog niet het exacte punt te zijn waarop de dijk faalt. Het is mogelijk dat door de lengte van macrostabiliteit of de Bishop methode de werkelijke sterkte verschilt van de referentiesterkte.

Verder is er in de vergelijking tussen de sterkte uit metingen en de referentiesterkte een verschil tussen een homogene kleilaag en een kleilaag bestaande uit zeven deellagen. Het opdelen in zeven lagen heeft een klein negatief effect op de referentiesterkte. Hierdoor is de sterkte uit berekeningen, los van het effect van rekenwaarden, in het algemeen een fractie hoger dan de referentiesterkte. Dit effect zou idealiter los moeten worden gekoppeld van de resultaten om alleen inzicht te krijgen in de invloed van meetkwantiteit. Uit *Bijlage C: Statistische gegevens simulaties* blijkt dat dit effect op de referentiesterkte ongeveer 0.05 is.

Naast deze discussiepunten in de methode zijn er ook aannames gedaan die het proces versimpelden. Dit is deels gedaan uit haalbaarheidsperspectief en deels om overzichtelijkheid te behouden. Zo zijn behalve in de kleilaag de overige grondeigenschappen, bodemopbouw en dijkgeometrie homogeen aangenomen. Ook is er geen fluctuatie in de breedterichting van de dijk toegepast. Dit wil zeggen dat in een kleilaag, de sterkte-eigenschappen in de breedterichting van het dijktraject gelijk zijn.

Over het algemeen resulteren laatstgenoemde versimpelingen in een constantere veiligheidsfactor. Dat wil zeggen dat de veiligheidsfactor over de lengte door de versimpelingen minder extreem varieert. Indien deze eigenschappen ook onzeker zouden zijn, is de kans op grotere uitschieters groter (zowel in de gemeten als de referentiesterkte). Er zal hierdoor extra ruis ontstaan in het vergelijken van een referentiesterkte met een daadwerkelijke sterkte. De stabiliteitsbeoordeling zal hierdoor minder accuraat worden. In de meerderheid van de gevallen zal echter uitmiddeling tussen deze parameters plaatsvinden.

5.2 CONCLUSIE

De hoofdvraag van het onderzoek is wat de gevoeligheid van de macrostabiliteitstoetsing is voor meetkwantiteit, en wat de gevolgen hiervan zijn op de accuraatheid van de toetsing.

Uit de simulatie blijkt dat stabiliteitsoordelen constanter worden naarmate de meetkwantiteit verhoogd wordt. Zowel de stabiliteitsoordelen van een lage als hoge meetkwantiteit benaderen de daadwerkelijke stabiliteit echter onvoldoende. Het verschil tussen de werkelijke sterkte en de berekende sterkte is groot. Ook de mate waarin de twee sterktes in verschillende simulaties van elkaar verschillen is groot; er is een grote onzekerheid in de accuraatheid van de toetsing.

In het overgrote deel van de gevallen is de veiligheidsfactor uit metingen lager dan de referentiesterkte. Bij een meetkwantiteit van 4 metingen is de berekende sterkte in 95% procent van de gevallen tussen de 100 en 62% van de daadwerkelijke sterkte. De grootte van het verschil neemt af naarmate meer metingen worden uitgevoerd. Dit effect is waar te nemen bij het toenemen van de meetkwantiteit van vier naar twintig metingen per kilometer. Bij twintig meetpunten is de berekende sterkte in 95% van de gevallen tussen de 100 en 89% van de daadwerkelijk sterkte. Dit is de maximaal haalbare accuraatheid in de simulatie, meer meten zorgt niet voor een verkleining van dit interval. 5% van de simulaties zal nog buiten de genoemde intervallen vallen.

Verder is uit het onderzoek gebleken dat er maar een kleine correlatie aanwezig is tussen de daadwerkelijke sterkte en de berekende sterkte (stabiliteitsoordeel). Dit gebrek aan correlatie zorgt ervoor dat instabiele dijken grotere kans hebben om overschat te worden, oftewel onterecht goedgekeurd te worden. Dit terwijl de sterkste dijktrajecten altijd met een relatief grote factor onderschat worden. Puntmetingen kunnen zwakke plekken in een dijktraject, of juist het ontbreken hiervan, niet goed waarnemen. Dit is bij alle onderzochte meetkwantiteiten het geval.

Omdat er weinig correlatie aanwezig is tussen de berekende sterkte en de daadwerkelijke sterkte, kan worden afgevraagd of dit wel de juiste manier van toetsing is. De onzekerheid in de accuraatheid van de stabiliteitsbeoordeling is groot, ook bij een hoge meetkwantiteit. Volume dekkend inzicht krijgen, en daaruit een accurate veiligheidsfactor berekenen, is in de gebruikte meetopzet en simulatie beperkt mogelijk.

Aan de hand van dit onderzoek kan niet worden bepaald of er in sommige gevallen sprake is van overschatting van de stabiliteit van de dijk. In de simulatie is er sprake van een overschatting in 2.5% van de gevallen wanneer er geen rekening is gehouden met een schematiseringsfactor. Omdat het onduidelijk is welk deel van de schematiseringsfactor de laagopbouw van de kern verdisconteerd, kunnen hier geen duidelijke conclusies uit worden getrokken.

Een andere reden waarom deze grens van 2.5% niet als absoluut kan worden aangenomen, is omdat er bepaalde factoren constant zijn aangenomen die in werkelijkheid zullen fluctueren, zoals de freatische lijn, homogeen aangenomen parameters en de invloed van een meetfout. Hierdoor zal er meer ruis optreden in de vergelijking tussen referentiesterkte en de berekende sterkte. De beoordeling zal in werkelijkheid minder accuraat zijn dan in de uitgevoerde simulatie.

Ook is de waargenomen bandbreedte afhankelijk van de variatie in parametereigenschappen van de gesimuleerde dijktrajecten. Indien een dijkstuk wordt getoetst, is deze variatie, en dus de bandbreedte, niet bekend. Uit dit onderzoek blijkt dat na 20 meetpunten per kilometer, gegeven de variatie en verwachtingswaarden in de dijktrajecten, de accuraatheid niet meer toeneemt. Pas wanneer erg veel metingen worden gedaan zal er inzicht worden gekregen in deze daadwerkelijke variatie in een dijktraject. Dit leidt ertoe dat pas wanneer erg veel metingen worden uitgevoerd het eventuele benodigde aantal metingen kan worden ingeschat.

5.3 AANBEVELINGEN

Aanbevolen wordt om naast puntmetingen ook andere bronnen te gebruiken om meer volume dekkend inzicht te krijgen. Om beter inzicht te krijgen in de verticale ruimtelijke variatie van grondparameters, is het mogelijk om de schijfsterkte te berekenen uit sonderingen met standaard correlaties (Deltares 2014). Hiermee kan het verticale verloop van in de schuifsterkte beter worden onderzocht. Deze techniek is niet heel nauwkeurig, maar kan wel een inzicht geven in de verticale fluctuatie binnen een grondlaag (Fugro 2010). Dit kan worden uitgevoerd in aanvulling op nauwkeurigere laboratoriumtesten.

Ook is het aan te bevelen om een stabiliteitsoordeel van een range te voorzien, in plaats van een op het oog exacte waarde. Gezien de onzekerheden die bij een toetsing komen kijken kan een veiligheidsfactor van bijvoorbeeld 1.08 als misleidend beschouwd worden. Toetsing met behulp van Monte Carlo simulaties waarin alle parameters variëren volgens een statistische distributie zou een aanvulling op de toetsing zijn. Hierin zou de gevoeligheid van het dijktraject voor bepaalde variabelen kunnen worden bepaald. Indien de gevoeligheid voor bepaalde variabelen erg hoog is en leidt tot een kans van een te lage stabiliteitsfactor, zou juist deze parameter beter kunnen worden onderzocht.

Naar verwachting heeft de ligging van de freatische lijn een groot effect op de stabiliteitsbeoordeling. De freatische lijn is in dit onderzoek constant aangenomen. De gevoeligheid van de stabiliteitsbeoordeling voor de ligging van de freatische lijn is een punt van eventueel verder onderzoek.

Omdat er onzekerheid is over de correlatielengten en andere eigenschappen van parameters, is het ook interessant om het effect van andere correlatielengtes op de accuraatheid van de stabiliteitsbeoordeling te onderzoeken. Bij een lagere correlatielengte varieert een parameter meer over de lengte van het dijktraject. Hierdoor zijn er meer uitschieters en zal naar verwachting de gemiddelde referentiesterkte iets lager liggen. Hierdoor neemt de kans op overschatting van het dijktraject toe.

VERWIJZINGEN

- Arcadis. *Derde toetsing dijkkring 44 - eindconcept*. Amsterdam: Arcadis, 2010.
- Arnold, Patrick, Grodon A. Fenton, Michael A. Hicks, Timo Schweckendiek, en Brian Simpson. *Modern Geotechnical Design Codes of Practice*. Amsterdam: IOS Press, 2013.
- Calle, E. „Statistiek bij regionale proevenverzamelingen.” *Geotechniek*, 2008: 40-44.
- Calle, Ed, Ton Vrouwenfelder, Jaap Lindenberg, Geerhard Hannink, en Edward Bruijn. „Representatieve waarden voor grondparameters in de Geotechniek.” *Geotechniek*, 2008: 24-29.
- Deltares. *Achtergrondrapportage Technische deel VTV*. Delft: Deltares, 2012.
- Deltares. *Basisrapport WTI 2017*. versie 1, Delft: Deltares, 2016.
- Deltares. *D-Geo Stability User Manual*. Delft: Deltares, 2016.
- Deltares. *Handreiking voor het bepalen van schuifsterkte parameters - WTI 2017 Toetsregels Stabiliteit*. Delft: Deltares, 2014.
- Deltares. *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit*. Versie maart 2016, Delft: Deltares, 2016.
- Deltares. *WTI 2017: Handleiding lokaal schematiseren met WIT-SOS*. Delft: Deltares, 2015.
- ENW Expertisenetwerk waterveiligheid. *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijk*. 's-Hertogenbosch: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, 2012.
- Fugro. „Toepassing van bolconus en insitu-vane, de sterkte van slappe grond.” *Civiele Techniek*, 2010: 35-36.
- GEO-SLOPE International. *Stability Modeling*. Calgary, Canada: Geo Slope International, 2012.
- Jonkman, Bas, en Wouter Ter Horst. „Probabilistisch model geeft beeld van falen rivierdijken.” *Land + Water*, 2004: 2-3.
- Korff, M. *Response of Piled Buildings to the Construction of Deep Excavations*. Amsterdam: IOS Press, 2013.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. *Verlengde derde toets primaire waterkeringen*. Utrecht: Inspectie leefomgeving en milieu, 2013.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007.
- Molenaar, A.A.A., en L.J.M. Houben. *Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen*. Delft: TU Delft, 2003.
- Niemeijer, J. *Stappenplan Schematiseringsfactor*. Hoorn: Rijkswaterstaat, 2010.
- Rijkswaterstaat, Projectbureau VNK. *De veiligheid van Nederland in kaart*. Den Haag: Ministerie van infrastructuur en Milieu, 2014.
- Schweckendiek, Timo. *A Bayesian Decision Approach*. Proefschrift, Delft: TU Delft, 2014.
- STOWA. *Technische Informatie uitvoering Inspecties*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, 2012.

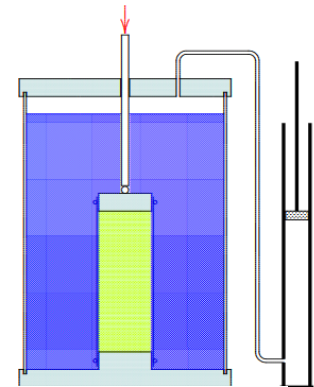
- Stowa. *Versneld ophogen regionale keringen*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), 2014.
- TAW. *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004.
- Technische adviescommissie van de waterkeringen. *Addendum bij het TRWG, Deel A Stabiliteitsfactoren*. Addendum, Delft: Technische adviescommissie van de waterkeringen, 2001.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*. Delft: TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2001.
- TNO. *Theoriehandleiding PC-Ring, Deel B: Statistische Modellen*. Delft: 98-CON-R1431: TNO Bouw, 1999.
- van Korlaar, K. *Onderzoek waterkering Beemstervaart*. De Bilt: Grondmij Nederland B.V., 2011.
- Veiligheid Nederland in Kaart. *De veiligheid van Nederland in kaart*. Lelystad: Rijkswaterstaat Projectbureau VNK, 2016.
- Verruijt, A., en W. Broere. *Grondmechanica*. Delft: Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft, 2011.
- Vrouwenvelder, Ton, en Ed Calle. *Measuring Spatial Correlation of Soil Properties*. Delft: TNO-Bouw, 2003.
- Wipfler, Louise, Ed Veling, en Kees Maas. *Een nieuw transportmodel voor verontreiniging in het grondwater*. Delft: TU Delft, 1994.
- Witteveen+Bos. *Sluitstukkades Cluster E ontwerpnota definitief ontwerp dijkkring 77*. Deventer: Witteveen+Bos, 2013.
- Zwanenburg, C, A Van Duinen, en A Rozing. *Technisch rapport macrostabiliteit*. Delft: Deltares, 2013.

BIJLAGE A: TRIAXIAALPROEF

Met een triaxiaalproef kunnen parameters worden bepaald die de schuifweerstand bepalen. Een triaxiaalproef wordt uitgevoerd van een monster van de dijk, die in een laboratorium onderzocht wordt. Dit dijkmonster is cilindrisch van vorm.

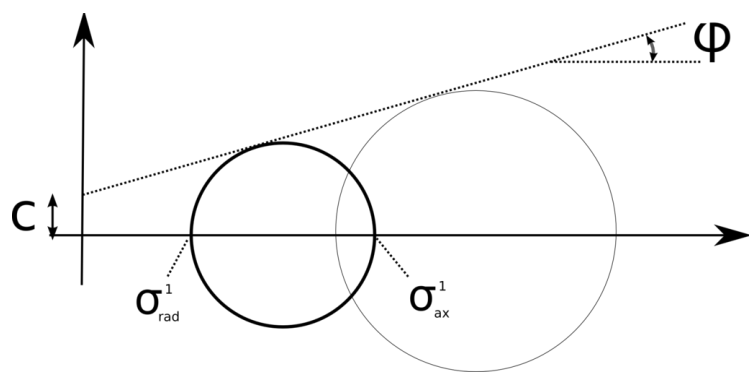
Bij het uitvoeren van de triaxiaalproef wordt het monster in een glazen of kunststof cel geplaatst, met daaromheen een rubber vlies (Verruijt en Broere 2011). Door het rubber vlies is het monster afgesloten. Vervolgens wordt de cel gevuld met water. Omdat het monster omringd wordt door water is de celdruk (σ_3) overal gelijk.

In Figuur Bijlage A 1 is het water aangegeven in het blauw. Het groene vlak representeert het monster. De druk van het water op het monster zorgt voor de celdruk σ_3 .



Figuur Bijlage A 1: Triaxiaalproef (Verruijt en Broere, 2011)

Vervolgens wordt er een verticale kracht op de het monster uitgeoefend. Bij het verhogen van de verticale kracht wordt de zakking worden gemeten. Meestal wordt de belasting verhoogd totdat het monster bezwijkt, met een vervorming van 5 tot 10 %. Deze verticale bezwijkbelasting is gekoppeld aan de verticale spanning. De maximale verticale spanning is een uitkomst van de test. Deze verticale spanning wordt samen met de horizontale spanning (veroorzaakt door de celdruk σ_3) op een spanningslijn gezet, zie Figuur Bijlage A 2. In dit figuur is de spanning van de celdruk aangegeven met σ_{rad}^1 . De verticale axiale bezwijkspanning is in dit figuur weergegeven met σ_{ax}^1 .



Figuur Bijlage A 2: Mohr-Coulomb cirkels

Rondom deze twee lijnen kan men een Mohr-Coulomb cirkel tekenen. Deze doorkruist beide spanningspunten en heeft het gemiddelde van de twee spanningspunten als middelpunt.

De cohesie en hoek van inwendige wrijving kunnen bepaald worden als er meerdere cirkels worden berekend (Verruijt en Broere 2011). Om verschillende cirkels te krijgen, zal de celdruk in het beginstadium van de proef moeten veranderen. Een verhoogde celdruk (horizontale spanning) resulteert in een grotere maximale verticale spanning. Hierdoor worden de cirkels met een hogere celdruk groter.

Als er meerdere cirkels bekend zijn kan er de raaklijn van de cirkels worden bepaald en getekend. De hellingshoek van deze raaklijn is de hoek van inwendige wrijving. Het punt waar de raaklijn de y-as snijdt is de cohesiewaarde [kN/m^2].

BIJLAGE B: VERKRIJGEN VAN SIMULATIES

Voor het verkrijgen van gecorreleerde parameterelden zijn correlatiematrices aangemaakt. Deze correlatiematrices zijn verkregen met behulp van Cholesky transformaties. De correlatiematrices worden vermenigvuldigd met getallen uit matrices met willekeurige normaal verdeelde getallen om gecorreleerde velden te krijgen.

Eerst is de een correlatievector uitgerekend in overeenstemming met onderstaande correlatiefunctie (Schweckendiek 2014). Deze formule bepaalt wat de afhankelijkheid is van opvolgende waarden van de huidige waarde, en bepaald hiermee de ruimtelijke fluctuatie.

$$\rho(x) = e^{-\left(\frac{x}{\delta_0}\right)^2}$$

In de formule is $\rho(x)$ een factor die de correlatie tussen twee punten aangeeft, gegeven een afstand x en een correlatieafstand δ_0 .

Wat volgt is een correlatievector, in geval van deze simulatie, voor de verticale fluctuatie 7 getallen bevat, die elk een meter representeren. De uitkomsten zijn weergegeven in Bijlage B Tabel 1. De correlatievector van de horizontale fluctuatie bevat 1000 getallen, vanwege inzichtelijkheid is hier de verticale fluctuatie behandeld.

Bijlage B Tabel 1

Afstand (m)	0	1	2	3	4	5	6
Afhankelijkheid	1	0.7788	0.3679	0.1054	0.0183	0.0019	0.00012341

Uit de tabel valt op te maken dat op 1 meter van het beginpunt, de waarde van de parameter voor 0.7788 afhankelijk is van de eerste random waarde. De afstand op de correlatielengte is gelijk aan $e^{-1} = 0.3679$. Dit is gelijk aan waarde van de derde kolom. Op twee meter afstand is de parameter dus voor 0.3679 afhankelijk van de oorspronkelijk waarde.

Deze vector wordt omgevormd tot een matrix waarbij de diagonaal steeds de waarde 1 heeft en de omliggende waarden gelijk afwijken als in de vector, zie Bijlage B Tabel 2. Over deze Bijlage B Tabel 2 wordt een Cholesky transformatie uitgevoerd. Een Cholesky transformatie maakt van de correlatiematrix (C) een matrix (U) waarvan de vermenigvuldiging met de inverse matrix (U') weer correlatiematrix (C) oplevert. In formulevorm: $U * U' = C$. Dit is met de functie 'chol' in MATLAB toegepast. Deze Cholesky transformatie is nodig om de correlatiematrix in de juiste vorm te krijgen. In Bijlage B Tabel 3 is het resultaat (U) weergegeven.

Bijlage B Tabel 2: Correlatiematrix

0	1	2	3	4	5	6
1	0.7788	0.3679	0.1054	0.0183	0.0019	1.0341 e-04
0.7788	1	0.7788	0.3679	0.1054	0.0183	0.0019
0.3679	0.7788	1	0.7788	0.3679	0.1054	0.0183
0.1054	0.3679	0.7788	1	0.7788	0.3679	0.1054
0.0183	0.1054	0.3679	0.7788	1	0.7788	0.3679
0.0019	0.0183	0.1054	0.3679	0.7788	1	0.7788
1.0341e-04	0.0019	0.0183	0.1054	0.3679	0.7788	1

Bijlage B Tabel 3: Cholesky transformatie van correlatiematrix

0	1	2	3	4	5	6
1	0.7788	0.3679	0.1054	0.0183	0.0019	1.0341e-04
0	0.6273	0.7848	0.4556	0.1453	0.0268	0.0029
0	0	0.4987	0.7669	0.4955	0.1677	0.0320
0	0	0	0.4396	0.7523	0.560	0.1808
0	0	0	0	0.4087	0.7426	0.5273
0	0	0	0	0	0.3916	0.7365
0	0	0	0	0	0	0.3817

Tabel 3 geeft de uitkomst van de Cholesky transformatie weer. Het eerste getal in kolom 0 is alleen afhankelijk van zichzelf. Dit zorgt ervoor dat de bovenste rij in de simulatie nog onafhankelijk van andere waarden is. De bovenste rijen van Bijlage B Tabel 4 en Bijlage B Tabel 5 zijn namelijk gelijk. De 2^e rij is daarentegen afhankelijk van zowel de eerste als de tweede waarde uit de random matrix, met respectievelijke factor 0.7788 en 0.6273 (zie Bijlage B Tabel 3, de 2^e kolom). Dit zorgt voor een waarde van $1.6288 * 0.7788 + 1.7142 * 0.6273 = 2.3438$ in de tweede rij, eerste kolom. Met deze factoren wordt de hele 2^e rij berekend. Voor andere rijen gelden andere factoren.

In Bijlage B Tabel 4 zijn fluctuaties al horizontaal toegepast. Hierdoor verschillen deze waarden niet veel van elkaar. Verticaal zijn de waarden nog wel ongecorrleerd. De uitkomst, Bijlage B Tabel 5, is de afwijking van een parameter t.o.v. het gemiddelde. Om het veld met gecorrleerde parameterwaarden te verkrijgen moet het gemiddelde er nog bij opgeteld worden.

Bijlage B Tabel 4: Willekeurige normaal verdeelde getallen

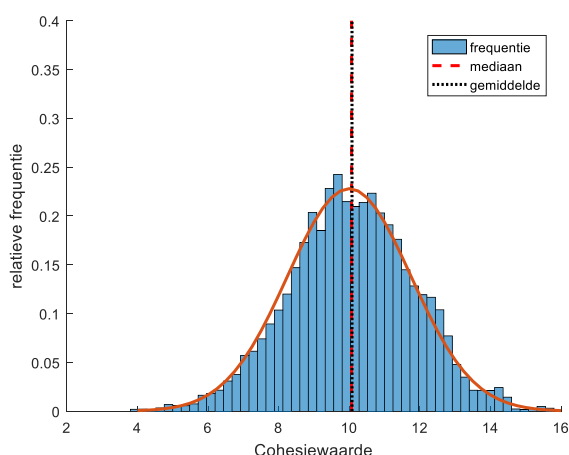
1	2	3	4	5	6	7	8
1.6288	1.6198	1.6107	1.6015	1.5922	1.5829	1.5735	1.5641
1.7142	1.7246	1.7340	1.724	1.7499	1.7563	1.7618	1.7664
-3.2314	-3.2251	-3.2174	-3.2084	-3.1981	-3.1865	-3.1736	-3.1594
-0.6374	-0.5583	-0.4796	-0.4013	-0.3236	-0.2465	-0.1700	-0.0942
2.3892	2.3824	2.3755	2.3686	2.3618	2.3549	2.3480	2.3411
-4.4999	-4.5069	-4.5134	-4.5195	-4.5252	-4.5305	-4.5354	-4.5399
-2.5731	-2.5045	-2.4372	-2.3711	-2.3062	-2.2427	-2.1804	-2.1195

Bijlage B Tabel 5: Veld met gecorrleerde afwijking van parameterwaarden

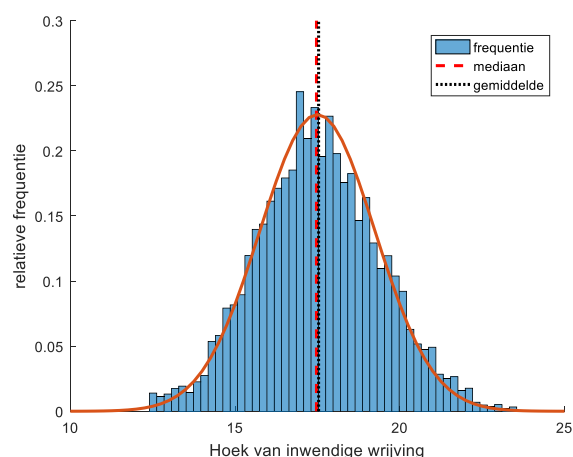
Horizontale/ verticale positie (m)	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.6288	1.6198	1.6107	1.6015	1.5922	1.5829	1.5735	1.5641
2	2.3438	2.3433	2.3421	2.3402	2.3377	2.3345	2.3306	2.3261
3	0.3330	0.3410	0.3488	0.3566	0.3641	0.3716	0.3789	0.3860
4	-1.8056	-1.7621	-1.1783	-1.6742	-1.6297	-1.5849	-1.5399	-1.4946
5	-0.8252	-0.7640	-0.7026	-0.6410	-0.5794	-0.5176	-0.4559	-0.3942
6	-0.8098	-0.7754	-0.7410	-0.7064	-0.6717	-0.6370	-0.6022	-0.5675
7	-3.2502	-3.2183	-3.1865	-3.1549	-3.1236	-3.0925	-3.0617	-3.0312

BIJLAGE C: STATISTISCHE GEGEVENS SIMULATIES

Om het effect van gelaagdheid te analyseren, zijn de statistieken van de simulaties, zie 3.2.3 *Simuleren van fluctuaties*, weergegeven. Eerst is de distributie van de fluctuerende parameters onderzocht. Dit zijn de parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving in de kleilaag van de dijk. Vervolgens is de verdeling van veiligheidsfactoren in de simulaties onderzocht.



Figuur 14: Distributie cohesiewaarden



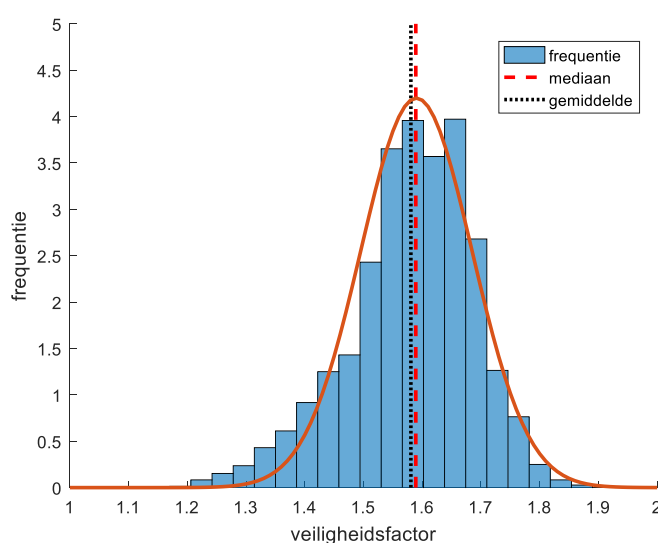
Figuur 15: Distributie hoek van inwendige wrijving

Zowel de parameters van cohesie en hoek van inwendige wrijving worden gesimuleerd conform de statistische verdelingen uit 3.2 *Fluctuatie parameters*. De resultaten in de veiligheidsfactoren zullen ook normaal gedistribueerd zijn, mits de volgende twee verbanden aanwezig zijn:

1. Tussen de parameterwaarden en de veiligheidsfactoren zit een lineair verband.
2. Het opdelen van de grond in zeven lagen heeft geen effect op de veiligheidsfactor

HOMOGENE KLEILAAG

De stabiliteitsberekening van de homogene kleidijk met als parametereigenschappen de verwachtingswaarden van cohesie van 10 [kN/m²] en hoek van inwendige wrijving van 17.5 [graden] levert een veiligheidsfactor van 1.59 op. Wanneer met de homogene de veiligheidsfactor met 2000 waarden uit bovenstaande distributies wordt uitgerekend ontstaat de distributie van stabiliteitsfactoren als weergegeven in Figuur 16. Het gemiddelde van de stabiliteitsberekeningen is 1.58, de mediaan heeft wel een waarde van 1.59. De distributie is in kleine mate rechtsscheef. De scheefheid, ook wel skewness genaamd, is berekend met de Pearson Coëfficiënt of Skewness en bedraagt -0.078.



Figuur 16: Distributie veiligheidsfactor met homogene kleilaag

$$\text{Scheefheid} = \frac{\text{Gemiddelde} - \text{Mediaan}}{\text{Standaardafwijking}}$$

De scheefheid ontstaat doordat een negatieve afwijking van de parameters een groter effect heeft op de veiligheidsfactor dan een positieve afwijking. Bij een afwijking van beide parameters van 1 maal de standaardafwijking leidt dit tot een veiligheidsfactor van 1.4 negatieve afwijking en 1.72 positieve afwijking. Hierbij is de negatieve afwijking een afwijking van 0.19 vanaf het gemiddelde. De positieve afwijking, waarbij beide parameters de verwachtingswaarde plus de standaardafwijking hebben, is 0.13. Tussen parameterwaarden en veiligheidsfactoren zit geen lineair verband.

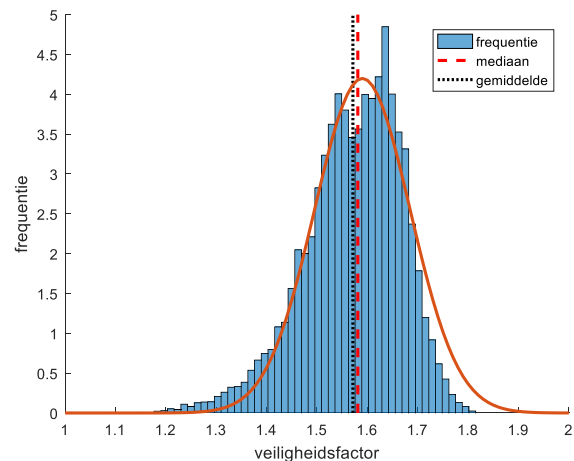
EFFECT GELAAGDE KLEILAAG

Voor het berekenen van een daadwerkelijke sterkte is het homogene kleistuk onderverdeeld in zeven verschillende lagen. Dit heeft ook een effect op de distributie van veiligheidsfactoren. Elk van de zeven lagen bestaat uit een gecorreleerde waarde uit het bovenstaande kans distributies. Dit leidt ertoe dat de gemiddelde veiligheidsfactor afneemt. Het kritische glijvlak volgt namelijk eerder zwakke lagen. Indien in een simulatie bepaalde lagen gunstige parametereigenschappen hebben en andere lagen ongunstige parametereigenschappen, zal het kritische glijvlak eerder door de lagen met ongunstige parametereigenschappen lopen. De relatief sterkte lagen hebben hierdoor maar een klein positief effect op de veiligheidsfactor.

Uit Figuur 17 valt op te maken dat door het opdelen in zeven verschillende lagen de gemiddelde veiligheidsfactor iets afneemt ten opzichte van de homogene distributie, Figuur 16. Het gemiddelde van de veiligheidsfactor van 30000 stabiliteitsberekening ligt op 1.57, de mediaan is 1.58. De scheefheid is nu -0.100 in plaats van -0.078. Er zijn aan de linkerkant van de distributie meer uitbijters dan aan de bovenkant. Deze extra uitbijters aan de linkerkant kunnen verklaard worden doordat voor een lage stabiliteitsfactor slechts enkele lagen ongunstige eigenschappen hoeven te hebben, terwijl voor een uitbijter aan de bovenkant alle lagen gunstige eigenschappen moeten hebben.

Juist de linkerkant van de distributie bepaalt vaak de referentiesterke van het dijktraject. Er ontstaan extra uitbijters aan de linkerkant van de distributie, veroorzaakt door de gelaagdheid. Aan de rechterkant zijn de uitbijters juist verminderd.

Dit neemt niet weg dat de kritische glijcirkel in een daadwerkelijke dijk ook de zwakke plekken in een grondlaag opzoekt. De homogene distributie van veiligheidsfactoren is daardoor naar verwachting minder kloppend dan de gelaagde veiligheidsfactordistributie. Vaak worden dijkdoorsneden in D Geo Stability ingevoerd met grote homogene grondlagen, met 1 of enkele grondsoorten. Het effect van zwakke plekken en heterogeniteit wordt gecompenseerd met een materiaalfactor.



Figuur 17: Distributie veiligheidsfactor heterogene kleilaag

De gelaagdheid heeft een licht negatief effect op de referentiesterke. Bij ongelaagde gronden zouden de referentiesterken iets hoger liggen. Indien het effect van gelaagdheid niet mee zou zijn meegenomen, (onzekerheid alleen voorkomend uit longitudinale verschillen) zou de bandbreedte van de accuraatheid, Figuur 12 a, naar beneden zakken, gezien de accuraatheid de karakteristieke (homogene) sterkte min de referentiesterke is. Een schatting van dit effect op de referentiesterke is 0.05.

BEGRIPPENLIJST

Accuraatheid van de toets – Verschil (absoluut of relatief) tussen de referentiesterkte en de berekende sterkte.

Berekende sterkte – Sterkte voortkomend uit puntenmetingen in het dijktraject

Bishop – Methode waarmee de stabiliteit van een dijkdoorsnede kan worden getoetst.

Cohesie – Aantrekkingskracht tussen gronddeeltjes, in kN/m^2

Correlatielengte – indicatie van de afstand waarover er correlatie is in de waarde van een parameter tussen twee punten

Daadwerkelijke sterkte – Zie referentiesterkte

D Geo Stability – Computersoftware dat aan de hand van een dwarsdoorsnede van de dijk een veiligheidsfactor kan uitrekenen.

Freatische lijn – Grondwaterspiegel in een dijkdoorsnede

Glijcirkel/Glijvlak – Het vlak waarvan een grondmoot in geval van macro-instabiliteit afschuift.

Gedetailleerde toets – Toetslaag in de macrostabiliteitsbeoordeling. Stabiliteit wordt met deze toets over het algemeen met behulp van een dijkdoorsnede en methode Bishop geanalyseerd.

Hoek van inwendige wrijving – Maat voor wrijving tussen gronddeeltjes, aangegeven in graden

Karakteristiek laaggemiddelde – Karakteristieke waarde van het gemiddelde van een laag.

Karakteristieke waarde – Waarde die naar waarschijnlijkheid volgens statistische analyse wordt overschreden (meestal 95%)

Macrostabiliteit – Faalmechanisme waarbij een grondmoot van de dijk afschuift langs een glijvlak.

Partiële factor – Factor die ten ongunste van geobserveerde of vereiste waarde werkt om conservatievere rekenwaarden te krijgen.

Referentiesterkte – De veiligheidsfactor van het zwakste punt in een gesimuleerd dijktraject, ook wel daadwerkelijk sterkte.

Schematiseringsfactor – Partiële factor gebruikt voor onzekerheden in de schematisering (laagopbouw, freatische lijn en geometrie)

Schuifsterkteparameters – De parameters die de schuifsterkte bepalen. In dit model is uit gegaan van het Mohr-Coulomb model met de parameters 'cohesie' en 'hoek van inwendige wrijving' voor de bepaling van de schuifsterkte.

Triaxiaalproef – Laboratoriumproef die gebruikt kan worden om de cohesie en hoek van inwendige wrijving van een grondmonster te bepalen.

Veiligheidsfactor – Resultaat van de macrostabiliteitsberekening. Grofweg gezegd het weerstandsmoment gedeeld door het aandrijvende moment

Volumiek gewicht – Gewicht van de grond per volume-eenheid. Standaard in kN/m^3