

**Modelonzekerheidsfactoren  
Spencer-Van der Meij model  
en ongedraineerde  
schuifsterkte**





# **Modelonzekerheidsfactoren Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte**

Programma WTI 2017, cluster Stabiliteit

Alexander van Duinen

1207808-001





## Titel

Modelonzekerheidsfactoren Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat, Dienst Water Verkeer en Leefomgeving	1207808-001	1207808-001-GEO-0006	43




## Trefwoorden

Schuifvlakmodel, Bishop, LiftVan, Spencer-Van der Meij, modelonzekerheidsfactoren, ongedraineerde schuifsterkte

## Samenvatting

Dit rapport gaat over de modelonzekerheidsfactor (gemiddelde, standaardafwijking) bij het analyseren van macrostabiliteit van dijken met de schuifvlakmodellen Spencer-Van der Meij en LiftVan met ongedraineerde schuifsterkte. Het schuifvlakmodel Spencer-van der Meij heeft een aantal specifieke kenmerken: (1) het volledige krachten- en momenten evenwicht wordt beschouwd, (2) het schuifvlak heeft een vrije vorm en (3) het genetisch zoekalgoritme is meestal sneller dan de zoekprocedure van de schuifvlakmethode LiftVan. In combinatie met ongedraineerde schuifsterkte parameters geeft het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel realistische stabiliteitsfactoren, waarmee zowel bezwijken van taluds als het doorstaan van hoog water situaties betrouwbaar kan worden geanalyseerd. Daarom is het Spencer-Van der Meij model geschikt voor het beoordelen van de binnenwaartse macrostabiliteit van dijken binnen het WTI 2017. Wanneer het Spencer-Van der Meij model een problematisch resultaat geeft bij het beoordelen van de binnenwaartse macrostabiliteit, moet dit resultaat kunnen worden gecontroleerd op basis van vergelijkende berekeningen met het model LiftVan. Het Spencer-Van der Meij model geeft soms druklijnen buiten het schuifvlak of soms vindt het model een grillig schuifvlak met een onregelmatige druklijn. Het berekeningsresultaat is dan onbetrouwbaar. Daarom wordt aanbevolen de macrostabiliteit van dijken te beoordelen met zowel het Spencer-Van der Meij model als het LiftVan-model. De modelonzekerheid voor de modellen Spencer-Van der Meij en LiftVan voor analyses met ongedraineerde schuifsterkte is 1,07. Deze waarde is iets groter dan de vigerende modelfactor, vanwege (1) het hogere betrouwbaarheidsniveau ( $\beta_{eis,dsn} = 4,8$  in plaats van  $\beta_{eis,dsn} = 4,3$  in de vigerende voorschriften), (2) het in rekening brengen van de onzekerheid door het automatisch positioneren van het zoekgebied en (3) de gekozen aanpak om de modelfactor te relateren aan empirische observaties, waardoor zowel de onzekerheid over het schuifvlakmodel als de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte in de modelfactor zijn verdisconteerd.

## Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
03	sept. 2015	Alexander van Duinen		Meindert Van		Leo Voogt	b/a Std 

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Schuifvlakmodel Spencer-van der Meij</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Berekeningen met Spencer-Van der Meij model</b>	<b>9</b>
3.1	Inleiding	9
3.2	Stowa CAOS onderzoek	9
3.3	Toetsing boezemkaden Waterschap Rivierenland	10
3.4	WTI cases	13
3.5	Optimalisatie automatische zoekprocedure	17
3.6	Samenvatting	20
<b>4</b>	<b>Modelonzekerheidsfactoren</b>	<b>23</b>
4.1	Inleiding	23
4.2	Technisch Rapport Macrostabiliteit	24
4.3	Veiligheid Nederland in Kaart	25
4.4	Literatuurreview	26
4.5	Samenvatting	29
<b>5</b>	<b>Modelonzekerheidsfactoren voor Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>41</b>



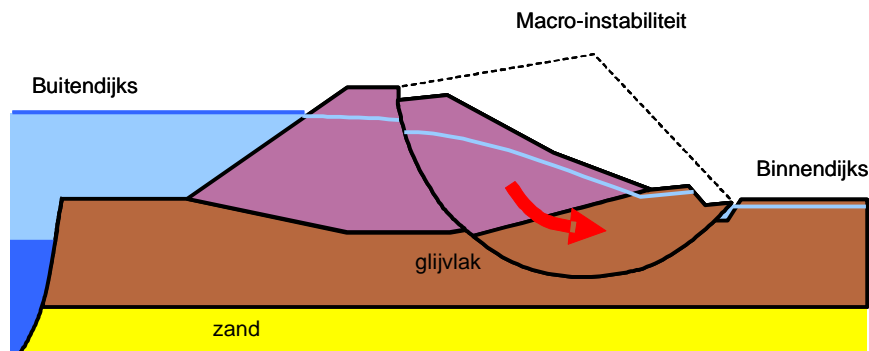


## 1 Inleiding

In het programma WTI 2017 wordt het wettelijk toetsinstrumentarium (WTI) voor de 4e toetsronde voorbereid. De 4e toetsronde start in 2017. Door een continue kennisontwikkeling is het toetsinstrumentarium in de loop van de jaren steeds completer en betrouwbaarder geworden. Ook voor het WTI van de vierde toetsronde (WTI 2017) wordt onderzoek verricht om kennisleemtes op te vullen en onzekerheden te reduceren.

Het WTI 2017 bouwt door op het WTI 2011. Met het nieuwe toetsinstrumentarium kan op basis van een overstromingskansnorm worden getoetst. Daarnaast wordt nieuwe kennis van het fysisch gedrag van watersystemen en faalmechanismen in het instrumentarium geïmplementeerd.

In het programma WTI 2017 wordt onder meer gewerkt aan een nieuwe toetsmethode voor het toetspoot macrostabiliteit. Macro-instabiliteit is een faalmechanisme dat de stabiliteit van een dijk of dam ernstig kan bedreigen. Als gevolg van een hoge (of juist lage) waterstand voor de waterkering of extreme neerslag (of juist droogte), in combinatie met andere belastingen, neemt de sterkte van de grond en de dijk af. Als de sterkte (ofwel de schuifweerstand van de grond) onvoldoende is, kunnen grote delen van het grondlichaam langs rechte en/of gebogen glijvlakken, afschuiven (zie Figuur 1.1). Dit zowel binnenwaarts als buitenwaarts, waarna de dijk of dam zijn waterkerende functie verliest.



Figuur 1.1 Macro-instabiliteit van een dijktalud.

In de eenvoudige toets (toetslaag 1) wordt met eenvoudige beslisregels getoetst of de kans op falen door macro-instabiliteit verwaarloosbaar klein is. De bestaande geometrische toets komt in het WTI 2017 te vervallen, omdat er twijfels zijn bij de onderbouwing hiervan. Hiervoor in de plaats komt een simpeler geometrische toets. Er zal vaker een gedetailleerde toets moeten worden uitgevoerd.

In de gedetailleerde toets op macrostabiliteit (toetslaag 2) wordt de macrostabiliteit met een glijvlakanalyse beoordeeld. In het WTI 2017 wordt voorgesteld de glijvlakanalyse op de volgende onderdelen te verbeteren:

- Nieuw materiaalmodel voor het karakteriseren van de schuifsterkte van grond, waarbij voor grondsoorten met een lage doorlatendheid, zoals klei en veen, wordt uitgegaan van ongedraineerd grondgedrag en voor grondsoorten met een hoge doorlatendheid, zoals zand, wordt uitgegaan van gedraineerd grondgedrag. Hiermee hangt samen dat de bepaling van schuifsterkteparameters in het veld en in het laboratorium op een andere manier moet worden uitgevoerd.
- Nieuw schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij. Dit is een schuifvlakmodel, waarmee een vrije schuifvlakvorm kan worden berekend en wat rekening houdt met de horizontale krachten tussen de lamellen. Het huidige LiftVan-schuifvlakmodel blijft beschikbaar op de achtergrond om controle-berekeningen uit te voeren.
- Verbetering van de schematisering van waterspanningen. Dit betreft uniformering van de schematisering van waterspanningen in de gedetailleerde toets en de ontwikkeling van een grondwaterstromingsmodel voor de toets op maat (toetslaag 3). Voor de gedetailleerde toets wordt nauw aangesloten bij de bestaande kennis uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. Het schematiseren van waterspanningen is complex. De voorgestelde verbeteringen moeten leiden tot meer eenduidigheid en betrouwbaarheid bij het schematiseren van de waterspanningen bij het toetsen van macrostabiliteit.

Naast de genoemde voorstellen voor verbetering van de toets op macrostabiliteit hebben uiteraard ook de algemene veranderingen in het WTI 2017, zoals de overstap op overstromingskansen, keuze voor nieuwe faalkansruimtefactoren, nieuwe partiële veiligheidsfactoren, nieuwe hydraulische randvoorwaarden en het stochastisch ondergrondmodel consequenties voor het toetsen van macrostabiliteit. Op deze punten wordt in het voorliggende rapport niet verder ingegaan. Deze punten worden in andere documenten toegelicht.

#### *Schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij en ongedraineerde schuifsterkte*

In de afgelopen jaren heeft het model Spencer, een schuifvlakmodel voor het berekenen van de macrostabiliteit van ophogingen en taluds een bewerking ondergaan. Het geoptimaliseerde model is hierna aangeduid met Spencer-Van der Meij. Een van de voordelen van het gebruik van dit geoptimaliseerde model is dat de vorm van het schuifvlak niet van tevoren is vastgelegd. Daarnaast wordt naast het momentenevenwicht en het verticaal evenwicht ook het horizontaal evenwicht beschouwd. Tevens heeft het model Spencer-van der Meij de mogelijkheid om met een automatisch gedefinieerd zoekgebied zonder verdere tussenkomst van de gebruiker het maatgevende schuifvlak te bepalen. Voor toepassing van het Spencer-Van der Meij model in Ringtoets / HydraRing dienen de kansverdeling van de modelonzekerheidsfactor (stochast) en de modelfactor bekend te zijn. De modelonzekerheidsfactor is een stochast die de onzekerheid over het schuifvlakmodel verdisconteert in een probabilistische stabiliteitsanalyse. De modelfactor is een partiële veiligheidsfactor die de onzekerheid over het schuifvlakmodel in een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse verdisconteert.

De huidige modelfactoren in het concept TR Macrostabiliteit (Rozing et al, 2013) en het TR Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012) gaan alleen over de onzekerheid van het schuifvlakmodel (uitgangspunten schuifvlakmodel en 3D-effect) en niet over de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. De door het VNK2-project toegepaste modelonzekerheidsfactoren betreffen zowel de onzekerheid over het schuifvlakmodel als de

onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. De modellering van de schuifsterkte heeft een onzekerheid, naast de onzekerheid over de schuifsterkte als gevolg van de geologische variabiliteit. In dit rapport wordt er van uit gegaan dat de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte ook in de modelonzekerheidsfactor moet worden verdisconteerd. Het schuifvlakmodel en de karakterisering van de schuifsterkte bepalen immers gezamenlijk de nauwkeurigheid waarmee een stabiliteitsanalyse de werkelijkheid beschrijft.

Dit rapport gaat over het bepalen van de kansverdeling van de modelonzekerheidsfactor (gemiddelde, standaardafwijking) en van de modelfactor van het schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij voor stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte. De kansverdeling van de modelonzekerheidsfactor is afgeleid uit stabiliteitsberekeningen van terug-analyses van overleefde hoge waterstanden (4 cases uit SBW onderzoek uit 2012) en van terug-analyses van bezweken en sterk gedeformeerde taluds (7 cases uit SBW validatiestudie uit 2010). Daarnaast zijn berekeningen uit andere projecten beschouwd. Voor de LiftVan- en Bishop- schuifvlakmodellen wordt dezelfde analyse uitgevoerd. Dit zorgt er voor dat de modelonzekerheidsfactoren voor de verschillende schuifvlakmodellen op dezelfde wijze zijn afgeleid en consistent zijn met elkaar. Tevens is een overzicht van de huidige in Nederland gebruikte modelonzekerheidsfactoren gegeven en is een beknopte literatuurreview uitgevoerd. Op basis van dit onderzoek zijn verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van de modelonzekerheidsfactoren van de Spencer- Bishop- en LiftVan-modellen afgeleid. De afleiding is deels kwalitatief en deels kwantitatief. In de afleiding is ook de onzekerheid als gevolg van de automatische zoekprocedure betrokken.

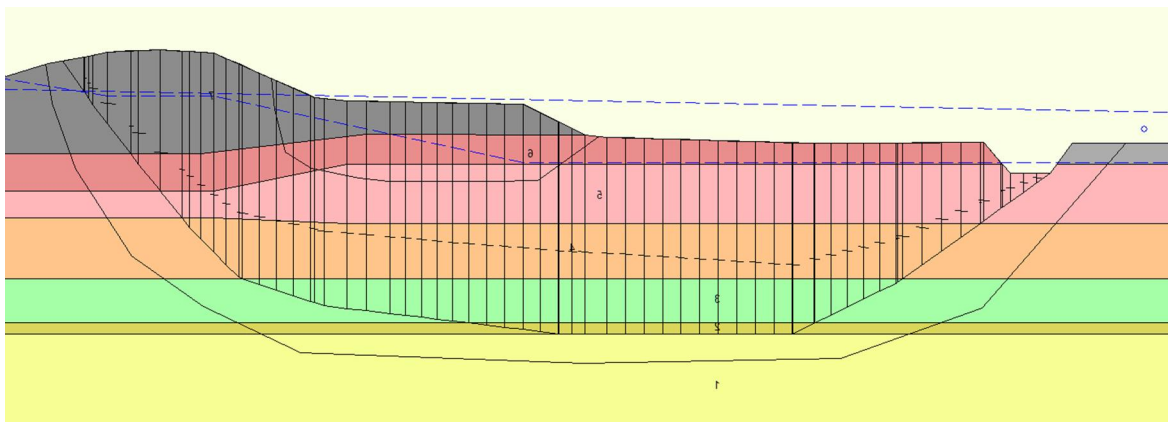
De modelfactoren in dit rapport zijn afgeleid ten behoeve van toepassing voor primaire waterkeringen binnen het WTI2017. Voor overige toepassingen (zoals ophoogfasering uitvoering, meerdijken/permanent waterkerende keringen) zijn mogelijk afwijkende modelfactoren nodig.



## 2 Schuifvlakmodel Spencer-van der Meij

Het schuifvlakmodel Spencer-van der Meij heeft een aantal specifieke kenmerken (Van der Meij, 2012):

- Horizontaal krachtenevenwicht tussen de lamellen wordt beschouwd;
- Het schuifvlak heeft een vrije vorm;
- Afsnuiten van grote schuifkrachten wordt niet toegepast;
- Het zoekalgoritme is meestal sneller dan dat van de schuifvlakmethode LiftVan.



Figuur 2.1 Berekend schuifvlak met Spencer-Van der Meij model.

Met het Spencer-model (Spencer, 1967) wordt een evenwichtsbeschouwing uitgevoerd, die naast het momentenevenwicht en het verticale krachten evenwicht ook de horizontale krachten op de lamellen binnen het schuifvlak in acht neemt. Bij de berekening van de horizontale krachten is de aanname dat deze interlamelkracht bij alle lamellen dezelfde hoek heeft. Bishop (1955) heeft aangetoond dat het bij hydrostatische waterspanningen en een homogene bodemopbouw gerechtvaardigd is alleen een cirkelvormig schuifvlak te beschouwen en het horizontale evenwicht te verwaarlozen. Bij stabiliteitsberekeningen voor waterkeringen wordt vrijwel nooit aan deze voorwaarden voldaan. De invloed van de horizontale krachten kan resulteren in een hogere of lagere evenwichtsfactor bij het Spencer model ten opzichte van het Bishop model. Dit is afhankelijk van de richting van de afwijking van het krachtenevenwicht dat niet door het Bishop model wordt beschouwd. In het LiftVan schuifvlakmodel is de aanname voor de lamelkrachten gelijk aan die van de methode Bishop, maar bij het LiftVan model wordt wel voldaan aan het horizontaal krachtenevenwicht van de drie hoofdonderdelen van het schuifvlak: het horizontale middenstuk en de actieve en passieve cirkelvormige delen. Bij een LiftVan-berekening worden de horizontale krachten als gevolg van de waterdrukken die op het horizontale middenstuk van het schuifvlak werken (d.w.z. aan het eind van het actieve cirkeldeel en aan het begin van het passieve cirkeldeel) niet in rekening gebracht, maar deze krachten worden wel in rekening gebracht bij de berekening van het momentenevenwicht (D-Geo Stability versie 10.1.3.2). Dit heeft een invloed op de berekende veiligheidsfactor. Dit is alleen het geval als de waterspanningen langs de horizontale drukstaaf niet constant zijn (ofwel wanneer de stijghoogten (PL-lijnen) aan het begin en einde van de drukstaaf niet gelijk zijn). Wanneer LiftVan op dit punt wordt aangepast, zullen de resultaten van het LiftVan-model en het Spencer-Van der Meij-model dichter bij elkaar komen te liggen.

De krachten tussen de lamellen binnen het schuifvlak werken bij het Spencer-model voor het hele schuifvlak allemaal onder dezelfde hoek. Deze werkwijze is in overeenstemming met het

oorspronkelijke Spencer-model (Spencer, 1967). Vanuit de mechanica is deze werkwijze een beperking. Deze hoek zou voor iedere lamel de hoek van de druklijn moeten zijn. Het is niet bekend hoe groot het effect hiervan is op de uitkomst van de schuifvlakberekening. Daarnaast vindt Spencer een enigszins hoekig schuifvlak. Een cirkelvormig schuifvlak past kinematisch beter dan een schuifvlak met scherpe hoeken. De mate van hoekigheid van het met Spencer gevonden schuifvlak hangt ook af van het aantal punten waarmee het zoekgebied wordt gedefinieerd. Eigenlijk zou een eindige elementensom de vorm van een dergelijk glijvlak moeten bevestigen.

Het Spencer-Van der Meij model werkt met een vrije schuifvlakvorm. Waar bij het Bishop- en LiftVan-model een middelpuntengrid en raaklijnen worden gebruikt om alle mogelijke glijcirkels te analyseren, wordt bij de Spencer methode alleen een zoekruimte gedefinieerd. Een Genetisch Algoritme (GA) vindt binnen deze ruimte de weg van de minste weerstand. Voor wat de vorm van het schuifvlak betreft zal Spencer met het genetisch algoritme altijd een maatgevender glijvlak vinden dan Bishop (en Lift-Van). Door de verschillende aannames in de verschillende modellen hoeft een maatgevender schuifvlak niet altijd te resulteren in een lagere evenwichtsfactor. Ook de definitie van het zoekgebied speelt hierbij weer een rol (zowel het aantal punten van het zoekgebied als de ligging van de punten).

Bij het Spencer-Van der Meij model gebeurt het in sommige gevallen dat de methodiek geen goed representatief schuifvlak vindt (Van der Meij et al, 2013). Het is ook mogelijk dat het zoekalgoritme een grillig schuifvlak vindt met een onregelmatige druklijn (Rozing et al, 2013). Dit doet zich soms voor als gevolg van de geometrie van de ophoging. Omdat de methode altijd de laagste evenwichtsfactor zoekt, bestaat de kans dat een irreëel schuifvlak gevonden wordt met een wiskundig erg lage evenwichtsfactor. De gebruiker kan dit deels bijstellen door minder goed te zoeken, bijvoorbeeld door het zoekgebied aan te passen of met minder punten langs het schuifvlak of door minder lang te zoeken. Wanneer dit geen soelaas biedt, moet worden uitgegaan van de resultaten van het Bishop of Lift-Van model. Uit Taccari (2014) volgt dat circa 5% van de Spencer-Van der Meij berekeningen geen resultaat geeft.

Het Spencer-Van der Meij model stelt geen eisen aan de druklijn in het afschuivende grondlichaam (Rozing et al, 2013). Het is daardoor mogelijk dat de methode een maatgevende oplossing vindt, waarbij de druklijn buiten het schuifvlak ligt. Dit is uiteraard niet juist. In deze gevallen moet kritisch naar de oplossing gekeken worden. Bovenin het schuifvlak kan de druk negatief worden (trek). Op de overgang tussen druk en trek ontstaat vaak een asymptoot in de druklijn. Omdat de krachten hier heel klein zijn, heeft een dergelijke asymptoot meestal nauwelijks invloed op de veiligheidsfactor.

Bij het Spencer-model wordt afsnuiten van grote schuifkrachten niet toegepast. Bij de modellen Bishop en LiftVan wordt wel afgesnoten. Afsnuiten duidt op het begrenzen van de maximale schuifkracht aan de onderzijde van een lamel wanneer deze steil uittreedt. Onrealistisch grote krachten worden berekend wanneer de onderzijde van een lamel een grotere hoek heeft dan  $\varphi / 2 - 45^\circ$ . De schuifkracht kan bij Bishop en LiftVan terecht niet groter worden dan dit maximum. Omdat Spencer het schuifvlak nooit verplicht om steil uit te treden, hoeft ook niet te worden afgesnoten. Vaak vindt Spencer vanuit een diepere laag een passieve wig naar het maaiveld in plaats van een cirkelvorm. Het niet afsnuiten zorgt ervoor dat de veiligheidsfactor volgens Spencer soms hoger kan zijn dan bij Bishop en LiftVan. Bij stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte wordt niet afgesnoten.

Het Spencer-Van der Meij model rekent met het genetisch zoekalgoritme sneller dan LiftVan met middelpuntengrids en raaklijnen. Het genetisch algoritme blijkt een snel en accuraat zoekalgoritme te zijn. De precisie van het resultaat wordt groter naarmate er langer gezocht wordt. Binnen 10 seconden levert het algoritme een resultaat met maximaal een paar procent afwijking. Naar mate langer wordt gezocht, zal het antwoord meer precisie krijgen. De

ervaring leert dat het uitvoeren van een Spencer analyse met de standaard instellingen van D-Geo Stability wat langer duurt dan een standaard Bishop-analyse, maar minder lang dan een LiftVan-analyse (factor twee tot meer dan tien bij automatisch zoeken met een groot zoekgebied volgens Taccari, 2014).

Tenslotte wordt opgemerkt dat er in de huidige Nederlandse adviespraktijk nog weinig ervaring is met zowel de schuifvlakmethode Spencer als het genetisch zoekalgoritme voor het zoeken van het maatgevende schuifvlak in de methode Spencer-Van der Meij. Met de methoden Bishop en LiftVan is veel meer ervaring opgedaan. In RingToets (WTI 2017) wordt het zoekgebied voor de glijvlakberekeningen automatisch geplaatst op basis van de geometrie van de waterkering en worden de berekeningen automatisch uitgevoerd.





### 3 Berekeningen met Spencer-Van der Meij model

#### 3.1 Inleiding

In diverse projecten is ervaring opgedaan met berekeningen met het schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij. Het betreft zowel berekeningen met de traditionele gedraineerde schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving als berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte. Deze ervaringen geven inzicht hoe de verschillende schuifvlakmodellen zich tot elkaar verhouden en welke aandachtspunten er zijn.

Van der Meij (2012) presenteert enkele voorbeelden van vergelijkende stabiliteitsberekeningen met de modellen Bishop, LiftVan en Spencer-Van der Meij. Uit deze berekeningen volgt dat de berekende stabiliteitsfactoren volgens het Spencer-Van der Meij model gelijk zijn aan of lager zijn dan volgens het Bishop-model. Met het LiftVan-model, inclusief modelfactor van 1,05, zijn de berekende stabiliteitsfactoren lager dan met het Spencer-Van der Meij model. Op basis van de vergelijkende berekeningen en een kwalitatieve beschouwing van de kenmerken van de genoemde schuifvlakmodellen stelt Van der Meij (2012) een modelfactor van 1,0 voor het Spencer-Van der Meij model voor.

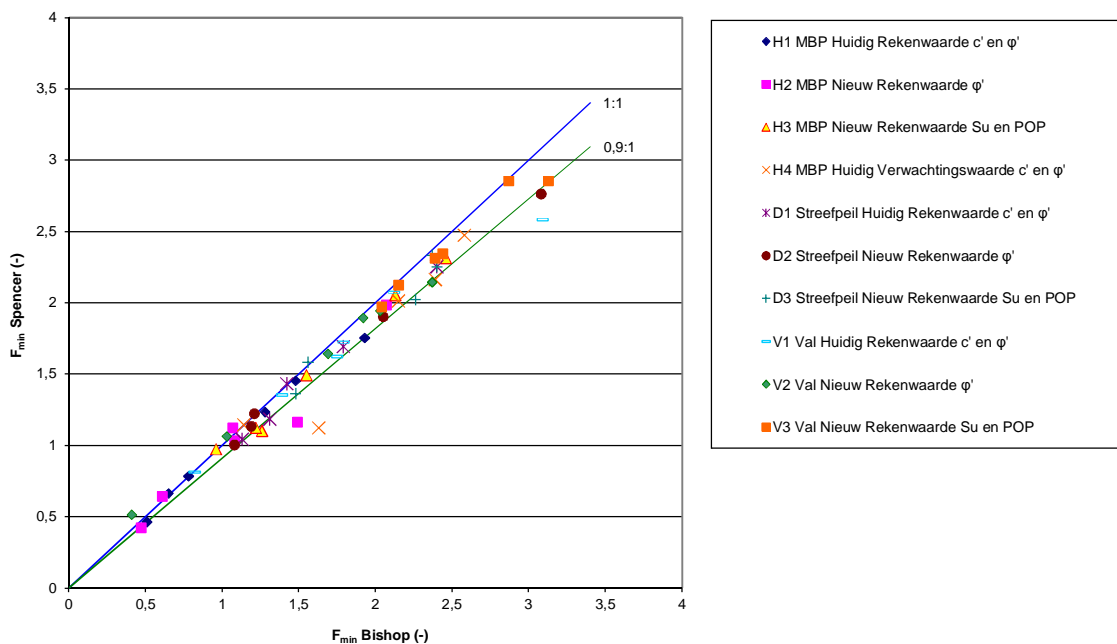
#### 3.2 Stowa CAOS onderzoek

Binnen het Stowa CAOS project zijn ook vergelijkende stabiliteitsberekeningen met de modellen Bishop en Spencer-Van der Meij uitgevoerd (Van Duinen et al, 2013). Stowa onderzoekt de consequenties van het toepassen van de ongedraineerde schuifsterkte van klei en veen in macrostabiliteitsanalyses voor boezemkaden. Hiervoor zijn door zes waterschappen case-studies gedaan. De uitwerking van de cases is verzorgd door de betrokken waterschappen, met ondersteuning van diverse ingenieursbureaus. Deltares heeft het onderzoek begeleid.

Aanleiding voor dit Stowa-onderzoek vormt het onderzoek in het kader van het WTI 2017 onderzoeksprogramma naar de nieuwe methode voor het toetsen van macrostabiliteit van primaire waterkeringen. Ten opzichte van primaire keringen is bij boezemkaden vaak sprake van betrekkelijk lage effectieve spanningen. Vanwege dit verschil zijn de consequenties van het toepassen van deze nieuwe toetsmethode voor macrostabiliteit specifiek voor boezemkaden door Stowa onderzocht.

Voor verschillende belasting scenario's, die voor boezemkaden relevant zijn, zijn zowel stabiliteitsberekeningen volgens de nieuwe toetsmethode uitgevoerd als berekeningen volgens de vigerende werkwijze. De stabiliteitsberekeningen volgens de nieuwe toetsmethode zijn zowel met effectieve schuifsterkte parameters (hoek van inwendige wrijving  $\phi'$  bij bezwijken) als met ongedraineerde schuifsterkte parameters (su-ratio bij bezwijken en pre overburden pressure POP) uitgevoerd. De berekeningen volgens de vigerende werkwijze zijn gebaseerd op de bij de waterschappen beschikbare proevenverzamelingen met cohesie en hoek van inwendige wrijving, die volgens de vigerende leidraden en technische rapporten zijn opgesteld. De schuifvlakberekeningen zijn uitgevoerd met het Bishop schuifvlakmodel en het schuifvlakmodel Spencer-Van der Meij.

Bij de onderzochte cases zijn geen situaties met opdrukken (opdrijven of opbarsten).



Figuur 3.1 Vergelijking van de evenwichtsfactoren van de stabiliteitsberekeningen van de CAOS studie (MBP is maatgevend boezempeil en Val is buitenwaartse stabiliteit bij val van de boezemwaterstand na maatgevend boezempeil).

In Figuur 3.1 zijn de berekende evenwichtsfactoren van de vergelijkende stabiliteitsberekeningen van de CAOS studie gepresenteerd. Met de symbolen in de figuur is het onderscheid tussen de verschillende belastingsscenario's en de verschillende karakterisering van de schuifsterkte weergegeven. De afwijking van de stabiliteitsfactoren tussen het Spencer-Van der Meij model en het Bishop-model kan oplopen tot 10 a 15%. De verhouding tussen de evenwichtsfactoren volgens Bishop en volgens Spencer is gemiddeld 1:0,956 met een standaardafwijking van 0,082. De evenwichtsfactor bij Spencer-Van der Meij is gemiddeld een factor 1,046 lager dan bij Bishop. Hierbij blijkt er geen verschil te zijn tussen de verschillende belastingsscenario's en de verschillende karakterisering van de schuifsterkte.

Bij de berekeningen van de buitenwaartse macrostabiliteit bij val van de boezemwaterstand na maatgevend boezempeil zijn in dit onderzoek met het Spencer-Van der Meij model soms schuifvlakken met een grillige vorm berekend. Aanbevolen wordt om voor de buitenwaartse macrostabiliteit het Bishop-model of eventueel LiftVan-model te handhaven.

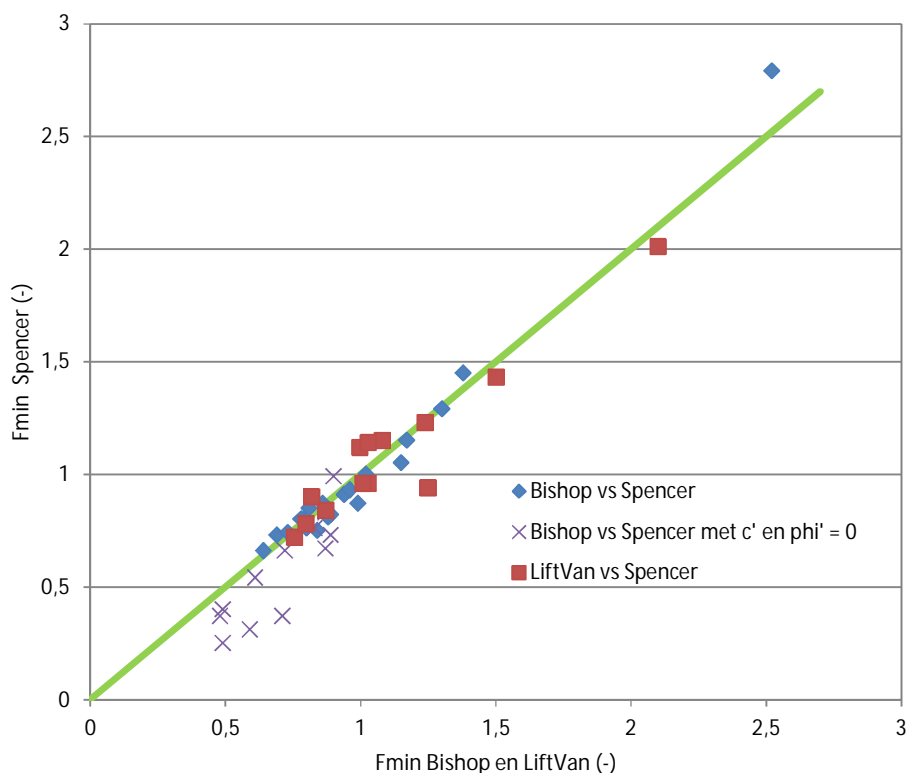
### 3.3 Toetsing boezemkaden Waterschap Rivierenland

Arcadis (Bijlsma et al, 2013) heeft in opdracht van Waterschap Rivierenland vergelijkende stabiliteitsberekeningen uitgevoerd met de schuifvlakmodellen Bishop, LiftVan en Spencer-Van der Meij. In het kader van het project "Verlengde toetsronde boezemkades Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden" van Waterschap Rivierenland zijn ruim 200 dwarsprofielen getoetst op macrostabiliteit van het binnentalud. Hierbij is gebruik gemaakt van D-Geo Stability met de rekenmodellen Bishop en LiftVan. De schuifsterkte is gekarakteriseerd met een proevenverzameling met  $c'$  en  $\phi'$  waarden.

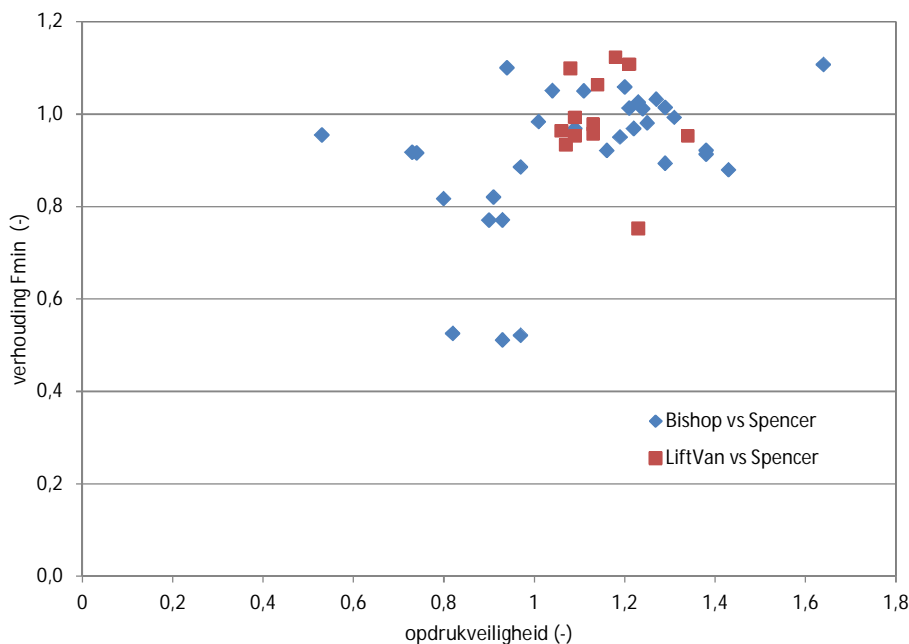
Met het doel een bijdrage te leveren aan de actuele ontwikkelingen rond het toetsinstrumentarium, is een aantal dwarsprofielen eveneens met het Spencer-Van der Meij model getoetst, zodat de resultaten met eerdergenoemde modellen kunnen worden

vergeleken. Voor de berekening met Spencer zijn in totaal 52 dwarsprofielen geselecteerd. Hierbij is gekozen voor een evenwichtige verdeling van sommen met betrekking tot:

- Stabiliteitsfactor volgens Bishop/LiftVan – variërend van zeer laag ( $F_{\min} = 0,30$ ) tot zeer hoog ( $F_{\min} = 2,52$ );
- Opdrukveiligheid – opbarsten met model Bishop met sterktereductie ( $c'$  en  $\varphi' = 0$ ) ( $<1,00$ ), opdrijven met model LiftVan ( $1,00-1,20$ ) of geen van beide met model Bishop ( $>1,20$ );
- Bodemopbouw – dikte en samenstelling van het afdekkend pakket, aanwezigheid van zandtussenschichten en verschil in opbouw onder/naast de kade.



Figuur 3.2 Vergelijking van de evenwichtsfactoren van de stabiliteitsberekeningen van de Arcadis studie.



**Figuur 3.3** Verhouding van de berekende evenwichtsfactoren van de vergelijkende stabiliteitsberekeningen van de Arcadis studie uitgezet tegen de opdrukveiligheid.

In de Figuren 3.2 en 3.3 zijn resultaten van de Arcadis studie weergegeven. Enkele berekeningen uit deze studie zijn niet getoond in de figuren, omdat het niet representatieve schuifvlakken bij slootkanten betreft of omdat de berekende schuifvlakken te veel zijn beïnvloed door de keuze van de middelpuntengrids en raaklijnen bij Bishop en LiftVan en de zoekgebieden bij Spencer. In Figuur 3.2 worden de berekende evenwichtsfactoren van de vergelijkende stabiliteitsberekeningen van de Arcadis studie getoond. De evenwichtsfactoren volgens het LiftVan-model zijn exclusief de vigerende modelfactor van 1,05. In Figuur 3.3 is de verhouding van de berekende evenwichtsfactoren van de vergelijkende stabiliteitsberekeningen van de Arcadis studie uitgezet tegen de opdrukveiligheid. In Figuur 3.2 liggen de evenwichtsfactoren van de drie beschouwde schuifvlakmodellen gemiddeld genomen dicht bij elkaar. Opvallend zijn de lage evenwichtsfactoren van de Spencer berekeningen met opbarsten (met sterkte reductie;  $c' = 0$  en  $\phi' = 0$ ). In Figuur 3.3 blijkt dat de evenwichtsfactoren sterk van elkaar afwijken bij een opdrukveiligheid kleiner dan 1,0. Bij situaties met opbarsten is de vorm van de berekende schuifvlakken vaak erg grillig. Daarbij blijkt de berekende evenwichtsfactor erg gevoelig voor relatief kleine aanpassingen aan het zoekgebied. Het genetisch algoritme is in dergelijke situaties niet in staat een goede oplossing te vinden.

	<b>Bishop versus Spencer</b>	<b>Bishop versus Spencer met <math>c' = 0</math> en <math>\phi' = 0</math></b>	<b>LiftVan versus Spencer</b>
Gemiddeld	1:0,986	1:0,792	1:0,987
Standaardafwijking	0,061	0,188	0,101

**Tabel 3.1** Onderlinge verhouding van de berekende evenwichtsfactoren in het Arcadis-onderzoek (Bijlsma et al, 2013).

In Tabel 3.1 is aangegeven hoe de berekende evenwichtsfactoren van de drie schuifvlakmodellen zich ten opzichte van elkaar verhouden. De evenwichtsfactor bij Spencer is gemiddeld een factor 1,014 lager dan bij Bishop. Dit resultaat sluit aan bij de bevindingen

van de CAOS studie van Stowa. Het Spencer-model berekent een stabiliteitsfactor, die gemiddeld een factor 1,013 lager is dan die van het LiftVan-model (zonder de vigerende modelfactor van 1,05).

Wanneer geen sprake is van opbarsten van het achterland zijn de evenwichtsfactoren volgens Bishop, LiftVan en Spencer gemiddeld vrijwel aan elkaar gelijk. Dat neemt niet weg dat in sommige cases de verschillen in de berekende evenwichtsfactoren procentueel soms aanzienlijk zijn. Anderzijds zorgen kleine veranderingen in de keuze van de middelpuntengrids en raaklijnen bij Bishop en LiftVan en de zoekgebieden bij Spencer bij kleine kades met kleine schuifvlakken soms voor relatief grote verschillen in berekende evenwichtsfactoren, doordat een kleine verschuiving in de ligging van een schuifvlak de evenwichtsfactor flink kan doen veranderen.

Bij opbarsten van het achterland (met sterkte reductie;  $c'$  en  $\varphi' = 0$ ) wijken de evenwichtsfactoren volgens Spencer en Bishop aanzienlijk van elkaar af (gemiddeld 20% en maximaal 50%). LiftVan is niet toegepast bij situaties met opbarsten. Wanneer er geen schuifsterkte is bij de binnenteen van een kade of onder een sloot wordt het evenwicht van de afschuivende grondmoot volgens het Spencer model ongunstiger. Dit resulteert in een lagere stabiliteitsfactor bij Spencer ten opzichte van Bishop. Dit is met name het geval als de stabiliteitsfactor toch al laag is bij het Bishop-model (zie Figuur 3.2).

### 3.4 WTI cases

In het kader van dit onderzoek naar de kansverdeling van de modelonzekerheidsfactor van het model Spencer-Van der Meij zijn eveneens vergelijkende berekeningen uitgevoerd met de schuifvlakmodellen Bishop, LiftVan en Spencer. Hierbij is uitgegaan van bestaande stabiliteitsberekeningen uit eerdere WTI-onderzoeken. Dit betreft:

- stabiliteitsberekeningen van terug-analyses voor 7 cases van bezweken en sterk gedeformeerde taluds (Van Duinen, 2010);
- stabiliteitsberekeningen van terug-analyses voor 4 cases van overleefde hoge waterstanden (Van Duinen, 2013).

In de genoemde onderzoeken zijn de stabiliteitsberekeningen uitgevoerd met het LiftVan-model. De schuifsterkte in deze berekeningen is gekarakteriseerd met gedraineerde schuifsterkte op basis van celproeven (spanningsafhankelijke sigma tau relaties ofwel stress tables) en met ongedraineerde schuifsterkte parameters ( $s_u$ ). Het gaat om verwachtingswaarden van de schuifsterkte parameters. Voor de stabiliteitsanalyse van deze cases is lokaal onderzoek uitgevoerd, op basis waarvan de schuifsterkte parameters zijn bepaald. De verwachtingswaarden van de schuifsterkte parameters geven daarom een goede schatting van de lokaal aanwezige schuifsterkte. Enkele belangrijke uitgangspunten bij de schuifsterkte parameters zijn:

- Ongedraineerd gedrag voor klei en veen, omdat afschuiving snel optreedt in relatie tot consolidatie van de grond (uitzondering casus Heinoomsvaart, waar sprake was van langzame deformatie gedurende enkele jaren);
- Schuifsterkte parameters  $\varphi'$  en su-ratio voor klei uit anisotroop geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproeven;
- Schuifsterkte parameters  $\varphi'$  en su-ratio voor veen uit direct simple shear proeven;
- Schuifsterkte bij critical state of ultimate state, omdat dan de schuifsterkte langs het hele schuifvlak gemobiliseerd wordt en schuifsterkte-ratio langs actieve en passieve deel van schuifvlak gelijk zijn.

In dit onderzoek zijn op basis van de bestaande berekeningen herberekeningen uitgevoerd met de modellen van Bishop en Spencer-Van der Meij. De berekende stabiliteitsfactoren zijn weergegeven in Tabel 3.2.

Case	Schuifsterkte uit celproeven			Ongedraineerde schuifsterkte		
	Bishop	LiftVan	Spencer	Bishop	LiftVan	Spencer
<i>Cases met opgetreden afschuivingen</i>						
Wolpherensedijk 1980	1,08	1,04	0,84	1,01	0,99	0,93
Streefkerk 1984	1,38	1,28	1,14	1,08	1,01	0,90
Zuiderlingedijk	0,93	0,93 (1,11)	0,73	0,92	0,92	0,87
IJkdijk proef	--	--	--	0,68	0,67	0,66
Bergambacht proef	0,41	0,37	0,32	0,78	0,76	0,74 (0,79)
<i>Cases met overleefde waterstanden</i>						
Markermeerdijk 1928	1,23	1,22	0,92	1,01	1,00	1,03 (1,06)
Lekdijk Nieuw-Lekkerland 1953	1,44	1,43 (1,58)	1,20	1,04	1,04	1,02
Lekdijk west 1995	1,29	1,27	1,30	1,10	1,05	1,07
Wolpherensedijk 1995	1,56	1,64	1,23	1,09	1,11	1,10
Bergambacht 1995	1,56	1,54	1,16	1,26	1,24	1,23
Heinoomsvaart	1,98	2,19	1,19	1,27	1,28	1,31

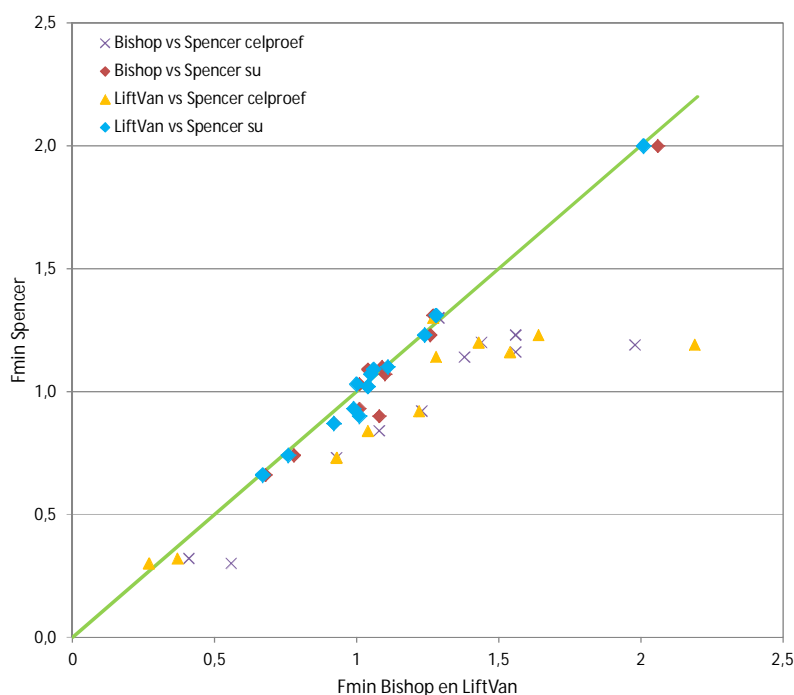
Tabel 3.2 Berekende evenwichtsfactoren van de terug-analyses uit de WTI-studies. De waarden tussen haakjes zijn gevonden met een iets ander zoekgebied. Voor het LiftVan-model zijn de evenwichtsfactoren exclusief de vigerende modelfactor van 1,05. Bij de locaties Lekdijk west en Heinoomsvaart is deformatie waargenomen.

In deze cases gaat het zowel om situaties met opdrukken als situaties zonder opdrukken (IJkdijk en Zuiderlingedijk).

Voor de IJkdijk proef is met het Spencer-van der Meij model een schuifvlak uitgerekend, waarvan de druklijn buiten het schuifvlak ligt. Dit is mogelijk veroorzaakt door het steile talud en het relatief kleine schuifvlak. De berekende stabiliteitsfactor is echter vrijwel gelijk aan die van het Bishop- en LiftVan-model. Voor de andere cases zijn met het Spencer-van der Meij model geen problematische uitkomsten geconstateerd.

Enkele analyses met het Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte voor de cases Bergambacht proef en Markermeerdijk zijn enkele malen herhaald met verschillend gedefinieerde zoekgebieden. Door de verdeling van de punten van de grenzen van het zoekgebied iets te verschuiven blijkt een verandering in stabiliteitsfactor van 0,03 tot 0,05 mogelijk te zijn. Hierbij is de ligging van het zoekgebied niet wezenlijk veranderd en is het aantal punten van de grenzen van het zoekgebied constant gehouden. Voor de cases Zuiderlingedijk en Nieuw-Lekkerland is hetzelfde gedaan met de middelpuntengrids en raaklijnen. Ook dit heeft een groot effect op de berekende evenwichtsfactoren. Door deze aanpassingen verhouden de resultaten van de drie schuifvlakmodellen zich logischer ten opzichte van elkaar.





**Figuur 3.4** Vergelijking van de stabiliteitsfactoren van de terug-analyses uit de WTI-studies. De gepresenteerde stabiliteitsfactoren van het LiftVan model zijn exclusief de vigerende modelfactor van 1,05.

Figuur 3.4 toont de berekende stabiliteitsfactoren van de terug-analyses uit de beide WTI-studies. De gepresenteerde stabiliteitsfactoren van het LiftVan-model zijn exclusief de vigerende modelfactor van 1,05. Gemiddeld genomen zijn de berekende evenwichtsfactoren van de drie beschouwde schuifvlakmodellen met de ongedraineerde schuifsterkte vrijwel gelijk. Uitgaande van de schuifsterkte op basis van celproeven zijn er aanzienlijke verschillen tussen Bishop en LiftVan enerzijds en Spencer anderzijds.

	Bishop versus LiftVan Celproef met stress tables	Bishop versus LiftVan su	Bishop versus Spencer Celproef met stress tables	Bishop versus Spencer $s_u$	LiftVan versus Spencer Celproef met stress tables	LiftVan versus Spencer $s_u$
Gemiddeld	1:0,940	1:0,984	1:0,768	1:0,965	1:0,837	1:0,981
Standaard-afwijking	0,163	0,023	0,122	0,052	0,150	0,040

**Tabel 3.3** Onderlinge verhouding van de berekende evenwichtsfactoren van de terug-analyses uit de WTI-studies. Hierbij is voor het LiftVan-model de modelfactor van 1,05 niet meegenomen.

In Tabel 3.3 is aangegeven hoe de stabiliteitsfactoren volgens de modellen van Bishop, LiftVan en Spencer-Van der Meij zich ten opzichte van elkaar verhouden. Hierbij is voor het LiftVan-model de vigerende modelfactor van 1,05 buiten beschouwing gelaten. De stabiliteitsfactor bij Spencer is gemiddeld een factor 1,036 lager dan bij Bishop bij berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte ( $s_u$ ). Dit resultaat is in lijn met de CAOS studie van Stowa en sluit goed aan bij het Arcadis onderzoek voor boezemkaden. Met het

Spencer-model zijn stabiliteitsfactoren berekend, die gemiddeld een factor 1,019 lager zijn dan die volgens het LiftVan-model (exclusief modelfactor 1,05) bij berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte. Dit resultaat is in lijn met het Arcadis onderzoek voor boezemkaden. Opmerkelijk hierbij is dat het verschil tussen Spencer-Van der Meij en LiftVan 1,02 tot 1,12 bedraagt voor de cases waar een taludinstabiliteit is opgetreden en het verschil is 0,97 tot 1,02 voor de cases waar een hoogwater is overleefd. Tussen Bishop en Spencer-Van der Meij zijn er soortgelijke verschillen. Bij de vergelijking van de Bishop- en LiftVan-resultaten zijn er geen opvallende verschillen tussen de cases met bezweken taluds en de cases met overleefde hoogwaters. Met het LiftVan-model worden gemiddeld een factor 1,016 lagere evenwichtsfactoren berekend dan met het Bishop model, uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte.

Bij de berekeningen met celproeven zijn de verschillen tussen de evenwichtsfactoren van de drie schuifvlakmodellen groter. Het verschil tussen Bishop en Spencer bedraagt gemiddeld 1,30. Bij de stabiliteitsberekeningen met schuifsterkte op basis van celproeven zijn de zogenaamde spanningsafhankelijke sigma tau relaties (stress tables) toegepast. Bij toepassing hiervan is de evenwichtsfactor volgens het Spencer-model opmerkelijk lager dan bij Bishop en LiftVan. Enkele testberekeningen waarbij ongedraineerde schuifsterkte parameters (su-ratio en POP) zijn omgerekend naar spanningsafhankelijke sigma tau relaties laten ook een lagere evenwichtsfactor bij het Spencer-Van der Meij model zien. Vooral nog is de oorzaak hiervan niet duidelijk. Vermoedelijk betreft het een software fout.

De berekende stabiliteitsfactoren volgens Tabel 3.2 kunnen ook in absolute zin worden beschouwd. Voor de cases waar afschuivingen plaats hebben gevonden geven de berekeningen met gedraineerde schuifsterkte volgens celproeven in enkele gevallen te hoge stabiliteitsfactoren met de drie beschouwde schuifvlakmodellen. Het gaat onder meer om de case Streefkerk, waar in 1984 een grote afschuiving is opgetreden. Met celproeven wordt een stabiliteitsfactor ruim groter dan 1,0 berekend. Dit geldt ook voor de locatie Lekdijk west in de Krimpenerwaard, waar in 1995 vervorming van de dijk is gemeten tijdens hoog water. De berekende stabiliteitsfactoren met schuifsterkte uit celproeven passen niet bij een deformerende dijk. Bij de Heinoomsvaart was sprake van langzame deformatie gedurende enkele jaren. Ook hier passen de berekende stabiliteitsfactoren met schuifsterkte uit celproeven duidelijk niet bij de vervorming die is waargenomen. Wat deze laatste case betreft, zijn de stabiliteitsberekeningen erg gevoelig voor de stijghoogte in de watervoerende zandlaag. Bij een hogere stijghoogte zijn de waargenomen vervorming en de berekende stabiliteitsfactoren wel in overeenstemming. Omdat de stijghoogte niet precies bekend is, zijn de resultaten van de Heinoomsvaart in de verdere analyses buiten beschouwing gelaten.

Met het Bishop- en LiftVan-model en schuifsterkte-eigenschappen uit celproeven is een stabiliteitsfactor groter dan 1,0 berekend voor de situatie waarbij in 1980 een afschuiving bij de Wolpherensedijk te Gorinchem optrad. Met het Spencer-model worden hier wel realistische stabiliteitsfactoren kleiner dan 1,0 berekend.

Het Spencer-model berekent een te lage stabiliteitsfactor voor de Markermeerdijk bij de situatie met de storm van 1928 uitgaande van schuifsterkte eigenschappen uit celproeven. Met de modellen van Bishop en LiftVan worden voor deze case betrouwbaarder stabiliteitsfactoren berekend.

Uitgaande van de ongedraineerde schuifsterkte worden meestal betere resultaten bereikt. Zowel voor de cases waar een taludafschuiving is opgetreden als voor de cases waar een waterstand kon worden weerstaan, zijn de berekende stabiliteitsfactoren op basis van de drie beschouwde schuifvlakmodellen meestal betrouwbaar. Voor de taludafschuivingen bij Streefkerk en de Wolpherensedijk te Gorinchem worden met het Bishop-model te hoge stabiliteitsfactoren berekend ( $> 1,0$ ). Voor de case Streefkerk geldt hetzelfde voor het LiftVan-

model. Voor de case Markermeerdijk met de storm van 1928 wordt een wat lage stabiliteitsfactor berekend met het LiftVan-model. Deze hoge waterstand kon worden gekeerd, terwijl de berekende stabiliteitsfactor 1,00 bedraagt. Met het Spencer-model en ongedraineerde schuifsterkte zijn zowel voor de cases met taludafschuivingen als voor de cases met overleefde waterstanden realistische stabiliteitsfactoren berekend.

### 3.5 Optimalisatie automatische zoekprocedure

Omdat in RingToets zal worden gewerkt met een automatische procedure voor het zoeken naar het maatgevende schuifvlak is onderzoek gedaan naar de nauwkeurigheid van de zoekprocedure (Taccari, 2014). Bij de automatische zoekprocedure wordt het zoekgebied door de software gepositioneerd ten opzichte van een aantal karakteristieke punten van het dijkprofiel (buitenkruinlijn, binnenkruinlijn, binnenteen, slootbodem, bovenkant diepe zandlaag etc). Het zoekgebied wordt bij het Bishop- en LiftVan-model bepaald door de middelpuntengrids (bij LiftVan zowel actief en passief middelpuntengrid) en de raaklijnen en bij het Spencer-Van der Meij model wordt het zoekgebied bepaald door het buitenste en binnenste schuifvlak. De ligging van de benodigde karakteristieke punten in het dijkprofiel dient vooraf door de gebruiker te worden gedefinieerd.

Het onderzoek naar de nauwkeurigheid van de automatische zoekprocedure is uitgevoerd op basis van 40 dwarsprofielen uit het VNK2-project en 11 dwarsprofielen uit het WTI-project, zoals beschreven in paragraaf 3.3. De nauwkeurigheid van de zoekprocedure is uitgedrukt in de afwijking van de stabiliteitsfactor gevonden door de automatische zoekprocedure ten opzichte van de stabiliteitsfactor gevonden bij handmatige definitie van het zoekgebied. Deze nauwkeurigheid is niet de absolute nauwkeurigheid van het model (de aansluiting bij de werkelijkheid), maar een maat voor de reproduceerbaarheid van het berekeningsresultaat.

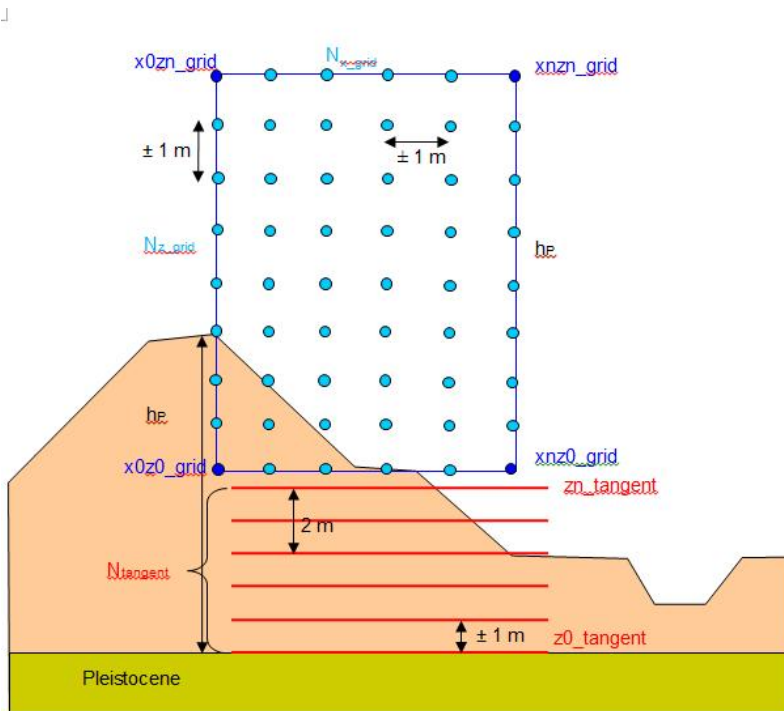
Door de berekeningsresultaten (berekende stabiliteitsfactor en ligging van het maatgevende schuifvlak) van de berekeningen met de automatische zoekprocedure en de berekeningen met handmatige definitie van het zoekgebied met elkaar te vergelijken is de automatische zoekprocedure verbeterd. De verbeteringen voor de zoekprocedure voor het LiftVan-model zijn bereikt door de ligging en grootte van het passieve middelpuntengrid aan te passen en door raaklijnen toe te voegen. De verbeteringen voor de zoekprocedure voor het Spencer-Van der Meij model zijn bereikt door de ligging van het buitenste schuifvlak aan te passen en door het zoekgebied in twee delen te verdelen, namelijk voor ondiepe en diepe schuifvlakken.

	Bishop	LiftVan	Spencer-Van der Meij
Grootste afwijking	1,047	1,054	1,069
Gemiddelde afwijking	1,005	1,005	1,029
Standaardafwijking	0,040	0,022	0,029

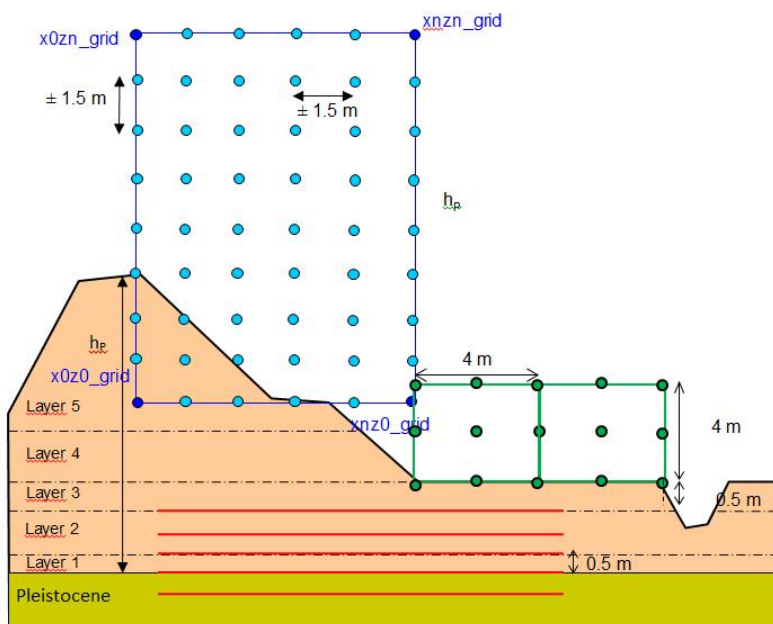
Tabel 3.4 Fout van de berekende stabiliteitsfactoren bij de automatische zoekprocedure ten opzichte van handmatig zoeken.

In Tabel 3.4 zijn de grootste fout, de gemiddelde fout en de standaardafwijking van de fout van de berekende stabiliteitsfactoren bij de automatische zoekprocedure ten opzichte van handmatig zoeken weergegeven. De grootste fout en de gemiddelde fout zijn het grootst bij het Spencer-Van der Meij model. De grootste standaardafwijkingen zijn gevonden bij het Bishop-model en het Spencer-Van der Meij model. Bij het LiftVan-model wordt de minimum stabiliteitsfactor, die wordt gevonden bij handmatig zoeken, door de automatische zoekprocedure het best benaderd.

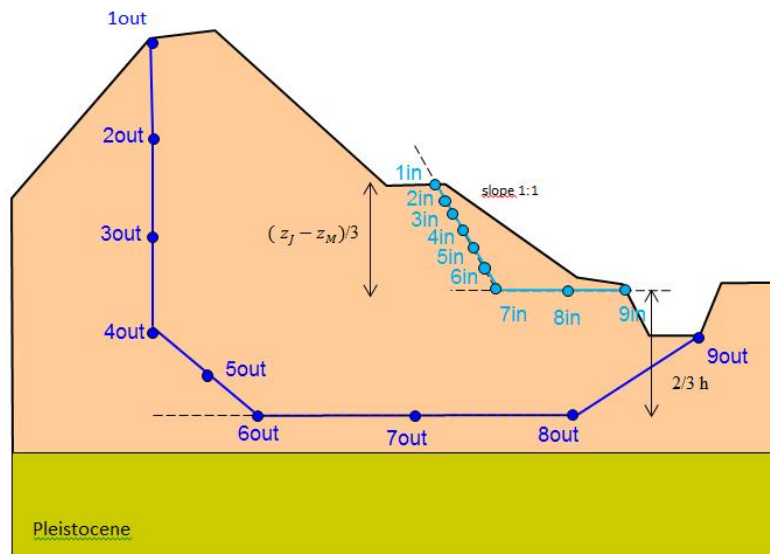
Mogelijk kan de procedure voor het automatisch zoeken bij het Spencer-Van der Meij model nog verder worden verbeterd. Dit kan wellicht worden bereikt door tijdens de zoekprocedure van het genetisch algoritme schuifvlakken met te veel lamellen ( $> 10\%$ ) waar de druklijn zich buiten de lamel bevindt of schuifvlakken met te scherpe hoeken ( $> 45^\circ$ ) te negeren en verder te zoeken naar meer realistische schuifvlakken.



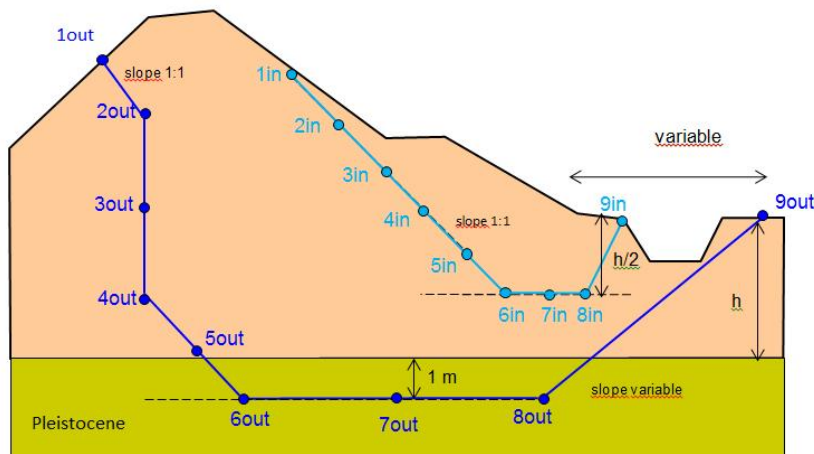
Figuur 3.5 Geoptimaliseerd zoekgebied voor het Bishop-model.



Figuur 3.6 Geoptimaliseerd zoekgebied voor het LiftVan-model.



Figuur 3.7 Geoptimaliseerd zoekgebied voor ondiepe schuifvlakken bij het Spencer-Van der Meij-model.



Figuur 3.8 Geoptimaliseerd zoekgebied voor diepe schuifvlakken bij het Spencer-Van der Meij-model.

In de Figuren 3.5 tot en met 3.8 zijn de geoptimaliseerde zoekgebieden voor het Bishop-model, LiftVan-model en Spencer-Van der Meij-model weergegeven. In de figuren zijn de ligging en grootte van de middelpuntengrids en raaklijnen bij het Bishop-model en het LiftVan-model en de ligging van de buitenste en binnenste schuifvlakken van het Spencer-Van der Meij model aangegeven ten opzichte van het dijkprofiel. Alle middelpuntengrids, raaklijnen en buitenste en binnenste schuifvlakken hebben een vaste positie ten opzichte van de karakteristieke punten van een dijkprofiel. De afwijkingen in berekende stabiliteitsfactoren van Tabel 3.4 behoren bij de zoekgebieden in de Figuren 3.5 tot en met 3.8. Nadere details over de geoptimaliseerde zoekgebieden zijn beschreven in Taccari (2014).

De benodigde rekentijd van de drie glijvlakmodellen voor tien berekeningen gegeven de zoekgebieden in de Figuren 3.5 tot en met 3.8 is als volgt (Taccari, 2014):

- Bishop-model 2 minuten;
- LiftVan-model 30 minuten;
- Spencer-Van der Meij model 10 minuten (5 minuten voor ondiep schuifvlak en 5 minuten voor diep glijvlak).

### 3.6 Samenvatting

De belangrijkste bevindingen vanuit dit Hoofdstuk 3 zijn als volgt:

- Met het Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte zijn zowel voor de cases met taludafschuivingen als voor de cases met overleefde waterstanden realistische stabiliteitsfactoren berekend. Dit geldt in iets mindere mate ook voor het LiftVan-model. Opmerkelijk hierbij is dat het verschil tussen Spencer-Van der Meij en LiftVan 1,02 tot 1,12 bedraagt voor de cases waar een taludinstabiliteit is opgetreden en het verschil is 0,97 tot 1,02 voor de cases waar een hoogwater is overleefd.
- De afwijking van de stabiliteitsfactoren tussen het Spencer-Van der Meij model en het Bishop-model kan oplopen tot 10 a 15%. De evenwichtsfactor bij Spencer-Van der Meij is gemiddeld een factor 1,014 tot 1,046 lager dan bij het Bishop-model met een standaardafwijking van 0,052 tot 0,082. Het betreft zowel de berekeningen met de traditionele gedraineerde schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving als de berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte.
- Het Spencer-Van der Meij model berekent een stabiliteitsfactor, die gemiddeld een factor 1,013 tot 1,019 lager is dan die van het LiftVan-model met een standaardafwijking van 0,040 tot 0,101. Het betreft zowel de berekeningen met de traditionele gedraineerde schuifsterkte parameters cohesie en hoek van inwendige wrijving als de berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte.
- Bij de berekeningen van de buitenwaartse macrostabiliteit worden met het Spencer-Van der Meij model soms schuifvlakken met een grillige vorm berekend. Overwogen moet worden om voor de buitenwaartse macrostabiliteit het Bishop-model of eventueel LiftVan-model te handhaven.
- Bij situaties met opbarsten (met sterkte reductie) is de vorm van de berekende Spencer-schuifvlakken vaak erg grillig. Daarbij blijkt de berekende evenwichtsfactor erg gevoelig voor relatief kleine aanpassingen aan het zoekgebied. Het genetisch algoritme is in dergelijke situaties niet in staat een goede oplossing te vinden. Een berekening met het LiftVan-model is dan de manier om toch een berekening te kunnen maken.
- De onderzoeken lijken geen aanleiding te geven om onderscheid te maken voor situaties met opdrukken. In het Arcadis onderzoek (Paragraaf 3.3) en het WTI onderzoek (Paragraaf 3.4) zijn situaties met en zonder opdrukken geanalyseerd. De resultaten van deze onderzoeken laten geen duidelijke verschillen tussen deze situaties zien. Dit geldt niet voor opbarsten met sterkte-reductie (zie vorige punt).
- Door relatief kleine aanpassingen in het zoekgebied van het Spencer-Van der Meij model zijn veranderingen in de berekende stabiliteitsfactor van 0,03 tot 0,05 mogelijk. Hierbij is de ligging van het zoekgebied niet wezenlijk veranderd en is het aantal punten van de grenzen van het zoekgebied constant gehouden. Dit dient in de modelonzekerheidsfactor te worden verdisconteerd.

- Door het automatisch positioneren van het zoekgebied worden veelal iets hogere stabiliteitsfactoren berekend dan bij handmatig positioneren van het zoekgebied. Dit levert bij het Spencer-Van der Meij-model een gemiddelde fout op van 1,029 met een standaardafwijking van 0,029. Bij het LiftVan-model is dit gemiddeld 1,005 met een standaardafwijking van 0,022. Dit dient in de modelonzekerheidsfactor te worden verdisconteerd.
- De rekentijd is voor het Spencer-Van der Meij model 10 minuten en voor het LiftVan-model 30 minuten voor tien berekeningen.





## 4 Modelonzekerheidsfactoren

### 4.1 Inleiding

In semi-probabilistische stabiliteitsanalyses wordt de totale vereiste betrouwbaarheid in rekening gebracht door middel van partiële veiligheidsfactoren. Dit zijn de materiaalfactor voor de onzekerheid over de schuifsterkteparameters, de schadefactor voor het vereiste betrouwbaarheidsniveau van een dijkring of dijkringdeel en de modelfactor voor de onzekerheid over het schuifvlakmodel. Volgens het TR Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012) dient ook een schematiseringsfactor voor onzekerheden in de schematisering van grondlagen en waterspanningen in rekening te worden gebracht. In het WTI 2017 wordt de schematiseringsfactor niet toegepast, maar worden schematiseringsonzekerheden in rekening gebracht door met scenario's te werken. Het product van deze partiële veiligheidsfactoren is de totale veiligheidsmarge tussen de karakteristieke waarde van de sterkte en de karakteristieke waarde van de belasting.

In de modelfactor worden onder andere de volgende modelonzekerheden verdisconteerd:

- De onzekerheid over het schuifvlakmodel: zowel een cirkelvormig schuifvlak (met name het Bishop-model en het LiftVan-model in mindere mate) als een schuifvlakmodel met rechte schuifvlakken (Spencer-model) geven niet altijd een goede weergave van de werkelijkheid;
- De onzekerheid over het schuifvlakmodel, omdat het horizontaal krachtenevenwicht binnen de afschuivende grondmoot niet wordt gecontroleerd door de modellen Bishop en in mindere mate ook LiftVan;
- De onzekerheid over de gemobiliseerde schuifsterkte, omdat een twee-dimensionale berekening wordt uitgevoerd, terwijl de afschuivende grondmoot drie-dimensionaal is;
- De mate waarin de ruimtelijke variabiliteit van schuifsterkte parameters uit middelt binnen een schuifvlak;
- De onzekerheid of de schuifsterkte langs het schuifvlak de werkelijke mobiliseerbare schuifsterkte van de grond goed representeert, waarbij er verschillende aspecten kunnen worden benoemd, waardoor de schuifsterkte kan worden overschat of onderschat (zie ook paragraaf 4.4). Immers in de materiaalparameters (karakteristieke waarden) en materiaalfactoren wordt alleen de onzekerheid als gevolg van geologische variatie en meetfouten verdisconteerd.

In probabilistische stabiliteitsanalyses wordt een modelonzekerheidsfactor met verwachtingswaarde en standaardafwijking toegepast om de onzekerheden ten aanzien van het gehanteerde schuifvlakmodel in rekening te brengen. De modelonzekerheidsfactor wordt ook wel stochastische drempelwaarde genoemd. De semi-probabilistische modelfactor is de rekenwaarde van de probabilistische modelonzekerheidsfactor. De semi-probabilistische modelfactor wordt als volgt berekend uit de verwachtingswaarde en standaardafwijking van de modelonzekerheidsfactor:

$$\gamma_d = \frac{d_d}{d_k} = \frac{\mu_d + \alpha_d \cdot \beta_{eis,dsn}^* \cdot \sigma_d}{d_k} \quad (4.1)$$

Waarin:

- $\gamma_d$  Modelfactor (partiële factor, niet te verwarren met de zogenaamde modelonzekerheidsfactor)
- $d_d$  Rekenwaarde van de modelonzekerheidsfactor
- $d_k$  Karakteristieke waarde van de modelonzekerheidsfactor
- $\mu_d$  Gemiddelde van de modelonzekerheidsfactor
- $\sigma_d$  Standaardafwijking van de modelonzekerheidsfactor
- $\alpha_d$  Representatief geachte invloedscoëfficiënt voor de modelonzekerheid
- $\beta_{eis,dsn}^*$  Betrouwbaarheidsindex op doorsnedeniveau waarbij de modelfactor wordt afgeleid (vaste waarde, niet afhankelijk van de normhoogte en de trajectlengte)

## 4.2 Technisch Rapport Macrostabiliiteit

Het concept Technisch Rapport Macrostabiliiteit (Rozing et al, 2013) geeft de meest actuele inzichten met betrekking tot de semi-probabilistische modelfactoren (zie Tabel 4.1). Waar het de modellen van Bishop en LiftVan betreft, zijn de genoemde modelfactoren identiek aan die in het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012).

Opdrukken	Rekenmodel	Onzekerheden rekenmodel $\gamma_{d1}$	3D-effect $\gamma_{d2}$ <sup>3)</sup>	Totale rekenmodel-factor $\gamma_d$
Nee	Bishop	1,10	0,90	1,00
	LiftVan	1,05	0,90	0,95
	Spencer-Van der Meij	1,05	0,90	0,95
	EEM - Mohr Coulomb	1,10 of bij 'fine tuning' 1,05	0,90	1,00 of bij 'fine tuning' 0,95
Ja	Bishop <sup>2)</sup>	1,10	1,00	1,10
	LiftVan	1,05	1,00	1,05
	Spencer-Van der Meij	1,05	1,00	1,05
	Model horizontaal evenwicht	-	-	1,20
	EEM - Mohr Coulomb	1,05 of bij 'fine tuning' 1,00	1,00	1,05 of bij 'fine tuning' 1,00

1) Opdrukken is in het concept Technisch Rapport Macrostabiliiteit (Rozing et al, 2013) het opdrukken van de slecht doorlatende deklaag door een hoge stijghoogte in de watervoerende zandlaag, waardoor opdrijven kan optreden of opbarsten (met verlies van sterkte bij dunnen deklagen).

2) Tevens zogenaamde Bishop  $c'=0$  en  $\phi'=0$  analyses.

3) Voor situaties waarbij geen sprake is van een 3D effect van de randen van de afschuiving moet deze deelfactor 0,9 niet worden gehanteerd. Ofwel dient de waarde 1,0 te worden gehanteerd. Dit geldt bijvoorbeeld voor een situatie in een zeer scherpe buitenbocht.

**Tabel 4.1** Semi-probabilistische modelfactoren volgens het Technisch Rapport Macrostabiliiteit (Rozing et al, 2013). De modelactoren gelden voor effectieve spanningsanalyses.

De modelfactoren in de genoemde technische rapporten zijn grotendeels gebaseerd op een kwalitatieve beoordeling van de beperkingen van de schuifvlakmodellen, ofwel van de mate waarin de schuifvlakmodellen falen van taluds goed beschrijven. In de technische rapporten wordt gedifferentieerd naar al dan niet opdrukken, vanuit de aanname dat dit invloed heeft op het 3D-effect (de grootte van het schuifvlak en de grootte van de invloed van de randen van het schuifvlak). De totale rekenmodelfactor is het product van de onzekerheden in het rekenmodel en het 3D-effect. De modelfactoren gelden voor een effectieve

spanningsanalyse. Verder veronderstellen de modelfactoren in de technische rapporten dat de schuifvlakmodellen iets te optimistisch zijn in gevallen met opdrukken van het achterland (modelfactor groter dan 1,0) en iets te conservatief zijn in situaties zonder opdrukken (modelfactor kleiner of gelijk aan 1,0).

Het technisch rapport maakt geen onderscheid naar de herkomst van de schuifsterkte parameters. Niet alle schuifsterkte parameters (celproeven, triaxiaalproeven, gedraineerd, ongedraineerd) passen echter even goed bij bezwijken van grond. Het onderscheid naar schuifsterkte parameters zou daarom ook moeten worden gemaakt. In Paragraaf 3.3 blijkt uit de gevonden evenwichtsfactoren dat stabiliteitsberekeningen op basis van schuifsterkte eigenschappen uit celproeven gemiddeld hogere evenwichtsfactoren geven dan de berekeningen met ongedraineerde schuifsterkte. De berekeningen op basis van ongedraineerde schuifsterkte passen beter bij het bezwijken van taluds.

In de technische rapporten is er voor gekozen de modelfactoren voor LiftVan en Spencer-van der Meij gelijk te stellen. Beide modellen hebben verschillende uitgangspunten en aannamen (zie Hoofdstuk 2). Bij het vaststellen van de modelfactoren is kennelijk geconcludeerd, dat ondanks deze verschillen de modelfactoren gelijk zijn.

Voor situaties met opbarsten van het achterland (met sterkte reductie;  $c'$  en  $\varphi' = 0$ ) is het verschil in modelfactoren voor Bishop en Spencer (1,10 versus 1,05), die in de technische rapporten worden voorgesteld, mogelijk te klein, gezien de resultaten uit de Arcadis studie. In de Arcadis studie (Paragraaf 3.2) blijkt het verschil tussen Bishop en Spencer bij opbarsten bij regionale keringen gemiddeld 1,26 te zijn.

#### 4.3 Veiligheid Nederland in Kaart

De modelonzekerheidsfactoren met bijbehorende standaardafwijkingen, die worden gehanteerd bij het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2), zijn vermeld in Tabel 4.2 (Calle et al, 2012).

Schuifvlak-model	Karakterisering schuifsterkte	Opdrukken (3D-effect)	$\mu_d$	$\sigma_d$
Bishop	Triaxiaalproeven <sup>1</sup>	Nee	0,92	0,05
		Ja	1,02	0,04
	Celproeven	Nee	0,83	0,07
		Ja	0,93	0,07
LiftVan	Triaxiaalproeven	Nee	0,87	0,05
		Ja	0,97	0,04
	Celproeven	Nee	0,79	0,07
		Ja	0,88	0,07

Tabel 4.2 Rekenmodelonzekerheidsfactoren ( $\mu_d$ ) en standaardafwijkingen ( $\sigma_d$ ), zoals in gebruik bij het project Veiligheid Nederland in Kaart VNK2 (Calle et al, 2012).

Deze modelonzekerheidsfactoren in Tabel 4.2 zijn gebaseerd op een evaluatie, waarin is nagegaan welke bijstellingen nodig zijn van de aannamen in het Marsrouterapport (Calle, 1997), om te komen tot een set van verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van

<sup>1</sup> De in de Nederlandse adviespraktijk veel gebruikte triaxiaalproeven (isotroop geconsolideerd, ongedraineerd, meertraps, rekgrenzen van 2 à 5%)

modelonzekerheidsfactoren, die zowel consistent zijn met het TR Grondmechanisch Schematiseren (ENW, 2012) (zie ook Paragraaf 4.2) als met de opbouw via deelfactoren in het Marsrouterapport. Criterium daarbij was dat de benodigde bijstellingen moeten leiden tot verwachtingen en standaardafwijkingen van de deelfactoren, die nog geloofwaardig zijn. De keuzes voor de modelonzekerheidsfactoren in het Marsrouterapport zijn gebaseerd op engineering judgement. Deze modelonzekerheidsfactoren worden toegepast bij effectieve spanningsanalyses. Bij deze modelonzekerheidsfactoren wordt niet alleen onderscheid gemaakt naar het toegepaste schuifvlakmodel en het optreden van opdrukken en het daaraan gekoppelde 3D-effect, maar ook naar de herkomst van de toegepaste schuifsterkteparameters. De gekozen modelonzekerheidsfactoren veronderstellen dat de stabiliteitsberekeningen gemiddeld genomen een onderschatting van de taludstabiliteit geven. De grootte van de standaardafwijking van de modelonzekerheidsfactoren is zodanig, dat in combinatie met de verwachtingswaarden van de modelonzekerheidsfactoren de schuifvlakmodellen iets te optimistisch worden verondersteld in gevallen met opdrukken van het achterland en iets te conservatief worden verondersteld in situaties zonder opdrukken.

Toepassing van deze modelonzekerheidsfactoren en bijbehorende standaardafwijkingen in 42 probabilistische stabiliteitsberekeningen leidt tot een grote bijdrage van de modelonzekerheid aan de berekende faalkansen (Jongejan et al, 2013). Van alle stochasten is de modelonzekerheid de stochast met gemiddeld genomen de grootste bijdrage aan de berekende faalkans. De gekwadraterde invloedscoëfficiënt voor de modelonzekerheid is gemiddeld 0,34, heeft een mediaan van 0,48 en loopt uiteen van bijna 0 tot 0,9. De andere stochasten in de berekeningen zijn de hydraulische randvoorwaarden, de schuifsterkteparameters ( $c'$  en  $\varphi'$ ) en de waterspanning met vaste standaardafwijking van 1,0 kPa. Van het VNK2-project zijn vergelijkbare ervaringen bekend.

#### 4.4 Literatuurreview

Een beperkte literatuurreview laat zien dat het niet algemeen gangbaar is om een modelfactor toe te passen bij het uitvoeren van stabiliteitsanalyses. In NEN-EN 9997-1 (Eurocode 7) komt een modelfactor niet aan de orde. In het geotechnische handboek Soil Mechanics in Engineering Practice van Terzaghi et al (1996) is dit evenmin het geval. In de ICE manual of geotechnical engineering (Burland et al, 2012) wordt slechts aangegeven dat een 2D-stabiliteitsanalyse iets ongunstiger is dan de werkelijke stabiliteit in het veld als gevolg van drie-dimensionale effecten. Azzouz et al (1983) gaan ook in op drie-dimensionale effecten. In Christian et al (1994) en Ladd et al (2004) komen enkele aspecten met betrekking tot de betrouwbaarheid van stabiliteitsanalyses aan de orde. De resultaten van Christian et al worden nog geciteerd door Wu (2008) en kunnen daarom nog als actueel worden gezien. Wu gaat er van uit dat de nauwkeurigheid van glijvlakanalyses niet kleiner dan 10% zal zijn en voegt hier aan toe dat de onnauwkeurigheid van analyses vooral groot zal zijn bij problemen waarbij de ervaring beperkt is. Tabel 4.3 geeft een overzicht van de deelaspecten uit Azzouz et al (1983), Christian et al (1994) en Ladd et al (2004).

Deelaspect	Verwachtingswaarde	Standaardafwijking	Bron
3D vs. 2D kopvlak effecten	0,900	0,060	Azzouz et al (1983), Christian et al (1994), Ladd et al (2004)
Meest kritieke glijvlak niet gevonden	1,050	0,050	Christian et al (1994)
Numerieke afronding en fouten	1,000	0,020	Christian et al (1994)
Interpretatie Mohr-Coulomb model	1,143	0,025	Ladd et al (2004)
Strain compatibility	1,111	0,050	Ladd et al (2004)
Intermediate principal stress effect	0,870	0,060	Ladd et al (2004)
Totaal alle aspecten	1,045	0,120	--

Tabel 4.3 Overzicht van deelaspecten binnen de modelonzekerheidsfactor vanuit de internationale literatuur.

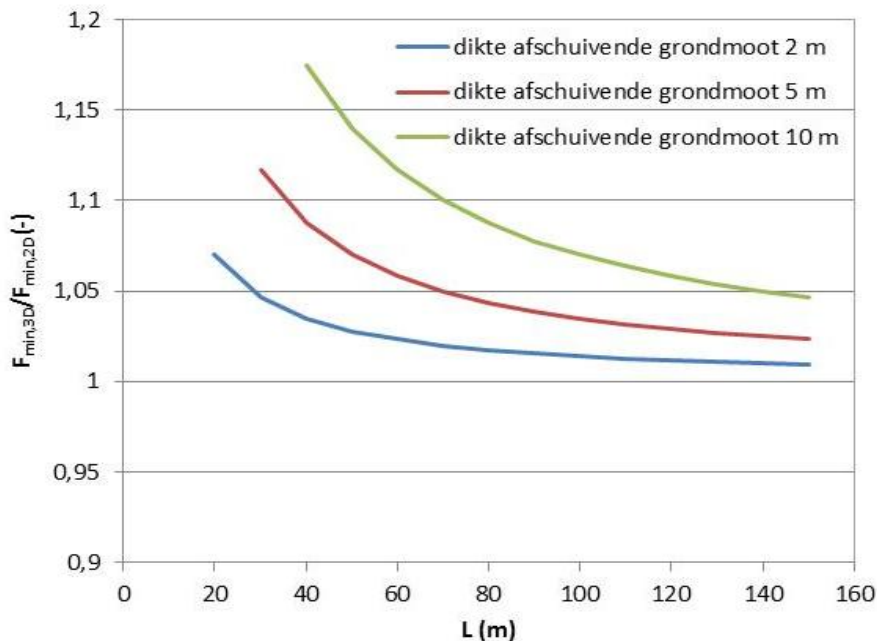
Door Azzouz et al (1983) is de volgende vergelijking voorgesteld om de berekende stabiliteitsfactor van een twee-dimensionale stabiliteitsanalyse te corrigeren voor kopvlakeffecten:

$$F_{\min(3D)} / F_{\min(2D)} = 1 + 0.7 (D / L) \quad (4.2)$$

Waarin:

- D dikte van de afschuivende grondmoot (m)
- L lengte van de afschuivende grondmoot (m)

Azzouz et al hebben deze vergelijking 4.2 afgeleid op basis van de terug-analyse van 17 bezwaken taluds van ophogingen. Christian et al (1994) en Ladd et al (2004) baseren zich voor wat de kopvlakeffecten betreft op het werk van Azzouz et al (1983).



Figuur 4.1 Effect van de afmetingen van een afschuivende grondmoot op de correctie van de stabiliteitsfactor op basis van Azzouz et al (1983).

In Figuur 4.1 is de vergelijking 4.2 grafisch weergegeven voor drie diktes van de afschuivende grondmoot. De verhoudingen van de lengte en de dikte van de afschuivende grondmoot blijken een groot effect te hebben op de benodigde correctie van de berekende stabiliteitsfactor van een twee-dimensionale stabiliteitsanalyse voor kopvlakeffecten. De correctie voor kopvlakeffecten kan dus niet alleen afhankelijk worden gesteld van de lengte van de afschuivende grondmoot, maar de diepte van de afschuivende grondmoot moet hierbij ook in beschouwing worden genomen. Wanneer er van uit wordt gegaan dat een lange afschuivende grondmoot ook altijd relatief diep zal zijn en een korte afschuivende grondmoot relatief ondiep is, is de correctie voor kopvlakeffecten altijd min of meer gelijk kan uit Figuur 4.1 worden afgeleid. Stel dat de lengte van een afschuivende grondmoot in de orde van tien maal zo groot is als de lengte van de afschuivende grondmoot, dan zou de correctiefactor 1,07 bedragen.

Christian et al (1994) geven aan dat de meest effectieve aanpak om de modelonzekerheid te bepalen is om deze af te leiden uit empirische observaties. Daarnaast komen Christian et al op basis van een drietal deelaspecten op een schatting van de modelonzekerheidsfactor van 0,95 met een standaardafwijking van 0,07. Ladd et al benoemen ook een viertal deelaspecten en geven aan dat deze aspecten elkaar gemiddeld genomen uitdempen. Op basis hiervan komen Ladd et al op een schatting van de modelonzekerheidsfactor in de orde van 1,0. De bijbehorende standaardafwijking is 0,10. De verwachtingswaarde van de modelonzekerheidsfactor op basis van alle deelaspecten uit Tabel 4.3 samen bedraagt 1,045. Deze kan worden berekend door vermenigvuldiging van de afzonderlijke effecten. De standaardafwijking van de modelonzekerheidsfactor bedraagt 0,120. Deze is berekend door de wortel te nemen van de som van de kwadraten van de standaardafwijking van alle effecten.

#### 4.5 Samenvatting

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat het toepassen van modelonzekerheidsfactoren gangbaar is in de Nederlandse praktijk van het ontwerpen en toetsen van waterkeringen. Daarbij gaan de huidige modelonzekerheidsfactoren in het TR Macrostabieliteit en het TR Grondmechanisch Schematiseren alleen over de onzekerheid van het schuifvlakmodel (uitgangspunten schuifvlakmodel en drie-dimensionale effecten) en niet over de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. De door het VNK2-project toegepaste modelonzekerheidsfactoren betreffen zowel het schuifvlakmodel als de modellering van de schuifsterkte. In probabilistische stabiliteitsanalyses blijkt de modelonzekerheid de stochast met gemiddeld genomen de grootste bijdrage aan de berekende faalkans. De gekozen modelonzekerheidsfactoren zijn gebaseerd op engineering judgement. Voor andere geotechnische constructies is het toepassen van een modelonzekerheidsfactor, zowel in Nederland als internationaal, niet vanzelfsprekend. Vanuit de literatuur worden wel aanknopingspunten gegeven om de modelonzekerheid van stabiliteitsanalyses in rekening te brengen. Dit is deels gebaseerd op engineering judgement en deels op terug-analyses van opgetreden afschuivingen. De verschillende genoemde modelonzekerheden hebben voor een deel een positief effect en voor een deel een negatief effect, zodat de effecten elkaar deels uitdempen. Toch wordt de modelonzekerheid nog wel in de orde van 10% of meer geschat. De grootte van de correctie voor drie-dimensionale effecten (of kopvlakeffecten) is volgens Azzouz et al (1983) niet alleen afhankelijk van de lengte van een afschuivende grondmoot, maar ook van de dikte van de afschuivende grondmoot. Wanneer er van uit wordt gegaan dat een lange afschuivende grondmoot ook altijd relatief diep zal zijn en een korte afschuivende grondmoot relatief ondiep is, is de correctie voor kopvlakeffecten altijd min of meer in dezelfde orde van grootte. Een onderscheid voor de grootte van de drie-dimensionale effecten bij taludafschuivingen in situaties met opdrukken of in situaties zonder opdrukken, zoals gangbaar bij de vigerende modelfactoren voor waterkeringen (zie de Tabellen 4.1 en 4.2), is op basis van het werk van Azzouz et al niet zondermeer te onderbouwen. Voor de meest objectieve kwantificering van de modelonzekerheid zijn volgens Christian et al (1994) empirische observaties nodig.





## 5 Modelonzekerheidsfactoren voor Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte

Op basis van de beschikbare ervaringen met het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel (zie Hoofdstuk 3) en de inzichten over de modelonzekerheid (zie Hoofdstuk 4) worden in dit hoofdstuk een verwachtingswaarde en standaardafwijking voor de modelonzekerheidsfactor afgeleid.

Bij het bepalen van de modelonzekerheidsfactor zijn er de volgende overwegingen:

- De verschillende schuifvlakmodellen zijn gebaseerd op verschillende uitgangspunten en hebben verschillende afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid. Het is op basis van de uitgangspunten van de modellen niet zondermeer duidelijk welk model de werkelijkheid het beste beschrijft (zie Hoofdstuk 2). De verschillende uitgangspunten van de schuifvlakmodellen leiden uiteraard ook tot verschillen in de berekende stabiliteitsfactoren (zie Hoofdstuk 3).
- De huidige modelonzekerheidsfactoren in het concept TR Macrostabiliteit en het TR Grondmechanisch Schematiseren gaan alleen over de onzekerheid van het schuifvlakmodel (uitgangspunten schuifvlakmodel en 3D-effect) en niet over de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. De door het VNK2-project toegepaste modelonzekerheidsfactoren betreffen zowel de onzekerheid over het schuifvlakmodel als de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. De modellering van de schuifsterkte heeft een onzekerheid, naast de onzekerheid over de schuifsterkte als gevolg van de geologische variabiliteit. De onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte moet dan ook in de modelonzekerheidsfactor worden verdisconteerd.
- De grootte van de correctie voor drie-dimensionale effecten (of kopvlakeffecten) is volgens Azzouz et al (1983) niet alleen afhankelijk van de lengte van een afschuivende grondmoot, maar ook van de dikte van de afschuivende grondmoot. Wanneer er van uit wordt gegaan dat een lange afschuivende grondmoot ook altijd relatief diep zal zijn en een korte afschuivende grondmoot relatief ondiep is, is de correctie voor kopvlakeffecten altijd min of meer in dezelfde orde van grootte. Een onderscheid voor de grootte van de drie-dimensionale effecten bij taludafschuivingen in situaties met opdrukken of in situaties zonder opdrukken, zoals gangbaar bij de vigerende modelfactoren voor waterkeringen (zie de Tabellen 4.1 en 4.2), is op basis van het werk van Azzouz et al niet zondermeer te onderbouwen.
- De huidige modelonzekerheidsfactoren in het concept TR Macrostabiliteit en het TR Grondmechanisch Schematiseren zijn hoofdzakelijk gebaseerd op engineering judgement. De modelonzekerheidsfactoren zijn niet of nauwelijks onderbouwd met testen of andere observaties (zie Paragraaf 4.2, 4.3 en 4.4).
- Eindige Elementen Modellen (EEM) met daarin toegepaste constitutieve modellen zijn ook niet perfect. EEM zijn daarom niet zondermeer geschikt als verificatie voor modelonzekerheidsfactoren.
- De modelonzekerheidsfactoren die worden toegepast bij het VNK2-project (en die consistent zijn met het TRGS en TRMD) hebben in probabilistische stabiliteitsanalyses een aanzienlijk effect op de faalkans in vergelijking met bijdrage andere onzekerheden. De gekwadrateerde invloedscoëfficiënt voor de modelonzekerheid is gemiddeld 0,34, heeft een mediaan van 0,48 en loopt uiteen van bijna 0 tot 0,9 (zie Paragraaf 4.3). Op basis van de literatuur wordt de modelonzekerheid op ten minste 10% geschat.

- Uit het Arcadis onderzoek (zie Paragraaf 3.3) volgt dat voor situaties met opbarsten van het achterland (met sterkte reductie) grote verschillen tussen het Bishop-model en het Spencer-Van der Meij model kunnen optreden. Het genetisch algoritme van het Spencer-Van der Meij model is in dergelijke situaties niet in staat een goede oplossing te vinden. Daarom moet de macrostabiliteit in situaties met opbarsten van het achterland worden berekend met de modellen Bishop of LiftVan.
- De berekeningsresultaten lijken geen aanleiding te geven om onderscheid te maken voor situaties met opdrukken. In het Arcadis onderzoek (Paragraaf 3.3) en het WTI onderzoek (Paragraaf 3.4) zijn situaties met en zonder opdrukken geanalyseerd. De resultaten van deze onderzoeken laten geen duidelijke verschillen tussen deze situaties zien.
- Kleine aanpassingen in het zoekgebied bij berekeningen met het LiftVan-model en het Spencer-Van der Meij model blijken al een aanzienlijk effect op de evenwichtsfactor te kunnen hebben (orde 0,05) (zie Paragraaf 3.4).
- Automatisch positioneren van het zoekgebied leidt tot een grotere fout in het vinden van het maatgevende schuifvlak en stabiliteitsfactor dan handmatig zoeken (zie Taccari, 2014 en Paragraaf 3.5). Wellicht kan de procedure voor het automatisch positioneren van het zoekgebied nog verder worden verbeterd, waardoor de hieraan gerelateerde onzekerheid kan worden verkleind.
- Met het Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte zijn zowel voor de cases met taludafschuivingen als voor de cases met overleefde waterstanden realistische stabiliteitsfactoren berekend (zie Paragraaf 3.4). Dit geldt in iets mindere mate ook voor het LiftVan-model. Het verschil in berekende stabiliteitsfactoren tussen Spencer-Van der Meij en LiftVan bedraagt 1,02 tot 1,12 voor de cases waar een taludinstabiliteit is opgetreden en het verschil is 0,97 tot 1,02 voor de cases waar een hoogwater is overleefd.

Wanneer de modelonzekerheidsfactor wordt afgeleid van empirische observaties, zoals aanbevolen door Christian et al (1994), is het niet zondermeer mogelijk om onderscheid te maken in de onzekerheid van het schuifvlakmodel en de onzekerheid van de modellering van de schuifsterkte. Ook eventuele andere onzekerheden (opbouw van de grondlagen en waterspanningen) kunnen een rol spelen, hoewel onderzoek in het veld naar deze onzekerheidsbronnen nog wel mogelijk is. De modelonzekerheidsfactor van een schuifvlakmodel kan niet worden bepaald onafhankelijk van de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte. Beide aspecten bepalen gezamenlijk of een taludinstabiliteit wel of niet correct kan worden nagerekend. Indien een stabiliteitsanalyse niet juist is, is niet zondermeer duidelijk of het schuifvlakmodel onjuist is of dat de modellering van de schuifsterkte onjuist is.

De macrostabiliteitsanalyses met bezweken taluds en situaties met overleefde hoge waterstanden van het WTI-onderzoek (zie Paragraaf 3.4 en Tabel 3.2) kunnen als ijkpunt voor de betrouwbaarheid van macrostabiliteitsanalyses worden gezien. Deze analyses geven een beeld van de betrouwbaarheid waarmee bezwijken of niet bezwijken van taluds kan worden berekend met verschillende combinaties van schuifvlakmodellen en schuifsterkte parameters. Schuifvlakmodel en schuifsterkte parameters kunnen niet los van elkaar worden gezien. De combinatie van schuifvlakmodel en schuifsterkteparameters bepaalt de betrouwbaarheid van een stabiliteitsanalyse. In het WTI onderzoek blijken het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel en in iets mindere mate het LiftVan-model in combinatie met ongedraineerde schuifsterkte het bezwijken van taluds en het overleven van hoge waterstanden betrouwbaar te berekenen. Bij de bezweken taluds is de hoogst berekende stabiliteitsfactor met het Spencer-Van der Meij model 0,93 en met het LiftVan-model 1,01. Bij

de overleefde hoogwaters is de laagst berekende stabiliteitsfactor met het Spencer-Van der Meij model 1,02 en met het LiftVan-model 1,0. Dit lijkt er op te wijzen dat het Spencer-Van der Meij model in combinatie met ongedraineerde schuifsterkte licht conservatief is en een kleine onzekerheid heeft. Het LiftVan-model geeft gemiddeld genomen een realistische stabiliteitsfactor, maar heeft een iets grotere onzekerheid, omdat er een kleine overlap is in de berekende stabiliteitsfactoren voor een bezwaken talud en een talud met een overleefde waterstand. Het Bishop-model geeft in enkele gevallen een overschatting van de stabiliteit. Op basis van deze resultaten zijn verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van de onzekerheid over het schuifvlakmodel en de modellering van de schuifsterkte geschat.

Refererend aan Christian et al (1994) zijn de geanalyseerde cases een empirische observatie dat het LiftVan-schuifvlakmodel en het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel in combinatie met ongedraineerde schuifsterkte betrouwbare stabiliteitsanalyses mogelijk maken. Daarmee worden de meeste bronnen van onzekerheid die door Christian et al en Ladd et al (2004) naar voren worden gebracht (zie Paragraaf 4.4) beschouwd als voldoende verdisconteerd in de stabiliteitsanalyses met de daarbij gemaakt keuzes bij de parameterbepaling (zie Paragraaf 3.4). Mogelijk middelen de verschillende onzekerheidsbronnen sterker uit dan in de literatuur wordt verondersteld.

Op basis van het werk van Azzouz et al (1983) wordt er van uit gegaan dat er geen aanleiding is om onderscheid te maken in drie-dimensionale effecten (of kopvlak-effecten) bij grote of kleine schuifvlakken. Gezien de resultaten van de geanalyseerde cases wordt er ook voor de correctie voor drie-dimensionale effecten van uitgegaan dat dit effect voldoende wordt verdisconteerd door de uitgangspunten voor de stabiliteitsanalyses. Dit is dus een belangrijk verschil met de huidige Nederlandse praktijk waar het drie-dimensionale effect wel in rekening wordt gebracht, gekoppeld aan wel of niet opdrukken van de slecht doorlatende binnendijkse deklaag. Voor situaties met opbarsten (met sterkte reductie) geldt dat het Spencer-Van der Meij-model minder geschikt is. Voor deze situaties heeft het LiftVan-model de voorkeur. Een afwijkende modelfactor voor het Spencer-Van der Meij-model voor situaties met opbarsten is daarom niet afgeleid.

Een aspect dat niet zondermeer wordt afgedekt door de empirische observaties vanuit het WTI-onderzoek is het feit dat niet altijd het meest kritische schuifvlak wordt gevonden als gevolg van een onjuist gekozen zoekgebied. Kleine wijzigingen in het handmatig gedefinieerde zoekgebied blijken op basis van dit onderzoek een effect in de orde van 0,03 tot 0,05 te hebben. Het onderzoek naar het automatisch positioneren van het zoekgebied heeft aangetoond dat het automatisch zoeken veelal tot hogere stabiliteitsfactoren leidt dan het met de hand positioneren van het zoekgebied. Het automatisch zoeken brengt dus ook onnauwkeurigheid met zich mee (zie Paragraaf 3.5). Christian et al noemen voor dit aspect een waarde van 1,05 met een standaardafwijking van 0,05. De modelonzekerheidsfactor zal ten minste dit aspect moeten verdisconteren.

Schuifvlak-model	Onzekerheid schuifvlakmodel en modellering schuifsterkte		Onzekerheid procedure zoeken laagste stabiliteitsfactor		Totale modelonzekerheid		Model-factor $\gamma_d$ [-]
	$\mu_d$ [-]	$\sigma_d$ [-]	$\mu_d$ [-]	$\sigma_d$ [-]	$\mu_d$ [-]	$\sigma_d$ [-]	
Bishop	1,020	0,030	1,005	0,040	1,025	0,050	1,12
LiftVan	1,000	0,025	1,005	0,022	1,005	0,033	1,07
Spencer-Van der Meij	0,980	0,020	1,029	0,029	1,008	0,035	1,07

Tabel 5.1 Modelonzekerheidsfactoren met standaardafwijkingen en modelfactoren voor de verschillende schuifvlakmodellen, uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte parameters en een betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$ .

In Tabel 5.1 zijn de schattingen van de verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van de modelonzekerheidsfactoren voor de verschillende schuifvlakmodellen vermeld. De schattingen van de onzekerheid over het schuifvlakmodel en de modellering van de schuifsterkte zijn met name gebaseerd het WTI-onderzoek (zie Paragraaf 3.4 en Tabel 3.2). De onzekerheid als gevolg van het automatisch zoeken van het kritische schuifvlak is gebaseerd op de resultaten in Paragraaf 3.5. Op basis hiervan zijn ook de modelfactoren afgeleid. Uitgangspunten hierbij zijn de toepassing van de ongedraineerde schuifsterkte en een betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$ .

De verwachtingswaarde  $\mu_d$  van de totale modelonzekerheid is berekend door vermenigvuldiging van de verwachtingswaarden van de twee afzonderlijke onzekerheden. De standaardafwijking  $\sigma_d$  van de totale modelonzekerheid is berekend door de wortel te nemen van de som van de kwadraten van de standaardafwijkingen van de twee afzonderlijke onzekerheden.

De modelfactor  $\gamma_d$  is berekend met formule 4.1 De karakteristieke waarde van de modelonzekerheidsfactor  $d_k$  is gelijk aan 1,0 gekozen. Gelijktelling van de karakteristieke waarde aan 1,0 betekent dat de modelfactor niet ook nog vermenigvuldigd hoeft te worden met een karakteristieke waarde. De modelfactor is onafhankelijk van de precieze normhoogte en de dijktrajectlengte. Er wordt door Jongejan et al (2014) voor alle situaties uitgegaan van een vaste betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$ . Deze waarde correspondeert met een norm van 1/300 per jaar en een trajectlengte van 20 km. Er is bewust gekozen voor een zeer soepele norm, om zeker te stellen dat de  $\beta$ -afhankelijke veiligheidsfactor groter is dan 1. De representatieve invloedscoëfficiënt  $\alpha$  voor de stochastische drempelwaarde is gebaseerd op het 75%-kwantiel van de berekende invloedscoëfficiënten (gelijk aan 0,43, zie Tabel 4.1 van Jongejan et al, 2014). In de uitgevoerde stabiliteitsanalyses is de schematiseringonzekerheid niet meegenomen. Dit betekent dat deze onzekerheid niet tot uitdrukking komt in de berekende invloedscoëfficiënten. In eerdere kalibratiestudies (Van der Meer et al, 2008; Jongejan et al, 2012) is aangenomen dat de schematiseringonzekerheid een bijdrage van 20% levert aan de variantie van de gelineariseerde, genormaliseerde grenstoestandfunctie. In dat geval zouden de invloedscoëfficiënten uit Tabel 4.1 van Jongejan et al (2014) nog moeten worden vermenigvuldigd met een factor  $\sqrt{(1-0,2)}$ . Dit levert dan een representatieve invloedscoëfficiënt voor de modelonzekerheid op van  $0,43 \times \sqrt{(1-0,2)} = 0,39$ . De kansverdelingsfunctie van de modelonzekerheidsfactor wordt normaal verdeeld aangenomen. Een en ander leidt met formule (4.1) tot een rekenwaarde van de modelonzekerheidsfactor voor de schuifvlakmodellen Bishop, LiftVan en Spencer-Van der Meij in combinatie met ongedraineerde schuifsterkte parameters zoals vermeld in Tabel 5.1.

De modelfactoren in Tabel 5.1 zijn iets hoger dan de vigerende modelfactoren (zie Paragraaf 4.2). Dit heeft een aantal oorzaken:

- het hogere betrouwbaarheidsniveau ( $\beta_{eis,dsn} = 4,8$  in plaats van  $\beta_{eis,dsn} = 4,3$  in de vigerende voorschriften);
- het in rekening brengen van de onzekerheid door het automatisch positioneren van het zoekgebied;
- de gekozen aanpak om de modelfactor te relateren aan empirische observaties, waardoor zowel de onzekerheid over het schuifvlakmodel als de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte in de modelfactor zijn verdisconteerd.

Tegenover de iets verhoogde modelfactoren staat dat de modelfactoren nog hoger gekozen zouden moeten worden, wanneer de inzichten vanuit de literatuur zouden worden gevolgd. Op grond van de empirische observatie dat het LiftVan-schuifvlakmodel en het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel in combinatie met de ongedraineerde schuifsterkte betrouwbare stabiliteitsanalyses mogelijk maken, worden de meeste bronnen van onzekerheid die door Christian et al en Ladd et al naar voren worden gebracht (zie Paragraaf 4.4) echter beschouwd als voldoende verdisconteerd in de stabiliteitsanalyses met de daarbij gemaakt keuzes bij de parameterbepaling.

De modelfactoren voor het Spencer-Van der Meij-model en het LiftVan-model zijn gelijk (1,07). Het Spencer-Van der Meij-model geeft gemiddeld iets lagere stabiliteitsfactoren dan het LiftVan-model, met name voor gevallen met lage stabiliteitsfactoren. Dit wordt onder andere veroorzaakt doordat de horizontale krachten tussen de lamellen in rekening worden gebracht en de vrijheid voor het zoeken van een kritisch schuifvlak met een lage stabiliteitsfactor iets groter is. Dit is in de modelfactoren verdisconteerd. Anderzijds blijkt het automatisch zoeken van een kritisch schuifvlak met het Spencer-Van der Meij-model moeilijker dan met het LiftVan-model (zie Paragraaf 3.5). De combinatie van deze effecten zorgt ervoor dat de modelfactoren voor het Spencer-Van der Meij model en het LiftVan-model gelijk zijn.

De in Tabel 5.1 genoemde modelfactoren zijn gebaseerd op een betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$  en een invloedscoëfficiënt  $\alpha$  van 0,39. Dit sluit aan op de voorlopige kalibratie (Jongejan et al, 2014). Wanneer de definitieve kalibratie voor het WTI 2017 daartoe aanleiding geeft, kunnen de modelfactoren met formule 4.1 worden aangepast voor een andere betrouwbaarheidseis of invloedscoëfficiënt.

Wanneer handmatig naar de minimum stabiliteitsfactor wordt gezocht (door een voldoende ervaren persoon) kan een ongunstiger schuifvlak met een lagere stabiliteitsfactor worden gevonden dan met automatisch zoeken. Voor handmatig zoeken kan worden overwogen met iets gunstiger modelonzekerheidsfactoren te werken, wat tot iets lagere modelfactoren leidt.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Ten aanzien van het toepassen van het Spencer-Van der Meij model in stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte in relatie tot het LiftVan-model en het Bishop-model zijn de conclusies als volgt:

- Horizontaal krachtenevenwicht wordt door het Spencer-Van der Meij model beschouwd voor alle lamellen binnen het schuifvlak, naast momentenevenwicht en verticaal evenwicht, zodat een volledige evenwichtsbeschouwing wordt uitgevoerd met daarbij als aanname dat de interlamelkracht een constante hoek heeft. Bij een LiftVan-berekening worden de horizontale krachten als gevolg van de waterdrukken, die op het horizontale middenstuk van het schuifvlak werken (d.w.z. aan het eind van de actieve cirkel en aan het begin van de passieve cirkel) niet in rekening gebracht, maar deze krachten worden wel in rekening gebracht bij de berekening van het momentenevenwicht. Dit heeft een invloed op de berekende veiligheidsfactor. Dit is alleen het geval als de waterspanningen langs de horizontale staaf niet constant zijn. Wanneer LiftVan op dit punt wordt aangepast, zullen de resultaten van het LiftVan-model en het Spencer-Van der Meij-model dichter bij elkaar komen te liggen.
- Het schuifvlak van het Spencer-Van der Meij model heeft een vrije vorm, zodat het meest kritische schuifvlak kan worden gevonden.
- Zowel het Spencer-Van der Meij model als het LiftVan model is gebaseerd op allerlei aannamen. Het is niet zondermeer aan te geven welk van deze modellen de stabiliteit van taluds het beste beschrijft.
- Het genetisch zoekalgoritme van het Spencer-Van der Meij model is meestal sneller dan dat van de schuifvlakmethode LiftVan. Het gaat om een factor twee tot meer dan tien bij automatisch zoeken met een groot zoekgebied (Taccari, 2014). Bij de gekozen automatische zoekprocedure gaat het om een factor 3. Uit Taccari (2014) volgt dat circa 5% van de Spencer-Van der Meij berekeningen geen resultaat geeft.
- De resultaten van het Spencer-Van der Meij model en het LiftVan model liggen gemiddeld genomen dicht bij elkaar. Het Spencer-Van der Meij model berekent gemiddeld een 1,02 lagere stabiliteitsfactor dan het LiftVan-model, maar dit verschil kan oplopen tot circa 1,10. Het Bishop model geeft veelal iets hogere evenwichtsfactoren dan LiftVan (circa 1,02) en Spencer-Van der Meij (circa 1,04).
- In combinatie met ongedraineerde schuifsterkte parameters geeft het Spencer-Van der Meij schuifvlakmodel realistische stabiliteitsfactoren, waarmee zowel cases met het bezwijken van taluds als cases met het doorstaan van hoog water situaties betrouwbaar kunnen worden geanalyseerd. Dit geldt in iets mindere mate ook voor het LiftVan-model.
- Het Spencer-Van der Meij model geeft aanzienlijk afwijkende stabiliteitsfactoren bij situaties met opbarsten van het achterland ( $c' = 0$  en  $\varphi' = 0$ ). Het genetisch algoritme is in dergelijke situaties niet in staat een goede oplossing te vinden. Daarom moet de macrostabiliteit in situaties met opbarsten van het achterland worden berekend met de modellen Bishop of LiftVan.
- Het Spencer-Van der Meij model geeft afwijkende stabiliteitsfactoren bij toepassing van spanningsafhankelijke schuifsterkte tabellen (stress tables). De oorzaak hiervan is niet duidelijk en is mogelijk een softwarematige fout. Voor WTI 2017 en RingToets is dit niet relevant, omdat geen gebruik zal worden gemaakt van spanningsafhankelijke schuifsterkte tabellen.
- De berekeningsresultaten zijn gevoelig voor de nauwkeurigheid van het zoeken van het maatgevende schuifvlak. Dit geldt zowel bij handmatig zoeken als bij het automatisch positioneren van het zoekgebied. Dit levert een aanzienlijke



modelonzekerheid op. De afwijking in de stabiliteitsfactor kan zowel bij het Spencer-Van der Meij model als het LiftVan-model gemakkelijk 0,05 bedragen. Wellicht kan de procedure voor het automatisch positioneren van het zoekgebied nog verder worden verbeterd, waardoor de hieraan gerelateerde onzekerheid kan worden verkleind. Dit kan wellicht worden bereikt door tijdens de zoekprocedure van het genetisch algoritme schuifvlakken met te veel lamellen waar de druklijn zich buiten de lamel bevindt of schuifvlakken met te scherpe hoeken te negeren en verder te zoeken naar meer realistische schuifvlakken.

Op grond van deze conclusies kan het Spencer-Van der Meij model worden toegepast in RingToets voor het WTI 2017. Het Spencer-Van der Meij model geeft gemiddeld iets lagere stabiliteitsfactoren dan het LiftVan-model en in sommige situaties kan de stabiliteitsfactor volgens het Spencer-Van der Meij model zelfs een factor 1,10 of meer lager zijn. Het Spencer-Van der Meij model is daarmee meestal maatgevend. De kortere rekentijden van het Spencer-van der Meij model zijn een voordeel voor de toepassing in RingToets, omdat grote aantallen berekeningen voor alle dwarsprofielen met bijbehorende scenario's zullen worden doorgerekend.

Het LiftVan-model dient echter ook beschikbaar te zijn in RingToets voor die gevallen waar het Spencer-Van der Meij model geen berekeningsresultaat geeft (5% van de gevallen volgens Taccari, 2014) of geen betrouwbaar resultaat geeft. Dit laatste is aan de orde bij de volgende gevallen:

- opbarsten van de binnendijkse deklaag (met sterkte reductie;  $c'$  en  $\varphi' = 0$ ), wat voor grote delen van Nederland vaak toegepast wordt;
- schuifvlakken waarbij de druklijn buiten het schuifvlak valt (hiervoor kan een criterium worden aangehouden dat de druklijn in niet meer dan 10%<sup>2</sup> van de lamellen buiten het schuifvlak mag komen);
- schuifvlakken met een sterk hoekige vorm (hiervoor kan een criterium worden aangehouden dat de hoekverdraaiing van het schuifvlak tussen twee lamellen niet groter mag zijn dan 45<sup>3</sup> graden).

Ten aanzien van de modelfactoren wordt het volgende geconcludeerd:

- De modelfactoren in Tabel 5.1 zijn iets hoger dan de vigerende modelfactoren (zie Paragraaf 4.2), namelijk 1,07 voor het Spencer-van der Meij model en het LiftVan-model en 1,12 voor het Bishop-model. Deze modelfactoren zijn 0,02 hoger dan de vigerende modelfactoren.
- De modelfactoren in Tabel 5.1 zijn iets hoger dan de vigerende modelfactoren als gevolg van: (1) het hogere betrouwbaarheidsniveau ( $\beta_{eis,dsn} = 4,8$  in plaats van  $\beta_{eis,dsn} = 4,3$  in de vigerende voorschriften), (2) het in rekening brengen van de onzekerheid door het automatisch positioneren van het zoekgebied en (3) de gekozen aanpak om de modelfactor te relateren aan empirische observaties, waardoor zowel de onzekerheid over het schuifvlakmodel als de onzekerheid over de modellering van de schuifsterkte in de modelfactor zijn verdisconteerd.
- Tegenover de iets verhoogde modelfactoren staat dat de modelfactoren nog hoger gekozen zouden moeten worden, wanneer de inzichten vanuit de literatuur zouden worden gevolgd. Op grond van de empirische observatie bij met name de WTI-cases (Paragraaf 3.4) dat het LiftVan-schuifvlakmodel en het Spencer-Van der Meij

<sup>2</sup> De genoemde waarde van 10% is een arbitraire keuze.

<sup>3</sup> De genoemde waarde van 45 graden is een arbitraire keuze, die nader onderbouwd kan worden op basis van resultaten van numerieke analyses (EEM of MPM).

schuifvlakmodel in combinatie met de ongedraineerde schuifsterkte betrouwbare stabiliteitsanalyses mogelijk maken, worden de meeste bronnen van onzekerheid die door Christian et al (1994) en Ladd et al (2004) naar voren worden gebracht (zie Paragraaf 4.4) echter beschouwd als voldoende verdisconteerd in de stabiliteitsanalyses met de daarbij gemaakt keuzes bij de parameterbepaling. Mogelijk middelen de verschillende onzekerheidsbronnen sterker uit dan in de literatuur wordt verondersteld.

- De berekeningsresultaten geven geen aanleiding om voor de modelonzekerheidsfactor onderscheid te maken voor situaties met opdrukken. In het Arcadis onderzoek (Paragraaf 3.3) en het WTI onderzoek (Paragraaf 3.4) zijn situaties met en zonder opdrukken geanalyseerd. De resultaten van deze onderzoeken laten geen duidelijke verschillen tussen deze situaties zien. Dit sluit ook aan bij de bevindingen van Azzouz et al (1983) dat er geen aanleiding is om onderscheid te maken in drie-dimensionale effecten (of kopvlak-effecten) bij grote of kleine schuifvlakken. Op dit punt wijken de voorgestelde modelonzekerheidsfactoren af van de vigerende modelonzekerheidsfactoren.
- Voor situaties met opbarsten (met sterktereductie) geldt dat het Spencer-Van der Meij-model minder geschikt is. Voor deze situaties heeft het LiftVan-model de voorkeur. Een afwijkende modelfactor voor het Spencer-Van der Meij-model voor situaties met opbarsten is daarom niet afgeleid.

Gegeven de bovenstaande conclusies en aanbevelingen kunnen de modelonzekerheidsfactoren volgens Tabel 6.1 worden toegepast.

Model	Totale modelonzekerheid		Model-factor
	$\mu_d$ [-]	$\sigma_d$ [-]	$\gamma_d$ [-]
Bishop	1,025	0,050	1,12
LiftVan	1,005	0,033	1,07
Spencer-Van der Meij	1,008	0,035	1,07
Model horizontaal evenwicht	--	--	1,20
EEM - Mohr Coulomb	--	--	1,07

Tabel 6.1 Modelonzekerheidsfactoren met standaardafwijkingen en modelfactoren voor de verschillende schuifvlakmodellen, uitgaande van ongedraineerde schuifsterkte parameters en een betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$ .

In Tabel 6.1 zijn de modelonzekerheidsfactoren met standaardafwijkingen en modelfactoren voor de verschillende modellen samengevat. De modelonzekerheidsfactoren voor de schuifvlakmodellen Bishop, LiftVan en Spencer-van der Meij zijn gebaseerd op de analyses in het voorliggende rapport. De modelfactoren voor het Model horizontaal evenwicht en voor Eindige Elementen Modellen (EEM) zijn overgenomen uit het concept Technisch Rapport Macrostabiliteit (Rozing et al, 2013) (zie Tabel 4.1). Voor de modelfactoren voor het Model horizontaal evenwicht en voor Eindige Elementen Modellen (EEM) zijn in het voorliggende rapport geen analyses uitgevoerd, omdat deze modellen niet in RingToets worden geïmplementeerd. EEM kunnen worden toegepast in de Toets op maat (toetslaag 3). Vanwege de resultaten van de bepaling van de modelonzekerheidsfactoren voor de schuifvlakmodellen Bishop, LiftVan en Spencer-van der Meij is de modelfactor voor EEM ook verhoogd naar 1,07. Op voorhand kan niet zondermeer worden gesteld dat EEM altijd beter presteren dan de glijvlakmodellen. Dit hangt onder andere af van het gekozen constitutieve model en van de gekozen mesh. Desgewenst kan de modelfactor voor EEM worden

geoptimaliseerd, zoals ook aangegeven in het concept Technisch Rapport Macrostablieit (Roziing et al, 2013).

De in Tabel 6.1 genoemde modelfactoren zijn gebaseerd op een betrouwbaarheidseis  $\beta_{eis,dsn} = 4,8$  en een invloedscoëfficiënt  $\alpha$  van 0,39. Dit sluit aan op de voorlopige kalibratie (Jongejan et al, 2014). Wanneer de definitieve kalibratie voor het WTI 2017 daartoe aanleiding geeft, kunnen de modelfactoren met formule 4.1 worden aangepast voor een andere betrouwbaarheidseis of invloedscoëfficiënt.

De modelfactoren in dit rapport zijn afgeleid ten behoeve van toepassing voor primaire waterkeringen binnen het WTI2017. Voor overige toepassingen (zoals ophoogfasering uitvoering, meerdijken/permanent waterkerende keringen) zijn mogelijk afwijkende modelfactoren nodig.

De modelfactoren zouden met 0,01 of 0,02 verlaagd kunnen worden wanneer handmatig naar het maatgevende glijvlak wordt gezocht in plaats van automatisch. Dit vereist wel voldoende ervaring van de gebruikers.

## 7 Referenties

Azzouz, A.S., Baligh, M.M., and Ladd, C.C. (1983). "Corrected field vane strength for embankment design." J. Geotech. Eng., ASCE, 109(5), 730-734.

Bijlsma, E., Oudkerk, R., Tenhage, N. (2013). Stabiliteitsberekeningen methode Spencer. Arcadis rapportnummer: C03011.000181.0300. 13 september 2013.

Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5: p. 7-17.

Burland, J., T. Chapman, H. Skinner, M. Brown. 2012. ICE manual of geotechnical engineering – Volume 1: Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation. ICE Publishing. Thomas Telford.

Calle, E.O.F. (1997). IJpunt Marsroute TAW, Case Hoeksewaard (modelfactor macrostabiliteit), GeoDelft, rapport CO-367060/30, januari 1997.

Calle, E.O.F. en Van Duinen, T.A. (2012). Modelonzekerheidsfactor macrostabiliteit voor VNK. Deltares notitie met kenmerk 1205631-000-GEO-0004 van 17 april 2012.

Christian, J.T., Ladd, C.C. and Baecher, G.B. (1994). RELIABILITY APPLIED TO SLOPE STABILITY ANALYSIS. J. Geotech. Engrg. 1994.120:2180-2207.

Van Duinen, T.A. (2010). SBW Werkelijke sterkte van dijken - validatie WS15 - Synthese resultaten stabiliteitsanalyses onderzoekslocaties. Deltares rapport 1202121-003-GEO-0022, Versie 1, 7 september 2010, concept.

Van Duinen, T.A. (2013). Back analyses of dikes that withstand a high water level. Deltares memo 1206015-000-GEO-0006, 18 March 2013.

Van Duinen, T.A. en Van Hemert, H. (2013). Stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte voor regionale waterkeringen. Geotechniek Special December 2013.

ENW (2012). Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. Oktober 2012.

Jongejan, R.B. (2012). Kalibratie semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor macrostabiliteit binnenwaarts. Deltares. 1206006-006-ZWS-0004.

Jongejan, R., Van Duinen, T.A., Kuiper, B., Vastenburg, E. (2014). WTI2017 Beoordeling macrostabiliteit met ongedraineerd materiaalmodel - Probabilistische analyse en voorlopige veiligheidsfactoren. Deltares rapport 1207808-001-GEO-0004, Versie 01, 7 augustus 2014, definitief.

Ladd, C.C. and DeGroot, D.J. 2004. Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. Prepared for 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA USA. June 22 – 25, 2003. April 10, 2003. Revised: May 9, 2004.

Van der Meer, M.T., Kapinga, H.S.O., Calle, E.O.F. (2008). Achtergrond materiaalfactoren rivierdijken. Fugro. Opdrachtnummer 1207-0055-000.

Van der Meij, R. (2012). Afschuiving langs een vrij glijvlak. Geotechniek, Januari 2012.

Van der Meij, R. en Van, M.A. (2013). Dijken op Veen II – rekenmodel. Deltares rapport 1208254-028-GEO-0001, Versie 02, december 2013.

Rozing, A.P.C., Zwanenburg, C., Van Duinen, T.A., Calle, E.O.F., Hofland, B. (2013). Technisch Rapport Macrostablieit. Deltares rapport 1204203-007-GEO-0007, Versie 3, 10 december 2013, concept.

Spencer, E. (1967). A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. Geotechnique, 1967. 17: p. 11-26.

Taccari, M.L. (2014). WTI-2017 – Analysis and Improvement of the Automatic Search Area Procedure. Traineeship Report. November 2014.

Terzaghi, K., R.B. Peck and G. Mesri (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Wu, Tien. H. (2008). Reliability analysis of slopes. In: Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications. Editor Kok-Kwang Phoon. Taylor & Francis. ISBN 978-0-415-39630-1.

