


# Blauwdruk EEM

POV-Macrostabiliteit  
Definitief

POV

MACRO  
STABILITEIT



**Auteur:** Cor Zwanenburg  
**Datum:** juni 2016

**Versie:** 1

#### Trefwoorden

POV-Macrostablieit, EEM, stabiliteitsschermen, materiaalmodellen, veiligheidsfilosofie

#### Samenvatting

De POV-Macrostablieit heeft tot doel alternatieve dijkversterkingsmethoden verder te ontwikkelen. Belangrijk hierbij is dat er rekentechnieken beschikbaar zijn voor een eenduidig ontwerp en toetsing van de dijkversterking. Voor veel van de alternatieve versterkingstechnieken ligt het gebruik van EEM technieken in het ontwerp voor de hand. In de verschillende deelonderzoeken van de POV-M wordt dit nader uitgewerkt. Om te voorkomen dat in de verschillende onderzoeken tegenstrijdige keuzes met betrekking tot het gebruik van EEM technieken worden gemaakt geeft de blauwdruk een overkoepelende visie hoe met EEM methoden in het ontwerp van dijken zou moeten worden omgegaan. Tevens wordt aangegeven welke stappen nodig zijn om dit te bereiken.



Als toekomstvisie worden op hoofdlijnen twee ontwikkelingen gezien. De eerste is de ontwikkeling van een eenduidige **veiligheidsfilosofie** voor het toepassen van EEM in dijkversterkingsprojecten. De tweede is het verder ontwikkelen van **materiaalmodellen**.

Het grootste knelpunt in het gebruik van EEM technieken in dijkversterkingen wordt gevormd door de huidige voorschriften en richtlijnen die zijn gebaseerd op het gebruik van LEM. Hierdoor wordt onvoldoende recht gedaan aan de mogelijkheden die EEM modellen bieden en de beperkingen die deze modellen kennen. Daarnaast bestaat de wens het modelleren van het grondgedrag te verbeteren. Er is een set componenten gedefinieerd waaruit een materiaalmodel idealiter zou zijn opgebouwd. Echter een model dat al deze componenten omvat zal naar verwachting te complex zijn voor het gebruik in de adviespraktijk. In plaats daarvan wordt voorgesteld het vervolgonderzoek te richten op praktisch toepasbare modellen die voor deelaspecten kunnen worden ingezet. De set componenten waaruit een materiaalmodel idealiter zou zijn opgebouwd, geldt daarbij als referentie voor het toepassingskader van de praktisch toepasbare modellen.

#### Referenties

201510438/332805

Project 1220505-001-GEO-0016

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juni 2016	Cor Zwanenburg		Cristina Jommi		Leo Voogt	

#### Status

definitief



*juni 2016, definitief*

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel van de blauwdruk EEM	1
1.3 Opzet van de blauwdruk	2
<b>2 Relatie met POV-M</b>	<b>3</b>
<b>3 Uitkomsten expertsessies</b>	<b>5</b>
3.1 Toelichting Expertsessies	5
3.2 Stand van zaken	5
3.3 Lange termijn visie	6
<b>4 Uitwerking</b>	<b>9</b>
4.1 Toelichting	9
4.2 Korte termijn	9
4.3 Lange termijn ontwikkeling	12
4.3.1 Modelleren sterktegedrag	12
4.3.2 Modelleren vervormingsgedrag	12
4.3.3 Modelleren constructiegedrag	13
4.3.4 Veiligheidsfilosofie	14
4.3.5 Validatie	17
 <b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Voorbereiding eerste expertmeeting</b>	<b>A-1</b>
<b>B Voorbereiding tweede expertsessie</b>	<b>B-1</b>
<b>C Voorbereiding derde expertsessie</b>	<b>C-1</b>
<b>D Verslag vooroverleg</b>	<b>D-1</b>
<b>E Verslag eerste expertsessie</b>	<b>E-1</b>
<b>F Verslag tweede expertsessie</b>	<b>F-1</b>
<b>G Verslag derde expertsessie</b>	<b>G-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Het onderzoeksprogramma POV-Macro stabiliteit, POV-M, richt zich op alternatieve versterkingsmethoden van dijken in relatie tot het faalmechanisme Macro stabiliteit. De POV-M is onderverdeeld in verschillende clusters. Een van deze clusters is de cluster rekentechnieken. De cluster rekentechnieken heeft tot doel de introductie van nieuwe versterkingsmethodieken te faciliteren door het beschikbaar maken van de rekentechnieken en ontwerpprocedures.

Recent is, in het kader van het Rijkswaterstaat programma WBI en in het onderzoeksproject Dijken op Veen, DoV, een werkwijze ontwikkeld voor het uitvoeren van sterkteberekeningen van dijken gebaseerd op ongedraineerde sterkte eigenschappen. Deze werkwijze is gericht op het gebruik van LEM zoals methode Bishop, LiftVan en Spencer. Waarbij het WBI zich specifiek richt op het toetsen van waterkeringen. Omdat de ontworpen dijkversterking in een later stadium, na gereedkomen van de versterking, ook getoetst moet kunnen worden, is het van belang dat de rekentools die in het POV-M onderzoek worden ontwikkeld aansluiten bij de ontwikkelingen in het WBI.

Een aantal van de alternatieve versterkingsmethoden bestaat uit het aanbrengen van constructieve elementen. Voor het goed modelleren van de interactie tussen grond en constructie wordt veelal gebruik gemaakt van de eindige elementen methode. Dit in tegenstelling tot de analytische glijvlakmodellen, die voor dijken zonder constructies, groene dijken, over het algemeen worden gebruikt. De analytische glijvlakmodellen, zoals methode Bishop, LiftVan en Spencer, zijn hierna aangeduid met Limit Equilibrium Methods, LEM.

Ten opzichte van de recent uitgevoerde onderzoeksprojecten komen hiermee op hoofdlijnen twee nieuwe onderwerpen naar voren. Het eerste onderwerp is de aansluiting van het ontwerpen van dijkversterkingen met EEM technieken op de ontwikkelingen, die recent voor glijvlakanalyses in het kader van het toetsen van waterkeringen, zijn uitgewerkt. Het tweede onderwerp is het ontwerpen van constructies in dijken, waar de eerder genoemde onderzoeksprogramma's WBI en DoV vooral zijn ingegaan op groene dijken.

Om richting te geven aan het onderzoek, dat in de verschillende onderdelen van het POV-M wordt uitgevoerd, is voorgesteld voorafgaand aan het onderzoek een gezamenlijke visie met betrekking tot het gebruik van EEM technieken in het ontwerp van dijkversterkingen vast te stellen. Door een gezamenlijke visie vast te stellen wordt de kans dat de resultaten van de afzonderlijke POV-M onderdelen niet op elkaar aansluiten geminimaliseerd.

## 1.2 Doel van de blauwdruk EEM

Het doel is te komen tot een eenduidig en optimaal gebruik van EEM technieken in het ontwerpen van dijkversterkingen inclusief constructies. De blauwdruk geeft een toekomstvisie voor de toepassing van de EEM in het ontwerp van dijkversterkingen. Tevens beschrijft het welke stappen nodig zijn om dit te bereiken. In de POV-M worden in verschillende deelonderzoeken optimalisaties in het ontwerp van constructies onderzocht. De blauwdruk heeft tot doel een overkoepelend raamwerk te bieden, waarbinnen het gebruik van EEM technieken binnen de deelonderzoeken op vergelijkbare wijze kunnen worden ingezet en berekeningsresultaten op vergelijkbare wijze worden getoetst.

### 1.3 Opzet van de blauwdruk

De blauwdruk is op basis van een drietal expertsessies ontwikkeld. In de eerste expertsessie is ingaan op het rekenen aan dijken in algemene zin. De tweede expertsessie was gewijd aan het rekenen aan constructies. De derde sessie was specifiek gericht op de inpassing in de veiligheidsfilosofie voor dijken. Voorafgaand aan de drie sessies is een extra sessie belegd waarin is gesproken over de beschikbare materiaalmodellen. Dit vooroverleg heeft geresulteerd in de ontwikkeling van een materiaalmodel, dat aansluit bij de ontwikkelingen voor het berekenen van de sterkte van dijken, met name ten aanzien van ongedraineerde sterkte van de grond.

Voorafgaand aan elk van de drie sessies is ter voorbereiding een discussiestuk opgesteld aan de hand waarvan de discussie werd gevoerd. Na afloop is van elke sessie een verslag gemaakt. De discussiestukken en de verslagen zijn opgenomen in de bijlagen.

De blauwdruk geeft een korte samenvatting van de discussie van de sessies, maar richt zich vooral op de gewenste ontwikkelingen. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de onderwerpen die in de POV-M, in relatie tot EEM technieken reeds spelen. Hoofdstuk 3 geeft een korte samenvatting van de huidige stand van zaken en geeft kort samengevat een toekomstvisie. Hoofdstuk 4 geeft een eerste aanzet voor het nader uitwerken van het benodigd onderzoek om de toekomstvisie te realiseren.

De POV-M richt zich op de combinatie dijklichaam en (langs)constructie, zoals stabiliteitsschermen en niet op kunstwerken zoals sluizen. Wanneer in de onderstaande tekst constructies wordt genoemd wordt dan ook **niet** gerefereerd aan kunstwerken, maar aan (langs)constructies die in combinatie met het dijklichaam voldoende waterkerend vermogen dienen te waarborgen.

## 2 Relatie met POV-M

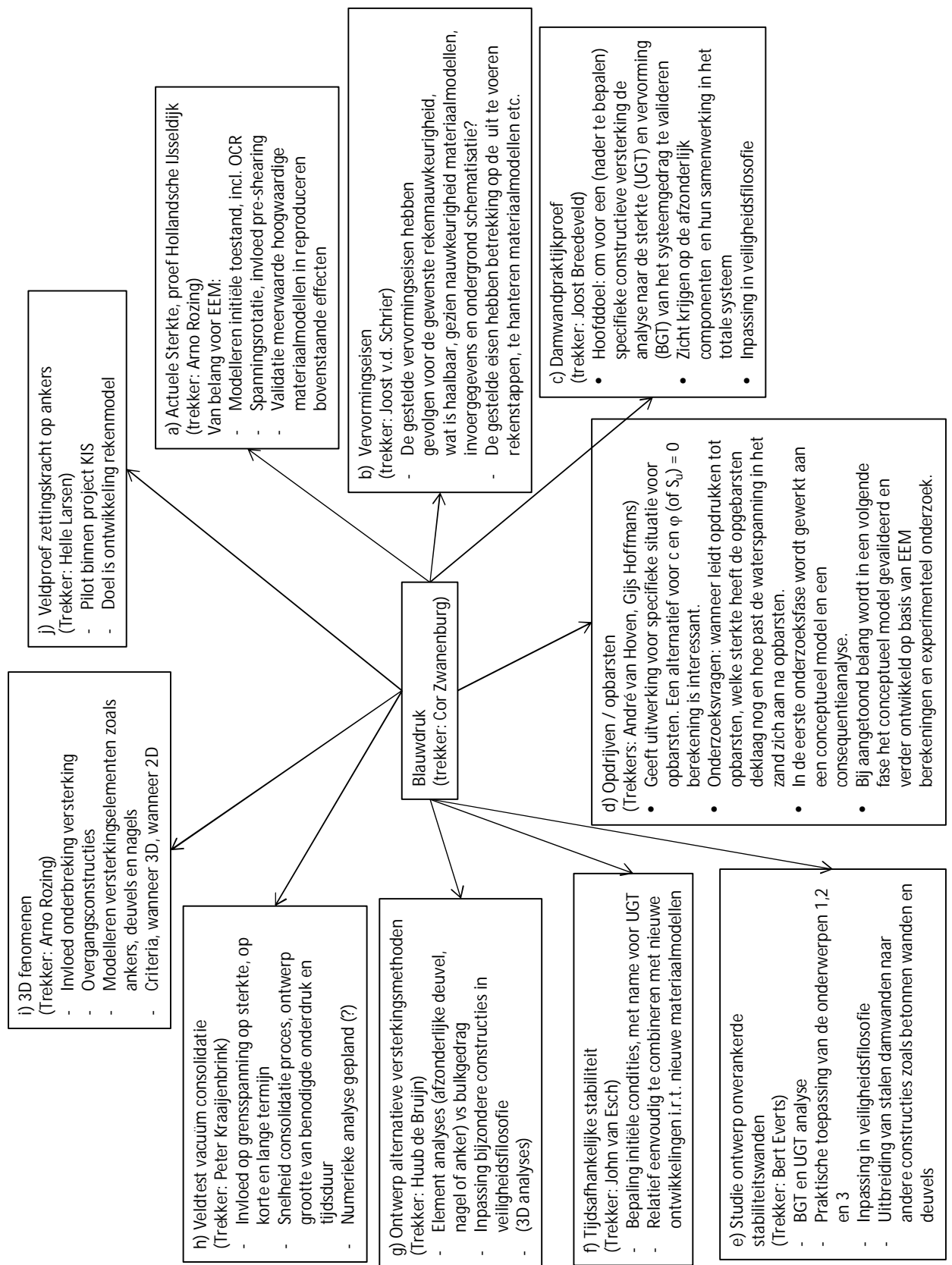
In hoofdstuk 1 is toegelicht dat in POV-M een aantal ontwikkelingen op het gebied van alternatieve dijkversterkingstechnieken wordt uitgewerkt. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de onderwerpen die reeds in de POV-M zijn voorzien en waar EEM analyses een rol spelen. Dit zijn de onderwerpen waarvoor de blauwdruk een overkoepelend raamwerk wil bieden waarbinnen EEM analyses kunnen worden toegepast. Benadrukt wordt dat het overzicht van onderwerpen de stand van zaken betreft van voorjaar 2016. Het is mogelijk dat later nieuwe onderzoeksprojecten worden gedefinieerd.

In totaal zijn er, binnen POV-M, 10 activiteiten waarin EEM analyses een rol spelen:

- a) Actuele Sterkte, veldproef op de Hollandsche IJsseldijk.
- b) Opstellen vervormingseisen.
- c) Damwandpraktijkproef.
- d) Onderzoek naar het modelleren van opdrijven / opbarsten.
- e) Studie naar het ontwerp van onverankerde stabiliteitswanden.
- f) Tijdsafhankelijke stabiliteit.
- g) Ontwerp alternatieve versterkingsmethoden.
- h) Veldproef vacuüm consolidatie.
- i) 3D fenomenen.
- j) Veldproef invloed zakkende grond op ankers.

Figuur 2.1 geeft een korte toelichting op de belangrijkste onderzoeksvragen, met betrekking tot EEM analyses, die in die activiteiten een rol spelen.

In Figuur 2.1 vallen twee punten op. Het eerste punt is dat er veel aandacht is voor constructies, met name stabiliteitsschermen, in dijken. Dit past in de opzet van de POV-M waarin bewust is gekozen voor een focus op alternatieve versterkingsmethoden. Het tweede punt dat opvalt, is dat er meerdere veldproeven zijn gepland. Veldproeven, vooral wanneer de proef daadwerkelijk tot bezwijken wordt doorgezet, zijn zeldzaam. Dit biedt een unieke gelegenheid voor het valideren van rekentechnieken en methoden. Elk van de veldproeven is opgezet met een helder doel en onderzoekshypothese. Echter, verwacht mag worden dat de combinatie van de verschillende veldproeven de mogelijkheid biedt tot een verdere validatie van de ontwerpmethodieken dan alleen de validatie van het onderzoeksaspect waarvoor de proef is ontworpen.



Figuur 2.1 Schema relaties Blauwdruk EEM en overige onderdelen van de POV-M



## 3 Uitkomsten expertsessies

### 3.1 Toelichting Expertsessies

De expertcommissie is in totaal vier keer bijeen geweest. Elke bijeenkomst heeft in het teken gestaan van een onderwerp. De volgende bijeenkomsten en onderwerpen zijn aan de orde geweest:

- Vooroverleg op 14 december 2015, nieuw te ontwikkelen materiaalmodel.
- 20 januari 2016, materiaal modellen.
- 16 februari 2016, constructies.
- 1 maart 2016, inpassing in veiligheidsfilosofie.

Van elk overleg zijn de notulen opgenomen in de bijlagen. Daarnaast is voor elk van de reguliere overleggen een voorbereidende memo opgesteld. Deze zijn eveneens in de bijlagen opgenomen. Tijdens de bijeenkomsten is aan de hand van de voorbereidende memo's gediscussieerd over de verschillende onderwerpen. Aan de hand van de gespreksverslagen is een beeld gevormd van de stand van zaken en de benodigde ontwikkelingen. In de volgende paragrafen wordt dit beeld beschreven.

### 3.2 Stand van zaken

Het beeld dat uit de expertsessies naar voren kwam is dat EEM technieken een waardevolle toevoeging vormen aan de rekentechnieken die beschikbaar zijn voor het ontwerpen van dijkversterkingen. Dit geldt met name voor situaties waarin een constructie onderdeel van de dijkversterking uitmaakt. Voor het ontwerpen van constructies zijn weinig analytische alternatieven voorhanden en zijn EEM technieken feitelijk onmisbaar.

Het merendeel van de dijkversterkingen betreft groene dijken waarbij de versterking met behulp van LEM, methode Bishop, LiftVan en Spencer, wordt ontworpen. De trajecten waar constructies nodig zijn, zijn relatief beperkt van omvang, maar betreffen wel de trajecten waar het meest intensieve rekenwerk nodig is. Omdat, van oudsher, de nadruk van het ontwerpen ligt op het gebruik van analytische modellen worden EEM technieken vaak in het verlengde van analytische modellen toegepast. Hier ligt het grootste knelpunt. De vigerende veiligheidsfilosofie en bijbehorende ontwerprichtlijnen zijn gebaseerd op de mogelijkheden en beperkingen van LEM. EEM technieken kennen andere mogelijkheden en beperkingen. Hierdoor kan een EEM analyse niet eenvoudig in de vigerende richtlijnen worden ingepast. Als voorbeeld van het verschil in mogelijkheden wordt genoemd het berekenen van vervormingen. In het ontwerp van constructies worden ook eisen gesteld aan vervormingen. Met de LEM-analyses kunnen geen vervormingen worden berekend. Het gevolg hiervan is dat de wijze waarop vervormingen, die met EEM modellen zijn berekend, worden getoetst ter discussie staat. Daarnaast leidt het gebruik van partiële veiligheidsfactoren, die voor LEM-analyses zijn afgeleid, tot discussie over het uiteindelijke resultaat van de EEM-analyse. Hetzelfde geldt voor het gebruik van restprofielen en de wijze waarop de evenwichtsfactor wordt bepaald. Daarnaast kent de veiligheidsfilosofie een lange historie waarbij sommige factoren nog aansluiten bij werkwijzen en methoden uit het verleden. De ontwikkeling van een veiligheidsfilosofie specifiek voor het gebruik van EEM geeft de mogelijkheid hierin op te schonen.

Op hoofdlijnen dient er geen verschil in eisen te zijn die aan een groene dijk en aan een met constructie versterkte dijk worden gesteld. Echter de indruk bestaat dat dit verschil er wel is.

Het verschil zou zijn ontstaan in de wijze waarop de veiligheidsfilosofie is uitgewerkt waarbij voor groene dijken glijvlakanalyses worden toegepast en EEM analyses voor dijken die met een constructie worden versterkt.

De huidige werkwijze van het toepassen van EEM analyses in het ontwerpen van dijkversterkingen is vastgelegd in het Technisch Rapport EEM, TREEM en de Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen. Daarnaast is er nog een ontwerprichtlijn zelfstandig waterkerende constructies opgesteld. De analyses die ten grondslag liggen aan het TREEM en de Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen zijn gebaseerd op berekeningen met het Mohr-Coulomb model. Inmiddels zijn meer geavanceerde materiaalmodellen beschikbaar voor de ingenieurspraktijk. Naar verwacht zou het toepassen van deze meer geavanceerde modellen moeten leiden tot nauwkeurigere berekeningen en daarmee tot een meer optimaal ontwerp. In hoeverre het TREEM en Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen toepasbaar zijn bij gebruik van andere materiaalmodellen is onduidelijk. Tevens zijn beiden gericht op constructies in de vorm van een stalen damwand terwijl ook andere constructietypen en materialen toegepast (kunnen) worden.

### 3.3 Lange termijn visie

Uit de expertmeetings volgde een grote hoeveelheid onderwerpen waarvoor optimalisatie wenselijk of noodzakelijk is. Uit deze onderwerpen volgt een globaal beeld van het einddoel van de gewenste ontwikkelingen op het gebied van het toepassen van EEM technieken in het ontwerp van dijkversterkingen. De lange termijn visie die volgt uit de expertmeetings valt uiteen in twee onderwerpen.

Het eerste onderwerp is het ontwikkelen van een **veiligheidsfilosofie** specifiek voor het gebruik van EEM in het ontwerp van dijkversterkingen. De huidige veiligheidsfilosofie voor het ontwerpen van dijkversterkingen gaat uit van het gebruik van LEM. EEM technieken hebben andere mogelijkheden en beperkingen dan LEM. Dit heeft tot gevolg dat het inpassen van EEM technieken in de huidige veiligheidsfilosofie niet altijd eenduidig is. Met betrekking tot de veiligheidsfilosofie is de uiteindelijke, totale, veiligheid waarop het ontwerp wordt gebaseerd van belang. Dit houdt in dat niet zozeer losse onderdelen uit de veiligheidsfilosofie moeten worden geoptimaliseerd, maar dat de afzonderlijke onderdelen in relatie tot het totaal moeten worden geoptimaliseerd.

Het tweede onderwerp is **optimaal modelleren grondgedrag**. In de huidige Nederlandse praktijk wordt, in het merendeel van de ontwerpberoevingen voor dijkversterkingen, gebruik gemaakt van het Mohr-Coulomb of het Hardening soil model. Inmiddels zijn meer geavanceerde modellen beschikbaar, waardoor grondgedrag beter kan worden gemodelleerd. Tevens is voor stabiliteitsanalyses met behulp van glijvlakmodellen de overstap gemaakt naar een ongedraineerde aanpak binnen het raamwerk van critical state soil mechanics. Voor een goede aansluiting is het wenselijk om een vergelijkbare aanpak met EEM technieken te volgen. Het optimaal modelleren van grondgedrag bestaat enerzijds uit het zo goed mogelijk beschrijven van het grondgedrag en anderzijds uit het toepasbaar maken van praktische modellen. Dit is enigszins met elkaar in tegenspraak. Het opstellen van materiaalmodellen die, vanuit academisch oogpunt, het grondgedrag optimaal modelleren kan leiden tot modellen waarvan de parameters niet eenvoudig eenduidig te bepalen zijn en daardoor in de praktijk niet goed toepasbaar zijn. Het verbeteren van het modelleren van het grondgedrag in het ontwerpen van dijkversterkingen vraagt om praktisch toepasbare modellen.

Voordat nieuwe, praktische toepasbare, modellen worden ontwikkeld is het van belang een goed beeld te vormen van de componenten waaruit een materiaalmodel, idealiter, zou moeten bestaan. Het zal, voorlopig, nog niet haalbaar zijn een praktisch toepasbaar model te ontwikkelen die al die componenten in voldoende mate bezit. De set van componenten is richting gevend en dient als referentie voor de ontwikkeling van de praktisch toepasbare modellen.

Het vervolgonderzoek dat in de blauwdruk wordt voorgesteld richt zich op de praktisch toepasbare modellen. Hierbij bestaat de mogelijkheid dat voor sterkteberekeningen en vervormingsberekeningen verschillende modellen worden of kunnen worden gebruikt. Dit beperkt de kans dat de afzonderlijke modellen (te) complex worden en zorgt ervoor dat de afzonderlijk modellen volledig kunnen worden gericht op hun toepassingsgebied.

De componenten waar een materiaalmodel idealiter over zou moeten beschikken zijn:

- Spanningsafhankelijke stijfheid / spanningspad afhankelijke stijfheid.
- Rekafhankelijke stijfheid.
- Gebaseerd op critical state concept.
- Rekeninghoudend met softening bij grote vervormingen.
- Rekeninghoudend met anisotropie in stijfheidseigenschappen.
- Spanningspad afhankelijke sterkte eigenschappen; anisotropie in sterkte eigenschappen.
- Rekening houdend met kruip, inclusief deviatorische kruip.
- Geschikt voor zowel normaal als overgeconsolideerd gedrag.
- Hoge nauwkeurigheid bij het narekenen van zowel sterkte -, als vervormingsproeven onder verschillende spanningspaden.
- Geschikt voor het toepassen van grote vervormingen.
- Rekening houden met het verschil tussen de axiaal symmetrische condities waaronder de parameters veelal worden bepaald en de plane strain condities waarvoor berekeningen worden uitgevoerd.

De laatste twee bovengenoemde punten zijn wellicht niet zozeer onderdeel van het materiaalmodel als wel de wijze waarop de EEM analyse wordt uitgevoerd.

Bij het ontwikkelen van praktische modellen gaat het niet alleen om het ontwikkelen van nieuwe modellen, maar mogelijk ook om het valideren en praktisch toepasbaar maken van reeds ontwikkelde modellen. Opgemerkt wordt dat een praktisch toepasbaar model niet alleen over het model zelf gaat, maar ook over het gemak waarmee parameters of initiële condities kunnen worden opgegeven, de user interface. Als voorbeeld wordt genoemd het gebruik van POP of OCR om de grensspanning op te geven. Indien deze verloopt van onder de dijk naar het achterland is het onwenselijk de ondergrond in verschillende clusters op te moeten delen die elk hun eigen waarde voor POP of OCR krijgen.

Voor beide onderwerpen geldt dat validatie van de ontwikkelingen belangrijk is. In de POV-M zijn meerdere praktijkproeven gepland. Deze proeven bieden een goede basis voor validatie. De meetdata dient hiervoor breder te worden ingezet dan alleen voor het doel waar de veldproeven voor opgezet zijn.



## 4 Uitwerking

### 4.1 Toelichting

In de expertsessies en in aanvullende discussies kwam een groot aantal vragen en witte vlekken naar voren. De aard van deze vragen en witte vlekken verschilt sterk. Sommigen gaan over de praktische toepassing, anderen zijn fundamenteeler en richten zich op de theoretische achtergrond. Weer anderen richten zich op de huidige werkwijze of op mogelijke toekomstige aanscherpingen of verbeteringen. Elk van de onderwerpen valt onder de hoofddoelen, het komen tot een eenduidige veiligheidsfilosofie voor het gebruik van EEM technieken in het ontwerpen van dijkversterkingen danwel het verbeteren van het modelleren van grondgedrag.

Dit hoofdstuk geeft een verdere invulling aan het vervolgonderzoek aan de hand van de onderwerpen die zijn besproken in de expertsessies. Eerst wordt ingegaan op acties die op korte termijn kunnen worden uitgevoerd, in de orde van enkele maanden. Deze korte termijn acties hebben voornamelijk tot doel meer helderheid te krijgen in de tekortkomingen van de huidige werkwijze en enkele voorgestelde verbeteringen te beschouwen. De korte termijn acties worden besproken in paragraaf 4.2. De lange termijn acties worden besproken in paragraaf 4.3. De lange termijn acties hebben een looptijd gelijk aan de duur van het POV-M onderzoeksprogramma.

In deze paragraaf krijgen de vragen en witte vlekken, die in de expertsessies zijn benoemd, hun plaats. Om de veelheid aan onderwerpen te rangschikken zijn deze onderverdeeld in onderzoeksporen. De onderzoeksporen kunnen niet helemaal los van elkaar worden gezien. Ontwikkelingen in het ene spoor kunnen gevolgen hebben voor de resultaten in het andere spoor.

De volgende 5 onderzoeksporen zijn onderkend:

- 1 Modelleren sterktegedrag van grond.
- 2 Modelleren vervormingsgedrag van grond.
- 3 Modelleren constructiegedrag.
- 4 Uitwerken complete veiligheidsfilosofie voor het gebruik van EEM voor dijkversterkingen.
- 5 Validatie.

De onderzoeksporen 1 en 2 leiden tot het hoofddoel *verbeteren modelleren grondgedrag*. Naast het modelleren van grondgedrag zijn ook vragen omtrent het modelleren van constructiegedrag naar voren gekomen. Deze zijn ondergebracht in onderzoekspoor 3. Onderzoekspoor 4 leidt tot het hoofddoel *eenduidige veiligheidsfilosofie*. Voor alle sporen geldt dat validatie van de resultaten voldoende aandacht dienen te krijgen. Onderzoekspoor 5 is specifiek gericht op het valideren.

### 4.2 Korte termijn

#### a) Analyse veldproeven

Recent zijn in Nederland een viertal grote praktijkproeven in relatie tot de sterkte van dijken uitgevoerd. In deze proeven is een dijklichaam onder gecontroleerde omstandigheden tot bezwijken gebracht, waarbij het grondgedrag uitgebreid is gemonitord. Tevens is voor deze proeven een uitgebreid laboratoriumonderzoek uitgevoerd waardoor informatie over de lokale

grondeigenschappen beschikbaar is. In dit onderdeel worden de proeven geanalyseerd, nagerekend, met EEM berekeningen.

De analyses hebben enerzijds tot doel de huidige state of the art meer helder te krijgen en anderzijds de onderzoeksvragen die tijdens de expertsessies naar voren kwamen van voorbeelden te voorzien en daarmee te verduidelijken. Op basis van de analyses kunnen naar verwachting nadere richtlijnen voor de ontwerp praktijk, in de vorm van best practices, worden gegeven en het vervolgonderzoek nader worden ingevuld.

Bij de analyse van de veldproeven zijn de volgende punten van belang:

- De vergelijking van het berekende bezwijkvlak met het opgetreden bezwijkvlak.
- De vergelijking van de optredende bezwijkbelasting en het moment van bezwijken.
- De grootte van de vervormingen van het dijklichaam en ondergrond naar aanloop van bezwijken, zowel in horizontale als verticale richting.

De analyse kan stapsgewijs worden opgebouwd, hierbij zijn de volgende stappen voorzien:

#### Stap 1, huidige praktijk

In de huidige, dagelijkse, praktijk wordt voor het modelleren van het grondgedrag vaak het Mohr-Coulomb model, MC model, het Hardening Soil model, HS-model of het Hardening Soil small strain stiffness, HSS model, toegepast. De laatste wordt met name toegepast bij het ontwerpen van constructies. In de eerste stap worden het MC en HS model gebruikt voor het narekenen van de proeven. Hierbij worden vooraf, op basis van het beschikbare laboratorium -, en veldonderzoek parameters bepaald. Vervolgens worden de berekeningen uitgevoerd en de berekeningsresultaten vergeleken met de proefuitkomsten. In deze stap worden de grondeigenschappen niet geoptimaliseerd aan de hand van de proefdata.

Mocht na het activeren van de belasting, waarbij in de proef bezwijken is opgetreden, rekenkundig nog geen bezwijken zijn gevonden, dan worden de sterkte eigenschappen verlaagd tot bezwijken wordt gevonden. Het verlagen wordt op twee wijzen uitgevoerd. De eerste wijze is door middel van een  $\varphi$  - c reductie. De tweede wijze is door middel van een switch in materiaaleigenschappen waarbij de verlaagde eigenschappen worden geactiveerd. De resultaten worden vergeleken waarbij niet alleen de grootte van benodigde verlaging om tot bezwijken te komen van belang is, maar ook de vorm van het glijvlak.

#### Stap 2, validatie nieuwe materiaalmodellen voor sterkte

Ten einde het uitvoeren van ongedraineerde analyse te faciliteren is het SHANSEP model ontwikkeld. Daarnaast is ook het ACU model ontwikkeld voor het uitvoeren van ongedraineerde analyses. In deze stap worden beide modellen toegepast in het analyseren van de veldproeven. De modellen zijn primair ontwikkeld voor het uitvoeren van sterkteberekeningen. De nadruk in de validatie zal dan ook komen te liggen op het reproduceren van de bezwijkbelasting en de vorm van het glijvlak. De benodigde parameters voor de modellen worden primair uit het beschikbare grond -, en laboratoriumonderzoek bepaald. Indien na het activeren van de belasting waarbij in de proef bezwijken optrad rekenkundig geen bezwijken wordt gevonden, of indien voortijdige bezwijken wordt gevonden, worden de parameters geoptimaliseerd tot berekeningen en observatie overeenkomen.

#### Stap 3, validatie materiaalmodellen voor vervormingsberekeningen

Naast sterkte spelen ook vervormingen een rol. Mogelijk dat vervormingen, voorafgaand aan bezwijken, beter kunnen worden benaderd met andere modellen dan de modellen waarmee

de sterkte wordt berekend. In deze stap worden de vervormingen zo goed mogelijk benaderd. Hierbij wordt zowel gebruik gemaakt van de eerder genoemde Mohr-Coulomb en Hardening Soil model als het Soft Soil en Soft Soil Creep model. Mogelijk dat andere modellen hier aan worden toegevoegd.

Het resultaat van deze drie stappen zal worden samengevat tot een praktische richtlijn.

b) Variatiestudie uitgangspunten

Uit de expertsessies volgden enkele fundamentele punten waarop EEM analyses kunnen worden verbeterd. De invloed hiervan op het berekeningsresultaat is niet altijd even duidelijk. In dit onderdeel wordt een variatiestudie uitgevoerd om de invloed van de fundamentele punten op het berekeningsresultaat vast te stellen. Het betreft hier met name *5.3 initiële condities* en *5.4 grote rek analyses*. Beide onderwerpen zijn in de volgende paragraaf toegelicht.

c) Raamwerk veiligheidsfilosofie en rekenmethodiek voor EEM analyses

De vigerende veiligheidsfilosofie is voor LEM ontwikkeld en grotendeels overgenomen. De vraag is in hoeverre dit terecht is. Als voorbeelden wordt genoemd:

- De materiaalfactoren voor de parameters cohesie,  $c'$  en hoek van inwendige wrijving,  $\varphi'$  zijn overgenomen van de LEM-analyses terwijl onduidelijk is of de invloed van deze parameters op het berekeningsresultaat voor EEM analyses even groot is als voor LEM analyses.
- Er zijn geen materiaalfactoren voor de stijfheidseigenschappen die mogelijk wel een invloed hebben op de sterkteanalyse. Hierbij wordt opgemerkt dat vooral stijfheidsverschillen invloed hebben op de sterkteanalyse.
- Er zijn geen materiaalfactoren voor materiaalmodellen die de sterkte met andere parameters beschrijven.
- Verwacht mag worden dat het gebruikte materiaalmodel het berekeningsresultaat beïnvloedt. Echter, dit komt niet tot uitdrukking in de modelfactor.
- Er is consensus over alternatieven voor het gebruik van  $\varphi'$ -  $c'$  reductie zowel voor het bepalen voor de eindstabiliteit als voor het bepalen van de snedekrachten in een constructie. Echter deze alternatieven zijn nog niet uitgewerkt en het is nog niet duidelijk vastgelegd hoe dit in de totale veiligheidsfilosofie past.
- Voor sommige stabiliteitsconstructies is het restprofiel, het profiel na afgeschoven dijklichaam, een bepalend mechanisme voor het ontwerp. De wijze waarop het restprofiel moet worden geschematiseerd is nog aan discussie onderhevig en dient in combinatie met de zonering te worden gezien.

In dit onderdeel wordt een raamwerk van de veiligheidsfilosofie voor EEM analyses vastgesteld en tevens de acties vastgesteld om deze in te vullen. Hierbij horen zowel de berekeningen van de bezwijkproeven uit onderdeel *a* als de bezwijkproeven die in het POV-M onderzoek zijn gepland te worden betrokken.

Zoals eerder opgemerkt dient de veiligheidsfilosofie integraal te worden beschouwd. De veiligheidsfilosofie dient te leiden tot een werkwijze waarmee op eenduidige wijze kan worden aangetoond dat aan de topeis wordt voldaan. In de praktische uitwerking daarvan dienen de bovengenoemde punten een plaats te krijgen. Naast de hierboven genoemde punten wordt opgemerkt dat specifiek voor het ontwerpen van constructies factoren op snedekrachten en ankerkrachten worden toegepast. Deze dienen in de integrale beschouwing te worden meegenomen.



### 4.3 Lange termijn ontwikkeling

#### 4.3.1 Modelleren sterktegedrag

Het merendeel van de EEM berekeningen die in het ontwerpen van dijkversterkingen worden uitgevoerd gaan uit van het Mohr-Coulomb model of het Hardening Soil model voor het modelleren van grondgedrag. Inmiddels zijn nieuwere inzichten in het modelleren van grondgedrag beschikbaar. Het verbeteren van het modelleren van het sterktegedrag van grond leidt tot nauwkeurigere berekeningen en daarmee tot een meer optimaal ontwerp.

##### 1.a Sterkteberekeningen, aansluiting glijvlakmodellen

Recent is in het kader van het opstellen van het Wettelijk Beheers Instrumentarium, WBI, (voorheen WTI) een ontwikkeling doorgemaakt om het sterktegedrag van grond in sterkteberekeningen beter te benaderen. Deze ontwikkeling gaat uit van het critical state raamwerk. Daarbinnen is gekozen voor een ongedraineerde benadering van de sterkte van slechte doorlatende grondsoorten als klei en veen. Het is wenselijk om de sterkte berekeningen van dijken zo eenduidig mogelijk uit te kunnen voeren en dus ook met EEM berekeningen vergelijkbare analyses uit te kunnen voeren. Om vergelijkende EEM analyses te kunnen uitvoeren zijn daarvoor geschikte materiaalmodellen nodig. Hiervoor is een ontwikkeling gestart waarbij dergelijke materiaalmodellen worden ontwikkeld. In het vervolg onderzoek dienen deze modellen nader te worden gevalideerd, beschreven en toegelicht.

##### 1.b Sterkteberekeningen, Verdere ontwikkelingen materiaalmodellen

Aan de hand van de ervaringen met de ontwikkelingen uit onderdeel 1.1 kunnen de materiaalmodellen ten behoeve van de sterkteberekeningen verder ontwikkeld worden. Paragraaf 3.3 schetst een beeld welke componenten een materiaalmodel idealiter zou moeten beschrijven. Voor de verdere ontwikkeling van het sterktemodel wordt specifiek genoemd:

- Anisotropie in sterkte; Spanningsrotatie onder een talud heeft invloed op de sterkte van grond onder het talud. Een van de meerwaarden van het gebruik van EEM technieken ten opzichte van glijvlakmodellen is dat de spanningen en de bijbehorende spanningsrotatie in de analyse worden bepaald. Met een materiaalmodel dat de sterkte-anisotropie modelleert kan dit worden benut.
- Overgeconsolideerd gedrag; Een van de aspecten van het berekenen van de sterkte van waterkeringen is dat tijdens maatgevende omstandigheden als gevolg van indringen van buitenwater op enkele locaties in de geometrie de effectieve spanningen afnemen. Op die locaties in de geometrie wordt de sterkte bepaald door het (licht) overgeconsolideerde gedrag. Dit wijkt af van het berekenen van de sterkte van nieuw aan te brengen ophogingen waar een spanningstoename wordt gevonden als gevolg van het gewicht van de ophoging.

#### 4.3.2 Modelleren vervormingsgedrag

In het ontwerp van dijken met constructies worden ook eisen gesteld aan de optredende vervormingen. In het ontwerpen van dijkversterkingen zonder constructies is het niet gebruikelijk om de vervormingen, die tijdens maatgevende omstandigheden optreden te berekenen. Hierdoor is er nog beperkte ervaring met de wijze waarop de vervormingen het beste kunnen worden berekend. In het kader van het POV-M onderzoek wordt gewerkt aan het vaststellen van de eisen die aan berekende vervormingen moeten worden gesteld. Om aan te kunnen tonen dat aan de eisen wordt voldaan zijn de volgende onderwerpen van belang:

##### 2.a Materiaalmodel

Paragraaf 3.3 beschrijft de componenten van grondgedrag die, idealiter, door een materiaalmodel dienen te worden beschreven. Vanuit een ideaalbeeld wat een optimaal



materiaalmodel zou moeten kunnen, kunnen praktisch toepasbare modellen worden ontwikkeld met een specifiek toepassingsgebied. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen modellen waarmee vervormingsberekeningen worden uitgevoerd en modellen waarmee de sterkteberekeningen worden uitgevoerd.

### 2.b Nauwkeurigheid berekende vervormingen

Een belangrijk discussiepunt in het ontwerpen van stabiliteitswanden is de maximaal toelaatbare verplaatsing. In andere onderdelen van het POV-M onderzoek wordt de vervormingseis nader uitgewerkt. Naast de vervormingseisen die volgen uit de functioneringseisen van de waterkeringen kunnen vanuit beheer en onderhoud eveneens vervormingseisen worden gesteld.

Momenteel is niet duidelijk met welke nauwkeurigheid de vervormingen, verticaal en horizontaal, kunnen worden voorspeld met EEM methoden. Dit geldt zowel voor een groene dijk als een constructief versterkte dijk. Naar verwachting zal de nauwkeurigheid afhangen van het gebruikte materiaalmodel, de wijze waarop parameters worden bepaald, schematisatie, de historie etc. Opgemerkt wordt dat momenteel inzicht in de invloed van spanningscondities op de grootte van de stijfheden ontbreekt. Belangrijk is wel dat de eisen die aan maximale vervormingen worden gesteld in verhouding staan tot de nauwkeurigheid waarmee de vervormingen kunnen worden bepaald. Bij voorkeur is de nauwkeurigheid minimaal een orde kleiner dan de gestelde eis.

### 2.c Invloed kruip op berekeningsresultaat

In de huidige Nederlandse praktijk wordt geen rekening gehouden met de kruipgevoeligheid van grond. Voor het bepalen van de sterkte waarbij wordt gecontroleerd op relatief snel bezwijken is dit mogelijk terecht. Echter voor het bepalen van de ontwikkeling van dwarskrachten en momenten in een constructie gedurende de levensduur is dit mogelijk niet terecht. Weliswaar wordt in het ontwerp rekening gehouden met maaiveldafval. Maar het is onduidelijk of dit het effect van kruip in voldoende mate simuleert. Opgemerkt wordt dat niet alleen volumetrische kruip, maar ook deviatorische kruip van belang is bij het bepalen van de snedekrachten in constructies. Er zijn weinig modellen die deviatorische kruip (goed) kunnen modelleren.

#### 4.3.3 Modelleren constructiegedrag

Figuur 2.1 laat zien welk onderzoek in het kader van POVM in relatie tot het gebruik van EEM technieken lopen. Veel van de onderwerpen hebben betrekking op het schematiseren van het gedrag van constructies. De indruk bestaat dat op het gebied van het modelleren van constructiegedrag het onderzoek naar de belangrijkste witte vlekken reeds is voorzien, zie Figuur 2.1. Op dit vlak is het belangrijker de afstemming tussen de verschillende onderdelen te waarborgen. Twee onderwerpen worden specifiek benoemd. De eerste is de inpassing in de veiligheidsfilosofie. Omdat deze dient aan te sluiten bij de invulling van de veiligheidsfilosofie van groene dijken. De tweede is het modelleren van niet-stalen constructies.

### 3.a Materiaalmodel voor constructies

Het merendeel van de stabiliteitsverhogende constructies die in dijken wordt toegepast betreft stalen damwanden. Het gedrag van deze wanden wordt met een lineair elastisch materiaalmodel gemodelleerd. Voor andere constructiematerialen, bijvoorbeeld beton, is het wenselijk een meer geavanceerd model toe te passen. In het POVM onderzoek is een voorstel gedaan voor het opstellen van een model voor constructie materialen anders dan staal.

Daarnaast leeft de wens om in het ontwerp de mogelijkheid van het ontstaan van een plastisch scharnier in een (stalen) damwand toe te staan. Daarvoor zijn mogelijk aanpassingen van het materiaalmodel voor constructies noodzakelijk. Ook is kennisontwikkeling uit de damwandpraktijkproef, onderwerp 3 uit Figuur 2.1, hiervoor van belang.

#### 4.3.4 Veiligheidsfilosofie

De vigerende veiligheidsfilosofie voor dijken is oorspronkelijk ontwikkeld voor glijvlakmodellen. Vervolgens is deze ook toegepast op EEM analyses. De indruk bestaat dat hier optimalisaties mogelijk zijn. Zo is er één modelfactor voor EEM analyses ongeacht het toegepaste materiaalmodel. Echter, verwacht mag worden dat een meer geavanceerd materiaalmodel het grondgedrag beter beschrijft en dat daarom bij gebruik van een meer geavanceerd model een optimalisatie van de modelfactor mogelijk zou moeten zijn. Een ander voorbeeld zijn de materiaalfactoren. In EEM analyses worden de materiaalfactoren die zijn afgeleid voor glijvlakanalyses toegepast. Omdat parameters in een EEM analyse mogelijk een andere invloed op het eindresultaat kunnen hebben dan in glijvlakanalyses is niet duidelijk of dit terecht is. Zo zijn er geen materiaalfactoren voor stijfheidseigenschappen. In glijvlakanalyses doen deze er ook niet toe, echter in EEM analyses zijn deze, afhankelijk van het gebruikte model wel van invloed op de berekende sterkte. Daarnaast hebben verschillen in stijfheid tussen de verschillende grondlagen en tussen grond en constructie invloed op de sterkteberekening

In dit onderdeel wordt een consistente veiligheidsfilosofie opgezet voor het gebruik van EEM analyses waarbij rekening wordt gehouden met de mogelijkheden en beperkingen van EEM technieken.

Benadrukt wordt dat de totale veiligheid die door middel van de partiële veiligheidsfactoren in rekening wordt gebracht van belang is. Het is hier niet de bedoeling om op afzonderlijke onderdelen de eis aan te scherpen zonder het totaal in rekening gebrachte veiligheidsniveau uit het oog te verliezen. Voor dit onderdeel dient vooraf een raamwerk voor de veiligheidsfilosofie te worden opgezet. Door middel van het raamwerk wordt het benodigde overzicht gecreëerd. De onderstaande onderwerpen dienen in dit raamwerk een plaats te krijgen.

##### 4.a Gebruik materiaalmodellen, bepaling evenwichtsfactor

In de huidige, Nederlandse, praktijk van het ontwerpen van stabiliteitsschermen met EEM technieken wordt voor het beschrijven van het grondgedrag gebruik gemaakt van het Mohr-Coulomb model of het Hardening Soil model. Inmiddels zijn meer geavanceerde modellen beschikbaar die sommige aspecten van het grondgedrag beter beschrijven.

In het WBI en DOV project is een aanpak voor het bepalen van de stabiliteit van dijken uitgewerkt, die gebaseerd is op ongedraineerde sterkte-eigenschappen van dijk en ondergrond. Belangrijk hierbij is dat veel grondsoorten bij het ongedraineerd afschuiven een verandering van waterspanning laten zien, "*shear induced pore pressure*". Deze waterspanningsverandering leidt tot een verandering van maximaal te mobiliseren schuifweerstand en beïnvloedt daarmee de berekende sterkte. In het Mohr Coulomb model wordt dit gedrag niet gesimuleerd.

In de huidige Nederlandse praktijk wordt de evenwichtsfactor in EEM analyses bepaald door het uitvoeren van een  $\phi' - c'$  reductie. Hierbij worden de sterkte parameters gereduceerd totdat bezwijken van de constructie wordt gevonden. In een dergelijke berekening wordt geen rekening gehouden met de "*shear induced pore pressure*". In de bepaling van de  $\phi' - c'$  reductie wordt automatisch overgestapt naar het Mohr-Coulomb model. Hierdoor zullen die aspecten van het grondgedrag, die meer geavanceerde modellen beter beschrijven, niet

worden toegepast in de  $\varphi' - c'$  reductie. Hierdoor komen de geavanceerde modellen slechts beperkt tot hun recht.

Als alternatief voor het bepalen van een evenwichtsfactor kan het wisselen van de set materiaaleigenschappen worden toegepast. In het vervolgonderzoek dient dit te worden uitgewerkt tot een algemeen toepasbare methode waarmee op eenduidige wijze kan worden vastgesteld dat wordt voldaan aan de gestelde veiligheidseis.

Met name voor constructies geldt de wens te komen tot een eenvoudiger en eenduidiger stappenplan waarbij de toe te passen factoren zijn gerelateerd aan de faalkansbenadering.

#### 4.b Gebruik materiaalmodellen, materiaalfactoren

In de huidige Nederlandse praktijk van het berekenen van de sterkte van waterkeringen wordt gebruik gemaakt van een semi-probabilistische aanpak. In de semi-probabilistische aanpak is het gevraagde veiligheidsniveau opgesplitst in partiële veiligheidsfactoren. Een daarvan is de set materiaalfactoren. Voor het Mohr-Coulomb model zijn deze materiaalfactoren beschikbaar. Voor andere modellen waarbij de sterkte op andere wijze, met andere parameters, wordt beschreven zijn de materiaalfactoren niet beschikbaar. Dit belemmert het gebruik van nieuwe materiaalmodellen.

#### 4.c Gebruik restprofiel / zonerings

Voor sommige constructietypen wordt een maatgevende situatie gevonden nadat een deel van het grondlichaam is bezweken. In de ontwerpmethodologie wordt dus impliciet verondersteld dat de faalkans van het bezwijken van een deel van het grondlichaam gelijk is aan 1,0. Pas bij bezwijken van dit deel van het grondlichaam zal de constructieve sterkte (volledig) worden aangesproken. Het is lastig dit eenduidig in een EEM analyse te modelleren. In de huidige werkwijze wordt de geometrie handmatig aangepast. Er is nog veel discussie over de wijze waarop dit zou moeten.

Een mogelijke oplossingsrichting kan zijn MPM berekeningen uitvoeren voor een aantal karakteristieke doorsneden. Deze berekeningen geven inzicht in de vorm van de geometrie van het restprofiel. Vervolgens kan een veiligheidsniveau van het restprofiel worden bepaald. Hierbij gelden wel de opmerkingen onder onderwerp 4.a. Uit de berekeningsresultaten van de MPM analyses kunnen vervolgens algemene richtlijnen worden gegeven voor het schematiseren van het restprofiel. Het restprofiel wordt vooral gebruikt bij situaties waar opdrijven of opbarsten optreedt. Dit onderwerp ligt daarmee dicht bij onderwerp *d* uit Figuur 2.1.

Enigszins hieraan verwant is het gebruik van zonerings. Niet elk bezwijkmechanisme die in een dwarsprofiel kan worden gevonden is even relevant. Voor LEM analyses is een methode gevonden om onderscheid te maken tussen bezwijkmechanisme die het waterkerend vermogen direct aantasten, bijvoorbeeld glijcirkels die door de kruin gaan en bezwijkmechanismen die niet direct het waterkerend vermogen aantasten, bijvoorbeeld glijcirkels die door de stabiliteitsberm gaan. Deze methode wordt aangeduid met zonerings. Deze is niet zondermeer in een EEM omgeving toe te passen. Immers in een EEM analyse wordt alleen het meest maatgevende bezwijkmechanisme gevonden. Voor het eenduidig en zinvol kunnen toepassen van zonerings in een EEM analyse zal een nieuwe werkwijze moeten worden ontwikkeld.

#### 4.d Inpassing veiligheidsfilosofie; Bepaling snedekrachten

In het ontwerp van stabiliteitsschermen dienen de dwarskrachten en momenten die tijdens maatgevende omstandigheden zich in de wand voordoen te worden gecontroleerd. Een controle berekening, met EEM, kent verschillende stappen die op verschillende wijzen kunnen worden doorlopen. Dit heeft gevolgen voor de grootte van de berekende momenten

en dwarskrachten. Hierbij speelt het volgende dilemma. Indien, in de berekening, eerst de constructie wordt geactiveerd en daarna de parameterset wordt gewisseld van verwachtingswaarden of karakteristieke waarde naar rekenwaarde zal als gevolg van deze wisseling van grondeigenschappen de damwand worden belast. Deze belasting is niet reëel. Immers in de natuur vindt een dergelijke wisseling niet plaats. Indien, in de berekening, eerst de wisseling van parameters wordt toegepast en daarna de constructie wordt geactiveerd vindt de onrealistische belasting van de wand niet plaats. Echter, er wordt een stabiliteitsscherm ontworpen omdat het beschouwde dwarsprofiel niet voldoet aan de gestelde stabiliteitseis. Dit heeft tot gevolg dat in de praktijk vaak na de parameters wissel instabiliteit wordt gevonden waardoor in de volgende stap het stabiliteitsscherm niet meer kan worden geactiveerd en optredende dwarskrachten en vervormingen kunnen worden gecontroleerd.

Momenteel is vanuit de expertgroep een eerste aanzet gegeven hoe met deze problematiek kan worden omgegaan. Deze aanzet bestaat eruit, indien voldoende sterkte beschikbaar is, eerst de materiaalswitch uit te voeren en daarna de constructie te activeren. Voor die situaties waarin minder sterkte aanwezig is, wordt voorgesteld de materiaalswitch in twee stappen uit te voeren. Na de eerste stap dient nog voldoende sterkte aanwezig te zijn dat instabiliteit niet optreedt waarna de constructie wordt geactiveerd en het resterende deel van de aanpassing van grondeigenschappen wordt doorgevoerd. Dit is echter een ad-hoc oplossing die voor lopende projecten een oplossing biedt. In het komende onderzoek dient dit verder te worden uitgewerkt en eventueel aangescherpt.

#### 4.e Invloed onzekerheden stijfheden

In de huidige praktijk zijn alleen voor de sterkte eigenschappen materiaalfactoren beschikbaar. Echter naast de sterkte parameters zijn ook de stijfheidsverschillen bepalend voor de stabiliteit. Daarnaast zijn de stijfheidsverschillen mede bepalend voor de snedekrachten in constructies. Omdat een verlaging van de stijfheid zowel een gunstige als een ongunstige invloed kan hebben op de berekende stabiliteit ligt het gebruik van materiaalfactoren voor de stijfheid niet voor de hand. Opgemerkt wordt dat een alternatief kan worden gevonden door variatieberekeningen uit te voeren met zowel een verhoogde als verlaagde stijfheid. Echter in veel gevallen zal een verschil in stijfheden bepalend zijn. Daarmee zou een eenvoudige variatie waarbij alle stijfheden tegelijkertijd worden verhoogd of verlaagd niet afdoende zijn. Tevens geldt dat de spanningsafhankelijkheid van stijfheden sterk niet lineair is. Hierdoor is het niet evident hoe in een probabilistische analyse met stijfheden en onzekerheden in stijfheden dient te worden omgegaan.

Omdat momenteel bij langsconstructies geen rekening wordt gehouden met een variatie in stijfheid kan het in rekening brengen van de onzekerheid leiden tot een verzwaring van de ontwerpeis. De vraag is in hoeverre dit terecht is en of er aanpassingen van de veiligheidsfilosofie op aspect noodzakelijk zijn.

#### 4.f Beschikbaarheid probabilistische tools

De gebruikelijke semi-probabilistische aanpak in het berekenen van de stabiliteit van dijken is een vereenvoudiging van een volledige probabilistische aanpak. In sommige toepassingen is de vereenvoudigde aanpak niet voldoende wordt teruggegrepen op een volledige probabilistische analyse. Daarnaast dient bij het ontwikkelen van een veiligheidsfilosofie bij gebruik van EEM analyses de daaruit voortvloeiende semi-probabilistische aanpak te worden gevalideerd met volledig probabilistische berekeningen. Momenteel zijn tools beschikbaar om probabilistische analyses uit te voeren. Echter, voor de praktische toepassing wordt aanbevolen deze door te ontwikkelen.

#### 4.3.5 Validatie

Het uitwerken van de bovengenoemde onderwerpen moeten leiden tot een verbeterde ontwerpprocedure van dijkversterkingen. Met verbeterd wordt bedoeld dat er meer recht wordt gedaan aan het werkelijke grondgedrag, dat er minder verborgen veiligheden zijn waarbij er een goede aansluiting is met de veiligheidsfilosofie zodat aantoonbaar wordt voldaan aan het gestelde veiligheidsniveau. Dit houdt in dat na het uitwerken van de bovengenoemde onderwerpen validatie van de uitkomsten nodig is. Op hoofdlijnen zijn er twee onderdelen waarop validatie noodzakelijk is. De eerste is het voldoende goed reproduceren van het materiaal -, of constructiegedrag en wisselwerking daartussen. De tweede is de inpassing in de veiligheidsfilosofie. Met name bij de laatste is het van belang dat niet zozeer op afzonderlijke onderdelen wordt geoptimaliseerd, maar dat de totale veiligheid die in de ontwerpprocedure wordt verwerkt, voldoet aan de gestelde eis.

##### 5.a Veldproeven

Figuur 2.1 geeft een overzicht van het gerelateerde onderzoek binnen de POVM. In het geplande onderzoek zijn meerdere veldproeven gepland. Deze veldproeven zijn bedoeld om bepaalde ontwerp uitgangspunten te valideren. Echter, deze proeven kunnen mogelijk breder worden ingezet. Ook voor die onderdelen waar geen veldproeven zijn gepland kan mogelijk gebruik worden gemaakt, van sommige delen van de uitgevoerde veldproeven.

Daarnaast zijn recent enkele grote praktijkproeven uitgevoerd; Praktijkproef Bergambacht, IJkdijk, Veldproeven Uitdam, bezwijkproef Leendert de Boerspolder etc. De meetdata van deze proeven kunnen worden gebruikt voor validatie van de verschillende onderdelen. Het gebruik van bestaande en nieuwe veldproeven wordt gezien als cruciaal om de protocollen voor EEM technieken te verbeteren.

##### 5.b Axiaal symmetrische proeven en plane strain schematisaties

Conventionele laboratoriumproeven worden uitgevoerd op axiaal symmetrische monsters. Bij de validatie dient in de berekeningen ook te worden uitgegaan van axiale symmetrie. Sterkteberekeningen van dijken worden echter plane strain uitgevoerd. Voor grond wordt voor plane strain condities andere sterkte gevonden dan voor axiaal symmetrische condities. De plane strain sterkte is hoger. Door gebruik te maken van sterkte parameters uit axiaal symmetrische proeven en die toe te passen in plane strain berekeningen wordt de waarde van de sterkte parameters conservatief ingeschat.

Er is beperkt inzicht in het verschil tussen de sterkte voor axiaal symmetrische condities en plane strain condities. Het beschikbare inzicht is gebaseerd op experimenteel onderzoek op zand en niet-humeuze klei. Het is wenselijk om voor veen en humeuze klei eveneens inzicht te krijgen in de verschillen tussen de sterkte voor axiaal symmetrie en plane strain.

##### 5.c Initiële condities

De ontwerpberekeningen die in deze blauwdruk centraal staan hebben betrekking op het versterken van bestaande dijklichamen. Deze dijklichamen hebben veelal een lange geschiedenis, met als gevolg wegzakken van het dijklichaam in de, over het algemeen, slappe ondergrond. Indien de ondergrond conform boringen en sonderingen wordt gemodelleerd wordt de ligging van de grondlagen weliswaar correct weergegeven, maar zaken als spanningsrotatie als gevolg van de zakking, ontwikkelde grensspanning etc. worden niet of minder goed gesimuleerd. Voor het correct simuleren van de initiële condities is de gehele geschiedenis van het dijklichaam van belang. Deze is over het algemeen niet bekend.

Bij het simuleren van de initiële condities over de fysische achtergrond van het ontwikkelen van een grensspanning. Is deze ontstaan door variaties in belasting of door aging en leidt tot verschillen niet alleen in de 1D, maar ook in de 3D spanningsruimte.

In dit onderwerp wordt nagegaan wat de invloed van de initiële condities op het eindresultaat is en hoe de initiële condities het best kunnen worden benaderd.

#### 5.d Grote rek analyses

Reguliere berekeningen zijn gebaseerd op relatief kleine vervormingen. Hierbij kunnen rekken worden gedefinieerd ten opzichte van de oorspronkelijk afmetingen. De vraag is in hoeverre dit terecht is, met name in die gebieden waar de ondergrond van het dijklichaam bestaat uit veen en humeuze klei. Naast de rek definitie speelt ook de (her)verdeling van spanningen een rol. Bij een sterk vervormende geometrie kan dit tijdens het vervormen wijzigen. De sterkte van grond wordt waarschijnlijk onderschat als vervormingen van de geometrie niet worden meegenomen.

De invloed van grote rek analyses wordt niet alleen rondom het bezwijkmoment bekeken, maar ook ten behoeve van het vaststellen van de initiële condities. Als vergelijking kunnen MPM berekeningen hier een rol spelen.

#### 5.e Vastleggen kennis en ervaring

Na afloop zal elk deel onderzoek een eindrapportage opleveren. Belangrijk hierbij is dat uit de bundeling van eindrapportages een eenduidige werkwijze ontstaat aan de hand waarvan dijkversterkingen kunnen worden ontworpen. Het eindresultaat van de afzonderlijke deelonderzoeken dient te worden verwerkt in nieuwe versie van het Technisch Rapport EEM, TREEM en Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen.



## **A Voorbereiding eerste expertmeeting**



## Memo

**Aan**  
expertcommissie blauwdruk EEM

<b>Datum</b> 14 januari 2016	<b>Kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0007	<b>Aantal pagina's</b> 9
<b>Van</b> Cor Zwanenburg	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 7290	<b>E-mail</b> cor.zwanenburg@deltares.nl

**Onderwerp**  
achtergrond notitie eerste bijeenkomst

---

## 1 Achtergrond

Het onderzoeksprogramma POV-Macrostablieit, POV-M, richt zich op alternatieve versterkingsmethoden van dijken in relatie tot het faalmechanisme Macrostablieit. De POV-M is onderverdeeld in verschillende clusters. Een van deze clusters is de cluster rekentechnieken. De cluster rekentechnieken heeft tot doel de introductie van nieuwe versterkingsmethodieken te faciliteren met beschikbaar maken van de rekentools ten behoeve van het maken van een ontwerp met de nieuwe versterkingsmethodieken.

Recent is in het kader Rijkswaterstaat programma Wettelijk Toets Instrumentarium, WTI en in het onderzoeksproject Dijken op Veen, DoV, een werkwijze ontwikkeld voor het berekenen van de stabiliteit van dijken gebaseerd op ongedraineerde sterkte eigenschappen. Deze werkwijze is gericht op het gebruik van analytische, limit equilibrium, methoden, LEM, zoals methode Bishop, LiftVan en Spencer. Waarbij het WTI zich specifiek richt op het toetsen van waterkeringen. Omdat de ontworpen dijkversterking in een later stadium, na gereedkomen van de versterking ook getoetst moet kunnen worden is het van belang dat de rekentools die in het POV- M worden ontwikkeld aansluiten bij de ontwikkeling in het WTI.

Een aantal van de alternatieve versterkingsmethoden bestaan uit het aanbrengen van constructieve elementen. Voor het goed modelleren van de interactie tussen grond en constructie wordt veelal gebruik gemaakt van eindige elementen methoden. Dit in tegenstelling van de analytische, LEM, methoden die voor groene dijken over het algemeen worden gebruikt en waar de WTI en DOV werkwijzen voor zijn ontwikkeld.

Samengevat; het rekencluster van de POV-M richt zich op de toepassing van eindig elementen methoden in het ontwerp van alternatieve dijkversterkingsmethodieken. In de toepassing wordt aansluiting gezocht met de ontwikkelingen die in WTI en DoV zich hebben voorgedaan met betrekking tot het gebruik van ongedraineerde sterkte eigenschappen voor analytische LEM toepassingen.

Met betrekking tot het rekenen met eindig elementen methoden aan dijken is reeds veel informatie beschikbaar. Ook naar het toepassen van ongedraineerde stabiliteitsanalyses met eindige elementen methoden is reeds veel onderzoek gedaan. Echter, als gevolg van de strenge eisen die worden gesteld aan de veiligheid van waterkeringen kan niet zondermeer worden gesteld dat alle ingrediënten beschikbaar zijn voor het maken van een betrouwbaar versterking ontwerp.



Om richting te geven aan het onderzoek dat in het POV-M wordt uitgevoerd is voorgesteld voorafgaand aan het onderzoek een gezamenlijke visie vast te stellen waarin wordt aangegeven wat we met EEM in het ontwerp van dijkconstructies willen bereiken en welke stappen nodig zijn om dat te bereiken. Deze visie wordt hierna aangeduid met blauwdruk EEM. De blauwdruk wordt in een drietal expertsessies ontwikkeld. De eerste expertsessie zal ingaan op rekenen aan dijken in algemene zin. Dit wordt in hoofdstuk 2 nader toegelicht. De tweede expertsessie zal gewijd zijn aan het rekenen aan constructies. De derde sessie zal specifiek ingaan op de inpassing in de veiligheidsfilosofie die voor dijken is opgesteld. In deze memo wordt nader ingegaan op enkele denkrichtingen die horen bij de eerste expertsessie.

## 2 Eerste sessie

In de eerste sessie zal worden nagegaan in hoeverre op dit moment met EEM analyses kan worden aangesloten op de werkwijze die in WTI en DoV is ontwikkeld voor analytische limit equilibrium methoden. Het betreft hier berekeningen van de stabiliteit in algemene zin, dus van een groene dijk, een dijk zonder specifieke aandacht voor constructies. Ter voorbereiding van de eerste sessie worden de volgende 5 punten genoemd en kort uitgewerkt:

### 1. *Materiaalmodel*

Bij ongedraineerd materiaalgedrag ontstaat niet alleen wateroverspanning als gevolg van veranderingen in isotrope spanningen, maar ook als gevolg van aangebrachte schuifvervorming. De ontwikkeling van wateroverspanningen is bepalend voor het effectieve spanningspad dat in de afzonderlijk spanningspunten in de berekening wordt doorlopen en daarmee maatgevend voor de uiteindelijke maximaal te mobiliseren schuifweerstand van de grond. De mate waarin de wateroverspanning wordt gegenereerd tijdens het ongedraineerd afschuiven is niet alleen afhankelijk van de grondsoort, maar ook van de belastingsgeschiedenis, de snelheid van belastingen en anisotropie in zowel grondeigenschappen als aangebrachte belasting. In een analytische LEM berekening worden deze effecten vooraf zo goed als mogelijk in geschat en verwerkt in de in de in rekening gebrachte sterkte eigenschappen. Dit kan onder andere door de ondergrond op te delen in blokken en aan de verschillende blokken verschillende sterkte eigenschappen toe te kennen.

Voor EEM kan een vergelijkbare benadering worden toegepast. Echter een van de meerwaarden van het gebruik van EEM is het gebruik van hoogwaardige materiaal modellen waarmee spanningspaden, inclusief de wateroverspanning als gevolg van opgelegde schuifvervorming wordt gesimuleerd. Het gebruik van dergelijke modellen voorkomt dat de invloed van de genoemde fenomenen foutief worden ingeschat, voorkomt tevens problemen met de overgangen van de gemodelleerde blokken of dat de indeling in verloop van sterkte eigenschappen niet blijkt te passen bij het uiteindelijk berekende glijvlak.

In de voorbespreking van 14 december jl is besloten een start te maken met een materiaalmodel dat geschikt is voor het gebruik van ongedraineerde analyses in EEM omgeving. Naast dit SHANSEP model zijn nog andere modellen in meer of mindere mate geschikt en beschikbaar voor het uitvoeren van ongedraineerde stabiliteitsberekeningen van dijken. In de bijlagen is een korte beschrijving van het SHANSEP model en een eerder uitgevoerde kleine inventarisatie van beschikbare modellen opgenomen. Met betrekking tot de materiaalmodellen worden de volgende discussiepunten genoemd:

- Beschikbare materiaalmodellen die geschikt zijn voor het simuleren wateroverspanning als gevolg van optredende schuifvervorming zijn ontwikkeld voor het modelleren van normaal geconsolideerd of licht overgeconsolideerd grondgedrag. Een typisch aspect van de stabiliteit van dijken is dat de sterkte van het dijklichaam en de ondergrond mede wordt bepaald door het indringen van buitenwater of stijging van de freatische lijn in het dijklichaam als gevolg van neerslag. De verhoging van de waterspanningen op sommige locaties in de geometrie leidt tot een verlaging van de effectieve spanning. Hierin wijkt de stabiliteitsanalyse van een bestaande dijk onder maatgevende omstandigheden af van de stabiliteitsanalyse van een nieuw aan te leggen ophoging ten behoeve van een (spoor)weg. In het laatste geval nemen de spanningen toe als gevolg van het aanbrengen van gewicht. Bij de stabiliteitsanalyse van bestaande dijken onder maatgevende omstandigheden veranderen totaal spanningen weinig en wordt lokaal een afname van effectieve spanning gevonden. Hiermee is een goede beschrijving van het over geconsolideerd gedrag in de toe te passen modellen van belang.
- Met name bij het ontwerpen van constructies in dijken zijn ook de berekende vervormingen van belang. Bij de Ultimate Limit State berekening bepalen de vervormingen de maatgevende momenten en bij de Serviceability Limit State zijn de berekende vervormingen een van de belangrijkste toetscriteria. Dit houdt in dat de modellen niet alleen de sterkte goed moeten benaderen ook de vervormingen, zowel horizontaal als verticaal, goed moeten kunnen berekenen. Wellicht dat sterkte berekeningen met andere materiaalmodellen moeten worden uitgevoerd dan vervormingsberekeningen.
- De slappe, organische, grondlagen die met name in het benedenrivierengebied veelvuldig aanwezig zijn kenmerken zich onder andere door een sterke kruipgevoeligheid. Er zijn weinig materiaalmodellen beschikbaar die kruip in rekening brengen. Voor stabiliteitsberekeningen is het goed modelleren van kruipgedrag geen of weinig belang. De vraag is of dit ook geldt voor het bepalen van de serviceability limit state van constructies in dijken.

## 2. Bepaling evenwichtsfactor

De laatste sessie omtrent het opstellen van de blauwdruk zal zich richten op de inpassing in de veiligheidsfilosofie. Essentieel hierbij is het aantonen van de marge tussen de gemobiliseerde schuifweerstand en de maximaal beschikbare sterkte. Traditioneel, voor dijken, wordt, in eindig elementen berekeningen, deze marge vastgesteld door middel van een sterkte reductie berekening. De sterkte reductie berekening leidt tot een evenwichtsfactor die kan worden getoetst aan een gestelde norm.

In een sterkte reductie berekening wordt geen rekening gehouden met de wateroverspanning die wordt gegenereerd tijdens het optreden van een schuifvervorming. Onduidelijk is in hoeverre hier een te hoge veiligheidsfactor wordt berekend. Onduidelijk is hoe voor hoogwaardige materiaalmodellen een sterkte reductie berekening zou moeten worden uitgevoerd.

In het Technisch Rapport Eindige Elementen Methoden, TREEM, wordt voorgeschreven om voor het uitvoeren van de sterkte reductie berekening van parameters te wisselen. Voorgeschreven is dat moet worden uitgegaan van associatief materiaalgedrag, dat wordt gesimuleerd met  $\varphi' = \psi$ . De achterliggende gedachte is dat de met associatief materiaalgedrag berekende evenwichtsfactor aansluit bij de evenwichtsfactoren die met analytische, limit equilibrium, methoden worden berekend. Hiermee wordt de inpassing van het rekenresultaat in de huidige veiligheidsfilosofie eenvoudiger. Vastgesteld dient te worden of bij gebruik van de

voorgestelde materiaalmodellen het eveneens nodig is om de sterkte reductie berekening met een set parameters dat associatief grondgedrag simuleert en hoe de benodigde parameters dan moeten worden vastgesteld.

### **3. Initiële toestand – berekening stabiliteit / berekenen veiligheid bij opdrijven**

De grootte van de ongedraineerde schuifsterkte wordt sterk bepaald door de heersende spanningen en spanningsgeschiedenis. Een correcte bepaling van de initiële spanningscondities voor het uitvoeren van de stabiliteitsanalyse is dan ook belangrijk. Het vaststellen van de initiële spanningscondities valt in twee delen uiteen:

- Het dijklichaam is reeds vele jaren tot soms honderden jaren aanwezig. Als gevolg van o.a. aging is in de loop der jaren de OCR in de ondergrond toegenomen. Daarnaast zijn de grondlagen onder het dijklichaam samengedrukt, waardoor het dijklichaam enigszins in de ondergrond is weggezakt. Deze zakking heeft rotatie van hoofdspanningen in de ondergrond tot gevolg. Dit geldt met name onder de binnenberm / talud van de dijk. Gezien het belang van OCR en het te volgen spanningspad in de uiteindelijk te mobiliseren ongedraineerde schuifsterkte is bij gebruik van hoogwaardige materiaalmodellen van belang de belastingsgeschiedenis correct in de berekening te meegenomen.
- De keuze voor het uitvoeren van een ongedraineerde stabiliteitsanalyse heeft betrekking op de snelheid van bezwijken ten opzichte van de consolidatiesnelheid van dijklichaam en ondergrond. Echter in aanloop naar bezwijken toe kunnen water- en effectieve spanningen veranderen als gevolg van het indringen van buitenwater. Dit kan worden gemodelleerd door de verwachte stijghoogte tijdens de maatgevende situatie te modelleren. Onder de noemer tijdsafhankelijk rekenen wordt in de POV-M hier reeds aandacht aanbesteed. (contact persoon John van Esch)

Bij stabiliteitsberekeningen waarin opdrijven of opbarsten van het achterland een rol speelt is het bepalen van de spanningscondities extra kritisch. Immers bij het optreden van opdrijven / opbarsten wordt een situatie gecreëerd waarbij de (verticale) effectieve spanningen tot 0 worden gereduceerd. Dit kan tot numerieke instabiliteit leiden.

Is voor dit punt alle benodigde kennis beschikbaar? Is op dit punt aanvullende handreikingen / voorschriften noodzakelijk?

### **4. 3D- berekeningen**

Ten behoeve van de ondersteuning van de introductie van alternatieve versterking technieken kan er behoefte ontstaan aan het gebruik van 3D berekeningen. Voorbeelden hiervan kunnen zijn:

- element berekeningen, het modelleren van een afzonderlijke anker, nagel of deuvel.
- overgangsconstructies, alternatieve versterkingsmethoden, met name constructies in dijken hebben een eindige lengte. Uit ervaring blijkt dat de overgang van dijk met constructie naar dijk zonder constructie vaak een zwakke plek in de waterkering is. Met een 3D berekening kan hier mogelijk worden ingezet voor het ontwerp van de overgangsconstructie.
- Een speciaal geval van overgangsconstructies is een lokale onderbreking van de dijkversterking. Hierbij kan worden gedacht aan stabiliteitsberm die ter plaatse van bebouwing in de teen van de dijk niet kan worden aangebracht. Indien de bebouwing smal is in relatie tot de breedte van het verwachte bezwijkvlak kan met een lokale onderbreking of verkleining van de stabiliteitsberm toch voldoende veiligheid worden gegarandeerd.

Software voor het uitvoeren van 3D berekeningen is beschikbaar. En het uitvoeren van 3D berekeningen is niet wezenlijk anders dan het uitvoeren van 2D berekeningen. Toch is het goed om na te gaan of er op dit vlak specifieke aandachtspunten zijn, bijvoorbeeld met betrekking tot parameterbepaling.

## **5. Overig**

In een recent verleden is het Technisch Rapport Eindig Elementen Methoden, TREEM, ontwikkeld. Het TREEM is nu enkele jaren in gebruik. Is goed een evaluatie uit te voeren en waar nodig het TREEM aan te passen. Opgemerkt wordt dat het TREEM zich specifiek richt op groene dijken en dijken met een onverankerde damwand. In het TREEM wordt uitgegaan van het gebruik van het Mohr-Coulomb model in de stabiliteitsanalyses.

In het TREEM worden enkele mogelijke verbeterpunten genoemd. De vraag is of deze nog altijd relevant zijn en in hoeverre deze in het blauwdruk moeten worden meegenomen.

## Bijlage A, Materiaalmodellen

Ter aanvulling op de discussie omtrent materiaalmodellen volgt hieronder een korte inventarisatie van de beschikbare modellen. De tekst is overgenomen uit een memo geschreven door Joost Breedevelt, 14 juni 2012.

### 4 Materiaalmodellen

Stabiliteitsanalyses van dijken met eindige elementen modellen worden in Nederland (en internationaal) vaak met het eindige elementen programma Plaxis uitgevoerd. In Plaxis is een groot aantal materiaalmodellen beschikbaar zowel voor het uitvoeren van gedraineerde als ook ongedraineerde stabiliteitsanalyses.

De meest gebruikelijke modellen voor gedraineerde analyses zijn:

1. Mohr-Coulomb model;
2. Hardening-Soil model;
3. Soft-Soil-Creep model.

Voor ongedraineerde analyses zijn de volgende modellen in Plaxis beschikbaar:

4. NGI-ADP model;
5. Undrained-Clay model Deltares.

Daarnaast zijn een veeltal geavanceerde materiaalmodellen ontwikkeld die echter in de ingenieurspraktijk weinig toegepast worden.

#### 4.1 Mohr-Coulomb model

Het Mohr-Coulomb model (Plaxis, 2011) heeft geen afhankelijkheid van de spanning of het spanningspad of de spanningsrichting (anisotropie). Er wordt een constante laaggemiddelde stijfheid gebruikt. Een toenemende stijfheid met de diepte kan door introductie van verschillende lagen gesimuleerd worden. De bezwijktoestand bij effectieve spanningen wordt door het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium beschreven, waarbij gebruik wordt gemaakt van de effectieve sterkte parameters  $c'$  en  $\phi'$ . Voor ongedraineerd materiaalgedrag kan het model gebruikt worden als de wrijvingshoek gelijk aan  $0^\circ$  gesteld wordt en de cohesie  $c$  gelijk gesteld wordt aan de ongedraineerde schuifsterkte  $s_u$ . Hierdoor wordt direct de ongedraineerde schuifsterkte gecontroleerd. De bepaling en invoer van  $s_u$  is hierbij echter lastig omdat met zones van gelijke  $s_u$  gewerkt moet worden. Dit is met name onder het talud en bij verlopende laagscheidingen moeilijk. Ook wordt met deze methodiek een toenemende schuifsterkte bij consolidatie of door spanningsrotatie door aanleg van een ophoging niet in rekening gebracht.



Met een toenemende wateroverspanning door toenemende schuifspanningen wordt geen rekening gehouden waardoor de schuifsterkte grof overschat kan worden. Bij het Mohr-Coulomb model is het ook niet mogelijk om rekening te houden met een initiële spannings-toestand gekarakteriseerd door een OCR of POP.

#### 4.2 Hardening-Soil model

Bij het Hardening-Soil model (Plaxis, 2011) worden spanningsafhankelijke stijfheden gebruikt. Dat betekent dat de stijfheid toeneemt bij toenemende spanning. De ingevoerde stijfheid is daarom gerelateerd aan een referentie spanning (gebruikelijk is hiervoor 100 kPa). In het model is de hardening een oorzaak van isotrope vervorming. Daardoor wordt bijvoorbeeld softening door optredende dilatantie niet in rekening gebracht. Het model maakt geen verschil tussen grote stijfheid bij lage rekken en gereduceerde stijfheid bij grotere rekken (zoals deze optreden in de ingenieurspraktijk). De stijfheden moeten daarom dusdanig worden gekozen dat deze overeenkomen met het overheersende rekniveau voor de betreffende toepassing. Voor triaxiale compressie is dit inderdaad beter, maar voor andere belastingswijzen zijn deze modellen niet veel beter dan het Mohr-Coulomb model. Ook bij het Hardening-Soil model wordt geen rekening gehouden met een schuifspanningsafhankelijke wateroverspanning of de anisotropie van spanningen. Daardoor kan ook hier de schuifsterkte grof overschat worden.

Naast deze parameters die afhankelijke zijn van het materiaalmodel zijn ook nog parameters van toepassing voor de bepaling van de initiële spanningstoestand, bijvoorbeeld de grensspanning. Deze zijn essentieel voor de analyse van overgeconsolideerde grondlagen (toenemende schuifsterkte) en bij vervormingsgerelateerde problemen. Door middel van deze parameters kan rekening worden gehouden met de initiële toestand bij het genereren van de spanningen voor bezwijken. NB. De invoer van een OCR of POP is alleen mogelijk als het Hardening-Soil model gebruikt wordt. Voor het Mohr-Coulomb model is deze optie niet beschikbaar. Bij het uitvoeren van een stabiliteitsanalyse ( $\phi$ -c reductie in Plaxis) wordt het standaard Mohr-Coulomb model gebruikt en geen rekening gehouden met spanningsafhankelijk gedrag of hardening effecten. In dit geval wordt de stijfheid aan het begin van de rekenfase bepaald en constant gehouden tijdens de sterkte-reductie waarbij alleen de parameters  $c'$  en  $\phi'$  gereduceerd worden.

#### 4.3 NGI-ADP model

Het NGI-ADP model (Grimstad et al., 2011) is een anisotroop elasto-plastisch constitutief model waarin gebruik wordt gemaakt van ongedraineerde schuifsterkte parameters. Het model is beschikbaar in Plaxis 2D vanaf versie 2010. Het kan gebruikt worden voor stabiliteits- en vervormingsanalyses en de analyse van interactie tussen grond en constructies waarbij de ongedraineerde belasting van klei een rol speelt. Bij het uitvoeren van een stabiliteitsanalyse ( $c$ - $\tan(\phi)$  reductie in Plaxis) worden bij het NGI-ADP model alle ongedraineerde parameters gereduceerd met de factor  $\Sigma Msf$ . Uitgangspunten van het model zijn:

- de grondparameters voor de (ongedraineerde) schuifsterkte worden voor drie verschillende spanningspaden/-toestanden onafhankelijk van elkaar gedefinieerd en direct ingevoerd, namelijk actief, passief en direct simple shear; hiermee wordt de anisotropie in sterkte geïntroduceerd;
- het bezwijkcriterium is gebaseerd op een aangepast/benaderend Tresca criterium;
- voor de plastische bezwijkrekken en voor de schuifsterkten in willekeurige spanningspaden worden elliptische interpolatie functies gebruikt; een niet-lineaire formulering voor hardening wordt gebruikt en de bezwijkrekken worden direct en onafhankelijk van elkaar voor de drie richtingen (actief, passief en direct simple shear) ingevoerd; hiermee wordt de anisotropie in stijfheid geïntroduceerd;

- het gedrag van isotrope elasticiteit wordt gedefinieerd door de geleidingsmodulus voor belasten en ontlasten;
- er is een criterium afgeleid en geïmplementeerd om interface elementen te kunnen gebruiken.

Het model is gevalideerd door middel van de simulatie van het eenvoudige 2D-probleem voor de bepaling van de ongedraineerde draagkracht van een strokenfundering (Grimstad et al. 2011). Hierbij wordt een goede overeenstemming met de klassieke plasticiteitstheorie bereikt van zowel de totale draagkracht als ook de spanningspaden in de verschillende zones (actief, passief en simple shear). Het model biedt veel mogelijkheden voor de definitie van de eigenschappen onder de verschillende belastingswijzen. Als gevolg hiervan lijkt het voornaamste probleem van dit model dan ook de bepaling van de benodigde invoerparameters. Daarnaast moet ook een validatie voor het aanbrengen van gefaseerde ophogingen en bestaande taluds moet in een vervolgstudie worden uitgevoerd.

#### 4.4 Undrained-Clay model (Deltares)

Het Undrained-Clay model van Deltares (Teunissen, 2010) is een anisotroop constitutief model waarin gebruik wordt gemaakt van ongedraineerde schuifsterkte parameters. Het model is gebaseerd op een anisotroop critical state model volgens Leoni et al. (2006) en Wheeler et al. (2003). Het model is gebaseerd op de Mohr-Coulomb formulering. Hierbij definieert een cap model de schuifspanning bij bezwijken. De cap is vast zowel met betrekking tot de oriëntatie van de anisotropie als de ontwikkeling van de grensspanning.

Het model is door Teunissen (2010) als *user defined* model binnen Plaxis geoperationaliseerd. Het Undrained-Clay model is door Vermeer et al. (2010) gevalideerd op basis van gepubliceerde resultaten van laboratoriumproeven: triaxiaal-, biaxiaal- en simple shear proeven. Afhankelijk van het gevolgde spanningspad worden op deze manier verschillende ongedraineerde schuifsterktes gevonden. Het ontwikkelde model sluit hierop aan en leidt tot schuifsterktes die goed overeen blijken te komen met de gepubliceerde proefresultaten. Naast deze validatie op basis van laboratoriumproeven is het nieuwe model geverifieerd op basis van een ongedraineerde analyse van een ophoging op slappe grond op een bestaand horizontaal maaiveld. Ook voor dit praktijkgeval leidt het nieuwe model tot realistische resultaten in tegenstelling tot de bestaande materiaalmodellen. De validatie voor het aanbrengen van gefaseerde ophogingen en bestaande taluds moet in een vervolgstudie worden uitgevoerd. Voor dit model is alleen een stabiliteitsanalyse ( $c$ - $\tan(\varphi)$  reductie in Plaxis) gebaseerd op het Mohr-Coulomb model mogelijk. Een uitbreiding waarbij specifiek met het ongedraineerd gedrag van dit model rekening wordt gehouden moet nog ontwikkeld worden.

In eerste instantie werd van een zuiver normaal geconsolideerde klei (met een overconsolidatie ratio van 1) uitgegaan, terwijl in Nederland veelal licht overgeconsolideerde kleilagen worden aangetroffen. Vandaar dat voor dit model ook numerieke simulaties uitgevoerd zijn voor overgeconsolideerde klei. Bij toenemende overconsolidatie volgt uit het Undrained-Clay model een toename van de ongedraineerde schuifsterkte, en dus ook van het draagvermogen van slappe grond. Ook voor de (licht) overgeconsolideerde klei blijkt het model ook kwantitatief goed aan te sluiten bij gepubliceerde experimentele data. Het Mohr-Coulomb model doet dit alleen bij een overconsolidatie ratio van ongeveer 2. Voor waarden van OCR groter dan 2 moet ermee rekening worden gehouden dat door schuifspanningen dilatantie kan optreden in plaats van contractie. Dit is echter vooralsnog niet geïmplementeerd in het model. In Nederland komen OCR-waarden tot 4 à 5 voor in holocene lagen.



Het voornaamste voordeel van dit model is de relatief eenvoudige invoer van materiaalparameters. Naast de effectieve cohesie ( $c'$ ) en de effectieve hoek van inwendige wrijving ( $\phi'$ ) wordt de ongedraineerde schuifsterkte dus in hoge mate door de graad van overconsolidatie bepaald, die door de invoering van een grensspanning of een OCR-waarde wordt beschreven. Bij uitvoering van ongedraineerde stabiliteitsberekeningen is het echter veel directer om van een  $c_u$ -simple shear ( $c_u$ -DSS) uit te gaan. Naast  $c'$  en  $\phi'$  wordt dan  $c_u$ -DSS ingevoerd, waarbij  $c_u$ -DSS intern door het programma automatisch wordt omgerekend in een OCR-waarde. Dit is echter vooralsnog niet geïmplementeerd in het Plaxis model. Een mogelijke voortzetting van het onderzoek in deze richting is vooral van belang omdat een ongedraineerde schuifsterkte uit de conusweerstand van een sondering kan worden afgeleid (Mayne et al., 2009; Van Duinen, 2010a). Op deze manier wordt de invoerdata van het model niet alleen uit laboratoriumproeven, maar ook uit robuuste in-situ proeven afgeleid.





## **B Voorbereiding tweede expertsessie**

## Memo

**Aan**  
expertteam blauwdruk EEM

<b>Datum</b> 10 februari 2016	<b>Kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0010	<b>Aantal pagina's</b> 3
<b>Van</b> Cor Zwanenburg	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 7290	<b>E-mail</b> cor.zwanenburg@deltares.nl

**Onderwerp**  
voorbereiding tweede sessie

---

De tweede sessie met betrekking tot het opstellen van de blauwdruk EEM staat in het teken van het ontwerpen van constructies in dijken. Benadrukt wordt dat het hier gaat om de combinatie van dijken en constructieve elementen. Deze constructieve elementen kunnen damwanden zijn, maar ook palenwanden, dijkdeuvels, nagels etc. Met name voor constructieve elementen die anders zijn dan stalen damwanden zijn handreikingen of voorschriften voor ontwerp beschikbaar. Benadrukt wordt dat het hier niet gaat om zelfstandig waterkerende constructies, bv keermuren.

Een belangrijk uitgangspunt in het ontwerpen van constructies in dijken dient te zijn dat het ontwerpen van een dijk met constructie niet wezenlijk anders is dan het ontwerpen van een groene dijk (dijk zonder constructies). In de praktische uitwerking echter kent het ontwerpen van constructies een andere ontwerptraditie dan het ontwerpen van groene dijken. Het is niet altijd eenvoudig deze bij elkaar te brengen. Voorbeelden hiervan zijn:

- In het ontwerp van constructies wordt expliciet onderscheid gemaakt in BruikbaarheidGrensToestand, BGT en Uiterste GrensToestand, UGT. Bij het ontwerpen van groene dijken is dit onderscheid niet gebruikelijk.
- De uitwerking van de veiligheidsfilosofie, zo is het voor groene dijken gebruikelijk om uit te gaan van  $\beta$ -onafhankelijke materiaalfactoren in combinatie met een  $\beta$ -afhankelijk schadefactor.

Het verschil in ontwerptraditie maakt lastig om een algemeen gedragen ontwerpfilosofie te ontwikkelen. Veel van de vragen rondom het ontwerpen van constructies in dijken hebben dan niet direct te maken met beperkingen van de beschikbare software, maar met vragen en onduidelijkheden omtrent de te volgen ontwerpmethodiek en de keuzes in schematisatie. Het vervolgonderzoek kan mogelijk grotendeels bestaan uit het verder ontwikkelen van ontwerpmethodiek en bijbehorende handleidingen en niet zo zeer uit het ontwikkelen van software. Belangrijk bij het door ontwikkelen van de ontwerpmethodiek is dat de ontwerpberekeningen verifieerbaar en reproduceerbaar zijn.

Voorafgaand aan de tweede sessie is een kleine inventarisatie van de vragen die leven rondom het ontwerpen van constructies in dijken met behulp van EEM. De volgende punten kwamen naar voren:

**Algemeen:**

- Ongedraineerde stabiliteitsanalyse; Tot nu toe zijn constructies in dijken met een gedraineerde analyse ontworpen. Voor groene dijken is de overstap gemaakt naar het gebruik van ongedraineerd grondgedrag in het modelleren van de sterkte van dijk en ondergrond. In het vorig overleg is gesproken over de wijze waarop dit voor groene

dijken met EEM analyse zou moeten worden uitgevoerd. Onder voorbehoud van de hieronder genoemde punten die ook gelden voor gedraineerde analyses, zijn alle ingrediënten beschikbaar om met een ongedraineerde analyse constructies in dijken te ontwerpen. De exacte werkwijze dient nog te worden vastgelegd. Ook dient te worden nagegaan of in vergelijkbare situaties met een gedraineerde analyse een vergelijkbare constructie wordt ontworpen als met een ongedraineerde analyse.

- Nauwkeurigheid vervormingen; In de POV-M wordt een studie verricht naar het optimaliseren van de eisen die aan de vervormingen van de constructie, met name in de BGT worden gesteld. Belangrijk hierbij is de nauwkeurigheid waarmee de vervormingen kunnen worden berekend. De nauwkeurigheid van de berekende vervormingen zou idealiter een orde nauwkeuriger zijn dan de gestelde eis. Momenteel is onduidelijk wat de nauwkeurigheid is van vervormingen die met EEM zijn berekend. De nauwkeurigheid wordt niet alleen door het materiaalmodel bepaald, maar ook door de schematisatie van de ondergrond, de wijze waarop parameters zijn bepaald en parameters die de uitvoering van het numerieke proces bepalen zoals opbouw mesh, elementtype, afbreekfout etc. Mogelijkerwijs moet er sprake zijn van een hoogst mogelijk haalbare nauwkeurigheid in plaats van alleen over nauwkeurigheid te spreken. Hoe kan de nauwkeurigheid worden bepaald?

#### Toetscondities:

- Opbarsten; Indien er sprake van mogelijk opbarsten van het slappe lagen pakket aan de teen van een dijklichaam dient het ontwerp van een dijkversterking te worden getoetst aan een situatie waarin aan het slappe lagenpakket geen sterkte wordt toegekend, een  $c' = 0$  analyse. Voor analytische glijvlakmodellen is het lastig zinvolle  $c' = 0$  analyses uit te voeren. Voor EEM berekeningen geldt nog sterker met name bij het ontwerp van een constructie aan de teen van een dijklichaam. Binnen de POV-M wordt nagedacht over de zin en onzin van een  $c' = 0$  analyse. Indien blijkt dat een  $c' = 0$  analyse een goede wijze van het modelleren van opbarsten van het achterland is, dient verder uitgewerkt te worden hoe dit in een EEM omgeving moet worden gemodelleerd.
- Restprofiel; In sommige situaties is zowel een diep als een ondiep glijvlak maatgevend. Een constructie ter plaatse van de binnenkruinlijn kan het stabiliteitsprobleem van het diepe glijvlak oplossen. Een dergelijke constructie dient in voldoende mate stabiel te zijn, ook als bezwijken van het talud achter de constructie (langs een diep/ondiep glijvlak) optreedt. Daarnaast geldt dat in EEM analyses de berekende stabiliteit wordt bepaald door het meest maatgevende bezwijkmechanisme. Indien bij het controleren van de stabiliteit van de constructie ten behoeve van het oplossen van het diepe bezwijkmechanisme een ander maatgevend mechanisme optreedt, is het lastig aan te tonen dat de weerstand tegen het optreden van het diepe bezwijkmechanisme voldoet aan de gestelde norm. Een manier om beide problemen op te lossen is het opnemen van een afgeschoven binnentalud in de schematisatie van het dijklichaam. Onduidelijk is hoe een berekening waarbij het restprofiel in rekening is gebracht past in de veiligheidsfilosofie. Wordt daarna nog de volledige veiligheidseis in rekening gebracht?

#### Constructieve aspecten

- Bepaling maatgevende momenten; Conform het TREEM worden de maatgevende momenten en dwarskrachten bepaald na het uitvoeren van een sterkte reductiefase. Een sterkte reductiefase is hier niet voor bedoeld. De vraag is hoe dit het beter kan.
- Plastisch scharnier; In de huidige richtlijnen wordt het optreden van plasticiteit niet toegestaan. Verwacht wordt dit indien het optreden van plasticiteit wel wordt

toegestaan, het optreden van een plastisch scharnier, kan worden volstaan met een lichtere constructie. Binnen de POV-M wordt uitgezocht hoe, rekening houdend met plasticiteit, een constructie in een dijklichaam moet worden ontworpen. De vraag is of alle ingrediënten hiervoor beschikbaar zijn. wellicht moet een elasto-plastisch materiaalmodel voor damwanden worden ontwikkeld.

- Dimensioneren ankers; Indien er een verankerde constructie wordt gedimensioneerd zullen de ankerstangen ook een verticale belasting te dragen krijgen als gevolg van zakkende grond. Op dit moment worden de doorbuiging, de toename van de ankerkracht handmatig berekend, buiten de EEM analyse om. Dit is bewerkelijk en het verdient de voorkeur indien dit in het EEM analyse zelf kan worden opgelost. De werkwijze van het bepalen van de extra ankerkrachten is ontwikkeld en gevalideerd bij gebruik van het Mohr-Coulomb model. Verwacht wordt dat bij het gebruik van meer complexe materiaalmodellen op dit punt minder conservatief kan worden ontworpen.
- Overgangsconstructies; Elke constructie is eindig. Aan het einde van de constructie dient een veilige overgang van de stijve constructie op het minder stijve dijklichaam te worden ontworpen. Is er voldoende inzicht in de te stellen eisen aan de overgangsconstructies?

#### Richtlijnen

- Als eerste dient de uitwerking van de bovenstaande punten in richtlijnen terecht te komen.
- De huidige ontwerprichtlijn stabiliteitsschermen richt zich op stalen damwanden, bij voorkeur zou de richtlijn worden uitgebreid met andere typen constructies zoals o.a. palenwanden, diepwanden, kistdammen, dijkdeuvels, korte damwanden
- Is optimalisatie van de huidige richtlijn mogelijk door niet alle mogelijke maatgevende situaties in een berekening te combineren.
- Voor welke situaties zijn 3D-analyses noodzakelijk en welke eisen moeten hieraan gesteld worden  
Hoe de interactie tussen grond en constructie bij 3D-achtige constructies (denk aan het stromen en/of snijden van de grond tussen dijkdeuvels, nagels, palen of in openingen van damwanden) beschrijven in een EEM-analyse?



## **C Voorbereiding derde expertsessie**

## Memo

**Aan**  
expertteam blauwdruk EEM

<b>Datum</b> 28 februari 2016	<b>Kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0013	<b>Aantal pagina's</b> 4
<b>Van</b> Cor Zwanenburg	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88335 7290	<b>E-mail</b> cor.zwanenburg@deltares.nl

**Onderwerp**  
voorbereiding derde bijeenkomst

---

De derde bijeenkomst staat in het teken van de inpassing in de veiligheidsfilosofie. In de voorgaande bijeenkomsten is de veiligheidsfilosofie al verschillende keren ter sprake gekomen. Enkele onderwerpen die eerder aanbod zijn gekomen zullen in deze bijeenkomst verder worden uitgediept.

Benadrukt wordt dat de veiligheidsfilosofie zelf niet ter discussie staat, het gaat erom hoe een ontwerp gebaseerd op EEM berekeningen kan worden ingepast in de veiligheidsfilosofie voor dijken, die oorspronkelijk is ontwikkeld voor analytische glijvlak modellen. De inpassing van EEM berekeningen in de veiligheidsfilosofie voor dijken is niet nieuw. In de voorbereiding ben ik uitgegaan van de ontwerpleidraad stabiliteitsschermen<sup>1</sup>.

Ook op dit punt geldt dat sommige ontwikkelingen reeds in andere onderdelen van het onderzoeksproject POV-Macrostabieleit in gang zijn gezet.

Hoewel richtlijnen beschikbaar zijn blijft de inpassing in de veiligheidsfilosofie een belangrijk aandachtspunt. Redenen dat ondanks de beschikbaarheid van een ontwerpleidraad de inpassing op de agenda te zetten zijn:

- Er is inmiddels ervaring opgedaan met de ontwerpleidraad, geeft dit aanleiding tot verbeteringen?
- De ontwerpleidraad is gebaseerd op gedraineerde stabiliteitsberekeningen. De wens bestaat om aansluitend op het WTI ook ongedraineerde stabiliteitsberekeningen uit te kunnen voeren.
- De ontwerpleidraad gaat uit van het gebruik van het Mohr-Coulomb model of het Hardening Soil model in het beschrijven van het grondgedrag. In de toekomstige ontwikkelingen willen we ook andere modellen toe kunnen passen.

Deze drie punten zijn nader uitgewerkt in de onderstaande discussiepunten:

### *Bepaling evenwichtsfactor*

In de huidige werkwijze wordt de evenwichtsfactor bepaald met behulp van een  $\varphi$  - c reductie. Hierbij wordt uitgegaan van het Mohr-Coulomb model. Een van de problemen is dat bij een  $\varphi$  - c reductie analyse de wateroverspanning bij het opleggen van een ongedraineerde schuifvervorming (shear induced pore pressure) niet wordt gemodelleerd.

---

<sup>1</sup> Larsen H., Lubking P., Breedveld J. (2013) Ontwerp stabiliteitsschermen (type II) in primaire waterkeringen (groene versie), Ontwerprichtlijn voor WSRL, Deltares rapport 1205887-000-GEO-0016

In de eerste bijeenkomst is gesteld dat een alternatieve werkwijze zou kunnen worden gevonden door het gebruik van design approaches waarbij de overstap naar een gereduceerde parameterset kan worden gemaakt. Hiermee wordt niet de grootte van een evenwichtsfactor gevonden, maar kan wel worden gebruikt om aan te tonen dat een bepaald veiligheidsniveau wordt gehaald.

De vraag is of met het gebruik van de design approaches een voldoende inpassing in de veiligheidsfilosofie wordt bereikt. Immers conform de veiligheidsfilosofie dient een stabiliteitsberekening, gebaseerd op rekenwaarden voor de sterkte eigenschappen, een evenwichtsfactor op te leveren die groter of gelijk is aan de gestelde eis,  $\gamma_{EEM,g}$ . Deze eis bestaat uit het product van de schadefactor, modelfactor, schematiseringsfactor en de opschaaftfactor, zie vgl (2.2) uit de ontwerpleidraad:

$$\gamma_{EEM,g} = \gamma_s \cdot \gamma_n \cdot \gamma_{b,g} \cdot \gamma_{d,g} \tag{2.2}$$

Uiteraard kan de parameterset met rekenwaarden zodanig worden aangepast dat de gestelde eis  $\gamma_{EEM,g} = 1,0$ . De vraag is of dit wenselijk is, gezien het feit dat reeds gebruik wordt gemaakt van een opschaaftfactor om numerieke stabiliteit (enigszins) te garanderen.

### modelfactor

De vigerende veiligheidsfilosofie is gebaseerd op een semi-probabilistische aanpak. Dit is een aanpak gebaseerd op partiële veiligheidsfactoren. Een van deze partiële veiligheidsfactoren is de modelfactor. Deze factor verdisconteert de onzekerheid die het gebruikte model introduceert vanwege het feit dat het model (in feite elk model) een vereenvoudiging van de werkelijkheid is. Een overzicht van gebruikte modelfactoren is gegeven in tabel 1.

opdriven	Rekenmodel (bij beschouwen globale veiligheid tegen geotechnisch bezwijken)	onzekerheden rekenmodel $\gamma_{d,g1}$	3D-effect $\gamma_{d,g2}$	totale rekenmodel -factor $\gamma_{d,g}$
Nee	Bishop (effectieve spanningsanalyse)	1,10	0,90	1,00
	LiftVan (effectieve spanningsanalyse)	1,05	0,90	0,95
	<b>EEM-Mohr Coulomb <sup>2)</sup> (effectieve spanningsanalyse)</b>	<b>1,10</b> (bij 'fine-tuning' 1,05)	<b>0,90</b>	<b>1,00</b> (bij 'fine-tuning' 0,95)
	Spencer Vrij glijvlak (effectieve spanningsanalyse)	1,05	0,90	0,95
Ja	Bishop (effectieve spanningsanalyse) <sup>1)</sup>	1,10	1,00	1,10
	LiftVan (effectieve spanningsanalyse)	1,05	1,00	1,05
	<b>EEM- Mohr Coulomb <sup>2)</sup> (effectieve spanningsanalyse)</b>	<b>1,05</b> (bij 'fine-tuning' 1,00)	<b>1,00</b>	<b>1,05</b> (bij 'fine-tuning' 1,00)
	Spencer Vrij glijvlak (effectieve spanningsanalyse)	1,05	1,00	1,05

<sup>1)</sup> tevens zogenaamde Bishop  $c = 0$  en  $\varphi = 0$  analyses

<sup>2)</sup> constitutief model waarmee het grondgedrag in de sterkte-reductie berekening wordt beschreven. Ook bij gebruik van geavanceerdere materiaalmodellen moet deze factor worden gehanteerd (tenzij uit nader onderzoek afwijkende factoren volgen).

Tabel 1. Modelfactoren overgenomen uit ontwerpleidraad stabiliteitschermen

Voor EEM berekeningen wordt aangehouden dat de stabiliteitsfactor wordt bepaald met een  $\varphi$ - $c$  reductie in combinatie met het Mohr Coulomb model. Indien in de toekomst op andere wijze de evenwichtsfactor wordt bepaald ligt het voor de hand dat er nieuwe aanvullende modelfactoren moeten worden bepaald.

#### *opschaalfactor*

Om voldoende numerieke stabiliteit te garanderen wordt momenteel in de analyse voor dijken met EEM gebruik gemaakt van een opschaalfactor waarmee de rekenwaarden van de sterkte eigenschappen worden opgewaardeerd. Als gevolg daarvan is de gestelde eis aan de minimale evenwichtsfactor eveneens met deze opschaalfactor verhoogd.

Momenteel wordt voor de opschaalfactor een waarde van 1,5 toegepast. Deze waarde is afgeleid voor het gebruik van het Mohr-Coulomb model in het beschrijven van grondgedrag. Indien op een andere wijze dan de  $\varphi$ - $c$  reductie de evenwichtsfactor wordt bepaald, is deze opschaalfactor nog nodig? en is er bij gebruik van andere materiaalmodellen dan het Mohr-Coulomb model nog vertrouwen in het berekende maatgevende bezwijkmechanisme als wel de sterkte, maar niet de stijfheid wordt verhoogd?

#### *associatief vs niet-associatief*

In de huidige werkwijze wordt de  $\varphi$  -  $c$  reductie uitgevoerd met een parameterset waarbij de dilatantie hoek  $\psi$  gelijk is gesteld aan de wrijvingshoek  $\varphi'$ . Op deze wijze wordt de reproduceerbaarheid van de resultaten verhoogd.

In ongedraineerde berekeningen leidt  $\psi = \varphi'$  tot onrealistische resultaten.

Hoe dient hier mee te worden omgegaan in ongedraineerde berekeningen?

#### *bepaling maatgevende dwarskrachten en momenten in constructies*

Momenteel wordt de maatgevende dwarskrachten en moment in UGT berekeningen bepaald na het uitvoeren van een  $\varphi$  -  $c$  reductie analyse. In de voorgaande bijeenkomst is aangegeven dat de  $\varphi$  -  $c$  reductie analyse hier niet voor bedoeld is. Een mogelijke oplossing is het gebruik van de optie design approaches.

Momenteel wordt dit in andere delen van de POV-M uitgewerkt. Is de vraag hiermee voldoende afgedekt?

#### *toepassen zonerings*

Niet elk bezwijkmechanisme in een dijkenprofiel is even belangrijk. Zo zal een diep glijvlak dat door de kruin van een dijklichaam loopt het waterkerend vermogen van de dijk meer aantasten dan een glijvlak door het talud van de stabiliteitsberm. Voor het gebruik van glijvlak analyses zijn in de verschillende leidraden voor het ontwerpen van rivierdijken zoneringsregels opgesteld. Aan de hand van deze zoneringsregels worden strengere eisen gesteld aan de berekende evenwichtsfactor van cirkels die door de kruin van een dijklichaam gaan en cirkels die het binnentalud of stabiliteitsberm aantasten. In numerieke analyses kan alleen de meest maatgevende bezwijkvlak worden gevonden. Als dit een mechanisme betreft dat door de berm of binnentalud gaat kan niet zonder meer worden gecontroleerd of andere bezwijkmechanismen die door de kruin van de dijk lopen voldoen aan de strengere norm.



Is het wenselijk om voor EEM berekeningen eveneens een zonering te kunnen toepassen? en zo ja hoe? De achterliggende vraag is hier eigenlijk hoe zicht kan worden gekregen op meerdere bezwijkmechanisme, diep en ondiep, in een dwarsprofiel. Dit sluit aan bij de discussie over het restprofiel in de tweede bijeenkomst.

N.B. de wijze waarop zonering voor glijvlakmodellen moet worden toegepast is een langlopende discussie. M.a.w. ook voor glijvlakmodellen is de wijze waarop zonering moet worden toegepast niet eenduidig.

*probabilistische analyses*

Hoewel het niet gebruikelijk is volledig probabilistisch te ontwerpen zijn wel vele software tools hiertoe beschikbaar.

Zijn nog ontwikkelingen op dit vlak noodzakelijk of wenselijk?, is verdere uitwerking van ondersteunende documenten, uitgewerkte cases wenselijk?

*validatie veiligheidsfilosofie*

In de POV-M zijn verschillende veldproeven en veldmetingen gepland. Dit geeft de mogelijkheid tot het (deels) valideren van de veiligheidsfilosofie.

Is op dit punt nog nadere actie benodigd of is hier in de afzonderlijke projectplannen al voldoende aandacht voor? en sluiten deze plannen voldoende op elkaar aan.

*Alternatieve versterkingsmethoden / alternatieve materialen*

Zijn er met betrekking tot de alternatieve versterkingsmethodieken nog aandachtspunten met betrekking tot de veiligheidsfilosofie waar nu nog niet in voorzien is.



## **D Verslag vooroverleg**

## Verslag

<b>Datum verslag</b> 18 december 2015	<b>Ons kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0005	<b>Project</b> 1220505-001	<b>Opgemaakt door</b> Mark van der Krogt
--	--	-------------------------------	---

<b>Datum bespreking</b> 14 december 2015	<b>Aantal pagina's</b> 4
---	-----------------------------

**Vergadering**  
Vooroverleg Blauwdruk EEM  
POV Macrostabiliiteit

### **Aanwezig**

Vasco Veenbergen (ABT), Rob van der Sman (RHDHV), Arny Lengkeek (Witteveen+Bos), Ronald Brinkgreve (PLAXIS), Cor Zwanenburg (Deltares), Mark van der Krogt (Deltares)

---

### **1.1 Introductie**

Cor opent de vergadering en legt uit wat het doel van deze bijeenkomst is. Het overleg is onderdeel van het onderzoeksprogramma Project Overstijgende Verkenningen Macrostabiliiteit (POV-m) welke zich voornamelijk richt op alternatieve dijkversterkingsmethoden, zoals nagels, deuvelds, maar ook over het optimaliseren van de toepassing van technieken. De POV-m is onderverdeeld in clusters. Eén daarvan is het cluster rekentechnieken. Het cluster Rekentechnieken ondersteunt alle andere clusters met rekenprocedures/ werkwijzen/ programmatuur. Omdat alternatieve dijkversterkingen vaak over constructies gaan, komen rekentechnieken zoals eindige elementen methoden (EEM) aan bod. Daarnaast is voor groene dijken kennis ontwikkeld over ongedraineerd gedrag en Critical State schuifsterkte.

Voordat er nieuwe kennis ontwikkeld wordt, moet er eerst een visie (blauwdruk) gemaakt worden waarin staat:

- Waar willen we over 3 jaar staan
- Wat moeten we hiervoor doen en wat moet er ontwikkeld worden
- Planning/invulling

Voor het opstellen van deze blauwdruk die in maart gereed moet zijn, zijn drie expertsessies voor ogen: in januari, februari, begin maart. Voor de sessies zijn in totaal 11 personen uitgenodigd. Het doel van het vooroverleg is het vaststellen van nut en noodzaak voor het ontwikkelen van een nieuw materiaalmodel in PLAXIS.

### **1.2 Toelichting op het model**

Ronald geeft een toelichting. Het Mohr-Coulomb model beschrijft het spaningspad tot aan bezwijken lineair, wat niet correct is. Bij cohesieve grondsoorten die ongedraineerd worden belast neemt de effectieve spanning/schuifsterkte namelijk af tijdens het afschuiven. Het Mohr-Coulomb model komt dus niet overeen met wat we in werkelijkheid zien.

In het verleden zijn ontwikkelingen geweest, zoals het hardening soil model, welke wel rekening houdt met afname van effectieve sterkte. Er zijn echter beperkingen, want dijken ondergrond zijn vaak door spanningswisselingen overgeconsolideerd. Het hardening soil model houdt geen rekening met de OCR.

Een werkwijze voor stabiliteitsanalyses gebaseerd op ongedraineerde sterkte eigenschappen is al veel langer ontwikkeld (o.a. Cambridge en MIT): het SHANSEP model. Naast de actuele

spanningsconditie in de vorm van een OCR, zijn er twee sterkte parameters: (1) schuifsterkteratio,  $S$  en (2) sterkte-exponent,  $m$ . Bij veiligheidsbeoordelingen gaat het om de ULS. Dan speelt het spanningspad niet een grote rol, zolang de ULS schuifsterkte correct is. De actuele spanningstoestand (OCR) kan hierin worden meegenomen. De SHANSEP parameters moeten vooraf bepaald worden per materiaal. Dit sluit aan bij een werkwijze die in WTI en DOV is uitgewerkt voor groene dijken.

Het voorstel voor de werkwijze is om eerst met PLAXIS via Stage Construction berekeningen te maken, waarbij het programma de spanningstoestand bijhoudt. Daarna kan een ULS berekening gemaakt worden met behulp van de OCR die gebaseerd is op de in situ effectieve spanning en de maximale hoofdspanning gedurende de belastingstappen. In de ULS berekening hoef je dus geen rekening te houden met stijfheidseigenschappen, schommelingen in waterspanningen en dergelijke, omdat deze al zijn berekend (en bijgehouden zijn) in de stage construction stappen.

### 1.3 Discussiepunten

Vasco vraagt of dit model ook onderkent dat de schuifsterkte afhankelijk is van de richting van het schuifvlak? Er zit geen anisotropie in dit model. Wel in het NGI ADP model, maar dit model is op basis van totaalspanning en is de schuifsterkte in dit model vooraf bepaald. Een combinatie van NGI ADP met SHANSEP kan wel. Dan moet de schuifsterkte met SHANSEP gedefinieerd worden en ingevoerd worden in het NGI ADP.

Voorgesteld wordt de implementatie van SHANSEP in PLAXIS als eerste stap nemen, maar wel de anisotropie voor ogen blijven houden. Hierbij is de waarde van de schuifsterkte ratio,  $S$  wel afhankelijk van hoe deze bepaald is, bijvoorbeeld met triaxiale compressie, extensie of met direct simple shear.

Arny vraagt zich af of je met wateroverspanningen wel over kunt gaan op de switch naar de SHANSEP methode. Dat kan wel met Undrained B, omdat de actuele spanningen en de historische spanningen in de voorgaande stappen zijn bijgehouden.

Ook tijdsafhankelijke processen zoals kruip of de constructie dan wel versterking van een dijk kunnen OCR beïnvloeden. Daarnaast spelen processen zoals ageing en verdichten hier een rol in. Het is de vraag welke OCR (bijvoorbeeld die uit het soft soil creep model) representatief is voor gebruik in de SHANSEP methode. Het blijft daarnaast de vraag welke trucs je verder nog moet gebruiken om de juiste OCR in de berekening te krijgen. Bijvoorbeeld een minimale OCR. Opgemerkt wordt dat bijvoorbeeld bij net aangebrachte versterkingen wel zo kan zijn dat  $OCR = 1$  wordt bereikt. Ronald geeft ook aan dat je misschien beter een minimale  $su$  invoert, zie het proposal dat Ronald heeft rondgestuurd in de POV-M. Cor zal dit doorsturen aan de expertgroep.

Arny vraagt zich af of de methode ook goed gaat met damwanden in de passieve zone, in het bijzonder omdat de POV zich op constructies in dijken richt. Ronald zegt dat dit niet echt uitmaakt, omdat de grootste hoofdspanning wordt gebruikt (in deze gevallen dus horizontaal).

Arny vraagt of je ook een soort van  $\varphi$  -- $c$  reductie kan doen. Dat kan zegt Ronald, omdat de reductie dan direct op de schuifsterkte wordt toegepast.

Vasco benadrukt dat er gekeken moet worden hoe er met constructies in de dijk zoals nagels, deuvets en dergelijken omgegaan wordt. Ronald onderkent dit en zal zich er nog in verdiepen

hoe zich dit in de glijvlakken vertaalt. De interface tussen grond en constructieve elementen moet wel verder gecheckt worden. Dit geldt ook voor de embedded-pile constructie. Deze kunnen bijvoorbeeld met een layer dependent skin resistance berekend worden (multi-lineair).

Arny stelt voor om de OCR afhankelijke Skempton A factor te gebruiken in het bestaande hardening soil model. Cor heeft weinig fiducia in de bepaling van deze factor via laboratoriumproeven, maar Arny zegt dat met bepaalde literatuur waarden een goede vergelijking kan worden verkregen met het werkelijk zichtbare spanningspad. Ronald vindt het lastig om zo'n factor te implementeren in het hardening soil model. Hier moet de plasticiteitstheorie bij bekeken moeten worden.

Vastgesteld wordt dat het ontwikkelen van de rekenmethode in SHANSEP een zinvolle eerste stap is. Er is al een eerste vingeroefening gedaan. Deze vingeroefeningen moeten worden omgezet in een concreet product (ca. 3 maanden).

#### **1.4 Het ACU model**

Recent is door Hans Teunissen een model ontwikkeld waarmee het ongedraineerde gedrag kan worden gesimuleerd. Het model is verwant aan het SClay1 model. Verwacht wordt dit model onder andere goed geschikt is voor het berekenen van de BGT voor ongedraineerde condities. Dit model zal in een van de volgende bijeenkomsten nader aan de orde komen.

#### **1.5 Conclusies**

Er is besloten dat het wenselijk is om de implementatie van de SHANSEP benadering in PLAXIS te ontwikkelen. De expertgroep zal het kernteam adviseren over te gaan tot opdrachtverlening van de ontwikkeling hiervan. Ronald past de offerte met de laatste inzichten uit dit gesprek.

Arny stelt voor de drie bespreking anders in de te delen:

- In de eerste vergadering ligt de nadruk op EEM en groene dijken
- in de tweede vergadering ligt de nadruk op EEM en constructies in dijken
- in de derde vergadering ligt de nadruk op enkele specifieke EEM onderwerpen zoals materiaalmodellen,  $\phi$  - c reductie etc.

Cor zal een voorzet geven en zodoende kan dat tijdens de vergaderingen aangevuld worden.

**Datum**  
18 december 2015

**Ons kenmerk**  
1220505-001-GEO-0005

**Pagina**  
4/4

## Actiepuntenlijst

Actiepunt		Uitvoerder	Geplande datum	Datum gereed	Status
1.1	Ben Rijnveld vragen voor expertgroep	Cor			
1.2	Proposal SHANSEP in PLAXIS rondsturen	Cor			
1.3	Literatuurlijst bijhouden	Cor			
1.4	Offerte proposal SHANSEP in PLAXIS aanpassen en versturen	Ronald en Cor			
1.5	Bijeenkomsten inplannen	Mark			

## Bijlage(n)

- 1 Email Cor Zwanenburg - Introductie expertsessies opstellen blauwdruk EEM en eerste bijeenkomst aanstaande maandag.pdf
- 2 Plaxis\_Research\_Proposal\_20151214.pdf
- 3 POV-M EEM rekentechnieken. Ontwikkeling ongedraineerde schuifsterktemodel.pdf

From: Cor Zwanenburg  
Sent: Thursday, December 10, 2015 16:48  
To: Mark van der Krogt; Ronald Brinkgreve (r.brinkgreve@plaxis.nl); 'Sman, Rob vander(rob.van.der.sman@rhdhv.com)'; Schrier, J.S.vander (Joost) (joost.van.der.schrier@rhdhv.com); marco.peters@grontmij.nl; Timo Schweckendiek; JoostBreedeveld; v.veenbergen@abt.eu; ArnyLengkeek (arny.lengkeek@witteveenbos.com); HansTeunissen; CorZwanenburg  
Subject: introductie expertsessies opstellen blauwdruk EEM en eerste bijeenkomst aanstaandemaandag

Beste allen,

Julie hebben aangegeven deel te willen nemen aan de expertsessies rondom het toepassen van EEM in het ontwerp van dijkversterkingen. Oorspronkelijk was het de bedoeling om in het nieuwe jaar te starten, maar we hebben gemeend al aanstaande maandag onze eerste bijeenkomst te hebben. De reden daarvoor zal ik zo nader toelichten. Als gevolg hiervan kunnen we niet allemaal bij de eerste bijeenkomst zijn. Met deze mail wil ik alvast wat toelichting geven zodat degene die in Januari aanhaken geen informatie achterstand hebben.

### **Achtergrond**

De werkzaamheden maken deel uit van het onderzoeksprogramma Project Overstijgende Verkenningen Macrostabieleit, POV-M. De POV-M richt zich op de onderzoeksvragen die bij het ontwerpen van de nu lopende dijkversterkingen zich voordoen met betrekking tot het faalmechanismen Macrostabieleit. Vragen met betrekking tot andere faalmechanismen zullen in andere POVs worden opgepakt. De POV-M richt zich op met name alternatieve dijkversterkingsmethoden. De POV-M is onderverdeeld in clusters een daarvan is het cluster rekentechnieken. In het cluster rekentechnieken worden rekenmethodieken of werkwijzen ontwikkeld die het ontwerp van de alternatieve versterkingsmethoden verder faciliteren. Veel van de alternatieve versterkingsmethoden hebben te maken met constructies in dijken, daarnaast kent de huidige werkwijze van het ontwerpen van constructies in dijken, zoals damwanden, potentiële verbeterpunten waardoor optimalisatie van het ontwerp mogelijk is. Het cluster rekentechnieken van de POV-M heeft dan ook het rekenen aan constructies in dijken als een belangrijk focuspunt.

basis van ongedraineerde sterkte eigenschappen van de grond. Dit is ontwikkeld voor groene dijken (dijken zonder constructies) en het is wenselijk dat de rekentechnieken uit de POV-M hierop aansluiten.

Het rekenen aan constructies in dijken wordt vaak in een EEM omgeving uitgevoerd. Voor het ontwerpen van dijkversterkingen met behulp van constructies met EEM zijn er nog wat praktische problemen. In het rekencluster willen we hier wat aan doen. De eerste stap is vast te stellen wat we aan het einde van de looptijd van de POV-EEM technieken in relatie tot het ontwerpen van dijkversterkingen willen kunnen, visievorming. Daarna, willen we vaststellen welke onderwerpen moeten worden uitgezocht om daar te komen. Tot slot kan dit in een planning worden vastgelegd. Het resultaat van de visievorming, het vaststellen van de onderzoeksonderwerpen en de planning worden vastgelegd in een document dat blauwdruk EEM is gaan heten.

### **Aanstaande maandag (14 december 2015)**

Er is een vooroverleg gepland op maandag 14 december 2015, 9:30 – 11:30 bij Deltares. Reden van het vooroverleg is dat in de POV-M is geconstateerd dat het waarschijnlijk wenselijk is een materiaalmodel voor EEM omgeving te ontwikkelen dat aansluit bij de ontwikkelingen met betrekking tot het gebruik van ongedraineerde sterkte eigenschappen zoals dat in het WTI is uitgewerkt. Omdat het ontwikkelen en valideren van een dergelijk model tijd vergt zou, indien de wens breed gedeeld wordt, zo snel mogelijk gestart moeten worden met de ontwikkeling van het model. Het overleg van komende maandag wil ik dan ook richten op de vraag of nieuwe modellen nodig zijn, of dat reeds ontwikkelde modellen hiervoor geschikt zijn of geschikt gemaakt kunnen worden en wat zo'n materiaalmodel wel en niet moet kunnen beschrijven.

### **Vervolg**

Ik heb Mark van der Krogt gevraagd (een deel) van de organisatie van het project op zich te nemen. Hij zal onder andere de besprekingsverslagen maken. Mark zal ook op korte termijn een datumbrief rondsturen om afspraken te maken over de volgende bijeenkomsten. De blauwdruk moet eind maart gereed zijn. Idealiter zouden we in januari, februari en begin maart bij elkaar komen. Aan jullie het verzoek snel op zijn datumbrief te reageren.



Met vriendelijke groet,

**Cor Zwanenburg**  
Adviseur

T +31(0)88335 7290

E [cor.zwanenburg@deltares.nl](mailto:cor.zwanenburg@deltares.nl)

---

**Deltares**

[www.deltares.com](http://www.deltares.com)

Postbus 177  
2600 MH Delft




 Please consider the environment before printing this email

# EEM rekentechnieken

Ontwikkeling eenvoudig  
ongedraineerd schuifsterkte  
model op basis van de  
SHANSEP benadering

POV



MACRO  
STABILITEIT

Auteur: Ronald Brinkgreve

Datum: 14 december 2015

Versie: 1.0

## Inleiding

Volgens de nieuwe toetsingsnormen moet bij het ontwerp van dijken en waterkeringen 'ongedraineerd' worden gerekend. Dat betekent dat gedurende een maatgevende (kritische) belasting het in de grond aanwezige grondwater opgesloten zit in de poriën van de grond en niet vrijelijk kan bewegen. Dit heeft verder als consequentie dat de (ongedraineerde) schuifsterkte van de grond wordt bepaald door de initiële effectieve spanningstoestand, dat wil zeggen de spanningstoestand vanuit de langetermijn evenwichtssituatie voordat de maatgevende belasting plaatsvindt. Bij dijken en waterkeringen gaat het in het algemeen over 'slappe', slecht doorlatende grondsoorten als klei en veen. De invoering van de het ongedraineerd rekenen zal leiden tot een nauwkeuriger en eenduidiger bepaling van de grondsterkte dan de tot nu toe gehanteerde methode van effectieve sterkte eigenschappen. Het ontwerp van dijken en waterkeringen zal hierbij gebaat zijn.

Naast het gebruik van conventionele ontwerpmethoden, zoals stabiliteitsberekeningen met de methode Bishop en de methode (Lift)Van, is er een toenemend gebruik van de eindige-elementenmethode (EEM). Zeker wanneer het gaat om constructieve elementen in een dijk is het gebruik van de EEM vrijwel onvermijdelijk, maar ook bij 'groene dijken' levert de EEM meer inzicht in het werkelijke gedrag. PLAXIS is in Nederland (en daarbuiten) het meest gebruikte eindige-elementenprogramma in de geotechniek. Om het ongedraineerd rekenen via de EEM mogelijk te maken is het noodzakelijk om een constitutief model te ontwikkelen dat de ongedraineerde schuifsterkte bepaalt aan de hand van de actuele effectieve spanningstoestand in de stabiele evenwichtstoestand, dus na het aanbrengen van de (dijk)constructie en voor het aanbrengen van een (kritieke) belasting of veiligheidsberekening. De ontwikkeling van zo'n model is het onderwerp van dit project.

## Achtergrond

Een internationaal bekende methode om de ongedraineerde schuifsterkte van slecht doorlatende grondsoorten te schatten is de SHANSEP benadering (Ladd & Foott, 1974). Deze benadering kan worden weergegeven middels de volgende formule:

$$\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} = \frac{s_u}{\sigma'_{vc}} = S \cdot OCR^m \quad (1)$$

Hierin is:

- $s_u$  = Ongedraineerde schuifsterkte
- $\sigma'_{v0}$  = Initiële verticale effectieve spanning
- $\sigma'_{vc}$  = Geconsolideerde celdruk (in een DSS of triaxiaalproef)
- $S$  = Proportionaliteitsfactor
- $OCR$  = Overconsolidatiegraad
- $m$  = Machtsfactor

In bovenstaande formule wordt de ongedraineerde schuifsterkte in een willekeurig punt in de grond, genormaliseerd door de initiële verticale effectieve spanning in dat punt (ofwel de geconsolideerde celdruk in het geval van een ongedraineerde DSS of triaxiaalproef), uitgedrukt in een proportionaliteitsfactor  $S$  en de heersende overconsolidatiegraad  $OCR$  tot de macht  $m$ . Typische waarden voor  $S$  en  $m$  liggen in de range [0.2-0.3] respectievelijk [0.7-0.8].

Internationaal is er veel gepubliceerd over de SHANSEP benadering. Ook in Nederland lijkt deze methode zeer geschikt voor ongedraineerd rekenen. Het nieuw te ontwikkelen model is dan ook op deze methode gebaseerd.

Aangezien het bij het ontwerp van dijken en waterkeringen vooral gaat om een Uiterste Grenstoestand (UGT), zijn met name de sterkte eigenschappen van de grond van belang, en in mindere mate de stijfheidseigenschappen. Hoewel de relatieve stijfheid tussen de grond en de daarin aanwezige constructieve elementen van invloed kan zijn op de onderlinge verdeling van krachten en spanningen, wordt voor het stijfheidsgedrag toch voor een eenvoudige benadering gekozen (Wet van Hooke met constante stijfheid gebaseerd op de initiële effectieve spanningstoestand). Daarmee is het model voor de beoogde doelgroep zeer toegankelijk.

---

## Werkzaamheden

De volgende werkzaamheden zullen worden uitgevoerd:

- a) Ontwikkeling en implementatie van ongedraineerde schuifsterkte model, te gebruiken als user-defined soil model in PLAXIS; zowel in eenvoudige labproefsimulaties als volledige eindige-elementenberekeningen.
- b) Testen van het model in labtestsimulaties en in (eenvoudige) voorbeeldsituaties met een dijk.
- c) Documentatie van het model, inclusief parameterbeschrijving

De volgende modelleringsaspecten vormen het uitgangspunt voor de ontwikkeling van het beoogde model:

- Elastisch gedrag volgens de Wet van Hooke.
- Bezwijkgedrag volgens het Tresca model (= Mohr-Coulomb met alleen een (ongedraineerde) cohesie en een wrijvingshoek van 0)
- Ongedraineerd gedrag door het toevoegen van een compressiestijfheid van het grondwater aan de materiaalstijfheidsmatrix ('undrained B')
- Elastische stijfheid gebaseerd op de initiële effectieve spanningstoestand
- Ongedraineerde schuifsterkte volgens de SHANSEP benadering, gebaseerd op de initiële effectieve spanningstoestand; om e.e.a. algemeen te houden wordt hierbij in plaats van de verticale effectieve spanning, de grootste effectieve hoofdspanning gehanteerd.

- Modelparameters:
  - $G / s_u$ : Proportionaliteitsratio tussen glijdingsmodulus en ongedraineerde schuifsterkte
  - $v$ : Dwarscontractiecoëfficiënt
  - $S$ : Proportionaliteitsfactor in de SHANSEP formule
  - $m$ : Machtsfactor in de SHANSEP formule
  - $s_{u,min}$ : Minimum ongedraineerde schuifsterkte; tenminste 1 kPa.
  - OCR: Initiële (minimum) overconsolidatiegraad
  - POP: Initiële 'pre-overburden pressure' (als alternatief voor OCR)
- Statusparameters:
  - $\sigma_p$ : Voorconsolidatiespanning (in de grootste hoofdspansingsrichting). Deze wordt initieel bepaald uit de initiële effectieve spanning en OCR of POP.
  - $s_u$ : Ongedraineerde schuifsterkte volgens de SHANSEP methode, waarbij OCR wordt bepaald uit  $\sigma_p$  en de grootste effectieve hoofdspansing.

Er wordt van uitgegaan dat een praktijksituatie in PLAXIS wordt opgebouwd volgens de methode Staged Construction. Daarbij wordt in eerste instantie met een ander constitutief model dan het hier beschreven model gerekend, of wanneer het SHANSEP model al wel is toegekend maar nog niet is geïnitieerd wordt met Mohr-Coulomb gerekend. Wanneer vervolgens een (kritische) belasting wordt aangebracht of een veiligheidsberekening wordt uitgevoerd, dient eerst het nieuwe model aan de betreffende grondlagen te worden toegekend (als dat nog niet is gedaan). Op dat moment dient ook de ongedraineerde schuifsterkte volgens de SHANSEP formule te worden geïnitieerd via de betreffende rekenoptie. Indien in een latere fase (bijvoorbeeld na consolidatie) de schuifsterkte opnieuw dient te worden bepaald, kan gebruik worden gemaakt van dezelfde rekenoptie om de schuifsterkte te 'resetten'.

## Op te leveren producten

Aan het eind van het project zullen de volgende producten worden opgeleverd:

- a) Dynamic Link Library (DLL) van het ontwikkelde ongedraineerde schuifsterkte model volgens bovenstaande specificaties, te gebruiken als user-defined soil model in combinatie met PLAXIS 2D 2016.
- b) Documentatie van het model, inclusief parameterbeschrijving en gebruik.

## Referentie

- [1] Ladd, C.C., Foott, R. (1974). New Design Procedure for Stability of Soft Clay. ASCE J. Geotech. Eng. Div., Vol. 100, No. GT7, July 1974, 763-786.



## **E Verslag eerste expertsessie**

## Verslag

<b>Datum verslag</b> 4 februari 2016	<b>Ons kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0008	<b>Project</b> 1220505-001	<b>Opgemaakt door</b> Mark van der Krogt
<b>Datum bespreking</b> 20 januari 2016	<b>Aantal pagina's</b> 7		
<b>Vergadering</b> Eerste Expertmeeting Blauwdruk EEM			

### **Aanwezig**

Joost Breedevelt, Hans Teunissen (Deltares), Ronald Brinkgreve (PLAXIS), Vasco Veenbergen (ABT), Arny Lengkeek (Witteveen+Bos), Rob van der Sman, Joost van der Schrier (RHDHV), Ben Rijnveld (FUGRO), Cor Zwanenburg, Mark van der Krogt

### **Afwezig**

Timo Schweckendiek (Deltares), Marco Peters (Grontmij)

---

## 1 Introductie

Iedereen wordt welkom geheten door Cor. Tijdens het vooroverleg, 14 december 2015, is reeds een voorstelronde geweest, hoewel niet iedereen daar bij kon zijn was er geen reden om de voorstelronde te herhalen.

Het doel van deze expertmeetings is het stroomlijnen en richting geven aan het ontwerpen van dijkversterkingen met EEM modellen. Het eindproduct is een gezamenlijke visie waarin wordt aangegeven wat we met EEM in het ontwerp van dijkconstructies willen bereiken en welke stappen nodig zijn om dat te bereiken. Deze visie wordt hierna aangeduid met blauwdruk EEM. In verschillende onderdelen van de POV-M wordt of zal worden gewerkt aan analyses van de stabiliteit van dijken met EEM. Om te voorkomen dat werk dubbel wordt verricht of dat verschillende onderdelen in de POV-M verschillende of zelfs tegengestelde keuzes maken op dit vlak wordt er een centrale rol aan het ontwikkelen van de blauwdruk toegekend. Dit is weerspiegeld in de samenstelling van het expertteam. De verschillende deelnemers zijn betrokken bij onderdelen van de POV-M. Zo is Joost Breedevelt betrokken bij de geplande damwandproef en het flankerend onderzoek, Joost van der Schrier bij onderzoek naar vervormingscriteria die aan waterkerende constructies moeten worden gesteld en zijn Vasco Veenbergen en Ben Rijnveld betrokken bij de referentieprojecten en de ontwikkelingen op het gebied van het ontwerpen van onverankerde damwandconstructies in dijken.

De blauwdruk wordt in een drietal expertsessies ontwikkeld. De eerste expertsessie gaat in op het rekenen aan dijken in algemene zin. De tweede expertsessie zal gewijd zijn aan het rekenen aan constructies in dijken. De derde sessies zal specifiek ingaan op de inpassing in de veiligheidsfilosofie die voor dijken is opgesteld.

De denkrichtingen voor de eerste sessie zijn

- 1) Materiaalmodel
- 2) Bepaling evenwichtsfactor
- 3) Initiële toestand, stabiliteit en opdrijven
- 4) 3D-berekeningen
- 5) Overig



Twee aanvullende onderwerpen die nog niet genoemd zijn, maar wel aan de orde moeten komen zijn:

- 1) Verschil uitvoering axiaal symmetrische proeven, terwijl berekeningen plain-strain zijn.
- 2) Update van het TREEM

Het eerste aanvullende punt is besproken bij onderwerp 1, materiaalmodel. Het tweede aanvullende punt is onderstaand beschreven en besproken onder punt 5 overig.

Er is onduidelijkheid over het TREEM. Na de versie van 2011 (toetsen met EEM) zijn diverse updates en toevoegingen gedaan (ontwerpen met EEM), terwijl alleen de eerste versie was meegestuurd. Cor zal dit nog op een rij zetten en benadrukt dat het niet de bedoeling is om tijdens deze meetings het TREEM te updaten. Wel kunnen aanbevelingen gedaan worden op welke punten verbeteringen/aanvullen mogelijk zijn. Een aandachtspunt is bijvoorbeeld het modelleren en toetsen van enerzijds waterveiligheid (UGT) en prestatie-eisen (BGT) zoals vervormingscriteria.

*Nagekomen reactie:*

*De meest recente versie van het TREEM is in gebracht in ENW-Techniek. Vanuit RWS is de wens geuit om eerst de reactie van ENW-Techniek af te wachten voordat deze versie verder wordt verspreid.*

Daarnaast is het van belang dat er een overzicht komt van de vragen uit de gebruikersgroep van eindige elementen modellen. Deze vragen geven richting aan de toekomst.

Tot slot is opgemerkt dat alle componenten van de schematiseringstrein van belang zijn. Het verbeteren van een grondmodel heeft weinig zin als vervolgens de onzekerheid in de in te voeren parameters groot is.

## 2 Materiaalmodellen

In de reguliere stabiliteitsanalyse, aan de hand van de LEM, is de overstap gemaakt naar toepassing van een ongedraineerde analyse. Voor een goede aansluiting is het wenselijk om met de EEM technieken eveneens deze overstap te maken. Opgemerkt wordt dat het ongedraineerde gedrag met name betrekking heeft op de snelheid van vervormen. Dus, het bezwijken treedt ongedraineerd op, de fase voorafgaand aan bezwijken hoeft niet ongedraineerd plaats te vinden. De blauwdruk zal richting moeten geven over hoe er met EEM modellen gedraineerd of ongedraineerd gerekend moet worden. Het TREEM lijkt nog wel toepasbaar voor gedraineerd, maar niet voor ongedraineerd. Boezemkades kunnen hier een uitzondering op zijn, omdat deze gedraineerd kunnen bezwijken (door langzame verhoging freatische lijn of vervormingen).

In het vooroverleg is al besloten om het ongedraineerde schuifsterkte model SHANSEP te implementeren in PLAXIS. Het model is specifiek bedoeld voor het bepalen voor het uitvoeren van een sterkte berekening in de UGT-fase. Hierbij kan, voorafgaand aan de sterkteberekening, met een ander materiaalmodel de spanningstoestand inclusief de geschiedenis (OCR) worden bepaald.

Het voordeel van dit model is dat het gericht is op het gebruik van ongedraineerde sterkte. Het model is relatief eenvoudig en verdisconteert ook de invloed van de belastingsgeschiedenis op de ongedraineerde sterkte. Daarnaast sluiten de benodigde parameters voor het model aan bij de parameters die thans gebruikt worden bij limit equilibrium methoden, LEM, (Bishop, LiftVan en Spencer) in de stabiliteitsanalyses van dijken. Dit maakt de overstap van een LEM naar een EEM berekening eenvoudiger. Opgemerkt wordt dat de meerwaarde van het gebruik van EEM boven LEM, bij gebruik van een vergelijkbaar materiaalmodel met name is gelegen in de bepaling van de spanningen in de ondergrond en de daaraan gerelateerde ongedraineerde schuifsterkte. Bij een LEM analyse zal de gebruiker hier keuzes in moeten maken. Dit leidt tot verticale laagscheidingen of het uitwiggen van lagen om het verloop van de sterkte onder het dijklichaam naar naast het dijklichaam te modelleren. In EEM analyse wordt deze belastinghistorie door het model zelf afgehandeld.

Naast de voordelen zijn er ook nadelen. Het model is gericht op het uitvoeren van een sterkte berekening, UGT en niet zozeer op het berekenen van de vervormingen, BGT. Daarnaast houdt het model, vooralsnog, geen rekening met de anisotropie, zowel in sterkte als stijfheid. Er zijn twee mogelijkheden om dit verder uit te werken.

De eerste mogelijkheid is het aanpassen van het model. Voorstel is om het model zoals het nu voorgesteld wordt te ontwikkelen, daar ervaring mee op te doen en daarna pas door te ontwikkelen. De tweede mogelijkheid is om andere modellen hiervoor te gebruiken. Dit zou het NGI-ADP model kunnen zijn. Dit model modelleert anisotropie in sterkte, maar het vooralsnog niet de mogelijkheid de invloed van de belastingsgeschiedenis op de sterkte te verdisconteren. Het model kan op dit punt worden aangepast.

Alternatief is het ACU model. Dit model is recent ontwikkeld. Dit model kan zowel de anisotropie in sterkte als de invloed van de spanningen en spanningsgeschiedenis op de sterkte modelleren.

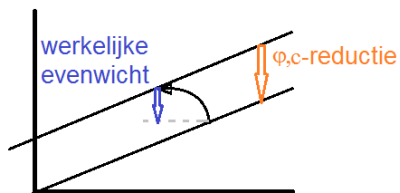
Naast modellen voor de sterkte berekening, UGT, zijn ook modellen nodig om, met name voor de constructies, vervormingsberekeningen uit te voeren. Hierbij zijn de volgende punten genoemd:

- Grote vervormingen spelen een rol, omdat de geometrie dan gaat veranderen. Vooral bij veen is dit van belang, omdat de sterkte van veen sterk vervormingsafhankelijk is. Dit vraagt aandacht voor het uitvoeren van updated mesh analyses, MPM analyses of anderszins. Dit heeft niet alleen gevolgen voor de wijze waarop de berekeningen worden uitgevoerd, maar ook voor de wijze waarop parameters worden bepaald.
- Kruip speelt met name bij interactie tussen constructies het dijklichaam een rol. Er zijn twee gangbare modellen waarmee kruip kan worden gemodelleerd: Soft Soil Creep model en het Creep-SClay1 model. Momenteel wordt in een apart spoor van de POV-M onderzoek gedaan naar een Hollandse IJsseldijk. Bij deze dijk spelen de vervormingen die door de jaren (eeuwen) zich hebben voorgedaan een belangrijke rol in de stabiliteitsanalyse.
- De grootte van de vervormingseis en de wijze waarop deze wordt gedefinieerd. Er is namelijk een verschil tussen maximale rekken op het schuifvlak en de daadwerkelijke vervorming. Een aantal voorbeelden hiervan zouden helpen bij de beeldvorming. In een ander POV-M spoor wordt nagedacht over de vervormingseis. Van belang voor de expertcommissie rondom de blauwdruk is de nauwkeurigheid waarmee vervormingen kunnen worden berekend. Bij voorkeur zou de nauwkeurigheid een orde kleiner moeten zijn dan de gestelde eis.

Een punt van aandacht is hoe de plain-strain sterkte, de sterkte die nodig is in de EEM berekeningen, zich verhoudt tot triaxiale sterkte uit compressie, of extensie proeven, zoals die in laboratoriumonderzoek wordt bepaald. Er zijn modelleringen van de plain strain sterkte beschikbaar, echter over het algemeen is hier weinig aandacht voor. Tevens is onduidelijk hoe deze modelleringen zich verhouden tot het gedrag van humeuze klei en veen. In de analytische LEM benaderingen worden ook sterktes uit triaxiale compressieproeven gebruikt. Hier geldt echter dat de gemaakte fout te niet wordt gedaan door andere fouten. Door nu met EEM het grondgedrag nauwkeuriger te gaan benaderen geldt niet langer dat de ene fout de andere opheft. Hoe groot invloed hiervan op de berekende evenwichtsfactor is, zal met voorbeeld berekeningen duidelijk moeten worden gemaakt.

### 3 Bepaling evenwichtsfactor

Het sterktegedrag van slecht doorlatende grond kenmerkt zich in de ontwikkeling van waterover-, of onderspanning al naar gelang de tendens voor compactie of dilatantie. Door de waterspanningsontwikkeling tijdens de afschuiffase vindt er een verandering van effectieve spanning plaats. Deze verandering van effectieve spanning heeft invloed op de maximaal te mobiliseren schuifweerstand; het spanningspad buigt af. Bij het uitvoeren van een  $\phi$ -c-reductie wordt de bezwijklijn stapsgewijs verlaagd. Het ontwikkelen van waterover -, of onderspanning treedt hierdoor niet op. Het verschil is in de onderstaande figuur weergegeven.



Als alternatief voor een  $\phi$ -c-reductie is in PLAXIS hiervoor de mogelijkheid “design approach” beschikbaar. Hierbij kan worden gewicht tussen verschillende parametersets. Door een parameterset te definiëren waarbij de sterkteparameters met een partiële factor verlaagd zijn, kan worden nagegaan of de stabiliteit bij een vooraf opgegeven minimaal veiligheidsniveau voldoet. Als gevoeligheidsanalyse kan dan in een tweede stap alsnog een  $\phi$ -c-reductie gedaan worden om te kijken hoever de opgegeven evenwichtsfactor van het werkelijke evenwicht af zit.

*Nagekomen opmerking:*

*In de huidige werkwijze zijn voor Nederlandse dijken algemeen toepasbare materiaalfactoren ontwikkeld. Vervolgens dient de evenwichtsfactor die, bv met LEM, methode is berekend minimaal te voldoen aan een schadefactor. De schadefactor verdisconteert het veiligheidsniveau van het onderzochte dijkvak en het feit dat niet voor elke dijk dezelfde mate van veiligheid wordt geëist. Met de voorgestelde design approach kan alleen worden vastgesteld dat na het switchen van parameters evenwicht wordt gevonden, maar de mate waarin is onbekend. Dit kan worden verholpen door per*

*project de materiaalfactoren te bepalen, zodanig dat de schadefactor gelijk wordt aan 1,0. Dit is technisch mogelijk, maar verdient nadere uitwerking en introductie.*

In het algemeen wordt opgemerkt dat een  $\varphi, c$ -reductie ontwikkeld is om te komen tot een globale evenwichtsfactor en dat deze niet bedoeld is voor het bepalen van snedekrachten in constructies en of vervormingen bij het optreden van bezwijken.

Het TREEM schrijft voor dat bij een sterkte reductie berekening moet worden uitgegaan van associatief materiaalgedrag, dat wordt gesimuleerd door te stellen  $\varphi' = \psi$ . De achterliggende gedachte is dat de met associatief materiaalgedrag een hogere numerieke stabiliteit wordt behaald, het resultaat niet meshafhankelijk is en daarmee dat het resultaat beter reproduceerbaar is.

Vastgesteld dient te worden of bij gebruik van de voorgestelde materiaalmodellen het eveneens nodig is om de sterkte reductie berekening met een set parameters dat associatief grondgedrag simuleert en hoe de benodigde parameters dan moeten worden vastgesteld. Opgemerkt wordt dat het TREEM uitgaat van gedraineerde stabiliteitsanalyses. Bij ongedraineerde analyses het toepassen van een (hoge) waarde voor  $\psi$  leidt tot hoge ongedraineerde sterkte. Met name voor veen en klei een hoge waarde voor  $\psi$  onrealistisch. Daarmee is de hoge ongedraineerde sterkte die bij een hoge waarde voor  $\psi$  wordt gevonden onrealistisch.

Wat de definitie van de evenwichtsfactor zou moeten zijn en hoe zich dit verhoudt tot de veiligheidsfilosofie zal in de derde expertmeeting aan de orde komen.

### 3.1 Initiele toestand, stabiliteit en opdrijven

Voor het bepalen van de initiële toestand van het dijklichaam in EEM modellen is de geohydrologische situatie belangrijk. De effectieve spanningen bepalen namelijk in grote mate de ongedraineerde schuifsterkte.

Het verloop van de waterspanning in horizontale en verticale zin is belangrijk. Opgemerkt is dat een discussie over het gebruik van geavanceerde materiaalmodellen alleen zinvol is als de overige invoergegevens, zoals de initiële (water)spanningstoestand in orde is. Daarnaast is het waterspanningsverloop evenwijdig aan de dijk (in een 3D model) belangrijk. Op dit moment is John van Esch bezig met de ontwikkeling van DGFlow waarin het tijdsafhankelijke aspect wordt beschouwd. Cor zal proberen helderder te krijgen wat er nu (en straks) precies met het model kan, zodat er geen dingen dubbel worden gedaan in de ontwikkeling van EEM modellen.

Voor wat betreft opdrijven en opbarsten spelen er diverse discussies:

- 1 Het verschil: bij opdrijven ontstaat onder het slappe lagenpakket een stijghoogte gelijk aan het gewicht van het slappe lagenpakket. Hierdoor reduceert de korrelspanning lokaal tot 0. Bij opbarsten gebeurt initieel hetzelfde, echter bij dunne lagen bestaat er de kans dat deze barsten. In de huidige praktijk wordt aan de opgebarste lagen geen sterkte mee gegeven,  $\varphi'$  en  $c = 0$  berekeningen..
- 2 het criterium van opbarsten: een opbarstpotentiaal 1,0 of 1,2 of nog iets anders.
- 3 de sterkte van een opgebarste laag deze gelijk aan 0 te stellen lijkt zeer conservatief.

Deze discussies worden elders gevoerd en Cor zal iedereen hiervan op de hoogte houden.

Voor de blauwdruk is het van belang dat in EEM modellen negatieve korrelspanningen tot numerieke instabiliteit kunnen leiden. Momenteel wordt het opdrijven gemodelleerd door geen negatieve korrelspanningen toe te laten. De effectieve spanning is hierbij minimaal 1kPa. Dit kan door het aanpassen van het stijghoogte verloop.

Voor het opbarsten en opdrijven zijn er nog een aantal andere aandachtspunten/ervaringen:

- 3D-effect. Het is aannemelijker dat opdrijven bij parallelsloten gebeurt dan bij kopsloten. In 3D-sommen kan dit worden meegenomen, in 2D sommen moet hier een keuze gemaakt worden.
- De lengte van het mesh in het achterland.
- Verschillen tussen geavanceerdere modellen en modellen met eenvoudige waterspanningen.

Niet alleen bij opdrijven, maar ook in bredere zin kunnen vervormingen leiden tot een andere initiële situatie. Bijvoorbeeld het falen in een construction stage. In EEM modellen kunnen dan problemen optreden met sommige parameters, zoals stijfheid en effectieve spanning, omdat de consolidatie nog niet volledig was. Ook de remoulded strength van afgeschoven grondlichamen is hierbij niet eenduidig. Er zijn verschillende trucjes om de initiële toestand toch te beschrijven; bijvoorbeeld door reset state parameters of reset small strain stiffness. Het beschouwen van een restprofiel zal in de derde expert sessie veiligheidsfilosofie aan bod komen.

In het algemeen geldt wel dat hoe complexer de modellen zijn, hoe complexer de initiële situatie en hoe gevoeliger het berekende eindantwoord wordt voor verschillen in de initiële situatie. Daarnaast wordt de gebruikersfactor dan ook weer groter. Dit is ook een aspect om mee te nemen naar de derde expert sessie veiligheidsfilosofie.

## 4 3D berekeningen

De analyse van de stabiliteit van dijken wordt traditioneel plain strain, 2D, uitgevoerd. Niet alle aspecten van de stabiliteit van dijken is met een plain strain benadering goed te modelleren. Voorbeelden zijn de overgangsconstructies, waar constructies weer overgaan in een groeiende dijk, het modelleren van afzonderlijke versterkingselementen, zoals dijkdeuvels,- nagels of ankers of het modelleren van een lokale onderbreking van de versterkingsconstructies. Hiervoor is 3D-EEM programmatuur beschikbaar. In principe zijn alle benodigdheden voor het 3D rekenen beschikbaar. Echter uit de relatief beperkte ervaring volgen de volgende opmerkingen:

- Een mesh voor een 3D analyse bestaat uit een orde meer elementen dan een 2D analyse. Hierdoor zal in de praktijk vaak worden gekozen voor een grover mesh van een lagere orde elementen.
- Het blijkt lastig om lokaal te kunnen verfijnen. Hierdoor is het lastig om kleine elementen in een groot grondmassief goed te modelleren, ook boogwerking en doorpersen is lastig te analyseren.
- 3D analyses zijn numeriek minder stabiel.

Gezien de bovengenoemde punten is een vergelijking tussen 2D en 3D analyses wenselijk.

## 5 Overig

Het huidige TREEM richt zich specifiek op groene dijken en dijken met een onverankerde damwand. In het TREEM wordt uitgegaan van het gebruik van gedraineerde stabiliteitsanalyses met het Mohr-Coulomb model. Ook worden er mogelijke verbeterpunten genoemd.

Het commentaar en errata/aanvullingen op het TREEM wordt verzameld en gebundeld om te kijken wat nog relevant is.

Constructies in dijken komen de volgende keer aan bod. Het praat makkelijker als er ook van een aantal constructies een plaatje is. Bijvoorbeeld een of twee sheets om iets toe te lichten.

De te gebruiken modelfactor voor PLAXIS/EEM modellen is onduidelijk, ook in combinatie met de onzekerheden, partiële factoren. De essentie is hoe een EEM model zich verhoudt tot de werkelijkheid. Deze vraagstukken horen thuis in het gedeelte veiligheidsfilosofie en zullen later nog aan bod komen.

## 6 Actiepuntenlijst

De volgende meetings zijn als volgt gepland:

2<sup>de</sup> expert meeting: 16 februari 2016, 13:00 – 17:00 uur, Deltares, vergaderzaal Ambition.

3<sup>de</sup> expert meeting: 1 maart 2016, 13:00 – 17:00 uur, Deltares, vergaderzaal Paviljoen 1.

Actiepunt	Uitvoerder	Geplande datum	Datum gereed	Status
1.1	Versies TREEM opzoeken en verspreiden	enCor	2 <sup>de</sup> meeting	
1.2	Uitzoeken wat in onderdeel tijdsafhankelijke stabiliteit precies wordt opgeleverd	enCor	2 <sup>de</sup> meeting	
1.3	Opdrijven/opbarsten op de hoogte houden	discussie enCor	2 <sup>de</sup> meeting	
1.4	Commentaar op TREEM verzamelen en bundelen		2 <sup>de</sup> meeting	
1.5	rondsturen publicatie Davies	Ronald	2 <sup>de</sup> meeting	



## **F Verslag tweede expertsessie**



## Verslag

<b>Datum verslag</b> 26 februari 2016	<b>Ons kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0012	<b>Project</b> 1220505-001	<b>Opgemaakt door</b> Mark van der Krogt
<b>Datum bespreking</b> 16 februari 2016	<b>Aantal pagina's</b> 9		
<b>Vergadering</b> Tweede Expertmeeting Blauwdruk EEM			

### Aanwezig

Joost Breedevelt, Hans Teunissen, Hellen Larsen, Timo Schweckendiek (Deltares), Ronald Brinkgreve (PLAXIS), Vasco Veenbergen (ABT), Arny Lengkeek (Witteveen+Bos), Rob van der Sman (RHDHV), Ben Rijnveld (FUGRO), Jeroen Hermans (Grontmij), Cor Zwanenburg, Mark van der Krogt

### Afwezig

Joost van der Schrier (RHDHV), Marco Peters (Grontmij)

---

## 1 Opening

Iedereen wordt wederom welkom geheten. Er zijn twee nieuwe gezichten. Helle Larsen (Deltares) schuift aan vanwege haar betrokkenheid bij constructies en stabiliteitswanden in dijken. Jeroen Hermans (Grontmij) komt in de plaats van Marco Peters.

## 2 Bespreking notulen

### 2.1 Notulen eerste expertmeeting

#### Opmerkingen

Pagina 5, derde alinea: Bij ongedraineerde analyses  $\psi$  helemaal niet gebruiken.  
Pagina 6, actiepunt 1.5: Davis

#### Actiepunten

- 1.1 De update van TREEM welke in het kader van WTI is opgesteld, is ingebracht in ENW-Techniek. RWS wil de reactie van ENW hierover afwachten voordat deze versie wordt verspreid. Het TREEM(2) is grotendeels gebaseerd op de *Ontwerprichtlijn Stabiliteitsschermen*. Als er behoefte aan dit document is kan het worden opgestuurd. Een aantal documenten zijn ook benaderbaar via de [Helpdesk Water](#).
- 1.2 Het uitzoeken van wat er in onderdeel tijdsafhankelijke stabiliteit wordt opgeleverd is nog niet uitgevoerd. De actie wordt voortgezet.
- 1.3 Sinds de vorige meeting is er niets veranderd aan de discussie opdrijven/opbarsten. De actie wordt voortgezet.
- 1.4 Aangezien het TREEM(2) nog niet gepubliceerd is, heeft het ook nog geen zin om het commentaar hierop te verzamelen. De actie wordt uitgesteld.
- 1.5 Ronald heeft de publicatie van Davis met betrekking tot associatief en niet-associatief grondgedrag nog niet opgezocht en rondgestuurd. Hans heeft dit artikel en zal het rondsturen.

*Nagekomen reactie:*

*In de eerste meeting bedoelde Ronald niet het artikel van Davis, maar het artikel van Tschuchnigg & Schweiger, dat voort borduurt op het thema Associated vs. Non-associated plasticity.*

## 2.2 Memo eerste aanzet n.a.v. eerste bijeenkomst

Cor heeft een aanzet gemaakt voor de blauwdruk EEM. Na de eerste expertmeeting kwam naar voren dat het vervolgonderzoek zal bestaan uit een korte en lange termijn spoor. Op korte termijn ligt de focus meer op het berekenen van sterkte in de UGT. Het lange termijn spoor focust meer op vervormingen welke belangrijk zijn in de BGT. Deze tweedeling is niet ingegeven door de prioriteit van de acties, maar door de beschikbare tijd die benodigd en beschikbaar is om de ontwikkelingen te realiseren.

De verkeerde versie van het memo is rondgestuurd, maar er zal zo snel mogelijk een goede versie van worden rondgestuurd, zodat er vóór de derde expertmeeting commentaar op gegeven kan worden.

## 2.3 Relaties van de blauwdruk EEM met andere POV-M projecten

Bij het ontwikkelen van een visie/ blauwdruk voor de ontwikkeling van EEM is het belangrijk dan deze aansluit bij andere POV-M projecten en dat de conclusies en aanbevelingen van de blauwdruk niet tegenstrijdig zijn met andere POV-M projecten. Daarnaast is het belangrijk dat er geen zaken dubbel onderzocht worden. Relaties met andere POV-M projecten zijn:

- 1 Actuele sterkte (Arno Rozing)
- 2 Vervormingseisen (Joost van der Schrier)
- 3 Damwand praktijkproef (Joost Breedevelt)
- 4 Opdrijven en opbarsten (Andre van Hoven, Gijs Hoffmans)
- 5 Ontwerp onverankerde damwanden (Bert Everts). Hier hoort ook het onderdeel restprofiel bij.
- 6 Tijdafhankelijke stabiliteit (John van Esch)
- 7 Ontwerp alternatieve versterkingsmethoden (Huub de Bruijn)
- 8 Veldtest vacuumconsolidatie (Huub de Bruijn)
- 9 3D fenomenen (Arno Rozing). Een onderdeel hierbij is ook criteria voor het uitvoeren van 3D berekeningen.
- 10 Pilotproject zettingen op ankers (Helle Larsen). Zettingen oefenen een verticale kracht uit op ankers wat een toename van de ankerkracht tot gevolg heeft. Deze toename wordt in aparte modellen berekend. Verder zijn er ontwikkelsporen voor een validatie van PLAXIS2D/3D embedded pile en het ontwikkelen van een geïntegreerd model.

Het onderwerp verankerde damwanden is geen onderzoek in de POV-M, maar komt wel veel voor in dijken. Problemen zijn de verticale component van de ankerkracht welke buiten PLAXIS om berekend moet worden en het missen van de invloed van horizontale gronddruk op het draagvermogen. Er is ook een relatie met het onderwerp vervormingen van korte palenwanden en funderingen als gevolg van dijkversterkingen en toenemende belasting, maar dit is niet direct gelinkt aan waterveiligheid/betrouwbaarheid van de dijk. Het schema met gerelateerde onderzoeken is opgenomen als de bijlage van deze notulen.

## 3 Bespreken constructies in dijken

### 3.1 Introductie

De tweede sessie met betrekking tot het opstellen van de blauwdruk EEM staat in het teken van het ontwerpen van constructies in dijken. Het gaat hier om de combinatie van dijken en constructieve elementen, zoals damwanden. Het gaat hier niet om zelfstandige waterkerende constructies, bv keermuren.

Een veel voorkomend probleem zijn dijken die net niet voldoende veilig zijn en dus een kleine versterking vereisen. Op het moment dat er gekozen wordt voor een constructieve versterking blijkt dat het ontwerp vaak zwaarder wordt dan gedacht.

Een belangrijk uitgangspunt in het ontwerpen van constructies in dijken dient te zijn dat het ontwerpen van een dijk met constructie niet wezenlijk anders is dan het ontwerpen van een groene dijk (dijk zonder constructies). In de praktijk blijken er echter wel verschillen, omdat er bij constructies gerekend wordt met een BGT en UGT, terwijl voor groene dijken de nadruk ligt op UGT berekeningen. Hierbij is het belangrijk om de stijfheidsverschillen tussen grond en constructie goed te beschouwen, omdat dit in grote mate de krachtsverdeling en vervorming bepaalt.

Daarnaast zijn er verschillen in de veiligheidsfilosofie. In de Eurocode wordt namelijk gerekend met  $\beta$ -afhankelijke materiaalfactoren (klassen), terwijl voor groene dijken  $\beta$ -onafhankelijke materiaalfactoren in combinatie met  $\beta$ -afhankelijke schadefactoren worden gebruikt.

Een inventarisatie van vragen rondom het ontwerpen van constructies in dijken met behulp van EEM voorafgaand aan de tweede sessie leidde tot een indeling in vier onderwerpen: algemene aspecten, constructieve aspecten, toetsing en richtlijnen.

### 3.2 Algemene aspecten

#### Ongedraineerd rekenen

Het eerste aspect is gerelateerd aan de overgang naar het ongedraineerd rekenen voor groene dijken. Dit heeft ook invloed op EEM berekeningen en de constructies in de dijken. Het ongedraineerd rekenen is gebaseerd op sterkteberekeningen in de UGT. Om dit in EEM te faciliteren is in het vooroverleg besloten een nieuw materiaal model, gebaseerd op het SHANSEP concept, te ontwikkelen. Dit model geeft de mogelijkheid om de ongedraineerde sterkte goed te modelleren, echter is niet specifiek bedoeld om vervormingsberekeningen te verbeteren.

In het bijzonder speelt hierbij het stijfheidsverschil tussen de verschillende materialen (grond, damwand, constructie) een grote rol in de verdeling van krachten op de constructie. Het SHANSEP model is in essentie niet bedoeld om de snedekrachten te bepalen. Er wordt geopperd om te onderzoeken of dit met ingewikkeldere modellen zoals NGI ADP wel mogelijk is. Deze berekeningen zijn vaak BGT berekeningen, waarbij (gezien de tijdsschaal van het vervormingsproces) juist gedraineerd gerekend wordt.

Het belangrijkste verschil is dus dat de vervormingen BGT berekeningen zijn, waar gedraineerd gerekend moet worden met modellen, waarbij stijfheden correct gemodelleerd wordt, terwijl voor UGT berekeningen voor de geotechnische sterkte van de dijk en ondergrond ongedraineerd berekend wordt met behulp van de SHANSEP methode.

## Nauwkeurigheid en betrouwbaarheid vervormingsberekeningen

Naast het materiaalmodel, de stijfheden en het verschil tussen BGT en UGT is de nauwkeurigheid van vervormingsberekeningen een punt van aandacht. Het is vooral de vraag welke nauwkeurigheid haalbaar is en welke onderdelen in de stabiliteitsanalyse bepalend zijn voor de nauwkeurigheid.

De nauwkeurigheid van de berekening wordt bepaald door de hele keten en begint bij de schematisatie van de ondergrond, grondlagen en stijghoogten. Een deel van de onzekerheid in berekende vervormingen komt uit de parameterbepaling en onzekerheid van proeven en de validatie hiervan. Stijfheidsparameters kunnen heel erg verschillen per laboratoriumproef/testmethode waardoor het gebruik van verschillende waarden kan leiden tot grote verschillen in de berekende vervormingen. Tot slot wordt de nauwkeurigheid bepaald door het gebruikte materiaalmodel en aspecten die het numerieke proces beïnvloeden zoals de elementen mesh, de opgelegde randvoorwaarden etc.

Ongeacht de discussie welke bronnen van onzekerheid er zijn, moet er in ieder geval worden voorkomen dat de strengheid van de vervormingseisen in conflict komen met de haalbare betrouwbaarheid. Om een betrouwbaar resultaat te hebben zal de nauwkeurigheid van de berekende vervorming in principe (bij voorkeur?) een orde kleiner moeten zijn dan de eis. De huidige eis is een maximaal toelaatbare vervorming van 10 centimeter. Onduidelijk is wat de bandbreedte is van de berekende vervormingen is en hoe deze bandbreedte zich verhoudt tot de gestelde eis van 10 cm. De vraag kan ook andersom gesteld worden: welke informatie is minimaal nodig en hoe moet een berekening worden uitgevoerd om een voldoende nauwkeurig antwoord te verkrijgen.

Een methode om de gevoeligheid van de berekende vervorming ten aanzien van de parameterkeuze te berekenen is via een gevoeligheidsanalyse door middel van een parametervariatie. Hiermee is in ieder geval de spreiding ten aanzien van de parameters onderzocht en kan men zekerder zijn van het eindantwoord, ondanks niet te weten welke parameterwaarden juist zijn..

Een gevoeligheidsanalyse kan een deel van het antwoord vormen. Het voordeel is dat een gevoeligheidsanalyse kan worden gestandaardiseerd. Voor praktische toepassingen zal dit nog nader uitgewerkt moeten worden.

Naast de grondparameters zijn ook parameters zoals de ankerkracht en stijfheid van de stabiliteitswand van belang. Deze zijn bovendien nog weer afhankelijk van de grondparameters. In het damwanden, CUR 166, wordt al een methode voorgeschreven hoe 5 gevoeligheidsberekeningen voor de ankerkrachten uitgerekend kunnen worden.

Een tweede bron van onzekerheid is toe te schrijven aan de gebruiker en de schematisering. Namelijk, structurele fouten in de schematisering of verkeerde gebruikerskeuzes zoals de modelkeuzes worden hier niet afgedekt door een parameterstudie/gevoeligheidsanalyse. Dit is in principe het geval bij ieder (geotechnisch) probleem waarbij de ingenieur verstandige keuzes moet maken. Om hier enige richting in te krijgen kan een bezwijkproef bij damwanden wel als validatie voor het de modellen en de methode dienen. Uit een eerste inventarisatie blijkt dat er momenteel diverse praktijkproeven worden gepland waar mogelijk op aangehaakt kan worden.

Een aspect voor de toepasbaarheid van bepaalde modellen is het bepalen welk spanningspad dominant is voor het mechanisme/model en kijken welke de belangrijkste parameter hiervoor is.

### 3.3 Constructieve aspecten

#### Bepalen maatgevende momenten

Conform het TREEM worden de maatgevende momenten en dwarskrachten bepaald na het uitvoeren van een sterkte reductiefase. Een sterkte reductiefase is echter alleen bedoeld voor de geotechnische stabiliteitsberekening in UGT. Namelijk, in deze UGT berekening zijn de vervormingen ook groot, waardoor de (stijve) damwandconstructie meer kracht naar zich toetrekt. Deze benadering is onrealistisch voor het bepalen van de maximale snedekrachten.

Als alternatief is de volgende optie besproken:

Een methode om de snedekrachten wel goed te berekenen is het geotechnisch rekenen met rekenwaarden en MHW. Daarna kunnen op basis van de maatgevende spanning de snedekrachten in BGT berekend worden. Daarna een partiële factor toevoegen over het moment om de sterkte van de stabiliteitswand in UGT te berekenen.

Een mogelijke andere methode is de design approach berekening met een factor op de grondparameters en dan de veiligheid berekenen. Dan de snedekrachten bepalen en daarna de sterktereductie uitvoeren. Achteraf moet gecontroleerd worden of aan de vervormingstoets voldaan wordt.

Daarnaast kan overwogen worden om eerst de geotechnische stabiliteit te bepalen en later de stabiliteitswand te modelleren. Het risico is dat de dijk al bezwaken kan zijn in de construction stage berekeningen.

Een vervolgactiviteit is het maken van rekenvoorbeelden om na te gaan wat het praktische verschil is tussen de verschillende methodes en wat de orde van grootte verschil is in berekende snedekrachten.

#### Plastisch scharnier

In de huidige richtlijnen is het niet toestaan om te rekenen met een plastisch scharnier in een stabiliteitswand. Het is wel mogelijk, maar wordt nog niet gedaan. Er mag pas plastisch gerekend worden bij klasse 1 wanden in verband met toleranties en corrosie. Berekeningstechnisch is het rekenen met een plastisch scharnier niet mogelijk in een lineair elastisch perfect plastisch model omdat dan de vervorming mist. Het is wel mogelijk dit gedrag te implementeren via M-kappa diagrammen. Hiermee wordt de stijfheid belastingsafhankelijk. Dit heeft weer invloed op de vervorming en dus op de normaalkracht. Deze optie wordt gebruikt voor beton, maar zou ook mogelijk moeten zijn voor staal. Dit is de methode "plates" in PLAXIS 2D. Een praktisch probleem hierin is het ontbreken van de juiste parameters voor staal en eventueel andere materialen.

#### Dimensioneren ankers

Een ander aandachtspunt is lateraalkrachten op ankers, welke niet kunnen worden meegenomen in de EEM analyse. Het uitrekenen hiervan gaat in een ander model. Daarna wordt het overige gedrag gemodelleerd via de Embedded Pile optie. De berekeningen met een 2D-model zijn op dit moment niet realistisch, hier is dus een actie voor benodigd. Op dit moment wordt er uitvoerig gemonitord bij de damwandproef in project KIS. Er zijn onder andere glasvezels op de ankerstangen geplaatst en de totale ankerkracht wordt gemeten. Ook

de zettingen worden gemonitord. De resultaten van de proef moet worden meegenomen in de blauwdruk. De wens is om op lange termijn ook de laterale kracht in een integraal model in een eindige elementen model mee te kunnen nemen.

### Overgangsconstructies

Afhankelijk van de (grootte van) vervormingen gaat het niet altijd goed met het berekenen van overgangsconstructies. Als het verschil in vervormingen van een groene dijk in de BGT ten opzichte van een constructief versterkte dijk orde decimeters zijn, dan kan dit problemen en scheurvorming geven. Als het vervormingsgedrag gelijk is dan is er geen probleem. Het vervormingspatroon is sterk afhankelijk van de grond en het type wand. Het is vooral belangrijk wat er bij de kruin gebeurt. Daarnaast is de richting van de vervorming van belang voor de constructie (horizontale verplaatsing, kruindaling). Het falen bij overgangsconstructies ontstaat vooral door kieren e.d.. Aangezien de veiligheidsfilosofie gericht is op overstromingskans moet dit pragmatisch meegenomen worden.

### Zakking van de damwand

#### *Nagekomen reactie:*

*In eindige elementen modellen zal de zakking van de damwand goed moeten worden meegenomen en het is belangrijk welke eis er wordt gesteld aan deze zakking in de BGT en in de UGT. Zaken die hierbij spelen is dat het draagvermogen volgens de NEN en in Plaxis op een andere wijze worden berekend. Zo dient volgens de NEN voor drukken een  $\alpha_s$  van 0,006 te worden aangehouden en voor trillen 0,004. Hoe zou dit in Plaxis meegenomen kunnen worden? Daarnaast is de horizontale korreldruk van invloed op het draagvermogen en negatieve kleef, maar omdat het verfoppervlak anders is dan de strekkende meters constructie mag je dit niet volledig meenemen.*

*Bij grote verticale krachten in de damwand door de ankerkracht en negatieve kleef kan het zijn dat knik in de damwand maatgevend wordt. De momentcapaciteit kan dan zo maar halveren. Lastig hierbij is om de kniklengte in te schatten van de combinatie ankerkracht/negatieve kleef. Bovendien zal door knikkende grond ook weer wat tegenwerken. Dit is niet goed handmatig mee te nemen, maar zou mogelijk wel in Plaxis kunnen indien in de berekening rekening wordt gehouden met de werkelijke vervorming van (enkel) de damwand.*

## **3.4 Toetscondities**

### Opbarsten en c en $\varphi = 0$ analyses

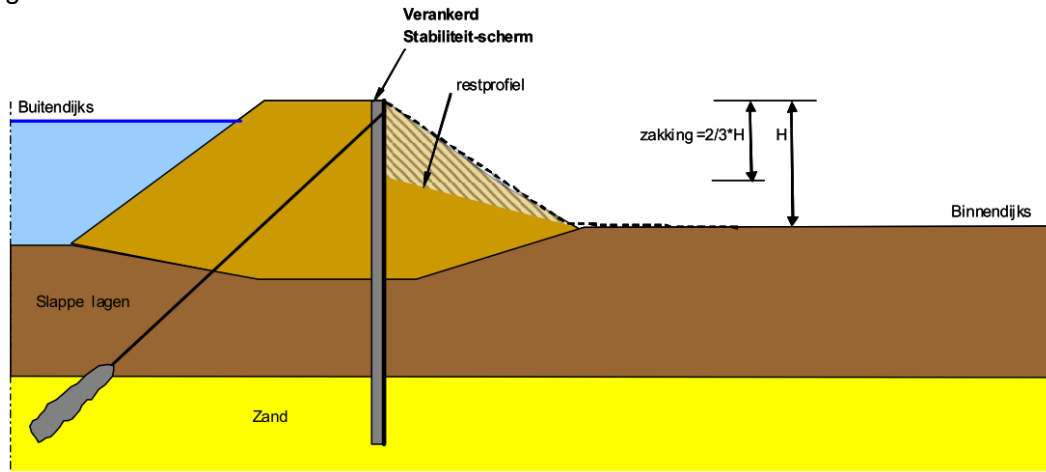
Indien er sprake is van opbarsten van de slappe lagen aan de teen van de dijk, wordt aan de grond in het gedeelte achter de dijk geen sterkte toegekend. Dat betekent automatisch dat er met een restprofiel gerekend moet worden voor de opgebarsten zone. Het lijkt onrealistisch dat alle sterkte weg is, aangezien het opbarsten een 3D effect is: lokaal zullen openingen of scheuren ontstaan waardoor er ventielwerking ontstaat en de overdruk kleiner wordt. Er zijn ontwikkelingen in een ander POV-M spoor gaande, welke afgewacht moeten worden.

### Restprofielbenadering

In sommige situaties is zowel een diep als een ondiep glijvlak maatgevend. Een constructie ter plaatse van de binnenkruinlijn kan het stabiliteitsprobleem van het diepe glijvlak oplossen. Een dergelijke constructie dient in voldoende mate stabiel te zijn, ook als bezwijken van het talud achter de constructie (langs een diep/ondiep glijvlak) optreedt. Daarnaast geldt dat in EEM analyses de berekende stabiliteit wordt bepaald door het meest maatgevende bezwijkmechanisme. Indien bij het controleren van de sterkte en stabiliteit van de constructie



ten behoeve van het oplossen van het diepe bezwijkmechanisme een ander maatgevend mechanisme optreedt, is het lastig aan te tonen dat de weerstand tegen het optreden van het diepe bezwijkmechanisme voldoet aan de gestelde norm. Een manier om beide problemen op te lossen is het opnemen van een afgeschoven binnentalud in de schematisering van het dijklichaam. Dit is de restprofielbenadering. Bij het KIS project wordt het restprofiel als volgt gemodelleerd.



In totaal wordt het restprofiel op 1/3 van de oorspronkelijke zakking geschematiseerd. Van de 2/3 zakking is 1/3 de zakking van het binnentalud bij een afschuiving en 1/3 is de vermindering van sterkte van het binnentalud. Er is geen correctie voor het omhoogkomen van het maaiveld omdat dit buiten het invloedsgebied van de stabiliteitswand ligt: in EEM berekeningen verdwijnt dus eigenlijk massa uit het systeem. Dit is niet terecht, want ondanks dat de afschuiving een verminderde sterkte heeft, helpt het gewicht wel mee in de stabiliteit van de wand.

Om in dit geval wel de juiste snedekrachten te kunnen bepalen worden twee opties voorgesteld:

- 1 Het meenemen van het afgeschoven gewicht door middel van een belasting, de verminderde sterkte modelleren door minder grond mee te nemen.
- 2 Het laten afschuiven van het stuk grond en gebruik maken van een updated mesh met eventueel massa/volume balans. Daarna verknde sterkte toevoegen aan het afgeschoven deel en daarmee de snedekrachten berekenen. De sterkte is dan kleiner, maar er is wel massa aanwezig zodat de stabiliteitswand genoeg grondgewicht heeft om een bepaald inklemmingsmoment op te brengen.

### Deuvels en nagels.

Bij alternatieve dijkversterkingsmethodes zoals dijkvernageling valt het op dat er veel verschillende factoren spelen. In het algemeen speelt de vraag hoe dit soort kleine constructies passen in de veiligheidsfilosofie. Het falen van een enkel onderdeel hoeft namelijk niet overstromen tot gevolg te hebben. In een foutenboom op systeemniveau kan dit zijn plaats vinden. Daarbij moeten ook gemeenschappelijke oorzaken of correlaties een plaats in vinden. In project TALREN is een soort werkwijze ontwikkeld waarbij op nagels op systeemniveau wordt gecheckt of aan de Unity Check wordt voldaan.

Hoe de interactie tussen grond en constructie bij dit soort 3D-achtige constructies (stromen en/of snijden van de grond tussen dijkdeuvels, nagels, palen of in openingen van damwanden)



beschreven moet worden in een EEM-analyse is nog niet duidelijk. Wel is duidelijk dat dit soort constructies zich gaan gedragen als membraan waardoor er grote vervormingen zijn.

### 3.5 Richtlijnen

De uitwerking van de besproken punten zal in richtlijnen terecht moeten komen. De huidige ontwerprichtlijn stabiliteitsschermen richt zich op stalen damwanden, maar zal bij voorkeur uitgebreid moeten worden met andere typen constructies zoals o.a. palenwanden, diepwanden, kistdammen, dijkdeuvels, korte damwanden.

Mogelijk is optimalisatie van de huidige richtlijn mogelijk door niet alle mogelijke maatgevende situaties in een berekening te combineren.

Daarnaast moet worden vastgesteld voor welke situaties 3D-analyses noodzakelijk zijn en welke eisen hieraan gesteld moeten worden.

### 3.6 Bijlagen

- 1220505-001-GEO-0009-m-eerste aanzet n.a.v. eerste bijeenkomst.pdf
- Relaties blauwdruk met onderzoeken in POV-M, aangepaste versie.
- Verduidelijkende slides:
  - Ben: onverankerde stabiliteitswanden
  - Arny, kleine dijkconstructies (deuvel/nagel/anker)
  - Vasco: restprofiel bij (grote) constructies (stabiliteitswanden)
  - Rob: Specifieke problematiek bovenriviergebied (opbarsten, kruindaling)
- Artikel Davis (1968)
- Artikel Tschuchnigg & Schweiger & Sloan (2015)

## 4 Actiepuntenlijst

De volgende meeting is als volgt gepland:

3<sup>de</sup> expert meeting: 1 maart 2016, 13:00 – 17:00 uur, Deltares, vergaderzaal Paviljoen 1.

Actiepunt	Uitvoerder	Geplande datum	Datum gereed	Status
1.1 Versies TREEM opzoeken en verspreiden	Cor	2 <sup>de</sup> meeting	2 <sup>de</sup> meeting	Gereed
1.2 Uitzoeken wat in onderdeel tijdsafhankelijke stabiliteit precies wordt opgeleverd	Cor	3 <sup>de</sup> meeting		
1.3 Opdrijven/opbarsten discussie op de hoogte houden	Cor	3 <sup>de</sup> meeting		
1.4 Commentaar op TREEM verzamelen en bundelen		Uitgesteld tot later		Gereed

**Datum**  
26 februari 2016

**Ons kenmerk**  
1220505-001-GEO-0012

**Pagina**  
9/9

1.5	rondsturen publicatie Davis	Hans	17 feb. 2016	Gereed
2.1	rondsturen publicatie Tschuchnigg & Schweiger	Ronald	17 feb. 2016	Gereed
2.2	Memo eerste aanzet rondsturen	Mark		

---



## **G Verslag derde expertsessie**

## Verslag

<b>Datum verslag</b> 25 maart 2016	<b>Ons kenmerk</b> 1220505-001-GEO-0015	<b>Project</b> 1220505-001	<b>Opgemaakt door</b> Mark van der Krogt
<b>Datum bespreking</b> 1 maart 2016	<b>Aantal pagina's</b> 8		
<b>Vergadering</b> Derde Expertmeeting Blauwdruk EEM			

### **Aanwezig**

Ronald Brinkgreve (PLAXIS), Vasco Veenbergen (ABT), Arny Lengkeek (Witteveen+Bos), Rob van der Sman (RHDHV), Ben Rijnveld (FUGRO), Jeroen Hermans (Grontmij), Falco Zueck (Arcelor Mittal), Roel Bijlard (Arcelor Mittal), Joost Bredeveld (Deltares), Hans Teunissen (Deltares), Timo Schweckendiek (Deltares), Cor Zwanenburg (Deltares), Mark van der Krogt (Deltares)

### **Afwezig**

Joost van der Schrier (RHDHV), Marco Peters (Grontmij)

---

## 1 Opening

Iedereen wordt wederom welkom geheten. Er zijn twee gasten namens Arcelor Mittal aanwezig, vanwege hun betrokkenheid bij damwandprojecten.

## 2 Bespreking notulen

### 2.1 Notulen tweede expertmeeting

#### Opmerkingen

Pagina 2, par 2.3 punt 5. Het onderzoek van Bert Everts richt zich in principe op het ontwerp van onverankerde damwanden, waarbij het restprofiel een onderdeel is. Er is geen specifiek project waarbij het restprofiel onderzocht wordt. De huidige aanpak is wel voldoende conservatief, maar mogelijk kan er scherper getoetst worden.

Pagina 3, par 3.1 alinea 3. Er is in de UGT geen officiële vervormingseis, maar in de contractdocumenten van KIS ("ontwerprichtlijn stabiliteitsschermen grijze versie") is wel een vervormingseis in UGT opgenomen.

Pagina 3, par 3.2. Aanvulling: Er kan ook een minimum OCR worden ingevoerd en de fases voorafgaand aan de UGT berekening met SHANSEP kunnen (zullen vaak) gedraineerd zijn.

Pagina 4. Aanvulling: Het narekenen van cases/bewijkproeven kan een onderdeel zijn in het bepalen van de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van vervormingsberekeningen.

Pagina 5, par 3.3, alinea 2. Rekenwaarden moet representatieve waarden zijn.

Pagina 5, laatste alinea. Hier hoort een actie van Helle bij: het doorsturen van onderbouwing van de vervormingseis van 10 centimeter bij stabiliteitswanden.

Pagina 6, alinea 4. Knikkende grond moet knik en de grond zijn.

#### Actiepunten

1.2: Cor heeft nog niet met John van Esch kunnen overleggen over tijdsafhankelijke stabiliteit. Aangezien het de laatste meeting is, zal Cor de resultaten aan de groep z.s.m. mailen.

1.3: Er zijn een aantal ontwikkelingen m.b.t. opdrijven/opbarsten. Er is een eerste concept rapport over opdrijven/opbarsten opgesteld. Arcadis gaat berekeningen uitvoeren met verschillende vuistregels die in de ontwerp -, en adviespraktijk gebruikt worden om verschillen te identificeren. Dit wordt voor diverse referentieprojecten gedaan en er wordt een overzicht gemaakt van de consequenties voor de hoeveelheid opgaves (in euro). Daarnaast wordt er aan de modelvorming gewerkt. Mogelijk zal experimenteel onderzoek nodig zijn om de vragen te beantwoorden.

## **2.2 Relaties van de blauwdruk EEM met andere POV-M projecten**

Op basis van de aangepaste versie van het relatieschema is het duidelijk dat er momenteel heel veel projecten gerelateerd aan EEM lopen. Niet alle onderwerpen hoeven op dit moment een plek in de blauwdruk te krijgen, maar de resultaten zullen wel richting geven aan vervolgonderzoek.

## **2.3 Memo eerste aanzet n.a.v. eerste bijeenkomst**

Cor heeft een aanzet gemaakt voor de blauwdruk EEM. Uit de expertmeetings zijn punten gevolgd waar direct mee aan de slag gegaan kan worden en punten waar op langere termijn iets gedaan moet worden. Op korte termijn ligt de focus meer op het berekenen van sterkte in de UGT. Het lange termijn spoor focust meer op vervormingen welke belangrijk zijn in de BGT. Deze tweedeling is niet ingegeven door de prioriteit van de acties, maar door de beschikbare tijd die benodigd en beschikbaar is om de ontwikkelingen te realiseren. Er zijn geen inhoudelijke opmerkingen op het memo.

De basis voor de implementatie van SHANSEP in PLAXIS is gelegd. Aan het importeren van een OCR uit een ander model wordt nog gewerkt. De verwachting is dat binnen enkele weken het user defined soil model gereed is.

# **3 Bespreken inpassing EEM in veiligheidsfilosofie**

## **3.1 Introductie**

De derde bijeenkomst staat in het teken van de inpassing in de veiligheidsfilosofie. In de voorgaande bijeenkomsten is de veiligheidsfilosofie al verschillende keren ter sprake gekomen. Enkele onderwerpen die eerder aanbod zijn gekomen zullen in deze bijeenkomst verder worden uitgediept.

De veiligheidsfilosofie zelf staat niet ter discussie: het gaat erom hoe een ontwerp gebaseerd op EEM berekeningen kan worden ingepast in de veiligheidsfilosofie, die oorspronkelijk is ontwikkeld voor analytische glijvlak modellen.

Hoewel richtlijnen (Ontwerprichtlijn stabiliteitsschermen)<sup>1</sup> beschikbaar zijn blijft de inpassing in de veiligheidsfilosofie een belangrijk aandachtspunt. Bijvoorbeeld ontwikkelingen van nieuwe materiaalmodellen moeten een plaats krijgen in de veiligheidsfilosofie, maar ook ongedraineerd rekenen conform de uitwerking in het WBI. Daarnaast geven ervaringen opgedaan met de ontwerpleidraad mogelijk aanleiding tot verbeteringen.

---

<sup>1</sup> Larsen H., Lubking P., Breedveld J. (2013) Ontwerp stabiliteitsschermen (type II) in primaire waterkeringen (groene versie), Ontwerprichtlijn voor WSRL, Deltares rapport 1205887-000-GEO-0016

### 3.2 Bepaling evenwichtsfactor, modelfactor, opschaalfactor

In de huidige werkwijze wordt de evenwichtsfactor bepaald met behulp van een  $\varphi$  - c reductie. Hierbij wordt uitgegaan van het Mohr-Coulomb model. Een van de problemen is dat bij een  $\varphi$  - c reductie analyse de wateroverspanning bij het opleggen van een ongedraineerde schuifbelasting (shear induced pore pressure) niet wordt gemodelleerd.

In de eerste bijeenkomst is gesteld dat een alternatieve werkwijze zou kunnen worden gevonden door het gebruik van design approaches waarbij de overstap naar een gereduceerde parameterset kan worden gemaakt. Hiermee wordt niet de grootte van een evenwichtsfactor gevonden, maar kan wel worden gebruikt om aan te tonen dat een bepaald veiligheidsniveau wordt gehaald.

De vraag is of met het gebruik van de design approaches een voldoende inpassing in de veiligheidsfilosofie wordt bereikt. Immers conform de veiligheidsfilosofie dient een stabiliteitsberekening gebaseerd op rekenwaarden voor de sterkte eigenschappen een evenwichtsfactor op te leveren die groter of gelijk is aan de gestelde eis,  $\gamma_{EEM,g}$ . Deze eis bestaat uit het product van de schadefactor, modelfactor, schematiseringsfactor en de opschaalfactor, zie vgl (1.1) uit de ontwerpleidraad:

$$\gamma_{EEM,g} = \gamma_s \gamma_n \gamma_{b,g} \gamma_{d,g} \quad (1.1)$$

Uiteraard kan de parameterset met rekenwaarden worden aangepast aan  $\gamma_{EEM,g}$ , maar dat is geen zuivere methode, omdat dan de schadefactor, modelfactor en schematiseringsfactor dan op materiaalparameters worden gezet. Als de gestelde eis uitkomt op  $\gamma_{EEM,g} = 1,0$  kan dit worden ontweken, maar het is de vraag is of dit wenselijk is als er een opschaalfactor gebruikt wordt om numerieke stabiliteit (enigszins) te garanderen.

Om voldoende numerieke stabiliteit te garanderen wordt momenteel in de analyse voor dijken met EEM gebruik gemaakt van een opschaalfactor waarmee de rekenwaarden van de sterkte eigenschappen worden opgewaardeerd. Als gevolg daarvan is de gestelde eis aan de minimale evenwichtsfactor eveneens met deze opschaalfactor verhoogd.

Opgemerkt wordt dat de schaalfactor alleen nodig is bij vergelijkingen tussen een analytisch glijvlak met mogelijk  $SF < 1$  en een EEM berekening. In alle andere gevallen (zoals het berekenen van de BGT) is geen opschaalfactor op de parameters benodigd, want als er numerieke instabiliteit zou optreden impliceert dit dat bij initiële (dagelijkse) omstandigheden de dijk al niet stabiel is. Bij voorkeur zou de berekening zonder de opschaalfactor moeten worden uitgevoerd. Mogelijk kan hier een knip worden gelegd tussen berekeningen ter controle van de uitgangspunten en ter vergelijking met analytische berekeningen enerzijds, waarbij de opschaalfactor wel wordt toegepast en anderzijds de daadwerkelijke ontwerpberekeningen waarbij geen opschaalfactor wordt toegepast.

*Nagezonden opmerking:*

*Het lijkt erop dat design approaches een zinvolle aanpak is om een UGT berekening voor de stabiliteit uit te voeren, maar of hetzelfde veiligheidsniveau wordt gehaald is onduidelijk. Daarnaast speelt de vraag of alleen de sterkteparameters of ook de stijfheidsparameters bij design approaches gereduceerd moeten worden en bij opschalen opgeschaald moeten worden.*

Bij een UGT berekening zou met design approaches getoetst kunnen worden of het ontwerp wel stabiel is bij  $\gamma_{EEM,g}$ . Benadrukt wordt dat hierna nog wel een  $\varphi$  - c reductie gedaan moet worden om wel degelijk aan te tonen dat er evenwicht  $>1$  is.

Een mogelijke werkwijze zou kunnen zijn dat de met behulp van design approach de stap van karakteristieke naar rekenwaarde voor de sterkte wordt gemaakt. Indien uit de berekening volgt dat de berekende geometrie voldoende stabiel is, wordt aangetoond dat er voldoende veiligheid is met betrekking tot de onzekerheid in grondeigenschappen. Vervolgens kan op een reguliere wijze een  $\varphi$  - c reductie worden uitgevoerd. De berekende  $\Sigma_{msf}$  dient vervolgens groter of gelijk te zijn aan het product van de schematiseringsfactor, schadefactor en modelfactor. Mogelijk kan de stap worden gemaakt naar beta – afhankelijke materiaalfactoren, waardoor de schadefactor gelijk wordt aan 1,0. In dat geval worden de onzekerheden met betrekking tot het materiaalgedrag gescheiden van de andere onzekerheden. De onzekerheden met betrekking tot het materiaalgedrag worden dan afgevangen door de design approach. De overige onzekerheden worden afgedekt door de berekende evenwichtsfactor.

*Nagezonden opmerking:*

*Belangrijk is dat dat de plane strain sterkte in Plaxis getoetst wordt of aangepast aan de werkelijke sterkte. Plaxis onderschat deze sterkte, omdat uitgegaan wordt van triaxiaal sterkte en deze is lager. Hierdoor wordt stelselmatig de sterkte onderschat. Ook dit heeft groot effect op toepassing van een design approach. Dit moet eerst worden onderzocht omdat dit een groot effect heeft op de sterkte analyses.*

### 3.3 Modelfactor

De vigerende veiligheidsfilosofie is gebaseerd op een semi-probabilistische aanpak. Dit is een aanpak gebaseerd op partiële veiligheidsfactoren. Een van deze partiële veiligheidsfactoren is de modelfactor. Deze factor verdisconteert de onzekerheid die het gebruikte model introduceert vanwege het feit dat het model (in feite elk model) een vereenvoudiging van de werkelijkheid is. Een overzicht van gebruikte modelfactoren is gegeven in Tabel 1.

Voor EEM berekeningen is bij het definiëren van de modelfactor aangehouden dat de stabiliteitsfactor wordt bepaald met een  $\varphi$ -c reductie in combinatie met het Mohr-Coulomb model. Indien in de toekomst op andere wijze de evenwichtsfactor wordt bepaald ligt het voor de hand dat er nieuwe aanvullende modelfactoren moeten worden bepaald. Het is mogelijk om voor ieder materiaalmodel een modelfactor te bepalen of om één modelfactor voor EEM te bepalen. Het is eerste is “scherper”, het tweede is wenselijker als het gaat om gebruiksvriendelijkheid.

Het wordt benadrukt dat er consistentie moet zijn tussen de modelfactoren voor verschillende berekeningsmodellen. Dit is eigenlijk alleen mogelijk door de modelfactor te valideren aan proeven waarbij alle andere onzekerheden afgedekt worden en de modelonzekerheden geïsoleerd worden. Alleen op die manier vertegenwoordigt de modelfactor de verschillen in geomechanische mechanismen tussen verschillende modellen.

Voor het afleiden van de modelfactoren zijn ijkpunten nodig, mogelijk dat de geplande veldproeven als dergelijke ijkpunten kunnen fungeren.

oprijven	Rekenmodel (bij beschouwen globale veiligheid tegen geotechnisch bezwijken)	onzekerheden rekenmodel $\gamma_{d;g1}$	3D-effect $\gamma_{d;g2}$	totale rekenmodel -factor $\gamma_{d;g}$
Nee	Bishop (effectieve spanningsanalyse)	1,10	0,90	1,00
	LiftVan (effectieve spanningsanalyse)	1,05	0,90	0,95
	<b>EEM-Mohr Coulomb <sup>2)</sup> (effectieve spanningsanalyse)</b>	<b>1,10</b> (bij 'fine-tuning' 1,05)	<b>0,90</b>	<b>1,00</b> (bij 'fine-tuning' 0,95)
	Spencer Vrij glijvlak (effectieve spanningsanalyse)	1,05	0,90	0,95
Ja	Bishop (effectieve spanningsanalyse) <sup>1)</sup>	1,10	1,00	1,10
	LiftVan (effectieve spanningsanalyse)	1,05	1,00	1,05
	<b>EEM- Mohr Coulomb <sup>2)</sup> (effectieve spanningsanalyse)</b>	<b>1,05</b> (bij 'fine-tuning' 1,00)	<b>1,00</b>	<b>1,05</b> (bij 'fine-tuning' 1,00)
	Spencer Vrij glijvlak (effectieve spanningsanalyse)	1,05	1,00	1,05

<sup>1)</sup> tevens zogenaamde Bishop  $c = 0$  en  $\varphi = 0$  analyses

<sup>2)</sup> constitutief model waarmee het grondgedrag in de sterkte-reductie berekening wordt beschreven. Ook bij gebruik van geavanceerdere materiaalmodellen moet deze factor worden gehanteerd (tenzij uit nader onderzoek afwijkende factoren volgen).

Tabel 1. Modelfactoren overgenomen uit ontwerpleidraad stabiliteitsschermen

### 3.4 Associatief vs niet-associatief

In de huidige werkwijze wordt de  $\varphi - c$  reductie uitgevoerd met een parameterset waarbij de dilatatiehoek  $\psi$  gelijk is gesteld aan de wrijvingshoek  $\varphi'$ . Op deze wijze wordt de reproduceerbaarheid van de resultaten verhoogd.

In ongedraineerde berekeningen leidt  $\psi = \varphi'$  tot onrealistische resultaten. Het is echter wel mogelijk om een sterktereductie toe te passen op de schuifsterkte  $s_u$  zelf. Het is hierbij van belang dat de dilatantie uitgeschakeld wordt.

Het Shansep model, met  $\tau = s_u$  leidt tot associatief gedrag. Voor de grondlagen die als gedraineerd worden beschouwd blijft het voorschrift  $\psi = \varphi'$  toe te passen. Mogelijk kan dit getrapd. Dus eerst de overstap naar het SHANSEP model voor de ongedraineerde grondlagen en daarna een tweede stap met  $\psi = \varphi'$  voor de gedraineerde lagen.

### 3.5 Bepaling maatgevende dwarskrachten en momenten in constructies

Momenteel wordt de maatgevende dwarskrachten en moment in UGT berekeningen bepaald na het uitvoeren van een  $\varphi - c$  reductie analyse. In de voorgaande bijeenkomst is aangegeven dat de  $\varphi - c$  reductie analyse hier niet voor bedoeld is. Een mogelijke oplossing is het gebruik van de optie design approaches.

Momenteel wordt dit in andere delen van de POV-M uitgewerkt. Is de vraag hiermee voldoende afgedekt?



Er zijn twee smaken: snedekrachten berekenen met representatieve waarden en het berekende moment met een factor (1,15) vermenigvuldigen of snedekrachten berekenen met rekenwaarden (o.b.v. design approaches) en het maximale moment nemen. Om te bepalen welke berekening het meeste overeenkomt met de werkelijkheid zal een ijkpunt met een proef of bijvoorbeeld een Monte Carlo berekening gemaakt moeten worden.

Een tweede (korte termijn spoor) zou zijn om een testberekening te maken met beide methodes en de ordegraote van antwoorden (zowel vervorming als snedekrachten) te vergelijken.

### 3.6 Toepassen zonerings

Niet elk bezwijkmechanisme in een dijkprofiel is even belangrijk. Zo zal een diep glijvlak dat door de kruin van een dijklichaam loopt het waterkerend vermogen van de dijk meer aantasten dan een glijvlak door het talud van de stabiliteitsberm. Voor het gebruik van glijvlak analyses zijn in de verschillende leidraden voor het ontwerpen van rivierdijken zoneringsregels opgesteld. Aan de hand van deze zoneringsregels worden strengere eisen gesteld aan de berekende evenwichtsfactor van cirkels die door de kruin van een dijklichaam gaan en cirkels die het binnentalud of stabiliteitsberm aantasten. In numerieke analyses kan alleen de meest maatgevende bezwijkvlak worden gevonden. Als dit een mechanisme betreft dat door de berm of binnentalud gaat kan niet zonder meer worden gecontroleerd of andere bezwijkmechanismen die door de kruin van de dijk lopen voldoen aan de strengere norm.

Momenteel is voor PLAXIS een optie beschikbaar waarbij de sterktereductie (en design approaches) alleen effect heeft op een deel van de geometrie. De gebruiker moet de clusters van grond waarin geen sterktereductie gedaan wordt handmatig selecteren. Hiermee kunnen oppervlakkige mechanismen worden uitgeschakeld.

Het is heel belangrijk dat de gebruiker weet naar welk glijvlak er gezocht wordt, zodat niet faalmechanismen over het hoofd worden gezien. De optie is daarmee een work-around en is niet zondermeer algemeen toepasbaar.

In dat opzicht zal voor de ontwerprichtlijn een procedure ontwikkeld moeten worden hoe zonerings toegepast moet worden in EEM berekeningen.

Bij de huidige werkwijze m.b.t. het restprofiel kun je geen onderscheid maken of het binnentalud net niet voldoet of ruim niet voldoet: je moet altijd rekenen met het restprofiel.

### 3.7 Probabilistische analyses

Hoewel het niet gebruikelijk is volledig probabilistisch te toetsen en ontwerpen zijn er wel ontwikkelingen gaande met software tools.

De basis voor probabilistische methodes is beschikbaar, alleen nog niet toegankelijk. Het is daarbij tot op dit moment vooral gebruikt in proof-of-concept studies. Een vergelijking met een veldproef zou wel bij kunnen dragen in de ontwikkeling en ijking van probabilistische methodes.

Voor praktische toepassingen is er nog geen tool. Dit heeft ook te maken dat er tijdens de berekeningen heel vele keuzes gemaakt moeten worden m.b.t. het probabilistisch model. Voor het oplossen van problemen is veel kennis en ervaring nodig. Daarnaast zijn er nog veel

discussiepunten rondom de keuzes van een probabilistisch model. Om deze reden kunnen dit soort probabilistische analyses nog lang niet in een werkwijzer of iets dergelijks gevat worden.

### 3.8 Validatie veiligheidsfilosofie

In de POV-M zijn verschillende veldproeven en veldmetingen gepland. Dit geeft de mogelijkheid tot het (deels) valideren van de veiligheidsfilosofie. Veldproeven kunnen vooral gebruikt worden om modellen en modelfactoren te valideren.

De veiligheidsfilosofie (de werkwijzers etc.) valideren door veldproeven is niet echt aan de orde, maar bijvoorbeeld probabilistische methodes kunnen hier wel een rol in spelen.

De betrokkenheid en interactie tussen de verschillende proeven kan beter.

### 3.9 Alternatieve versterkingsmethoden / alternatieve materialen

Zijn er met betrekking tot de alternatieve versterkingsmethodieken nog aandachtspunten met betrekking tot de veiligheidsfilosofie waar nu nog niet in voorzien is.

In dijkversterking HOP gaan waarschijnlijk dijknagels toegepast worden. Hierbij moet met PLAXIS3D gerekend worden. Dit geeft problemen met de verhouding van de elementen, aangezien de nagels 10 centimeter in diameter zijn en met het grout eromheen op 30 centimeter uitkomen. Door deze kleine diameter van de constructie moet met een extra factor gerekend worden, waardoor het talud achterlangs maatgevend wordt en de constructie niet meer berekend kan worden.

### 3.10 Invloed vervormingen op andere mechanismen

In de POV-M vervormingen wordt bekeken of de vervormingseisen in BGT (10 cm) en UGT (50 cm) vervangen kunnen worden door iets nieuws. De beta's die worden uitgerekend zijn gericht op sterkte, niet op vervormingen. Het is de vraag bij welke doelbetrouwbaarheid de vervorming berekend moet worden, omdat de vervormingen zelf ook weer een effect kunnen hebben op andere faalmechanismen. Daarnaast speelt ook het feit dat tussen BGT en UGT situaties kunnen zijn waarbij de vervormingen al groter zijn.

Het dilemma is vergelijkbaar met het performance-based design bij aardbevingen, waarbij bij extreme evenementen vervormingen worden toegestaan. Er wordt dan een vorm van schade geaccepteerd, mits er aan de functie van de dijk voldaan wordt.

### 3.11 Constructief bezwijken

Het constructief bezwijken van een damwand wordt op dit moment relatief eenvoudig met de vloeispanning berekend. In het kader van de blauwdruk kan hierin verkend worden wanneer er elastisch of plastisch gerekend moet worden. Een voorstel is om in de BGT elastisch te rekenen, maar in de UGT plasticiteit toe te laten. Bijvoorbeeld in de UGT1 met een plastisch scharnier en UGT2 het vloeicriterium, omdat er nog een toename in sterkte is tussen het moment waarbij het eerste plastische scharnier ontstaat en het vloeien van het staal.

De vloeispanning van staal zit nu niet verwerkt in de veiligheidsfilosofie, omdat de sterkte van damwandplanken vaak een 95% of 99% karakteristieke ondergrens waarde hebben. Daarnaast zijn er ook nog toleranties op de dikte van de damwandplank en worden er bij batches steekproeven gedaan. Verder geldt ook nog de systeemwerking van een set aan damwandplanken: als er één damwandplank slecht is, kunnen de krachten door herverdeling

aan de naastliggende planken worden overgedragen. Het kan ook nog van belang zijn dat in een hele batch de toleranties niet worden gehaald.

## 4 Vervolg

Na deze derde expert sessie houdt de expertcommissie op met bestaan. De notulen zullen nog worden rondgestuurd. Cor zal een concept voor de blauwdruk opstellen en rondsturen. Hierbij hoort ook een roadmap met acties op korte en lange termijn. Op dit concept kan nog een review ronde plaatsvinden, waarna een revisie op het document kan worden gemaakt.

## 5 Actiepuntenlijst

Actiepunt	Uitvoerder	Geplande datum	Datum gereed	Status	
1.1	Versies TREEM opzoeken en verspreiden	Cor	2 <sup>de</sup> meeting	2 <sup>de</sup> meeting	Gereed
1.2	Uitzoeken wat in onderdeel tijdsafhankelijke stabiliteit precies wordt opgeleverd	Cor	z.s.m.	Via mail	
1.3	Opdrijven/opbarsten discussie op de hoogte houden	Cor	3 <sup>de</sup> meeting	3 <sup>de</sup> meeting	Gereed
1.4	Commentaar op TREEM verzamelen en bundelen		Uitgesteld tot later		Gereed
1.5	rondsturen publicatie Davis	Hans		17 feb. 2016	Gereed
2.1	rondsturen publicatie Tschuchnigg & Schweiger	Ronald		17 feb. 2016	Gereed
2.2	Memo eerste aanzet rondsturen	Mark		3 <sup>de</sup> meeting	Gereed
2.3	Onderbouwing vervormingseis van 10 centimeter	Helle	z.s.m.		
3.1	Blauwdruk concept	Cor	1 april 2016		