

SBW project Werkelijke Sterkte Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM

Activiteit 03.a Opstellen veiligheidsfilosofie

H.L. Bakker
J. Bredeveld

Titel			
SBW	project	Werkelijke	Sterkte
Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM			

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat	Waterdienst1001463-012	1001463-012-GEO-0002	76
Postbus	17		
8200 AA LELYSTAD			

Trefwoorden

SBW project Werkelijke Sterkte, stabiliteitsanalyse, Eindige Elementen Methode

Samenvatting

Het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) wordt in opdracht van de Waterdienst van Rijkswaterstaat door Deltares uitgevoerd. Het bestaat uit een aantal inhoudelijk gerichte projecten, die zich richten op het invullen van belangrijke kennisleemtes bij het vijfjaarlijks toetsen van de primaire waterkeringen. Door kennisleemtes in te vullen wordt het toetsingsinstrumentarium uitgebreid en verbeterd. De huidige verbeteringslag wordt gemaakt ten behoeve van het VTV 2011.

Het SBW-project 'Werkelijke Sterkte' richt zich op het verbeteren van het toetsingsproces van macrostabiliteit binnenwaarts. Dit SBW-project omvat drie deelprojecten, waaronder het deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met Eindige Elementen Modellen (EEM)'. Dit type geavanceerde modellen komt aan bod als eenvoudige rekenregels of glijvlakberekeningen tekort schieten, bijvoorbeeld bij toepassing van constructieve elementen in dijken. Er bestaan momenteel echter geen richtlijnen voor het toetsen van dijken met EEM, zodat met het rekenresultaat nog niet goed kan worden getoetst aan de wettelijk vereiste veiligheid. Dit vormt een drempel voor het gebruik en de acceptatie van EEM als toetsingsinstrument.

Het hoofddoel van dit deelproject is het komen tot een in de praktijk bruikbare richtlijn, bestaande uit een veiligheidsfilosofie en een bijbehorend stappenplan, waarmee primaire waterkeringen met EEM kunnen worden getoetst op macrostabiliteit en de sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen. Op dit moment ligt daarbij de nadruk op waterkeringen zonder of met eenvoudige constructies (zoals damwanden). Later kan dit worden uitgebreid naar meer complexe versterkingsconstructies (zoals INSIDE-technieken).

In het onderhavige onderzoek wordt tot de volgende conclusies gekomen:

- De veiligheidsfilosofie voor het toetsen van primaire waterkeringen al dan niet voorzien van constructieve elementen met EEM moet aansluiten bij de filosofie van het Addendum het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.
- Conform het Addendum worden onzekerheden in het toetsen met EEM in rekening gebracht door een aantal factoren: schematiseringsfactor, modelfactor, schadefactor, materiaalfactor. Tevens wordt er een correctiefactor geïntroduceerd.
- In het stappenplan wordt uitgegaan van karakteristieke waarden voor materiaalsterkten.
- Het toetsen aan de opgeschaalde stabiliteitsnorm vindt in EEM plaats met een sterktereductieberekening. Aan de berekeningsstap waarbij aan de vereiste stabiliteitsnorm wordt voldaan, worden de maatgevende snedekrachten ontleend.

Met deze eenvoudige aanpak kan een goed beeld worden verkregen van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties, hetgeen aansluit bij de wens om bij primaire waterkeringen ook te toetsen aan de grenstoestand voor vervorming.

Referenties

WD-4977/BIO/Hofman

Titel
 SBW project Werkelijke Sterkte
 Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM

Opdrachtgever **Project** **Kenmerk** **Pagina's**
 Rijkswaterstaat Waterdienst1001463-012 1001463-012-GEO-0002 76
 Postbus 17
 8200 AA LELYSTAD

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2	2009-09-23	Ir. H.L. Bakker		Dr.ir. C. Zwanenburg		Ing. A.T. Aantjes	
		Ir. J. Bredeveld					

Status
 definitief

Inhoud

1	Managementsamenvatting	1
2	Inleiding	3
2.1	Achtergrond	3
2.1.1	SBW-project 'Werkelijke Sterkte'	3
2.1.2	Deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM'	3
2.1.3	Inpassing in het SBW-onderzoek	4
2.2	Aanleiding	4
2.2.1	Probleembeschrijving	4
2.2.2	Probleemstelling	5
2.2.3	Doelstelling	6
2.2.4	Onderzoeksvragen	6
2.3	Plan van aanpak	7
2.3.1	Organisatorische aanpak	7
2.3.2	Technisch inhoudelijke aanpak (leeswijzer)	7
2.4	Verklarende woordenlijst	8
3	Bestaande regelgeving	9
3.1	Algemeen	9
3.2	Waterkeringen zonder constructieve elementen	9
3.2.1	Addendum bij Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies	9
3.3	Waterkeringen met constructieve elementen	10
3.3.1	Leidraad Kunstwerken	10
3.3.2	CUR 166 Damwandconstructies	11
3.3.3	Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen	12
3.4	Conclusies met betrekking tot bestaande regelgeving	12
4	Veiligheidsfilosofie SBW EEM	15
4.1	Relevant eerder uitgevoerd onderzoek	15
4.2	Oplossingsrichtingen voor aanpak EEM-berekening	15
4.2.1	Aanpak a - Materiaalfactoren ongelijk aan 1,0 en stabiliteitsnorm conform Addendum	15
4.2.2	Aanpak b – Materiaalfactoren gelijk aan 1,0 en opschalen stabiliteitsnorm Addendum	16
4.2.3	Aanpak c – Twee sets schuifsterkteparameters	17
4.2.4	Voorgestelde aanpak	18
4.3	Invulling veiligheidsfilosofie	18
4.3.1	Normfrequentie	18
4.3.2	Stabiliteitsnorm	18
4.3.3	Input PLAXIS	21
4.3.4	Toetsingsnorm constructieve elementen	23
5	Literatuur	25

Bijlage(n)

A Praktijkcase Maeslantkering	26
A.1 Veiligheidsfilosofie	26
A.1.1 Verschillen in normering betrouwbaarheid	26
A.1.2 Rekenwaarde van schuifsterkteparameters	27
A.1.3 Aanpassing van de stabiliteitsnorm i.v.m. schuifsterkteparameters	27
A.1.4 Toetsnorm voor constructieve elementen	27
A.1.5 Overige aspecten	27
A.2 Uitwerking kistdam Maeslantkering volgens Addendum	27
A.2.1 Schematiseringsfactor	27
A.2.2 Modelfactor	28
A.2.3 Schadefactor	28
A.2.4 Partiële factoren	29
A.2.5 Stabiliteitsnorm	29
A.3 Uitwerking kistdam Maeslantkering volgens Leidraad Kunstwerken	30
A.3.1 Vereiste betrouwbaarheid	30
A.3.2 Partiële factoren damwandconstructie	31
A.3.3 Stabiliteit waterkerende grondconstructies	32
A.4 Voorbeeld: stabiliteitsnorm kistdam Maeslantkering voor EEM berekening	33
B Toelichting I – Bestaande regelgeving	35
B.1 Inleiding	35
B.1.1 Achtergrond	35
B.1.2 Bestaande regelgeving	35
B.2 Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies i.c. Addendum	36
B.2.1 Algemeen	36
B.2.2 Onzekerheidsfactoren	36
B.3 Leidraad Kunstwerken	38
B.3.1 Algemeen	38
B.3.2 Vereiste betrouwbaarheid	38
B.3.3 Samenvatting normering volgens de Leidraad Kunstwerken:	41
B.4 CUR 166 Damwandconstructies	42
B.4.1 Deel 1 van CUR 166	42
B.4.2 Deel 2 van CUR 166	45
B.4.3 Samenvatting van de normering volgens CUR 166	50
B.5 Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen	51
B.5.1 Algemeen	51
B.5.2 Samenvatting normering volgens Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden	51
B.6 Voorstel stabiliteitsnormering EEM berekening van waterkeringen	52
B.6.1 Mogelijke aanpak	52
B.6.2 Aanpak a - Materiaalfactoren ongelijk aan 1,0 en stabiliteitsnorm conform Addendum	52
B.6.3 Aanpak b – Materiaalfactoren gelijk aan 1,0 en opschalen stabiliteitsnorm Addendum	52
B.6.4 Aanpak c – Twee sets schuifsterkteparameters	53
B.6.5 Voorgestelde aanpak	54
C Toelichting II – Veiligheidsfilosofie voor EEM	55
C.1 Inleiding	55

C.1.1	Bestaande regelgeving	55
C.1.2	Probleembeschrijving	55
C.1.3	Doelstelling	56
C.2	Stabiliteitsnorm volgens het Addendum	56
C.2.1	Tekortkomingen	56
C.2.2	Partiële veiligheidsfactoren	57
C.2.3	Schematiseringsfactor	59
C.2.4	Materiaalfactor	59
C.2.5	Modelfactor	60
C.2.6	Schadefactor	60
C.3	Afleiding stabiliteitsnorm EEM	61
C.3.1	Stappen	61
C.3.2	Uitwerking stappen	62
C.3.3	Praktische invulling stabiliteitsnorm EEM	67

1 Managementsamenvatting

Om een indruk te geven van de toegevoegde waarde van het voorliggende document is een aantal vragen geformuleerd. De antwoorden van deze vragen vormen de onderstaande managementsamenvatting.

Bijdrage resultaten van het gerapporteerde werk aan het hoofddoel

Het SBW onderzoek werkelijke sterkte heeft tot doel de macrostabiliteitstoets zoals die nu in de VTV is voorgeschreven te verbeteren. Hiertoe is het onderzoeksproject werkelijke sterkte opgesplitst in drie delen. Het onderdeel “analyse van macrostabiliteit van dijken met eindige elementen modellen”, hierna aangeduid met onderzoeksspoor EEM, heeft tot doel een procedure op te stellen waarmee de stabiliteit van waterkeringen kan worden berekend met behulp van eindige elementen modellen. Het voorliggende rapport beschrijft de problemen met de aansluiting van nieuwe rekenmodellen aan de huidige voorschriften en geeft voorstellen deze op te lossen.

Binnen het SBW project werkelijke sterkte vullen de verschillende deelprojecten elkaar aan. Het resultaat van het onderzoeksspoor analyse macrostabiliteit van dijken met eindige elementen modellen zal worden gebruikt in het onderzoeksspoor “aanscherping gedetailleerde toets macrostabiliteit van dijken aan grenstoestanden van sterkte en vervormingen”, hierna aangeduid met onderzoeksspoor TGSV. Met name het toetsen aan grenstoestanden van vervormingen kan slechts met behulp van eindige elementen modellen te worden uitgevoerd.

Plaats van de rapportage in het onderzoek

Samen met de rapportage 1001463-013-GEO-0001 achtergronden bij activiteit 04a: Numerieke geomechanica levert de rapportage de achtergronden van het stappenplan. Het stappenplan is gerapporteerd in rapport 1001463-013-GEO-0002. Het stappenplan is de kern van het eindproduct van dit onderdeel. In de navolgende fasen van het project zal het stappenplan worden gevalideerd en waar nodig worden geoptimaliseerd.

Wat waren de verwachtingen vooraf en komen die overeen met de resultaten?

Het betreft hier een toelichting op tekortkomingen van de kennis. Daarom is er geen sprake van verwachtingen vooraf.

Wat draagt dit resultaat (of het onderzoek waar dit bij hoort) bij aan het terugdringen van het aantal dijkvakken waaraan de score “geen oordeel” is toegekend.

De nieuwe toetsprocedure zal met name worden toegepast aan het einde van de gedetailleerde toetsing op macrostabiliteit. Recent is door Arcadis een inventarisatie uitgevoerd van de toetsresultaten uit de toetsronde 2001 – 2006. Uit deze inventarisatie volgde dat voor 27% van de getoetste waterkeringen er nog geen oordeel is voor het onderdeel Macrostabiliteit binnenwaarts. De nieuwe toetsmethode is met name voor deze waterkeringen opgezet. De totale lengte primaire waterkering die aan de toetsing onderworpen wordt is 3558 km. Dit houdt in dat voor 960 km, 27% van 3558 km, nog geen eindscore voor macrostabiliteit is toegekend. In het onderzoeksspoor TGSV wordt gebruik gemaakt van berekende vervormingen om aan het einde van de gedetailleerde toets het vervormingsaspect in de toetsing mee te nemen.

Daarnaast is de toepassing van eindige element modellen met name geschikt bij het toetsen van kunstwerken. Uit de bovengenoemde inventarisatie van Arcadis blijkt dat circa 57 kunstwerken nog geen eindscore voor het onderdeel stabiliteit hebben gekregen. Voor deze 57 kunstwerken kan het stappenplan worden toegepast om tot een eindoordeel te komen.

Wat is de bijdrage aan een mogelijke versimpeling van de toetsing

De nieuwe toetsprocedure heeft tot doel de nauwkeurigheid van de toetsing op macrostabiliteit te verbeteren. Hierdoor zullen naar verwachting meer dijkvakken sneller een eindoordeel krijgen en minder dijken onterecht worden afgekeurd. Dit doel staat haaks op een mogelijke versimpeling van de toetsprocedure.

Wat is de bijdrage aan financieel voordeel

De uitwerking van het spoor analyse macrostabiliteit van dijken met eindige elementen modellen draagt voor een belangrijk deel bij aan de het onderzoekspoor TGSV. Voor twee dijkvakken is ter illustratie het kosten voordeel uitgewerkt. Het betreft een dijkvak langs de Markermeerdijk, Edam - Hoorn met een totale lengte van 19 km en verschillende dijkvakken langs de Lek in de Alblasserwaard met een totale lengte van 17 kilometer. Met een meer geavanceerde toetsmethode wordt geschat dat de dijkvaklengte waarover daadwerkelijk dijkversterking nodig is voor het traject Edam - Hoorn kan worden terug gebracht tot 9 km. Dit is een besparing van 10 km dijkversterking à 2 tot 2,5 M€ per kilometer komt dit neer op 18 tot 22,5 M€. Voor de dijkvakken langs de Lek wordt geschat dat de lengte waarover daadwerkelijk zou moeten worden versterkt kan worden terug gebracht naar 11 tot 7,7 km. Vanwege de bebouwing is in dit gebied de kosten van een dijkversterking geraamd op 2 tot 5,6 M€ per kilometer. De besparing wordt hiermee 15,4 tot 64,4 M€. Naast de besparing vanwege het niet uitvoeren van de dijkversterking kan voor het resterende deel worden aangetoond dat de dijkverzwaring 10 jaar kan worden uitgesteld zonder dat de veiligheid in gevaar komt. Het rentevoordeel, bij gemiddeld rentepercentage van 2%, bedraagt 4M€ voor de dijkvakken Hoorn - Edam en 8M€ voor de dijkvakken langs de Lek. De genoemde bedragen zijn gebaseerd op prijspeil 2005.

Daarnaast wordt opgemerkt dat het gebruik van eindige element methoden met name geschikt is voor het toetsen van kunstwerken. Tot nu toe ontbreekt in veel gevallen een goede toetsprocedure voor het toetsen van kunstwerken. Dit leidt tot een relatief groot aantal kunstwerken waar nog geen eindoordeel is toegekend. Bij de komende ronde dijkversterking in de Krimpenerwaard zal voor het traject Bergambacht – Schoonhoven vanwege ruimtegebrek een groot aantal kunstwerken worden toegepast. Na realisatie van deze kunstwerken zullen zij ook in de vijfjaarlijkse toetsing worden opgenomen terwijl er momenteel nog geen geschikte toetsprocedure voor handen is.

Waar in het gerapporteerde werk zitten discussiepunten die van belang zijn voor het reviewteam

De auteurs zien de volgende discussievragen voor het reviewteam:

- Sluit de voorgestelde veiligheidsfilosofie in voldoende mate aan bij de veiligheidsfilosofie die thans in de adviespraktijk wordt gebruikt?
- Biedt de voorgestelde filosofie voldoende aanknopingspunten om later te kunnen uitbreiden naar het toetsen van kunstwerken?
- In het rapport worden enkele voorstellen gedaan voor de grootte van de te gebruiken materiaal factoren en partiële factoren. Kan het reviewteam zich vinden in de voorstellen en op welke wijze kan er een brede consensus ontstaan over het gebruik van de voorgestelde waarden?

2 Inleiding

2.1 Achtergrond

2.1.1 SBW-project 'Werkelijke Sterkte'

Het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) wordt in opdracht van de Waterdienst van Rijkswaterstaat door Deltares uitgevoerd. Het bestaat uit een aantal inhoudelijk gerichte projecten, die zich richten op het invullen van belangrijke kennisleemtes bij het vijfjaarlijks toetsen van de primaire waterkeringen. Deze kennisleemtes betreffen zowel de belasting- als de sterktekant bij het toetsen. Door kennisleemtes in te vullen wordt het toetsingsinstrumentarium uitgebreid en verbeterd. De huidige verbeteringslag wordt gemaakt ten behoeve van het VTV 2011.

Eén van de projecten is het SBW-project 'Werkelijke Sterkte', dat erop gericht is het toets-spoor van macrostabiliteit binnenwaarts te verbeteren. Het omvat onderzoek naar de drie volgende kennisleemtes die, vanwege de bestaande raakvlakken binnen het SBW-project, zijn gebundeld:

- toetsen macro-stabiliteit van dijken aan grenstoestanden voor sterkte en vervorming;
- schuifsterkte van grond bij lage effectieve spanningen;
- analyse macro-stabiliteit van dijken met Eindige Elementen Modellen (EEM).

De onderzoeksresultaten van deze drie deelprojecten binnen het SBW-project 'Werkelijke Sterkte' zullen gezamenlijk leiden tot een Technisch Rapport.

2.1.2 Deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM'

EEM-modellen komen aan bod als eenvoudige rekenregels of glijvlakberekeningen tekort schieten, bijvoorbeeld bij toepassing van constructieve elementen in dijken. Er bestaat echter momenteel geen veiligheidsfilosofie en stappenplan voor het uitvoeren van EEM berekeningen voor het toetsen van dijken. Dit betekent dat met een EEM rekenresultaat nog niet goed kan worden getoetst aan de wettelijk vereiste veiligheid. Dit vormt een drempel voor het gebruik en de acceptatie van EEM als toetsingsinstrument.

Het hoofddoel van het deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM' is te komen tot richtlijnen met bijhorend stappenplan waarbinnen stabiliteitsanalyses met behulp van EEM kunnen worden uitgevoerd. Hierbij is in 2008 de ambitie uitgesproken om EEM te gebruiken als *ultimate limit state* model, waarbij de veiligheid wordt afgestemd op de huidige gebruikte glijvlakmodellen (Bishop, Lift Van, Spencer).

De samenhang met de twee andere deelprojecten binnen SBW-project 'Werkelijke Sterkte' is groot. De resultaten uit beide deelprojecten zijn noodzakelijk om een aantal onzekerheden die met EEM worden geïntroduceerd te verkleinen of op te heven, en daarmee om de meerwaarde van EEM als toetsingsinstrument te realiseren.

2.1.3 Inpassing in het SBW-onderzoek

De doelstelling van activiteit 03 (opstellen veiligheidsfilosofie) en activiteit 04 (opstellen stappenplan voor het uitvoeren van stabiliteitsanalyses met EEM) binnen deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM' is het ontwikkelen van een in de praktijk bruikbare richtlijn om primaire waterkeringen, al dan niet voorzien van constructieve elementen, te kunnen toetsen op macrostabiliteit en op de sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen.

Op dit moment ligt daarbij de nadruk op waterkeringen zonder constructies of met eenvoudige constructies, zoals damwanden. Later kan dit worden uitgebreid naar meer complexe versterkingsconstructies, zoals INSIDE-technieken. Om deze uitbreiding later mogelijk te maken is wel al veel aandacht besteed aan de inpassing van constructieve elementen in de veiligheidsfilosofie.

De bruikbaarheid van de richtlijn, dat wil zeggen de resultaten uit activiteit 03 en activiteit 04, wordt gaandeweg het deelproject getoetst door het uitvoeren van validaties. Deze bestaan uit het uitwerken van cases op basis van de (voorlopige) richtlijn, waarbij de keuze voor de cases binnen SPA-activiteit 05.a wordt gemotiveerd.

In eerste instantie zal, na overeenstemming wat betreft de onderliggende rapportages, een validatie van de voorlopige richtlijn door Deltares zelf (SPA-activiteit 05.b) worden uitgevoerd. De resultaten hieruit kunnen aanleiding geven de voorlopige veiligheidsfilosofie en het bijbehorende stappenplan aan te passen dan wel aan te vullen. Na de 'interne' verbeterslag van de voorlopige veiligheidsfilosofie en het bijbehorende stappenplan zal ook een aantal externe partijen een validatie van deze cases (TO-activiteit 08) uitvoeren.

Vanuit het oogpunt van deze opzet van het deelproject zijn activiteit 03 en activiteit 04 opgedeeld in twee deelactiviteiten, te weten:

- 'voorlopige' veiligheidsfilosofie (SPA-activiteit 03.a) en het bijbehorende stappenplan (SPA-activiteit 04.a) ten behoeve van de interne validatie;
- 'definitieve' veiligheidsfilosofie (SPA-activiteit 03.b) en het bijbehorende stappenplan (SPA-activiteit 04.b) ten behoeve van de externe validatie .

Ook de resultaten uit de externe validatie kunnen weer aanleiding geven tot een verbeterslag (TO-activiteit 10).

Het onderliggende document vormt daarmee de basis voor de nieuwe richtlijn.

2.2 Aanleiding

2.2.1 Probleembeschrijving

Naast het VTV 2006 zijn voor het ontwerpen en toetsen van primaire waterkerende grondconstructies op dit moment verschillende normen en richtlijnen beschikbaar. De voor dit SBW-deelonderzoek meest relevante daarvan zijn:

- Addendum behorende bij Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [ref 1];
- Leidraad Kunstwerken [ref 2];
- CUR 166 Damwandconstructies [ref 3];
- Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4].

Het Addendum behorende bij Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, in het vervolg afgekort tot Addendum, is van toepassing op primaire waterkeringen die alleen uit grond bestaan (zogenaamde 'groene dijken'). De overige richtlijnen zijn van toepassing op primaire waterkeringen waarin zich constructieve elementen zoals damwanden, kistdammen en diepwanden bevinden. De genoemde richtlijnen, met uitzondering van CUR 166, zijn alleen bedoeld voor toepassing in combinatie met klassieke rekenmodellen zoals MStab (voor glijcirkelstabiliteit) en MSheet (voor damwandconstructies).

Als gevolg van technische en maatschappelijk ontwikkelingen komen bij het toetsen van primaire waterkeringen op macrostabiliteit in toenemende mate situaties voor waarbij de klassieke rekenmodellen te kort schieten. In dergelijke situaties is er vaak sprake van een complex bezwijkmechanisme, dat alleen met Eindige Elementen Modellen (EEM) goed kan worden berekend. Voorbeelden hiervan zijn:

- waterkeringen voorzien van constructieve elementen;
- waterkeringen met een complexe geometrie of grondlaagstratificatie;
- waterkeringen met in het INSIDE-project voorgestelde constructies.

Er is echter nog geen bruikbare veiligheidsnormering en stappenplan waarmee een adviseur op basis van EEM-berekeningen de macrostabiliteit van primaire waterkeringen en de sterkte van de eventueel daarin aanwezige constructieve elementen kunnen toetsen. Een bruikbare richtlijn voor het toetsen met EEM sluit tevens aan op een van de subdoelstellingen van het SBW-deelproject 'Toetsen macrostabiliteit van dijken aan grenstoestanden voor sterkte en vervormingen', dat met EEM een goed beeld kan worden verkregen van de vervormingen van de waterkering onder veel voorkomende belastingsituaties.

2.2.2 Probleemstelling

Een bruikbare veiligheidsfilosofie en een bijbehorend stappenplan zijn noodzakelijk om met een EEM betrouwbare toetsing te kunnen uitvoeren. Bij de beoordeling van de veiligheid van een primaire waterkering is de combinatie van de proeven in het veld en in het laboratorium, interpretatie van de resultaten van het veld- en laboratoriumonderzoek, gebruikte rekenmodellen en veiligheidsfactoren van belang. Deze onderdelen moeten altijd in samenhang worden gezien om een juiste uitspraak over de veiligheid te kunnen doen.

Daarnaast wordt er momenteel wel gebruik gemaakt van EEM, maar omdat de hoeveelheid 'knoppen' waaraan kan en moet worden gedraaid groot is, wordt de uitkomst van deze analyses teveel afhankelijk van het uitvoerende bureau of ingenieur.

Dit betekent dat met een EEM rekenresultaat nog niet goed kan worden getoetst aan de wettelijk vereiste veiligheid. Dit vormt een drempel voor het gebruik en de acceptatie van de EEM als toetsingsinstrument.

De belangrijkste problemen, die de bruikbaarheid van EEM als betrouwbaar instrument bij het toetsen van primaire waterkeringen op dit moment in de weg staan, betreffen:

- p1) Het niet goed op elkaar aansluiten van het Addendum op de bestaande normen voor primaire waterkeringen met constructieve elementen, en de vele in deze normen aanwezige verwijzingen waardoor het geheel nauwelijks is te overzien;
- p2) Het ontbreken van een norm voor het toetsen van de macrostabiliteit voor primaire waterkeringen zonder constructieve elementen op basis van EEM berekeningen;

- p3) Het ontbreken van een norm voor het toetsen van constructieve elementen die deel uitmaken van primaire waterkeringen op basis van EEM berekeningen;
- p4) Het ontbreken van een praktisch bruikbaar stappenplan voor het met EEM doorrekenen van primaire waterkeringen, al dan niet voorzien van constructieve elementen;
- p5) Verschillen tussen de mechanica van klassieke rekenmodellen en de mechanica van EEM modellen, waardoor de resultaten van beiden niet zonder meer vergelijkbaar zijn;
- p6) Verschillen tussen de bezwijkmechanismen van primaire waterkeringen zonder en met constructieve elementen.

2.2.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderhavige onderzoek is het ontwikkelen van een in de praktijk bruikbare richtlijn om primaire waterkeringen, al dan niet voorzien van constructieve elementen, te kunnen toetsen op macrostabiliteit en op de sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen.

Deze richtlijn moet resulteren in een toetsresultaat dat qua veiligheid in overeenstemming is met een toetsing volgens de bestaande normen en berekeningen met klassieke rekenmodellen.

N.B. In de Nederlandse adviespraktijk wordt al veel gebruik gemaakt van het EEM-programma PLAXIS om complexe geotechnische problemen inclusief constructieve elementen te analyseren. In het onderhavige onderzoek worden de resultaten dan ook gepresenteerd op een wijze die het toepassen ervan in PLAXIS vergemakkelijkt. De hier gegeven oplossingen gelden echter ook voor andere EEM-programma's. Vooral het onderdeel veiligheidsfilosofie is onafhankelijk van het gebruikte programma.

2.2.4 Onderzoeksvragen

De onderstaande onderzoeksvragen volgen uit het vertalen van de problemen p1 t/m p6 in subparagraaf 1.2.2 op basis van de doelstelling in subparagraaf 1.2.3:

- o1) Hoe zit de veiligheidsfilosofie in elkaar, waarmee primaire waterkeringen op basis van de resultaten van EEM berekeningen kunnen worden getoetst op macrostabiliteit en sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen, die qua veiligheid in overeenstemming is met het toetsresultaat dat (indien mogelijk) kan worden verkregen met een toetsing met klassieke rekenmodellen en berekeningen volgens de bestaande normen (p1, p2 en p3)?
- o2) Hoe ziet de praktisch bruikbare strategie (stappenplan) eruit om primaire waterkeringen met EEM te kunnen toetsen op macrostabiliteit en sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen (p4)?
- o3) Hoe kan binnen de veiligheidsfilosofie en het stappenplan op praktische wijze invulling worden gegeven aan de vragen, die voortkomen uit verschillen tussen de mechanica van klassieke rekenmodellen en de mechanica van EEM modellen (p5 en p6)?

2.3 Plan van aanpak

2.3.1 Organisatorische aanpak

Het beantwoorden van de drie in subparagraaf 1.2.4 genoemde onderzoeksvragen (o1, o2 en o3) vereist uiteenlopende expertise.

Het beantwoorden van de omvangrijke onderzoeksvraag (o1), die betrekking heeft op de veiligheidsnormering, wordt uitgevoerd door ir. H.L. Bakker. Voor wat betreft theoretische zaken met ondersteuning van ir. E.O.F. Calle en ing. H. Schelfhout en voor wat betreft praktische zaken met ondersteuning van de andere bij het project betrokken personen.

Het beantwoorden van de onderzoeksvraag (o2) met betrekking tot de praktisch bruikbare strategie (inclusief de schematisering en uitvoering van de berekening met PLAXIS) om primaire waterkeringen met EEM te kunnen toetsen, waarbij rekening wordt gehouden met de verschillen tussen waterkeringen zónder en mét constructieve elementen, wordt uitgevoerd door dr.ir. J.A.M. Teunissen en ir. H.L. Bakker gezamenlijk. Voor zover nodig met ondersteuning door de andere bij het project betrokken personen. De resultaten volgend uit deze onderzoeksvraag zijn vastgelegd in de rapportage voor activiteit 04.a [ref 5].

Het beantwoorden van de onderzoeksvraag (o3) over de mechanicaverschillen tussen klassieke rekenmodellen en de EEM wordt uitgevoerd door dr.ir. J.A.M. Teunissen. Voor zover nodig met ondersteuning van de andere bij het project betrokken personen.

2.3.2 Technisch inhoudelijke aanpak (leeswijzer)

Een belangrijke vereiste voor de te ontwikkelen veiligheidsfilosofie is dat het veiligheidsniveau bij gebruik van EEM als toetsingsinstrument in overeenstemming is met het niveau dat wordt verkregen bij een toetsing met klassieke rekenmodellen volgens de bestaande normen.

In hoofdstuk 2 wordt dan ook eerst ingegaan op de bestaande veiligheidsfilosofie en regelgeving omtrent de macrostabiliteit van primaire waterkeringen. Daarbij wordt er onderscheid gemaakt in de bestaande regelgeving die betrekking heeft op waterkeringen zónder constructieve elementen (paragraaf 2.2) en waterkeringen mét constructieve elementen (paragraaf 2.3). Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een opsomming van elementen uit de bestaande regelgeving, die voor toepassing van EEM van belang zijn.

In hoofdstuk 3 wordt op basis van de elementen uit de bestaande regelgeving gekomen tot een veiligheidsfilosofie bij toepassing van EEM als toetsingsinstrument voor primaire waterkeringen. Hierbij wordt eerst een drietal mogelijke oplossingsrichting gepresenteerd voor de veiligheidsfilosofie. In paragraaf 3.2.4 wordt een voorstel gedaan voor de keuze van de best passende veiligheidsfilosofie gedaan. In het resterende deel van dit hoofdstuk wordt invulling gegeven aan de veiligheidsfilosofie op basis van de gekozen oplossingsrichting.

In bijlage A is een praktijkvoorbeeld opgenomen, waarin de bestaande regelgeving volgens het Addendum [ref 1] en de Leidraad Kunstwerken [ref 2] wordt losgelaten op een kistdam die deel uitmaakt van de Maeslantkering. In bijlage B wordt een nadere toelichting gegeven op wat de bestaande regelgeving betekent voor de veiligheidsfilosofie bij toepassing van EEM. In bijlage C wordt dieper ingegaan op de theoretische aspecten van de veiligheidsfilosofie.

2.4 Verklarende woordenlijst

Correctiefactor stabiliteitsnorm

Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het feit dat de berekening met karakteristieke waarden wordt uitgevoerd in plaats van rekenwaarden.

Faalruimte

Voor een bepaald onderdeel van de foutenboom maximaal toelaatbare faalkans.

Faalruimtefactor

Factor die de invloed van het type constructie op de toelaatbare faalkans van deze constructie in rekening brengt.

Levensduurfactor

Factor om de invloed van het gecorreleerd zijn van faalkansen in afzonderlijke jaren binnen de levensduur op de faalkans voor de gehele levensduur in rekening te brengen.

Modelfactor

Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het gebruikte rekenmodel en de manier waarop de berekening is uitgevoerd.

Normfrequentie of Norm

De gemiddelde herhalingsstijd van de Maatgevend Hoogwater.

Schadefactor

Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade, die in rekening brengt in welke mate de vereiste betrouwbaarheid afwijkt van het basisbetrouwbaarheidsniveau.

Schematiseringsfactor

Partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het schematiseren van de ondergrond.

Stabiliteitsnorm

De minimale waarde van de stabiliteitsfactor, waaraan een waterkering moet voldoen.

Standaardafwijking

Maat voor de spreiding van de proefresultaten.

Verwachtingswaarde

Bij een normale verdeling is het rekenkundig gemiddelde van een steekproef een maat (zuivere schatting) voor de verwachtingswaarde.

3 Bestaande regelgeving

3.1 Algemeen

Er bestaan verschillende normen, leidraden, Technische Rapporten en handboeken met regelgeving die van belang zijn voor het ontwerpen, berekenen en toetsen van al dan niet met constructieve elementen versterkte waterkeringen.

Het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [ref 1] is voor het toetsen van de macrostabiliteit van primaire waterkeringen zonder constructieve elementen, (zogenaamde groene dijken) de belangrijkste richtlijn.

De belangrijkste richtlijnen voor het toetsen van (primaire waterkeringen met) damwanden en aanverwante constructies, zoals kistdammen en diepwanden, zijn:

- Leidraad Kunstwerken [ref 2];
- CUR 166 Damwandconstructies [ref 3];
- Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4].

De veiligheidsfilosofie in al deze regelgeving komt er grofweg op neer dat de onzekerheden in de materiaalsterkte van de grond ook aan de sterktekant in de analyse worden meegenomen. Oftewel, de rekenwaarde van de effectieve cohesie (c') en inwendige wrijvingshoek (φ') wordt bepaald door de representatieve waarde door een materiaalfactor te delen. Het probleem, dat deze aanpak voor EEM-berekeningen kan opleveren, wordt in subparagraaf 3.2.1 toegelicht.

Omdat er op dit moment nog geen veiligheidsfilosofie voor het met EEM toetsen van waterkeringen bestaat, zullen keuzen worden gemaakt welke richtlijnen en/of theorie als uitgangspunt voor de toetsing moeten gaan dienen. In het vervolg van deze paragraaf wordt de belangrijkste regelgeving behandeld en aangegeven hoe daar in de praktijk mee om te gaan. De nadere toelichting vindt plaats in bijlage A, bijlage B en bijlage C van dit rapport. Bijlage A betreft een praktijkvoorbeeld over de toetsing op macrostabiliteit en sterkte van de kistdam welke deel uitmaakt van de Maeslantkering.

N.B. In het onderstaande worden de begrippen 'materiaalfactor' en 'partiële factor' door elkaar gebruikt. Dit is een gevolg van de manier van aanduiden in de achterliggende regelgeving. Voor zover dit betrekking heeft op schuifsterkteparameters, wordt er hetzelfde mee bedoeld.

3.2 Waterkeringen zonder constructieve elementen

- 3.2.1 Addendum bij Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies
Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies en het bijbehorende Addendum [ref 1] bevat de regels waaraan waterkerende grondconstructies moeten voldoen. Het Technisch Rapport is van toepassing voor het vaststellen van de rekenwaarden van de materiaalparameters en de stabiliteitsnorm waaraan moet worden voldaan. Dit is vastgelegd in Deel A van het bijbehorende Addendum, dat uitgaat van klassieke rekenmodellen.

In het Addendum worden de onzekerheden in de toetsing van een primaire waterkering in rekening gebracht door het meenemen van een aantal factoren, te weten:

- schematisering van bodemopbouw en waterspanningen → schematiseringsfactor
- rekenmodel → modelfactor
- afwijkingen ten opzichte van het basisbetrouwbaarheidsniveau → schadefactor
- beschrijving van de schuifsterkte → materiaalfactor

De schematiseringsfactor In het Addendum wordt de suggestie gewekt dat de materiaalfactor op dezelfde manier invloed heeft op de veiligheid tegen afschuiven als de schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor. Laatstgenoemde factoren zijn echter onafhankelijk van de grondlaagstratificatie, terwijl de materiaalfactoren in principe per grondlaag en sterkteparameter verschillend zijn. Hierdoor is met het Addendum een eenduidige bepaling van de stabiliteitsnorm onmogelijk.

Daarnaast vindt geen correctie plaats van de materiaalfactor voor het geval het vereiste betrouwbaarheidsniveau van het basisbetrouwbaarheidsniveau van $\beta = 4,0$ afwijkt. Volgens het Addendum vindt deze correctie plaats via de schadefactor. In bijlage B wordt dieper ingegaan op de bevindingen met betrekking tot het Addendum.

3.3 Waterkeringen met constructieve elementen

3.3.1 Leidraad Kunstwerken

De Leidraad Kunstwerken [ref 2] bevat voorschriften die specifiek betrekking hebben op kunstwerken in waterkeringen. Een aantal van deze voorschriften is relevant voor met constructieve elementen versterkte primaire waterkeringen.

Betrouwbaarheidsniveau

Het betrouwbaarheidsniveau, waaraan het grondlichaam van met constructieve elementen versterkte primaire waterkeringen moet voldoen, dient te worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken. Hierbij moet gebruik worden gemaakt van een faalruimtefactor en levensduurfactor. Volgens het Addendum [ref 1], en niet volgens Leidraad Kunstwerken, kan door middel van een factor de mate van correlatie tussen de instabiliteit en Maatgevend HoogWater (MHW) worden meegenomen.

De Leidraad Kunstwerken bevat geen voorschriften voor het bepalen van een schadefactor, modelfactor en schematiseringsfactor. De laatstgenoemde factor is overigens pas in het Addendum geïntroduceerd, welke later is verschenen dan de Leidraad Kunstwerken. Er wordt verondersteld dat deze factoren (en de stabiliteitsnorm als functie hiervan) moeten worden bepaald volgens het Addendum.

Stabiliteitsnorm

De Leidraad Kunstwerken bevat geen voorschrift voor het bepalen van een stabiliteitsnorm.

Uitgaande van het betrouwbaarheidsniveau dat volgt uit de Leidraad Kunstwerken, eventueel verhoogd met 10% voor constructies langer dan 100 meter, dient de stabiliteitsnorm te worden bepaald volgens het Addendum met in acht name van de hierin voorgeschreven schematiseringsfactor, modelfactor, schadefactor en materiaalfactoren van de grond.

Constructieve elementen

Volgens de aanpak van Leidraad Kunstwerken, welke is gebaseerd op klassieke rekenmodellen, dienen er twee berekeningen te worden uitgevoerd.

- Een berekening voor de krachtsverdeling in de constructieve elementen, waarbij de partiële factoren voor de schuifsterkteparameters van de grond volgens CUR 166 in acht moeten worden genomen.
- Een berekening voor het toetsen van de constructieve elementen, waarbij de partiële factoren voor het constructiemateriaal volgens CUR 166 in rekening moeten worden gebracht.

In beide berekeningen moet voor vereiste betrouwbaarheidsniveaus hoger dan $\beta = 4,2$ een correctiefactor volgens de Leidraad Kunstwerken in acht te worden genomen.

3.3.2 CUR 166 Damwandconstructies

CUR 166 Damwandconstructies [ref 3], in het vervolg afgekort tot CUR 166, bestaat uit twee delen. Deel 1 is een handleiding voor de ontwerper met een stappenplan met praktische aanwijzingen voor het maken van de voor het ontwerp benodigde berekeningen. Dit stappenplan is vrijwel volledig toegespitst op klassieke berekeningen met zogenaamde "ligger op verende bedding" modellen en om die reden beperkt toepasbaar op berekeningen met EEM modellen. In deel 2, waarin de achtergrond en onderbouwing van het stappenplan in deel 1 wordt gegeven, wordt wel op het gebruik van EEM ingegaan.

Hoewel de beschrijving in de voorschriften met betrekkingen tot (primaire waterkeringen met) constructieve elementen sterk uiteenloopt, komt de regelgeving in CUR 166 voor het toetsen van met damwanden versterkte waterkeringen uiteindelijk vrijwel op hetzelfde neer als die in de Leidraad Kunstwerken [ref 2].

Betrouwbaarheidsniveau

Het betrouwbaarheidsniveau, waaraan het grondlichaam van met constructieve elementen versterkte primaire waterkeringen moet voldoen, dient te worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken. Volgens het Addendum [ref 1], niet volgens Leidraad Kunstwerken, kan door middel van een factor de mate van correlatie tussen de instabiliteit en MHW worden meegenomen.

Stabiliteit

Uitgaande van het betrouwbaarheidsniveau dat volgt uit de Leidraad Kunstwerken, eventueel verhoogd met 10% voor constructies langer dan 100 meter, moet de stabiliteitsnorm worden bepaald volgens het Addendum met in acht name van een schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor en de materiaalfactoren van de grond volgens het Addendum.

N.B. De grafiek in CUR 166 voor het in rekening brengen van het lengte-effect op het vereiste betrouwbaarheidsniveau is in het onderhavige geval, bij het toetsen op de macrostabiliteit van primaire waterkeringen met EEM, niet van toepassing. Dit wordt toegelicht in paragraaf B.4.2 in bijlage B.

CUR 166 geeft aan dat in de EEM berekening de rekenwaarden van de schuifsterkteparameters en de stabiliteitsnorm moeten worden opgeschaald tot waarden waarmee het mogelijk is om een EEM berekening met aansluitend sterktereductie berekening uit te voeren.

Constructieve elementen

Volgens de aanpak van CUR 166, welke is gebaseerd op klassieke rekenmodellen, dienen er twee berekeningen te worden uitgevoerd.

- Een berekening voor de krachtsverdeling in de constructieve elementen, waarbij partiële factoren voor de schuifsterkteparameters van de grond volgens CUR 166 in acht moeten worden genomen.
- Een berekening voor het toetsen van de constructieve elementen, waarbij de partiële factoren voor het constructiemateriaal volgens CUR 166 in rekening moeten worden gebracht.

In beide berekeningen moet voor vereiste betrouwbaarheidsniveaus hoger dan $\beta = 4,2$ een correctiefactor volgens de Leidraad Kunstwerken in acht te worden genomen.

In CUR 166 is geen voorschrift opgenomen voor het toetsen van de constructieve elementen voor het geval dat de stabiliteitsnorm en schuifsterkteparameters zijn opgeschaald.

3.3.3 Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen

Uit bestudering van Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4] is gebleken dat het in feite een nadere uitwerking van Leidraad Kunstwerken [ref 2] en CUR 166 [ref 3] is, toegespitst op deze specifieke constructies.

In Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen wordt de faalruimte van 0,01 keer de normfrequentie opgedeeld in afzonderlijke faalruimten voor macrostabiliteit, damwanden en anker. Hieraan ligt de gedachte ten grondslag dat bezwijken van deze drie elementen niet gecorreleerd zou zijn. Er kan echter worden bewezen [ref 8] dat bezwijken van deze elementen wel (vrijwel volledig) is gecorreleerd. Dit betekent dat voor macrostabiliteit en bezwijken van constructieve elementen een gelijke faalruimte van 0,01 keer de normfrequentie kan worden aangehouden.

3.4 Conclusies met betrekking tot bestaande regelgeving

Een belangrijke conclusie is dat de bestaande regelgeving weinig eenduidig is, soms (ogenschijnlijk) tegenstrijdig en dat er veel verwijzingen en in sommige gevallen ook weer terugverwijzingen zijn van de ene regelgeving naar de andere is. Dit maakt het lastig om in een concrete situatie te bepalen welk artikel in welk rapport bepalend is.

Ook is het zo dat de genoemde richtlijnen niet allemaal op hetzelfde moment zijn opgesteld. De historische ontwikkeling heeft ertoe bijgedragen dat bijvoorbeeld de schematiseringsfactor, die in het Addendum [ref 1] is geïntroduceerd, in de eerder uitgegeven Leidraad Kunstwerken [ref 2] dan ook niet wordt genoemd.

Wel bestaat er tussen deskundigen overeenstemming dat de veiligheidsfilosofie van primaire waterkeringen die met een EEM worden berekend moet aansluiten bij de veiligheidsfilosofie van het Addendum. Dit om te voorkomen dat een waterkering die bij een berekening met een klassiek rekenmodel zou worden goedgekeurd bij een berekening met een EEM zou worden afgekeurd, en andersom.

N.B. Er moet worden getracht zo goed mogelijk aan te sluiten bij de filosofie dat een meer geavanceerde toetsing, die wordt uitgevoerd als een situatie met een globale toetsing niet voldoet of als een situatie zich niet leent voor een globale toetsing (bv door de aanwezigheid van constructies), minder conservatief is dan een globale toetsing.

Uit vergelijken van de verschillende bronnen van bestaande regelgeving volgt verder dat:

- De veiligheidsnormering van Leidraad Kunstwerken, CUR 166 [ref 3] en het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4] zijn met elkaar in overeenstemming, hoewel het door de vele verwijzingen van de ene naar de andere richtlijn bijzonder lastig is om hier de weg in te vinden.
- Het Addendum blijkt niet aan te sluiten op de normen voor constructies (i.e. Leidraad Kunstwerken; CUR 166; Technisch Rapport Kistdammen). Dit komt ten eerste doordat het Addendum niet voorziet in constructieve elementen. Daarnaast gaat men bij waterkeringen zonder constructieve elementen uit van een betrouwbaarheid per jaar, terwijl men in de normen voor constructies uitgaat van een betrouwbaarheid voor een referentieperiode van een aantal jaren.

De oplossing voor het verschil in normering van de betrouwbaarheid is gevonden in de constatering dat het product van de faalruimtefactor en levensduurfactor gelijk is aan de toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit volgens het Addendum. De consequentie van de aanpak in Leidraad Kunstwerken is wel dat een dijk met constructieve elementen, die behalve aan het Addendum ook aan de Leidraad Kunstwerken moet voldoen, veiliger is dan een dijk zonder constructieve elementen die alleen aan het Addendum hoeft te voldoen.

N.B. Het verschil in normering van de betrouwbaarheid vormt een punt van inconsistentie, dat nog nader uitgezocht moet worden. Hierdoor is het betrouwbaarheidsniveau volgens het Addendum niet vergelijkbaar met het betrouwbaarheidsniveau volgens de normen voor constructies. De verschillen tussen het Addendum en de normen voor constructies zijn echter overbrugbaar.

- Het lijkt verdedigbaar om bij de bepaling van het betrouwbaarheidsniveau voor het in rekening te brengen lengte effect in plaats van de in de Leidraad Kunstwerken voorgeschreven verhoging van 10% voor strekkingen groter dan 100 meter het meer onderscheidende voorschrift in het Addendum aan te houden.
- Een nadeel van de aanpak in CUR 166, en daarmee tevens in Leidraad Kunstwerken, voor het toetsen van een primaire waterkering waarin constructieve elementen zijn aangebracht is, dat er twee geotechnische berekeningen moeten worden uitgevoerd. Een berekening voor het toetsen van de stabiliteit (op basis van partiële factoren volgens het Addendum) en een voor het bepalen van de krachtsverdeling (op basis van de partiële factoren volgens CUR 166).

4 Veiligheidsfilosofie SBW EEM

4.1 Relevant eerder uitgevoerd onderzoek

Naast het bestuderen van de bestaande regelgeving, waarvan de resultaten in samengevatte vorm in hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd, is Deltares ook nagegaan welke adviezen en onderzoeken mogelijk relevant zijn voor het onderhavige onderwerp.

In 2003 is door het voormalige GeoDelft het onderzoeksproject “Stabiliteits- en sterktecriteria bij lange damwanden in dijken” [ref 9] uitgevoerd ten behoeve van dijkversterkingen in de Krimpenerwaard. Hieruit zijn een voorlopige richtlijn voor een stabiliteitsnorm, in de EEM in te voeren waarden voor de schuifsterkteparameters en een toetsnorm voor de constructieve elementen voortgekomen.

Verder heeft Deltares in het recente verleden advies uitgebracht ten aanzien van de veiligheidsnormering van twee waterkeringen voorzien van constructieve elementen. Voor deze adviezen zijn de bestaande richtlijnen bestudeerd en is nagegaan wat de overeenkomsten, verschillen en inconsistenties zijn. Het gaat hierbij om:

- Veiligheidsnormering Wilhelminakade in de Eemshaven [ref 10];
- Toetsing Kistdam Maeslantkering in het kader van het VTV (zie bijlage A)

De resultaten uit dit onderzoek en deze adviezen zijn, waar relevant en nodig, meegenomen.

4.2 Oplossingsrichtingen voor aanpak EEM-berekening

Voor een integratie van de veiligheidsfilosofie in het stappenplan voor de toepassing van de EEM bij het toetsen van de macrostabiliteit van een primaire waterkering, is het nodig dat er tussen de mogelijk aanwezige belasting en de gerealiseerde sterkte voldoende marge zit. Echter, zowel het bepalen van de sterkte van het materiaal waaruit de waterkering bestaat als de belastingen op de waterkering vergt een geïntegreerde aanpak om tot een voldoende hoog betrouwbaarheidsniveau te komen.

Bij EEM-berekening heeft aanpak van de berekening invloed op de wijze waarop de berekening loopt en de mate waarin de geschematiseerde situatie met de werkelijkheid overeenkomt. Er zijn globaal drie mogelijke oplossingsrichtingen voor de wijze om voor wat betreft de sterkten en belastingen tot een voldoende hoog betrouwbaarheidsniveau te komen:

- a) materiaalfactoren ongelijk aan 1,0 en stabiliteitsnorm conform Addendum
- b) materiaalfactoren gelijk aan 1,0 en opschalen stabiliteitsnorm Addendum
- c) twee sets schuifsterkteparameters

4.2.1 Aanpak a - Materiaalfactoren ongelijk aan 1,0 en stabiliteitsnorm conform Addendum

Een mogelijke aanpak is om de materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm te bepalen in overeenstemming met het Addendum [ref 1], bij constructies met in acht name van de Leidraad Kunstwerken [ref 2], CUR 166 [ref 3] en het Technische Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4]. Dit resulteert in een combinatie van rekenwaarden en een stabiliteitsnorm die (meestal) in de buurt van bezwijken zal liggen. Daardoor is het vaak niet mogelijk om met succes een EEM-berekening en aansluitend een sterktereductie-berekening (de c' -tan ϕ' -reductie in PLAXIS leidend tot een waarde voor MSF) uit te voeren.

De rekenwaarden van de schuifsterkteparameters en de stabiliteitsnorm worden in dit geval met hetzelfde getal vermenigvuldigd, zodat waarden worden verkregen waarmee het wel mogelijk is om met succes een sterktereductie-berekening uit te voeren. Als de sterktereductie-berekening resulteert in een MSF-waarde groter dan de stabiliteitsnorm, dan voldoet de constructie aan de richtlijnen. Is dit niet het geval, dan moet de constructie worden afgekeurd. Deze aanpak heeft raakvlakken met de aanpak van CUR 166.

Het voordeel van deze aanpak is ten eerste dat de constructie, afgezien van mechanica-verschillen tussen EEM en klassieke rekenmodellen, tijdens de sterktereductie-berekening bezwijkt bij dezelfde waarden van de schuifsterkteparameters als in klassieke rekenmodellen. Verder is deze aanpak eenvoudig en is het resultaat qua veiligheid direct vergelijkbaar met het voorschrift in het Addendum.

Het grote nadeel is dat de berekening wordt uitgevoerd met een combinatie van schuifsterkteparameters die niet overeenkomt met de gemiddeld aanwezige schuifsterkteparameters of de karakteristieke waarden daarvan. Hierdoor kunnen problemen ontstaan met het creëren van een realistische initiële uitgangssituatie. Daarmee is deze aanpak niet geschikt voor het beoordelen van vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties. En daarmee sluit deze aanpak niet aan bij het SBW-onderdeel toetsen macrostabiliteit van dijken aan grenstoestanden voor sterkte en vervormingen.

4.2.2 Aanpak b – Materiaalfactoren gelijk aan 1,0 en opschalen stabiliteitsnorm Addendum

Een tweede mogelijke aanpak is om, in plaats van rekenwaarden van de schuifsterkteparameters bij de eerste aanpak, uit te gaan van karakteristieke (materiaalfactor gelijk aan 1,0) of gemiddelde waarden. Hierbij dient de stabiliteitsnorm waaraan moet worden voldaan te worden opgeschaald met het (gewogen) gemiddelde van de verhouding tussen de karakteristieke of gemiddelde waarden van de schuifsterkteparameters en de rekenwaarden volgens het Addendum [ref 1].

Het voordeel van deze aanpak is dat de EEM-berekening wordt uitgevoerd met parameters die representatief zijn voor de in werkelijk gemiddeld ter plaatse aanwezige parameters. Hierdoor kan een goed beeld van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties worden verkregen.

Het nadeel van de aanpak is dat de constructie tijdens sterktereductie-berekening bezwijkt bij een andere combinatie van schuifsterkteparameters dan het geval is in klassieke rekenmodellen. Hierdoor kan het (in theorie) gebeuren dat een constructie, die met een klassiek rekenmodel net zou worden goedgekeurd, met een EEM-berekening net wordt afgekeurd en andersom. Er moet hierbij echter worden bedacht, dat een stabiliteitsfactor zowel volgens een klassiek model als met EEM altijd een gemiddelde betrouwbaarheid weergeeft. Bij een meer verfijnde probabilistische berekening zal blijken dat de werkelijke betrouwbaarheid vrijwel altijd groter of kleiner zal zijn dan deze gemiddelde betrouwbaarheid.

4.2.3 Aanpak c – Twee sets schuifsterkteparameters

Een derde mogelijke aanpak, die kan worden ingezet als de eerste twee oplossingen niet blijken te voldoen, is een berekening met twee sets parameters voor de schuifsterkte van de grond en een aangepaste stabiliteitsnorm, namelijk:

- een set met karakteristieke schuifsterkteparameters en
- een set met 'rekenwaarden' (opgeschaalde karakteristieke waarden).

In dit geval vindt de opschaling plaats met de grootste waarde voor de verhouding tussen de rekenwaarden volgens het Addendum [ref 1] en karakteristieke waarden van de schuifsterkteparameters. De stabiliteitsnorm, waaraan tijdens de sterktereductie-berekening moet worden voldaan, dient met dezelfde verhouding te worden opgeschaald.

In deze aanpak worden het eigen gewicht van de constructie en de belastingen aangebracht met karakteristieke schuifsterkteparameters. Net voor het begin van de sterktereductie-berekening wordt de set met karakteristieke waarden vervangen door de set vanuit de rekenwaarden volgens het Addendum opgeschaalde waarden. Op basis van de set met rekenwaarden wordt een daarop aangepaste stabiliteitsnorm bepaald.

In paragraaf B.6.4 van bijlage B wordt het bepalen van de vanuit de rekenwaarden opgeschaalde schuifsterkteparameters en de aangepaste stabiliteitsnorm toegelicht.

Door deze manier van opschalen wordt bereikt dat de parameters in de tweede parameterset altijd minimaal gelijk of groter dan de karakteristieke waarden, c.q. de parameters in de eerste parameterset. Hiermee wordt voorkomen dat tijdens het wisselen van parameterset numerieke onbalans in Plaxis ontstaat waardoor de berekening kan ontsporen.

Het voordeel van deze aanpak is dat een goed beeld wordt verkregen van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties én dat de methode op de best denkbare wijze aansluit op het Addendum. Als de constructie in EEM bij exact de opgeschaalde stabiliteitsnorm bezwijkt, dan zijn de bezwijkwaarden van de schuifsterkteparameters namelijk precies gelijk aan de bezwijkwaarden bij een berekening met een klassiek rekenmodellen en rekenwaarden volgens het Addendum.

Het nadeel van deze aanpak is dat ze bewerklijker is, omdat er twee sets parameters nodig zijn waartussen tijdens de berekening moet worden gewisseld. Een ander nadeel is dat, als de constructie in de EEM-berekening bezwijkt bij een andere veiligheidsfactor dan de stabiliteitsnorm, deze veiligheidsfactor niet onmiddellijk vergelijkbaar is met de veiligheidsfactor van een klassiek rekenmodel. Dit komt omdat de sterktereductie-berekening is gestart met een andere combinatie van parameters dan de rekenwaarden volgens het Addendum. Overigens is dit probleem waarschijnlijk grotendeels oplosbaar.

4.2.4 Voorgestelde aanpak

In een overleg tussen betrokkenen is vastgesteld dat de tweede aanpak, waarin wordt uitgegaan van karakteristieke waarden voor de materiaalsterkten en een opgeschaalde waarde voor de stabiliteitsnorm, op dit moment de voorkeur heeft.

De motivatie hiervoor is met name de eenvoud van deze aanpak, wat van belang is voor de praktische bruikbaarheid van de veiligheidsfilosofie en het hierop gebaseerde stappenplan. Tevens kan met deze aanpak een goed beeld van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties worden verkregen, hetgeen goed aansluit bij de wens om bij primaire waterkeringen ook te toetsen aan de grenstoestand voor vervorming.

Wat betreft de grondstijfheid wordt voorgesteld om uit te gaan van verwachtingswaarden. In paragraaf 3.4.4 van CUR 166 [ref 3] worden indicaties voor de grondstijfheid gegeven, welke gebruikt kunnen worden in het Mohr-Coulomb model in PLAXIS.

4.3 Invulling veiligheidsfilosofie

4.3.1 Normfrequentie

De veiligheid waaraan de waterkering moet voldoen volgt uit de Wet op de Waterkering en is in het Hydraulische randvoorwaarden [ref 13] opgenomen. De vereiste veiligheid wordt bepaald door de maatgevende hoogwaterstand (MHW) gekoppeld aan de gemiddelde herhalingstijd van deze waterstand. De gemiddelde herhalingstijd van deze waterstand wordt aangeduid met normfrequentie of norm.

4.3.2 Stabiliteitsnorm

De vereiste veiligheid tegen geotechnisch bezwijken wordt bereikt door het eisen van een minimale waarde van de stabiliteitsfactor waaraan de waterkering bij het aanwezig zijn van MHW moet voldoen. De minimale waarde van de stabiliteitsfactor, waaraan een waterkering moet voldoen, wordt aangeduid als de stabiliteitsnorm. De voorgeschreven waarde van de stabiliteitsnorm voor EEM-analyse (γ_{eem}) komt in PLAXIS overeenkomt met de waarde voor MSF die volgt uit een sterktereductie-berekening.

De stabiliteitsnorm, en daarmee de vereiste waarde voor MSF die in de sterktereductie-berekening minimaal moet worden bereikt, waaraan de waterkering moet voldoen volgt uit:

$$\gamma_{\text{eem}} = \gamma_{\text{b}} \cdot \gamma_{\text{d}} \cdot \gamma_{\text{n}} \cdot \gamma_{\text{mat}}$$

waarin:

- γ_{eem} vereiste stabiliteits- of veiligheidsfactor o.b.v. een EEM-berekening met PLAXIS;
- γ_{b} partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het schematiseren van de ondergrond, ook schematiseringfactor genoemd;
- γ_{d} partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het gebruikte rekenmodel en de manier waarop de berekening is uitgevoerd, ook modelfactor genoemd;
- γ_{n} partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade, ook schadefactor genoemd;
- γ_{mat} partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het feit dat de berekening met karakteristieke waarden wordt uitgevoerd in plaats van rekenwaarden. Voorgesteld wordt om deze factor 'correctiefactor stabiliteitsnorm' te noemen.

In het vervolg van deze subparagraaf worden deze factoren nader toegelicht.

Correctiefactor stabiliteitsnorm (γ_{mat})

Omdat de stabiliteitsberekening met karakteristieke waarden voor de schuifsterkteparameters wordt uitgevoerd in plaats van met rekenwaarden, is een correctiefactor stabiliteitsnorm (γ_{mat}) nodig om hiervoor te corrigeren.

De correctiefactor stabiliteitsnorm is een functie van de materiaalfactoren volgens het Addendum [ref 1], de in de constructie aanwezige grondsoorten en de grondlaagstratificatie. In de materiaalfactoren volgens het Addendum worden de onzekerheden ten aanzien van de beschrijving van de schuifsterkte verdisconteerd.

Ervan uitgaande dat de schuifsterkte op basis van CU triaxiaalproeven bij een bepaalde rekgrens wordt bepaald (zie subparagraaf 3.3.3), zijn volgens het Addendum de materiaalfactoren in onderstaande tabel 3.1 van toepassing.

Grondsoort en parameter		Variatie-coëfficiënt V	γ_m
volumieke massa nat/droog	(ρ)		1.0
klei	(TP-CU-5%)		
	cohesie (c)	0.45	1.25
	inwendige wrijving ($\tan \varphi$)	0.20	1.25
veen	(TP-CU-5%)		
	cohesie (c)	0.80	1.50
	inwendige wrijving ($\tan \varphi$)	0.25	1.25
zand	(TP-CD)		
	cohesie (c)	n.v.t.	n.v.t.
	inwendige wrijving ($\tan \varphi$)	0.15	1.2

TP-CU-5% = triaxiaalproef, geconsolideerd en ongedraineerd, met 2 à 5% vervorming
 TP-CD = triaxiaalproef, geconsolideerd en gedraineerd
 Bij aantoonbaar lagere variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kunnen aangescherpte materiaalfactoren worden afgeleid. Bijvoorbeeld in het geval van natuurlijke niet-organische klei, waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0.275$ en $V_\varphi \leq 0.15$, geldt $\gamma_{m,c} = 1.15$ en $\gamma_{m,\tan \varphi} = 1.15$

Tabel 4.1 *Materiaalfactoren ten behoeve van correctiefactor stabiliteitsnorm volgens Tabel 5.3.1 van het Addendum [ref 1]*

De grootte van de correctiefactor stabiliteitsnorm (γ_{mat}) in te onderscheiden situaties, die tussen de kleinste (1,20) en grootste waarde (1,50) van de materiaalfactor in Tabel 3.1 zal liggen, moet aan de hand van de aanwezige grondsoorten en de bodemopbouw in de beschouwde situatie worden bepaald. In paragraaf C.3.3 van bijlage C wordt voor de bepaling een voorstel gedaan.

Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor (γ_b) is de factor waarmee onzekerheden in de schematisering van de bodemopbouw en waterspanningen in rekening wordt gebracht. Het uitgangspunt van de stabiliteitsbeoordeling is een conservatieve inschatting van de bodemopbouw en waterspanningen. De onzekerheden hierin wordt vooralsnog verdisconteerd met een schematiseringsfactor van $\gamma_b = 1,30$.

Uit onderzoek [ref 14] ten behoeve van de SBW-deelstudie Technisch Rapport Grondonderzoek is gebleken dat de schematiseringfactor onder voorwaarden tot een waarde tussen 1,10 en 1,30 kan worden verlaagd. Dit is onder anderen afhankelijk van de mate waarin de geometrie en bodemopbouw van de constructie bekend zijn.

Modelfactor

De modelfactor (γ_d) is de factor waarmee de verschillen tussen een EEM-berekening en een berekening met een klassiek rekenmodel in rekening worden gebracht. De volgende overwegingen zijn van belang bij het vaststellen van de modelfactor:

- In het geval van constructieve elementen in de waterkering wordt de materiaalsterkte bij bezwijken in mindere mate gemobiliseerd dan in het geval er geen constructieve elementen aanwezig zijn.
- Het gewoonlijk in klassieke rekenmodellen toegepaste Coulombse wrijving model is niet gelijk aan het in PLAXIS toegepaste Mohr-Coulomb model. Bij gelijke waarden van de schuifsterkteparameters resulteert dit tijdens de sterktereductie-berekening in een lagere stabiliteitsfactor dan in de klassieke rekenmodellen.
- Het maakt verschil of de berekening in PLAXIS gedraineerd of ongedraineerd (beide op basis van gedraineerde sterkteparameters) wordt uitgevoerd. Bij een ongedraineerde berekening moet rekening worden gehouden met waterspanningsgeneratie. In het Mohr-Coulomb model van PLAXIS wordt dit niet goed in rekening gebracht.

In overeenstemming met het bovenstaande volgt de modelfactor (γ_d) uit de formule:

$$\gamma_d = \gamma_{d;strain} \cdot \gamma_{d;const} \cdot \gamma_{d;undr}$$

waarin:

- $\gamma_{d;strain}$ factor voor het in rekening brengen van de mate waarin de materiaalsterkte in het bezwijkmechanisme is gemobiliseerd;
- voor waterkeringen zonder constructieve elementen geldt $\gamma_{d;strain} = 1,0$
 - voor waterkeringen met constructieve elementen geldt $\gamma_{d;strain} < 1,0$
- $\gamma_{d;const}$ factor voor het in rekening brengen van de verschillen tussen het Coulombse wrijving model en het Mohr-Coulomb model van PLAXIS;
- $\gamma_{d;undr}$ factor voor het in rekening brengen van het gegeven dat PLAXIS, in het geval van een ongedraineerde berekening op basis van gedraineerde sterkteparameters, de waterspanningsgeneratie niet op de juiste wijze in rekening brengt.

De voor $\gamma_{d;strain}$, $\gamma_{d;const}$ en $\gamma_{d;undr}$ aan te houden waarden moeten nader worden vastgesteld.

Schadefactor

De vereiste betrouwbaarheid per dijkvak β_{nodig} kan afwijken van het basisbetrouwbaarheidsniveau $\beta = 4,0$ (1/jaar). Dit wordt gecorrigeerd met een schadefactor γ_n . De schadefactor voor 'groene' dijken, maar ook voor dijken waarin constructieve elementen zijn aangebracht, is direct gerelateerd aan de betrouwbaarheidsindex en wel als volgt:

$$\gamma_n = 1,0 + 0,13 \cdot (\beta_{nodig} - 4,0)$$

Tabel 3.1: Schadefactor γ_n als functie van de benodigde betrouwbaarheidsindex [ref 1]

betrouwbaarheidsindex β (1/jaar)	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25
schadefactor γ_n (-)	1.00	1.03	1.07	1.10	1.13	1.16

Conform het Addendum moet voor het bovenrivierengebied bij het beschouwen van de binnenwaartse macrostabiliteit een betrouwbaarheidsindex $\beta_{nodig} = 4,60$ worden aangehouden. Dit resulteert in een schadefactor van 1,08.

Voor het benedenrivierengebied (en er wordt aangenomen dat dit ook geldt voor zeedijken en meerdijken) kan voor de te hanteren betrouwbaarheidsindex per dijkvak volgens het Addendum de volgende benadering worden gevolgd:

$$\beta_{nodig} = \Phi^{-1}(P_{loc,toel}) \text{ waarin } P_{loc,toel} = \frac{f \cdot Norm}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{L}{l}\right) \cdot P_{f|inst}}$$

waarin:

β_{nodig}	: vereiste betrouwbaarheid voor een dijkvak	[1/jaar]
Φ^{-1}	: inverse Gauss kansfunctie	
$P_{loc,toel}$: toelaatbare kans op instabiliteit op een bepaalde locatie	[1/jaar]
Norm	: veiligheidsnorm	[1/jaar]
f	: toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit; f = 0,10	[-]
α	: factor waarmee correlatie van dijkvakken in rekening wordt gebracht; $\alpha = 0,033$	[-]
L	: totale lengte van de waterkering	[m]
l	: representatieve lengte dijkvak voor de analyse in een doorsnede l = 50 m.	
$P_{f inst}$: kans op falen gegeven een instabiliteit.	
	- voor instabiliteit die niet samenhangt met hoogwater geldt $P_{f inst} = 0,1$	
	- voor instabiliteit die samenhangt met hoogwater geldt $P_{f inst} = 1,0$	

4.3.3 Input PLAXIS

Materiaalsterkte en -stijfheid

Grondsterkte en -stijfheid

Voor wat betreft het bepalen van de rekenwaarde van de materiaalsterkte wordt ervan uitgegaan dat de proevenverzameling, conform het onderzoeksspoor geavanceerd toetsen aan grenzen sterkte en vervormingen bestaat uit gegevens die zijn ontleend aan CU single stage triaxiaalproeven bij een rekgrens van 2 à 5%.

N.B. In de voorfase van het SBW project Werkelijke Sterkte is een overzicht gegeven van de voor en nadelen van de verschillende proefprocedures. In het stappenplan [ref 6] wordt een voorstel voor een keuze gemaakt.

Conform subparagraaf 3.2.1 van [ref 11] worden de karakteristieke waarden van de grondsterkte (schuifsterkteparameters) uit de waarde bepaald, die in 5% van de gevallen wordt onder- of overschreden. Bij het bepalen van deze karakteristieke waarden speelt het aantal proeven waaruit de proevenverzameling bestaat een belangrijke rol. Als de karakteristieke waarden niet bekend zijn, dan moeten deze worden bepaald volgens een aparte procedure. Deze procedure is beschreven in [ref 12].

Bij het bepalen van de 5%-ondergrens van de schuifsterkte (de combinatie van c' en $\tan \phi'$) van cohesieve materialen (klei en veen) moet rekening worden gehouden met het feit dat deze ondergrens betrekking heeft op de combinatie van beide parameters en niet op c' en $\tan(\phi')$ afzonderlijk.

Wat betreft de grondstijfheid wordt voorgesteld om uit te gaan van verwachtingswaarden. In paragraaf 3.4.4 van CUR 166 [ref 3] worden indicaties voor de grondstijfheid gegeven, welke gebruikt kunnen worden in het Mohr-Coulomb model in PLAXIS.

Constructieve sterkte en stijfheid

Voor de karakteristieke waarden van de sterkte- en stijfheidsparameters van de constructieve elementen en de stijfheidsparameters van de grond kan worden uitgegaan van normale verdelingen met een verwachtingswaarde (μ) en standaardafwijking (σ). De karakteristieke waarden van de parameters volgen dan uit $(\mu-1,64\cdot\sigma)$ respectievelijk $(\mu+1,64\cdot\sigma)$.

Bepaling van belastingen

Waterstandsverschil binnen- en buitenzijde

De belasting op de waterkering bestaat in de eerste plaats uit het drukverschil tussen de buitenzijde en binnenzijde van de waterkering ten gevolge van waterstandsverschillen.

- Voor de representatieve waarde van de dominante belasting op de buitenzijde van de waterkering dient te worden uitgegaan van het Toetspeil, welke op basis van de Hydraulische randvoorwaarden [ref 13] (en een hierin aangegeven correctie in verband met de verwachte hoogwaterstijging in de planperiode) kan worden vastgesteld.
- De in rekening te brengen waterdruk tegen de binnenzijde van de waterkering dient zodanig te worden bepaald dat de kans per jaar op overschrijding van de ontwerpwaarde van de verschildrukken kleiner is dan de normfrequentie: sterk gereguleerd peil = constant peil aanhouden, statistische analyse inclusief correlatie verdelingsfuncties waterstanden binnen- en buitenzijde (indien mogelijk). In de praktijk komt dit er op neer dat kan worden uitgegaan van het polderpeil (zomer of winterpeil).

Grondwaterspanningen

- Het bepalen van de belasting door grondwaterspanningen kan plaatsvinden volgens de procedure in PLAXIS voor het genereren van waterspanningen uit op te geven freatische lijnen dan wel door middel van een grondwaterstromingsberekening. Nadere informatie hierover is te vinden in het Technisch Rapport Waterspanningen [ref 15]

N.B. Als de waterstand aan de binnenzijde hoger is dan aan de buitenzijde (keren van binnen naar buiten) moet volgens de Leidraad Kunstwerken [ref 2] in voorkomende gevallen rekening worden gehouden met een belastingfactor op het waterdrukverschil van $\gamma_H = 1,25$ (eenvoudige methode). Voor het toetsen van de veiligheid onder MHW omstandigheden (keren van buiten naar binnen) is dit echter minder van belang.

Bovenbelastingen

Behalve met de hierboven genoemde belastingen moet ook rekening worden gehouden met mogelijke bovenbelastingen. Dit kunnen verkeersbelastingen zijn, omdat de waterkering tijdens hoogwateromstandigheden toegankelijk moet zijn voor rijdend materieel ten behoeve van beheersmaatregelen en bovenbelastingen als gevolg van de (tijdelijke) opslag van materialen. De in rekening te brengen bovenbelastingen tijdens MHW omstandigheden volgen uit de ontwerp-specificaties van de waterkering of de Leidraad Rivieren [ref 16]. In bijzondere gevallen moeten de bovenbelastingen in overleg met de beheerder van de waterkering worden vastgesteld.

Overige belastingen

Indien van toepassing moet ook rekening worden gehouden met ijsbelastingen en belastingen als gevolg van scheepsaanvaringen of aanvaringen met drijvende voorwerpen. Andere belastingen zoals bolderkrachten zijn tijdens hoogwateromstandigheden minder van belang.

Voor nadere informatie betreffende eventueel in rekening te brengen belastingen wordt verwezen naar de Leidraad Rivieren [ref 16], welke van toepassing is op waterkeringen zonder kunstwerken, dan wel de Leidraad Kunstwerken, CUR 166 [ref 3] en het Technisch rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4] indien er wel constructies in de waterkering aanwezig zijn.

N.B. Tabel B4.1 uit Leidraad Kunstwerken [ref 2] is bewust niet overgenomen, omdat de meeste hierin genoemde belastingen niet van toepassing zijn bij het toetsen van primaire waterkeringen onder MHW-omstandigheden.

4.3.4 Toetsingsnorm constructieve elementen

Uit onderzoek [ref 9] is gebleken dat de krachtsverdeling na de sterktereductie-berekening tot de stabiliteitsnorm een goed uitgangspunt is voor het toetsen van de constructieve elementen. De hieronder volgende normering is op dit onderzoek gebaseerd.

Materiaalsterkte

De materiaalsterkten (vloeigrens of breuksterkte) moeten worden bepaald overeenkomstig de NEN 6700 serie (NEN 6700 - TGB Algemeen, NEN 6720 – TGB Betonconstructies, NEN 6770 – TGB Staalconstructies) en CUR 166 [ref 3].

Profielgrootheden

De profielgrootheden (doorsneden, weerstandmomenten en traagheidsmomenten) moeten worden bepaald overeenkomstig de NEN 6700 serie (NEN 6700 - TGB Algemeen, NEN 6720 – TGB Betonconstructies, NEN 6770 – TGB Staalconstructies) en CUR 166.

Krachtenverdeling

Uitgangspunt voor de toetsing van de constructieve elementen (damwand, diepwand, anker) zijn de berekende momenten en ankerkrachten uit de sterktereductie-berekening, in PLAXIS bij een waarde voor de MSF-factor tijdens de sterktereductie-berekening gelijk aan de stabiliteitsnorm. In voorkomende gevallen moet rekening worden gehouden met scheve buiging en de invloed van tweede orde effecten zoals knik en plooi op de opneembare snedekrachten.

Toetsnorm

Het maatgevende (veld)moment en de maatgevende normaalkracht worden ontleend aan de berekeningsstap in de sterktereductie-berekening waarbij aan de vereiste stabiliteitsnorm wordt voldaan. Vervolgens dient:

- voor het toetsen van de sterkte van de damwand en de gording het maatgevende (veld)moment en de maatgevende normaalkracht in de damwand te worden vermenigvuldigd met een (additionele) veiligheidsfactor van 1,15. De hierbij behorende maximale spanningen in de damwand worden getoetst aan de rekenwaarde van de vloeigrens of breuksterkte in overeenstemming met NEN 6770;
- voor het toetsen van de sterkte van de diepwand het maatgevende (veld)moment en de maatgevende normaalkracht in de diepwand te worden vermenigvuldigd met een (additionele) veiligheidsfactor van 1,15. De snedekrachten (buigend moment en normaalkracht) worden getoetst aan NEN 6720 (VBC 1990) Hoofdstuk 8, Dimensionering en Toetsing;
- voor het toetsen van de sterkte van het anker de maatgevende ankerkracht te worden vermenigvuldigd met een (additionele) veiligheidsfactor van 1,25. De hierbij behorende maximale spanning in het anker wordt getoetst aan de rekenwaarde van de vloeigrens of breukgrens volgens NEN 6770.

5 Literatuur

- [ref 1] “Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies”, Rijkswaterstaat DWW, ISBN 978-90-369-1411-6, Den Haag, juli 2007;
- [ref 2] “Leidraad Kunstwerken”, TAW, DWW-2003-059, ISBN 90-369-5544-0, mei 2003;
- [ref 3] “CUR 166 Damwandconstructies”, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, ISBN 90-3760-063-8, 4^e druk, Gouda, oktober 2005;
- [ref 4] “Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen”, Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde, DWW-2004-074, ISBN 90-369-5569-6, Delft, november 2004;
- [ref 5] “SBW Werkelijke Sterkte, Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM, Activiteit 04.a Opstellen stappenplan”, Deltares, kenmerk 1001463-013-GEO-0002, Delft, 2 juli 2009;
- [ref 6] Memo “SBW Werkelijke sterkte van dijken – stappenplan (product WS014)”, Deltares, kenmerk 1200177-000-GEO-0006, 29 mei 2009;
- [ref 7] “SBW project Werkelijke Sterkte - Projectplan 2009”, Deltares, versie 4, Delft, 16 april 2009;
- [ref 8] “Probabilistische rekenmethode kistdammen en diepwanden”, Grondmechanica Delft, Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde, rapport CO-349820/61, Delft, 10 juni 1996;
- [ref 9] “Stabiliteits- en sterktecriteria bij lange damwanden in dijken t.b.v. de Begeleidingscommissie Dijkversterkingen Krimpenerwaard”, RWS-DWW, Provincie Zuid-Holland, Fugro, GeoDelft, versie 2, Delft, 21 november 2003;
- [ref 10] “Rapportage Veiligheidsnormering verlenging Kade Wilhelminahaven”, Deltares, kenmerk 1200146-000-GEO-0003, Delft, 3 maart 2009;
- [ref 11] “CUR 162 Construeren met grond – Grondconstructies op en in weinig draagkrachtige en sterk samendrukbare ondergrond”, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, ISBN 90-376-0024-7, Gouda, november 1992;
- [ref 12] “Veiligheid Nederland in Kaart – Resultaten verkenning Langsconstructies”, Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde, 3 augustus 2006;
- [ref 13] “Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen”, Ministerie van Verkeer & Waterstaat, 2006;
- [ref 14] “Schematiseringsfactor bij controle van taludstabiliteit van dijken (deelstudie SBW Technisch Rapport Grondonderzoek)”, Deltares, kenmerk 432550.007 vvs 1, Delft, september 2008;
- [ref 15] “Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken”, Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde, DWW-2004-057, ISBN 90-369-5565-3, Delft, 1 september 2004;
- [ref 16] “Leidraad Rivieren”, Ministerie van Verkeer & Waterstaat, ISBN 978-90-369-1408-6, Den Haag, juli 2007.

A Praktijkcase Maeslantkering

Voor het toetsen van de Kistdam van de Maeslantkering is een uitgebreide PLAXIS-berekening uitgevoerd. Voor deze berekening zijn alle stappen, die betrekking hebben op het met de EEM toetsen van een primaire waterkering voorzien van constructieve elementen, doorlopen. Hieronder vallen tevens de stappen die betrekking hebben op de veiligheidsfilosofie, namelijk het vaststellen van:

- de in te voeren sterkteparameters,
- de toetsnorm voor macrostabiliteit en
- de toetsnorm voor de constructieve elementen.

A.1 Veiligheidsfilosofie

Voor het toetsen van de macrostabiliteit van deze kistdam is conform paragraaf 2.3 de veiligheidsfilosofie in het Addendum [ref 1] als uitgangspunt gekozen. Ten opzichte van het Addendum is er in de veiligheidsfilosofie voor de kistdam van de Maeslantkering echter een aantal belangrijke punten waarmee rekening moest worden gehouden.

- Het Addendum gaat uit van een jaarlijkse betrouwbaarheid, terwijl de normen voor constructies uitgaan van een betrouwbaarheid voor een referentieperiode;
- De rekenwaarden van de schuifsterkteparameters volgens het Addendum zijn niet geschikt voor PLAXIS, omdat deze (zonder aanpassing) dermate laag zijn dat de mate van veiligheid niet middels een berekening is vast te stellen;
- Omdat de rekenwaarden van de schuifsterkteparameters volgens het Addendum niet geschikt zijn voor PLAXIS, moet de stabiliteitsnorm ook worden aangepast;
- De veiligheidsfilosofie voor de kistdam moet ook voorzien in een toetsnorm voor de sterkte van de constructieve elementen.

A.1.1 Verschillen in normering betrouwbaarheid

De oplossing voor het verschil in normering van het betrouwbaarheidsniveau van groene dijken volgens het Addendum en de normen voor primaire waterkeringen met constructies: Leidraad Kunstwerken [ref 2], CUR 166 [ref 3], Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4] is gevonden in de volgende constatering.

Opmerking: Het Addendum schrijft bij de kans op bezwijken als gevolg van onvoldoende macrostabiliteit bij een waterstand lager dan MHW een faalruimte voor van 0,10 keer de normfrequentie voor. De constructieve richtlijnen voor dit type constructies daarentegen gaan uit van een faalruimte van 0,01 keer de normfrequentie, maar dan wel met een referentieperiode van 10 jaar.

Dit laatste resulteert ook in een faalruimte van 0,10 keer de Normfrequentie, zij het dat deze faalruimte betrekking heeft op een referentieperiode van 10 jaar in plaats van 1 jaar.

Dit vormt punt een inconsistentie. Door ir. E.O.F. Calle is gesteld dat dit nog nader uitgezocht moet worden. Voor dit project lijkt dit echter geen consequenties te hebben.

In het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden wordt de faalruimte van 0,01 keer de normfrequentie nog weer opgedeeld in afzonderlijke faalruimten voor macrostabiliteit, damwanden en anker. Hieraan ligt de gedachte ten grondslag dat bezwijken van deze drie elementen niet gecorreleerd zou zijn.

Er is echter bewezen [ref 8] dat bezwijken van deze elementen (vrijwel volledig) gecorreleerd is. Dit betekent dat voor macrostabiliteit en bezwijken van constructieve elementen een gelijke faalruimte van 0,01 keer de normfrequentie kan worden aangehouden.

A.1.2 Rekenwaarde van schuifsterkteparameters

De oplossing voor de schuifsterkteparameters is gevonden in het niet in rekening brengen van de in het Addendum voorgeschreven materiaalfactoren voor de schuifsterkteparameters en het in plaats daarvan met rekenwaarden (of bij de onderhavige kistdam met gemiddelde waarden) uitvoeren van de EEM berekening.

A.1.3 Aanpassing van de stabiliteitsnorm i.v.m. schuifsterkteparameters

De oplossing voor de grote van de stabiliteitsnorm is gevonden in het opschalen van de stabiliteitsnorm die volgt uit het Addendum met een factor die wordt bepaald door de grootte van de materiaalfactoren. Hoe de opschaling in een concreet geval zou moeten plaatsvinden, vormt een punt van nader onderzoek. Het hieronder aangegeven voorstel moet dan ook als een voorlopige invulling worden gezien

A.1.4 Toetsnorm voor constructieve elementen

De oplossing voor de veiligheidsfilosofie voor de constructieve elementen van de kistdam is gezocht in het overnemen van de conclusies van het in 2003 uitgevoerde onderzoek [ref 9] aangevuld met elementen uit de Leidraad Kunstwerken, CUR 166 en het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen.

A.1.5 Overige aspecten

Behalve de genoemde punten zijn er nog enkele andere punten waarvoor ook keuzes moesten worden gemaakt. Voor zover nodig is dit aangegeven.

In overleg tussen betrokkenen is vastgesteld dat de voor de kistdam van de Maeslantkering uitgewerkte aanpak als basis kan dienen voor de veiligheidsfilosofie voor het met de EEM toetsen van waterkeringen al dan niet voorzien van constructieve elementen. Dit betekent dat veel van de in het Addendum gehanteerde concepten en begrippen in de veiligheidsfilosofie voor het met de EEM toetsen van primaire waterkeringen terugkomen. In de volgende paragraaf wordt de veiligheidsfilosofie beschreven.

A.2 Uitwerking kistdam Maeslantkering volgens Addendum

A.2.1 Schematiseringsfactor

Op grond van de beschikbare informatie en de omstandigheden waaronder de toetsing wordt uitgevoerd is het voor deze kistdam verantwoord om voor de schematiseringsfactor af te wijken van de in het Addendum voorgeschreven waarde $\gamma_b = 1,30$ en in plaats daarvan een waarde $\gamma_b = 1,10$ aan te houden.

Opmerking: *Intussen is een nadere studie uitgevoerd naar de grootte van schematiseringsfactor [ref 14]. Uit de studie volgt dat een verlaging van de schematiseringsfactor moet worden onderbouwd met een gevoeligheidsanalyse.*

A.2.2 Modelfactor

De modelfactor γ_d voor de kistdam bedraagt 1,0.

A.2.3 Schadefactor

Voor de kistdam geldt volgens [ref 1] in de berekening van de vereiste betrouwbaarheid:

norm : 1/10000 (1/jaar);
 f : 0,10 (-);
 α : 0,033;
 L : 30 meter;
 l : 30 meter;
 P_{fjinst} : 0,10 (-);
 P_{fjinst} : 1,0 (-).

Er volgt dat de kistdam voor laagwatercondities moet voldoen aan een betrouwbaarheid van de doorsnede $\beta_{nodig} = 3,73$ (1/jaar) en voor hoogwatercondities aan een betrouwbaarheid van de doorsnede $\beta_{nodig} = 4,28$ (1/jaar). Deze betrouwbarheideisen resulteren voor laagwatercondities in een schadefactor van 0,965 (zie Tabel 2.1) en voor hoogwatercondities in een schadefactor van 1,036 (zie Tabel 2.2).

Tabel 2.1: Betrouwbaarheidsniveau (β_{nodig}) en schadefactor (γ_n) bij laagwatercondities [ref 1]

Volgens Addendum Leidraad Rivieren:		
Norm	1,00E-04	Addendum blz. 11 en 12
f = Toelaatbare kans op overstroming als deel van Norm	0,100	Addendum blz. 11 en Lr.KW blz. 76 en 182. In het Addendum zijn ξ_c en f_N gecombineerd tot f.
P_{fjinst} = Factor voor correlatie met MHW	0,1	Addendum blz. 11 en 12
α = Factor voor correlatie dijkvakken	0,0330	Addendum blz. 11 en 12
L = Totale lengte waterkering	30	Addendum blz. 11 en 12
l = Correlatielengte	30	Addendum blz. 11 en 12
β_{nodig} doorsnede [1/jaar]	3,73	Addendum blz. 11
Toelaatbare faalkans doorsnede [1/jaar]	9,68E-05	Addendum blz. 11
γ_n = Schadefactor	0,965	Addendum blz. 11

Tabel 2.2: Betrouwbaarheidsniveau β_{nodig} en schadefactor Y_n bij hoogwatercondities [ref 1]

Volgens Addendum Leidraad Rivieren:		
Norm	1,00E-04	Addendum blz. 11 en 12
f = Toelaatbare kans op overstrooming als deel van Norm	0,100	Addendum blz. 11 en Lr.KW blz. 76 en 182. In het Addendum zijn ξ_c en f_N gecombineerd tot f.
$P_{f_{inst}}$ = Factor voor correlatie met MHW	1,0	Addendum blz. 11 en 12
α = Factor voor correlatie dijkvakken	0,0330	Addendum blz. 11 en 12
L = Totale lengte waterkering	30	Addendum blz. 11 en 12
l = Correlatielengte	30	Addendum blz. 11 en 12
β_{nodig} doorsnede [1/jaar]	4,28	Addendum blz. 11
Toelaatbare faalkans doorsnede [1/jaar]	9,68E-06	Addendum blz. 11
Y_n = Schadefactor	1,036	Addendum blz. 11

A.2.4 Partiële factoren

De volgens het Addendum op de karakteristieke waarden van de schuifsterkteparameters in rekening te brengen partiële factoren staan vermeld op blz. 10 van het Addendum. Voor de grondsoorten die bepalend zijn voor de stabiliteit van de kistdam bedraagt de gemiddelde materiaalfactor γ_m iets meer dan 1,20.

A.2.5 Stabiliteitsnorm

Het Addendum is niet duidelijk voor wat betreft de bepaling van de stabiliteitsnorm. Het kan echter worden afgeleid dat, als de stabiliteitsberekening wordt uitgevoerd met de in het Addendum vermelde partiële factoren voor de schuifsterkteparameters, de volgende formule voor de bepaling van de stabiliteitsnorm in overeenstemming is met het Addendum:

$$\gamma_{mod} = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

waarin:

- γ_{mod} : met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor;
- γ_b : schematiseringsfactor;
- γ_d : modelfactor;
- γ_n : schadefactor.

Met de hierboven berekende waarden voor γ_b , γ_d en γ_n en partiële factoren voor de schuifsterkteparameters volgens het Addendum volgt dat voor laagwatercondities moet worden voldaan aan een stabiliteitsnorm van de kistdam $\gamma_{mod} = 1,1 \times 1,0 \times 0,965 = 1,061$ en voor hoogwatercondities aan een stabiliteitsnorm $\gamma_{mod} = 1,1 \times 1,0 \times 1,036 = 1,140$.

De verhouding tussen de gemiddelde waarden van de schuifsterkteparameters en de rekenwaarden is ongeveer 1,30. Hieruit volgt dat bij een berekening met gemiddelde waarden van de schuifsterkteparameters voor laagwatercondities moet worden voldaan aan een stabiliteitsnorm $\gamma_{mod} = 1,061 \times 1,30 = 1,379$ en voor hoogwatercondities aan een stabiliteitsnorm $\gamma_{mod} = 1,140 \times 1,30 = 1,481$.

A.3 Uitwerking kistdam Maeslantkering volgens Leidraad Kunstwerken

A.3.1 Vereiste betrouwbaarheid

De normfrequentie voor de kistdam bedraagt 10^{-4} , er geldt een faalruimtefactor van 0,01 en een levensduurfactor van 10. Voor instabiliteit die niet samenhangt met hoogwater geeft de Leidraad Kunstwerken geen voorschrift. Hiervoor wordt aangesloten bij het Addendum, resulterende in een factor voor correlatie met MHW $P_{f_{inst}} = 0,10$. Er hoeft geen lengte-effect in rekening te worden gebracht.

Uit de gegevens volgt dat de kistdam om aan de Leidraad Kunstwerken te voldoen voor laagwatercondities een betrouwbaarheidsindex van de doorsnede $\beta_{nodig} = 3,72$ (-) moet hebben en voor hoogwatercondities een betrouwbaarheidsindex van de doorsnede van $\beta_{nodig} = 4,27$ (-), zie Tabel 3.1 en Tabel 3.2.

Tabel 3.1: Betrouwbaarheidsniveau (β_{nodig}) en schadefactor (γ_n) bij laagwatercondities [ref 3]

Volgens Leidraad Kunstwerken en via verwijzingen naar LKW ook volgens CUR 166:		
Norm	1,00E-04	Leidraad KW blz. 72 en blz. 184
ξ_c = Faalruimtefactor	0,010	Leidraad KW blz. 76 en blz. 182
f_N = Levensduurfactor	10	Leidraad KW blz. 182
$P_{f_{inst}}$ = Factor voor correlatie met MHW	0,1	Addendum blz. 12
Toelaatbare faalkans constructie	1,00E-04	Leidraad KW blz. 182
β_N constructie [-]	3,72	Leidraad KW blz. 182
Toeslag voor lengte-effect	0%	Leidraad KW blz. 184
β_{nodig} doorsnede [referentieperiode f_N]	3,72	Leidraad KW blz. 182 en blz. 184
Toelaatbare faalkans doorsnede [referentieperiode f_N]	1,00E-04	Leidraad KW blz. 182 en blz. 184
γ_n = Schadefactor	0,963	Addendum blz. 11

Voor de beoordeling van de geotechnische stabiliteit verwijst de Leidraad kunstwerken naar het Addendum. Met formule 5.3.8 van het Addendum resulteren de berekende betrouwbaarheidsniveaus in schadefactoren van 0,963 voor laagwatercondities en 1,035 voor hoogwatercondities. Deze waarden voor het betrouwbaarheidsniveau en de schadefactor zijn vrijwel gelijk aan die volgens het Addendum, maar betreffen een referentieperiode van 10 jaar in plaats van een betrouwbaarheid per jaar zoals volgens het Addendum.

Tabel 3.2: Betrouwbaarheidsniveau (β_{nodig}) en schadefactor (γ_n) bij hoogwatercondities [ref 3]

Volgens Leidraad Kunstwerken en via verwijzingen naar LKW ook volgens CUR 166:		
Norm	1,00E-04	Leidraad KW blz. 72 en blz. 184
ξ_c = Faalruimtefactor	0,010	Leidraad KW blz. 76 en blz. 182
f_N = Levensduurfactor	10	Leidraad KW blz. 182
$P_{f_{\text{inst}}}$ = Factor voor correlatie met MHW	1,0	Addendum blz. 12
Toelaatbare faalkans constructie	1,00E-05	Leidraad KW blz. 182
β_N constructie [-]	4,27	Leidraad KW blz. 182
Toeslag voor lengte-effect	0%	Leidraad KW blz. 184
β_{nodig} doorsnede [referentieperiode f_N]	4,27	Leidraad KW blz. 182 en blz. 184
Toelaatbare faalkans doorsnede [referentieperiode f_N]	9,80E-06	Leidraad KW blz. 182 en blz. 184
γ_n = Schadefactor	1,035	Addendum blz. 11

A.3.2 Partiële factoren damwandconstructie

Voor de partiële factoren van damwandconstructie verwijst blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken naar CUR 166 [ref 2]. Voor hoogwatercondities is volgens het Addendum een betrouwbaarheidsniveau van 4,28 (1/jaar) vereist en volgens de Leidraad Kunstwerken een betrouwbaarheidsniveau van 4,27 (-) voor een planperiode met $N = 10$ jaar.

Dit betekent dat de in CUR 166 (voor de schuifsterkteparameters Tabel 2.10B op blz. 66 en voor de sterkteparameters van de constructieve elementen Deel I: Stap 7.2 op blz. 47 en Hoofdstuk 7 op blz. 76) vermelde partiële factoren in beide gevallen moeten worden gecorrigeerd volgens de op blz. 201 van de Leidraad Kunstwerken genoemde formule met een drempelwaarde 4,2.

$$\gamma_{m,corr} = e^{\alpha_R(\beta_N - 4,2)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}}$$

Voor grond geldt een variatiecoëfficiënt $V_r = 0,2$. Voor het betrouwbaarheidsniveau volgens het Addendum van 4,28 resulteert dit in een correctiefactor van 1,011 toe te passen op de materiaalfactoren voor de schuifsterkteparameters van de grond. Voor het betrouwbaarheidsniveau volgens de Leidraad Kunstwerken van 4,27 resulteert dit in een correctiefactor van 1,012 toe te passen op de materiaalfactoren voor de schuifsterkteparameters van de grond.

Voor staalconstructies geldt een variatie coëfficiënt $V_r = 0,1$. Voor zowel het betrouwbaarheidsniveau volgens het Addendum van 4,28 als het betrouwbaarheidsniveau volgens de Leidraad Kunstwerken van 4,27 resulteert dit in een correctiefactor van 1,006 toe te passen op de materiaalfactoren voor het staal.

Voor laagwateromstandigheden is volgens het Addendum een betrouwbaarheidsniveau van 3,73 (1/jaar) vereist en volgens de Leidraad Kunstwerken een betrouwbaarheidsniveau van 3,72 (-) voor een planperiode met $N = 10$ jaar. Deze beide waarden zijn lager dan de voor Klasse III in CUR 166 geldende drempelwaarde van 4,20 zodat voor dit geval de partiële factoren niet gecorrigeerd behoeven te worden.

A.3.3 Stabiliteit waterkerende grondconstructies

Voor de partiële factoren voor de schuifsterkteparameters voor glijvlakberekeningen verwijst blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken naar het Addendum. Volgens de Leidraad Kunstwerken kunnen de hierin vermelde partiële factoren zonder correctie worden toegepast. Dit omdat volgens de Leidraad Kunstwerken in de in het Addendum gegeven ontwerpeis voor de stabiliteit van waterkerende grondconstructies de van de normstelling afgeleide betrouwbaarheidseis reeds is verwerkt.

Uit de Leidraad Kunstwerken volgen iets lagere betrouwbaarheidsniveaus waaraan moet worden voldaan dan uit het Addendum. En in overeenstemming daarmee ook iets lagere schadefactoren zoals hierboven reeds bepaald. Er geldt:

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

waarin:

- γ_{mod} : met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor;
- γ_b : schematiseringsfactor;
- γ_d : modelfactor;
- γ_n : schadefactor.

Met $\gamma_b = 1,1$ en $\gamma_d = 1,0$ en de hierboven berekende waarden voor γ_n en de partiële factoren voor de schuifsterkteparameters volgens het Addendum volgt, dat voor laagwatercondities moet worden voldaan aan een stabiliteitsnorm $Y_{\text{mod}} = 1,1 \times 1,0 \times 0,963 = 1,060$ en voor hoogwatercondities aan een stabiliteitsnorm $Y_{\text{mod}} = 1,1 \times 1,0 \times 1,035 = 1,139$.

De verhouding tussen de gemiddelde waarden van de schuifsterkteparameters van de kistdam en de rekenwaarden bedraagt ongeveer 1,30. Hieruit volgt dat bij een berekening met gemiddelde waarden van de schuifsterkteparameters voor laagwatercondities moet worden voldaan aan een stabiliteitsnorm van ongeveer $Y_{\text{mod}} = 1,060 \times 1,30 = 1,378$ en voor hoogwatercondities aan een stabiliteitsnorm van ongeveer $Y_{\text{mod}} = 1,139 \times 1,30 = 1,480$.

A.4 Voorbeeld: stabiliteitsnorm kistdam Maeslantkering voor EEM berekening

In het hieronder aangegeven voorbeeld is de stabiliteitsnorm voor de kistdam van de Maeslantkering bepaald. In afwijking van de drie hiervoor genoemde mogelijke oplossingen is de berekening uitgevoerd met gemiddelde grondparameters. Het principe blijft echter gelijk.

In bijlage C wordt afgeleid dat de stabiliteitsnorm γ_{eem} waaraan een grondconstructie die met de EEM wordt berekend moet voldoen om aan het Addendum [ref 1] te voldoen volgt uit:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{add}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

waarin:

- w_i : bijdrage van de betreffende schuifsterkteparameter aan de stabiliteit;
- R_i : karakteristieke waarde van de betreffende schuifsterkteparameter;
- $\gamma_{m,i}^{add}$: partiële factoren toegepast op karakteristieke waarden volgens het Addendum;
- $\gamma_{m,i}^{eem}$: partiële factoren toegepast op karakteristieke waarden in de EEM berekening;
- γ_{eem} : stabiliteitsfactor uit EEM berekening

Voor $\gamma_{m,i}^{eem}$ gelijk aan de partiële factoren $\gamma_{m,i}^{add}$ volgens het Addendum wordt de stabiliteitsnorm waaraan moet worden voldaan: $\gamma_{eem} = \gamma_{add} = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$

Voor Laagwatercondities:

$$\gamma_{add} = Y_b \cdot Y_d \cdot Y_n = 1,10 \cdot 1,0 \cdot 0,965 = 1,061$$

Hoogwatercondities:

$$\gamma_{add} = Y_b \cdot Y_d \cdot Y_n = 1,10 \cdot 1,0 \cdot 1,036 = 1,140$$

Deze waarden liggen in de buurt van 1,0.

EEM berekeningen met materiaalparameters in de buurt van de bezwijkwaarden en een stabiliteitsnorm in de buurt 1,0 geven vaak problemen. Om deze reden zijn de EEM berekeningen van de kistdam niet uitgevoerd met rekenwaarden volgens het Addendum, maar met gemiddelde waarden.

De schuifsterkteparameters van de kistdam zijn ontleend aan het GeoDelft-rapport met kenmerk CO-332760/10. Dit betreft een advies betreffende een eerder uitgevoerde PLAXIS-berekening van de kistdam. De schuifsterkteparameters betreffen verwachtingswaarden en karakteristieke (5%) ondergrenswaarden.

De partiële factoren in het Addendum gelden voor karakteristieke waarden.

Berekend is dat voor de grondlagen die bepalend zijn voor de stabiliteit van de kistdam de verhouding $\frac{\mu(R)}{R_d}$ gemiddeld ongeveer gelijk is aan 1,30.

Zoals aangegeven bedraagt de gemiddelde materiaalfactor $\frac{R_{kar}}{R_d} = \gamma_{add}$ volgens het Addendum ongeveer 1,20.

Hieruit volgt voor de verhouding $\frac{R_{kar}}{\mu(R)} = \gamma_{eem}$ een waarde van $\frac{1,20}{1,30} = 0,923$.

Dit betekent dat een EEM berekening van de kistdam met gemiddelde waarden aan de volgende stabiliteitsnorm moet voldoen om aan het Addendum te voldoen:

Laagwatercondities:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{add}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n = \frac{1}{1,2} \cdot 0,923 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 0,965 = 1,38$$

Hoogwatercondities:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n = \frac{1}{1,2} \cdot 0,923 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,036 = 1,48$$

Voor een nadere onderbouwing, zie de voorgaande beschrijving en bijlage C.

B Toelichting I – Bestaande regelgeving

B.1 Inleiding

B.1.1 Achtergrond

Deze toelichting maakt deel uit van het rapport “SBW Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM – Activiteit 03.a Opstellen veiligheidsfilosofie”. Dit onderzoek heeft tot doel om een in de praktijk bruikbare richtlijn te ontwikkelen om primaire waterkeringen, al dan niet voorzien van constructieve elementen, met Eindige Elementen Modellen (EEM) te kunnen toetsen op macrostabiliteit en op de sterkte van eventueel daarin aanwezige constructieve elementen.

In de onderliggende bijlage wordt ingegaan op de bestaande regelgeving, welke als basis dient voor de te ontwikkelen richtlijn voor het toepassen van EEM.

B.1.2 Bestaande regelgeving

Er bestaan verschillende richtlijnen en handboeken die van belang zijn voor het ontwerpen, berekenen en toetsen van met constructieve elementen versterkte waterkeringen. De voor damwanden en aanverwante constructies (zoals kistdammen en diepwanden) belangrijkste daarvan zijn:

- Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies + bijbehorend Addendum;
- Leidraad kunstwerken;
- CUR 166 Handboek Damwandconstructies;
- Technisch Rapport kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen

Een probleem met deze regelgeving is, is dat deze weinig eenduidig is, soms (ogenschijnlijk) tegenstrijdig en dat er veel verwijzingen en soms weer terugverwijzingen zijn van de ene richtlijn naar de andere is. Dit maakt het lastig om in een concrete situatie te bepalen welk artikel in welk rapport bepalend is. In de onderliggende bijlage wordt de belangrijkste regelgeving behandeld en aangegeven hoe daar in de praktijk mee om te gaan.

Ten behoeve van de leesbaarheid vooraf nog de volgende opmerkingen:

- In het onderstaande worden de begrippen materiaalfactor en partiële factor door elkaar gebruikt. Dit is een gevolg van de manier van aanduiden in de achterliggende regelgeving. Voor zover dit betrekking heeft op schuifsterkteparameters, wordt hiermee hetzelfde bedoeld.
- In het onderstaande wordt regelmatig verwezen naar CUR 166 Damwandconstructies. Bij geen verdere vermelding wordt steeds Deel 2 van CUR 166 bedoeld.

B.2 Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies i.c. Addendum

B.2.1 Algemeen

Het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies i.c. Addendum [ref 1], in het vervolg afgekort tot Addendum, bevat de regels waaraan waterkerende grondconstructies moeten voldoen. Het Technisch Rapport is van toepassing voor het vaststellen van de rekenwaarden van de materiaalparameters en de stabiliteitsnorm waaraan moet worden voldaan. Dit is vastgelegd in Deel A van het bijbehorende Addendum. Hieronder worden de belangrijkste onderdelen van de regelgeving betreffende stabiliteit in het Addendum behandeld.

B.2.2 Onzekerheidsfactoren

In het Addendum worden de onzekerheden in de toetsing van een primaire waterkering in rekening gebracht door het meenemen van een aantal factoren. Deze worden hier toegelicht.

Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor (γ_b) is de factor waarmee de stabiliteitsnorm vermenigvuldigd moet worden om onzekerheden in de schematisering van de bodemopbouw en waterspanningen in rekening te brengen. Volgens het Addendum is de schematiseringsfactor gelijk aan 1,30.

Uit onderzoek [ref 14], dat is uitgevoerd na het gereedkomen van het Addendum, is gebleken dat de schematiseringfactor onder voorwaarden verlaagd tot een waarde tussen 1,10 en 1,30 kan worden verlaagd. Dit afhankelijk van de mate waarin geometrie en bodemopbouw van de constructie bekend zijn en de deskundigheid van de betreffende adviseur.

Modelfactor

In de modelfactor (γ_d) zijn onder meer de onzekerheden ten aanzien van het rekenmodel verdisconteerd. Voor EEM wordt aanbevolen om $\gamma_d = 1,0$ aan te houden.

Schadefactor

Het vereiste betrouwbaarheid per dijkvak kan afwijken van het basisbetrouwbaarheidsniveau van $\beta = 4,0$ (1/jaar). Dit wordt gecorrigeerd met een schadefactor. De schadefactor volgt uit:

$$\gamma_n = 1,0 + 0,13 \cdot (\beta_{nodig} - 4,0)$$

Hierin is β_{nodig} de vereiste betrouwbaarheid per dijkvak (1/jaar).

Opmerking: Voor waterkeringen met een relatief grote norm kan β_{nodig} kleiner dan 4,0 zijn. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij boezemkaden en bij bezwijken niet gecorreleerd met hoogwater.

Voor het bovenrivierengebied bij het beschouwen van de binnenwaartse macrostabiliteit een betrouwbaarheidsindex $\beta_{nodig} = 4,60$ worden aangehouden. Dit resulteert in een schadefactor van 1,08.

Voor het benedenrivierengebied (en er wordt aangenomen dat dit ook geldt voor zeedijken en meerdijken) kan voor de te hanteren betrouwbaarheidsindex per dijkvak de volgende benadering uit het Addendum [ref 1] worden gevolgd:

$$\beta_{nodig} = \Phi^{-1}(P_{loc,toel}) \text{ waarin } P_{loc,toel} = \frac{f \cdot norm}{\left(1 + \alpha \frac{L}{l}\right) \cdot P_{f,inst}}$$

waarin:

- β_{nodig} : vereiste betrouwbaarheid voor een dijkvak (1/jaar);
- Φ^{-1} : inverse Gauss kansfunctie;
- $P_{loc,toel}$: toelaatbare kans op instabiliteit in een bepaalde locatie;
- norm : veiligheidsnorm variërend van 1/1250 tot 1/10000 (1/jaar);
- f : 0,10 (-); De toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit = f . norm;
- α : 0,0333; Factor waarmee de correlatie van dijkvakken in rekening wordt gebracht;
- L : totale lengte van de waterkering;
- l : representatieve lengte voor de analyse in een doorsnede (50 m);
- $P_{f,inst}$: 0,10 (-), is kans op falen gegeven instabiliteit niet samenhangend met hoogwater;
- $P_{f,inst}$: 1,0 (-), is kans op falen gegeven instabiliteit wel samenhangend met hoogwater

Partiële factoren

In de materiaalfactor (γ_m) zijn de onzekerheden ten aanzien van de beschrijving van de schuifsterkte verdisconteerd. De partiële factoren in het Addendum gelden voor een basisbetrouwbaarheidsniveau $\beta = 4,0$ (1/jaar). Dit komt overeen met een jaarlijkse faalkans van $3,17 \cdot 10^{-5}$ of 1/31600. De materiaalfactoren worden toegepast voor de karakteristieke waarden van de schuifsterkteparameters.

Opmerking: Volgens het Addendum vindt geen correctie plaats van de materiaalparameters voor het geval dat het vereiste betrouwbaarheidsniveau afwijkt van het basisbetrouwbaarheidsniveau van 4,20. In plaats daarvan vindt via de hierna te behandelen schadefactor een aanpassing plaats van de stabiliteitsnorm waaraan de waterkering moet voldoen.

Stabiliteitsnorm

Het Addendum [ref 1] laat voor wat betreft de bepaling van de stabiliteitsnorm aan duidelijkheid te wensen over. De oorzaak hiervan is dat de formules 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5 en 5.3.6 in het Addendum de suggestie wekken dat de materiaalfactor op de zelfde manier in het systeem van vergelijkingen dat de veiligheid tegen afschuiven bepaald zit als de schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor. Laatstgenoemde factoren zijn echter onafhankelijk van de grondlaagstratificatie, terwijl de materiaalfactoren in principe per grondlaag verschillend zijn en ook nog verschillend voor de effectieve cohesie (c') en inwendige wrijvingshoek (ϕ'), zoals volgt uit tabel 5.3.1 van het Addendum.

Hierdoor is een eenduidige vertaling van de formules 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5 en 5.3.6 in het Addendum naar een stabiliteitsnorm waaraan zou moeten worden voldaan onmogelijk.

Het wordt echter met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid vermoed dat in het Addendum bedoeld wordt, dat de stabiliteitsnorm het product van alleen γ_b , γ_d en γ_n is. En dat in plaats van één materiaalfactor, zoals in de formules 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5 en 5.3.6 (die mede de stabiliteitsnorm zou bepalen), de aanpak in de oude Leidraad Rivieren [ref 16] moet worden toegepast. Dat wil zeggen, het delen van de karakteristieke schuifsterkteparameters door de in tabel 5.3.1 van het Addendum gegeven materiaalfactoren. In dat geval geldt:

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

waarin:

- γ_{mod} : met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor;
- γ_b : schematiseringsfactor;
- γ_d : modelfactor;
- γ_n : schadefactor.

B.3 Leidraad Kunstwerken

B.3.1 Algemeen

De Leidraad Kunstwerken [ref 2] bevat voorschriften die specifiek betrekking hebben op kunstwerken in waterkeringen. Een aantal van deze voorschriften zijn relevant voor met constructieve elementen versterkte waterkeringen.

B.3.2 Vereiste betrouwbaarheid

Faalruimtefactor constructief bezwijken kunstwerk

De faalruimtefactor (ξ), i.c. de kans op constructief bezwijken van een kunstwerk, is volgens de Leidraad Kunstwerken 0,01 keer de normfrequentie.

Levensduurfactor

De levensduurfactor (f_n) volgens de Leidraad Kunstwerken bedraagt 10. Het product van faalruimtefactor en levensduurfactor bedraagt 0,1 en is gelijk aan de factor f (toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit = $f \cdot \text{norm}$) volgens het Addendum [ref 1].

Opmerking: Tijdens het bestuderen van de regelgeving kwam de vraag naar voren of het toeval is dat de Leidraad Kunstwerken een faalruimtefactor van 0,01 en een levensduurfactor van 10 hanteert, terwijl bij dijken zonder constructieve elementen volgens het Addendum een toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit (feitelijk ook een faalruimtefactor) van 0,1 keer de Norm geldt.

Een faalruimtefactor van 0,01 en levensduurfactor van 10 resulteren voor waterkeringen met constructieve elementen namelijk in de zelfde faalruimte als het Addendum, namelijk 0,1 keer norm. Zij het dat deze faalruimte bij waterkeringen met constructieve elementen (Leidraad Kunstwerken) betrekking heeft op een periode van 10 jaar en bij waterkeringen zonder constructieve elementen (Addendum) op een periode van 1 jaar.

Volgens E.O.F. Calle liggen hieraan geen bijzondere overwegingen ten grondslag en zijn in het verleden keuzen gemaakt zonder dat alles goed is uitgezocht.

Lengte-effect

De Leidraad Kunstwerken beveelt op blz. 184 aan om voor constructies langer dan 100 meter de waarde van de vereiste betrouwbaarheidsindex met 10% te verhogen.

Instabiliteit die niet samenhangt met hoogwater

De Leidraad Kunstwerken bevat geen voorschrift voor de bepaling van de betrouwbaarheidsindex voor het geval van instabiliteit die niet samenhangt met hoogwater.

Betrouwbaarheidsniveau

De beschrijving in de Leidraad Kunstwerken aangevuld met het voorschrift in het Addendum voor de kans op falen gegeven een instabiliteit al dan niet samenhangende met hoogwater ($P_{f_{inst}}$) resulteren in de volgende aanpak voor de bepaling van het benodigde betrouwbaarheidsniveau. Deze aanpak is door H.A. Schelhout en H.L. Bakker ontwikkeld ten behoeve van een advies [ref 10].

Aanpak bij laagwatercondities

- Neem 1% van de dijkkringfrequentie en vermenigvuldig dit met een factor 10 om het niet gecorreleerd zijn van MHW en laagwater in rekening te brengen;
- Vermenigvuldig het resultaat met een levensduurfactor $f_N = 10$ om de toelaatbare bezwijkkans voor de levensduur van de constructie in rekening te brengen;
- Het resultaat (1% van 1/10000 maal 10 en nog een keer maal 10 = 1/10000) wordt omgerekend naar een vereiste betrouwbaarheidsindex $\beta_N (-)$;
- Voor normale gebruiksomstandigheden geldt geen lengte-effect.

Aanpak bij hoogwatercondities

- Neem 1% van de dijkkringfrequentie (1/10000 per jaar) en vermenigvuldig dit met een factor 1 om het gecorreleerd zijn van MHW en hoogwater in rekening te brengen;
- Vermenigvuldig het resultaat met een levensduurfactor $f_N = 10$ om de toelaatbare bezwijkkans voor de levensduur van de constructie in rekening te brengen;
- Het resultaat (1% van 1/10000 maal 10 = 1/100000) wordt omgerekend naar een vereiste betrouwbaarheidsindex $\beta_N (-)$;
- De berekende β_N wordt bij een constructie die langer is dan 100 m standaard vermeerderd met 10 % om het lengte-effect in rekening te brengen.

De factor 10 waarmee de dijkkringfrequentie voor laagwatercondities vermenigvuldigd moet worden is de reciproke van de in het Addendum genoemde factor $P_{f_{inst}}$. Als het optreden van instabiliteit samenhangt met hoogwatercondities geldt $P_{f_{inst}} = 1,0$, en als het optreden van instabiliteit niet samenhangt met hoogwatercondities geldt $P_{f_{inst}} = 0,1$.

Schadefactor, modelfactor en schematiseringsfactor

De Leidraad Kunstwerken bevat geen voorschriften voor het bepalen van een schadefactor, modelfactor en schematiseringsfactor ten behoeve van het bepalen van een stabiliteitsnorm.

Stabiliteitsnorm

De Leidraad Kunstwerken bevat geen voorschrift voor het bepalen van een stabiliteitsnorm.

Opmerking

Het wordt verondersteld dat de schadefactor, modelfactor en schematiseringsfactor en de stabiliteitsnorm als functie van deze factoren moeten worden bepaald volgens Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies in combinatie met het Addendum.

Partiële factoren

Voor de partiële factoren van constructies in primaire waterkeringen verwijst de Leidraad Kunstwerken naar de partiële factoren uit de NEN 6700 serie. Echter, als de betrouwbaarheidseis volgens het Addendum strenger is dan volgens de TGB ($\beta_N = 3,60$), dan moeten de partiële factoren uit de NEN 6700-serie worden verhoogd door vermenigvuldiging met een correctiefactor te berekenen met de formule in paragraaf B4.6.1 van [ref 2]:

$$\gamma_{m,corr} = e^{\alpha_R(\beta_N - 3,6)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}}$$

waarin:

- $\gamma_{m,corr}$: correctiefactor op de materiaalfactor;
 α_R : invloedsfactor voor de onzekerheid van de sterkte;
 β_N : betrouwbaarheidsindex voor de referentieperiode (met minimumwaarde van 3,6);
 V_R : variatiecoëfficiënt van de sterkte.

In een aantal uitzonderingen (voor $\beta_N > 3,60$) hoeft de materiaalfactor volgens de Leidraad Kunstwerken niet gecorrigeerd te worden en geldt een ander voorschrift:

1. Maatgevend Hoogwater (MHW);
2. Glijvlakstabiliteit waterkerende grondconstructies;
3. Damwandconstructies;
4. Controle onder- en achterloopsheid.

Uit de in de Leidraad Kunstwerken beschreven toelichtingen op deze uitzonderingen blijkt dat de uitzonderingen hun grondslag vinden in het bestaan van op de uitzondering betrekking hebbende specifieke richtlijnen waarnaar ook wordt verwezen. Zie de toelichting hieronder.

Damwandconstructies

Voor de partiële factoren van de damwandconstructie verwijst de Leidraad Kunstwerken op blz. 202 naar CUR 166: voor de schuifsterkteparameters naar tabel 2.10B van [ref 3] en voor de sterkteparameters van de constructieve elementen naar Deel I, Stap 7.2 op blz. 46 en Hoofdstuk 7 op blz 76 [ref 3]. Hierin worden volgens de Leidraad Kunstwerken al van de NEN afwijkende veiligheidsniveaus en partiële factoren geïntroduceerd.

De in CUR 166 vermelde betrouwbaarheidsindex voor de hoogste veiligheidsklasse heeft een waarde $\beta_N = 4,20$. Indien er een nog hogere betrouwbaarheid dan $\beta_N = 4,20$ moet worden gehaald kan volgens blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken een correctiefactor op de partiële factoren behorende bij de hoogste veiligheidsklasse (Klasse III) worden berekend met de formule in par. B4.6.1 van de Leidraad Kunstwerken, waarbij de drempelwaarde van de betrouwbaarheidsindex $\beta_N = 3,6$ wordt vervangen door de drempelwaarde $\beta_N = 4,2$ volgens CUR 166. De formule komt dan te luiden:

$$\gamma_{m,corr} = e^{\alpha_R(\beta_N - 4,2)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}}$$

Voor de variatiecoëfficiënten van de constructieve elementen kan volgens Leidraad Kunstwerken van $V_R = 0,2$ worden uitgegaan. Voor de variatiecoëfficiënt van de sterkte van staal en beton wordt op blz. 72 van CUR 166 een waarde van $V_R = 0,1$ respectievelijk $V_r = 0,20$ genoemd.

Opmerking: *Het is hier verondersteld dat de verwijzing naar CUR 166 geldt voor zowel de constructieve parameters als de schuifsterkteparameters van de grond waarmee de krachtsverdeling in de constructieve elementen wordt bepaald.*

Stabiliteit waterkerende grondconstructies

Voor de partiële factoren voor de schuifsterkteparameters voor glijvlakberekeningen verwijst blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken naar het Addendum. Volgens de Leidraad Kunstwerken kunnen de hierin vermelde partiële factoren zonder correctie worden toegepast. Dit omdat volgens de Leidraad Kunstwerken in de in het Addendum gegeven ontwerpeis voor de stabiliteit van waterkerende grondconstructies de van de normstelling afgeleide betrouwbaarheidseis reeds is verwerkt.

Opmerking 1: *De vraag kan worden gesteld of de partiële factoren in het Addendum ook gelden voor het toetsen van de stabiliteit in situaties waarin in plaats van bezwijken langs glijvlakken sprake is van bezwijken van grondvolumes zoals actieve en passieve grondwigen.*

Als dat het geval is, dan kunnen de partiële factoren in het Addendum gebruikt worden voor het berekenen van de stabiliteit van met constructieve elementen versterkte waterkeringen en voor het dimensioneren van de constructieve elementen. Deze ruime interpretatie dient een praktisch belang, omdat in EEM berekeningen de geotechnische stabiliteit en de krachtsverdeling in constructieve elementen in één berekeningsgang kunnen worden bepaald.

In veel gevallen treedt daarbij echter wel een geotechnisch bezwijkmechanisme op dat een combinatie is van actieve en passieve grondwigen en glijvlakken. Als voor glijvlakstabiliteit andere partiële factoren gelden dan voor stabiliteit volgens actieve en passieve grondwigen en dimensionering van constructieve elementen, dan zijn er meerdere EEM berekeningen nodig. Dit stuit op grote praktische bezwaren.

Opmerking 2: *Het gestelde in de Leidraad Kunstwerken, dat de in het Addendum gegeven ontwerpeis voor de stabiliteit van waterkerende grondconstructies de van de normstelling afgeleide betrouwbaarheidseis reeds is verwerkt, doelt op de op blz. 11 van het Addendum genoemde schadefactor. Deze is een functie van het vereiste betrouwbaarheidsniveau en is een van de drie in het Addendum voorgeschreven factoren die bepalend zijn voor de Stabiliteitsnorm waaraan de constructie moet voldoen.*

B.3.3 Samenvatting normering volgens de Leidraad Kunstwerken:

Samenvattend komt de regelgeving in de Leidraad Kunstwerken [ref 2] voor het toetsen van met constructieve elementen versterkte waterkeringen op het volgende neer:

Betrouwbaarheidsniveau

- Het betrouwbaarheidsniveau β_N waaraan het grondlichaam van met constructieve elementen versterkte waterkeringen moet voldoen moet worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken;
- Niet volgens de Leidraad Kunstwerken, maar wel volgens het Addendum [ref 1] kan het betrouwbaarheidsniveau voor instabiliteit die samenhangt met MHW met in acht name van een factor voor correlatie met MHW van 1,0 worden bepaald. Het betrouwbaarheids-

niveau voor instabiliteit die niet samenhangt met MHW kan met een factor voor correlatie met MHW van 0,1 in rekening worden gebracht (zie formule 5.3.9 van het Addendum).

Stabiliteit

- Uitgaande van het betrouwbaarheidsniveau dat volgt uit de Leidraad Kunstwerken, eventueel verhoogd met 10 % voor constructies langer dan 100 meter, moet de stabiliteitsnorm worden bepaald volgens het Addendum met in acht name van een schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor;
- De stabiliteitsfactor moet worden bepaald met in acht name van partiële factoren van de grond volgens het Addendum en getoetst aan de hierboven aangegeven stabiliteitsnorm.

Constructieve elementen

- De krachtsverdeling in de constructieve elementen moet worden bepaald met partiële factoren voor de schuifsterkteparameters van de grond volgens Tabel 2.10B van Deel 2 van CUR 166 [ref 3]. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor te berekenen met de formule op blz. 201 in de Leidraad Kunstwerken met drempelwaarde 4,2 en een variatie coëfficiënt voor de grond van 0,20;
- De constructieve elementen moeten worden getoetst met partiële factoren voor het constructiemateriaal volgens CUR 166 – Deel 2. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor te berekenen met de formule op blz. 201 van de Leidraad Kunstwerken met drempelwaarde 4,2 en een variatiecoëfficiënt voor staal van $V_r = 0,1$ en voor beton en hout van $V_r = 0,20$.

Een nadeel van deze aanpak is dat er twee geotechnische berekeningen moeten worden uitgevoerd, namelijk het bepalen van de stabiliteitsfactor met partiële factoren volgens het Addendum en een berekening van de krachtsverdeling in de constructieve elementen met partiële factoren volgens Tabel 2. 10B op blz. 66 in par. 2.4.4 van CUR 166 – Deel 2.

B.4 CUR 166 Damwandconstructies

B.4.1 Deel 1 van CUR 166

Stappenplan ontwerpberekening

Het in hoofdstuk 3 van Deel 1 [ref 3] opgenomen stappenplan is vrijwel volledig toegespitst op klassieke berekeningen met zogenaamde “Ligger op verende bedding” modellen en om die reden beperkt toepasbaar op berekeningen met EEM modellen.

Eindige Elementen Methode

Volgens hoofdstuk 4 van Deel 1 kunnen damwandberekeningen met de EEM volgens Eurocode EC7 worden gedaan met drie ontwerpbenaderingen (OB) namelijk OB1, OB2 en OB3. In CUR 166 wordt uitgegaan van OB3 omdat de andere benaderingen voor de Nederlandse praktijk een trendbreuk zouden inhouden. Er worden vervolgens voor EEM berekeningen van damwandconstructies twee berekeningschema's onderscheiden:

- berekeningschema A: Berekening met rekenwaarden
- berekeningschema B: Berekening met representatieve waarden

EEM berekeningen met rekenwaarden (schema A) lopen vaak vast als gevolg van numerieke problemen. Verder geeft Deel 1 van CUR 166 voor berekeningschema A geen stabiliteitsnorm waaraan moet worden voldaan. Om die reden wordt dit verder niet behandeld.

Met berekeningschema B moet volgens Deel 1 van CUR 166 voor een klasse II constructie aan een veiligheidsfactor (MSF) van 1,15 worden voldaan en voor een klasse III constructie aan een MSF van 1,20. De MSF in PLAXIS volgt uit een sterktereductie berekening.

Voor het toetsen van de inbeddingsdiepte, momenten, dwarskrachten, normaalkrachten en anker / stempelkrachten moet worden uitgegaan van de krachtsverdeling in de constructie na het uitvoeren van de sterktereductie berekening.

Opmerking: In dit voorschrift is geen rekening gehouden met de eisen die volgen uit de regelgeving voor waterkeringen.

Verankeringen

Hoofdstuk 7 van Deel 1 bevat regels voor het toetsen van verankeringen. Een van de belangrijkste regels, zo niet de belangrijkste, betreft de toetsing van de ankerstaaf of -streng:

$$F_{s;A;st;d} \leq \min \left(\frac{F_{r;vloei;rep}}{1,4}; \frac{F_{r;vloei;rep}}{1,0} \right)$$

waarin:

$F_{s;A;st;d}$: rekenwaarde van de ankerbelasting;

$F_{r;br;rep}$: representatieve waarde van de breukkracht van de ankerstaaf of streng;

$F_{r;vloei;rep}$: representatieve waarde van de vloeikracht van de ankerstaaf.

Het komt er op neer dat ankers getoetst moet worden op zowel de breukspanning als, indien aanwezig, de vloeispanning. Voor de breukspanning met een materiaalfactor $\gamma_m = 1,4$ en voor de vloeispanning meet een materiaalfactor $\gamma_m = 1,0$.

Verder bevat het hoofdstuk regels voor groutankers, schroefankers, ankerschotten en paragraven betreffende "Beproevingen" en "Zakkende grond op ankerstangen".

Hoewel dat niet is vermeld, lijkt het dat de regels in dit hoofdstuk ook van toepassing zijn op berekeningen met de EEM. Mits uitgevoerd in overeenstemming met Hoofdstuk 4 van Deel 1 van CUR 166.

Opmerking: Een probleem met de toepassing van deze regels voor constructieve elementen in waterkeringen is, dat Deel 1 van CUR 166 in Hoofdstuk 4 voorschrijft dat met berekeningschema B (representatieve waarden) voor een klasse II constructie voldaan moet worden aan een veiligheidsfactor (MSF) van 1,15 en voor een klasse III constructie aan een veiligheidsfactor MSF van 1,20. Uit het Addendum en de Leidraad Kunstwerken volgt echter dat voor berekeningen met representatieve (of karakteristieke) waarden aan een aanzienlijk zwaardere stabiliteitseis moet worden voldoen. Deze omstandigheid maakt dat de voorschriften in de hoofdstukken 4 en 7 van Deel 1 van CUR 166 niet toepasbaar zijn op met constructieve elementen versterkte waterkeringen.

Kistdam met EEM-Berekening

Het grootste deel van hoofdstuk 8 van Deel 1 [ref 3] heeft betrekking op kistdammen die geen onderdeel zijn van een waterkering en is om die reden niet relevant. Voor zover wel relevant wordt dat hieronder beschreven.

Partiële factoren

Voor kistdammen (Klasse III) worden op blz. 95 van CUR 166 Deel 1 de volgende partiële factoren voorgeschreven voor het bepalen van rekenwaarden van de schuifsterkte van de grond:

Controle van sterkte en stabiliteit van damwanden en ankers:

- cohesie: $\gamma_m = 1,10$
- hoek van inwendige wrijving: $\gamma_m = 1,20$

Controle van de kistdamvulling:

- cohesie: $\gamma_m = 1,10$
- hoek van inwendige wrijving: $\gamma_m = 1,51$

Controle van de totale stabiliteit:

- cohesie: $\gamma_m = 1,60$
- hoek van inwendige wrijving: $\gamma_m = 1,30$

Deze partiële factoren hebben niet specifiek betrekking op kistdammen in waterkeringen.

Opmerking: Zoals aangegeven lopen EEM berekeningen met rekenwaarden in veel gevallen vast. Deze omstandigheid, in combinatie met de al aangegeven zwaardere stabiliteitseis voor waterkeringen, maakt dat dit voorschrift niet direct toepasbaar is op met kistdammen versterkte waterkeringen. Wel kan, indien de stabiliteitsnorm op basis van rekenwaarden (o.b.v. de partiële factoren) bekend is, een indicatie worden bepaald van de stabiliteitsnorm waaraan de constructie op basis van representatieve of gemiddelde waarden zou moeten voldoen.

Een probleem daarbij is dat voor de kistdamvulling andere partiële factoren, en dus ook andere rekenwaarden, gelden dan voor de totaalstabiliteit. Daarnaast kan men zich, nu een EEM berekening van een met kistdam versterkte waterkering niet principieel anders verloopt dan een EEM berekening van een met andere constructieve elementen versterkte waterkering, afvragen of voor kistdammen afwijkende materiaalfactoren en een afwijkende stabiliteitsnorm zouden moeten gelden.

Het lijkt er dan ook op dat aan de in Hoofdstuk 8 van Deel 1 van CUR 166 genoemde partiële factoren voor kistdammen geen groot belang hoeft te worden toegekend.

Definitief ontwerp

De uiterste grenstoestand van de kistdam moet worden getoetst met rekenwaarden voor de schuifsterkte van de grond en de constructieve elementen.

Controle van sterkte en stabiliteit van damwanden en ankers:

- Toets de rekenwaarden van de momenten, normaalkrachten en ankerkrachten aan de rekenwaarde van de sterkte van de damwandplank (of in dit geval stalen buispaal);
- De rekenwaarde van de ankerkracht wordt bepaald door de berekende ankerkracht te vermenigvuldigen met 1,25. Deze waarde moet worden getoetst aan de rekenwaarde van de sterkte van het anker.

Controle van de kistdamvulling:

- De kistdam dient stabiel te zijn bij gereduceerde grondparameters.

Controle van de totale stabiliteit:

- De totale stabiliteit kan bijvoorbeeld met de methode Bishop worden berekend.

Opmerkingen:

a) Dit voorschrift gaat uit van rekenwaarden en is vanwege de kans op vastlopen van EEM berekeningen alleen al om die reden onbruikbaar.

b) Het is niet duidelijk wat bedoeld wordt met "De kistdam dient stabiel te zijn bij gereduceerde grondparameters" en hoeveel gereduceerd die dan zouden moeten zijn. Aan het einde van een sterkereductie-berekening is een grondconstructie per definitie niet stabiel.

c) Het is niet vermeld wat uitgaande van rekenwaarden de stabiliteitsnorm voor de Bishop berekening moet zijn.

Samenvatting en conclusie

Deel I van CUR 166 bevat regels voor het met de EEM berekenen van damwandconstructies. Uit het Addendum en de Leidraad Kunstwerken volgen regels die hier niet mee in overeenstemming zijn of vragen oproepen. Omdat het Addendum en de Leidraad Kunstwerken specifiek zijn bedoeld voor waterkeringen moet hieraan het zwaarste gewicht worden toegekend. Als gevolg daarvan is Deel 1 van CUR 166 slechts beperkt bruikbaar voor het met de EEM berekenen van met constructieve elementen versterkte waterkeringen.

B.4.2 Deel 2 van CUR 166

Veiligheidsniveau

Paragraaf 2.4.2 van Deel 2 [ref 3] onderscheid drie veiligheidsklassen, te weten: Klasse I, Klasse II en Klasse III. Primaire waterkeringen versterkt met constructieve elementen zoals damwanden vallen altijd in Klasse III: grote schade bij falen en/of aanzienlijk persoonlijke veiligheidsrisico's. Voor klasse III geldt:

$$\beta_{\text{grondbreuk}} \approx \beta_{\text{vloei plank}} \approx \beta_{\text{anker}} = 4,50$$

De bijbehorende faalkansen resulteren voor de damwandconstructie als geheel bij Klasse III in een betrouwbaarheidsniveau van $\beta_{\text{constructie}} \approx 4,2$. Dit komt vrijwel overeen met het vereiste veiligheidsniveau van $\beta = 4,27$ voor primaire waterkeringen met een normfrequentie van 1/10000 zoals vastgelegd in de regelgeving voor waterkeringen.

Grote strekking en/of lange referentieperiode

Paragraaf 2.4.7 van Deel 2 bevat op blz. 71 een grafiek waarmee het effect van een grote strekking van de constructie op het vereiste betrouwbaarheidsniveau in rekening kan worden gebracht. De grafiek resulteert echter in een grotere toename van het betrouwbaarheidsniveau dan formule 5.3.9 op blz. 11 van het Addendum [ref 1].

Constructies ontworpen volgens de NEN 6700 serie hebben een referentieperiode van 50 jaar. Voor een referentieperiode van 100 jaar, zoals bij constructies in waterkeringen gewoonlijk het geval is, wordt op blz. 72 voorgeschreven dat het betrouwbaarheidsniveau met circa 0,2 moet worden verhoogd.

Paragraaf 2.4.7 van Deel 2 bevat ook de aan de Leidraad Kunstwerken [ref 2] ontleende formule, waarmee de partiële factoren kunnen worden gecorrigeerd voor het vereiste betrouwbaarheidsniveau. Deze formule luidt:

$$\gamma_{m,corr} = e^{\alpha_R \cdot (\beta_N - \beta_{ref}) \cdot \sqrt{\ln(1+V_R^2)}}$$

waarin

$\gamma_{m,corr}$ = correctiefactor op de materiaalfactor;

α_R = invloedsfactor voor de onzekerheid van de sterkte = 0,8;

β_N = betrouwbaarheidsindex voor de referentieperiode voor de hele constructie;

β_{ref} = Oorspronkelijke waarde van de betrouwbaarheidindex, voor Klasse III $\beta_{ref} = 4,2$;

V_R = Variatiecoëfficiënt van de sterkte. Voor staal $V_r = 0,1$ en voor beton en hout $V_r = 0,2$

Verhoging partiële factoren

Volgens blz. 72 van Deel 2 schrijft de Leidraad Kunstwerken voor dat de correctie van de materiaalfactor betrekking heeft op alle materialen, dat wil zeggen zowel op de grond als op de constructieve elementen.

Opmerking

Dit voorschrift lijkt in strijd met paragraaf B4.6.2 van de Leidraad Kunstwerken, waarin wordt gesteld dat bij damwandconstructies de partiële factoren niet gecorrigeerd hoeven te worden omdat in CUR 166 al van de NEN afwijkende veiligheidsniveaus en corresponderende partiële factoren zijn geïntroduceerd. Hoe dit uitpakt voor respectievelijk de constructieve elementen en het grondlichaam wordt hieronder behandeld.

Constructieve elementen

Als onderbouwing voor het niet voor het betrouwbaarheidsniveau corrigeren van de partiële factoren van damwandconstructies verwijst blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken in ad 3 naar CUR 166, waarin al van de NEN afwijkende veiligheidsniveaus (grafiek lengte-effect, zie paragraaf B.4.2) en een correctieformule voor partiële factoren op blz. 72 zijn geïntroduceerd. Als er een hogere betrouwbaarheid dan 4,2 moet worden gehaald, dan moet volgens de Leidraad Kunstwerken wel worden gecorrigeerd, namelijk volgens de formule in paragraaf B4.6.1 met drempelwaarde 4,2 voor de betrouwbaarheid in plaats van 3,6.

Paragraaf 4.12.2 van CUR 166 schrijft echter voor dat bij damwanden in waterkeringen, die bij falen kunnen leiden tot een falen van de gehele dijk, (altijd) dient te worden gerekend met de betrouwbaarheidsindices uit de Leidraad Kunstwerken.

We hebben dus te maken met een ogenschijnlijke contradictio in terminus; namelijk de Leidraad Kunstwerken die voorschrijft dat voor damwandconstructies in waterkeringen voor betrouwbaarheidsniveaus lager dan 4,2 de partiële factoren voor de grond niet gecorrigeerd hoeven te worden en dat in plaats daarvan de betrouwbaarheidsniveaus en partiële factoren volgens CUR 166 gelden. Terwijl CUR 166 op zijn beurt voorschrijft dat de betrouwbaarheidsindices (maar niet de partiële factoren voor de grond!) die volgen uit de Leidraad Kunstwerken van toepassing zijn.

Dit leidt voor wat betreft de constructieve elementen tot de volgende conclusies:

- Het betrouwbaarheidsniveau (β_N) waaraan constructieve elementen in waterkeringen moeten voldoen, moet altijd worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken. Dit betekent dat de grafiek op blz. 71 van CUR 166 voor het in rekening brengen van het lengte-effect op het benodigde betrouwbaarheidsniveau niet van toepassing is.
- De krachtsverdeling in de constructieve elementen te berekenen met partiële factoren voor de schuifsterkteparameters van de grond volgens Tabel 2.10B in paragraaf 2.4.4 van Deel 2 van CUR 166. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor, die met de formule op blz. 201 in Leidraad Kunstwerken kan worden berekend met drempelwaarde 4,2 en variatie coëfficiënt voor grond van 0,20.
- De constructieve elementen te toetsen met partiële factoren voor het constructiemateriaal volgens CUR 166 – Deel 2. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor te berekenen, die met de formule op blz. 201 van Leidraad Kunstwerken met drempelwaarde 4,2 en variatiecoëfficiënt voor staal van $V_r = 0,1$ en voor beton en hout van $V_r = 0,20$.

Opmerking 1: *Uit het voorschrift in paragraaf 4.12.2 van Deel 2 van CUR 166 blijkt dat bij damwanden in waterkeringen die bij falen kunnen leiden tot een falen van de gehele dijk, (altijd) dient te worden gerekend met de betrouwbaarheidsindices uit de Leidraad Kunstwerken volgt dat de verhoging van het betrouwbaarheidsniveau met ca. 0,20 bij constructies met een referentieperiode van 100 jaar niet van toepassing is op damwanden in waterkeringen.*

Achtergrond hiervan zal zijn dat in de normering volgens de Leidraad Kunstwerken deze verhoging impliciet al in rekening is gebracht.

Opmerking 2: *Het lijkt verdedigbaar om voor het in rekening te brengen lengte-effect in plaats van de in de Leidraad Kunstwerken voorgeschreven werkwijze (verhoging van de vereiste betrouwbaarheid met 10 % voor strekkingen langer dan 100 meter) aan te sluiten bij de manier waarop het lengte-effect in het Addendum in rekening wordt gebracht.*

Dit omdat het Addendum meer onderscheidend is voor wat betreft de in rekening te brengen representatieve lengte (l) voor de analyse in een doorsnede en de totale lengte (L) van de waterkering. Als er geen lengte effect is resulteren het Addendum en de Leidraad Kunstwerken vrijwel in de zelfde betrouwbaarheid, zij het dat de betrouwbaarheid volgens het Addendum strikt genomen betrekking heeft op een periode van 1 jaar en die volgens de Leidraad Kunstwerken op een (referentie)periode van 10 jaar.

Grondlichaam

Par. 4.12.2 van Deel 2 van CUR 166 (blz. 389) schrijft voor dat bij damwanden in primaire waterkeringen die bij falen kunnen leiden tot een falen van de gehele dijk, dient te worden gerekend met de betrouwbaarheidsindices uit de Leidraad Kunstwerken [ref 2]. Tabel 4.11 in Deel 2 van CUR 166 (blz. 389) komt ook overeen met de op blz. 184 van de Leidraad Kunstwerken genoemde normfrequenties. Voor de bijbehorende partiële factoren (van de grond) verwijst CUR 166 (blz. 389) naar De Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken. Het wordt aangenomen dat dit nu mag worden gelezen als “het Addendum van het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies” [ref 1].

De Leidraad Kunstwerken schrijft in B4.6.2 (blz. 201) voor dat de partiële factoren (uit de NEN 6700 serie) voor de glijvlakstabiliteit van waterkerende grondconstructies niet gecorrigeerd hoeven te worden voor het vereiste betrouwbaarheidsniveau. Als onderbouwing hiervoor schrijft de Leidraad Kunstwerken onder ad. 2. (blz. 202) dat voor glijvlakberekeningen van waterkerende grondconstructies zonder correctie gebruik kan worden gemaakt van de partiële factoren uit het Addendum [ref 1]. Dit omdat in de in dit Addendum gegeven ontwerpeis voor de stabiliteit van waterkerende grondconstructies, de van de normstelling afgeleide betrouwbaarheidseis reeds is verwerkt.

Opmerking: *Het wordt vermoed dat de beschrijving onder ad 2. op blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken alleen bedoeld is voor grondconstructies zonder constructieve elementen.*

Hiervoor geldt volgens het Addendum een betrouwbaarheid β_{nodig} per jaar.

Hoewel voor grondconstructies met constructieve elementen een betrouwbaarheid β_N voor een referentieperiode geldt in plaats van een betrouwbaarheid β_{nodig} per jaar lijkt het verantwoord om het gestelde in ad. 2 op blz. 202 van de Leidraad Kunstwerken ook toe te passen op de stabiliteit van grondconstructie met constructieve elementen.

Dit leidt voor wat betreft de stabiliteit van het grondlichaam tot de volgende conclusies:

- Het betrouwbaarheidsniveau β_N waaraan het grondlichaam van met constructieve elementen versterkte waterkeringen moet voldoen moet worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken;
- De stabiliteitsnorm van het grondlichaam waarin de constructieve elementen zich bevinden moet worden bepaald volgens het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies i.c. het Addendum;
- De partiële factoren van de grond ten behoeve van de bepaling van de stabiliteit van het grondlichaam moeten worden bepaald volgens het Addendum

Opmerking 1: Zoals ook al onder “constructieve elementen” is vermeld lijkt het verdedigbaar om in deze aanpak in plaats van de in Leidraad Kunstwerken voorgeschreven bepaling van het lengte effect het voorschrift in het Addendum aan te houden.

Opmerking 2: De hierboven beschreven interpretaties voor de berekening van respectievelijk de constructieve elementen en de stabiliteit van het grondlichaam resulteren er in dat er twee berekeningen moeten worden uitgevoerd.

- 1) Bepaling van de krachtverdeling in de constructieve elementen met partiële factoren voor de grond volgens CUR 166. Eventueel met een correctie voor betrouwbaarheidsniveaus groter dan 4,2;
- 2) Bepaling van de stabiliteitsfactor met partiële factoren volgens het Addendum.

Damwanden in waterkeringen

Veiligheidsbeschouwing

In paragraaf 4.12.2 van Deel 2 [ref 3] wordt aangegeven dat bij damwanden in primaire waterkeringen, die bij falen kunnen leiden tot een falen van de gehele dijk, dient te worden gerekend met de betrouwbaarheidsindices uit de Leidraad Kunstwerken.

De vereiste betrouwbaarheidsindices voor diverse type dijken zijn in Tabel B.1 weergegeven. Bij langgerekte damwandconstructies (> ca. 100 m) moet rekening worden gehouden met hogere betrouwbaarheidsindices. Dit is het zogenaamde lengte-effect.

Tabel B.1: Vereiste betrouwbaarheidsindices voor waterkeringen

Type waterkering	Normfrequentie	Betrouwbaarheidsindex*
Primaire waterkering	1 / 10.000 jaar	$\beta \approx 4,3$ [TAW 2003]
Primaire waterkering	1 / 4.000 jaar	$\beta \approx 4,1$ [TAW 2003]
Primaire waterkering	1 / 2.000 jaar	$\beta \approx 3,9$ [TAW 2003]
Primaire waterkering	1 / 1.250 jaar	$\beta \approx 3,8$ [TAW 2003]
Secundaire waterkering	niet van toepassing	$\beta \approx 3,4$ of $3,6$ [NNI 1991]

*Uitgegaan van faalkansen gelijk aan 10% van de normfrequentie

De bijbehorende partiële factoren zijn gegeven in de “Leidraden voor het ontwerpen van rivierdijken”. Deze Leidraden zijn intussen vervangen door de Leidraad Rivieren en voor wat betreft partiële factoren (partiële factoren) door het Addendum.

Ontwerp

In paragraaf 4.12.3 van Deel 2 wordt een methode beschreven waarmee een toetsnorm volgens de TAW regelgeving kan worden omgerekend naar een toetsnorm voor een EEM berekening. De stabiliteitsberekening met een EEM verloopt anders dan bij het analytisch model. Zo wordt in een analytisch model gerekend met rekenwaarden van de grondparameters, terwijl in een EEM vaak wordt gerekend met representatieve of gemiddelde grondparameters, dit om numerieke instabiliteiten te voorkomen.

Met een zogenaamde sterktereductie-berekening wordt vervolgens de stabiliteitsfactor (veiligheidsfactor) bepaald. Deze stabiliteitsfactor kan echter niet rechtstreeks worden

vergeleken met de toetsnorm. Dit kan worden opgelost door zowel met het analytisch model als met het EEM een referentieberekening te maken voor de dijk zonder damwand en hieraan de toetsnorm te ijken (zie Tabel B.2).

Tabel B.2: Bepaling vereiste veiligheidsfactor voor Eindige Elementen Modellen

	Stabiliteitsfactor analytisch model	Veiligheidsfactor eindige elementenmodel
Dijk zonder damwand	A	B
Dijk met damwand	toetsnorm TAW Leidraden	$C \geq \text{toetsnorm} \times B/A$

hierin is:

- A. Veiligheidsfactor van de waterkering zonder damwand volgens de TAW regels berekend met een analytisch model;
- B. Veiligheidsfactor van de waterkering zonder damwand berekend met een EEM model;
- C. Veiligheidsfactor berekend met een EEM model die de waterkering met damwand moet hebben om aan de TAW regels te voldoen

De berekeningen B en C moeten met de zelfde partiële factoren worden uitgevoerd, waarbij rekening wordt gehouden met de geotechnische en constructieve verschillen die het gevolg zijn van het aanbrengen van de damwand.

B.4.3 Samenvatting van de normering volgens CUR 166

Hoewel de beschrijving in de onderliggende voorschriften sterk uiteenloopt, komt de regelgeving in CUR 166 [ref 3] voor het toetsen van met damwanden versterkte waterkeringen uiteindelijk vrijwel op hetzelfde neer als die in de Leidraad Kunstwerken [ref 2].

Betrouwbaarheidsniveau

- Het betrouwbaarheidsniveau β_N waaraan het grondlichaam van met constructieve elementen versterkte waterkeringen moet voldoen moet worden bepaald volgens de Leidraad Kunstwerken;
- Niet volgens de Leidraad Kunstwerken maar wel volgens het Addendum kan het betrouwbaarheidsniveau voor instabiliteit die samenhangt met MHW worden bepaald met in acht name van een factor voor correlatie met MHW van 1,0 en voor instabiliteit die niet samenhangt met MHW met in acht name van een factor voor correlatie met MHW van 0,1. Zie formule 5.3.9 op blz. 11 van het Addendum [ref 1].

Stabiliteit

- Uitgaande van het betrouwbaarheidsniveau dat volgt uit de Leidraad Kunstwerken (eventueel verhoogd met 10 % voor constructies langer dan 100 meter) moet de stabiliteitsnorm worden bepaald volgens het Addendum met in acht name van een schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor.
- De stabiliteitsfactor moet worden bepaald met in acht name van partiële factoren van de grond volgens het Addendum en getoetst aan de hierboven aangegeven stabiliteitsnorm.
- Bij een EEM-berekening moeten de rekenwaarden van de schuifsterkteparameters en de stabiliteitsnorm worden opgeschaald tot waarden waarmee het mogelijk is om een berekening met aansluitend een sterkereductie-berekening uit te voeren. Volgens

CUR 166 kan dit worden uitgevoerd volgens het schema op blz. 392 in Par. 4.12.2 van CUR 166 – Deel 2.

Constructieve elementen

- De krachtsverdeling in de constructieve elementen moet worden bepaald met partiële factoren voor de schuifsterkteparameters van de grond volgens Tabel 2. 10B op blz. 66 in par. 2.4.4 van CUR 166 – Deel 2. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor te berekenen met de formule op blz. 201 in de Leidraad Kunstwerken met drempelwaarde 4,2 en een variatie coëfficiënt voor de grond van 0,20;
- De constructieve elementen moeten worden getoetst met partiële factoren voor het constructiemateriaal volgens CUR 166 – Deel 2. Voor betrouwbaarheidsniveaus hoger dan 4,2 met in acht name van een correctiefactor te berekenen met de formule op blz. 201 van de Leidraad Kunstwerken met drempelwaarde 4,2 en een variatie coëfficiënt voor staal van $V_r = 0,1$ en voor beton en hout van $V_r = 0,20$.

Het lijkt verdedigbaar om bij de bepaling van het betrouwbaarheidsniveau voor het in rekening te brengen lengte effect in plaats van de in de Leidraad Kunstwerken voorgeschreven verhoging van 10 % voor strekkingen groter dan 100 meter het meer onderscheidende voorschrift in het Addendum aan te houden.

Een nadeel van deze aanpak is dat er twee geotechnische berekeningen moeten worden uitgevoerd, namelijk bepaling van de stabiliteitsfactor met partiële factoren volgens het Addendum en een berekening van de krachtsverdeling in de constructieve elementen met partiële factoren volgens Tabel 2. 10B op blz. 66 in par. 2.4.4 van CUR 166 – Deel 2.

In CUR 166 is geen voorschrift opgenomen voor het toetsen van de constructieve elementen voor het geval dat de stabiliteitsnorm en schuifsterkteparameters zijn opgeschaald.

B.5 Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen

B.5.1 Algemeen

De beschrijving in Hoofdstuk 4 van het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen “Veiligheidsbenadering ten aanzien van ontwerp en toetsing” is voor wat betreft berekeningen met klassieke rekenmodellen een nadere uitwerking van de veiligheidsnormeringen in de Leidraad Kunstwerken [ref 2] en CUR 166 [ref 3]. Afgezien van enkele aannamen betreffende de correlatie tussen bezwijken van grond en constructieve elementen resulteert dit in dezelfde normering als de Leidraad Kunstwerken en CUR 166.

Daarnaast wordt in het Technisch Rapport een probabilistische Niveau 2 methode beschreven om met behulp van PLAXIS van waterkeringen versterkt met constructieve elementen het betrouwbaarheidsniveau te berekenen. De methode kan worden ingezet als een constructie niet door de toetsing komt en het nodig is om op basis van EEM berekeningen een meer geavanceerde probabilistisch berekening uit te voeren. Voor de op te stellen toetsvoorschriften is de methode minder van belang.

B.5.2 Samenvatting normering volgens Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden

Voor wat betreft klassieke rekenmodellen is de normering in het Technisch Rapport vrijwel gelijk aan die in de Leidraad Kunstwerken en CUR 166 Damwandconstructie.

De in het Technisch Rapport beschreven probabilistische methode kan worden ingezet als een constructie niet door de toetsing komt en het nodig is om een meer geavanceerde probabilistisch berekening uit te voeren.

B.6 Voorstel stabiliteitsnormering EEM berekening van waterkeringen

B.6.1 Mogelijke aanpak

Voor de materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm voor EEM berekeningen dienen zich drie mogelijk oplossingen aan. Deze worden hieronder beschreven.

B.6.2 Aanpak a - Materiaalfactoren ongelijk aan 1,0 en stabiliteitsnorm conform Addendum

De eerste aanpak is om de materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm te bepalen in overeenstemming met het Addendum [ref 1] en bij constructies met in acht name van de Leidraad Kunstwerken [ref 2], CUR 166 [ref 3] en het Technische Rapport Kistdammen en Diepwanden [ref 4]).

Dit resulteert in een combinatie van rekenwaarden en een stabiliteitsnorm die meestal in de buurt van bezwijken zal liggen, waardoor het vaak niet mogelijk zal zijn om met succes een EEM berekening en aansluitend een sterktereductie-berekening uit te voeren. De rekenwaarden van de schuifsterkteparameters en de stabiliteitsnorm worden nu vermenigvuldigd met hetzelfde getal, zodanig dat waarden worden verkregen waarmee het wel mogelijk is om met succes een EEM berekening en een sterktereductie-berekening uit te voeren.

Als de sterktereductie-berekening resulteert in een MSF waarde groter dan de stabiliteitsnorm voldoet de constructie aan de richtlijnen. Is dit niet het geval dan moet de constructie worden afgekeurd. Deze aanpak heeft raakvlakken met de aanpak op blz. 392 van CUR 166.

Het voordeel van deze aanpak is dat de constructie, afgezien van mechanica verschillen tussen PLAXIS en klassieke rekenmodellen, in PLAXIS bezwijkt bij dezelfde waarden van de schuifsterkteparameters als in klassieke rekenmodellen, dat de methode eenvoudig is en dat het resultaat qua veiligheid direct vergelijkbaar is met het voorschrift in het Addendum.

Het grote nadeel is dat de berekening wordt uitgevoerd met een combinatie van schuifsterkteparameters die niet overeenkomt met de gemiddeld aanwezige schuifsterkteparameters of de karakteristieke waarden daarvan. Hierdoor kunnen problemen ontstaan met het creëren van een realistische initiële uitgangssituatie en is de methode niet geschikt voor het beoordelen van vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties.

B.6.3 Aanpak b – Materiaalfactoren gelijk aan 1,0 en opschalen stabiliteitsnorm Addendum

De tweede aanpak is om in plaats van rekenwaarden van de schuifsterkteparameters uit te gaan van karakteristieke waarden of gemiddelde waarden en de stabiliteitsnorm waaraan voldaan moet worden op te schalen met het (gewogen) gemiddelde van de verhouding tussen deze karakteristieke waarden of gemiddelde waarden en de rekenwaarden volgens het Addendum [ref 1].

Het voordeel van deze aanpak is dat de berekening wordt uitgevoerd met parameters die representatief zijn voor de in werkelijk gemiddeld ter plaatse aanwezige parameters. Hierdoor kan een goed beeld van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties worden verkregen.

Het nadeel van de aanpak is dat de constructie in PLAXIS bezwijkt bij een andere combinatie van schuifsterkteparameters dan het geval is in klassieke rekenmodellen. Hierdoor kan het in theorie gebeuren dat een constructie die met een klassiek rekenmodel net zou worden goedgekeurd met PLAXIS net wordt afgekeurd en andersom.

Bedacht moet echter worden dat een stabiliteitsfactor zowel volgens een klassiek model als met Plaxis altijd een gemiddelde betrouwbaarheid weergeeft. Bij een meer verfijnde probabilistische berekening zal blijken dat de werkelijke betrouwbaarheid vrijwel altijd groter of kleiner zal zijn dan de gemiddelde betrouwbaarheid.

B.6.4 Aanpak c – Twee sets schuifsterkteparameters

Een derde aanpak, die zou kan worden ingezet als de eerste twee oplossingen niet blijken te voldoen, is een berekening met twee sets parameters en een aangepaste stabiliteitsnorm.

- een set met karakteristieke schuifsterkteparameters en
- een set met 'rekenwaarden' (opgeschaalde karakteristieke waarden).

In dit geval vindt de opschaling plaats met de grootste waarde voor de verhouding tussen de rekenwaarden volgens het Addendum [ref 1] en karakteristieke waarden van de schuifsterkteparameters. De stabiliteitsnorm, waaraan tijdens de sterktereductie-berekening moet worden voldaan, dient met dezelfde verhouding te worden opgeschaald.

In deze methode worden het eigen gewicht van de constructie en de belastingen aangebracht met karakteristieke schuifsterkteparameters. Net voor het begin van de sterktereductie-berekening worden de karakteristieke waarden vervangen door vanuit de rekenwaarden volgens het Addendum opgeschaalde waarden en wordt een daarop aangepaste stabiliteitsnorm bepaald.

Het bepalen van de vanuit de rekenwaarden opgeschaalde parameters en de aangepaste stabiliteitsnorm gaat als volgt:

- Bepaal de rekenwaarden van cohesie (c') en de tangens van de hoek van inwendige wrijving ($\tan \phi'$) door de karakteristieke waarden te delen door de materiaalfactoren volgens het Addendum;
- Vermenigvuldig de rekenwaarden met de grootste van de in de vorige stap gebruikte materiaalfactoren. Dit resulteert in de opgeschaalde parameters;
- Bepaal de stabiliteitsnorm die zou gelden als de berekening zou worden uitgevoerd met rekenwaarden volgens het Addendum;
- Bepaal de stabiliteitsnorm voor de opgeschaalde waarden van c' en $\tan \phi'$ door de in de vorige stap bepaalde stabiliteitsnorm te vermenigvuldigen met de grootste materiaalfactor.

Met de grootste materiaalfactor wordt bedoeld de grootste materiaalfactor van alle grondsoorten die in de constructie voorkomen. Met de opgeschaalde waarden wordt de sterktereductie-berekening uitgevoerd. De op basis van de opgeschaalde parameters gevonden veiligheidsfactor MSF wordt getoetst aan de opgeschaalde stabiliteitsnorm.

Door deze manier van opschalen zijn de parameters in de tweede parameterset altijd minimaal gelijk of groter dan de parameters in de eerste parameterset. Hiermee wordt voorkomen dat tijdens het wisselen van parameterset numerieke onbalans in PLAXIS ontstaat waardoor de berekening kan ontsporen.

Het voordeel van deze methode is dat een goed beeld wordt verkregen van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties én dat de methode op de best denkbare wijze aansluit op het Addendum. Als de constructie in PLAXIS bij exact de opgeschaalde stabiliteitsnorm bezwijkt, zijn de bezwijkwaarden van c' en $\tan \phi'$ namelijk precies gelijk aan de bezwijkwaarden van c' en $\tan \phi'$ bij een berekening met een klassiek rekenmodel en rekenwaarden volgens het Addendum.

Het nadeel van de methode is dat ze bewerklijker is omdat er twee sets parameters nodig zijn waartussen tijdens de berekening moet worden gewisseld. Een ander nadeel is dat als de constructie in PLAXIS bezwijkt bij een andere veiligheidsfactor dan de stabiliteitsnorm, deze veiligheidsfactor niet onmiddellijk vergelijkbaar is met de veiligheidsfactor van een klassiek rekenmodel. Dit komt omdat de sterktereductie-berekening is gestart met een andere combinatie van parameters dan de rekenwaarden volgens het Addendum. Overigens is dit probleem waarschijnlijk grotendeels oplosbaar.

B.6.5 Voorgestelde aanpak

Als aangetoond kan worden dat het verschil tussen de beoogde betrouwbaarheid en de werkelijke betrouwbaarheid bij aanpak b gemiddeld genomen niet groter is dan volgens het Addendum [ref 1] en aanpak a, is aanpak b zonder meer acceptabel.

De motivatie hiervoor is met name de eenvoud van deze aanpak, wat van belang is voor de praktische bruikbaarheid van de veiligheidsfilosofie en het hierop gebaseerde stappenplan. Tevens kan met deze aanpak een goed beeld van de vervormingen onder veel voorkomende belastingsituaties worden verkregen, hetgeen goed aansluit bij de wens om bij primaire waterkeringen ook te toetsen aan de grenstoestand voor vervorming.

Als blijkt dat de afwijking te groot wordt moet de voorkeur worden gegeven aan aanpak c.

C Toelichting II – Veiligheidsfilosofie voor EEM

C.1 Inleiding

In de onderliggende bijlage wordt ingegaan op de bestaande relevante richtlijnen, en dan vooral de veiligheidsfilosofie die daarin voor het toetsen van waterkeringen op macrostabiliteit is opgenomen. Daarbij is de stabiliteitsnorm, waaraan de waterkering moet voldoen, van groot belang.

C.1.1 Bestaande regelgeving

In diverse richtlijnen en handboeken zijn veiligheidsfilosofieën opgenomen voor het berekenen en toetsen van de stabiliteit van waterkerende grondconstructies.

- Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [ref 1];
- Leidraad Kunstwerken [ref 2];
- CUR 166 Handboek damwandconstructies [ref 3];
- Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen [ref 4].

Het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies wordt gebruikt bij het toetsen van de macrostabiliteit van primaire waterkeringen zonder constructieve elementen (zogenaamde groene dijken). De overige genoemde richtlijnen worden gebruikt bij het toetsen van (primaire waterkeringen met) damwanden en aanverwante constructies, zoals kistdammen en diepwanden.

C.1.2 Probleembeschrijving

Voor de veiligheidsnormering van waterkeringen is de belangrijkste richtlijn het Addendum, dat is toegespitst op berekeningen met klassieke rekenmodellen (zoals MStab). Ten opzichte van een berekening met klassieke rekenmodellen is er bij een berekening met EEM echter een aantal mogelijkheden, verschillen en beperkingen waardoor het Addendum niet geschikt is voor het toetsen van de resultaten van EEM berekeningen:

- In MStab wordt met rekenwaarden voor de schuifsterkteparameters gerekend. Deze rekenwaarden worden bepaald door de karakteristieke waarden te delen door een materiaalfactor. Dit resulteert in een set parameters die vaak dicht in de buurt van de bezwijkwaarden liggen. Eindige Elementen Modellen zoals PLAXIS lopen meestal vast bij rekenen met parameters die in de buurt van de bezwijkwaarden liggen. Als gevolg daarvan zijn de materiaalfactoren in het Addendum niet bruikbaar.
- De veiligheidsfilosofie van het Addendum sluit slecht aan bij de veiligheidsfilosofie voor waterkeringen met constructieve elementen. Zo is er om aansluiting te krijgen bij de NEN-regelgeving bij waterkeringen met constructieve elementen veelal sprake van een planperiode van 50 of 100 jaar. Voor het bepalen van het vereiste betrouwbaarheidsniveau wordt deze planperiode vertaald in een referentieperiode van bijvoorbeeld 10 jaar. Bij waterkeringen zonder constructieve elementen is dit echter niet gebruikelijk en gaat men uit van een jaarlijkse betrouwbaarheid.
- Bij waterkeringen met constructieve elementen zijn geavanceerde EEM meestal de enige methode waarmee deze voldoende nauwkeurig kunnen worden berekend. Het bezwijkmechanisme van waterkeringen met constructieve elementen wijkt echter af van het bezwijkmechanisme van waterkeringen zonder constructieve elementen. Zo wordt het bezwijkmechanisme bij constructieve elementen meestal over een groter grondvolume

verdeeld. Hierdoor blijven de rekken kleiner en wordt de schuifsterkte van de grond meestal minder gemobiliseerd dan het geval is als er geen constructieve elementen aanwezig zijn.

- Het gewoonlijk in klassieke rekenmodellen toegepaste Coulombse wrijving model is niet gelijk aan het in PLAXIS toegepaste Mohr-Coulomb model. Bij gelijke waarden van de schuifsterkteparameters resulteert het Mohr-Coulomb model tijdens de sterktereductie-berekening in een lagere stabiliteitsfactor dan M-Stab. Ook kan het bezwijkmechanisme afwijken van dat volgens een klassiek rekenmodel.
- Het maakt verschil of de berekening in PLAXIS gedraineerd of ongedraineerd (beide op basis van gedraineerde sterkteparameters) wordt uitgevoerd. Bij een ongedraineerde berekening moet rekening worden gehouden met waterspanningsgeneratie. In het Mohr-Coulomb model van Plaxis wordt dit niet goed berekend.
- In het Addendum zijn een aantal onduidelijkheden gesignaleerd. Zo is het bijvoorbeeld niet duidelijk hoe voor een uit meerdere grondsoorten bestaande waterkering een stabiliteitsnorm moet worden bepaald.

C.1.3 Doelstelling

Ten behoeve van het SBW-deelproject 'Analyse macrostabiliteit van dijken met EEM' moet een veiligheidsfilosofie voor EEM berekeningen van primaire waterkeringen worden ontwikkeld, waarin met de punten in paragraaf C.1.2 rekening wordt gehouden en die zowel geschikt is voor waterkeringen zonder als met constructieve elementen.

Een belangrijke randvoorwaarde voor de nieuwe veiligheidsfilosofie is dat deze praktisch is, aansluit bij het Addendum en in een gemiddeld genomen gelijk veiligheidsniveau resulteert.

C.2 Stabiliteitsnorm volgens het Addendum

C.2.1 Tekortkomingen

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de bepaling van de stabiliteitsnorm volgens het Addendum [ref 1]. Het Addendum gaat uit van een berekening met klassieke rekenmodellen (methode Bishop) en is toegespitst op waterkeringen zonder constructieve elementen.

De duidelijkheid van het Addendum voor wat betreft de bepaling van de stabiliteitsnorm laat echter veel te wensen over. En wel om de volgende drie redenen:

- In het Addendum wordt de stabiliteitsnorm bepaald als het product van schematiseringsfactor, modelfactor, schadefactor en slechts één materiaalfactor.
- Het Addendum bevat geen voorschrift hoe in het geval van meerdere sterkteparameters met verschillende materiaalfactoren te werk moet worden gegaan.
- Het Addendum spreekt zich niet uit over het feit, dat het bij grote spreidingen van de parameters gewenst kan zijn om uit te gaan van log-normale verdelingen.

De eerste twee punten zijn in strijd met de praktijk en met de in de oude Leidraad voor het Ontwerpen van Rivieren gehanteerde aanpak. Hierin is de stabiliteitsnorm namelijk het product van een schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor en worden rekenwaarden van de sterkteparameters bepaald door de karakteristieke waarden te delen door een van de grondsoort afhankelijke materiaalfactor.

Naar de letter genomen is het Addendum dan ook niet bruikbaar als regelgeving voor de stabiliteit van primaire waterkeringen. Dit wordt door verschillende deskundigen onderkend wat intussen ook heeft geresulteerd in voorstellen om het Addendum te herschrijven. Toch moet het als uitgangspunt dienen voor de regelgeving voor het bepalen van de stabiliteitsnorm voor EEM berekeningen.

Om te voorkomen dat de nieuwe regelgeving dezelfde tekortkomingen krijgt als het Addendum, is het gewenst om het Addendum nader te analyseren en aan te geven hoe deze tekortkomingen kunnen worden opgelost.

Hieronder worden de voorschriften in Hoofdstuk 5.3.5 "Veiligheid tegen afschuiven: stabiliteitsfactoren" in het Addendum nader onder de loupe genomen.

C.2.2 Partiële veiligheidsfactoren

Volgens het Addendum [ref 1] geldt:

$$\gamma_0 = R / S$$

waarin:

γ_0	stabiliteitsfactor op basis van gemiddelde waarden
R	gemiddelde sterkte langs het schuifvlak
S	aandrijvend moment op basis van gemiddelde waarden

In het Addendum worden R en S aangeduid als gemiddelde sterkte en gemiddelde belasting. Hoewel niet expliciet vermeldt, kan worden aangenomen dat dit karakteristieke waarden of respectievelijk de 5%-ondergrens en de 5%-bovengrens van de sterkte en belasting betreft. Ook kan worden aangenomen dat de in het Addendum aangegeven partiële veiligheidsfactoren gelden voor karakteristieke waarden en niet voor gemiddelde waarden.

Overigens kunnen partiële veiligheidsfactoren op basis van karakteristieke waarden en partiële veiligheidsfactoren op basis van gemiddelde waarden eenvoudig in elkaar worden omgerekend.

$$\gamma_d(x) = (1 - \alpha(x) \cdot 1,64 \cdot C_v(x)) \cdot \gamma_\mu(x)$$

$$\gamma_\mu(x) = \frac{\gamma_d(x)}{(1 - \alpha(x) \cdot 1,64 \cdot C_v(x))}$$

waarin:

x	: variabele parameter
$\alpha(x)$: gevoeligheids coëfficiënt van x
$C_v(x)$: variatiecoëfficiënt van x
$\gamma_d(x)$: materiaalfactor toe te passen op karakteristieke waarden
$\gamma_\mu(x)$: materiaalfactor toe te passen op gemiddelde waarden

Volgens het Addendum moet bij een Bishop berekening worden voldaan aan:

$$\gamma_{Bishop} = \frac{R_d}{S_d} \quad \text{met:} \quad R_d = \frac{R}{\gamma_r} \quad \text{en} \quad S_d = \gamma_s \cdot S$$

waarin:

R_d rekenwaarde van het maximaal mobiliseerbaar tegenwerkend moment berekend op basis van rekenwaarden voor de sterkte

S_d rekenwaarde voor het aandrijvende moment

Volgens het Addendum geldt verder:

$$\gamma_s = 1 \quad \text{en} \quad \gamma_r = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n$$

waarin:

γ_b : schematiseringsfactor

γ_d : modelfactor

γ_m : partiële veiligheidsfactor voor het materiaal, ook wel materiaalfactor genoemd

γ_n : schadefactor

γ_s : veiligheidsfactor van de belasting

Uitgaande van de beschrijving in het Addendum volgt dan voor de stabiliteitsfactor γ_{Bishop} :

$$\gamma_{Bishop} = \frac{R_d}{S_d} = \frac{\frac{R}{\gamma_r}}{\gamma_s \cdot S} = \frac{\frac{R}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n}}{\gamma_s \cdot S} = 1$$

De beschrijving in het Addendum komt er dus op neer dat γ_b , γ_d , γ_m en γ_n allemaal in de sterkteparameters worden verdisconteerd en dat met deze “rekenwaarden” een stabiliteitsfactor γ_{Bishop} van 1,0 moet worden gehaald. Dit komt niet overeen met de uit de oude Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken afkomstige en in praktijk gebruikelijk aanpak, waarbij alleen γ_m in de sterkteparameters in rekening wordt gebracht en γ_b , γ_d en γ_n in de stabiliteitsnorm worden verdisconteerd.

Het wordt dan ook verondersteld dat de beschrijving in het Addendum een onjuiste weergave betreft en dat eigenlijk bedoeld wordt dat de stabiliteitsfactor γ_{Bishop} volgt uit:

$$\gamma_{Bishop} = \frac{R_d}{S_d} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n = \frac{\frac{R}{\gamma_s \cdot S}}{\gamma_s \cdot S} = \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

Bij meerdere grondlagen stuit ook deze benadering op problemen omdat de sterkte R in een glijvlak gewoonlijk een combinatie is van meerdere sterkteparameters met verschillende materiaalfactoren. De aanpak in het Addendum zou er op neerkomen dat iedere

sterkteparameter in een andere γ_{Bishop} resulteert waaraan de hele constructie dan zou moeten voldoen. Hieruit volgt dat de paragraaf “Partiële veiligheidsfactoren” in het Addendum aanpassing behoeft.

C.2.3 Schematiseringsfactor

De schematiseringsfactor γ_b volgens het Addendum is bedoeld om uitgaande van een conservatieve inschatting onzekerheden in bodemopbouw en waterspanningen te verdisconteren. Volgens het Addendum is de Schematiseringsfactor: $\gamma_b = 1,3$.

De manier waarop de schematiseringsfactor in de praktijk wordt toegepast is onduidelijk. Enerzijds verneemt men dat rekenwaarden bepaald volgens het Addendum bij EEM berekeningen niet gebruikt kunnen worden omdat deze in de buurt van de bezwijkwaarden liggen. Anderzijds resulteert strikte toepassing van de Schematiseringsfactor volgens het Addendum wel in een stabiliteitsnorm van minimaal 1,30. Dat impliceert rekenwaarden die minimaal een factor 1,30 van de bezwijkwaarden af liggen.

In een EEM berekening kunnen bodemopbouw en waterspanningen meestal beter worden gemodelleerd dan in een Bishop berekening.

Uit na het gereedkomen van het Addendum uitgevoerd onderzoek is gebleken dat de schematiseringsfactor onder voorwaarden kan worden verlaagd tot een waarde tussen 1,10 en 1,30. Dit is afhankelijk van de mate waarin geometrie en bodemopbouw bekend zijn en van de deskundigheid van de betreffende adviseur. Volgens ir. E.O.F. Calle moet voor het verlagen van de schematiseringsfactor een gevoeligheidsanalyse moet worden uitgevoerd.

C.2.4 Materiaalfactor

Volgens het Addendum is de materiaalfactor bedoeld om onzekerheden ten aanzien van de beschrijving van de schuifsterkte te verdisconteren die het gevolg zijn van:

- Grondsoort;
- Beproevingmethode

Bij afschuiving langs een glijvlak, zoals in een Bishop berekening, treden relatief grote schuifrekken op waarbij de schuifsterkte vrijwel volledig wordt gemobiliseerd.

De materiaalfactoren in het Addendum zijn bedoeld voor Bishop berekeningen en zijn van toepassing op schuifsterkteparameters die zijn bepaald uit triaxiaalproeven bij een bepaald vervormingspercentage.

In het Addendum worden de materiaalfactoren gepresenteerd als een tabel waarin voor een basisbetrouwbaarheidsniveau van 4,0 (1/jaar) voor een aantal grondsoorten, afhankelijk van de beproevingsmethode, de materiaalfactor γ_m en een Variatiecoëfficiënt V zijn gegeven.

De materiaalfactoren zijn in hoge mate gerelateerd aan de stabiliteitsnorm.

Hoge materiaalfactoren resulteren in een lage stabiliteitsnorm en andersom.

De materiaalfactoren volgens het Addendum kunnen resulteren in materiaalparameters en een stabiliteitsnorm die in de buurt van bezwijken liggen. In een EEM berekening stuit dit op bezwaren.

C.2.5 Modelfactor

De modelfactor γ_d verdisconteert onder anderen onzekerheden ten aanzien van het rekenmodel. Welke onzekerheden dat zijn wordt in het Addendum niet genoemd, maar verondersteld wordt dat het onzekerheden betreft die betrekking hebben op de mechanica van het rekenmodel.

Bij een juiste modellering beschrijft een EEM model het bezwijkmechanisme beter dan een Bishop model. Daar staat tegenover dat de uitkomst van een EEM berekening gevoeliger is voor een juiste modellering van de spanningen in de grond en van de afmetingen van de elementen. Ook kunnen kleine veranderingen in geometrie of materiaalparameters bij een EEM berekening veel meer invloed hebben dan in een klassiek rekenmodel.

Zowel voor Bishop berekeningen als EEM berekeningen adviseert het Addendum om een modelfactor van 1,0 aan te houden.

Voor wat betreft EEM berekeningen gaat het Addendum echter wel aan enkele aspecten voorbij.

Bij waterkeringen met constructieve elementen zijn er bij bezwijken meestal geen discrete afschuifvlakken maar in plaats daarvan actieve en passieve grondwigen waarin veel kleinere rekken optreden. Door de kleinere rekken wordt, afhankelijk van de grondsoort, de materiaalsterkte bij bezwijken in mindere mate gemobiliseerd dan het geval is zonder constructieve elementen.

Voor een sterkte reductie berekening met Plaxis betekent dit dat bij gelijke schuifsterkteparameters de veiligheidsfactor van een waterkering die is versterkt met constructieve elementen een minder grote veiligheid representeert dan dezelfde veiligheidsfactor voor een waterkering zonder constructieve elementen.

In een EEM berekening wordt de schuifsterkte volgens een ander constitutief model (Mohr Coulomb model) in rekening gebracht dan in een Bishop berekening (Coulombse wrijving). Daardoor zijn bij een overigens gelijk bezwijkmechanisme de resultaten van een EEM berekening niet zonder meer vergelijkbaar met de resultaten van een Bishop berekening.

Het maakt ook verschil of de berekening in een EEM gedraineerd of ongedraineerd op basis van gedraineerde sterkteparameters wordt uitgevoerd. Bij een ongedraineerde berekening moet rekening worden gehouden met waterspanningsgeneratie.

In het Mohr-Coulomb model van Plaxis wordt dit niet goed in rekening gebracht.

C.2.6 Schadefactor

De schadefactor γ_n is bedoeld om het verschil tussen het vereiste betrouwbaarheidsniveau per dijkvak en het basisbetrouwbaarheidsniveau ($\beta = 4,0$) in rekening te brengen. Er geldt:

$$\gamma_n = 1,0 + 0,13 \cdot (\beta - 4,0)$$

Hierin is β het vereiste betrouwbaarheidsniveau per dijkvak.

Voor het Bovenrivierengebied geldt voor de betrouwbaarheidsindex per dijkvak:

$$\beta_{nodig} = 4,0$$

Voor het Benedenrivierengebied geldt voor de betrouwbaarheidsindex per dijkvak:

$$\beta_{nodig} = \Phi^{-1}(P_{loc,toel})$$

waarin:

$$P_{loc,toel} = \frac{f \cdot norm}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{L}{l}\right) \cdot P_{f|inst}}$$

β_{nodig}	:	vereiste betrouwbaarheidsniveau voor een dijkvak (1/jaar)
Φ^{-1}	:	inverse Gauss kansfunctie
$P_{loc,toel}$:	toelaatbare kans op instabiliteit op een bepaalde locatie (1/jaar)
$norm$:	veiligheidsnorm; variërende van 1/500 tot 1/10000 (1/jaar)
f	:	0,1. Toelaatbare kans op overstroming door instabiliteit
α	:	0,033. α verdisconteert 1) het niet substantieel bijdragen van alle dijkvakken in de ring aan de kans op instabiliteit en 2) de aanwezige correlatie tussen de kans op instabiliteit van de afzonderlijke dijkvakken
L	:	totale lengte van de waterkering
l	:	representatieve lengte voor de analyse in een doorsnede (in Addendum 50 m.)
$P_{f inst}$:	kans op falen van de waterkering gegeven een instabiliteit

C.3 Afleiding stabiliteitsnorm EEM

C.3.1 Stappen

Zoals hiervoor is aangegeven stuit de letterlijke toepassing van het Addendum [ref 1] voor wat betreft de daarin opgenomen regels voor het bepalen van materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm in de praktijk op grote bezwaren.

Om de aangegeven problemen op lossen volgt hieronder een in de geest van het Addendum uitgewerkte aanpak om materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm voor EEM berekeningen te bepalen. Om het overzichtelijk te houden wordt het raamwerk stapsgewijs van eenvoudig naar ingewikkeld opgebouwd, waarbij iedere volgende stap voortbouwt op de vorige stap.

De te onderscheiden stappen zijn:

- Bishopberekening voor een constructie met één sterkteparameter, één materiaalfactor γ_m en één belastingfactor γ_s
- Bishopberekening voor een constructie met één sterkteparameter, één materiaalfactor γ_m en verder een schematiseringsfactor γ_b , modelfactor γ_d , schadefactor γ_n en belastingfactor γ_s
- Bishopberekening voor een constructie met meerdere sterkteparameters en materiaalfactoren $\gamma_{m;i}$, schematiseringsfactor γ_b , modelfactor γ_d , schadefactor γ_n en belastingfactor γ_s
- EEM berekening voor een constructie met meerdere sterkteparameters en meerdere materiaalfactoren $\gamma_{m;i}$, schematiseringsfactor γ_b , modelfactor γ_d , schadefactor γ_n en belastingfactor γ_s

C.3.2 Uitwerking stappen

Bishopberekening met één sterkteparameter

Uit het Addendum [ref 1] volgt dat moet worden voldaan aan:

$$\gamma_0 = \frac{R}{S}$$

Hierin zijn R en S de (gemiddelde of karakteristieke) waarden voor de sterkte en de belasting in het schuifvlak. Er geldt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_m \cdot \gamma_s} = \frac{\gamma_m}{S \cdot \gamma_s} = \frac{R_d}{S_d} = \gamma_{\text{mod}} \geq 1,0 \quad \text{waaruit volgt:} \quad \gamma_0 \geq \gamma_m \cdot \gamma_s$$

Hierin zijn γ_m en γ_s de (partiële) factoren voor de materiaalsterkte en de belasting, R_d en S_d de in het stabiliteitsmodel ingevoerde rekenwaarden voor de sterkte en de belasting en γ_{mod} de met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor.

Hoewel dat niet expliciet in het Addendum is vermeld geldt altijd $\frac{R_d}{S_d} = \gamma_{\text{mod}}$.

Voor het geval van één sterkteparameter en verder alleen een partiële factor voor de belasting luidt de stabiliteitseis dus dat voor een rekenwaarde van de sterkte bepaald door delen van een (karakteristieke of gemiddelde) sterkte door een materiaalfactor de stabiliteitsfactor γ_{mod} moet voldoen aan $\gamma_{\text{mod}} \geq 1,0$.

Bishopberekening met één sterkteparameter en verder alle partiële factoren

We breiden het voorgaande uit naar een configuratie waarin niet alleen de partiële factoren voor sterkte en belasting een rol spelen, maar ook de schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor van belang zijn. Uit het Addendum volgt dat dan voldaan moet worden aan:

$$\gamma_0 = \frac{R}{S}$$

Hierin zijn R en S de (gemiddelde of karakteristieke) waarden voor de sterkte en de belasting in het schuifvlak. Er geldt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_m \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s} = \frac{\left(\frac{R}{\gamma_m}\right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{R_d}{S_d} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \gamma_{\text{mod}} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} \geq 1,0$$

waaruit volgt: $\gamma_0 \geq \gamma_m \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s$ en $\gamma_{\text{mod}} \geq \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$

Hierin zijn γ_m , γ_b , γ_d , γ_n en γ_s de (partiële) factoren voor materiaalsterkte, schematisering, model, schade en belasting. R_d en S_d zijn de in het stabiliteits model ingevoerde rekenwaarden voor de sterkte en de belasting. γ_{mod} is de met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor.

Voor het geval van één sterkteparameter en verder alle partiële factoren voor materiaalsterkte, schematisering, schade en belasting luidt de stabiliteitseis dus dat voor een rekenwaarde van de sterkte bepaald door delen van een (karakteristieke of gemiddelde) sterkte door een materiaalfactor de stabiliteitsfactor γ_{mod} moet voldoen aan $\gamma_{\text{mod}} \geq \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$.

Bishopberekening met meerdere sterkteparameters en alle partiële factoren

De volgende stap betreft de uitbreiding van het voorgaande naar een configuratie met meerdere sterkteparameters. De sterkte R in het schuifvlak wordt nu niet bepaald door één sterkteparameter maar door meerdere sterkteparameters, ieder met hun eigen materiaalfactor. De bijdrage van iedere sterkteparameter aan de sterkte wordt bepaald door vooralsnog onbekende gewichtsfactoren w. Er geldt:

$$R = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)$$

waarin:

R_i sterkteparameter i.

w_i gewichtfactor voor de bijdrage van sterkteparameter i

Uit het Addendum volgt dat voldaan moet worden aan:

$$\gamma_0 = \frac{R}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{S}$$

Hierin zijn R en S de (gemiddelde of karakteristieke) waarden voor de sterkte en de belasting in het schuifvlak. Er geldt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_{\bar{m}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s} = \frac{\left(\frac{R}{\gamma_{\bar{m}}}\right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{\bar{m}}}\right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{R_d}{S_d} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n}$$

Hierin is $\gamma_{\bar{m}}$ op te vatten als het gewogen gemiddelde van de in de Bishop berekening toegepaste materiaalfactoren. In de praktijk wordt echter niet gerekend met een voor alle sterkteparameters gelijke materiaalfactor $\gamma_{\bar{m}}$ maar met materiaalfactoren $\gamma_{m,i}$ die afhankelijk zijn van de betreffende sterkteparameter. Er geldt:

$$\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{\bar{m}}}\right) = \sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}\right) \quad \text{waaruit volgt:} \quad \gamma_{\bar{m}} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}\right)}$$

Er volgt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_{\bar{m}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}\right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_{d,i})}{S_d} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \gamma_{\text{mod}} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} \geq 1,0$$

waaruit volgt: $\gamma_0 \geq \gamma_{\bar{m}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s$ en $\gamma_{\text{mod}} \geq \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$

Hierin zijn $\gamma_{m,i}$, γ_b , γ_d , γ_n en γ_s de (partiële) factoren voor de materiaalsterkte, schematisering, model, schade en belasting. $R_{d,i}$ en S_d zijn de in het stabiliteits model ingevoerde rekenwaarden voor de verschillende sterkteparameters en de belasting. γ_{mod} is de met het stabiliteitsmodel berekende stabiliteitsfactor.

Ook in het geval van meerdere sterkteparameters en partiële factoren voor materiaalsterkte, schematisering, schade en belasting luidt de stabiliteitseis dus dat voor rekenwaarden van de sterkte bepaald door delen van de (karakteristieke of gemiddelde) sterkte door materiaalfactoren de met het model berekende stabiliteitsfactor γ_{mod} moet voldoen aan

$$\gamma_{\text{mod}} \geq \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot$$

EEM berekening met meerdere sterkteparameters en alle partiële factoren

In EEM berekeningen kunnen de materiaalfactoren $\gamma_{m,i}$ volgens het Addendum niet worden gebruikt omdat deze resulteren in rekenwaarden die in de buurt van de bezwijkwaarden liggen. Om toch tot een resultaat te komen zal met grotere rekenwaarden gerekend moeten worden dan in een Bishop berekening gebruikelijk is en zal in verband daarmee ook de stabiliteitsnorm aangepast moeten worden. De aangepaste materiaalfactoren $\gamma_{m,i}^{eem}$ kunnen voor alle materiaalparameters verschillend zijn maar er kan ook voor worden gekozen om voor alle materiaalparameters een gelijke waarde van $\gamma_{\bar{m}}^{eem}$ aan te houden.

De hieronder volgende uitwerking is zo opgezet dat voor een willekeurig model materiaalfactoren en een stabiliteitsnorm bepaald kunnen worden.

Uit het Addendum volgt dat voldaan moet worden aan:

$$\gamma_0 = \frac{R}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{S}$$

Hierin zijn R en S de (gemiddelde of karakteristieke) waarden voor de sterkte en de belasting in het schuifvlak. Er geldt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_{\bar{m}}^{eem} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s} = \frac{\left(\frac{R}{\gamma_{\bar{m}}^{eem}} \right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{\bar{m}}^{eem}} \right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{R_d^{eem}}{S_d} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n}$$

Hierin is $\gamma_{\bar{m}}^{eem}$ op te vatten als het gewogen gemiddelde van de in de EEM berekening toegepaste materiaalfactoren en R_d^{eem} als de gegeneraliseerde equivalente rekenwaarde voor de sterkte in het EEM model.

In de praktijk wordt niet gerekend met een voor alle sterkteparameters gelijke materiaalfactor $\gamma_{\bar{m}}^{eem}$ maar met materiaalfactoren $\gamma_{m,i}^{eem}$ die afhankelijk zijn van de sterkteparameters.

Er geldt:

$$\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}} \right) = \sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}} \right) \quad \text{waaruit volgt:} \quad \gamma_{\bar{m}}^{eem} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}} \right)}$$

Er volgt:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_{\bar{m}}^{eem} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}} \right)}{S \cdot \gamma_s} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot R_{d,i}^{eem}}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} \cdot \frac{1}{S_d} = \frac{R_d^{eem}}{S_d} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n} = \gamma_{eem} \cdot \frac{1}{\gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n}$$

De stabiliteitsfactor γ_{eem} uit een EEM berekening zal dus moeten voldoen aan:

$$\gamma_{eem} = \frac{\gamma_0}{\gamma_{\bar{m}}^{eem} \cdot \gamma_s}$$

met $\gamma_0 \geq \gamma_{\bar{m}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s$ (zie hiervoor) volgt voor de stabiliteitsnorm van een EEM berekening:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\gamma_{\bar{m}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n}{\gamma_{\bar{m}}^{eem}}$$

waarin:

$\gamma_{\bar{m}}$ gemiddelde materiaalfactor in een Bishop berekening

$\gamma_{\bar{m}}^{eem}$ gemiddelde materiaalfactor in een EEM berekening

met:

$$\gamma_{\bar{m}}^{eem} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}} \right)} \quad \text{en} \quad \gamma_{\bar{m}} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^n \left(w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}} \right)}$$

(zie hiervoor) volgt dat de stabiliteitsfactor γ_{eem} van een EEM berekening volgt uit:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

Dit is de basisformule voor het bepalen van de stabiliteitsnorm voor een EEM berekening. Voor $\gamma_{m,i}^{eem}$ gelijk aan de materiaalfactoren $\gamma_{m,i}$ volgens het Addendum resulteert de formule in dezelfde stabiliteitsnorm als het Addendum.

C.3.3 Praktische invulling stabiliteitsnorm EEM

Inleiding

In paragraaf C.3.2 is afgeleid dat de stabiliteitsnorm γ_{eem} voor een EEM berekening volgt uit:

$$\gamma_{eem} \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_d \cdot \gamma_n$$

Gesteld wordt:

$$\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}^{eem}}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{R_i}{\gamma_{m,i}}} = \gamma_{mat}$$

γ_{mat} is de opschaaftfactor waarmee de stabiliteitsnorm volgens het Addendum moet worden vermenigvuldigd om de EEM stabiliteitsnorm γ_{eem} te bepalen.

Voor $\gamma_{m,i}^{eem}$ gelijke aan de materiaalfactoren $\gamma_{m,i}$ volgens het Addendum wordt γ_{mat} gelijk aan 1,0 en γ_{eem} gelijk aan de stabiliteitsnorm volgens het Addendum:

In de onderstaande tabel zijn de materiaalfactoren volgens het Addendum [ref 1] gegeven. Hieruit volgt dat de materiaalfactoren volgens het Addendum varieert tussen 1,20 en 1,50.

Grondsoort en parameter			Variatie-coëfficiënt V	γ_m
volumieke massa nat/droog		(ρ)		1.0
klei	(TP-CU-5%)			
	cohesie	(c)	0.45	1.25
	inwendige wrijving	($\tan \varphi$)	0.20	1.25
veen	(TP-CU-5%)			
	cohesie	(c)	0.80	1.50
	inwendige wrijving	($\tan \varphi$)	0.25	1.25
zand	(TP-CD)			
	cohesie	(c)	n.v.t.	n.v.t.
	inwendige wrijving	($\tan \varphi$)	0.15	1.2

TP-CU-5% = triaxiaalproef, geconsolideerd en ongedraineerd, met 2 à 5% vervorming
 TP-CD = triaxiaalproef, geconsolideerd en gedraineerd
 Bij aantoonbaar lagere variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kunnen aangescherpte materiaalfactoren worden afgeleid. Bijvoorbeeld in het geval van natuurlijke niet-organische klei, waarvoor is aangetoond dat de variatiecoëfficiënten voor cohesie en inwendige wrijving kleiner of gelijk zijn aan respectievelijk $V_c \leq 0.275$ en $V_\varphi \leq 0.15$, geldt $\gamma_{m,c} = 1.15$ en $\gamma_{m,\tan \varphi} = 1.15$

In bijlage B is aangegeven dat één van de mogelijke oplossingen is om EEM berekeningen met karakteristieke waarden uit te voeren. In dat geval zijn alle materiaalfactoren $\gamma_{m,i}^{eem}$ gelijk aan 1,0.

Uit de formule volgt dat γ_{mat} afhankelijk van de grondsoorten in het bezwijkmechanisme en hun gewichtsfactoren in theorie een waarde tussen 1,20 en 1,50 zal hebben.

Omdat de gewichtsfactoren niet bekend zijn is het niet mogelijk om γ_{mat} exact te bepalen.

Er moet dus worden gezocht naar een invulling voor γ_{mat} die de juiste waarde zo goed mogelijk benaderd. Daarvoor dienen zich twee basisprincipes aan.

1) Deterministische bepaling van een recept voor γ_{mat}

De deterministische invulling van γ_{mat} betreft een zodanig voorschrift voor de bepaling van γ_{mat} dat het gemiddelde verschil over alle voorkomende constructies tussen de exacte waarde van γ_{mat} en de waarde volgens het recept minimaal is.

2) Probabilistische bepaling van een recept voor γ_{mat}

De probabilistische invulling van γ_{mat} betreft een zodanig voorschrift voor de bepaling van γ_{mat} dat gegeven de verdelingsfuncties ($\mu(R_i)$, $\sigma(R_i)$) van de schuifsterkteparameters het gemiddelde verschil over alle voorkomende constructies tussen de faalkans van de constructie berekend op basis van de opgeschaalde stabiliteitsfactor en de faalkans van de constructie berekend op basis van de stabiliteitsfactor volgens het Addendum minimaal is.

Voorstel opschaaftfactor stabiliteitsnorm EEM bij een grondsoort

Het wordt op basis van sound engineering judgement ingeschat dat het volgende voorschrift de beste oplossing voor de deterministische invulling van de opschaaftfactor stabiliteitsnorm EEM γ_{mat} benaderd.

Waterkeringen waarvan het bezwijkmechanisme zich geheel in zand bevindt: $\gamma_{mat}^{zand} = 1,20$

Bij zanddijken zijn er alleen schuifsterkteparameters $\tan(\varphi'_i)$ waarvan de materiaalfactoren volgens het Addendum gelijk zijn aan 1,20. Uit de formule volgt dat γ_{mat} voor zanddijken dan ook gelijk is aan 1,20.

Waterkeringen waarvan het bezwijkmechanisme zich geheel in klei bevindt: $\gamma_{mat}^{klei} = 1,22$

Bij kleidijken zijn de materiaalfactoren volgens het Addendum: $c = 1,25$ en $\tan(\varphi'_i) = 1,20$.

Het wordt ingeschat dat kleidijken hun sterkte gemiddeld voor 1/3 aan cohesie ontleen en voor 2/3 aan wrijving. Voor het geval van een uit één kleilaag bestaande waterkering en een verhouding tussen de bijdragen van $w_i \cdot C_i$ en $w_i \cdot \tan(\varphi'_i)$ van 0,33:0,67 volgt uit de formule dat γ_{mat} voor kleidijken gelijk is aan 1,22.

Waterkeringen waarvan het bezwijkmechanisme zich geheel in veen bevindt: $\gamma_{mat}^{veen} = 1,36$

Bij veendijken zijn de materiaalfactoren volgens het Addendum: $c' = 1,50$, $\tan(\phi'_i) = 1,25$. Het wordt ingeschat dat veendijken hun sterkte gemiddeld voor de helft aan cohesie ontlenen en voor de helft aan wrijving. Voor het geval van een uit één veenlaag bestaande waterkering en een verhouding tussen de bijdragen van $w_i \cdot C_i$ en $w_i \cdot \tan(\phi'_i)$ van 0,50:0,50 volgt uit de formule dat γ_{mat} voor veendijken gelijk is aan 1,36.

Voorstel opschaalfactor stabiliteitsnorm EEM bij meerdere grondsoorten

Voor het geval van een uit meerdere grondsoorten bestaande waterkering moet $\gamma_{mat}^{constructie}$ met in acht name van de hierboven aangegeven waarden γ_{mat} per grondsoort worden bepaald uit het naar rato van de bijdrage aan de sterkte gewogen gemiddelde van de verschillende grondlagen. De bepaling van $\gamma_{mat}^{constructie}$ kan plaats vinden volgens de volgende formule:

$$\gamma_{mat}^{constructie} = \frac{w_{zand} \cdot R_{zand} + w_{klei} \cdot R_{klei} + w_{veen} \cdot R_{veen}}{\left(\frac{w_{zand} \cdot R_{zand}}{\gamma_{mat}^{zand}} \right) + \left(\frac{w_{klei} \cdot R_{klei}}{\gamma_{mat}^{klei}} \right) + \left(\frac{w_{veen} \cdot R_{veen}}{\gamma_{mat}^{veen}} \right)}$$

Hierin zijn $w_{zand} \cdot R_{zand}$, $w_{klei} \cdot R_{klei}$ en $w_{veen} \cdot R_{veen}$ de bijdragen aan de sterkte in het bezwijkmechanisme van de zand, veen en kleilagen. De bijdragen $w_{zand} \cdot R_{zand}$, $w_{klei} \cdot R_{klei}$ en $w_{veen} \cdot R_{veen}$ moeten oordeelkundig worden bepaald.

Strikt gekomen moet dit plaatsvinden met in acht name van de in respectievelijk de zand, klei en veenlagen aanwezige spanningen en rekken in de grond. Dit resulteert in een zeer complex voorschrift.

Het wordt ingeschat dat voor constructies waarbij de zandlagen zich overwegend beneden de klei en veenlagen bevinden het volgende voorschrift een goede benadering vormt.

- Voor grondconstructies zonder constructieve elementen worden $w_{zand} \cdot R_{zand}$, $w_{klei} \cdot R_{klei}$ en $w_{veen} \cdot R_{veen}$ bepaald naar rato van de verhoudingen van de lengte van de delen van de glijcirkel die zich in respectievelijk de zand, klei en veenlagen bevinden.
- Voor grondconstructies met constructieve elementen worden $w_{zand} \cdot R_{zand}$, $w_{klei} \cdot R_{klei}$ en $w_{veen} \cdot R_{veen}$ bepaald naar rato van de verhoudingen van de oppervlakten in het bezwijkmechanisme die zich in respectievelijk de zand, klei en veenlagen bevinden.

Vanuit de mechanica beschouwd resulteert dit voorschrift in een onderschatting van de bijdragen van de zandlagen aan de sterkte. De waarde γ_{mat}^{zand} is de kleinste van de drie waarden γ_{mat} . Dit leidt tot het oordeel dat het voorschrift conservatief is.

Daar staat tegenover dat bezwijkmechanismes de neiging hebben om de zwakste plaatsen van een constructie op te zoeken én dat de statistische spreiding van de sterkte van klei en veen groter is dan die van zand. Hierdoor is de kans dat het meest waarschijnlijke bezwijkmechanisme zich voor een groter deel in de slappe lagen zal bevinden dan de berekening aangeeft groter dan de kans dat het meest waarschijnlijke bezwijkmechanisme zich voor een groter deel in de zandlagen zal bevinden dan de berekening aangeeft. Dit leidt tot het oordeel dat het voorschrift progressief is.

De grootte van de factoren γ_{mat}^{zand} , γ_{mat}^{klei} , en γ_{mat}^{veen} in aanmerking genomen wordt ingeschat dat de conservatieve en progressieve factoren in de opschaalfactor stabiliteitsnorm EEM elkaar zullen opheffen.