

## Samenvatting

# Nieuwe veiligheidsfactoren voor dijken in de Leidraad Rivieren

In de vorig jaar uitgekomen ENW\*-Leidraad Rivieren, met de bijbehorende Technische Rapporten [1], is een nieuw stelsel van partiële veiligheidsfactoren geïntroduceerd voor de taludstabiliteit van (rivier)dijken. Deze leidraad vervangt de oude TAW\*\*'-Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken, deel 1 uit 1985 (voor het bovenriviergebied, LOR1 [4] en deel 2 uit 1989 (voor het benedenriviergebied, LOR2 [5]). De nieuwe veiligheidsfactoren zijn gepresenteerd in een Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TRWG) [6]. Dit artikel gaat in op de achtergronden en keuzes die gemaakt zijn bij de afleiding van deze factoren. Meer informatie is opgenomen in het nog uit te brengen 'Achtergrondrapport materiaalfactoren rivierdijken' [3].

## Waarom nieuwe materiaalfactoren? Een historische terugblik

Bij het opstellen van de oude leidraad, midden en eind tachtiger jaren van de vorige eeuw, is

het destijds in opkomst zijnde concept van partiële veiligheidsfactoren voor de controle van stabiliteit van het binnentalud van dijken geïntroduceerd. Voor wat betreft het grondmechanisch ontwerpen van dijken zou de leidraad consistente richtlijnen moeten bevatten voor de verschillende rivierregimes. Een belangrijke (door beleidsmatige motieven ingegeven) voorwaarde was echter dat nieuwe richtlijnen niet tot trendbreuk zouden mogen leiden ten opzichte van de tot dan toe heersende ontwerp praktijk, waarin gerekend werd met overall veiligheidsfactoren.

Een complicatie was dat de heersende ontwerp praktijk niet eenduidig was. Nog afgezien van vrije keuzes van de ontwerpers was er een structureel verschil ontstaan tussen de praktijk in het bovenrivierengebied, met relatief stevige ondergrond, en in het benedenrivierengebied met doorgaans een slappe ondergrond. Ook werd geadviseerd op basis van verschillende

In de vorig jaar uitgekomen ENW-Leidraad Rivieren, met de bijbehorende Technische Rapporten is een nieuw stelsel van partiële veiligheidsfactoren geïntroduceerd voor de stabiliteit van het binnentalud van (rivier)dijken. De nieuwe veiligheidsfactoren zijn te vinden in het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TRWG). Deze veiligheidsfactoren, bestaande uit materiaalfactoren, een schematiseringsfactor en schadefactoren, vervangen de materiaal- en schadefactoren in de Leidraad Ontwerpen Rivierdijken, deel 1 en 2. Het systeem van partiële veiligheidsfactoren is ontwikkeld vanuit het adagium 'geen ongewenste trendbreuk'. De uitbreiding van het stelsel van partiële veiligheidsfactoren met een schematiseringsfactor is bedoeld om onzekerheden in de schematisering die samenhangen met de bodemopbouw en waterspanningen expliciet in rekening te brengen.

proeven om de schuifsterkte van grond te meten: de celproef in het westen van het land en de triaxiaalproef elders. De gemeten waarden van de schuifsterkte met de celproef kunnen (aanzienlijk) kleiner zijn dan die met de triaxiaalproef en mede daardoor was de ontwerpbenadering in het benedenrivierengebied conservatiever dan in het bovenrivierengebied. In de tijd dat de leidraad ([4] en [5]) werd opgesteld, werden de verschillen tussen beide proeftypen kleiner ingeschat dan nu. Bovendien bestond over dit verschil destijds weinig consensus.

De opstellers van de leidraad moesten dus schipperen. Enerzijds wilde men een leidraad die 'uniform', of althans consistent van opzet, was voor het boven- en het benedenrivieren gebied, ongeacht de wijze waarop schuifsterkte gemeten wordt. Anderzijds moest trendbreuk in het ontwerp voor beide gebieden vermeden worden. Dit resulteerde in aan te houden materiaalfactoren die voor schuifsterktes op basis van celproeven kleiner zijn dan voor schuifsterktes op basis van triaxiaalproeven. Daar is op zich niets mis mee, deze proeven geven immers verschillen in gemeten schuifsterkte. Echter, de verschillen in materiaalfactoren waren ook in belangrijke mate ingegeven door de eis om trendbreuk te vermijden. Dit leidde ertoe dat de verschillen in voorgeschreven materiaalfactoren voor 'celproef-schuifsterkte' en voor



‘triaxiaalproef-schuifsterkte’ kleiner waren dan op grond van de werkelijke verschillen in proefuitkomsten zou mogen worden verwacht.

Dit bleek ook toen naar aanleiding van het afschaffen van de celproef als uitgangspunt voor advisering, een grote serie vergelijkende proeven is uitgevoerd. Waar de materiaalfactoren in de leidraad suggereren dat die verschillen in de orde van 10 tot 15 procent liggen (afhankelijk van het rekniveau bij de triaxiaalproeven), gaf dit onderzoek aan dat de werkelijke verschillen eerder in de orde van 20 tot 40 procent liggen bij een axiaal rekniveau in de triaxiaalproeven van 2 tot 5 procent. De verschillen zijn nog veel groter als piekwaarden van de schuifsterkte in de triaxiaalproeven worden gehanteerd.

In het TRWG [2] is deze ongerijmdheid in kaart gebracht als ‘grijs gebied’, maar niet nader geduid. Een nadere duiding werd in het vooruitzicht gesteld bij een volgende update van de ontwerp leidraad. Daarom is naar aanleiding van het opstellen van de nieuwe Leidraad Rivieren deze kwestie nader onderzocht.

Verschillende typen onzekerheden en onzekerheidsafdekkingen in één veiligheidsformat Bij het schematiseren voor berekeningen van taludstabiliteit spelen verschillende typen onzekerheden een rol. Zo’n berekening gaat altijd uit van een bepaalde opbouw van de gelaagdheid van de ondergrond, de water(over)spanningen en de grondeigenschappen (o.a. volumegewichten en schuifsterkte parameters) binnen de grondlagen. Geen van alle zijn 100 procent bekende grootheden. Bij het schematiseren moeten dus keuzes gemaakt worden. En omdat we een veilig talud willen, dus met slechts een kleine kans op afschuiven wanneer de dijk een hoge waterstand moet keren, zullen al die keuzes aan de veilige (conservatieve) kant moeten zijn.

Het analytisch beredeneren van verantwoorde keuzes, zonder te veel ‘veiligheid op veiligheid’ te stapelen, kan alleen met behulp van integrale kwantitatieve faalkansanalyses. Die zijn echter pas de laatste decennia enigszins in zicht gekomen. Vroeger, en voor een groot deel ook nu nog, is het veilig (maar niet te veilig) schematiseren een kwestie van ingenieursgevoel en (overgedragen) ervaring. Niettemin is er een ontwikkeling, waarbij delen van het totale proces van schematiseren op basis van ‘engineering judgement’ stapje voor stapje worden vervangen door, of beter gezegd, aangevuld met, probabilistisch/

statistisch beredeneerde procedures.

In het tijdperk vóór de oude leidraad [4] en [5] werd gewerkt met niet expliciet omschreven regels om te schematiseren. We zouden die het beste kunnen karakteriseren als ‘enigszins veilige ‘best guess’ schematiseringen’. Criterium voor voldoende standzekerheid van het talud was dat de berekende stabiliteitsfactor bij deze schematisering groter moest zijn dan 1,3 bij gebruik van celproeven en 1,5 bij gebruik van triaxiaalproeven (bij een rekniveau van 2 à 5 procent). Deze benadering wordt ook wel aangeduid als de overall veiligheidsfactor benadering. De werkwijze wordt overigens, zowel in de nationale zowel als internationale regelgeving, nog steeds als technisch wetenschappelijk acceptabel gezien.

Bij het opstellen van leidraad deel 1 en deel 2 ([4] en [5]) is de keuze gemaakt om over te stappen op het systeem van partiële veiligheidsfactoren, het zogenaamde Load and Resistance Factor Design (LRFD) concept, dat later ook in de geotechnische norm (NEN 6740) en in de Eurocode 7 is geadopteerd. Aan de sterktekant is de uitwerking van het LRFD concept beperkt gebleven tot partiële veiligheidsfactoren voor de schuifsterkte(parameters) van grond. De schematisering van onzekerheden in de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen kwam hierbij niet expliciet in beeld. Door de partiële veiligheidsfactoren voor de schuifsterkte te ijken aan de ‘vroegere’ overall veiligheidsfactor benadering, werd impliciet de afdekking in de onzekerheid voor bodemopbouw en waterspanningen min of meer ‘meegenomen’ in de partiële veiligheidsfactoren voor de schuifsterkte.

Bij de nieuwe Leidraad Rivieren [1] zijn we een stap verder gegaan in de uitwerking van het LRFD concept. De partiële veiligheidsfactoren voor de schuifsterkte dekken nu uitsluitend de onzekerheid van deze grondeigenschap af. De onzekerheid in schematisering van de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen wordt afgedekt door een nieuwe partiële veiligheidsfactor, namelijk de schematiseringsfactor. Ook hierbij is er uiteraard weer voor gewaakt dat dit gemiddeld niet tot ongewenste trendbreuk zou leiden. Als veilige waarde is nu in de Leidraad Rivieren een schematiseringsfactor van 1,3 voorgeschreven. Het voordeel van een aparte schematiseringsfactor is dat een doordachte en op goede informatie berustende schematisering van de ondergrondopbouw en de water(over)spanningen als het ware beloond

kan worden door aanzienlijke reductie van deze schematiseringsfactor. Handreikingen voor zo’n reductie bestaan al wel, maar zijn nog tamelijk abstract; in het achtergrondrapport [3] wordt hier nader op in gegaan. In de komende tijd zal worden gewerkt aan meer concrete recepten op basis waarvan de schematiseringsfactor kan worden gekozen. Tot die tijd wordt door de Helpdesk Waterkeren de benodigde technisch-specialistische ondersteuning geboden. Opgemerkt wordt dat de nieuwe materiaal-, schade- en schematisatiefactoren bij elkaar horen en dus niet los van elkaar gebruikt kunnen worden.

### Materiaalfactoren als functie van het betrouwbaarheidsniveau

Bij de afleiding van de materiaalfactoren is er voor gekozen om vanuit de theoretische onderbouwing materiaalfactoren af te leiden. Materiaalfactoren zijn partiële veiligheidsfactoren. Het begrip partiële veiligheidsfactor komt uit de wereld van de semi-probabilistische ontwerpberekeningsmethoden, de zogenaamde niveau 1 benadering. Materiaalfactoren dienen om onzekerheden in de (schuif)sterkte eigenschappen van het materiaal af te dekken. In algemene vorm geldt:

$$\tilde{\alpha}_R = \frac{R_{kar}}{R_s} = \frac{(1 - 1,65 V_R)}{(1 - \hat{\alpha}_{vereist} \hat{\alpha}_R V_R)} \quad (1a)$$

wanneer uitgegaan wordt van een normaal verdeelde sterkte en

$$\gamma_R = \exp(-(1,65 - \beta_{vereist} \alpha_R) \sqrt{\ln(1 + V_R^2)}) \quad (1b)$$

wanneer uitgegaan wordt van een lognormaal verdeelde sterkte.

Uit de formules (1a) en (1b) blijkt dat materiaalfactoren afhankelijk zijn van een invloedscoëfficiënt  $\alpha_R$ , de variatiecoëfficiënt  $V_R$  van de sterkte en een vereiste betrouwbaarheidsindex  $\beta_{vereist}$ . In het binnenkort te verschijnen ‘Achtergrondrapport materiaalfactoren rivierdijken’ [3] worden onder andere de keuzes beschreven die bij de afleiding van de materiaalfactoren een rol hebben gespeeld. In dit artikel beperken we ons tot de betrouwbaarheidsindex  $\beta$  die afhangt van de vereiste betrouwbaarheid van het beschouwde dwarsprofiel.

Over de uitgangspunten om de vereiste betrouwbaarheid op dijkvakniveau ( $\beta$ ) vast te stellen was en is enige (beleidsmatige) discussie. Met name gaat het om de keuze voor een dijkvak- of dijkkringbenadering (inclusief lengte-effecten). Om de voortgang van het project niet

	Bèta (1/jaar)	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25
<b>Klei</b>								
cohesie (c')	0,45	1,21	1,26	1,31	1,37	1,43	1,49	1,55
inw. wrijving (tan φ')	0,20	1,18	1,21	1,24	1,27	1,30	1,33	1,37
<b>Veen</b>								
cohesie (c')	0,80	1,39	1,49	1,60	1,72	1,84	1,98	2,12
inw. wrijving (tan φ')	0,25	1,23	1,27	1,31	1,35	1,39	1,43	1,47
<b>Klei lage variatiecoëfficiënt</b>								
cohesie (c')	0,275	1,12	1,15	1,18	1,21	1,25	1,28	1,31
inw. wrijving (tan φ')	0,15	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26
<b>Zand</b>								
cohesie (c')	-	-	-	-	-	-	-	-
inw. wrijving (tan φ')	0,15	1,16	1,19	1,21	1,23	1,26	1,28	1,31

**Tabel 1** Materiaalfactoren als functie van de vereiste betrouwbaarheid  $\beta$

hierdoor te laten vertragen is ervoor gekozen de materiaalfactoren te koppelen aan een range van  $\beta$ -waarden, in plaats van dijkkringgebiedskennmerken. Het staat dan de gebruiker vrij om voor een specifiek geval de benodigde betrouwbaarheidsindex te bepalen, rekening houdende met mogelijke beleidsmatige gevoeligheden. Op basis van de Leidraad voor het Ontwerpen van Rivierdijken - deel 2 Benedenrivierengebied (LOR2 [5]) kan een schatting worden gemaakt van de range van betrouwbaarheden voor de stabiliteit van het binnentalud. Volgens deze leidraad ligt de vereiste betrouwbaarheid op dijkvakniveau in de range van  $\beta = 3,8$  tot  $5,2$ . De materiaalfactoren voor deze range zijn weergegeven in *tabel 1*.

De materiaalfactoren in *tabel 1* worden toegepast op karakteristieke (5% ondergrens-) schattingen van de cohesie (c') en van de tangens van de hoek van inwendige wrijving (tan φ'). Bij het bepalen van deze karakteristieke schattingen uit lokaal of regionaal grondonderzoek moet, waar relevant, met de statistische onderlinge afhankelijkheid (correlatie) van deze parameters rekening worden gehouden (waarnemingen van c' en tan φ' worden immers bepaald uit één en dezelfde set van (triaxiaal)proeven. Voor afwijkende variatiecoëfficiënten kunnen 'maatwerk' materiaalfactoren worden afgeleid op basis van receptuur in het achtergrondrapport [3].

### Eén set materiaalfactoren en beta-afhankelijke schadefactoren

De bèta-afhankelijke materiaalfactoren zoals weergegeven in tabel 1, zijn in het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies [6] vervangen door één set materiaalfactoren behorende bij een betrouwbaarheidsindex  $\beta = 4,00$  en bèta-afhankelijke correctiefactoren, de schadefactoren. Dit betekent dat de schadefactor geen partiële veiligheidsfactor is maar een correctiefactor die onlosmakelijk verbonden is met de bijbehorende set materiaalfactoren.

De keuze om de bèta-afhankelijke materiaalfactoren te vervangen door een set bèta-onafhankelijke materiaalfactoren en bèta-afhankelijke schadefactoren komt voort uit de behoefte om aan te sluiten bij de vigerende praktijk. Er zijn geen goede redenen om dit spoor te verlaten. Aansluiten bij de vigerende praktijk biedt logica voor de gebruiker: de materiaalfactoren hangen uitsluitend af van het materiaal en niet van het type waterkering en het beschermde gebied. Bovendien is het voor de adviespraktijk erg praktisch: het volstaat om bij de beoordeling van de stabiliteit één som te maken. De vereiste betrouwbaarheid op dijkvakniveau wordt verwerkt in een differentiatie van de schadefactor. Bij de afleiding van de schadefactor als functie van het vereiste betrouwbaarheidsniveau op dijkvakniveau is aansluiting gezocht bij LOR2 [5]. De schadefactor is bepaald door de schade-

factor volgens de LOR2 te delen door de schadefactor volgens LOR2 bij een betrouwbaarheidsindex  $\beta = 4,00$ . Formule (5.3.8) uit het Addendum bij het TRWG [6] is een linearisatie van dit schadefactorverloop.

Strikt genomen is deze werkwijze onjuist omdat het verloop van de schadefactor een afgeleide zou moeten zijn van het verloop van de bèta-afhankelijke materiaalfactoren. Mede op basis van verschillende cases [3] is geconcludeerd dat het schadefactorverloop uit de LOR2 goed aansluit bij het werkelijke schadefactorverloop op basis van de bèta-afhankelijke materiaalfactoren. Bovendien was het aantal onderzochte cases (5 in totaal) te beperkt om onderbouwd een verbeterd verloop van de correctiefactor vast te stellen.

De oplettende lezer ontdekt nu dat als de correctiefactoren een afgeleide zijn van de bèta-afhankelijke materiaalfactoren deze correctiefactoren kunnen wijzigen indien de grootte van de bèta-afhankelijke materiaalfactoren wijzigt. Opmerkelijk is het dan dat de correctiefactoren voor c' en φ' en ook voor een grote en kleine spreiding hetzelfde zijn. Dit is het gevolg van het feit dat bij de afleiding van de correctiefactoren gebruik is gemaakt van integrale cases uit de praktijk, waar bepaalde combinaties van c' en φ' en spreidingen in opgenomen zijn. De theoretische noodzaak van verschillende sets van correctiefactoren is dus ondervangen door de cases zo te kiezen dat deze een groot deel van het areaal van (rivier)dijken omvatten [3].

Zoals eerder genoemd is in het Addendum bij het TRWG [6] één set materiaalfactoren gegeven behorende bij een betrouwbaarheidsindex  $\beta = 4,00$ . Gemakshalve wordt dit verder het basis betrouwbaarheidsniveau genoemd. Ten opzichte van de materiaalfactoren uit LOR1 en LOR 2 is het basis betrouwbaarheidsniveau zo gekozen dat het aansluit bij de betrouwbaarheidsniveaus van overige normen en richtlijnen. Het basis betrouwbaarheidsniveau komt overeen met  $\beta_N = 3,4$  (referentieperiode N=50 jaar). Dit is ongeveer gelijk aan veiligheidsklasse 2 in NEN6700 en CUR 166, alsmede Reliability Class 1 van de Eurocode [8].

### Lognormale verdelingen

Bij de afleiding van de nieuwe set materiaalfactoren is gebruik gemaakt van de lognormale kansverdeling. Bij gebruik van de normale verdeling en een situatie met grote relatieve spreidingen bestaat de kans dat de berekende karakteristieke waarde negatief wordt, zie



figuur 2. De lognormale verdeling biedt in dit geval uitkomst. Bovendien sluit de lognormale verdeling, zeker bij grote relatieve spreidingen (variatiëcoëfficiënten), aantoonbaar beter aan bij de werkelijke kansverdeling van schuifsterkteparameters [3].

Bij kleine relatieve spreidingen zijn de verschillen tussen benaderingen met normale en lognormale verdeling klein.

Indien de partiële veiligheidsfactoren worden gebaseerd op een lognormale verdeling van de grondparameters is het consistent om ook de karakteristieke schattingen op een lognormale kansverdeling te baseren. Dit zou kunnen betekenen dat de momenteel in gebruik zijnde proevenverzamelingen moeten worden omgevormd naar 'lognormaal'.

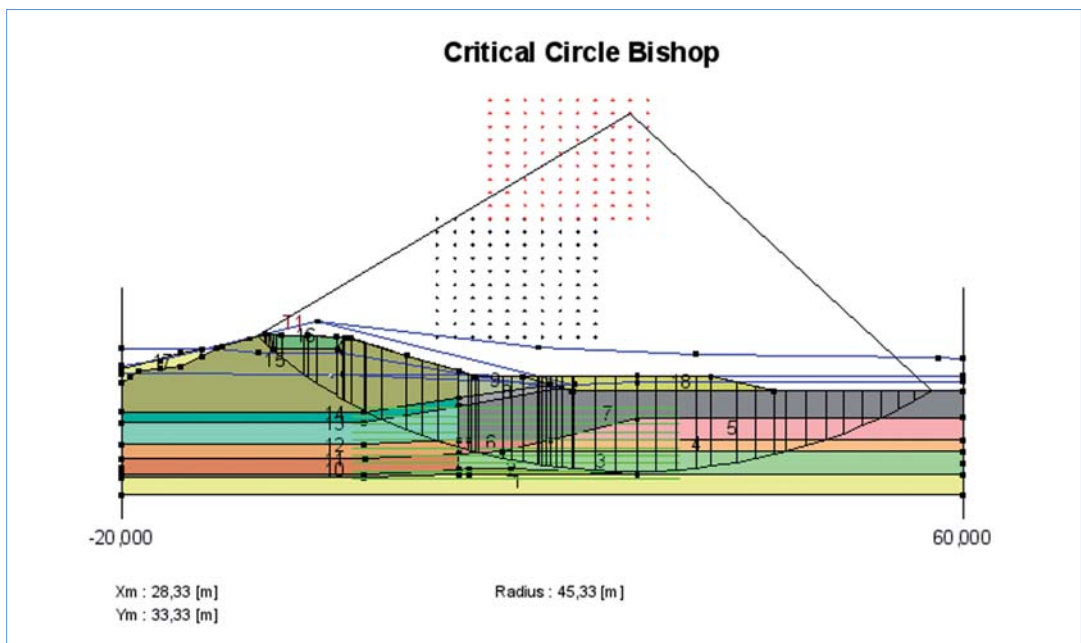
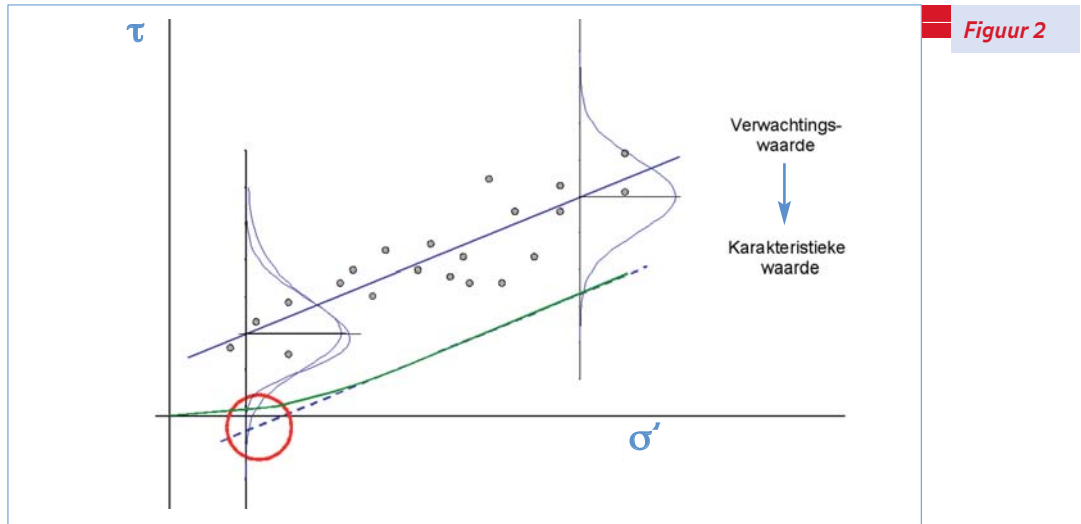
Zoals in 'Statistiek bij regionale proevenverzamelingen, toepassingen' [7] is beschreven zijn de berekende karakteristieke waarden bij gebruik van een lognormale kansverdeling tenminste gelijk of groter dan de karakteristieke waarden behorende bij een normale verdeling. Zolang een 'normale' proevenverzameling, bij de toetsingen volgens het VTV, leidt tot goedkeuren is er niets aan de hand. Pas wanneer dit leidt tot de score 'onvoldoende' bij een gedetailleerde toetsing, is het zaak om nieuwe karakteristieke waarden te berekenen aan de hand van een lognormale verdeling. In zo'n situatie is er uiteraard ook voldoende urgentie.

**Voorbeeld: een dijk in het benedenrivierengebied**

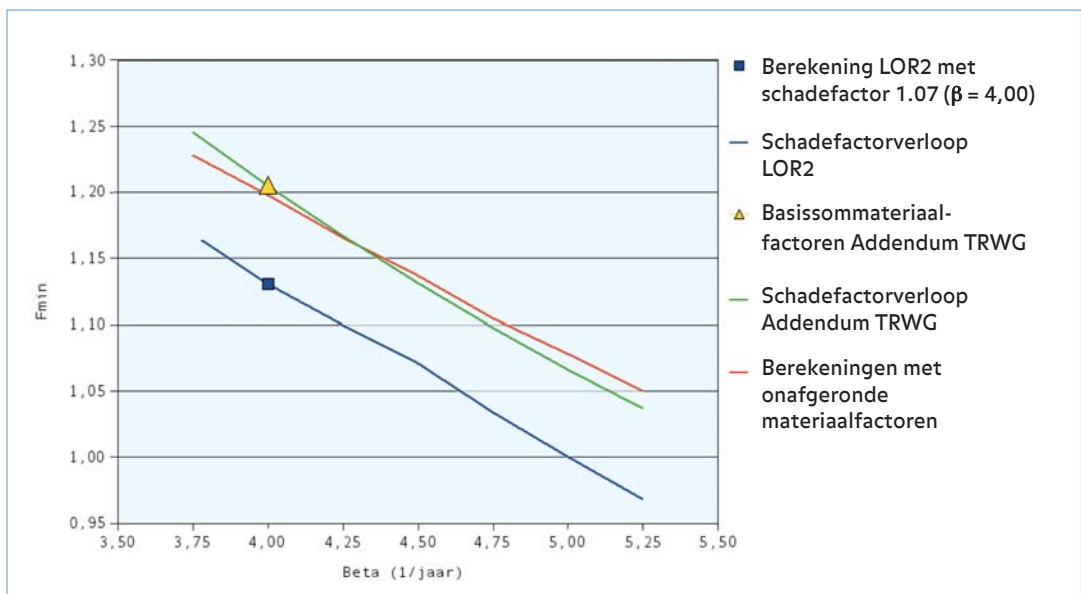
Met het afleiden van een nieuwe set partiële veiligheidsfactoren (materiaal-, schade-, en schematiseringsfactor) rijst de vraag wat het effect zou kunnen zijn op de dagelijkse ontwerp- en adviespraktijk. Aan de hand van een voorbeeld zal mogelijke trendbreuk effecten worden verkend. In het achtergrondrapport Materiaalfactoren rivierdijken [3] worden meer cases behandeld.

Het voorbeeld betreft een dijk in het benedenrivierengebied, zie figuur 3. De karakteristieke waarden voor de schuifsterkteparameters zijn ontleend aan een bestaande proevenverzameling voor dit gebied. De stabiliteitsberekeningen zijn uitgevoerd met de Bishop-methode in MStab en effectieve spanningsanalyse (c'-φ' model). De berekening met rekenwaarden, conform de LOR2, levert een stabiliteitsfactor van 1,21. De resultaten van de overige berekeningen zijn samengevat in figuur 4.

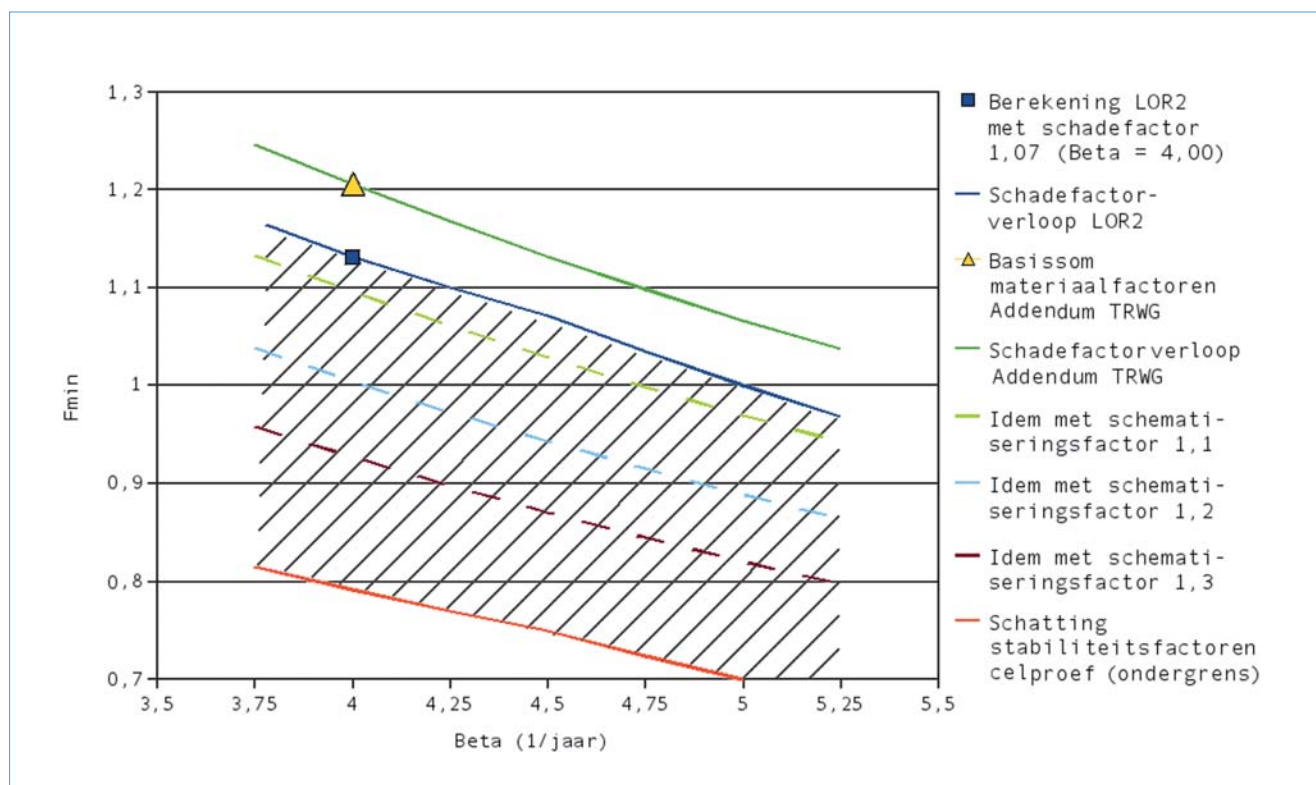
Met een schadefactor 1,07 wordt het betrouwbaarheidsniveau gecorrigeerd naar β = 4,00, de



Figuur 3 Maatgevende glijcirkel van een dijk in het benedenrivierengebied.



Figuur 4 Berekeningsresultaten case Benedenrivierengebied.



**Figuur 5 Grafische voorstelling van het veronderstelde 'grijze gebied' in het TRWG.**

stabiliteitsfactor is dan  $F_{min} = 1,21/1,07 = 1,13$ . Dit is het blauwe vierkantje in de *figuur*.

De blauwe lijn geeft het verloop van de stabiliteitsfactor weer als de schade factoren worden gehanteerd conform LOR2.

Indien de materiaalfactoren uit het Addendum bij het TRWG worden gebruikt, wordt in dit specifieke geval een 7% hogere stabiliteitsfactor gevonden. Dit beeld komt bij de overige cases overigens ook terug.

De afwijking tussen het gelineariseerde schade factor verloop (groene lijn) en het 'werkelijke' schade factor verloop (rode lijn, gebaseerd op de onafgeronde materiaalfactoren in tabel 1) is klein. De rode lijn loopt evenwijdig met het schade factor verloop van LOR2 (blauwe lijn), dit betekent dat het schade factor verloop in het Addendum [6] niet afwijkt van het oude schade factor verloop uit de LOR2 [5].

De berekeningen zijn alle uitgevoerd met karakteristieke waarden uit de proevenverzameling. Deze zijn gebaseerd op de aanname van normaliteit. Zouden we voor de berekeningen met de nieuwe materiaal- en schade factoren de karakteristieke waarden hebben herberekend op basis van de aanname van lognormaliteit, dan zouden de rode en groene lijn iets naar boven verschuiven. Dus in werkelijkheid zijn de nieuwe uitkomsten nog iets gunstiger. Het combineren van de nieuwe materiaal- en schade factoren met 'oude' karakteristieke waarden is een veilige

benadering, die zonnodig nog iets geoptimaliseerd kan worden.

### Het grijze gebied

In het TRWG [2] is een 'grijs gebied' genoemd, enerzijds begrensd door de vroegere werkwijze met celproefresultaten en anderzijds door de werkwijze met triaxiaalproefresultaten bij bezwijken. Dit verschil tussen celproeven en triaxiaalproeven is maximaal indien de bezwijk schuifsterkte parameters van de triaxiaalproef worden gebruikt. Indien de schuifsterkteparameters zijn bepaald bij een kleinere vervorming, zal dit verschil kleiner zijn. Wat is nu het effect van de nieuwe materiaalfactoren die zijn gepresenteerd in het Addendum? Zal voldaan worden aan het uitgangspunt dat de set partiële veiligheidsfactoren in het Addendum binnen een verondersteld 'grijs gebied' passen?

In *figuur 5* is een schatting gemaakt van het grijze gebied op basis van de hierboven beschreven case in het benedenrivierengebied. De grootte van het grijze gebied is bepaald met als uitgangspunt dat een stabiliteitsberekening op basis van een celproef een 30% lager resultaat geeft dan dezelfde berekening op basis van de triaxiaalproef. Overigens is dit percentage een arbitraire keuze op basis van het onderzoek naar 'fitfactoren'.

*Figuur 4* en *5* laten zien dat een berekening met de materiaalfactoren volgens het Addendum een grotere stabiliteitsfactor oplevert dan een

berekening met de materiaalfactoren uit LOR2. Binnen het stelsel van partiële factoren is de veiligheidsbeschouwing echter nog niet compleet, de schematiseringsfactor ontbreekt.

Met de schematiseringsfactor verschuift de lijn binnen het grijze gebied. Met een schematiseringsfactor van 1,1 komt de uitkomst van deze case zelfs dicht bij de veiligheidsbeschouwing volgens de 'oude' Leidraad LOR2 [5].

De schematiseringsfactor wordt vooralsnog op 1,3 gesteld. Onder voorwaarden is het mogelijk om de schematiseringsfactor te reduceren naar 1,1. Deze reductie is onder meer afhankelijk van de intensiteit van het grondonderzoek, de complexiteit van de ondergrond en de 'gevoeligheid' van de som.

### Mogelijkheden tot aanscherping

De set materiaal-, schade en schematiseringsfactoren zijn afgeleid om toepasbaar te zijn voor het areaal aan rivierdijken in Nederland. Dit impliceert dat voor specifieke (ontwerp)geval len een mogelijkheid bestaat tot aanscherping van deze set.

Ten eerste is het logisch om bij het ontwerp te rekenen met de lognormale verdeling. Indien de spreidingen van de beschikbare proevenverzameling significant lager zijn dan de variatiecoëfficiënten genoemd in *tabel 1*, is het zinvol om aangescherpte materiaalfactoren af te leiden.

Door aanvullend onderzoek of gevoeligheidsberekeningen kan men meer vertrouwen verkrijgen in de gehanteerde schematisering van het bodemprofiel en waterspanningen. Indien de indruk bestaat dat de gehanteerde schematisering voldoende veilig is voor de variatie in de bodemopbouw en waterspanningen, kan, onder voorwaarden, een gereduceerde schematiseringsfactor worden gebruikt. Hierbij dient te worden aangetoond dat de kans afwijkingen ten opzichte van de gehanteerde schematisering voldoende klein is. Opgemerkt wordt dat een stappenplan tot aanscherping van de schematiseringsfactor nog zal worden ontwikkeld. Tot die tijd wordt door de Helpdesk Waterkeren de benodigde technisch-specialistische ondersteuning geboden.

## Conclusies

Met het uitbrengen van het Addendum bij het TRWG zijn nieuwe partiële veiligheidsfactoren beschikbaar gekomen voor het ontwerpen van rivierdijken. Deze veiligheidsfactoren, bestaande uit materiaalfactoren, een schematiseringsfactor en schadefactoren, vervangen de materiaal- en schadefactoren in de Leidraad Ontwerpen Rivierdijken, deel 1 en 2. Het systeem van partiële veiligheidsfactoren is ontwikkeld vanuit het adagium 'geen ongewenste trendbreuk'.

Bij het gebruik van de partiële veiligheidsfactoren in het Addendum zijn de volgende punten van belang:

- De set materiaalfactoren is afgeleid voor grondeigenschappen uit triaxiaalproefresultaten bij 2 à 5% vervorming. Deze materiaalfactoren dekken, met een veilige marge, de onzekerheden die horen bij de variatie in sterkte eigenschappen van het materiaal.
- De materiaalfactoren zijn afgeleid bij een betrouwbaarheidsniveau van  $\beta = 4,00$ . Andere betrouwbaarheidsniveaus worden bereikt door differentiatie in de eis van de stabiliteitsfactor. Dit komt tot uiting in de schadefactor.
- De set materiaalfactoren is gemiddeld consistent met de nieuwe Eurocode. Net zoals deze set maakt de Eurocode onderscheid naar het betrouwbaarheidsniveau  $\beta$ , maar er is (nog) geen differentiatie naar grondsoort.
- Ten opzichte van de oude Leidraad Ontwerpen Rivierdijken (LOR1 en LOR2) is de differentiatie tussen de materiaalfactoren voor klei en veen groter. Dit volgt uit de

grotere variatie in sterkte eigenschappen van veen. Gemiddeld zijn de 'nieuwe' materiaalfactoren circa 5% lager dan de materiaalfactoren uit LOR1 en LOR2.

- De set materiaalfactoren maakt geen onderscheid tussen spanningsonafhankelijke en spanningsafhankelijke benadering, zoals die in LOR2 wel werd benoemd. De materiaalfactoren gelden bij het gebruik van het bezwijkcriterium volgens het Mohr-Coulomb model ( $c' - \varphi'$  model).
- Het stelsel van partiële veiligheidsfactoren is uitgebreid met een schematiseringsfactor om onzekerheden in de schematisering die samenhangen met de bodemopbouw en waterspanningen expliciet in rekening te brengen. De schematiseringsfactor wordt voorsnog op 1,3 gesteld. Onder voorwaarden is het mogelijk om de schematiseringsfactor te reduceren. Hierbij kan door de Helpdesk Waterkeren de benodigde technisch-specialistische ondersteuning worden geboden.
- De nieuwe materiaalfactoren mogen gecombineerd worden met karakteristieke waarden uit proevenverzameling die nog gebaseerd zijn op de aanname van normaliteit. Zonodig is enige optimalisatie mogelijk door deze karakteristieke waarden te herberekenen op basis van lognormaliteit. ■

\* ENW is het Expertise Netwerk Waterveiligheid, dat in juni 2006 is opgericht, als opvolger van de TAW.

\*\* TAW was de Technische Adviescommissie Waterkeren, opgeheven in juni 2006.

**Reacties op dit artikel kunnen tot 29 augustus 2008 naar de uitgever worden gestuurd.**

## Literatuur

- [1] Leidraad Rivieren, april 2007, *Expertise Netwerk Waterveiligheid*, Delft. Bij deze leidraad horen de volgende ENW-Technische Rapporten: *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen*, *Technisch Rapport Ruimtelijke Kwaliteit* en *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*. De laatste was al in 2001 uitgebracht en in 2007, i.h.k.v. de nieuwe leidraad, voorzien van een Addendum. Zie [www.enwinfo.nl](http://www.enwinfo.nl)
- [2] *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen*, juni 2001.
- [3] *Achtergrondrapport Materiaalfactoren Rivierdijken, Achtergronden bij materiaalfactoren uit het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*, Rijkswaterstaat, nog uit te brengen.
- [4] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 - Bovenrivierengebied*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 's Gravenhage, september 1985.
- [5] *Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 - Benedenrivierengebied*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 's Gravenhage, september 1989.
- [6] *Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat en Expertisecentrum Netwerk Waterkeren, juli 2007.
- [7] *Statistiek bij Regionale Proevenverzamelingen, toepassingen*, E.O.F. Calle, Geotechniek, januari 2008.
- [8] *Eurocode 7: Geotechnisch Ontwerp (deel 1) en Nationale Bijlage*. NEN-EN 1997-1:2005 en NB:2006 Ontw. En. Uitgave NEN.ICS codes 91.080.01 en 93.020.