

Memo

Aan
H. van Hemert

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
15 november 2012	1206046-005-GEO-0002-gbh	9
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Raymond van der Meij	+31 (0)88 33 57 538	raymond.vandermeij@deltares.nl

Onderwerp
Modelkeuze voor analyse macrostabiliteit van kades bij droogte

1 Achtergrond

In de droge zomer van 2003 heeft de kadeafschuiving bij Wilnis ons doen inzien dat langdurige droogte een aanleiding kan zijn voor het bezwijken van een kade. Bij een lichte kade zoals een verdroogde veenkade, is met name de horizontale component van het evenwicht van de kade in het geding. De toetsmethodiek van de kades hield tot die tijd nog geen rekening hiermee.

Na de betreffende kadeafschuiving moet volgens de leidraden het horizontale evenwicht van lichte kades separaat getoetst worden. Dit gebeurt aan de hand van een eenvoudige methodiek volgens Van Baars zoals beschreven in [Stowa 2007]. Veel kades worden hierdoor afgekeurd terwijl het gevoel leeft dat dit lang niet altijd terecht is.

Dit memo inventariseert een aantal beschikbare methodes om de stabiliteit tijdens droogte te analyseren en oordeelt vervolgens welke methode het best toegepast kan worden.

2 Modellen voor analyse droogteproblematiek bij waterkeringen

De methode Bishop is de referentiemethodiek voor het berekenen van de macrostabiliteit van een grondlichaam. In [Bishop 1955] stelt de auteur dat bij een homogene ondergrond en onder hydrostatische waterspanningen het afschuifvlak cirkelvormig zal zijn en dat in dat geval geen rigoureuze evenwichtsbeschouwing noodzakelijk is. Een rigoureuze evenwichtsbeschouwing voldoet zowel aan het horizontale-, verticale- als het momentenevenwicht. Bij de beschouwing van de krachtenveelhoek van een lamel bij Bishop is dan ook te zien dat deze niet sluit (zie later Figuur 3.1), maar dat er in horizontale richting een stuk ontbreekt. Wegens de vermeend relatief kleine invloed en de eenvoud van de rekenmethode is Bishop internationaal erkend en wordt veelvuldig toegepast.

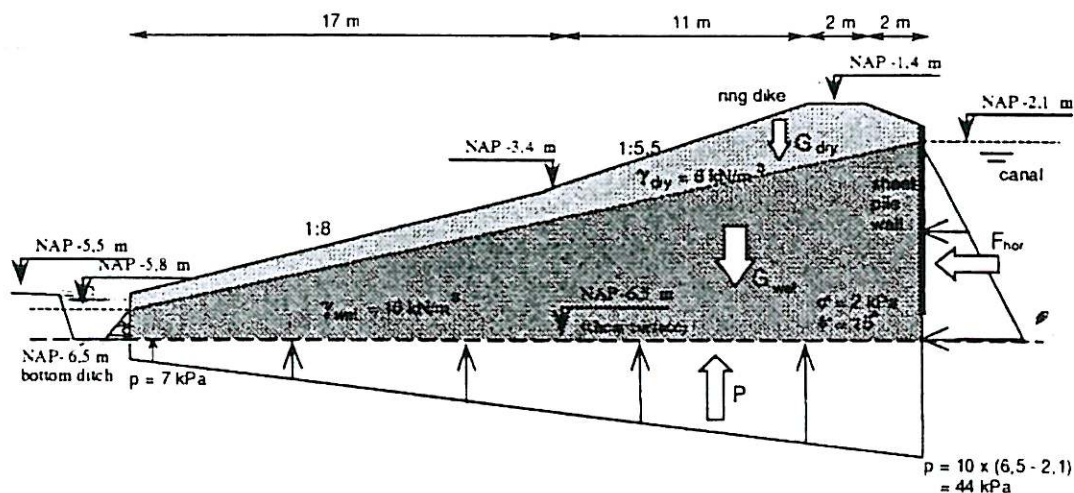
Bij niet-hydrostatische waterspanningen, in een gelaagde ondergrond of wanneer het (gebrek aan) horizontale evenwicht een rol speelt, voldoet Bishop niet goed. In 1984 is in Streefkerk een dijk afgeschoven volgens een niet-cirkelvormig glijvlak. Dit werd veroorzaakt door niet-hydrostatische waterspanningen en een niet-homogene bodemopbouw. Bij de afschuiving bij Wilnis in 2003 was het gebrek aan horizontaal evenwicht de reden dat de Bishopanalyse niet voldeed.

Om deze tekortkoming van Bishop af te vangen, zijn er speciale modellen ontwikkeld die naast Bishop toegepast moeten worden in het geval van niet-hydrostatische waterspanningen (Lift-Van [Van 2001]) en een vermoeden van een gebrek aan horizontaal evenwicht (Van Baars [Stowa 2007]). Deze beschouwingen dienen volgens de leidraden separaat plaats te vinden naast de Bishopanalyse. Dit hoofdstuk presenteert in detail een aantal modellen die, in tegenstelling tot Bishop, het horizontale evenwicht expliciet in beschouwing nemen.

Een cirkelvormige afschuiving is het enige glijvlak dat mogelijk is zonder in de grondmoot plastische vervormingen te veroorzaken. Niet cirkelvormige glijvlakken zoals Van Baars, Lift-Van en Spencer-Van der Meij hebben hierdoor in de praktijk wat meer sterkte dan dat blijkt uit de evenwichtsbeschouwing. Deze verborgen veiligheid is niet meegenomen maar zou in de toekomst verwerkt kunnen worden in de modelfactor.

2.1 Methode Van Baars

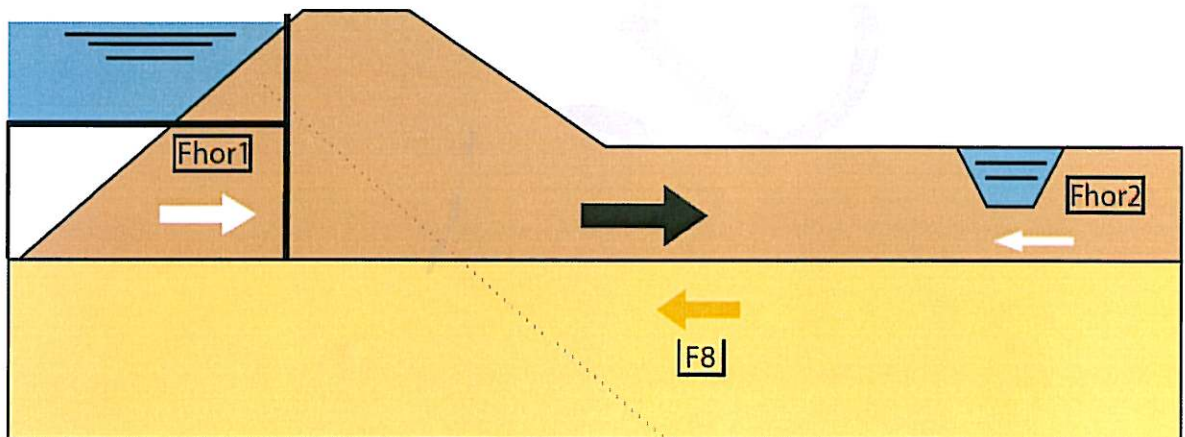
De methode Van Baars beschouwt uitsluitend het horizontale evenwicht langs twee verticale grenzen en boven een horizontaal niveau, zie Figuur 2.1



Figuur 2.1 Horizontaal evenwicht volgens Van Baars

De horizontale kracht (F_{hor} in kN/m) gaat uit van hydraulische groundbreuk. Deze kracht wordt uitgeoefend door het boezemwater en drukt tegen de kade. De kade reageert hierop met een weerstandbiedende kracht (F_s in kN/m) oftewel de wrijvingskracht onderaan de grondmoot. Tevens biedt de waterdruk aan de passieve kant van de afschuiving een weerstandbiedende kracht. Voor de berekening van de evenwichtsfactor kan de kade in twee gedeelten geschematiseerd worden om een droog en nat gedeelte te representeren daar deze een verschillend volumiek gewicht hebben. De berekende veiligheidsfactor is het quotiënt van de aandrijvende en de weerstandbiedende krachten.

Deze methode Van Baars is overgenomen in de Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen. De horizontale krachten behorende bij deze methodiek staan getekend in Figuur 2.2 en zijn in principe hetzelfde als in Figuur 2.1.



Figuur 2.2 Horizontaal evenwicht volgens de Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen

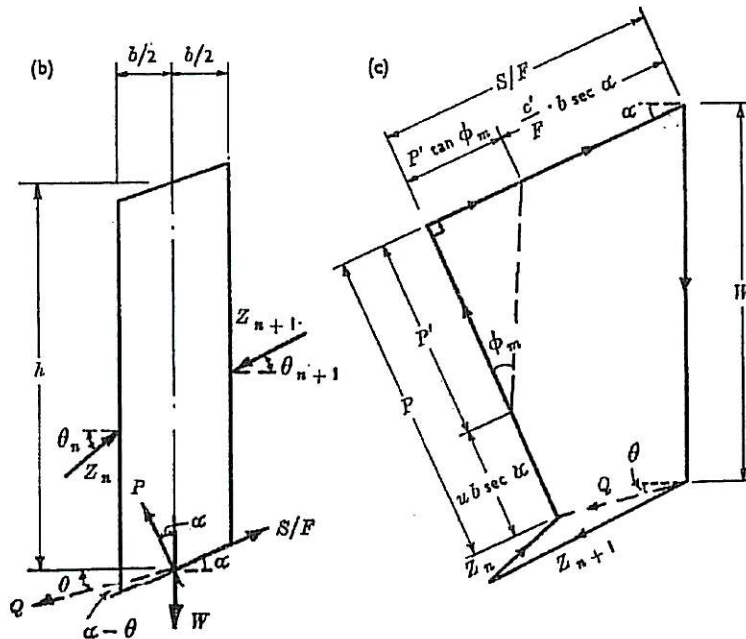
2.2 Horizontal balance (DGeoStability)

De methode "Horizontal Balance" zoals geïmplementeerd in DGeoStability is qua krachtenbeschouwing gelijk aan de methode Van Baars en volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid van regionale waterkeringen. De numerieke oplossing wordt bepaald door de grondmoot in een aantal lamellen op te delen en de in paragraaf 2.1 gepresenteerde methode op de som van alle individuele lamellen toe te passen. Dit staat een meer complexe geometrie van de kade toe en vereenvoudigt het rekenen met niet lineair verlopende freatische lijnen en verschillende materialen in de kade en ondergrond.

2.3 Methode Spencer

In 1967 heeft E. Spencer een publicatie geschreven [Spencer 1967] betreffende een evenwichtsbeschouwing van een grondlichaam. Deze evenwichtsbeschouwing is evenals Bishop algemeen geaccepteerd en in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid is deze methode geaccordeerd voor het toetsen van waterkeringen. Spencer's evenwichtsbeschouwing wijkt op twee punten af van Bishop. Spencer geeft een rigoureuze oplossing (voldoet aan horizontaal-, verticaal- én momentenevenwicht) en is niet gebonden aan cirkelvormige glijvlakken.

Ook Spencer gaat uit van een glijvlak dat opgedeeld wordt in lamellen. Aan de linkerkant van Figuur 2.3 is te zien dat alle krachten op een lamel beschouwd worden in de evenwichtsbeschouwing. Dit in tegenstelling tot Bishop waar de interlamelkrachten (Z_n en Z_{n+1}) niet onder een hoek staan én niet voldoen aan de evenwichtsvoorwaarde. Aan de rechterkant is de sluitende krachtenveelhoek te zien. Wanneer deze krachtenveelhoek bij Bishop getekend wordt, zal deze niet sluiten in horizontale richting.



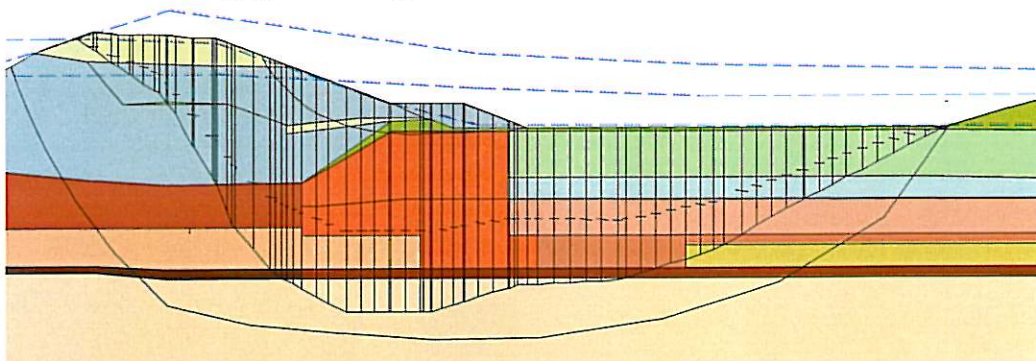
Figuur 2.3 Krachten op een lamel (links) en de sluitende krachtenveelhoek bij Spencer

Spencer kan de evenwichtsfactor berekenen langs eenzelfde blokvormige afschuiving als de methode Van Baars. In de volgende paragraaf wordt een methodiek besproken die niet gebonden is aan een dergelijke rechthoekige vorm.

2.4 Methode Spencer-Van der Meij

De methode Spencer kan een afschuiving langs ieder ingetekend glijvlak berekenen. Traditioneel worden bij een Bishopanalyse cirkelvormige glijvlakken uitgerekend via een middelpunten grid en een set tangentiën waarna de maatgevende gepresenteerd wordt. Omdat Spencer niet gebonden is aan cirkelvormige glijvlakken, is dit geen logische optie. Een efficiënte methodiek om het maatgevende afschuifvlak te vinden is de methode Spencer-Van der Meij. Deze methodiek zoekt langs een vrij glijvlak de evenwichtsfactor van de representatieve grondmoot. Oftewel, het afschuifvlak met de laagste evenwichtsfactor.

In deze methodiek wordt gezocht door middel van een genetisch algoritme. Het vlak is niet gebonden aan een vooraf gedefinieerde vorm zoals een cirkel of een drukstaaf. Het vrije glijvlak beschrijft de weg van de minste weerstand. Een voorbeeld van een dergelijk glijvlak is ter illustratie weergegeven in Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Afschuiving langs een vrij glijvlak met de methode Spencer-Van der Meij

2.5 Eindige Elementen Methode (EEM)

Een eindige-elementenanalyse is evenals Spencer-Van der Meij een rigoureuze beschouwing die niet vooraf gebonden is aan een bepaald vorm glijvlak. In dit kader is het een goede methode om de stabiliteit tijdens droogte uit te rekenen. In de praktijk zijn er echter twee problemen.

Tijdens droogte is er opdrijven aan de polderzijde vanwege vermeende hydraulische grondbreuk. Bij opdrijven zijn er praktisch geen effectieve spanningen. In dit geval zal een kleine belasting leiden tot zeer grote vervormingen. Het is lastig voor de EEM-berekening om een evenwichtssituatie te vinden waardoor de berekening lastig convergeert tot een correct antwoord.

Daarnaast hebben droge veenkades vaak een wiskundig erg lage evenwichtsfactor. Toetswaardes kunnen lager dan 1,0 zijn. Een EEM-modellering kan nooit tot lagere veiligheidsfactoren dan 1,0 leiden omdat er dan wiskundig geen evenwicht is. De sterkte-eigenschappen en toetswaarde zullen met een factor verhoogd moeten worden om überhaupt te kunnen rekenen.

In geavanceerde gevallen is het mogelijk om een EEM-analyse te maken. Dit is echter relatief complex en blijft daarom buiten de scope van dit memo.

3 Modellen en de veiligheidsfilosofie

3.1 Het vinden van het juiste afschuifvlak

Het wiskundige model wordt gebruikt ter bepaling van de evenwichtsfactor, maar er moet vervolgens gezocht worden welk afschuifvlak maatgevend is. Hiervoor is een zoekprocedure nodig.

Bij de methode Van Baars zoals geprogrammeerd in DGeoStability (horizontal balance) moeten de linker en rechter rand opgegeven worden door de gebruiker. Hiervoor worden meestal de boezem en de teensloot gekozen. De diepte van het afschuifvlak kan handmatig opgegeven worden, of er kan een boven- en ondergrens opgegeven worden in combinatie met een aantal stappen waarin van deze boven- naar ondergrens gegaan wordt.

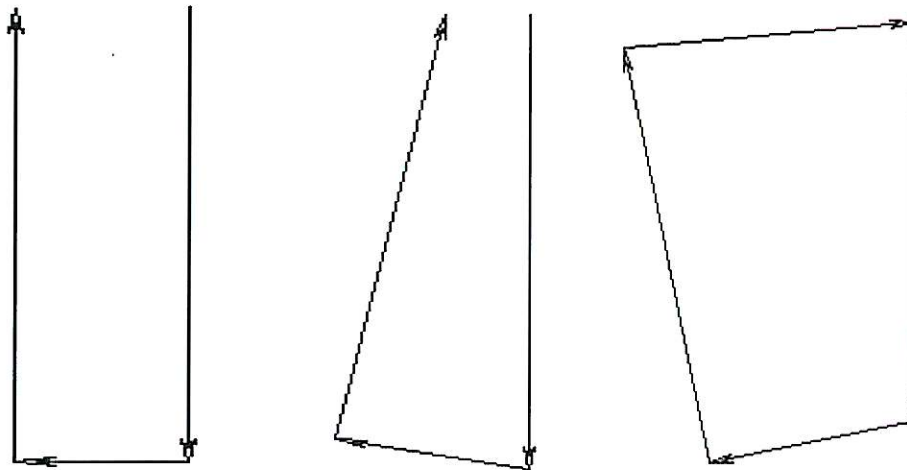
De gebruiker moet alert zijn bij het berekenen van de evenwichtsfactor met deze methode. Om te beginnen is het vaak niet maatgevend wanneer het intredepunt bij de boezem, en het uittredepunt bij de teensloot gekozen wordt. Significant lagere evenwichtsfactoren kunnen gevonden worden wanneer het glijvlak wat ingekort wordt. De gebruiker moet handmatig zoeken en vervolgens kiezen wanneer het glijvlak nog representatief is voor een droogteberekening. Daarnaast is de diepte van het glijvlak ook niet triviaal. Het is belangrijk dat de laagscheidingen exact horizontaal geschematiseerd worden én dat exact ter hoogte van alle mogelijk representatieve laagscheidingen een berekening gemaakt wordt. Een kleine afwijking (<1cm) kan zeer grote gevolgen hebben voor de berekende evenwichtsfactor.

Bij de methode Spencer is het vinden van de maatgevende situatie door het doorrekenen van alle mogelijke situaties niet haalbaar. Er zijn oneindig veel glijvlakken in een bepaald zoekgebied. Een cirkel is terug te brengen tot drie vrijheidsgraden (middelpunt van de cirkel – x, y – en de straal maar voor een vrij glijvlak moeten minstens 10 punten vrij in de ruimte kunnen bewegen om de vorm goed te kunnen beschrijven. De combinatie van mogelijkheden

neemt hierdoor exponentieel toe. In het verleden werd de methode Spencer eigenlijk alleen gebruikt langs vooraf gedefinieerde glijvlakken. Met de implementatie van de methode Spencer-Van der Meij is het mogelijk om ook met de het model Spencer het maatgevende glijvlak te vinden.

3.2 Kwaliteit van de evenwichtsbeschouwing

De kwaliteit van de verschillende stabiliteitsmodellen kan goed gepresenteerd worden aan de hand van de krachtenveelhoeken op een lamel. Figuur 3.1 toont de krachtenveelhoek op ongeveer dezelfde lamel bij een Horizontal Balance berekening (links), een Bishop analyse (midden) en een Spencer berekening (rechts)



Figuur 3.1 Krachtenveelhoek Horizontal Balance (links), Bishop (midden) en Spencer (rechts)

De pijl loodrecht naar beneden representeert altijd het eigen gewicht van de lamel. De pijl die daarop aansluit is de schuifkracht aan de onderkant van de lamel. Deze pijl heeft dezelfde richting als de onderhoek van de lamel. De volgende pijl staat onder een hoek van 90 graden op de schuifkracht omdat het de normaalkracht op hetzelfde vlak is. Alleen Spencer heeft een vierde pijl, dat is de resultante van de interlamelkrachten.

De kwaliteit van de modellen neemt in Figuur 3.1 toe van links naar rechts. In het eerste model zitten alleen horizontale en verticale krachten, bij Bishop is er een afwijking in horizontale richting en Spencer toont een rigoureuze oplossing. Het verschil in kwaliteit van de modellen heeft invloed op de betrouwbaarheid van de uitkomst van een analyse. Omdat slechtere modellen een meer onzeker rekenresultaat opleveren worden deze bestraft met een hogere modelfactor. De gangbare praktijk omtrent modelfactoren wordt uiteengezet in de volgende alinea.

3.3 Modelfactoren

Niet ieder model presteert even goed. Om in de veiligheidsbeschouwing de kwaliteit van het model in acht te nemen, wordt de berekende veiligheidsfactor gedeeld door een factor afhankelijk van de kwaliteit van een model. Een goed model heeft een lagere modelfactor. Zo wordt de gebruiker beloond voor het correct toepassen van een complex maar precies model.

Een semi-probabilistische veiligheidsbeschouwing vindt plaats aan de hand van partiële veiligheidsfactoren. Eén van deze partiële factoren houdt verband met het gebruikte model.

Deze factor staat daarom ook bekend als de modelfactor en wordt vaak afgekort met het symbool γ_d . In het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TRWG) is deze modelfactor geïntroduceerd. Het Technisch Rapport Macrostabiteit (in ontwikkeling) toont de meest actuele inzichten met betrekking tot deze modelfactor. In dit rapport wordt gedifferentieerd naar al dan niet opdrijven omdat het invloed heeft op het 3D effect. De totale rekenmodelfactor is het product van de onzekerheden in het rekenmodel en het 3D-effect. De modelfactoren gelden voor een effectieve spanningsanalyse.

De vetgedrukte vakken in Tabel 3.1 zijn relevant voor de analyse van veenkades onder droge omstandigheden. Omdat de precisie van een Spencer berekening theoretisch hoger is dan een Horizontal Balance analyse mag hiervoor een significant lagere modelfactor toegepast worden.

Opdrijven	Rekenmodel	Onzekerheden rekenmodel: γ_{d1}	3D-effect: γ_{d2}	Totale rekenmodelfactor γ_d
nee	Bishop	1.10	0.90	1.00
	Uplift-Van	1.05	0.90	0.95
	EEM- Mohr Coulomb	1.10 bij 'fine-tuning' 1.05	0.90	1.00 Bij 'fine-tuning' 0.95
	Spencer-Van der Meij	1.05	0.90	0.95
Ja	Bishop	1.10	1.00	1.10
	Uplift-Van	1.05	1.00	1.05
	EEM- Mohr Coulomb	1.05 bij 'fine-tuning' 1,00*	1.00	1.05 bij 'fine-tuning' 1,00*
	Horizontal balance	1,20*	1,00	1,20
	Spencer-Van der Meij	1.05	1.00	1.05

Tabel 3.1 Modelfactoren voor de algemeen toegepaste modellen (TR Macrostabiteit i.o.)

De rekenmodelfactor voor zowel Horizontal Balance als Spencer-Van der Meij is aan de hand van een aantal praktische overwegingen gekozen. Nader onderzoek kan in de toekomst leiden tot lagere modelfactoren.

3.4 Beperkingen bij toepassing Van Baars en Horizontal Balance (DGeoStability)

Wanneer het gebrek aan horizontaal evenwicht geen dominante kracht achter het maatgevende afschuifvlak is, zal de evenwichtsfactor volgens Van Baars hoger uitvallen dan het Bishopresultaat. Wanneer dit gebrek aan horizontaal evenwicht wel dominant is, zal het resultaat volgens Van Baars lager uitvallen dan het Bishopresultaat. Een gewogen gemiddelde – afhankelijk van de invloed van het gebrek aan horizontaal evenwicht – is een goede indicatie van de werkelijke evenwichtsfactor. Het is echter niet eenvoudig de mate van dominantie van de horizontale component in te schatten.

In de praktijk betekent dit dat bij lichte veenkades Van Baars een onderschatting van de veiligheidsfactor geeft. Deze veelal te lage veiligheidsfactor moet ook nog eens gedeeld worden door een hoge modelfactor (1,20) omdat het een modeluitkomst geeft met veel

onzekerheid. De combinatie van deze twee zorgt ervoor dat heel veel veenkades worden afgekeurd met deze methode.

Versterking van de kade is na een dergelijke analyse echter erg voorbarig. Er zijn wiskundig betere rekenmodellen beschikbaar die over het algemeen tot hogere veiligheidsfactoren leiden en een over een lagere modelfactor beschikken.

3.5 Beperkingen bij toepassing Spencer en Spencer-Van der Meij (DGeoStability)

Een nadeel van zowel de methode Spencer als het zoekalgoritme voor het maatgevende glijvlak in de methode Spencer-Van der Meij is dat er nog relatief weinig ervaring met deze methode is. Bij veel ingenieursbureaus is voldoende kennis en ervaring beschikbaar om een zoekgrid voor Bishop op een correcte manier te definiëren. Op een soortgelijke manier moet een zoekruimte voor Spencer-Van der Meij gedefinieerd worden. Bij gebruikers moet deze ervaring groeien.

Een groot voordeel van de methode Bishop is dat het altijd een antwoord geeft. Het is echter aan degene die de analyse uitvoert om te beoordelen of dit antwoord correct is. Spencer geeft, wanneer er geen reële oplossing mogelijk is, soms geen antwoord. Soms geeft Spencer een irreal antwoord. Het is aan de gebruiker om de validiteit van een Spenceroplossing te beoordelen en zo nodig bij te sturen. Er zijn binnen DGeoStability voldoende mogelijkheden om dit te controleren, maar er moet wel voldoende kennis aanwezig zijn om hiervan gebruik te maken. In een klein aantal gevallen kan Spencer geen reële oplossing vinden. In dat geval zal teruggevallen moeten worden op een andere methodiek bijvoorbeeld Van Baars.

3.6 Toepassing methode Spencer bij primaire waterkeringen

De methode Spencer is sinds de jaren 80 een geaccordeerde methodiek om de stabiliteit van waterkeringen mee te berekenen. In de jaren 80 is de methode veel gebruikt toen duidelijk werd dat Bishop niet voldeed in het geval van opdrijven bij primaire waterkeringen. De methode is uit het zicht geraakt bij de introductie van het model Lift-Van. Lift-Van sluit conceptueel beter aan op Bishop omdat ze in het geval van een cirkelvormig glijvlak exact hetzelfde antwoord geven.

In het kader van WTI (Wettelijk Toets Instrumentarium) 2017 komt de methode Spencer-Van der Meij in beeld als een methodiek om op een eenduidige manier de stabiliteit van een waterkering uit te rekenen. Het is niet gewenst dat er met verschillende modellen aan hetzelfde mechanisme (macrostabiliteit) gerekend moet worden omdat dit het maken van een probabilistische berekening erg complex maakt. Tevens verkleint het uitvoeren van één enkele berekening, altijd met hetzelfde model, de kans op fouten in de analyse en ook de rekentijd. In de loop van volgend jaar zal een beslissing gemaakt worden over de rol van de methode Spencer-Van der Meij in het nieuwe WTI.

4 Advies met betrekking tot toetsing kades onder droge omstandigheden

Dit memo beschrijft dat methode Spencer een geaccordeerde methode is ter bepaling van de stabiliteit van een grondlichaam en met name voor een waterkering. Methode Spencer-Van der Meij voegt daar een handzaam zoekalgoritme aan toe waarmee in de meeste gevallen

eenvoudig het maatgevende glijvlak wordt gevonden. Deze methode is bruikbaar in alle situaties, ook tijdens opdrijven (primaire waterkeringen) en droogte (regionale waterkeringen).

Spencer-Van der Meij verdient de voorkeur boven de methode Van Baars omdat het een minder conservatieve veiligheidsfactor geeft met daarbovenop een gunstigere modelfactor. De beschouwing is enerzijds preciezer en zal anderzijds tot het afkeuren van minder boezemkades leiden. Nader onderzoek en accordering van deze modelfactoren (zowel Van Baars als Spencer-Van der Meij) is in de nabije toekomst wenselijk.

Er is, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de methode Bishop, relatief weinig ervaring met de methode Spencer-Van der Meij. Het is van belang ervaring op te bouwen met dit model. Wel wordt geadviseerd om de methode Van Baars als terugvaloptie beschikbaar te houden omdat in een zeer klein percentage van de analyses geen uitspraak kan worden gedaan met het Spencermodel. Tevens is het van belang dat er zorg besteedt wordt aan de kwaliteitsborging van de Spencerberekeningen omdat er bij ingenieursbureaus nog geen of zeer weinig ervaring met deze methodiek is

Referenties

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

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

Stowa (2007). Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, Katern Boezemkadenm. ISBN: 978.90.5773.382.6

Van, M. A. (2001). "New approach for uplift induced slope failure". XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul. 2285-2288

Paraaf



Raymond van der Meij