

Afschuiving langs een vrij glijvlak

ir. Raymond van der Meij
Deltares



Introductie

Het toetsen van waterkeringen zit in onze genen. Sinds jaar en dag zijn wij in Nederland voorlopers in het rekenkundig toetsen van de stabiliteit van de waterkeringen. Door de jaren heen is een scala aan gereedschappen ontwikkeld om bij iedere omstandigheid de juiste analyse uit te voeren. Deze gereedschappen variëren van eenvoudige vuistregels via vele evenwichtsbeschouwingen tot complexe eindige elementen analyses.

Het vereenvoudigde Bishop model wordt altijd toegepast bij het bepalen van de taludstabiliteit. Dit model is niet altijd maatgevend en bevat een aantal vereenvoudigingen te opzichte van een volledige evenwichtsbeschouwing. Het is aan de ingenieur om te bepalen of er ook andere analyses gemaakt moeten worden zoals een Lift-Van berekening of het toetsen van het horizontale evenwicht.

Een nieuw model ter bepaling van de stabiliteit combineert het beste van de bestaande methodes. Het glijvlak wordt niet a priori opgelegd en wordt berekend aan de hand van een evenwichtsbeschouwing in alle richtingen. Door deze nauwkeurigere aanpak zal de modelonzekerheid significant gereduceerd worden.

Geschiedenis van het rekenen aan taludstabiliteit

De eerste rekenkundige beschouwing van een cirkelvormig glijvlak in een grondlichaam is opgesteld door Fellenius. In 1936 beschrijft hij een methode om langs een cirkelvormig glijvlak het momentenevenwicht te berekenen aan de hand van lamellen. Janbu deduceert in 1954 een methodiek die, naast het momentenevenwicht, ook het horizontale- en verticale evenwicht in beschouwing neemt. Daarbovenop kan Janbu's methode ook niet-cirkelvormige glijvlakken analyseren.

Mede vanwege de beperkte rekenkracht in de tijd is het de 'simplified' methode van Bishop (1955) die erg populair wordt. Het is een relatief eenvoudige formule gebaseerd op twee aannames. Het glijvlak moet cirkelvormig zijn en het evenwicht

van de horizontale interlamelkrachten hoeft niet beschouwd te worden. Hij toont aan dat deze aannames in een homogeen materiaal en bij hydrostatische waterspanningen slechts een kleine invloed op de veiligheidsfactor hebben. Tot in de jaren 60 gaat de ontwikkeling van dergelijke modellen in een rap tempo verder. Janbu verbetert zijn methodiek en soortgelijke alternatieven als Morgenstern-Price en Spencer komen beschikbaar. De laatste drie methodes beschouwen het horizontale-, verticale- en het momentenevenwicht langs een willekeurig glijvlak.

In het geval van opdrijven blijkt Bishop niet te voldoen en wordt een nieuwe methode ontwikkeld: Lift-Van. Deze methode heeft een drukstaaf tussen twee cirkels. In haar limiet is deze methode hetzelfde als Bishop. Wanneer de drukstaaf oneindig kort wordt en de actieve en passieve cirkels samenvallen volgt hetzelfde resultaat.

In de latere jaren komt de eindige-elemententechniek als alternatief op. Deze methodiek wordt met name toegepast wanneer een constructie in een grondlichaam geanalyseerd moet worden. Ondanks deze ontwikkelingen blijft de methode Bishop tot op de dag van vandaag de meest gehanteerde methode ter bepaling van de stabiliteit.

Beperkingen van onze gereedschappen

De huidige evenwichtsbeschouwingen gaan uit van een vooraf gedefinieerde vorm van het glijvlak. Helaas volgt de natuur niet altijd de wiskundige beschouwingen maar vindt ze altijd de weg van de minste weerstand.

Een bekend voorbeeld is de afschuiving bij Streefkerk in 1984. Hier bezweek de dijk niet volgens een cirkelvormig glijvlak zoals Bishop suggereerde. Vanwege het opdrijven van het achterland vond een langgerekte afschuiving plaats. In de daarop volgende jaren is er een alternatieve methode ontwikkeld, Lift-Van, om in het geval van opdrijven de stabiliteit beter te kunnen berekenen. Deze methode wordt nu alom toegepast bij de toetsing en ontwerp van onze beneden rivier dijken.

In 2003 werden we wederom met de neus op de feiten gedrukt. De kade bij Wilnis voldeed bij een Bishop analyse. Het horizontale evenwicht was echter niet voldoende gewaarborgd. Dit blijkt niet uit de Bishop analyse omdat deze juist het horizontale evenwicht niet in beschouwing neemt. Ook in dit geval is er in de 'Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen' weer een procedure opgesteld om lichte kades te toetsen op hun stabiliteit tijdens droogte. Deze regel, die alleen de horizontale krachten analyseert, is echter erg conservatief.

Een eenduidige systematiek: Spencer-GA

Een nieuwe methodiek is ontwikkeld waarbij de vorm van het glijvlak niet van tevoren vast staat. Waar normaalgesproken een grid gebruikt wordt om alle mogelijke glijcirkels te analyseren, hoeft bij deze methode alleen een zoekruimte gedefinieerd te worden. Een Genetisch Algoritme (GA) vindt binnen deze ruimte de weg van de minste weerstand.

Er is gekozen voor een genetisch algoritme omdat dit zoekproces heel goed is in het vinden van oplossing in een grillige, meerdimensionale ruimte. Waar een meer conventioneel zoekalgoritme in een lokaal minimum kan blijven steken of vastloopt als er een paar keer geen oplossing mogelijk is, blijkt het GA een robuust, snel en accuraat zoekalgoritme te zijn. De precisie van het resultaat wordt groter naarmate er langer gezocht wordt. Binnen 10 seconden levert het algoritme een resultaat met maximaal een paar procent afwijking. Naar mate langer gezocht wordt, zal het antwoord meer precisie krijgen.

Omdat de rekentijd met de huidige generatie computers niet meer maatgevend is, wordt deze zoekmethodiek gecombineerd met de methode Spencer. Dit is een volledige evenwichtsbeschouwing die dus ook de horizontale componenten in acht neemt.

Omdat de vorm van het vlak vrij is en de evenwichtsbeschouwing compleet, vervalt de noodzaak om verschillende modellen te gebruiken

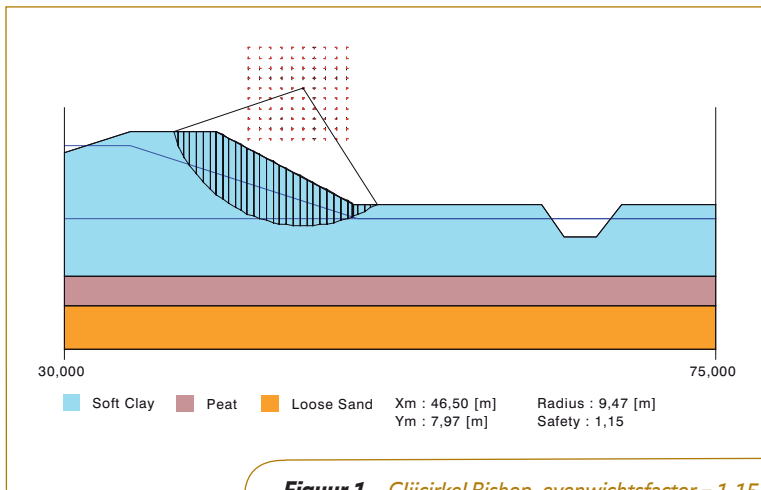
Samenvatting

In de jaren 50 en 60 van de vorige eeuw zijn veel modellen opgesteld om de stabiliteit van een grondlichaam te berekenen. Bishop's vereenvoudigde methode is hiervan de bekendste en wordt vandaag de dag nog dagelijks door vele ingenieurs toegepast. Door een aantal aannames vergt de methode relatief weinig rekenkracht. In de tijd dat rekenkracht nog een schaars goed was is zeer veel ervaring opgedaan met deze methode.

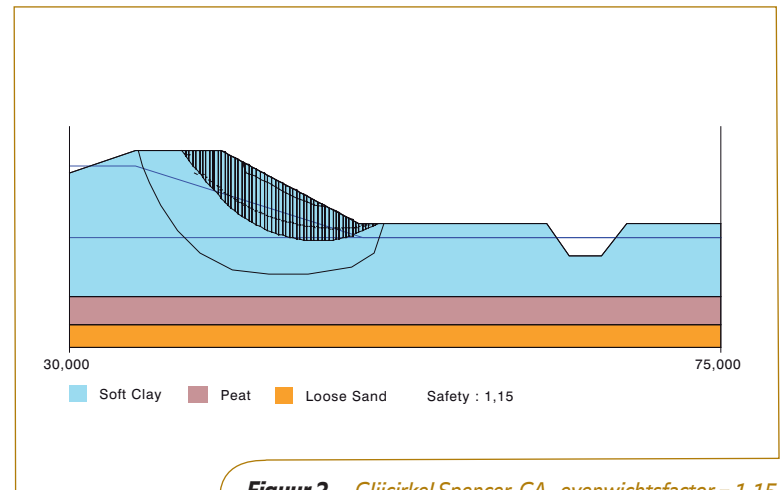
Omdat er ook beperkingen aan Bishop zitten, zijn er in de loop der tijd een aantal aanvullingen gemaakt. In het geval van opdrijven moet tevens een Lift-Van analyse gemaakt worden en bij een risico op droogte moet ook het horizontaal

evenwicht gecontroleerd worden.

Sinds enige tijd zit er een nieuwe module in DGeo-Stability (vroeger: MStab) die geen gebruik meer maakt van Bishop. Deze module combineert de methode Spencer met een Genetisch Algoritme om een vrij glijvlak te vinden in een grondlichaam. Deze techniek heeft een aantal fundamentele verbeteringen ten opzichte van de huidige methodes waardoor de evenwichtsfactor nauwkeuriger te bepalen is. Meerdere analyses zoals opdrijven en een droogtetoets zijn niet meer noodzakelijk.



Figuur 1 - Glijcirkel Bishop, evenwichtsfactor = 1,15.



Figuur 2 - Glijcirkel Spencer-GA, evenwichtsfactor = 1,15

voor opdrijven en horizontale stabiliteit tijdens droogte.

Voorbeelden

Om het gebruik van deze methode te laten zien, worden voor een fictieve dijk een aantal analyses gemaakt. Ten eerste wordt de stabiliteit van het talud berekend bij een oppervlakkige afschuiving. Vervolgens wordt een grote afschuiving bekeken. Tenslotte wordt de analyse gemaakt waar het pleistocene zand een verhoogde druk heeft ten gevolge van kortsluiting met het hoge rivierwaterpeil.

Figuur 1 toont het traditionele Bishop resultaat links en het nieuwe model wordt rechts getoond in figuur 2. Traditioneel wordt de maatgevende cirkel gezocht aan de hand van een punten-grid en een aantal tangentialijnen. De combinatie van alle berekeningen wordt gemaakt en degene met de laagste veiligheidsfactor wordt gerapporteerd. Bij de rechter berekening is geen sprake van een grid en tangentialijnen om het glijvlak te definiëren. De twee rode lijnen geven de randvoorwaarden waartussen het glijvlak gevonden moet worden. Binnen dit zoekgebied wordt de weg van de minste weerstand gevonden.

Zowel de vorm van de glijvlakken als de evenwichtsfactor komen goed overeen in beide berekeningen. Ook de rekentijd van beide analyses is ongeveer hetzelfde. Wat wel opvalt, is dat bij een vrij glijvlak het begin- en eindstuk van het glijvlak minder gekromd zijn dan het middenstuk.

In dezelfde geometrie is vervolgens gezocht naar diepere glijvlakken. Figuur 3 toont het maatgevende mechanisme volgens Bishop, figuur 4 volgens Lift-Van en figuur 5 volgens Spencer-GA. De drie berekeningen geven veiligheidsfactoren die dicht bij elkaar liggen, variërend van 1,13 tot 1,08. Hoe meer vrijheid beschikbaar is om het glijvlak te beschrijven, hoe lager de evenwichtsfactor. Om de vergelijking compleet te maken, is in figuur 6 het resultaat van een eindige-elementen (EEM) berekening met Plaxis weergegeven. De evenwichtsfactor bij deze analyse is 1,06.

Het is niet altijd het geval dat Spencer-GA lagere evenwichtsfactoren geeft dan de andere analytische methodes. Dit is zichtbaar in de volgende drie figuren wanneer de waterdruk in het onderste zand is toegenomen.

In dit geval geeft de Lift-Van berekening de

Tabel 1 - Evenwichtsfactoren van de verschillende berekeningen

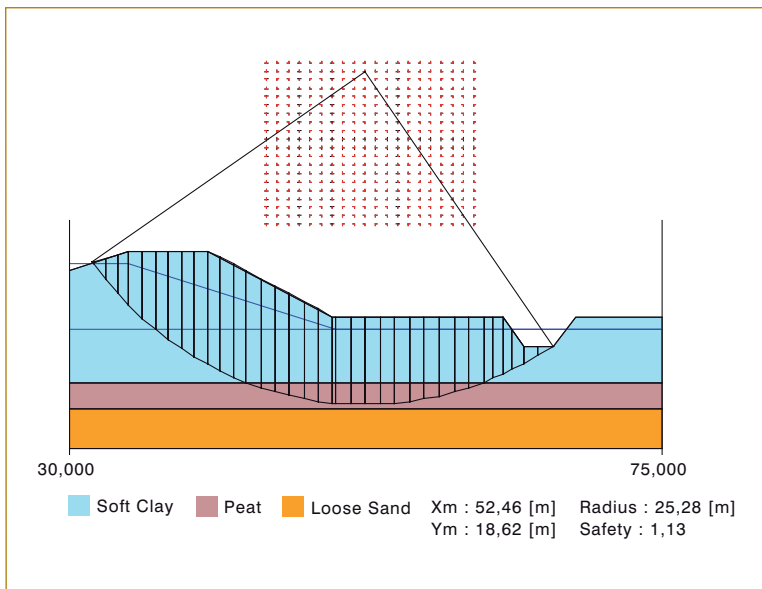
	Oppervlakkige cirkel	Maatgevende cirkel	Hoge druk zandlaag
Bishop	1,15	1,13	0,82
Lift-Van	nvt	1,11	0,72
Spencer	1,15	1,08	0,81
Plaxis	Nvt	1,06	Nvt

laagste uitkomst. Samenvattend zijn de evenwichtsfactoren van alle berekeningen weergegeven in tabel 1. Het is met een EEM analyse niet eenvoudig om de evenwichtsfactor van een oppervlakkige cirkel te berekenen, evenals een evenwichtsfactor onder de 1,0. Deze analyses zijn dan ook niet uitgevoerd.

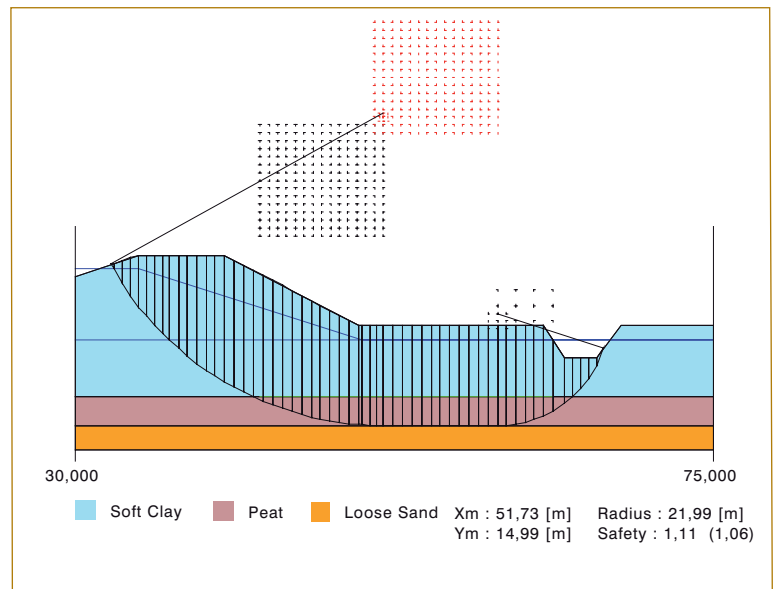
Oorzaken van verschillende resultaten

Er zijn drie oorzaken aan te wijzen waardoor de drie methodieken andere resultaten geven: de vorm van het glijvlak, het horizontale krachtenevenwicht, en het afsnuiten van de schuifkrachten.

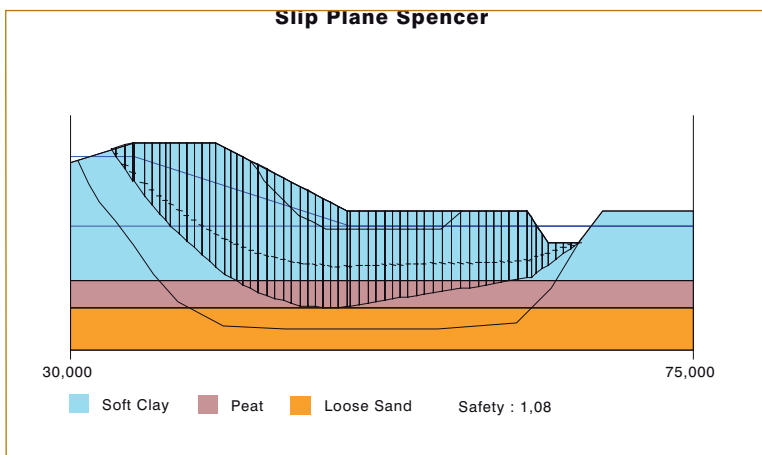
Voor wat betreft de vorm van het glijvlak zal



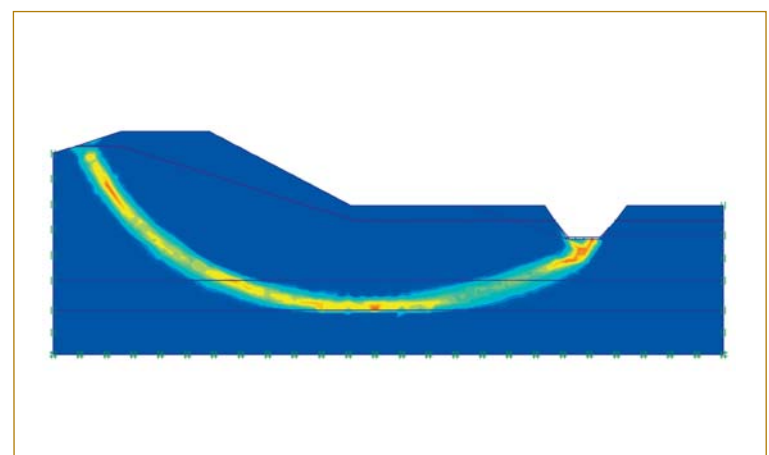
Figuur 3 – Glijcirkel Bishop, evenwichtsfactor = 1,13.



Figuur 4 – Glijvlak Lift-Van, evenwichtsfactor = 1,11.



Figuur 5 – Glijvlak Spencer-GA (met druklijn), evenwichtsfactor = 1,08.



Figuur 6 – Glijvlak met EEM methode: evenwichtsfactor = 1,06

Tabel 2: Partiële modelfactoren voor de verschillende methodes

	Bishop	Lift-Van	EEM	Spencer-GA
3D-effect	0,9	1,0	1,0 (of iets lager)	Tussen 0,9 en 1,0
Modelprecisie	1,1	1,05	1,0 (of iets hoger)	Tussen 1,0 en 1,05
Product - γ_d	1,0	1,05	1,0	Tussen 0,9 en 1,05

Spencer-GA altijd een lagere veiligheidsfactor geven dan Bishop (en Lift-Van). Wanneer een cirkel maatgevend is, zal dit ook uit Spencer-GA volgen. Als een andere vorm van het glijvlak een lagere evenwichtsfactor geeft, zal Spencer-GA dit andere vlak rapporteren.

De invloed van de horizontale krachten kan resulteren in een hogere of lagere evenwichtsfactor. Dit is afhankelijk van de richting van de afwijking van het krachtenevenwicht dat niet door Bishop beschouwd wordt.

Het laatste fundamentele verschil tussen Bishop (en Lift-Van) en Spencer is dat er bij het laatste model niet 'afgesnuten' wordt. Afsnuten duidt op het aftoppen van de maximale schuifkracht onderop een lamel wanneer deze steil uittreedt. Onrealistisch grote krachten worden berekend wanneer de onderkant van een lamel een grotere hoek heeft dan $\varphi/2 - 45^\circ$. De schuifkracht kan bij Bishop en Lift-Van niet groter worden dan dit maximum.

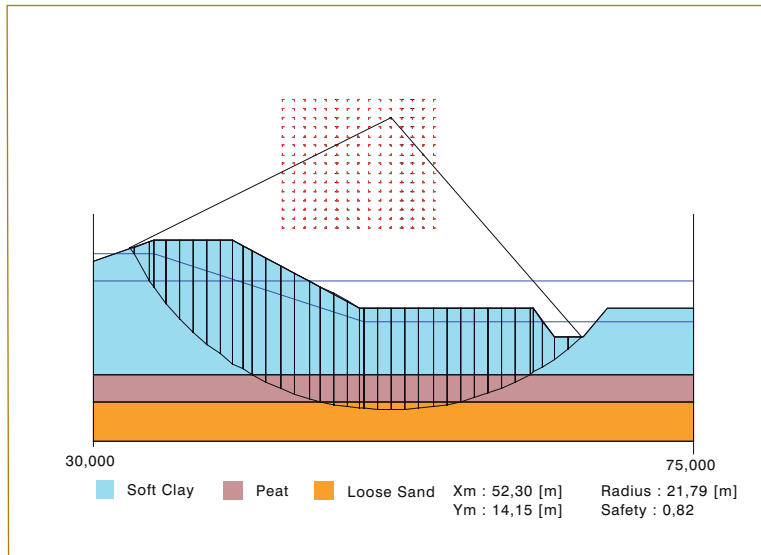
Omdat Spencer-GA het glijvlak nooit verplicht om steil uit te treden, hoeft ook niet afgesnuten

te worden. Vaak vindt Spencer-GA vanuit een diepere laag een wig naar het maaiveld in plaats van een cirkelvorm. Het niet afsnuten zorgt ervoor dat de veiligheidsfactor door Spencer-GA hoger kan zijn dan bij Bishop en Lift-Van.

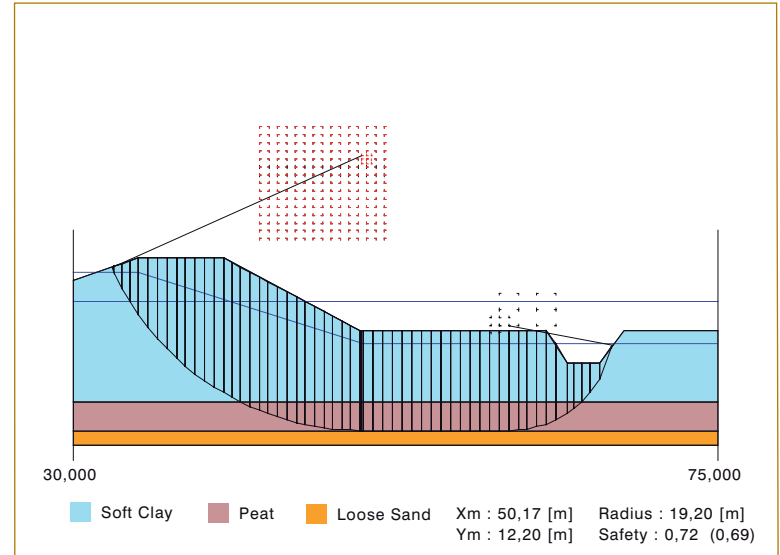
Resumerend is er één verschil dat altijd een ongunstig effect heeft op de veiligheidsfactor (vorm) één die positief en negatief kan werken (horizontale krachten) en één die altijd een positief effect heeft (afsnuten). In alle drie de gevallen is het echter een verbetering ten opzichte van de huidige praktijk.

Toetsing van dijken

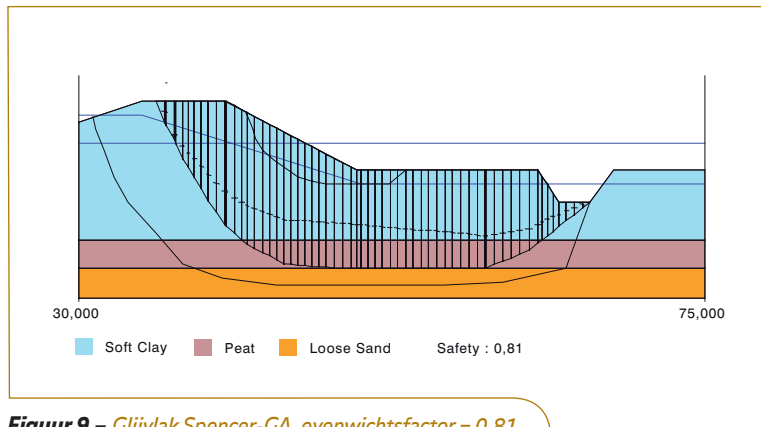
Duidelijkheid omtrent de partiële veiligheidsfactoren is noodzakelijk wanneer deze methodiek gebruikt wordt voor het toetsen van dijken. De keuze voor γ_d , de partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het gebruikte model oftewel



Figuur 7 – Glijcirkel Bishop, evenwichtsfactor = 0,82.



Figuur 8 – Glijvlak Lift-Van, evenwichtsfactor = 0,72.



Figuur 9 – Glijvlak Spencer-GA, evenwichtsfactor = 0,81.

de modelfactor, is niet triviaal. Deze factor verdisconteert onzekerheden in de berekeningsmethode en kan worden opgevat als het product van twee deelfactoren. Een met betrekking tot de (gunstige) 3D effecten en een (ongunstige) afwijking tussen het model en de werkelijkheid.

De deelfactoren voor Bishop, Lift-Van en een EEM analyse zijn bekend. Analoog daaraan kunnen ook een indicatie voor de deelfactoren voor Spencer-GA afgeleid worden, zie tabel 2.

Omdat de vorm van het vrije glijvlak sterk overeen komt met een EEM berekening lijkt het logisch dezelfde modelfactor van 1,0 te hanteren. Bij beide berekeningen moet overwogen worden of in het geval van een langgerekt glijvlak niet beter is een modelfactor van 1,05 te hanteren. Een discussie over dit onderwerp is wenselijk.

Conclusies

Er is in DGeoStability een nieuwe methode beschikbaar om de stabiliteit van grondlichamen te bereke-

nen. De methode bevat een betere evenwichts-beschouwing en een betere definitie van het glijvlak dan Bishop. Omdat het afschuiven meer nauwkeurig beschreven wordt, zal de evenwichtsfactor vaak iets lager uitvallen, al hoeft dit niet altijd het geval te zijn.

Het uitvoeren van een analyse duurt bij een bepaalde precisie wat langer dan een standaard Bishop analyse, maar minder lang dan een Lift-Van analyse.

Deze methodiek maakt het onnodig meerdere modellen te moeten toepassen voor het doen van de stabiliteitsanalyse. Dit is met name handig voor het uitvoeren van geautomatiseerde berekeningen, maar ook in de dagelijkse praktijk vermindert dit de 'ingenieursfactor' en maakt het de resultaten dus beter reproduceerbaar. Wel zal ervaring opgedaan moeten worden om te zien of de resultaten structureel in de lijn der verwachtingen liggen aangezien er niet veel ervaring is met de methode Spencer voor het toetsen van waterkeringen.

Een discussie met betrekking tot de modelfactor is gewenst wanneer deze methode voor toetsing van waterkeringen gebruikt wordt, al lijkt een modelfactor van 1,0 reëel.

Verdere literatuur

De methode wordt in meer detail beschreven in de volgende publicatie:

- Van der Meij, R. and J.B. Sellmeijer, *A Genetic Algorithm for Solving Slope Stability Problems: from Bishop to a Free Slip Plane*, in 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE). 2010, Balkema, Rotterdam: Trondheim.
- Raymond.vanderMeij@Deltares.nl

Technische achtergronden van de genoemde evenwichtsbeschouwingen zijn hier te vinden:

- Bishop, W., *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique, 1955. 5: p. 7-17.
- Spencer, E., *A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces*. Geotechnique, 1967. 17: p. 11-26.
- Van, M.A. *New approach for uplift induced slope failure*. in XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2001. Istanbul.

Met betrekking tot het genetisch algoritme is zeer veel te vinden op internet. Twee belangrijke publicaties zijn de volgende:

- Barricelli, Nils Aall (1957) *Symbiogenetic evolution processes realized by artificial methods*. Methodos: 143-182
- Bellman, R.E., *Dynamic Programming*. 1957: Princeton University Press. ●