

Betrouwbaarheidsindex van een dijk op basis van één berekening

Probabilistisch ontwerpen geeft een zuivere beoordeling, maar is tot nu toe nog relatief arbeidsintensief en beperkt tot één rekenmodel. PMMS brengt hier verandering in: Probabilistisch Model Macro Stabiliteit.

De recente gebeurtenissen laten overduidelijk de noodzaak van veilige dijken zien. In het lopende Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) worden alle waterkeringen beoordeeld en blijkt dat vele dijken versterkt moeten worden. De maatschappelijke kosten zijn enorm, dus is het van belang dat de noodzaak voor versterken zo goed mogelijk wordt bepaald. De ontwerppraktijk is met name op een deterministisch of semi-probabilistische beoordeling gericht, waar probabilistisch echter een zuiverdere beoordeling geeft. Sinds 2016 ontwikkelt Henk Bakker bij CRUX Engineering het PMMS: Probabilistisch Model Macro Stabiliteit. Bakker heeft reeds in zijn thesis aan de TU Delft de basis gelegd voor de 'Sterkte Reductie'-functionaliteit in Plaxis, dat nu één van de pijlers is voor de beoordeling van waterkeringen. Sinds 1991 verricht hij onderzoek naar praktisch bruikbare, snelle en nauwkeurige probabilistische rekenmodellen voor met name waterkeringen met of zonder langconstructies.

Voorlopers van het PMMS zijn toegepast en gerapporteerd in het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen (2004) en in 'Veiligheid Nederland in Kaart' (2005).

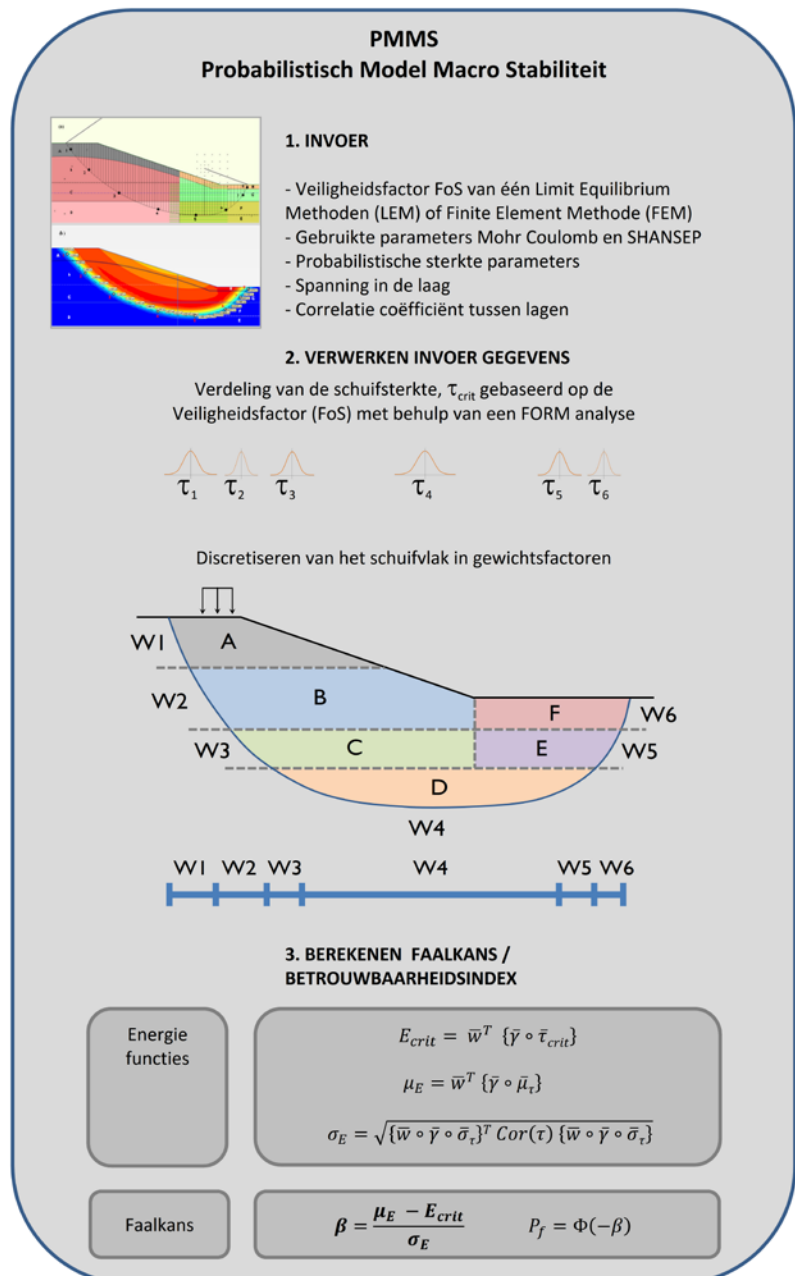
IN 'T KORT - PMMS

PMMS sluit aan op alle typen 2D-stabiliteitsberekeningen

PMMS berekent een betrouwbaarheidsindex op basis van één berekening

PMMS geeft dezelfde resultaten als meer tijdrovende methoden

PMMS kan de variatie in grondlaagopbouw meenemen



Schematische weergave stappen in PMMS.

Doorbraak

Probabilistische berekeningen zijn, ondanks de toenemende computerkracht, nog altijd tijdrovende exercities. Voor Limit Equilibrium Methoden (LEM) zoals D-Stability is het mogelijk om de berekeningen vanuit een Toolkit aan te sturen, waardoor binnen een

afzienbaar tijdsbestek een betrouwbaarheidsindex wordt berekend. Bij eindige-elementenmethode (FEM)-berekeningen zoals Plaxis is dit vooralsnog in de ontwerppraktijk onvoldoende mogelijk. Het PMMS zorgt hier voor een doorbraak door het mogelijk te maken om op basis van één (of een gering aantal) LEM-

of FEM-berekening een betrouwbaarheidsindex te bepalen.

Betrouwbaarheidsindex

Voor het bepalen van de betrouwbaarheidsindex β is slechts één doorsnede berekening van een LEM- of FEM-model nodig, bijvoorbeeld met de sterktereductie-functionaliteit van Plaxis. PMMS is daarmee de eerste probabilistische methode waarmee, op een voor de praktijk toegankelijke methode, snel een betrouwbaarheidsindex kan worden bepaald voor een FEM-model. Huidige methoden (FORM analyses of random finite element methoden) zijn gebaseerd op vele langdurige berekeningen, hetgeen met PMMS tot het verleden behoort.

Sterktemodellen

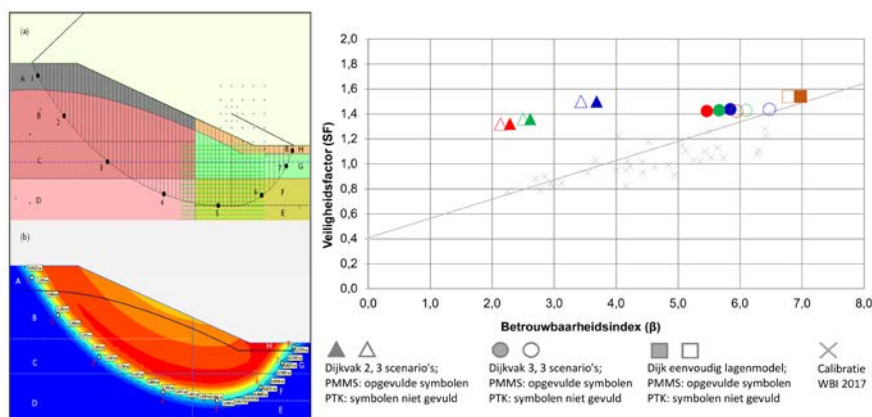
PMMS kan met Mohr Coulomb en SHANSEP werken en dekt daarmee de gangbare sterktemodellen voor het ontwerp van waterkeringen en grondlichamen af. Voor het SHANSEP-model wordt een numerieke integratie toegepast om rekening te houden met opschuiven van de grensspanning als gevolg van de belastingfasering. Voor alle relevante lagen worden in het PMMS de statistische sterkteparameters (gemiddelde, standaard deviatie, etc.) ingevoerd. Tevens worden de sterkteparameters ingevoerd die in de LEM- of FEM-berekening zijn gebruikt (dit kan gemiddelde, karakteristiek of een andere waarde zijn), de spanning in de glijcirkel en de veiligheidsfactor (FOS) die uit deze berekening volgt. Op basis van de ingevoerde gegevens wordt met een FORM-analyse voor elke laag een statistische beschrijving van de afschuifsterkte in het ontwerp punt berekend. De correlatiecoëfficiënten tussen alle lagen onderling worden in PMMS in rekening gebracht, met de mogelijkheid om voor iedere onderlinge combinatie van twee lagen, iedere waarde tussen 0 en 1 te kiezen. Combinaties die fysisch niet mogelijk zijn, worden automatisch geweerd.

Discretisatie van de glijcirkel

De lengte van de glijcirkel wordt onderverdeeld in gewichtsfactoren die een fractie van de glijcirkel per laag vertegenwoordigen. Deze discretisatie biedt de mogelijkheid om ook de variatie in laagdikte en -ligging in het PMMS mee te nemen. Met de SUM (Stochastic Underground Model) functionaliteit kan één discrete doorsnede worden omgerekend naar een betrouwbaarheidsindex voor een heel dijkvak, inclusief laagonzekerheden.

Betrouwbaarheidsniveau

De energie bij bezwijken E_{crit} gedissipeerd in de glijcirkel, wordt berekend uit de gewichtsfactoren



Impressie van DStability en Plaxis-model 'eenvoudige case' en resultaten van de vergelijkende berekeningen.

ren van de grondlagen volgend uit de LEM- of FEM-berekening, de spanningen in de grondlagen in de glijcirkel en de afschuifsterkten in de ontwerp punten van die grondlagen en de afschuifrekken in het bezwijkmechanisme. Naast E_{crit} wordt ook het gemiddelde en de standaardafwijking van de bezwijkenergie in de glijcirkel berekend. De Betrouwbaarheidsindex β van de grondconstructie wordt vervolgens bepaald uit de resultaten conform de standaard formule van de energiefunctie en daarmee ook de faalkans van de grondconstructie. De energiefunctie als faalfunctie is ook toegepast in het Technisch Rapport Kistdammen en Diepwanden in Waterkeringen en is in 1996 door GeoDelft geverifieerd en juist bevonden. Bij het gebruik van de SUM-functionaliteit wordt de methode complexer, hetgeen in een volgend artikel wordt behandeld.

Vergelijking

In de paper van Simanjuntak et.al. (2019) is de vergelijking beschreven van de berekende betrouwbaarheidsindex met PMMS (op basis van een Plaxis-model, verticale spanningen) en PTK (Probabilistic ToolKit in combinatie met D-Stability van Deltares). Deze vergelijking is voor twee doorsneden van het project KIJK uitgevoerd, beide met drie belastinggevallen. Dijkvak 2 heeft een relatief ondiep glijvlak, het glijvlak gaat door een beperkt aantal lagen. Dijkvak 3 betreft daarentegen een diep glijvlak. Daarnaast is een vergelijking gemaakt voor een eenvoudig lagenmodel van een dijklidder. Op basis van de resultaten wordt geconcludeerd dat de resultaten van PMMS en PTK vergelijkbaar zijn.

Langsconstructies

De resultaten laten zien dat het PMMS uitermate geschikt is om de betrouwbaarheidsindex van een grondlichaam te berekenen op basis van een LEM- of FEM-berekening. Omdat een glijvlak wordt gediscrèteerd met

gewichtsfactoren is PMMS ook toepasbaar om de betrouwbaarheidsindex van langsconstructies in een dijk te berekenen. Op dit moment is nog geen praktische rekenmethode die een probabilistische analyse van een langsconstructie mogelijk maakt. Bij dijken versterkt met constructieve elementen gaat het doorgaans om actieve en passieve grondwigen. Deze kunnen eenvoudig op dezelfde manier als glijvlakken in het PMMS worden gemodelleerd. Om deze unieke functionaliteit van PMMS te toetsen, is CRUX op zoek naar cases die met PMMS kunnen worden geanalyseerd.

Elegantie

In PMMS heeft Henk Bakker 35 jaar ervaring in probabilistische grondmechanica laten neerslaan om een praktisch model te maken dat de betrouwbaarheidsindex van een dijk bepaalt op basis van één rekendoorsnede van een LEM- of FEM-model. Vanwege de snelheid, elegantie en relatieve eenvoud is PMMS uitermate geschikt om onderdeel uit te maken van een geautomatiseerd beoordelingsproces zodat op basis van een betrouwbaarheidsindex (of faalkans) de waterkering snel en zuiver getoetst en ontworpen kan worden. PMMS beschikt tevens over de functionaliteit om de ligging van de grondlaagbegrenzungen en de laagdikte in de beoordeling mee te nemen én is geschikt voor het toetsen en ontwerpen van waterkeringen inclusief de langsconstructie. Toepassing van het PMMS in de (voor)verkenningfase kan leiden tot een zuiverdere toetsing en daarmee wellicht een kleinere scope van de versterkingsopgave. Dit leidt tot minder maatschappelijke kosten zonder dat dit veel meer engineering effort kost ten opzichte van de standaard semi-probabilistische benadering.

Dirk Goeman is specialist Geotechniek; Henk Bakker is senior specialist Geotechniek en Jacco Haasnoot is senior specialist/directeur (allen bij CRUX Engineering).