

Factsheet

Van	P. Beurskens / C. Bisschop
Review	A. van Duinen / B. Hardeman / J. Tigchelaar
Kopie aan	-
Datum	23-1-2018
Versie	2
Onderwerp	KPR-Factsheet omgang met grensspanning in het ontwerp

**Kennisplatform
Risicobenadering**

Zuidersluis 1
3439 LA Nieuwegein
Postbus 2232
3500 GE Utrecht

kpr@rws.nl

1 Inleiding

De laatste jaren is er voor een groot aantal dijkversterkingstrajecten in met name veiligheidsanalyses (en dus de veiligheidsbeoordelingen) ervaring opgedaan met de (ongedraineerde) stabiliteitsberekeningen volgens het CSSM-model. In dit model wordt er voor de relatief ondoorlatende klei- en veenlagen in de ondergrond, ongedraineerd grondgedrag verondersteld. Bij een, conform de schematiseringshandleiding [2], uitgevoerde stabiliteitsanalyse (bepaling sterkteparameters, schematisering grensspanning en schematisering van freatische waterstanden en stijghoogten) leidt dit tot verklaarbare en herleidbare beoordelingsresultaten.

Er is in Nederland echter nog zeer weinig ervaring met het ontwerpen op basis van ongedraineerde sterkte. Het blijkt dat dit op een aantal zeer uiteenlopende wijzen gedaan wordt, waarbij dan ook zeer uiteenlopende (veelal zeer forse) versterkingsmaatregelen in de vorm van stabiliteitsbermen worden gedimensioneerd. Het ontbreekt nu aan een gedeeld ervaringsbeeld van een 'goede' som, ook in relatie tot de nieuwe normering.

Met de huidige versie van D-GeoStability (recentste versie is 17.1) is het moeilijk en relatief veel werk om tijdens de verschillende ontwerpomstandigheden de spanningstoestand in de ondergrond te schematiseren. Om het schematiseren te versnellen en de spanningstoestand van de verschillende ontwerpomstandigheden te bepalen is en wordt door ingenieursbureaus software (en/of excelsheet) ontwikkeld om het schematiseren te faciliteren. Een belangrijk onderdeel van de spanningstoestand van de ondergrond is de zogenaamde POP-waarde (Pre Overburden Pressure). Deze POP is een maat voor de overconsolidatie en draagt bij aan de sterkte van de ondergrond. Met de verandering van de effectieve spanning in de ondergrond, door bijvoorbeeld het aanbrengen van een berm of kruinverhoging neemt de overconsolidatie af. De overconsolidatie ontstaat als gevolg van:

1. Een hogere spanningstoestand in het verleden hoger dan de actuele spanningstoestand.
2. Veroudering en bodemprocessen (aging). De overconsolidatie neemt toe in de loop van de tijd.

De ontwikkeling van de overconsolidatie (POP) in de loop van de tijd is niet goed bekend.

Daarnaast is de wens groot om de afmetingen van de stabiliteitsbermen efficiënt te kunnen bepalen. Een wijziging in de dimensies van de stabiliteitsberm, resulteert namelijk in een gewijzigde spanningstoestand van het grondlichaam, en dus in andere mate van overconsolidatie en dus in een andere schematisatie van de spanningstoestand.

Door de tijdsdruk op de dijkversterkingsprojecten (sneller en beter) wordt de noodzaak gevoeld invoer voor D-GeoStability te automatiseren.

Momenteel is een nieuwe versie van D-GeoStability in ontwikkeling die de externe schematiseringssoftware overbodig maakt. Wanneer oplevering van deze versie plaatsvindt is niet helemaal bekend. De inhoud van voorliggende memo dient t.z.t. nogmaals bekeken te worden.

Door de huidige beperkingen in D-GeoStability ontstaat een berekening met een vrij ingewikkelde geometrie en opbouw wat veelal als niet wenselijk wordt gezien omdat deze werkwijze:

- niet controleerbaar en ook niet reproduceerbaar is;
- de aanpak van pre-processing in de externe software per dijkversterkingsproject sterk verschilt, of door onduidelijke kwaliteitsborging de kwaliteit van deze externe software (en/of excelsheets) onduidelijk is;
- een schijnnaauwkeurigheid veronderstelt, die slechts gebaseerd is op een beperkt aantal meetpunten (veelal gering aantal sonderingen) in een dwarsprofiel van een geometrie (dijkvak). In de schematisatie ligt er minder nadruk op de ruimtelijke variatie van de ondergrond;
- de nadruk ligt op de mate van de overconsolidatie van de ondergrond onder MHW condities en daardoor andere schematisatie -en daarmee de ontwerpkeuzen impliciet maakt (bijvoorbeeld de mate van indringing van stijghoogte en ligging van freatische waterstand tijdens maatgevende omstandigheden).

2 Doel

Voorliggende memo is bedoeld als voorstel over hoe binnen de lopende dijkversterkingsprojecten stabiliteitsberekeningen, gegeven het gebruik van de huidige versie van D-GeoStability, uitgevoerd moeten worden.

3 Methode afleiden ongedraineerd grondgedrag

De belangrijkste onderdelen van de methode om ongedraineerd grondgedrag af te leiden, zijn hieronder weergegeven.

Methode

In een stabiliteitsanalyse op basis van CSSM wordt de ongedraineerde schuifsterkte s_u in de klei- en veenlagen als volgt berekend:

$$\tau_\alpha = s_u = \sigma'_{vi} \cdot S \cdot OCR^m$$

Hierin is

σ'_{vi} verticale effectieve insitu spanning [kPa]

S schuifsterkteratio [-]

OCR overConsolidatie Ratio [-]

m sterktoename exponent [-].

De Over Consolidation Ratio (OCR) is de ratio tussen de verticale grensspanning (σ'_{vy}) en de verticale effectieve spanning (σ'_{vi}). De Pre Overburden Pressure (POP) is het verschil tussen de grensspanning en de verticale effectieve spanning. Deze parameters zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'_{vi}} = \frac{\sigma'_{vi} + POP}{\sigma'_{vi}}$$

Een stabiliteitsberm is bij een CCSM-stabiliteitsanalyse (ongedraineerde benadering) minder effectief dan wanneer dezelfde grond volgens het Mohr-Coulomb model (gedraineerde benadering) zou worden beschouwd. Dit wordt veroorzaakt doordat bij het aanbrengen van een berm als gevolg van de toename van de effectieve spanning de term $\sigma'_{vi} \cdot S$ toeneemt en de term OCR^m afneemt. Door deze twee effecten zal in het overgeconsolideerde gebied de S_u maar weinig

toenemen. Als het normaal geconsolideerde gebied wordt bereikt neemt de S_u evenredig toe met de toename van de effectieve spanning.

De berm die als verbetermaatregel is bedoeld, moet hoger worden aangebracht, zodat de nieuwe effectieve spanning duidelijk hoger is dan de oude grensspanning en de berm meteen effectief is. Bestaande ervaringen (op basis van gedraineerd grondgedrag) met de effectiviteit en afmetingen van stabiliteitsbermen gaan dus niet zomaar meer op. Hierdoor lijkt de kloof tussen theorie en praktijk te vergroten. De bermen die met de gedraineerde methode werden ontworpen, 'voelen' soms al wat groot voor de waterkeringbeheerders.

Na de aanleg van bijvoorbeeld een stabiliteitsberm, kan de OCR toenemen door twee effecten:

- Toename van de grensspanning (σ'_{vy}) door kruip of uitdroging;
- Door toename van waterspanning onder maatgevende omstandigheden vindt (tijdelijk) een afname van de verticale effectieve spanning (σ'_{vi}) plaats ten opzichte van de dagelijkse omstandigheden.

De toename van de grensspanning (σ'_{vy}) in de tijd na het aanbrengen van de stabiliteitsberm blijkt zeer moeilijk te voorspellen en heeft daarom een grote onzekerheid. Dit betekent dat zonder aanvullend onderzoek er, op het moment van oplevering of na het einde van de consolidatie, van uit moet worden gegaan dat de grensspanning gelijk blijft aan de verticale effectieve spanning tijdens dagelijkse omstandigheden¹. Toepassing van deze grensspanning resulteert in stabiliteitsbermen die gevoelsmatig groter zijn dan wat de dijkbeheerder zou verwachten. In diverse dijkversterkingsprojecten wordt overwogen om voorbelasting en/of een vacuümconsolidatie toe te passen om op deze manier een toename van de grensspanning te bereiken.

4 Grensspanning in ontwerpberoeeningen

Indien een grondlaag ongedraineerd grondgedrag vertoont, kan de grensspanning op basis van de sondering in de berekening worden meegenomen. Daarnaast is het ook mogelijk om de POP-waarden per grondsoort te bepalen uit samendrukkingsproeven (of CRS-proeven). Aanbevolen wordt om beide te combineren om lokaal een zo goed mogelijk beeld van de ondergrond te krijgen, hanteer hierbij wel een eenduidige aanpak voor het gehele traject en wissel niet per profiel van aanpak.

4.1 Belangrijke punten vooraf t.b.v. bepaling grensspanning in berekeningen

Hoe de bepaling van de OCR/grensspanning uit sonderingen en/of laboratoriumproeven uitgevoerd moet worden voor het beoordelen van bestaande situaties tijdens maatgevende waterstanden, wordt verwezen naar WBI [2].

Hierbij gelden nadrukkelijk de volgende uitgangspunten:

- Bepaling grensspanning gebeurt onder dagelijkse omstandigheid (bijvoorbeeld ten tijde van het uitvoeren van de sondering of boring);
- Freatische waterstanden en stijghoogten dienen passend te zijn bij deze situatie;
 - Voor het gebruik van sonderingen houdt dat in dat de freatische stand en stijghoogte bepaald moeten worden uit gemeten waterspanningen of meetwaarden uit dissipatietesten of peilbuismetingen (indien aanwezig);
 - Bij gebruik van vaste POP waarden (op basis van laboratoriumonderzoek) dienen deze bij de verticale spanningen onder dagelijkse omstandigheden (gemiddelde freatische lijn en stijghoogte) opgeteld te worden;
- Gebruik verwachtingswaarden (gemiddelde waarden) voor het volumieke gewicht, de (grond)parameters S , m en N_{kt} bij de bepaling van de grensspanning met sonderingen.

¹ Opgemerkt wordt, dat er ook een aanzienlijke onzekerheid zit in "dagelijkse omstandigheden".

Indien een grensspanning met een sondering wordt bepaald, dient de schematisatie van de grensspanningspunten in D-GeoStability (versie 16.2 of hoger) als Yield Stress point ingevoerd te worden. Hierbij dienen de laagscheidingen van de grondlagen in de berekening gelijk te zijn aan de laagscheidingen in de sondering. Het rekenen middels een POP waarde is ook mogelijk, wel dient hiervan een onderbouwing gegeven te worden van de te hanteren waarde.

4.2 Vaststellen grensspanning volgens methode: Toekomstig dagelijkse omstandigheid (TDO)

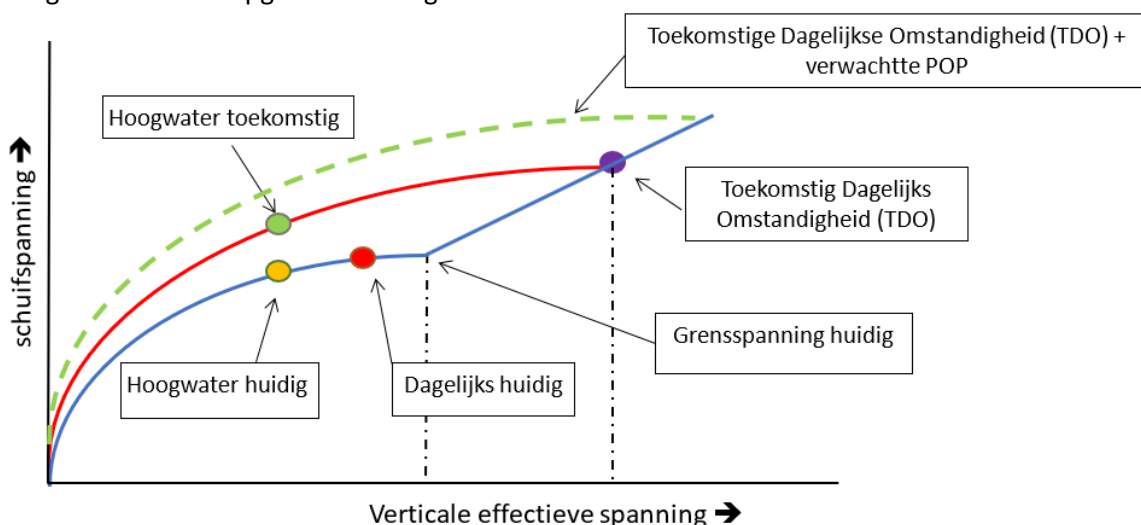
Omdat het vrij lastig is de grensspanning in een toekomstige situatie te voorspellen (en mogelijk lukt dat in het geheel niet), wordt voorgesteld om de methode *Toekomstige dagelijkse omstandigheid (TDO)* te gaan gebruiken. In deze methode wordt de grensspanning in de uiteindelijke situatie (bijvoorbeeld einde planperiode) gelijk verondersteld aan de korrelspanning onder de dan geldende gemiddeld “dagelijkse” omstandigheden.

Dit is een veilige aanpak, omdat:

- Door schommelingen in de freatische grondwaterstand zal, ten opzichte van de toekomstige dagelijkse omstandigheden, de grensspanning mogelijk groter zijn. Gemiddelde omstandigheden is dus voor het ontwerp een ‘veilige’ waarde.
- De consolidatiesnelheid van de ondoorlatende lagen in de periode na het aanbrengen van de berm is onzeker en kent een grote ruimtelijke spreiding. De aan te houden grensspanning is afhankelijk van de mate van consolidatie na uitvoering en kan als ontwerpeis worden opgegeven. Deze eis kan je bijv. een aantal jaar na de uitvoering verifiëren.

Door deze korrelspanningen als grensspanningspunten (Yield Stress points) in D-GeoStability op te geven zal, door het afnemen van korrelspanning door het oplopen van waterspanningen, een POP-waarde (en daarmee een OCR) ontstaan. Indien op een andere methode de grensspanning wordt verrekend zal dit aangetoond moeten worden. De grootte van deze POP is het verschil in effectieve spanningen (korrelspanning) tijdens normale dagelijkse omstandigheden en die tijdens hoogwater zal optreden.

In theorie zal hierdoor nog steeds de schuifspanning (enigszins) afnemen, omdat de sterkte-toename exponent (m) kleiner dan 1,0 is. Echter zal het effect van met name de indringing in de onderste grondlagen veel kleiner zijn dan bij een gedraineerde berekening (o.b.v. Mohr-Coulomb), waarbij de sterkte lineair gekoppeld is aan de korrelspanning. Een schematische weergave hiervan is opgenomen in figuur 1.



Figuur 1 Overzicht ontwikkeling schuifsterkte onder dagelijkse en toekomstige omstandigheden

De rode en oranje bol geven de huidige spanningssituatie weer, waarbij de rode bol de huidige dagelijkse omstandigheid weergeeft en de oranje bol de huidige toestand onder maatgevende (hoogwater) omstandigheden (en dus met een bepaalde waarde van POP). Bij afnemende effectieve spanning, neemt de schuifspanning dus ook enigszins af. Hierbij is er een aanname gedaan dat er dagelijks een POP waarde aanwezig is en er dus sprake is van een overgeconsolideerde spanningssituatie. Het totale sterkte verloop is weergegeven met de blauwe lijn.

Wanneer er een ophoging plaatsvindt zal de verticale in-situ spanning (korrelspanning) oplopen (in het voorbeeld tot de paarse bol). Indien de huidige grensspanning wordt overschreven zal dit punt over de blauwe lijn gaan verschuiven. Deze korrelspanning is daarbij gelijk aan een korrelspanning onder normale dagelijkse toestand (lage waterspanningen door lage waterstanden en hogere totaalspanningen door ophoging).

Het overgeconsolideerde gedrag (rode lijn) zal zich naar het verstrijken van de tijd gaan aanpassen op eenzelfde kromming als voorheen (m blijft gelijk waarmee de bolling naar verhouding gelijk zal blijven). Door het afnemen van de korrelspanning onder maatgevende omstandigheden zal de schuifspanning over de rode lijn afnemen tot het punt van de laagste spanning (groene bol).

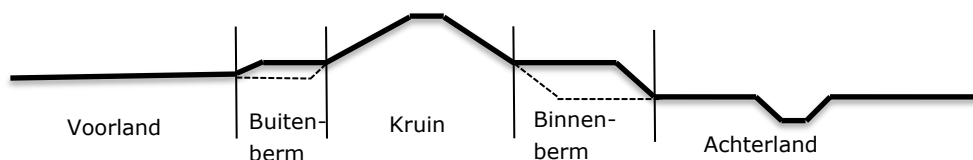
De winst hierin is dat, ten opzichte van het vasthouden van de huidige grensspanning, er altijd bij een hoogwatersituatie een $POP > 0$ kPa en daarmee $OCR > 1,0$ aanwezig zal zijn wat een positief effect heeft op de stabiliteit. Indien dit effect niet doorgevoerd wordt zal bij een hoogwater-situatie de grond normaal geconsolideerd grondgedrag vertonen en de sterkte lineair afnemen.

Onder MHW condities nemen de waterspanningen in de deklaag toe, waardoor korrelspanningen afnemen en de mate van overconsolidatie toeneemt. Dit heeft tot gevolg dat de afname van de schuifsterkte door de afname van de effectieve spanning grotendeels wordt gecompenseerd door de toename van de overconsolidatie, met name in de indringingszone aan de onderzijde.

4.3 Schematiseren grensspanningspunten

Om de methode van de grensspanningsbepaling goed te schematiseren, dient de dijk in een aantal gedeelten opgedeeld te worden, zie figuur 2. De exacte locatie van de verticale scheiding dient per situatie te worden ingeschat.

Aanbevolen wordt niet meer scheidingen aan te brengen dan strikt noodzakelijk is en bijvoorbeeld de onderverdeling, zoals in onderstaande figuur is weergegeven, te hanteren. Wel zal er op basis van de berekeningen die nu zijn uitgevoerd een gevoeligheid van dit uitgangspunt bepaald moeten worden.



Figuur 1 Zones waterkering

In tabel 1 is aangegeven welke methode gehanteerd kan worden voor het vaststellen van de grensspanning.

Tabel 1 Methode bepaling grensspanning per zone

Zone	Sondering/ proeven	TDO	Opmerking
Voorland / achterland	X		
Buitenberm / binnenberm		X	Controle o.b.v. sonderingen* ¹
Kruin	X	(x)	Controle o.b.v. dagelijkse omstandigheid* ²

*¹ Aangenomen kan worden dat de berm een dermate grote massa heeft dat de huidige aanwezige grensspanning wordt overschreven. Indien aannemelijk dat de huidige grensspanning wel hoger is dient een analyse op basis van sonderingen/proeven uitgevoerd te worden. Dit kan voorkomen op locaties waar in het verleden de dijk naar buiten is verplaatst (zie bestekkenboeken).

*² De grensspanning en POP waarden uit sonderingen/laboratoriumproeven dienen vergeleken te worden met de methode dagelijkse omstandigheden. Indien aannemelijk is dat de ophoging hoger is dan de huidige POP waarden dient de methode "dagelijkse omstandigheden" gehanteerd te worden. De hoogste waarde vanuit de analyse dient aangehouden te worden in de berekening.

Wanneer in een huidige situatie bermen aanwezig zijn, dient hiervoor een aparte verticale zone te worden aangemaakt. Wanneer een nieuwe berm nagenoeg geen verhoging geeft van de huidige berm, kunnen de grensspanningen in de huidige situatie hoger zijn dan de middels de TDO methode bepaalde spanningen. In dat geval dienen de huidige grensspanningen in de som opgenomen te worden.

Als gevolg van indringing vanuit de watervoerende zandlaag zal zich over een zekere indringingslengte het verloop tussen de freatische waterstand en de stijghoogte instellen. Aanbevolen wordt te onderzoeken of deze indringingslaag over één of meerdere laagscheidingen verdeeld moet worden om een goede schematisering van de spanningen en de schuifsterkte te kunnen berekenen.

De invoer van een TDO grensspanningspunten in DGeostability geschiedt op een gelijke manier zoals ook de grensspanningen worden ingevoerd, wanneer deze worden afgeleid uit de sonderingen, zie paragraaf 4.1.

De in D-GeoStability op te geven reference-level, dient in het geval van het rekenen met de TDO als volgt te worden geschematiseerd:

- Over huidig maaiveld, wanneer grensspanning is bepaald uit sonderingen (uitgaande dat deze grensspanningen zijn gecorrigeerd voor de waterspanningsverandering)
- Over toekomstig maaiveld, wanneer grensspanning bepaald in TDO;
- Op origineel maaiveld doortrekken van insteek tot insteek ter plaatse van sloten (voor nieuw te graven en reeds bestaande sloten);
- Op origineel maaiveld plaatse van afgravingen.

5 Conclusie en aanbevelingen

De grensspanning in de stabiliteitsberekeningen mag niet lager zijn dan de effectieve spanningen (korrelspanningen) onder dagelijkse omstandigheden in de toekomstige situatie (en dus bijvoorbeeld aan het einde van de planperiode). Dit dient aangehouden te worden in de ontwerpberekeningen met als uitzondering de situatie dat de huidige grensspanningen al hoger zijn. Dan dienen deze hogere waarden aangehouden te worden. In deze notitie is beschreven hoe dit kan. Daarbij is het belangrijk een zo realistisch mogelijk beeld te scheppen van de huidige en toekomstige korrelspanningen, die overeenkomt met de modellering in D-GeoStability. Hierbij is naast de volumegewichten, kennis van waterspanningen in de ondergrond essentieel.

De ontwikkeling van de grensspanning onder nieuwe bermen dient gemonitord en geanalyseerd te worden. Dit houdt in dat voorafgaand aan ophogingen de 0-situatie op een aantal maatgevende locaties goed in beeld gebracht moet worden. Hierbij dienen sonderingen gecombineerd te worden met boringen en monsternamen waarbij op de monsters sterkte (DSS/TX) en samendrukkingsproeven (SAM/CRS) moeten worden uitgevoerd. Daarnaast dienen de waterspanningen voorafgaand en tijdens het ophogen ook goed gemonitord te worden. Hiermee kan een betere inschatting gemaakt worden van de ontwikkeling van de POP/grensspanning tijdens het aanbrengen van de bermen, hiermee kan tijdens de uitvoering van de werkzaamheden nogmaals een optimalisatie plaatsvinden van de dimensies van de bermen.

Ook dient het ontstaan van grensspanningen na dijkversterkingen nog beter bekeken te worden. Deze is vaak het product van meer dan alleen schommelingen in freatisch of stijghoogteniveau. Wanneer een bepaalde POP waarde in de huidige situatie aanwezig is, is het mogelijk dat in de toekomst zich weer een POP 'ontwikkelt'. Door de huidige POP in een gevoeligheidsberekening mee te nemen kan het effect hiervan worden nagegaan. Het ontstaan van deze grensspanning kan ook worden nagegaan door bijvoorbeeld in en achter een berm, aangebracht in de voorgaande dijkversterkingsronde, onderzoek uit te voeren.

Daarnaast dienen diverse gevoeligheden nog bepaald te worden:

- Aantal verticale zones bij verschillende situaties in relatie tot horizontale gelaagdheid van de grensspanning;
- Optellen van een POP waarde bovenop de TDO spanning;
- Bepalen van 2D effect op korrelspanning onder en naast de dijk en deze bij een TDO berekening meenemen en invloed bepalen op de resultaten.

Literatuurlijst

- [1] Toepassen grensspanning onder stabiliteitsbermen; 1220647-003-GEO-0004; Deltares; 22-9-2017
- [2] Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit; Definitief; Ministerie van Infrastructuur en Milieu; 1-12-2016
- [3] Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken; DWW-2004-057 / ISBN-90-369-5565-3; Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW); 1-9-2004
- [4] CPTtool Deltares; versie 1.0 build 150; 1-7-2017

Het kennisplatform risicobenadering is opgericht ter ondersteuning van de keringbeheerder bij toepassen van de nieuwe normering en de risicobenadering. Adviezen en ondersteuning van het kennisplatform risicobenadering hebben een informele status en staan gelijk aan collegiaal advies.