


# **POVM Beter benutten actuele sterkte KIJK**

## Activiteit 6 – Ontwerpverkenning

Definitief

**POV**

MACRO  
STABILITEIT



**Auteur: M.A.T. Visschedijk**  
**Datum: maart 2017**

**Versie: 3**

**Project**  
1230804-012




**Pagina's**  
18

### Samenvatting

De probabilistische “Bewezen Sterkte” methodiek verdisconteert de invloed van de overleefde belasting op de faalkans tijdens de toetsituatie. Voorliggende verkenning beschrijft de technische mogelijkheden om de methodiek aanvullend ook toe te passen voor de ontwerpsituatie. Dat is van belang voor gevallen waarin toch versterking nodig is, ondanks de “Bewezen Sterkte” toepassing tijdens de toetsing. Waar nodig worden daarbij aanbevelingen gegeven voor vervolgacties. Verder worden ook aanbevelingen gegeven om de praktische wenselijkheid en toepasbaarheid van probabilistisch ontwerpen te gaan onderzoeken, al dan niet in combinatie met bewezen sterkte.

Een probabilistische stabiliteitsbepaling met de bewezen sterkte methodiek blijkt technisch gesproken toepasbaar voor zowel toetsen als ontwerpen. Een probabilistisch ontwerp is doorgaans al scherper dan het traditionele semi-probabilistische ontwerp. De aanvullende meerwaarde van de bewezen sterkte methodiek blijft in de ontwerpsituatie bewaard, zolang de lagen die het maatgevend glijvlak in de ontwerpsituatie doorsnijdt vergelijkbaar zijn met de lagen die worden doorsneden in de overleefde situatie. Bovendien mag de ligging van het maatgevend glijvlak in horizontale richting niet te veel verschillen. Een vergelijkbare ligging van het glijvlak kan in veel gevallen worden geforceerd door een slim stabiliteitsontwerp. Daarvoor worden diverse suggesties gegeven.

Het verdient aanbeveling om als volgende stap een evaluatie uit te voeren van de praktische toepasbaarheid en wenselijkheid van probabilistisch ontwerpen (met of zonder “Bewezen Sterkte”). Dat kan met hulp van een aantal casestudies. Bij de vergelijking van semi-probabilistisch en probabilistisch ontwerpen wordt aanbevolen om naast de kosteneffectiviteit ook de robuustheid van het integrale ontwerp te beschouwen. Na een eventuele positieve conclusie uit de evaluatiefase kan de al bestaande handreiking voor faalkansberekening en faalkansupdate worden uitgebreid voor ontwerp toepassingen. Daarna zouden eerste pilot-toepassingen kunnen volgen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec 2016						
2	Jan. 2017						
3	Mrt. 2017	Marcel Visschedijk		Arno Rozing		Leo Voogt	
		Mark van der Krogt					

**Status**  
definitief

8 maart 2017

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Opdrachtkader en doel	1
1.2 Veronderstelde voorkennis	1
1.3 Huidige “Bewezen Sterkte” toepassing voor toetsing	1
1.4 Probleemstelling	3
1.5 Vraagstelling	4
<b>2 Probabilistisch ontwerpen met bewezen sterkte</b>	<b>5</b>
2.1 Randvoorwaarden voor glijvlakligging	5
2.2 Probabilistisch ontwerpen met Bewezen Sterkte	5
2.3 Slim ontwerpen	8
2.3.1 Versterking is nodig vanwege een ander toetsspoor	8
2.3.2 BS geeft onvoldoende verbetering om tot goedkeuring voor macrostabiliteit te komen, of versterking is nodig vanwege een sterk afwijkende ligging van het maatgevend glijvlak.	11
2.4 Benutten van informatie tijdens de uitvoeringsfase	12
<b>3 Aanbevolen vervolgtraject</b>	<b>13</b>
<b>Referenties</b>	<b>15</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Case studie naar bruikbaarheid parameterupdate</b>	<b>16</b>
A.1 Inleiding	16
A.2 Aanpak	16
A.3 Analyse	18
A.4 Resultaten	19
A.5 Conclusie	19

# 1 Inleiding

## 1.1 Opdrachtkader en doel

Binnen de “Project Overstijgende Verkenning Macrostablieit” (POVM) wordt onderzoek uitgevoerd naar het “Beter benutten van Actuele Sterkte”. Dat gebeurt onder andere door gebruik van de “Bewezen Sterkte” (BS) techniek. Met deze techniek wordt bepaald welke invloed de al overleefde belasting heeft op de faalkans tijdens de toetsituatie. Activiteit 6 uit het plan van aanpak (Deltares, 2015) betreft een BS toepassing voor drie praktijkgevallen. Activiteit 6 is nader uitgewerkt in Deltares offerte 1230804-000-GEO-002 (Deltares, 2016a). In de Deltares offerte wordt ook een (beperkte) verkenning aangeboden naar de mogelijkheden voor BS toepassing bij het ontwerp. De voorliggende versie 2 doet verslag van deze verkenning. In deze versie 2 is het commentaar verwerkt dat is ontvangen op versie 1 (Deltares memo, gedateerd 21 december 2016).

Het primaire doel van het voorliggende rapport is om vast te stellen wat de technische mogelijkheden zijn voor een probabilistisch ontwerp met bewezen sterkte, waar nodig in combinatie met aanbevelingen voor vervolgacties. De strekking van het voorliggende rapport is dus niet om al uitspraken te doen over de praktische wenselijkheid en toepasbaarheid van probabilistisch ontwerpen, al dan niet in combinatie met bewezen sterkte.

## 1.2 Veronderstelde voorkennis

De inhoud van het concept voor het sterkte deel van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium wordt bekend verondersteld (Ministerie van I&M, 2016), evenals de inhoud van het relevante deel van de achterliggende technische rapporten waarnaar in het concept wordt verwezen. Aanwijzingen voor de huidige BS toepassing voor toetsing worden gegeven in de handreiking (Deltares, 2016d). Het BS achtergronddocument bevat een nadere beschrijving van de methode (Deltares, 2016b). De inhoud van deze twee BS documenten wordt ook bekend verondersteld.

## 1.3 Huidige “Bewezen Sterkte” toepassing voor toetsing

Hierna volgt een korte samenvatting en analyse van de huidige BS toepassing voor toetsing, met primaire focus op de zaken die van belang zijn voor aanvullende ontwerp toepassing.

De BS aanpak brengt in rekening wat de invloed is van de overleefde belasting op de faalkans tijdens de toetsituatie. Dat gebeurt impliciet door aanpassing (*update*) van de actuele sterkte. Een BS aanpak is vooral effectief wanneer de faalkans zowel in de overleefde situatie als in de toetsituatie grotendeels wordt beïnvloed door dezelfde tijdsafhankelijke en onzekere parameters. De invloed van waterstandvariatie en de invloed van andere tijdsafhankelijke verschillen tussen beide situaties moet dus relatief klein zijn. Toepassing van BS voor toetsing van een vak vereist verder dat er relatief kleine vakken worden toegepast, waarbinnen niet of nauwelijks ruimtelijke variatie optreedt in waterstand, (3D) geometrie, laagligging, stijghoogteveld en grensspanningsveld.

Een overleefde belasting is in principe een combinatie van waterstand, neerslag, overslag en mogelijk zwaar transport. De waterstand, overslag en neerslag zijn echter geen directe belastingen, maar alleen tijdsafhankelijke randvoorwaarden voor het stijghoogteveld. Het stijghoogteveld beïnvloedt weer de (deels) spanningsafhankelijke actuele sterkte van grond. In een reguliere toetsing wordt het stijghoogteveld in het dijklichaam en in de watervoerende en cohesieve lagen afhankelijk gesteld van de buitenwaterstand. Daarbij wordt gebruik

gemaakt van de conservatieve schematiseringsregels volgens het aanstaande wettelijk beoordelingsinstrumentarium WBI (Deltares, 2016c, pp. 19-24). Het verloop in de dijk en in de watervoerende lagen wordt volgens die regels bepaald door een polderpeil, een dempingsfactor in de binnenteen en een leklengte vanaf de binnenteen. Het verloop in de cohesieve lagen wordt verder ook nog bepaald door de dikte van de zogenaamde indringingszone.

De actuele sterkte wordt verder beïnvloed door de (3D) dijkgeometrie en de laagliggingen. Bij een sterktemodellering met cohesie  $c$  en wrijvingshoek  $\phi$  treedt deze beïnvloeding op via de verticale effectieve spanning  $\sigma'_v$ . Bij een sterktemodellering met “ongedraineerde sterkte”  $s_u$  (onder invloed van grondparameters  $S$  en  $m$  en een grensspanningsveld  $p_g$ ) treedt deze beïnvloeding vooral op via de grensspanning. De grensspanning neemt toe met de leeftijd en door (voor)belasten tot voorbij de oorspronkelijke grensspanning.

In de recente BS toepassingen wordt uitgegaan van onzekere grondsterkte-parameters ( $c$  en  $\phi$  voor zand en  $S$  en  $m$  voor cohesieve lagen) en van een onzekere modelfactor voor de glijvlakberekening. Bij de verwachtingswaarden voor het aangenomen grensspanningsveld wordt verder ook een constante variatiecoëfficiënt aangenomen. De laagliggingen in het vak worden in de recente BS toepassingen zeker verondersteld, door gebruik te maken van lokaal grondonderzoek. Mochten de laagliggingen in het vak echter onzeker zijn, dan kan aanvullend gebruik worden gemaakt van stochastische ondergrondmodellen. In de geanalyseerde doorsnede wordt het bij elke buitenwaterstand aangenomen stijghoogteveld bij voorkeur gebaseerd op metingen. Die worden gecombineerd met conservatieve aannames voor de situaties die anders zijn dan gemeten. Conservatief voor de toetsing wil zeggen met een kleine kans dat onterecht stabiliteit wordt voorspeld, dus hoge stijghoogtes. Conservatief voor de observaties wil echter zeggen met een kleine kans dat onterecht instabiliteit wordt voorspeld, dus lage stijghoogtes. Voor de verwachtingswaarden van het grensspanningsveld worden vergelijkbare conservatieve aannames gedaan. Dat wil zeggen een hoge verwachtingswaarde voor de overleefde situatie en een lage verwachtingswaarde voor de toetsituatie.

Voor het bepalen van de invloed van de overleefde belasting op de faalkans in de toetsituatie zijn tot nu toe de volgende twee BS methoden toegepast:

- **BS-1:** De exacte methode. Dat wil zeggen een volledige faalkansbepaling met een Monte-Carlo-achtige (MC-achtige) methode, met gelijktijdige variatie van de buitenwaterstand en van alle onzeker veronderstelde tijdsafhankelijke parameters. Daarbij worden voor de toetsing de realisaties uitgefilterd waarvan de stabiliteitsfactor onvoldoende is in de parallelle realisatie bij de overleefde buitenwaterstand (met dezelfde tijdsafhankelijke parameters en modelfactor). De aangepaste faalkans voor de toetsing is dan het aantal realisaties dat na filtering nog faalt gedeeld door het totaal aantal realisaties na filtering. Deze aanpak is zeer tijdrovend wanneer hoge betrouwbaarheidsniveaus worden vereist. Er zijn dan namelijk veel realisaties nodig waarbij steeds een glijvlakberekening moet worden uitgevoerd. Een enkele doorsnedeberekening voor de in praktijk gangbare betrouwbaarheidsniveaus (betrouwbaarheidsindex  $\beta$  tussen de 3 en 5) duurt op dit moment tussen een week en vijftig jaar.

In de huidige toepassing wordt gebruik gemaakt van een vaste ligging van het glijvlak in alle realisaties. Deze ligging is niet noodzakelijkerwijs de werkelijke ligging van het maatgevend glijvlak voor een bepaalde realisatie. Deze beperking is echter niet inherent

aan de methode. Het is in principe mogelijk om de maatgevende glijvlaklocatie voorafgaand aan elke realisatie eerst vrij te laten bepalen, zoals normaliter ook gebeurt in een deterministische berekening.

- **BS-2:** De kwetsbaarheidscurve methode. Dat wil zeggen eerst bepaling van kwetsbaarheidscurves met FORM (*First Order Reliability Method*), gevolgd door gebruik van deze curves binnen een MC-achtige methode. Kwetsbaarheidscurves (ook wel *fragility curves* genoemd) geven de faalkans (of de alternatieve betrouwbaarheidsindex  $\beta$ ) als functie van de buitenwaterstand. In de voorafgaande FORM berekeningen vindt dus alleen variatie plaats van alle onzeker veronderstelde sterkte-variabelen en modelonzekerheid. De kwetsbaarheidscurves worden zowel bepaald voor de toetsituatie als ook voor de overleefde situatie. De curves worden daarna, net zoals bij BS-1, weer gebruikt voor de gefilterde faalkansbepaling met een MC-achtige methode. Tijdens deze tweede stap wordt alleen nog de heersende buitenwaterstand (belasting) en de kritieke buitenwaterstand (sterkte) gevarieerd. De kansverdeling voor de kritieke buitenwaterstand wordt bepaald uit de kwetsbaarheidscurves. Daarbij wordt de (doorgaans sterke) correlatie in rekening gebracht tussen de kritieke buitenwaterstand in de overleefde situatie en in de toetsituatie. Deze correlatie wordt berekend met hulp van de zogenaamde invloedscoëfficiënten die volgen uit de FORM berekeningen. Een BS-2 berekening is aanzienlijk sneller dan de BS-1 berekening (indicatief een half uur). De BS-2 aanpak wordt daarom in praktijk steeds toegepast.

In de huidige toepassing wordt er voor alle waterstanden gebruik gemaakt van eenzelfde ligging van het glijvlak. Deze ligging is niet noodzakelijkerwijs de werkelijke ligging van het maatgevend glijvlak voor alle waterstanden die met FORM worden doorgerekend. Deze beperking is echter niet inherent aan de methode. Het is in principe mogelijk om de maatgevende glijvlaklocatie bij elke waterstand op semi-probabilistische wijze vrij te bepalen (bij de ontwerpwaarden voor de sterkte-parameters), voorafgaand aan de daarop volgende FORM berekening.

#### 1.4 Probleemstelling

- De bewezen sterkte toepassing is gebaseerd op een probabilistische analyse. Aan de ene kant zal een probabilistisch ontwerp doorgaans scherper zijn dan het semi-probabilistische ontwerp, zoals momenteel gangbaar. Aan de andere kant is een aangescherpt probabilistisch ontwerp doorgaans ook minder robuust.
- Zolang wordt gerekend met één vastgelegde locatie voor het glijvlak mag de BS aanpak alleen worden gebruikt wanneer de werkelijke ligging van het maatgevend glijvlak in de toets- of ontwerpsituatie niet of nauwelijks verschilt van de ligging in de overleefde situatie.
- Bij het hypothetisch gebruik van een vrije ligging per BS-1 realisatie of per FORM berekening voor BS-2 mag bovenstaande eis worden verruimd. Daarvoor geldt wel als voorwaarde dat er langs de verschillend gelegen glijvlakken weinig tot geen ruimtelijke variatie kan optreden in de onzekere sterkte-parameters. Daarmee wordt bedoeld de parameteronzekerheid na middeling over zowel de doorsnede laagdikte (verticaal) als ook over de breedte van het afschuifvlak (horizontaal langs de dijkas).
- De BS aanpak is vooral effectief wanneer de glijvlakligging en faalkans zowel in de overleefde situatie als in de toets- of ontwerpsituatie grotendeels worden beïnvloed door

dezelfde tijdsonafhankelijke en onzekere parameters. De invloed van veranderingen tussen overleefde situatie en toets- of ontwerpsituatie (in termen van geometrie, laagligging, stijghoogteveld en grensspanningsveld) moet voor effectieve toepassing dus beperkt blijven. De BS aanpak zal haar meerwaarde verliezen wanneer de ligging van het maatgevende glijvlak in de toetsituatie sterk verandert. Dat gebeurt bijvoorbeeld bij oppervlakkige instabiliteit als gevolg van infiltratie na golfoverslag. Dat kan ook het geval zijn wanneer een vak dankzij de BS aanpak wordt goedgekeurd op macrostabiliteit, maar wanneer er in de ontwerpsituatie toch nog versterking nodig is vanwege andere toetssporen. Bij een versterking in grond zullen de veranderingen tussen overleefde situatie en ontwerpsituatie namelijk (veel) groter worden en zal het gebruik van observaties uit het verleden dus minder waardevol worden.

## 1.5 Vraagstelling

Uit de probleemstelling in § 1.4 zijn in principe de volgende vijf vragen af te leiden:

- 1 Welke verbetering is wenselijk in de BS-1 en BS-2 procedure met betrekking tot een meer vrije glijvlakligging en onder welke randvoorwaarden is het gebruik van verschillend gelegen maatgevende glijvlakken toegestaan.
- 2 Voor het geval dat de toets op macrostabiliteit ook na (de impliciet probabilistische) BS toepassing niet voldoet: kan in het ontwerp dan toch nog een significant voordeel worden geput uit probabilistisch ontwerpen, met of zonder BS.
- 3 Voor het geval dat versterking nodig is vanwege andere toetssporen of vanwege oppervlakkige instabiliteit door overslag: welke slimme ontwerp oplossingen zijn beschikbaar om de verschillen tussen overleefde situatie en ontwerpsituatie zo klein mogelijk te maken en zo voor stabiliteitscontrole de maximale winst van de BS aanpak te behouden of juist te creëren.
- 4 Op welke wijze kan de stabiliteitsmonitoring tijdens ophoging, in combinatie met het de daarbij gemeten stijghoogtes, tevens worden benut voor het daarna toetsen en ontwerpen met bewezen sterkte.
- 5 In welke mate is het wenselijk om scherper te gaan ontwerpen door middel van probabilistische analyses, en welke robuustheid is dan nog vereist.

De vragen 1 tot en met 3 zijn gericht op de technische mogelijkheden en beperkingen voor het gebruik van de probabilistische BS techniek tijdens het ontwerp. De beantwoording van deze vragen valt primair binnen het blikveld van de verkenning (hoofdstuk 2). Antwoorden op vraag 4 en vraag 5 worden in deze verkenning nog niet gegeven, maar er wordt wel nadrukkelijk aanbevolen om deze vragen mee te nemen in het vervoltraject (hoofdstuk 3).

## 2 Probabilistisch ontwerpen met bewezen sterkte

### 2.1 Randvoorwaarden voor glijvlakligging

De huidige BS aanpak gaat uit van één vaste locatie voor het maatgevend glijvlak. Dat beperkt de toepasbaarheid op voorhand tot situaties waar de ligging van het maatgevend glijvlak (vrijwel) gelijk is voor de overleefde situatie en de toets- of ontwerpsituatie. Het verdient aanbeveling om bij zowel de BS-1 als BS-2 aanpak ook een vrije glijvlakligging toe te staan en vervolgens na te gaan welke verschillen dan gaan optreden. In het BS-2 geval betekent dit dat voorafgaand aan elke FORM berekening eerst deterministisch de meest aannemelijke ligging van het maatgevende glijvlak in het ontwerppunt moet worden bepaald. Voor de onzekere tijdsonafhankelijke variabelen worden in die deterministische berekeningen rekenwaarden gebruikt.

Als randvoorwaarde voor het gebruik van verschillende glijvlakliggingen geldt verder dat de verschillende liggingen in de doorsnede geen significante invloed mogen hebben op de onzekere sterkte-parameters per grondlaag, na voorafgaande middeling over de laagdikte (verticaal) en breedte van het afschuifvlak (horizontaal langs de dijkas). Voor de grootteorde van de horizontale correlatielengte van grondeigenschappen wordt vaak 50m aangenomen. De aannemelijke breedte van het afschuifvlak (gemeten langs de dijk-as) ligt in dezelfde orde. Daaraan kan bijvoorbeeld de eis worden gekoppeld dat horizontale verschillen tussen de ligging van de intredepunten en ook de uitredepunten van glijvlakken niet meer dan 30 % van deze correlatielengte mogen bedragen. Het is aannemelijk dat de beperkte ruimtelijke variaties die dan kunnen optreden in de over de laagdikte gemiddelde waarden van sterkteparameters grotendeels weer teniet zullen worden gedaan door de verdere middeling over de veel grotere breedte van het afschuifvlak in de dijkasrichting.

### 2.2 Probabilistisch ontwerpen met Bewezen Sterkte

Het huidige ontwerpinstrumentarium (Rijkswaterstaat, 2015a) staat een semi-probabilistisch of een probabilistisch doorsnedeontwerp toe. In beide gevallen moet worden getoetst aan een maximaal aanvaardbare faalkans in de doorsnede.

- Binnen een probabilistisch ontwerp wordt direct een faalkans berekend, die vervolgens expliciet wordt getoetst aan de maximaal aanvaardbare waarde in de doorsnede. Een dergelijke probabilistische doorsnede-berekening wordt doorgaans uitgevoerd met FORM.
- In een semi-probabilistisch ontwerp wordt impliciet getoetst of de faalkans beneden de maximaal aanvaardbare waarde blijft. Daartoe wordt de stabiliteitsfactor deterministisch getoetst aan een minimaal vereiste waarde. Daarbij wordt gebruik gemaakt van karakteristieke waarden voor belasting en sterkte, die worden doorvertaald naar rekenwaarden met hulp van voorgeschreven partiële veiligheidsfactoren. De voorgeschreven partiële factoren zijn bovengrenzen, die zijn bepaald met een probabilistische kalibratie voor veel verschillende gevallen. Door het gebruik van bovengrenzen blijft de faalkans in al die gevallen onder de maximaal aanvaardbare doorsnedewaarde.

Binnen beide methoden worden dus dezelfde onzekere parameters meegenomen en worden daarvoor ook gelijke kansverdelingen aangehouden. Dat semi-probabilistisch ontwerpen doorgaans conservatiever is dan probabilistisch ontwerpen komt uitsluitend omdat de toe te passen partiële factoren bovengrenzen zijn, terwijl de probabilistische berekening wordt toegesneden op de specifieke doorsnede. Ter illustratie van het bovengrenskarakter toont de rode lijn in Figuur 2.1 de relatie die volgens het WBI moet worden gebruikt tussen de



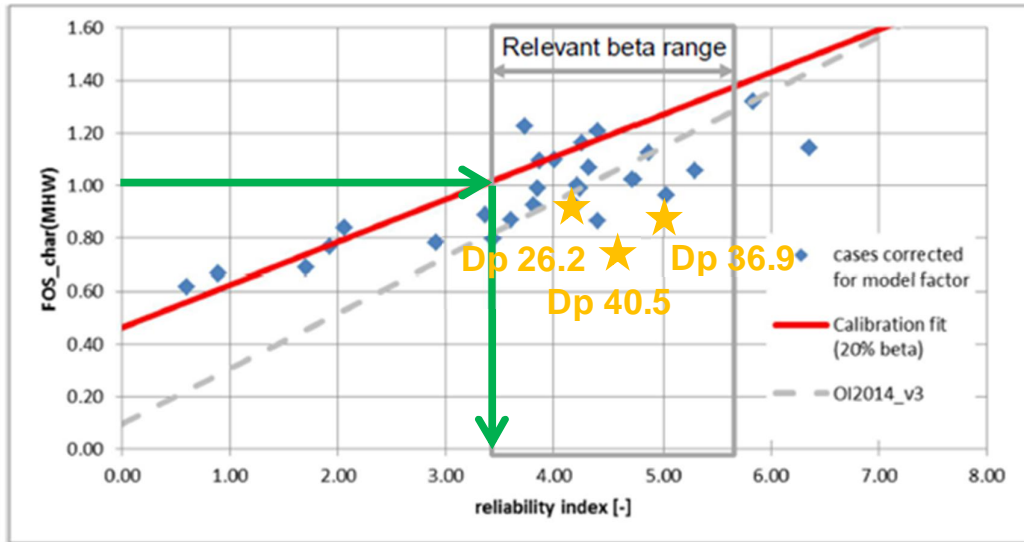
minimaal vereiste stabiliteitsfactor en de minimaal vereiste betrouwbaarheidsindex. Een veiligheidsfactor gelijk aan 1 correspondeert met de referentiewaarde van 3.5 voor de betrouwbaarheidsindex. De waarde van 3.5 correspondeert weer met een faalkans van minder dan 1/4000 per jaar. De blauwe stippen tonen de semi-probabilistisch berekende stabiliteitsfactor tegen de probabilistisch berekende betrouwbaarheidsindex voor de gevallen die zijn gebruikt ter kalibratie. De oranje sterren tonen dezelfde waarden voor de drie gevallen die momenteel binnen POVM activiteit 6 worden beschouwd (Deltares, 2016a). Uit de figuur blijkt dat de werkelijke waarde van de betrouwbaarheidsindex in de beschouwde gevallen (veel) groter is dan de volgens de rode lijn minimaal vereiste waarde.

Figuur 2.2 geeft in essentie het stappenplan weer voor faalkansanalyse en *update* in de toetssituatie. Daarbij wordt gewerkt van grof naar fijn. Het begint met het aanscherpen van de schematiseringen voor de gewone semi-probabilistische analyses op basis van aanvullend terreinonderzoek en/of monitoringgegevens (stap 1)<sup>1</sup>. Indien nodig wordt vervolgens de stap gemaakt naar probabilistische faalkansanalyses (stap 2). Ten slotte kan de berekende faalkans, indien nodig en mogelijk, nog worden bijgesteld door het in rekening brengen van overleefde belastingcondities ('bewezen sterkte', stap 3).

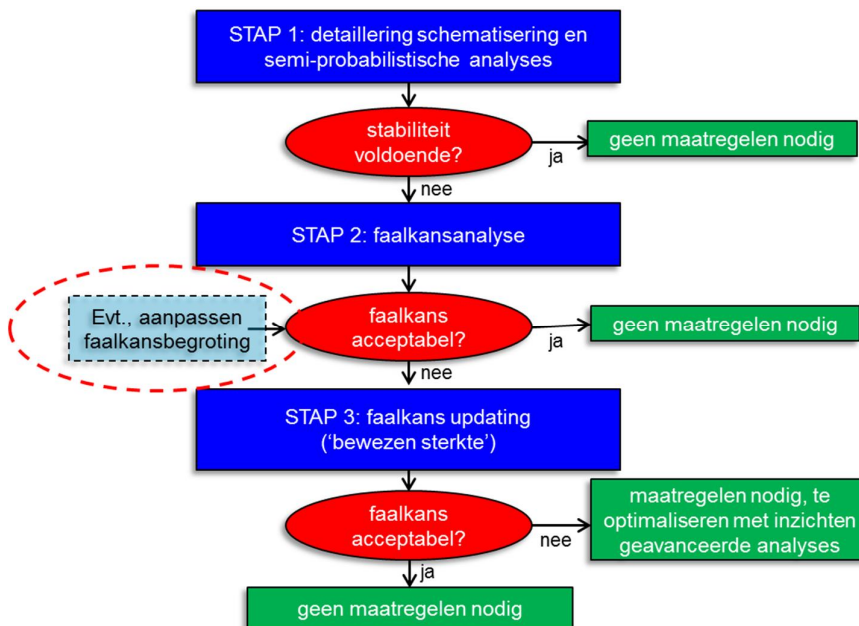
Indien een probabilistisch ontwerp vanuit robuustheidsoogpunt aanvaardbaar wordt geacht, ligt het op vergelijkbare wijze voor de hand om in de ontwerpsituatie te starten met een semi-probabilistisch ontwerp, gevolgd door verfijning met een probabilistisch ontwerp. Deze verfijning leidt ook zonder BS al tot een scherper ontwerp. Indien tijdens de toetsing een aanvullende meerwaarde is gebleken van BS, dan kan toepassing van BS tijdens de probabilistische verfijning ook nog voordeel opleveren. De BS-2 methode rekent voldoende snel om dat eenvoudig uit te proberen.

---

<sup>1</sup> De semi-probabilistische analyse werd in het verleden ook vaak nog aangescherpt door gebruik van "pseudokarakteristieke waarden". Deze methodiek brengt in rekening dat de de 5% karakteristieke ondergrenswaarde van de totale schuifsterkte van alle grondlagen langs het gehele schuifvlak hoger is dan het totaal van de 5% ondergrenswaarden van de schuifsterkte van alle doorsneden grondlagen. Dit is effect is echter al impliciet meegenomen bij de kalibratie van de partiële factoren volgens WB2017 (Duinen, 2016f).



Figuur 2.1 De rode lijn toont de volgens WBI toe te passen relatie tussen de minimaal vereiste stabiliteitsfactor FOS (semi-probabilistisch) en de minimaal vereiste betrouwbaarheidsindex in de doorsnede (Deltares, 2016a). Deze relatie is gebaseerd op tijdens kalibratie doorgekende gevallen (blauwe punten). De oranje punten tonen de semi-probabilistisch berekende veiligheidsfactor en de probabilistisch berekende faalkans voor de 3 gevallen die binnen activiteit 6 worden beschouwd



Figuur 2.2 Stappen in de toetsing op macrostabiliteit (Deltares, 2016e). Stap 1 is de semi-probabilistische analyse. Stap 2 is de probabilistische analyse zonder BS. Stap 3 is de probabilistische analyse met BS

In het kader van deze verkenning is ook nog onderzocht of het mogelijk is om, in plaats van de update door filtering, de kansverdelingen en onderlinge correlaties van de onzekere tijdsonafhankelijke parameters aan te passen. Dit is zeer wenselijk om de aangepaste

parameters vervolgens rechtstreeks in het ontwerp te kunnen gebruiken. Bijlage A beschrijft het resultaat bij toepassing van deze aanpak op een voorbeeldgeval. Uit het rekenvoorbeeld blijkt echter dat daarmee vervolgens veel minder afname van de faalkans (of toename van de betrouwbaarheidsindex) wordt berekend dan kan worden geïncasseerd bij rechtstreekse toepassing van filtering. De reden daarvoor is dat het aangenomen correlatiemodel (met lineaire correlatiecoëfficiënten) onvoldoende geschikt blijkt om dezelfde falende en niet-falende realisaties te vinden als bij rechtstreeks gebruik van de filtering techniek.

### 2.3 Slim ontwerpen

Bij de hierna behandelde opties voor het slim ontwerpen wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende twee gevallen:

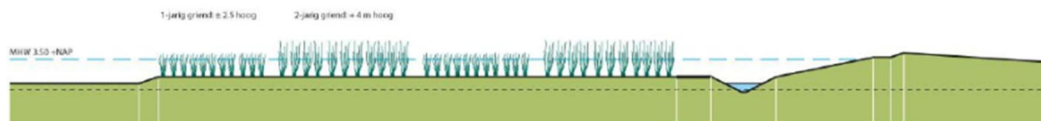
- Er is versterking nodig vanwege een ander toetsspoor.
- BS geeft onvoldoende verbetering om tot goedkeuring te komen voor macrostabiliteit, of BS heeft (nog) geen meerwaarde omdat in de toetssituatie een volledig andere locatie van het glijvlak maatgevend wordt. In het laatste geval gaat het bijvoorbeeld om oppervlakkige instabiliteit als gevolg van overslag, indien die alleen tijdens de toetssituatie maatgevend is.

#### 2.3.1 Versterking is nodig vanwege een ander toetsspoor

Als gebruik van BS er toe leidt dat een doorsnede op macro-stabiliteit wordt goedgekeurd, dan kan er toch nog versterking nodig zijn om te voldoen aan de flankerende eisen voor bijvoorbeeld overloop/overslag of piping. Het BS toepassingsgebied kan onder dergelijke omstandigheden worden vergroot door gebruik van alternatieve ontwerpmaatregelen. Die zorgen er voor dat wordt voldaan aan de eisen voor alle toetssporen, terwijl de voor macrostabiliteit belangrijke verschillen tussen de ontwerpsituatie en de overleefde situatie toch zo klein mogelijk blijven. De uitvoeringskosten en robuustheid van dergelijke alternatieve ontwerp oplossingen moeten dan uiteraard wel worden afgewogen tegen de uitvoeringskosten en robuustheid van een traditioneel ontwerp in grond voor bijvoorbeeld hoogte of piping. Bij een traditioneel ontwerp zal het voordeel van BS voor macro-stabiliteit kunnen afnemen.

Bij alternatieve ontwerp oplossingen valt onder andere te denken aan de volgende opties:

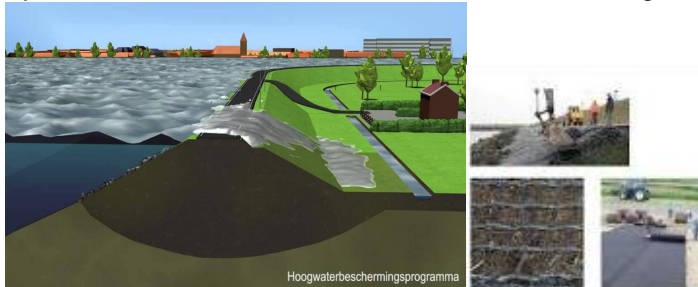
- 1) Verminder of voorkom golfoverslag of het effect van golfoverslag door bijvoorbeeld:
  - a) Golfremmende maatregelen buitenwaarts, zoals wilgenbossen of voorlanden.



- b) Golfploopremmende maatregel op het buitentalud, zoals bijvoorbeeld *Hillblock*.



- c) Overslagbestendig materiaal. Naast gras/klei, asfalt, open steen asfalt of steenzetting bijvoorbeeld ook *Elastocoast*, *Bentofix* of *Smart Grass* geotextiel.



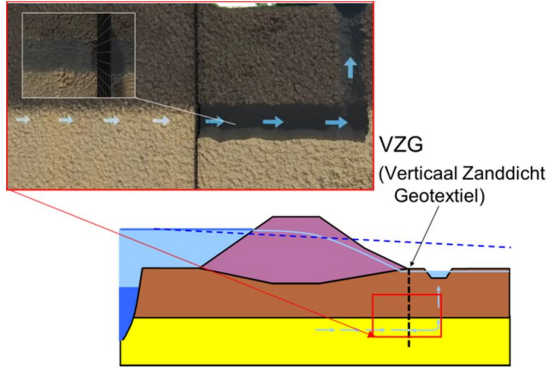
- d) Flexibele keringen.



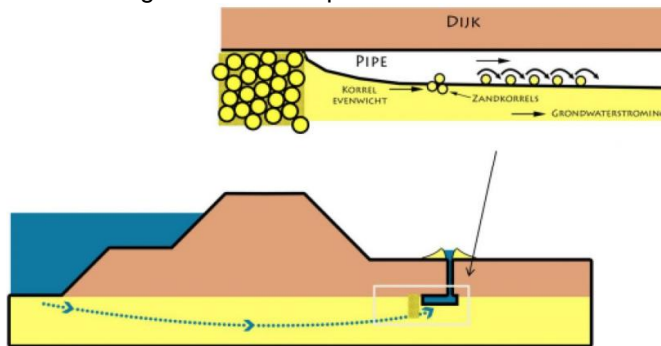
- e) Een lichtgewicht constructie op de dijkkrui. Door deze gewichtsneutrale oplossing wordt de macrostabiliteit nauwelijks beïnvloed.

2) Voorkom het optreden van piping, bijvoorbeeld door:

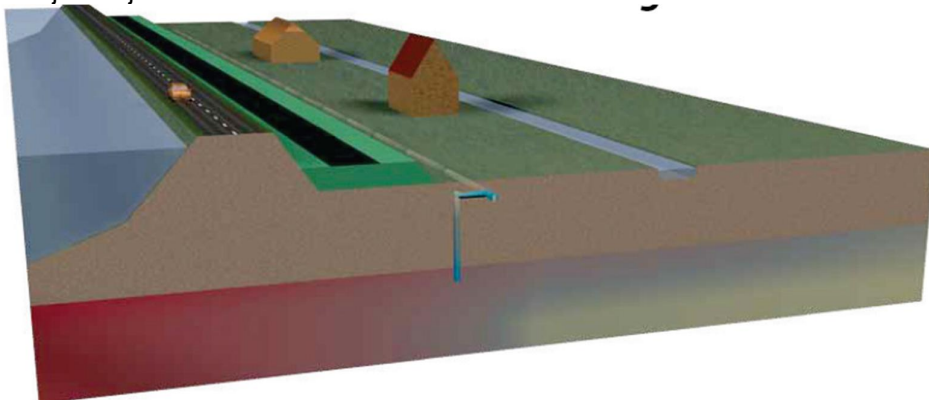
a) Verhindering van zandtransport met een *Verticaal Zanddicht Geotextiel*.



b) Verhindering van zandtransport met een *Grof-Zand-Barrière*.



c) Voorkom opbarsten en daarmee ook piping, door verlaging van de stijghoogte in het diepe zand met een drainagesysteem. Hierbij wordt ook macrostabiliteit gunstig beïnvloed. Bijvoorbeeld het systeem *De waterontspanner*, zoals toegepast in de lekdijk nabij Alblasserwaard.

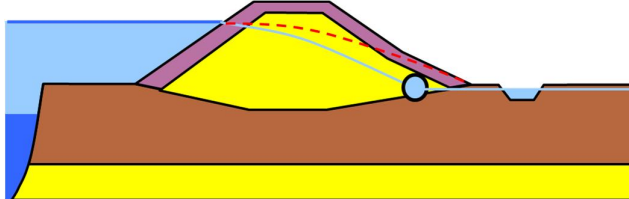


2.3.2 BS geeft onvoldoende verbetering om tot goedkeuring voor macrostabiliteit te komen, of versterking is nodig vanwege een sterk afwijkende ligging van het maatgevend glijvlak.

Wanneer blijkt dat de maatgevende glijvlakligging in de toetsituatie sterk afwijkt van de maatgevende glijvlakligging in de overleefde situatie heeft BS toepassing niet of nauwelijks meerwaarde. Dit geldt vooral indien in de toetsituatie een oppervlakkige ligging van het glijvlak maatgevend wordt, vanwege infiltratie na overslag. In dergelijke gevallen kunnen maatregelen worden overwogen waardoor de ligging van het glijvlak in de overleefde situatie en ontwerpsituatie weer vergelijkbaar worden.

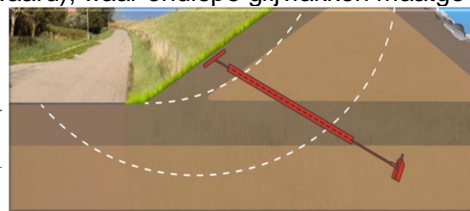
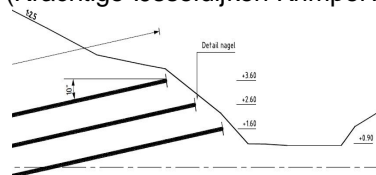
Naast het verminderen of verhinderen van golfoverslag (en daarmee de infiltratie na golfoverslag), zoals al behandeld in § 2.3.1, zijn verder ook nog de volgende twee ontwerpmaatregelen voor macrostabiliteit denkbaar.

- 1) Pas maatregelen toe die het stijghoogteveld in de ontwerpsituatie gunstiger maken, zoals bijvoorbeeld een drain in de binnenteen.

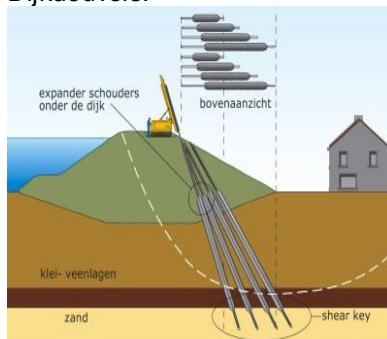


- 2) Voorkom kritieke glijvlakken door bijvoorbeeld:

- a) Dijkvernageling of *JLD* *anchors*. Deze technieken zijn zowel toepasbaar voor diepe als ondiepe glijvlakken. Toepassing is onder andere mogelijk voor dijkversterking KJK (Krachtige IJsseldijken Krimperwaard), waar ondiepe glijvlakken maatgevend zijn.



- b) Dijkdeuvels.



#### **2.4 Benutten van informatie tijdens de uitvoeringsfase**

Wanneer ophoging plaatsvindt, dan veroorzaken de tijdelijke wateroverspanningen een tijdelijke stabiliteitsafname. Het is daarom gebruikelijk deze wateroverspanningen in de tijd te meten en te gebruiken om de ophoogsnelheid te optimaliseren. Dit kan ook als een proefbelasting worden gezien. Deze informatie kan daarom ook worden gebruikt als een reeks van observaties voor het met de BS aanpak naar boven bijstellen van de faalkans in de eindsituatie. Deze bijstelling kan voordelig zijn bij volgende toetsrondes en/of bij het versterken van nabijgelegen vakken. Er kan zelfs worden overwogen om tijdens uitvoering bewust de stabiliteitsgrens op te zoeken, zolang reparatie na uitvoeringsinstabiliteit snel kan plaatsvinden.

Het verdient aanbeveling om de eventuele meerwaarde te evalueren door toepassing voor een of meer praktijkgevallen.

### 3 Aanbevolen vervolgtraject

De toepassing van een probabilistisch stabiliteitsontwerp met en zonder BS, eventueel in combinatie met slimme alternatieve ontwerp oplossingen, leidt tot meer kosteneffectieve integrale ontwerpen. Daarbij moet echter nog wel de vraag worden beantwoord in hoeverre de kostenbesparing gedurende de versterking opweegt tegen de wellicht toegenomen kans op afkeuring tijdens de ontwerplevensduur, als gevolg van een minder robuust ontwerp. Met integrale ontwerpen worden ontwerpen bedoeld waarin alle faalmechanismen zijn beschouwd.

Het verdient aanbeveling om de invloed op kosteneffectiviteit en robuustheid nader te evalueren, op basis van casestudies. Om de technische toepasbaarheid te vergroten wordt aanbevolen om het beschikbare BS software-instrumentarium voorafgaand eerst uit te breiden voor vrije glijvlakligging. Wat met vrije glijvlakligging wordt bedoeld is beschreven in § 1.3 en § 2.1. Bij een eventuele positieve conclusie kunnen vervolgens aanwijzingen worden opgesteld voor praktijktoepassing, waarna eerste praktijkpilots kunnen volgen.

De volgende drie vervolgfasen worden voorgesteld:

- 1) Breid het BS software-instrumentarium uit voor vrije glijvlakligging en valideer de BS-2 uitbreiding door vergelijking met het BS-1 resultaat. Resultaat van deze fase is een uitbreiding van het BS instrumentarium, met testrapportage.
- 2) Evalueer voor enkele praktijkgevallen de praktische toepasbaarheid en meerwaarde (kostenbesparing) van een probabilistisch stabiliteitsontwerp, als onderdeel van een slim integraal ontwerp. Betrek in het integrale ontwerp ook de eisen voor overloop/overslag en piping. Weeg de kostenbesparing af tegen het eventuele robuustheidsverlies. Beschouw ook de mogelijkheden voor het gebruik van uitvoeringsstabiliteit. Resultaat van deze fase zijn rapportages waarin per geval wordt beschreven:
  - Wat de impliciete robuustheid is van het semi-probabilistische ontwerp, uitgedrukt in de verhouding tussen de maximaal aanvaardbare faalkanswaarde en de probabilistisch bepaalde faalkans (of alternatief: tussen de probabilistisch bepaalde betrouwbaarheidsindex en de minimaal vereiste indexwaarde).
  - hoe een aangescherpt probabilistisch stabiliteitsontwerp (met of zonder BS) kan worden ingepast in een integraal ontwerp,
  - welke ervaringen daarbij zijn opgedaan,
  - welke kostenbesparingen een probabilistisch stabiliteitsontwerp (met of zonder BS) kan opleveren, in combinatie met slimme ontwerpopties,
  - Wat de mogelijkheden zijn voor gebruik van uitvoeringsstabiliteit.
- 3) Indien de evaluatie in fase 2 positief uitvalt: gebruik de informatie uit fase 2 voor het uitbreiden van de al bestaande handreiking voor faalkansanalyse en faalkansupdate (Deltares, 2016d).  
De uitbreiding bevat indicatief de volgende informatie en aanwijzingen:
  - a) De mogelijkheden, beperkingen en randvoorwaarden voor het gebruik van een probabilistisch stabiliteitscontrole (met of zonder BS) binnen het integrale ontwerp.
  - b) Voor zover nodig: update van de aanwijzingen voor de opzet en uitvoering van de probabilistische stabiliteitscontrole met of zonder BS.
  - c) Nadere aanwijzingen voor toepassing van een probabilistisch stabiliteitscontrole (met of zonder BS) als onderdeel van een integraal ontwerp.





- d) de te stellen robuustheidseis, in termen van de verhouding tussen de maximaal aanvaardbare faalkanswaarde en de probabilistisch bepaalde faalkans
- e) Aanwijzingen en randvoorwaarden voor toepassing van ontwerpalternatieven voor een traditionele ophoging in grond.

## Referenties

- Deltares. (2015, juni 25). POVM - Beter benutten actuele sterkte: Plan van Aanpak 1220518-000-GEO-007.
- Deltares. (2015). *Verkenning Bewezen Sterkte Markermeerdijken, Onderdeel vervolgonderzoek pompen+geotechniek, rapport nr 1221189-000-GEO-0004.*
- Deltares. (2016a, juli 27). POVM - Beter benutten actuele sterkte - activiteit 6 - Bewezen Sterkte Analyses: offerte 1230804-000-GEO-002.
- Deltares. (2016b). *Reliability updating for slope stability of dikes, Approach with fragility curves (background report), report nr. 1230090-033-GEO-0001.*
- Deltares. (2016c). *Basis Module Macrostabilliteit, Stand alone tool voor Macrostabilliteit binnenwaarts, handleiding, Versie 16.1.2, revisie 44316.*
- Deltares. (2016d). *Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating, rapport nr. 1230090-032-GEO-0016.*
- Deltares. (2016e). *POVM Beter benutten actuele sterkte KJK, Activiteit 6 - Faalkans updating 3 cases, concept rapport.*
- Duinen, A. v. (2016f). *Default waarden voor Pre Overburden Pressure (POP) voor macrostabilliteit. Deltares memo 1230086-001-GEO-0004.*
- Ministerie van I&M. (2016). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, concept versie 1, 22 april 2016.*
- Rijkswaterstaat. (2015a). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, versie 3.*

## A Case studie naar bruikbaarheid parameterupdate

### A.1 Inleiding

Uit een probabilistische bewezen sterkte analyse volgt een bijgestelde faalkans door middel van filtering. Een eventueel probabilistisch ontwerp kan op deze filtering aanpak worden gebaseerd. Het doel van de in deze bijlage gepresenteerde analyse is om te verkennen of het als alternatief ook mogelijk is om updates van sterkteparameters uit de bewezen sterkte analyses te destilleren en om die parameterupdates te gebruiken tijdens het ontwerp. Het voordeel in termen van faalkansaanpassing zou dan in beide gevallen vergelijkbaar moeten zijn.

### A.2 Aanpak

De volgende informatie kan uit een bewezen sterkte analyse volgen:

- 1 Een bijgestelde kansverdeling van de individuele parameters (parameter update)
- 2 Een bijgestelde covariantie matrix.

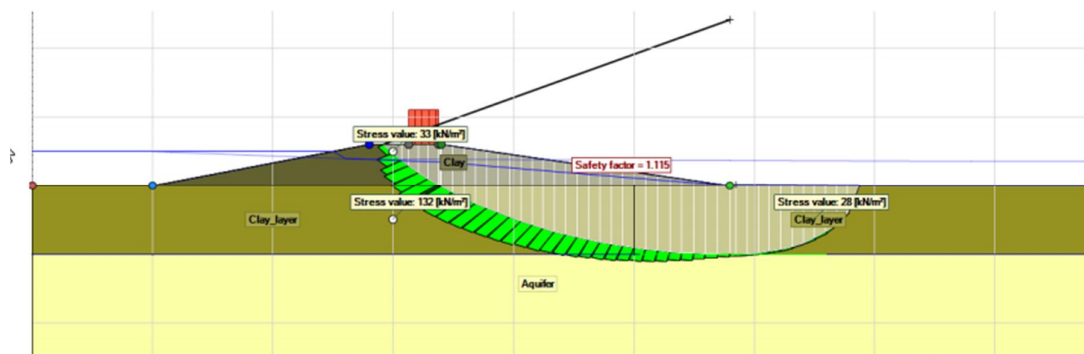
De informatie kan (voorlopig?) alleen met de directe methode (BS-1) worden verzameld, door de MC-realisaties te beschouwen nadat de onmogelijke realisaties weg zijn gefilterd.

Eerst wordt uit de Monte Carlo berekening voor de posteriori faalkans alle realisaties van de stochasten tegen elkaar geplot en de correlatiematrix berekend.

Vervolgens worden de realisaties die niet waar kunnen zijn (observatie) eruit gefilterd. Met de overgebleven realisaties worden aangepaste kansverdelingen voor de parameters afgeleid en de aangepaste correlatiematrix berekend.

Daarna worden de aangepaste kansverdelingen en aangepaste correlatiematrix gebruikt in een probabilistische som om de grootte van de faalkans update te bekijken, in relatie tot de BS-1 en BS-2 methode.

Hiervoor wordt voorbeeld 3 uit het achtergrond rapport gebruikt (Deltares, 2016b). Het betreft een kleidijk op een toplaag van klei. Hieronder volgt een afbeelding van de geometrie en een tabel met de gehanteerde kansverdelingen voor de laaigeenschappen en de waterstand.



Name	Unit	Description	Distribution	Parameters
<i>Clay_Su</i>	[-]	undrained shear strength ratio	Lognormal	$\mu = 0.35, \sigma = 0.10$
<i>Claylayer_Su</i>	[-]	undrained shear strength ratio	Lognormal	$\mu = 0.30, \sigma = 0.03$
<i>Clay_m</i>	[-]	strength increase exponent	Lognormal	$\mu = 0.90, \sigma = 0.02$
<i>Claylayer_m</i>	[-]	strength increase exponent	Lognormal	$\mu = 0.90, \sigma = 0.02$
<i>Aquifer_c</i>	[kN/m <sup>2</sup> ]	cohesion	Deterministic	0.0
<i>Aquifer_phi</i>	[°]	friction angle	Deterministic	35°
<i>Clay_yield</i>	[kN/m <sup>2</sup> ]	yield stress	Lognormal	$\mu = 38, \sigma = 6$
<i>Claylayer_under_yield</i>	[kN/m <sup>2</sup> ]	yield stress	Lognormal	$\mu = 137, \sigma = 6$
<i>Claylayer_next_yield</i>	[kN/m <sup>2</sup> ]	yield stress	Lognormal	$\mu = 28, \sigma = 6$
<i>Water level</i>	[m]	outside water level	Gumbel	<i>shift</i> = 1.5, <i>scale</i> = 0.4
<i>m<sub>d</sub></i>	[-]	model uncertainty	Lognormal	$\mu = 0.995, \sigma = 0.033$

De a-priori resultaten van deze benchmark zijn als volgt.

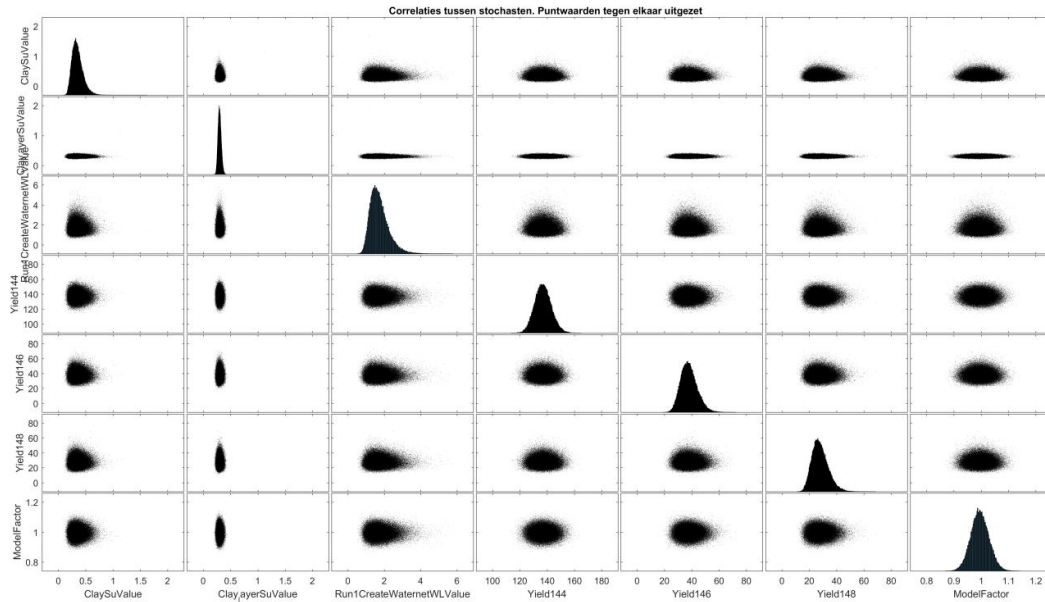
Methode	Betrouwbaarheidsindex $\beta$
BS-1 (Crude Monte Carlo Sampling)	2,15
BS-2 (Fragility Curve methode)	2,07

De a-posteriori resultaten van deze benchmark zijn als volgt

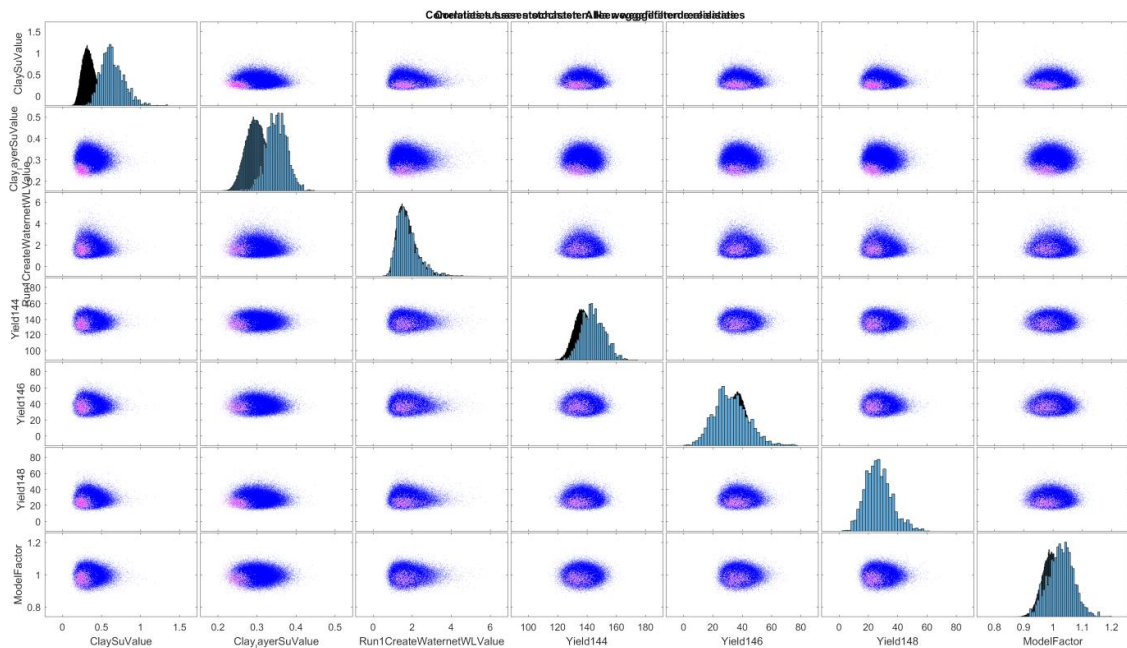
Methode	Betrouwbaarheidsindex $\beta$
BS-1 (Crude Monte Carlo Sampling)	3,05
BS-2 (Fragility Curve methode)	3,05

### A.3 Analyse

Per realisatie zijn de puntwaarden van de variabelen tegen elkaar geplott. Dit is onderstaand weergegeven. Voor de realisaties a-priori is de correlatiematrix gelijk aan 0.



Hierna wordt een soortgelijke afbeelding geplott van de realisaties waarvoor de observatie waar is (blauw) en de realisatie waar de observatie niet waar is (paars). Deze laatste zijn de weg gefilterde realisaties.



Na het wegfilteren kan een aangepaste kansverdeling voor de parameters worden afgeleid. De aanpassing zit vooral in een verschuiving van de gemiddelde waarde, en in mindere mate in een

verlaging van de standaardafwijking. De stochasten met de hoogste invloedcoëfficiënt ( $\alpha^2$ ) laten hier de grootste verandering zien.

	$\alpha^2$	Kansverdeling vooraf			Kansverdeling na update	
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Clay.Su	0.18	Log normal	0.352	0.100	0.350	0.100
Clay_layer.Su	0.55	Log normal	0.301	0.029	0.300	0.030
144.Yield	0.06	Log normal	137.080	5.999	137.000	6.000
146.Yield	0.01	Log normal	38.065	6.043	38.000	6.000
148.Yield	0.11	Log normal	28.086	6.003	28.000	6.000
Model.Factor	0.09	Log normal	0.996	0.033	0.995	0.033
Clay.m	0.00	Log normal	0.900	0.020	0.900	0.020
Clay_layer.m	0.00	Log normal	0.900	0.020	0.900	0.020
CreateWaternet.WL	0.01	Gumbel			n/a	n/a

De update van de correlatiematrix wordt bepaald door de correlatie te bepalen van de realisaties die waar zijn. Hier geldt ook dat de grootste aanpassingen optreden bij de parameters met de hoogste invloedcoëfficiënten.

Correlatiematrix na update	1	2	3	4	5	6	7
1 ClaySuValue	1.000	-0.028	0.004	-0.008	-0.002	-0.011	-0.017
2 Clay_layerSuValue	-0.028	1.000	0.004	-0.015	-0.004	-0.024	-0.023
3 Run1CreateWaternetWLValue	0.004	0.004	1.000	0.003	0.002	0.004	0.002
4 Yield144	-0.008	-0.015	0.003	1.000	-0.005	-0.005	-0.004
5 Yield146	-0.002	-0.004	0.002	-0.005	1.000	-0.002	-0.004
6 Yield148	-0.011	-0.024	0.004	-0.005	-0.002	1.000	-0.003
7 ModelFactor	-0.017	-0.023	0.002	-0.004	-0.004	-0.003	1.000

#### A.4 Resultaten

De resultaten van de aangepaste kansverdelingen en correlaties zijn in de a-priori FORM som gebruikt. Hiermee wordt inderdaad een hogere betrouwbaarheidsindex gevonden, maar niet de volledige 'faalkans update'.

Methode	Betrouwbaarheidsindex $\beta$
A-priori	2,07
A-priori + aangepaste kansverdelingen	2,14
A-priori + aangepaste kansverdelingen + aangepaste correlaties	2,24

#### A.5 Conclusie

Een parameter update is technisch gesproken mogelijk, maar biedt geen gelijkwaardig alternatief voor het toepassen van filtering. Bij toepassing van de aangepaste kansverdelingen en onderlinge correlaties van de onzekere tijdsafhankelijke parameters wordt namelijk veel minder afname van de faalkans (of toename van de betrouwbaarheidsindex) berekend dan bij rechtstreekse toepassing van filtering.