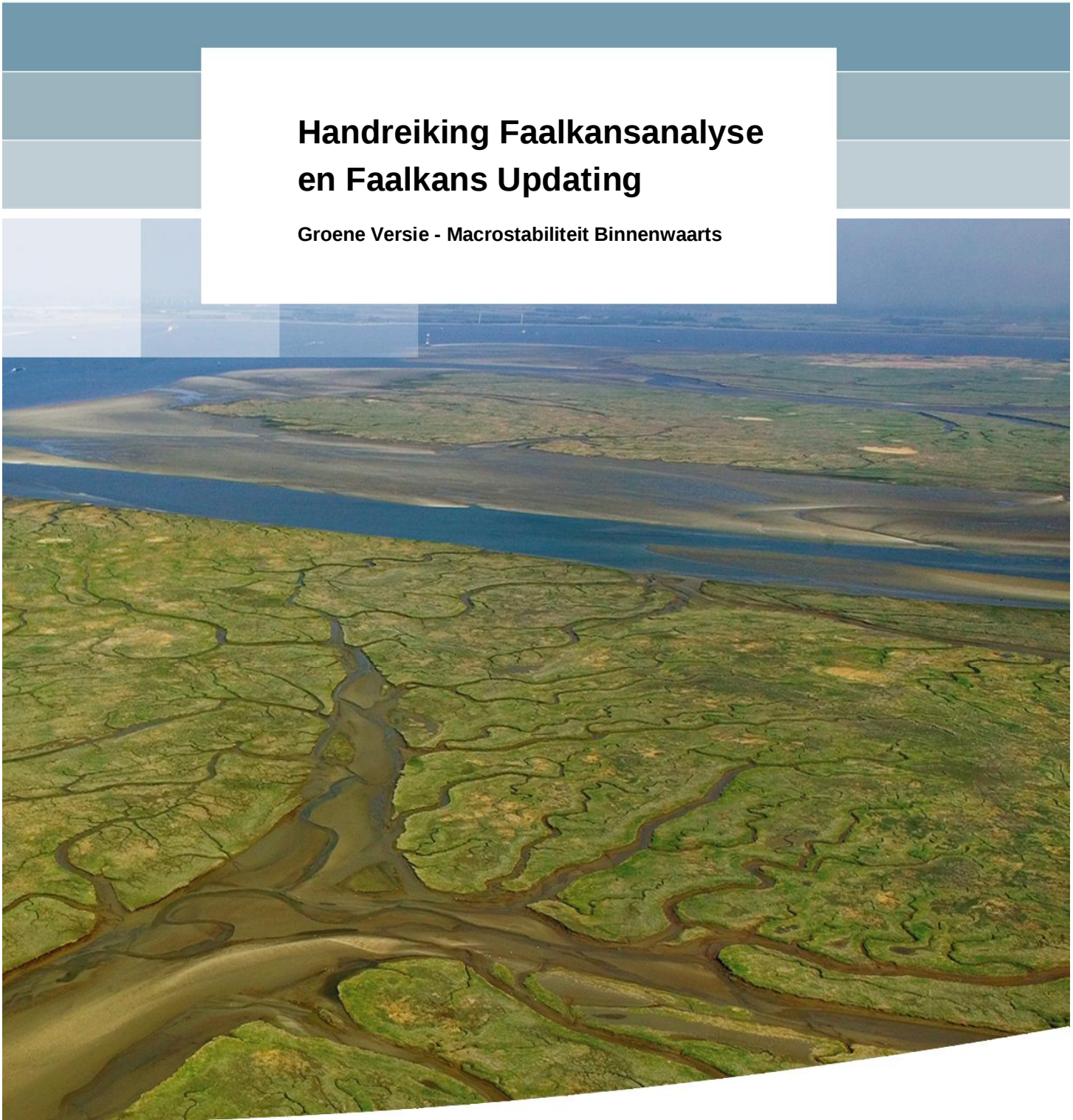


Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating

Groene Versie - Macrostabieliteit Binnenwaarts



Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating

Groene Versie - Macrostabieliteit Binnenwaarts

Wim Kanning
Timo Schweckendiek

11200575-014

Titel

Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating

Trefwoorden

faalkansanalyse, faalkans updating, reliability updating, bewezen sterkte, overleefde belasting, macrostabiliteit

Samenvatting

Deze groene versie van de handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating (FU) heeft als doel de gebruiker te ondersteunen in het maken van (probabilistische) faalkansanalyses en FU analyses voor geotechnische faalmechanismen van dijken. Deze handreiking bevat informatie, theoretische achtergronden en praktische aanbevelingen voor het uitvoeren van (probabilistische) faalkansanalyses voor macrostabiliteit binnenwaarts van dijken, en voor het bijstellen van de faalkansen door middel van faalkans updating (in het Engels: reliability updating) op basis van overleefde belastingcondities.

De handreiking omvat de volgende elementen: een overzicht van faalkansanalyse en faalkans updating, faalkans updating principes, veiligheidsfilosofie, en vervolgens de verschillende stappen van faalkansanalyse en faalkans updating:

- Stap 0: inschatting kansrijkheid
- Stap 1: semi-probabilistische analyse
- Stap 2: faalkans analyse
- Stap 3: faalkans updating

De voorliggende versie betreft een groene versie welke in de loop der tijd zal worden uitgebreid met ervaringen vanuit case studies en praktijktoepassingen. Daarnaast wordt een uitbreiding naar meer faalmechanismen en andere typen observaties beoogd.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Aug 2016	dr.ir. W. Kanning dr.ir. T. Schweckendiek		ir. A. van Hoven		dr.ir. M.S. Sule	
2	Nov 2016	dr.ir. W. Kanning dr.ir. T. Schweckendiek		ir. A. van Hoven		dr.ir. M.S. Sule	
3	Sept 2017	dr.ir. W. Kanning dr.ir. T. Schweckendiek		ir. A. van Hoven		dr.ir. M.S. Sule	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding en doel groene versie handreiking	1
1.1.1 Aanleiding groene versie handreiking.	1
1.1.2 Doel	1
1.1.3 Status handreiking	1
1.2 Afbakening groene versie	2
1.3 Veronderstelde voorkennis en doelgroep	2
1.4 Samenhang met TAW/ENW publicaties	2
1.5 Kwaliteitscontrole	2
1.6 Leeswijzer	3
2 Faalkansanalyse en faalkans updating in het kort	4
2.1 Hoofdstappen	4
2.2 Stap 0: inschatting kansrijkheid	4
2.3 Stap 1: semi-probabilistische analyse	5
2.4 Stap 2: faalkansanalyse	5
2.5 Stap 3: faalkans updating	5
3 Veiligheidsfilosofie	6
3.1 Algemene bepaling benodigde veiligheid	6
3.2 Eis macrostabiliteit	6
4 Stap 0: Inschatting kansrijkheid faalkans updating	7
4.1 Toepassingsvoorwaarden	7
4.2 Algemene factoren die impact faalkans updating beïnvloeden	7
4.3 Specifieke gevallen die impact faalkans updating beïnvloeden	8
4.4 Voorbeelden gevoeligheidsanalyses	9
5 Stap 1: Semi-probabilistische analyse	11
5.1 Algemeen	11
5.2 Schematisering	11
6 Stap 2: Faalkansanalyse	12
6.1 Probabilistische stabiliteitsanalyses	12
6.1.1 Grenstoestand	12
6.1.2 Probabilistische methoden voor glijvlakberekeningen	12
6.2 Opzet faalkansanalyse beoordelingscondities (a-priori)	13
6.2.1 Algemeen	13
6.2.2 Scenario's	13
6.2.3 Waterspanningen	14
6.3 Bepaling verdelingen grondparameters	14
6.3.1 Schuifsterkteparameter verdelingen	14
6.3.2 Ruimtelijke onzekerheden en uitmiddeling	15
6.3.3 Modelleren grondgewicht	15
6.3.4 Default waarden binnen WBI2017	15

6.4	Bepaling verdeling belasting en belastingeffecten	15
6.4.1	Buitenwaterstand	16
6.4.2	Waterspanningen	16
6.4.3	Verkeersbelasting	16
6.5	Bepaling fragility curves	16
6.5.1	Opzet fragility curve	16
6.5.2	Aandachtspunten bij het opzetten van een fragility curve	17
6.5.3	Checks	18
6.6	Bepaling faalkans	18
7	Faalkans updating principes	20
7.1	Algemeen principe faalkans updating	20
7.1.1	Beschrijving methode	20
7.1.2	Reduceerbare onzekerheid	20
7.1.3	Beoordeling en observatie	20
7.1.4	Overleefde belasting	21
7.1.5	Aanvullende meerwaarde faalkans updating	21
7.2	Faalkans updating methodiek	21
7.3	Omgaan met onzekerheden in faalkans updating	22
7.3.1	Kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit	22
7.3.2	Rekenen met scenario's	23
7.3.3	Veranderingen tussen observatie en beoordelingscondities	23
7.4	Conservatieve keuzes in faalkans updating	24
8	Stap 3: Faalkans updating	25
8.1	Kritieke glijvlakken voor faalkans updating	25
8.2	Modellering observatie	26
8.2.1	Het gaat bij de schematisering van de observatie om twee aspecten: de schematisering van de dijk ten tijde van de observatie en de geobserveerde belasting. Keuze observatie	26
8.2.2	Modelering sterkte parameters	26
8.2.3	Modelering belasting parameters	27
8.2.4	Verkeersbelasting	27
8.2.5	Regenval	27
8.2.6	3D geometrie effecten	28
8.3	Samenhang tussen beoordeling en observatie	28
8.3.1	Kennisonzekerheid of intrinsieke variabiliteit	28
8.3.2	Verschillen tussen beoordeling en observatie	28
8.3.3	Typische genegeerde sterktebijdrages	28
8.4	Faalkans updating met exacte methode	29
8.5	Faalkans updating met methode fragility curves	29
8.5.1	Fragility curves in relatie tot observatie	29
8.5.2	Te gebruiken technieken	30
8.5.3	Correlatie tussen de fragility curves	30
8.6	Doorvertaling van doorsnede naar dijkstrekking	31
8.7	Faalkans updating op basis van meerdere scenario's	32
8.8	Ontwerpen van een proefbelasting	32
9	Referenties	34

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel groene versie handreiking

1.1.1 Aanleiding groene versie handreiking.

Het concept faalkans updating doelt op het gebruik van overleefde belastingen om de sterkte en de veiligheid van een dijk beter in te schatten. Faalkansanalyse en faalkans updating resulteren in een nauwkeuriger veiligheidsbeeld dan een reguliere semi-probabilistische analyse. Faalkansanalyse en faalkans updating zijn dus voornamelijk bedoeld om toe te passen in geval een dijk niet aan de eis voldoet volgens een reguliere semi-probabilistische analyse. Door het nauwkeuriger veiligheidsbeeld na faalkansanalyse of faalkans updating kan mogelijk wel aan de eis worden voldaan, waardoor deze technieken mogelijk ingrijpende dijkversterkingen kunnen verminderen of voorkomen. Het mogelijk gebruik van faalkans updating (FU) is in 2015 in een stroomversnelling geraakt door een verkenning van de mogelijke toepassing hiervan op de Markermeerdijken (MMD) door Schweckendiek en van der Krogt (2015). In navolging deze studie is door Rijkswaterstaat een meerjarig ontwikkeltraject voor de toepassing van faalkans updating opgezet, waaronder in 2016 een achtergrondrapport en twee case studies van de Markermeerdijken Schweckendiek et al. (2016). Deze groene versie van de handreiking faalkansanalyse en faalkans updating is onderdeel van het ontwikkeltraject Bewezen Sterkte van Rijkswaterstaat.

1.1.2 Doel

Deze groene versie van de handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating (FU) heeft als doel de gebruiker te ondersteunen in het maken van (probabilistische) faalkansanalyses en FU analyses voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts van dijken. FU analyses kunnen worden gebruikt binnen bijvoorbeeld Beoordelen op Maat in het geval een dijk is afgekeurd in een standaard ("gedetailleerde") beoordeling, of bij een scope bepalende studie bij dijkversterkingen. Het doel is om handvatten en richtlijnen te geven ter ondersteuning van het maken van keuzes binnen een FU analyse. Gefundeerd afwijken hiervan is mogelijk.

1.1.3 Status handreiking

Groene versie 1 diende ter ondersteuning van de Markermeerdijken analyses. Bij groene versie 2 zijn ook de gebruikerservaringen van onder meer het POV-M project 'Beter benutten actuele sterkte' (met referentieproject KIJK - Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard) verwerkt. Ook is commentaar van het Expert team bewezen sterkte meegenomen. Deze groene versie 3 omvat toevoegingen op basis van het STOWA project 'Bewezen Sterkte Regionale Keringen' in 2017 (Kanning e.a., 2017) en commentaar van Rijkswaterstaat. Verder zijn de uitkomsten van de studie doorvertaling doorsnede naar dijkvak (Teixeira en Rosenbrand, 2017) toegevoegd. Binnen deze versie is voornamelijk ervaring opgedaan met de benadering met "fragility curves". Fragility curves geven de relatie tussen faalkans en buitenwaterstand en worden toegepast omdat deze doorgaans efficiënt zijn. De handreiking zal met de in de loop der tijd opgedane ervaring verder worden uitgebreid en aangepast. Uitbreidingen worden beoogd op het gebied van andere faalmechanismes, maar ook andere technieken en mogelijk ontwerptoepassingen zullen een plek krijgen in volgende versies van de handreiking. Deze handreiking is onderdeel geweest van het Expert Team Bewezen Sterkte. Commentaar van dit expert team is zo veel mogelijk verwerkt.

1.2 Afbakening groene versie

De versie van de handreiking richt zich op faalkans en faalkans updating (FU) analyses van waterkeringen voor het faalmechanisme macrostabiliteit van het binnentalud met de volgende afbakening:

1. Er wordt uitsluitend het volledig probabilistisch beoordelen van een bestaande dijk uitgewerkt, passend in bijvoorbeeld de context van een Beoordelen op Maat (WBI2017).
2. Er worden uitsluitend observaties van overleefde belastingcondities behandeld.
3. Voor de stabiliteitsbepaling wordt uitgegaan van de binnen het Wettelijk Beoordelings- Instrumentarium (WBI2017) ontwikkelde methode (bv. CSSM/SHANSEP model voor ongedraineerde grondlagen).
4. Er wordt in deze handreiking uitgegaan van stabiliteitsanalyses met invoerparameters op basis van laaggemiddelden. Random Field berekeningen (VanMarcke, 1983; Calle, 1985) zijn mogelijk maar worden hier niet nader uitgewerkt.
5. FU analyses kunnen met verschillende technieken worden opgelost, onder andere via de benadering met fragility curves zoals beschreven in Schweckendiek en Kanning (2016), maar ook via de in het Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken (TRAS; ENW 2009) beschreven methode. De voorliggende versie is toegespitst op de benadering met fragility curves; mogelijkheden en beperkingen van andere methodes worden toegelicht waar relevant, maar voorlopig niet nader uitgewerkt.

Voor toekomstige versies van deze handreiking worden uitbreidingen beoogd qua faalmechanismen, types observaties etc. Ook wordt voorzien dat de handreiking wordt uitgebreid met vereenvoudigde rekenvoorbeelden. t.

1.3 Veronderstelde voorkennis en doelgroep

De gebruiker van deze handreiking wordt verondersteld voldoende kennis te hebben om een probabilistisch stabiliteitsanalyse te maken en te interpreteren zoals bijvoorbeeld uitgevoerd in het project VNK2, echter met de stabiliteitsmodellering zoals uitgewerkt in WBI2017. Het verdient de voorkeur om ook reviews te laten uitvoeren door personen met voldoende ervaring in probabilistische stabiliteitsanalyses en FU analyses.

1.4 Samenhang met TAW/ENW publicaties

De in deze handreiking beschreven methode heeft dezelfde basis als de probabilistische bewezen sterkte aanpak in het TRAS (ENW, 2009), maar een andere uitwerking. Uit Schweckendiek et al. (2016) blijkt dat de TRAS methode een beperkt toepassingsgebied heeft en onder bepaalde voorwaarden tot overschatting van de veiligheid kan leiden.

1.5 Kwaliteitscontrole

Zowel de probabilistische beoordelingsanalyse als FU analyses worden nog weinig toegepast in beoordelen en ontwerpen. Dit vereist onder andere kennis van probabilistische sommen (zie 1.3). Voor de kwaliteitsborging wordt naast gangbare interne review procedures ook het betrekken van externe deskundigen sterk aanbevolen. Voor een goede kwaliteitscontrole is een schematiseringsverantwoording van groot belang.

1.6 Leeswijzer

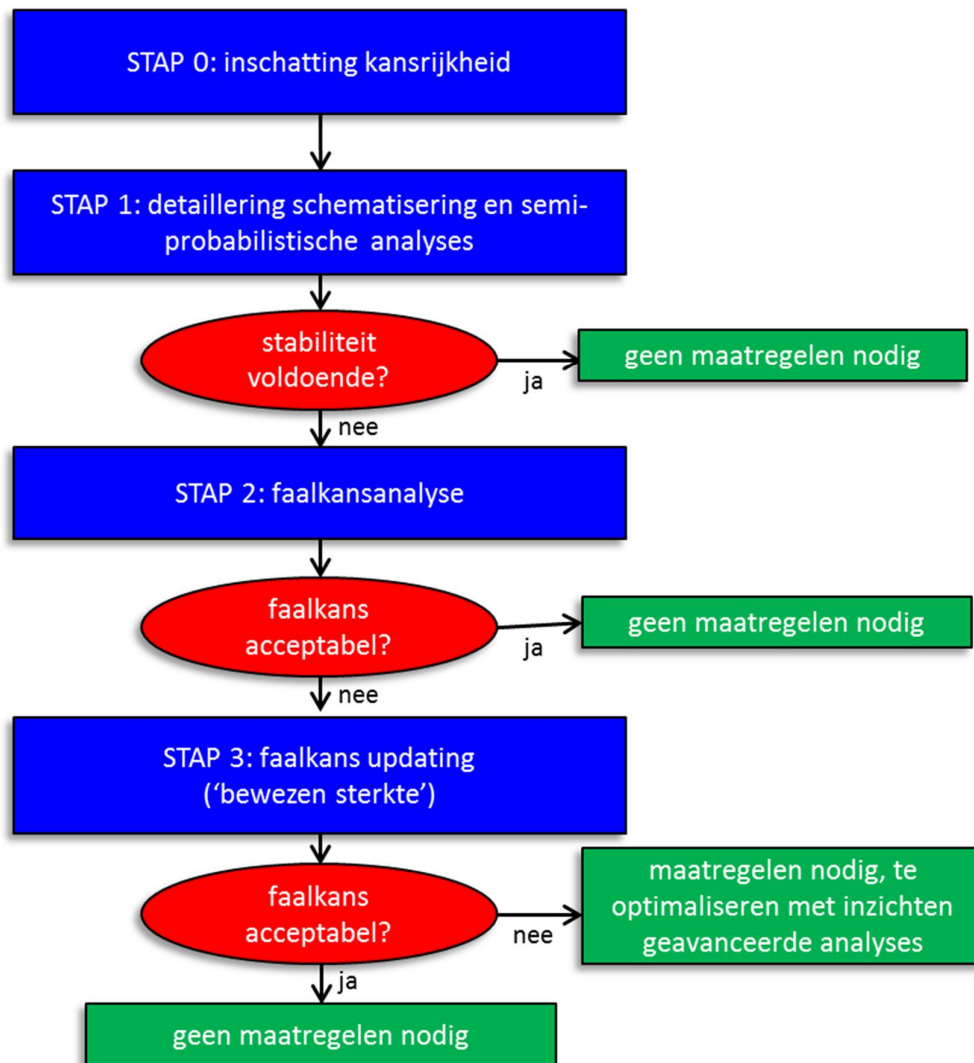
In Hoofdstuk 2 worden de stappen in FU analyse beschreven. In Hoofdstuk 3 staat de inpassing in de veiligheidsfilosofie beschouwd. Vervolgens worden de verschillende stappen in een FU analyse beschouwd:

- Stap 0: inschatting kansrijkheid (Hoofdstuk 4)
- Stap 1: semi-probabilistische analyse (Hoofdstuk 5)
- Stap 2: faalkans analyse (Hoofdstuk 6)
- Faalkans updating principe (Hoofdstuk 7)
- Stap 3: faalkans updating (Hoofdstuk 8)

2 Faalkansanalyse en faalkans updating in het kort

2.1 Hoofdstappen

Het stroomschema voor het maken van een faalkans updating analyse is weergegeven in Figuur 2.1. In elke stap kan de dijk worden goedgekeurd ('geen maatregelen') nodig, of worden besloten om al dan niet verder te gaan in de FU analyse. De verschillende stappen staan in de volgende paragrafen verder toegelicht.



Figuur 2.1 Stroomschema faalkansanalyse en faalkans updating

2.2 Stap 0: inschatting kansrijkheid

In de eerste stap wordt op basis van algemene kenmerken van de dijk een inschatting gemaakt of een faalkansanalyse, al dan niet met informatie van overleefde belastingen, kansrijk is. Dit gebeurt mede op basis van de reeds beschikbare stabiliteitsanalyses, aangezien faalkans updating wordt toegepast nadat een kering is afgekeurd op stabiliteit. Een faalkans (updating) analyse is bijvoorbeeld vooral kansrijk als de faalkans of stabiliteit

voornamelijk wordt bepaald door (reduceerbare) sterkteonzekerheden, het veiligheidstekort beperkt is en er een significante observatie is. Voor de inschatting van de kansrijkheid zijn in principe verkennende berekeningen nodig. In hoofdstuk 4 wordt deze stap verder uitgewerkt. De inschatting van kansrijkheid staat nu als stap 0 gedefinieerd, maar deze kan door het project heen worden toegepast; in de verschillende stappen en bij het beschikbaar komen van aanvullende informatie. De inschatting van de kansrijkheid voor stap 2 wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 4.. In het algemeen geldt voor de kansrijkheid van stap 1 dat de semi-probabilistische beoordeling in het merendeel van de gevallen conservatief is, waardoor met een faalkansanalyse alsnog aan de eis kan worden voldaan. Ook geldt dat hoe groter het veiligheidstekort is, des te kleiner de kans dat dit tekort wordt opgelost door een faalkansanalyse.

2.3 Stap 1: semi-probabilistische analyse

In deze stap wordt een verdere aanscherping van de semi-probabilistische analyse uitgevoerd. Hiertoe dienen eerst alle uitgangspunten te worden vastgesteld en mogelijk aangescherpt. In geval er wordt vastgesteld dat de stabiliteitsfactor voldoende is, zijn geen verdere maatregelen nodig. Deze stap wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 5.

Opgemerkt wordt dat deze semi-probabilistische analyse in principe niet afwijkt van een standaard beoordeling of ontwerp berekening, behalve dat de analyse over meer detailniveau kan beschikken, al dan niet verrijkt met aanvullend lokaal onderzoek zoals beschreven in het Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken (ENW, 2009).

2.4 Stap 2: faalkansanalyse

In deze stap wordt de faalkans van de dijk bepaald en vergeleken met de faalkanseis, hier t.a.v. het specifieke faalmechanisme macrostabiliteit (zie hoofdstuk 3). Een faalkans analyse geeft een scherper veiligheidsbeeld dan de semi-probabilistische analyses in stap 1. Aanvullende stappen ten opzichte van stap 1 zijn voornamelijk het bepalen van de kansverdelingen van alle variabelen. De faalkansanalyse is doorgaans tijdrovender dan de semi-probabilistische analyse. Als de berekende faalkans kleiner is dan de faalkanseis zijn geen aanvullende maatregelen nodig. Is dit wel het geval, dan kan worden doorgegaan met stap 3. De faalkansanalyse wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 6.

2.5 Stap 3: faalkans updating

In stap 3 wordt faalkans updating toegepast. Dat houdt in dat overleefde belastingcondities worden beschouwd en deze informatie gebruikt wordt om de faalkans bij te stellen ('bewezen sterkte'). Dit kan er toe leiden dat de bijgestelde faalkans wel aan de gestelde eis voldoet, terwijl de faalkans in stap 2 dat nog niet deed. Ook als dit niet het geval is, kunnen de maatregelen mogelijk worden geoptimaliseerd op basis van de uitkomsten van de analyses (in principe uit alle stappen 1 t/m 3). De uitkomsten van stap 1 en 2 worden gebruikt voor een inschatting van de kansrijkheid van faalkans updating. Met het uitvoeren van een proefbelasting op de dijk kan relevante belasting(effect) condities worden gecreëerd die als observatie in een faalkans updating analyse kunnen worden gebruikt. Ook kan een proefbelasting worden gebruikt om de uitgangspunten van de schematisering in stap 2 nauwkeuriger te modelleren, zodat in stap 2 ook een nauwkeuriger veiligheidsbeeld ontstaat. Aanvullende opties om aan de norm te voldoen zijn om te kijken of een levensduurbenadering (Jongejan, 2016) of een restprofielbenadering waarin wordt gekeken naar welke glijvlakken daadwerkelijk tot overstroming kunnen leiden.

De principes van faalkans updating worden toegelicht in hoofdstuk 7, wat een samenvatting van het achtergrondrapport Schweckendiek en Kanning (2016) bevat; de concrete uitwerking wordt in hoofdstuk 8 beschreven.

3 Veiligheidsfilosofie

3.1 Algemene bepaling benodigde veiligheid

Voor de veiligheidsfilosofie wordt aangesloten op het WBI en OI (Rijkswaterstaat, 2015). Hierin wordt de doorsnede-eis ($P_{eis,dsn}$) waaraan de dijk moet voldoen als volgt bepaald:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N} \quad (1)$$

waarin

$P_{eis,dsn}$ Faalkanseis die per doorsnede aan een faalmechanisme wordt gesteld (per jaar).

P_{max} Maximaal toelaatbare overstromingskansen van het dijktraject (per jaar).

ω Faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme (-).

N Lengte-effectfactor (-)

En

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b} \quad (2)$$

waarin

a Fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor het betreffende faalmechanisme (-).

b Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor het betreffende faalmechanisme (m).

$L_{traject}$ Lengte van het dijktraject waarop de norm van toepassing is (m).

3.2 Eis macrostabiliteit

Voor macrostabiliteit gelden de volgende default waarden (Rijkswaterstaat, 2015), waarvan onderbouwd kan worden afgeweken:

ω = 0.04.

a = 0.033.

b = 50 m.

Op basis van de maximaal toelaatbare overstromingskansen van het dijktraject en de lengte van dijktraject (met mogelijke bijdrage aan de faalkans) kan nu een faalkanseis voor macrostabiliteit binnenwaarts voor een doorsnede worden afgeleid.

4 Stap 0: Inschatting kansrijkheid faalkans updating

4.1 Toepassingsvoorwaarden

Het Bayesiaans bijstellen van de faalkans op basis van een observatie kent in principe geen fundamentele beperking. Wel kan het zo zijn dat bij grote verschillen tussen de beoordeling- en observatiesituatie het effect op de faalkans klein is, dit wordt verder beschouwd in de rest van deze sectie. Om praktische redenen (onder andere rekentijd) is er voornamelijk ervaring opgedaan met de toepassing van de methode fragility curves, zie Schweckendiek ea (2016). Bij de methode fragility curves wordt de buitenwaterstand in discrete stappen opgeknipt en pas later in het proces als een volledige stochast meegenomen. Dit heeft als voordeel dat de rekentijd minder is, terwijl nog wel niet-lineaire effecten als gevolg van de buitenwaterstand (bijvoorbeeld opbarsten) kunnen worden meegenomen. Ook bij de methode fragility curves is er geen fundamentele beperking aan het toepassen van FU. Wel kan het zo zijn dat de impact beperkt is als er geen significante observatie is.

Als er twijfel is over de toepassing van de methode fragility curves t.a.v. van de benadering die deze inhoudt wordt aangeraden om de exacte methode toe te passen ter validatie (zie ook paragraaf 8.4).

4.2 Algemene factoren die impact faalkans updating beïnvloeden

In het algemeen wordt het meeste effect, dat wil zeggen de grootste bijstelling van de berekende faalkans, verwacht in een FU analyse in geval:

- De faalkans voor een groot deel wordt bepaald door reduceerbare onzekere variabelen, zoals grondsterkte eigenschappen. Een eerste indicatie hiervoor is als stabiliteitsfactoren bij gemiddelde en rekenwaarden van de grondparameters sterk verschillen, wat duidt op een grote invloed van de onzekerheden in grondeigenschappen. Deze uit zich ook in grote invloedscoëfficiënten (α).
- De stabiliteit van de dijk beperkt afhankelijk is van de buitenwaterstand of een andere dominante belasting. Dat uit zich in vlakke fragility curves (zie ook beschouwingen in Schweckendiek en Kanning, 2016).
- Er geen significante afname is van stabiliteit tussen observatie en beoordelingscondities door bijvoorbeeld degradatie of sterke bodemdaling van het achterland.
- De belasting tijdens de observatie relatief dicht bij de karakteristieke belasting van de beoordeling ligt, of de belastingeffecten.
- Er een significante observatie is. Hiervoor is van belang dat de dominante variabelen worden bepaald (zie 4.4). Als er een observatie is van een dominante belastingvariabele zal dit relatief veel effect hebben. Het is vooraf niet eenduidig te bepalen welke belastingvariabelen dit zijn, dit verschilt van case tot case, hier zijn berekeningen voor nodig. Dit hangt ook af van sterk niet lineair gedrag van de kering (zie 0).

Het is echter op voorhand niet te zeggen hoe dit van geval tot geval uitpakt, aangezien niet altijd alle beschreven gevallen van toepassing zijn. Hiervoor zijn analyses nodig. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

In het algemeen is de impact dus het grootst als er een observatie is van een dominant belasting effect. Bijvoorbeeld in geval de sterkte vooral wordt bepaald door een hoog freatisch vlak door neerslag, zal vooral de observatie van een hoog freatisch vlak de impact van FU bepalen. In principe geldt wel dat een dijk mogelijk goedgekeurd kan worden zonder dat de belastingen bij beoordelingscondities al eens zijn overleefd. Verder geldt ook in het

algemeen dat hoe kleiner het veiligheidstekort, hoe eerder aan de doelbetrouwbaarheid kan worden voldaan.

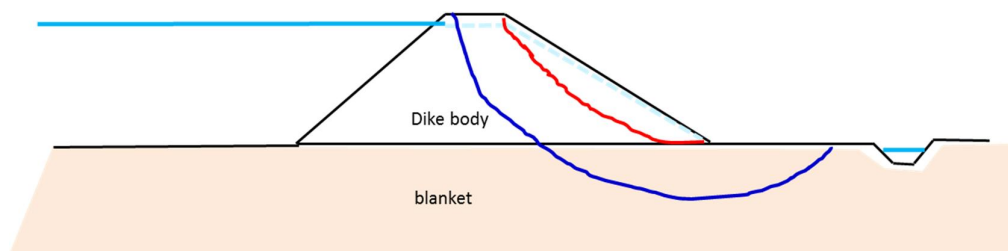
4.3 Specifieke gevallen die impact faalkans updating beïnvloeden

Bebouwing. In het geval van een enkel huis op een verder groene dijk kunnen mogelijke effecten van bebouwing worden opgenomen in de modellering. Echter, in geval van een dichtbebouwd gebied moet gecontroleerd worden of de bebouwing met bijhorende opritten en afritten tegen het dijktaalud invloed op de stabiliteit heeft en of/hoe deze invloed in rekening kan worden gebracht, zie ook paragraaf 8.6. Dit is een complicerende factor die in de praktijk tot dusver nog niet volledig is uitgewerkt, maar in volgende versies van deze handreiking mogelijk aandacht zal krijgen.

Dijkversterking. Faalkans updating is ook mogelijk in ontwerpcontext. De beoordeling van een talud kan echter vooralsnog alleen worden toegepast voor een bestaande situatie. Een voorbeeld waarbij FU kan worden toegepast in een ontwerp is een dijk voor die ondiepe glijvlakken met korte damwanden worden gestabiliseerd en diepe glijvlakken met FU worden 'opgewaarderd'. Voorwaarde is dan dat de grondspanningen voor de diepe glijvlakken niet door de maatregel (damwand) worden beïnvloed. Omgaan met sterk niet lineaire effecten De beperking bij de methode fragility curves is dat de glijvlakken en het bezwijkgedrag in de beoordelingscondities en observatiecondities vergelijkbaar moeten zijn (wat betreft ligging en spanningen langs het glijvlak). In 8.1 worden richtlijnen gegeven hoe hiermee kan worden omgegaan. Dit is vooral van belang in geval er sterk niet lineaire effecten zijn. Er is bijvoorbeeld mogelijk een beperkt effect voor de door opbarsten beïnvloedde glijcirkels, als er geen waarneming van opbarsten is. Er is echter wel effect voor andere glijcirkels die niet hierdoor beïnvloedt worden. Enkele voorbeelden van sterk niet lineaire effecten die de impact van FU kunnen beperken zijn:

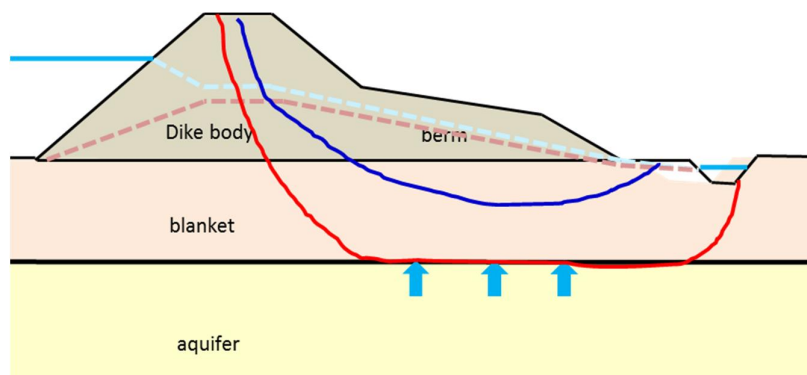
- Dijken waar opbarsten of opdrijven relevant is. In dit geval wordt doorgaans een volledig verlies van sterkte gemodelleerd in de beoordeling waardoor het glijvlak sterk verandert. Dit is niet aannemelijk en niet conservatief voor de observatie. Hierdoor kan geen bijstelling worden toegepast voor glijvlakken die door opbarsten worden beïnvloedt. Glijvlakken die niet door opbarsten worden beïnvloedt kunnen wel worden bijgesteld.
- Dijken waar de geo-hydrologische respons fundamenteel anders is in de beoordeling in vergelijking tot de observatie. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij hoge voorlanden.
- Dijken waarbij verzadiging door overslag en infiltratie dominant is. Verzadiging door overslag en infiltratie treedt doorgaans pas op bij relatief hoge waterstanden. Als verzadiging de totale faalkans domineert, en deze is niet waargenomen kan dit de impact van FU sterk beperken.

Voor bijvoorbeeld verzadiging kunnen er twee mogelijke situaties zijn, zie ook Figuur 4.1. De blauwe glijcirkel is de maatgevend glijcirkel die niet door verzadiging wordt beïnvloed. De rode glijcirkel is kritiek in geval verzadiging een rol speelt. In het geval dat de totale faalkans vooral bepaald wordt door de bijdrage van de (blauwe) glijcirkel waar verzadiging geen rol speelt, kan FU een grote impact hebben. In het geval de totale faalkans vooral wordt bepaald door verzadiging (rood), en een onderbouwde observatie hiervan is niet aanwezig, dan zal FU weinig impact hebben.



Figuur 4.1 Kritieke glijcirkel met en zonder verzadiging.

In geval er bijvoorbeeld opdrijven optreedt in de beoordeling en het is onduidelijk of er opdrijven is opgetreden tijdens de observatie, zal er geen impact van FU zijn bij glijvlakken die door opdrijven worden beïnvloed (rood in Figuur 4.2), maar wel bij glijvlakken die niet door opdrijven worden beïnvloed (blauw in Figuur 4.2).



Figuur 4.2 Te beschouwen glijvlakken voor opdrijven

4.4 Voorbeelden gevoeligheidsanalyses

Het is van belang de dominante variabelen te identificeren om een inschatting te kunnen maken van de impact, benodigde observaties en aandachtspunten bij het modelleren. Het is vooraf niet eenduidig te bepalen welke variabelen dit zijn, hier zijn doorgaans berekeningen voor nodig. Onderstaande gevoeligheidsanalyses kunnen een beeld geven van de variabelen die een significante invloed hebben op de stabiliteit en eventueel de verandering hiervan in de tijd:

- 1 Buitenwaterstand
- 2 Verkeersbelasting
- 3 Verzadiging t.g.v. infiltratie (bijvoorbeeld door overslag)
- 4 Zettingen van het dijklichaam en het maaiveld
- 5 Ondergrondopbouw
- 6 Schuifsterkte parameters (bv. verschil tussen gemiddeld en rekenwaarde)
- 7 Grensspanningen
- 8 Volumegewicht
- 9 Leklengtes (welk percentage van de buitenwaterstand zich in stijghoogte in het zandpakket onder dijk vertaalt) en indringingslengte (hoever de toegenomen waterspanningen in het zandpakket merkbaar zijn het bovenliggende slappe lagen pakket).
- 10 Freatische lijn
- 11 Eventueel onverzadigde sterkte boven freatische lijn

Vaak is het verstandig om als vertrekpunt ('base case') een analyse met rekenwaarden van sterkte en belasting te gebruiken.

5 Stap 1: Semi-probabilistische analyse

Het startpunt van een FU analyse is stap 1: de semi-probabilistische analyse.

5.1 Algemeen

De eerste stap is om een semi-probabilistische stabiliteitsanalyse uit te voeren. Hierin worden onzekerheden afgedekt door het gebruik van rekenwaarden en moet de kering voldoen aan een minimum vereiste stabiliteitsfactor of een via de stabiliteitsfactor geschatte faalkans. Dit is hetzelfde als in een reguliere beoordeling of ontwerp. Veelal zal er dus vanuit beoordeling of ontwerp al een stabiliteitsanalyse beschikbaar zijn. Een extra aandachtspunt kan zijn het verwerken van aanvullende metingen (zie ENW, 2009). Voor ondersteuning bij de te maken schematiseringen wordt verwezen naar van Deen en van Duinen (2016). Het is van belang om de keuzes in de schematisering goed te verantwoorden en onderbouwen.

Daarnaast is stap 1 van belang voor het afleiden van de gevoeligheden (zie 4.4), die vaak al met deterministische sommen kunnen worden ingeschat.

5.2 Schematisering

In de schematisering worden de keuzes voor een representatieve modelering van de stabiliteit onderbouwd. De volgende elementen dienen te worden beschouwd en verantwoord in de schematisering:

- **Homogene vakindeling:** De eerste stap is om een homogene vakindeling te maken van het te beschouwen dijktraject. Hierin dient de dijkvakindeling zo te worden bepaald dat (mogelijke) variaties in de lengterichting worden afgedekt. Dit kunnen zowel geometrische als geologische variaties in lengte richting zijn. De beschouwde doorsnedes dienen dus representatief te zijn voor het beschouwde dijkvak.
- **Geometrie:** Op basis van de homogene vakindeling dient op basis van metingen de geometrie te worden opgegeven. Eventueel inclusief te verwachten toekomstige veranderingen (zie 7.3.3).
- **Laagopbouw:** De laagopbouw wordt bepaald op basis van boringen en sonderingen. De laagopbouw dient zo te worden geschematiseerd dat geologische onderscheidende lagen worden opgesplitst. Variaties van parameters binnen een laag worden meegenomen bij de bepaling van grondparameters.
- **Geo-hydrologie:** De waterspanningen in de verschillende grondlagen als gevolg van de beschouwde belasting(combinaties) worden gemodelleerd.
- **Grondparameters:** De grondparameters worden per grondlaag bepaald. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om grondgewicht, schuifsterkte ratio S , grensspanning en sterkte toename exponent m voor ongedraineerde lagen en de cohesie en hoek van inwendige wrijving voor gedraineerde lagen.
- **Overige** schematiseringkeuzes: voorbeelden hiervan zijn hoe om te gaan met verkeersbelasting, bebouwing etc.

Voor meer informatie en ondersteuning bij de te maken keuzes wordt verwezen naar van Deen en van Duinen (2016).

Als voor een beoordeling een uitspraak wordt gedaan over een toekomstige situatie, wordt aanbevolen eerst het **zichtjaar** te definiëren voor welk jaar wordt de beoordeling gedaan (bijvoorbeeld met een periode van 12 jaar en een in 2017 wordt het zichtjaar 2029). Vervolgens wordt in beeld gebracht welke mogelijk veranderingen en verouderingen er voorzien worden (zie 7.3.3).

6 Stap 2: Faalkansanalyse

Op basis van de in dit hoofdstuk beschreven analyses kan de faalkans van de dijk worden bepaald voor de beoordelingscondities. Dit is de zogenaamde a-priori faalkans. Als deze a-priori faalkans kleiner is dan de eis (zie H4) kan de dijk worden goedgekeurd. Het uitvoeren van een faalkansanalyse is vaak een optimalisatie ten opzichte van een semi-probabilistische analyse (zie paragraaf 6.2.1). De faalkans updating welke in de komende hoofdstukken wordt beschouwd, leidt tot een bijstelling van deze a-priori kans tot een a-posteriori kans.

6.1 Probabilistische stabiliteitsanalyses

Dit hoofdstuk behandelt het maken van probabilistische stabiliteitsanalyses. Deze kunnen direct worden uitgevoerd op basis van de grenstoestandsfunctie of door eerst fragility curves te berekenen (Schweckendiek e.a., 2017). Deze laatste optie is een benadering die minder rekentijd vergt.

Het lengte-effect is in de faalkanseis verwerkt, zoals beschreven in hoofdstuk 3. In de probabilistische stabiliteitsanalyses in dit hoofdstuk wordt het lengte-effect daarom niet meer expliciet behandeld. Er wordt dus gekeken naar een 2-dimensionale analyse van een dwarsdoorsnede. Er wordt wel rekening gehouden met uitmiddeling van grondparameters langs het glijvlak; de berekeningen worden uitgevoerd op basis van variaties in laaggemiddelden van de grondparameters (zie 6.3.2). Voor meer informatie over probabilistische stabiliteitsanalyses wordt ook verwezen naar de ervaringen met Veiligheid Nederland in Kaart (Rijkswaterstaat, 2009).

6.1.1 Grenstoestand

Voor een probabilistische analyse dient een grenstoestand g te worden gedefinieerd. Als de grenstoestand groter of gelijk is aan 0 treedt er geen falen op, als g kleiner is dan 0 betekent dit falen.

$$g = SF \cdot m_d - 1 \quad (3)$$

Hierin is SF de stabiliteitsfactor en m_d de modelonzekerheid. SF is een functie van geometrie, buitenwaterstand, waterspanningen, grondsterkte etc, zie ook Tabel 7.1. Doordat de variabelen die SF bepalen onzeker zijn, is SF ook onzeker. Voor de modelonzekerheid m wordt verwezen naar Van Duinen (2016). Voor een beschrijving van verschillende glijvlak modellen om SF uit te rekenen wordt verwezen van Deen en van Duinen (2016).

De faalkans (P_f) en betrouwbaarheidsindex (β) wordt nu bepaald als de kans van overschrijden van de grenstoestand:

$$P_f = P(g < 0) \quad (4)$$

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \quad (5)$$

waar Φ de standaard normale kansfunctie is. Falen (F) treedt op als $g < 0$.

Kortom, om de faalkans te bepalen moeten de onzekerheden van alle variabelen die SF bepalen worden afgeleid. Met deze verdelingen en een model wat SF bepaalt, bijvoorbeeld het model LiftVan of Bishop, kan de faalkans worden bepaald.

6.1.2 Probabilistische methoden voor glijvlakberekeningen

Er zijn verschillende methodes om vergelijking (3) op te lossen, bijvoorbeeld op basis van Monte Carlo Simulaties (MCS) of op basis van First Order Reliability Method (FORM)

berekeningen, Importance Sampling of Directional Sampling (zie bijvoorbeeld CUR, 1996). Enkele mogelijkheden en overwegingen voor implementatie zijn:

- **Monte Carlo simulaties** zijn relatief eenvoudig, maar kunnen erg veel rekentijd kosten voor stabiliteitsanalyses (orde dagen tot weken).
- Daarom is er in Schweckendiek ea (2016) en Kanning ea (2015) voor gekozen om op basis van **fragility curves** te werken. Deze geven de relatie tussen de buitenwaterstand en de conditionele faalkans. De verschillende punten in de fragility curve, ofwel de faalkans gegeven discrete buitenwaterstanden, kunnen op basis van **FORM** worden bepaald. De faalkans (vergelijking 3) wordt bepaald door de fragility curve te combineren met de waterstandsstatistiek (zie 6.4.1). Dit heeft als voordeel een sterke beperking van de rekentijd. Ook komen er zogenaamde invloedscoëfficiënten (relatieve bijdrage van een onzekere parameter aan de faalkans) en ontwerppunt (meest waarschijnlijk combinatie van parameters bij falen) uit een FORM analyse. De invloedscoëfficiënten kunnen voor de kwaliteitscontrole worden gebruikt, bijvoorbeeld door te checken of de gevonden bijdrage van een laag strookt met de verwachte sterkte en onzekerheid van deze laag. De glijcirkels in het ontwerppunt kunnen worden gebruikt om te bepalen of deze glijcirkels relevant zijn, dat wil bij beoordeling bijvoorbeeld zeggen dat ze een bedreiging zijn voor een overstroming.
- Verder wordt in Schweckendiek ea (2016) en in de kalibratie van partiële factoren voor WBI-2017 (Kanning ea, 2015) gewerkt met een **vastgelegd glijvlak**. Dit betekent dat per punt in de fragility curve eerst het punt met minimale SF op basis van gemiddelde of karakteristieke waarde wordt bepaald. Het glijvlak dat bij deze SF wordt vervolgens vastgelegd (in plaats van een grid om de maatgevende glijcirkel te zoeken wordt de glijcirkel opgelegd in de software). Met de overige parameters als stochasten wordt de FORM som uitgevoerd. Er kan naderhand worden gecontroleerd of het initiële glijvlak overeenkomt met het glijvlak in de parameters combinatie in het ontwerppunt. Als er grote verschillen zijn kan de som met een nieuw glijvlak in het ontwerppunt worden herhaald. Dit is een iteratief proces en vergt expertise en ervaring van degene die deze analyse uitvoert.
- Een andere aanpak is gevolgd in **MPROSTAB** (Geodelft, 1994), waarbij ook met FORM wordt gewerkt maar dan zonder een vastgelegd glijvlak. Binnen WBI wordt ook voorzien om de probabilistische binnenwaartse stabiliteitsberekeningen te maken met behulp van op FORM gebaseerde fragility curves.

6.2 Opzet faalkansanalyse beoordelingscondities (a-priori)

6.2.1 Algemeen

Vergelijkbaar met reguliere semi-probabilistische analyse kan ook een probabilistische analyse worden uitgevoerd. De berekende faalkans (zie sectie 6.6) kan worden vergeleken met de faalkanseis. Dit kan in sommige gevallen al tot goedkeuring leiden voor macrostabiliteit zonder het effect van de overleefde condities mee te nemen. Een semi-probabilistische beoordeling is in veel gevallen conservatief vergeleken met een faalkansanalyse, dat komt door de manier hoe semi-probabilistische veiligheidseisen zijn afgeleid (Kanning ea, 2015).

6.2.2 Scenario's

Zoals ook aangegeven in 7.3.2, wordt soms gebruik gemaakt van rekenen met scenario's, bijvoorbeeld bij onzekerheid over de samenstelling van de ondergrond. De totale faalkans P_f kan dan worden berekend door de conditionele faalkansen van de scenario's ($P(F|E_i)$) te combineren met de kansen op deze scenario's ($P(E_i)$):

$$P_f = \sum P(F|E_i) \cdot P(E_i)$$

De bepaling van de faalkans voor een scenario ($P(F|E_i)$) wordt verder behandeld in 6.6. De kans op voorkomen van een scenario wordt voornamelijk gebaseerd op een combinatie van expert inschatting en beschikbare data, zie ook de volgende secties. Voor het rekenen met scenario's wordt verder verwezen naar ENW (2012). Door het rekenen met scenario's is het gebruik van de schematiseringsfactor overigens niet meer van toepassing.

6.2.3 Waterspanningen

De ligging van het freatisch vlak hangt af van de buitenwaterstand, het polderpeil en de invloed van regenval in combinatie met de doorlatendheden van de dijk en ondergrond. Wat hierin dominant is verschilt van geval tot geval. Binnen een probabilistische som moeten voor verschillende buitenwaterstanden de waterspanningen in de dijk worden bepaald. Dit is nodig voor zowel Monte Carlo simulaties van elke gesimuleerde buitenwaterstand, als voor de fragility curve. Het verdient de voorkeur om de freatische lijn als functie van de buitenwaterstand te modelleren. Er is een afhankelijkheid tussen de buitenwaterstand en de waterspanningen in de slappe lagen en het zandpakket. Door deze te modelleren via bijvoorbeeld leklengtes en indringingslengte wordt de afhankelijkheid tussen de lokale waterspanningen in deze lagen en de buitenwaterstand verwerkt.

Als er weinig informatie bekend is over de relatie tussen buitenwaterstand en het freatisch vlak, of als regenval dominant is in de ligging van het freatisch vlak, dan kan worden teruggevallen op de definitie van verschillende scenario's of een conservatieve deterministische modelering.. Ook overslag (bijvoorbeeld in geval van hogere toelaatbare overslaggebieden) zal de ligging van het freatisch vlak beïnvloeden. In geval er geen data beschikbaar is, kan voor (de voor de beoordeling) conservatieve (hoge) schattingen van de waterspanningen onder beoordeling somstandigheden worden teruggevallen op bijvoorbeeld TAW (2004).

6.3 Bepaling verdelingen grondparameters

In principe kunnen verschillende schuifsterkte modellen worden toegepast. In de Nederlandse praktijk zijn het CSSM-model en Mohr-Coulomb gebruikelijk, zie Van Deen en van Duinen, (2016). Onderstaande algemene beschouwingen zijn voor de materiaal en state parameters in beide modellen van toepassing. Specifieke bijzonderheden worden geadresseerd waar nodig.

6.3.1 Schuifsterkteparameter verdelingen

Er zijn ook voor het bepalen van de karakteristieke waarde van de parameters voor een semi-probabilistische beoordeling doorgaans ook gemiddelde waarden en spreidingen nodig. Deze data kan worden gebruikt voor het bepalen van verdelingen van deze parameters. De volgende keuzes en berekeningen zijn nodig voor de bepaling van de verdelingen van de schuifsterkteparameters:

- **Verdelingstype:** Doorgaans zijn normale of lognormale verdelingen verdedigbare keuzes voor grondparameters. De lognormale verdeling heeft als voordeel dat deze geen negatieve waarden kan aannemen.
- **Verwachtingswaarde:** Deze kan op basis van de beschikbare data uit laboratoriumproeven en of sonderingen worden bepaald. Zie TAW (2001) hoe dit kan worden gedaan in het geval er een beperkt aantal metingen beschikbaar is.
- **Standaardafwijking:** Deze kan op basis van de beschikbare data uit laboratoriumproeven en of sonderingen worden bepaald. Zie TAW (2001) hoe dit uitpakt voor verschillende verdelingen.

Verwachtingswaarden en standaardafwijkingen van grondparameters hebben doorgaans betrekking op (ruimtelijke) laaggemiddelden, zie volgende sectie. In geval er geen data beschikbaar is, kan worden teruggevallen op de schematiseringshandleiding (van Deen en van Duinen, 2016) voor een eerste schatting.

6.3.2 Ruimtelijke onzekerheden en uitmiddeling

Er zijn verschillende manieren om met ruimtelijke variabiliteit om te gaan. In deze handreiking wordt uitgegaan van stabiliteitsberekeningen op basis van laaggemiddelde grondparameters. Dat wil zeggen dat de verwachtingswaarde en de standaardafwijking van de grondparameters betrekking hebben op het gemiddelde van de grondparameters over de laagdikte. In het vervolg van deze paragraaf wordt gesproken van schuifsterkte parameters; de theorie kan echter ook worden toegepast op andere grondparameters. Schuifsterkteparameters worden dus gemodelleerd als “enkelvoudige stochasten die het gemiddelde van deze parameters in een grondlaag representeren (“random average”; Rijkswaterstaat, 2009). Deze laaggemiddelde parameters worden gebruikt in de probabilistische stabiliteitsanalyses. Enkele aandachtspunten bij het bepalen van laaggemiddelde parameters worden hieronder gegeven. Voor meer informatie wordt verwezen naar TAW (2001).

- Als de dataset **lokaal** is zal een groot deel van de spreiding in de data uitmiddelen en wordt de onzekerheid rond het laaggemiddelde vooral bepaald door statistische onzekerheid (zie onder)
- Als het een **regionale** dataset betreft middelt slechts een deel van de variantie uit en is de spreiding rond het laaggemiddelde doorgaans groter dan op basis van een lokale dataset zou worden gevonden.
- **Beperkt aantal metingen.** Door een beperkt aantal metingen ontstaat er statistische onzekerheid welke kan worden meegenomen bij de bepaling van de spreiding in laaggemiddelde parameters (zie TAW, 2001).

6.3.3 Modelleren grondgewicht

Het gewicht van de grond heeft zowel invloed op het aandrijvend moment als het weerstand biedend moment en de schuifsterkte (via de effectieve spanningen). De onzekerheid in het gewicht is doorgaans klein. Eventueel is de gevoeligheid per case te onderbouwen.

6.3.4 Default waarden binnen WBI2017

Het verdient altijd de voorkeur om lokale data te gebruiken, omdat dit de lokale situatie beter weerspiegelt en doorgaans resulteert in kleinere onzekerheid over de parameters. Als deze niet beschikbaar zijn en niet redelijkerwijs te verkrijgen zijn, dan kan men voor parameters die beperkt bijdragen aan de stabiliteit terugvallen op (conservatieve) default waarden. Deze worden gegeven in de Schematiseringshandleiding (van Deen en van Duinen, 2016). Voor belangrijke parameters wordt dit niet aanbevolen en dienen de parameters bepaald te worden.

6.4 Bepaling verdeling belasting en belastingeffecten

In deze sectie worden de belangrijkste belastingen en belastingeffecten behandeld. Voor de opzet van de FU analyse is het van belang om de dominante belastingen te identificeren. Het gaat voor FU analyses vooral om belastingeffecten, dus vooral het effect van een buitenwaterstand (belasting) op de waterspanningen (belastingeffect) of het effect van regenval op de waterspanningen. Het heeft in het algemeen de voorkeur om te werken met een volledig stochastisch belastingmodel met correlaties. Waar dat niet kan, kan worden teruggevallen op rekenwaarden.

6.4.1 Buitenwaterstand

De kansverdeling van de lokale buitenwaterstand wordt doorgaans bepaald op basis van statistiek van hoogwater, afvoer en/of wind. Het heeft de voorkeur om de kansverdeling van de buitenwaterstand te baseren op een geïntegreerd statistisch belastingmodel zoals de Hydra-modules, Hydra-NL of Hydra-Ring (ontwikkeld voor WBI). Voor de praktische uitwerking kan de kansverdeling ook worden benaderd met een extreme waarde verdeling (bv. Gumbel, zie bijvoorbeeld Schweckendiek & Van der Krogt, 2015, Appendix C).

6.4.2 Waterspanningen

Het heeft de voorkeur om waterspanningsrespons relatief tot de externe belastingen te modeleren. Dit heeft als voordeel dat de autocorrelaties tussen de belastingen en tussen de responsparameters goed meegenomen kunnen worden.

Er zijn verschillende manieren om de onzekerheden in waterspanningen mee nemen:

- Op basis van **gemeten variabiliteit** in waterspanningen (zie bijvoorbeeld Geodelft, 1993)
- Op basis van de **modellering** van freatisch vlak, leklengtes en indringing volgens de methode ontwikkeld in WBI. Voor default schattingen van freatisch vlak, leklengtes en indringingslengte en de onzekerheid hierin wordt verwezen naar Rozing (2015).

Het verdient de voorkeur de verdeling (type, gemiddelde, standaardafwijking) zoveel mogelijk te bepalen op basis van metingen. Als deze niet aanwezig zijn kan worden teruggevallen conservatieve schattingen, zie ook overwegingen in sectie 7.4

De implementatie van waterspanningsonzekerheden staat verder beschreven in Kanning en van der Krogt (2016). Voor het verdelingstype is het van belang deze zo te kiezen dat de verdeling goed op eventuele data past en dat de verdeling niet kan resulteren in onrealistische realisaties. Bijvoorbeeld voor de freatische lijn kan met een driehoeksverdeling worden voorkomen dat de freatische lijn onrealistisch kleine of grote waarden krijgt (bijvoorbeeld boven het maaiveld uitstijgt).

6.4.3 Verkeersbelasting

Voor verkeersbelasting zijn er doorgaans onvoldoende gegevens om de kansverdeling te onderbouwen via een statistische analyse. Vaak wordt dan ook een conservatieve waarde (rekenwaarde) aangehouden met bekende getallen uit de regelgeving voor dijken (bv. 13.3 kN/m² over 2.5 m breedte volgens Deen en Van Duinen, 2016). Het is tevens van belang om na te gaan welke verkeersbelasting bij welke waterstanden of andere omstandigheden redelijkerwijs aan de houden is (KPR, 2016). Let wel, zoals in 7.4 aangegeven is een conservatieve keuze voor de observatie condities juist het aanhouden van geen verkeersbelasting (mits het netto effect op de stabiliteit van verkeer ongunstig is).

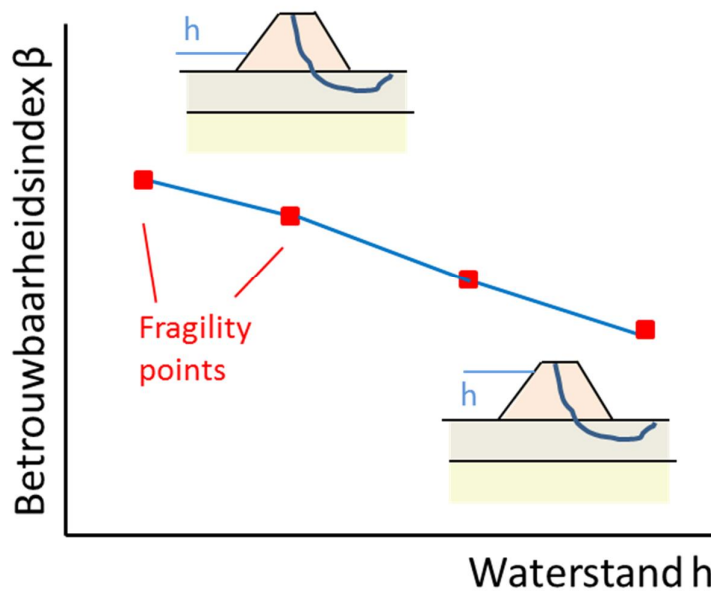
6.5 Bepaling fragility curves

6.5.1 Opzet fragility curve

Een fragility curve geeft de relatie tussen faalkans en waterstand h . De faalkans is direct om te schrijven in de betrouwbaarheidsindex volgens vergelijking (3). Vaak wordt een fragility curve weergegeven in de vorm van een beta- h curve, in deze handreiking wordt de beta- h curve echter ook fragility curve genoemd. Een voorbeeld van fragility curve staat in onderstaande figuur. De fragility curve wordt opgebouwd uit fragility points. Deze geven de betrouwbaarheidsindex voor verschillende waterstanden. De fragility curve wordt vervolgens opgebouwd door te interpoleren tussen de fragility points. Lineaire interpolatie tussen de

berekende betrouwbaarheidsindices is een gangbare en doorgaans voldoende nauwkeurige benadering. In onderstaande figuur staat een gelijkmatige aflopende fragility curve weergegeven. In het geval van bijvoorbeeld opbarsten kan er ook een sterke daling tussen 2 punten plaatsvinden en krijgt de curve een geknikt verloop.

Een overleefde waterstand wordt als uitgangspunt gebruikt bij het opstellen van de fragility curves; de waterstand komt hiermee op de horizontale as. Overige belastingen (bijv. verkeersbelasting) worden in de fragility curve meegenomen. De analyses kunnen echter ook worden gedaan met, in plaats van de waterstand, bijvoorbeeld de verkeersbelasting als dominante variabele in de fragility curve op de horizontale as.



Figuur 6.1 Voorbeeld van een fragility curve

De fragility points kunnen per waterstand met FORM worden bepaald. Dit is een relatief snelle techniek. De FORM invloedscoëfficiënten zijn overigens nodig in de faalkans updating benadering met fragility curves (zie 8.5.3).

6.5.2 Aandachtspunten bij het opzetten van een fragility curve

Er zijn enkele aandachtspunten bij het opzetten van een fragility curve:

- Het faalgedrag kan doorgaans goed gemodelleerd worden door de fragility points te definiëren bij waterstanden variërend van dijkteen tot dijkkrui en buiten dit bereik te extrapoleren. Als er afwijkend gedrag van de kering buiten dit bereik wordt verondersteld kunnen extrapunten worden gedefinieerd, bijvoorbeeld onder de teen.
- De stapgrootte in waterstand moet klein genoeg zijn om het gedrag van de dijk voldoende nauwkeurig in kaart te brengen. Voor de kalibratie (Kanning ea, 2015) blijkt een stapgrootte van 0.6 m doorgaans voldoende. Voor dijken met een beperkte afhankelijkheid van de stabiliteit van de waterstand kan met minder punten worden volstaan omdat de curve nauwelijks van helling verandert. In het geval van bijvoorbeeld opbarsten kan er een sterke knik in de fragility curve zitten. Om dit effect goed in kaart te brengen zijn er mogelijk meer fragility points nodig, met name in de buurt van deze overgang. Als er twijfels zijn over het aantal punten, kunnen meer punten worden

ingevoegd. Als de vorm en de faalkans hierdoor niet verandert, was het oorspronkelijk aantal punten voldoende.

6.5.3 Checks

Er kunnen enkel checks worden uitgevoerd ter validatie van de FORM berekeningen:

- De betrouwbaarheidsindex en FORM invloed coëfficiënten per waterstand kunnen worden bekeken om te zien of deze overeenkomen met de verwachting en of deze veel of weinig fluctueren tussen de punten.
- De glijcirkel in het ontwerppunt kan worden gecontroleerd, zowel op de plausibiliteit van het ontwerppunt als op relevantie van de glijcirkel.
- De FORM convergentie kan worden nagekeken. Dit kan door de convergentie van de betrouwbaarheidsindex en invloedscoëfficiënten in het FORM proces na te gaan.
- Check of het ontwerppunt van de waterstand lager is dan de kruin, in geval wordt gekeken naar de totale faalkans (zie 6.6). Als dit niet het geval is, dan is de berekening mogelijk niet betrouwbaar.

Mochten er twijfels zijn bij de resultaten van de fragility curve, dan kan altijd worden teruggevallen op de exacte methode (Schweckendiek en Kanning, 2016).

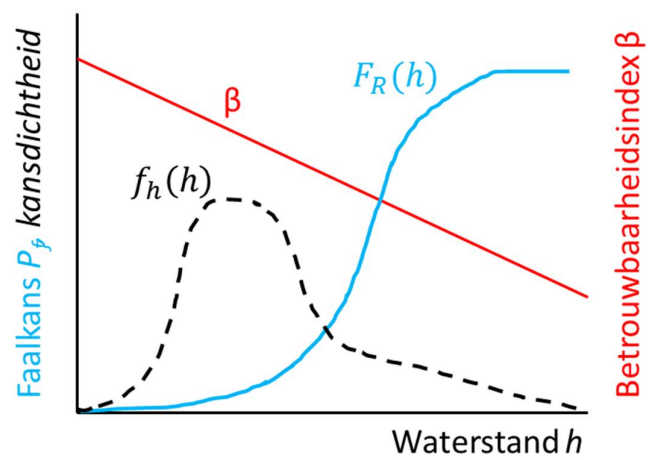
6.6 Bepaling faalkans

De totale faalkans van de beoordelingscondities kan worden bepaald door vergelijking (3) op te lossen. Dit wordt verder toegelicht voor de methode fragility curves

De totale faalkans van de kering volgt uit de combinatie van de conditionele faalkans per waterstand (fragility curve, zie 6.5) en de kansverdeling van de waterstand (6.4.1). Deze combinatie kan worden gedaan met verschillende algoritmes (FORM, Numerieke Integratie, Monte Carlo Sampling – MCS, zie CUR, 1997). FORM heeft als voordeel dat hier ook de gecombineerde invloedscoëfficiënten uit voortkomen. Overigens kunnen ook binnen een MCS analyse invloedscoëfficiënten worden bepaald, dit vraagt een aanvullende analyse. Numerieke Integratie heeft als voordeel dat deze snel en nauwkeurig is voor een beperkt aantal variabelen. De totale faalkans wordt bepaald door de conditionele faalkans per waterstand (de fragility curve) te combineren met de kansdichtheid van de waterstand volgens:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(h) \cdot f_h(h) dh = \int_{-\infty}^{\infty} P(F|h) \cdot f_h(h) dh \quad (7)$$

waarin $F_R(h) = P(F|h)$ de faalkans als functie van de waterstand is en $f_h(h)$ de kansdichtheid van de waterstand. $F_R(h)$ is hierin dus de fragility curve. Kortom, de totale faalkans is een gewogen gemiddelde (volgens de verdeling van de waterstand) van de fragility curve (in de kansruimte), zie Figuur 6.2. Overigens kan doorgaans met een kleiner bereik van de waterstand (bijvoorbeeld tussen kruin en teen) een goede schatting van de faalkans worden verkregen.



Figuur 6.2 Integreren fragility curve over kansdichtheid waterstand

7 Faalkans updating principes

In dit hoofdstuk worden de algemene principes en aandachtspunten voor faalkans updating beschouwd.

7.1 Algemeen principe faalkans updating

7.1.1 Beschrijving methode

Het algemene principe van faalkans updating (FU) is dat op basis van een observatie de schatting van de faalkans kan worden bijgesteld door toepassing van de stelling van Bayes. In deze handreiking wordt als observatie beschouwd het overleven van geobserveerde belastingcondities zonder indicaties van falen, zodat ervan kan worden gegaan dat de beschouwde grenstoestand niet is overschreden. Met deze informatie kan de faalkans worden bijgesteld. Dat gebeurt expliciet of impliciet (afhankelijk van de wiskundige uitwerking) door het niet plausibel verklaren van bepaalde waardes (of combinaties) van sterkte en belastingeffect parameters. Voor achtergrondinformatie wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

7.1.2 Reduceerbare onzekerheid

Het bijstellen van (faal)kansen berust op de veronderstelling dat een deel van de onzekerheid kennisonzekerheid is.

- **Kennisonzekerheid** (in het Engels 'epistemic uncertainty') betekent dat de echte waarde van een parameter wel bestaat, maar dat we hem alleen niet precies kennen. Zo gaan we er bijvoorbeeld van uit dat de waarde van de gemiddelde wrijvingshoek van een zandlaag in principe nauwkeurig te bepalen is door oneindig veel te meten, en dat deze waarde ook niet in de tijd verandert. De kansverdeling die we aan deze wrijvingshoek toekennen heeft dan ook niets te maken met toeval (een "random process") maar puur met onze beperkte stand van kennis en informatie over de wrijvingshoek verkregen middels een beperkte hoeveelheid grondonderzoek. Variabelen die grondeigenschappen beschrijven zijn doorgaans kennisonzekerheid.
- Hier tegenover staat dat de meeste belastingvariabelen **intrinsieke variabiliteit** in de tijd beschrijven. Zo is de jaarlijkse maximum waterstand echt de uitkomst van een random proces. In principe zegt de meting van een maximum waterstand in een jaar weinig over de maximum waterstand in het volgende jaar mits er al een aanzienlijke datareeks bekend is.

Het belangrijke verschil in deze context tussen kennisonzekerheid en intrinsieke variabiliteit is dat kennisonzekerheid reduceerbaar is door toevoegen van extra informatie, terwijl intrinsieke variabiliteit dat niet is (op een stuk statistische onzekerheid na).

Voor de praktische invulling in de hier beschreven FU analyses betekent dit dat we moeten nagaan of een variabele significant in de tijd verandert, of dat de kansverdeling praktisch puur kennisonzekerheid representeert. Over het algemeen geldt dat hoe groter het aandeel van reduceerbare kennisonzekerheid, hoe groter het effect van updating. Voor een nadere invulling hiervan, per type variabele in macrostabiliteit analyses, wordt verwezen naar Tabel 7.1.

7.1.3 Beoordeling en observatie

Binnen een FU analyse dient onderscheid te worden gemaakt tussen twee situaties:

1. De beoordelingscondities: dit zijn de (toekomstige) condities die aangehouden worden ter vergelijking met de veiligheidseis, meestal in een bepaald zichtjaar in de toekomst.
2. De observatie: dit zijn de omstandigheden ten tijde van de (overleefde) observatie.

De bijstelling van de berekende faalkans ontstaat door mogelijke realisaties van parameters of parametercombinaties die in de observatie niet kunnen zijn voorgekomen, ook in de beoordelingscondities niet kunnen voorkomen. Het gaat hierbij dus om een bijstelling door meer informatie over de kennisonzekerheden.

7.1.4 Overleefde belasting

Bij de (overleefde) observatie is het van belang dat aannemelijk kan worden gemaakt dat de grenstoestand ten tijde van de observatie niet is overschreden. Praktisch betekent dit voor de dijk dat er geen indicaties van een afschuiving zijn waargenomen (significante deformaties, scheurvorming).

7.1.5 Aanvullende meerwaarde faalkans updating

Naast het effect van overleefde condities op de faalkansschatting levert een faalkans (updating) analyse aanvullende meerwaarde op de volgende punten:

- Een a-priori faalkansanalyse (faalkansanalyse zonder updating) is onderdeel van de analyse. Deze tussenstap kan in sommige gevallen tot goedkeuring leiden waar dat niet het geval was bij de doorgaans conservatievere semi-probabilistische beoordeling.
- Er wordt inzicht verkregen in het relatieve belang van de buitenwaterstand, verkeersbelasting, overslag en infiltratie etc, op de stabiliteit. Deze inzichten kunnen worden gebruikt bij het optimaliseren van versterkingsmaatregelen.
- Het benutten van proefbelastingen kan expliciet worden meegenomen. Welke proefbelasting nodig is om tot goedkeuring van het profiel te komen kan vooraf worden bepaald (zie sectie 8.7).

7.2 Faalkans updating methodiek

In het algemeen moet de volgende vergelijking voor een FU analyse worden opgelost (Schweckendiek en Kanning, 2016):

$$P(F|\epsilon) = \frac{P(F \cap \epsilon)}{P(\epsilon)} = \frac{P(\{g(X) < 0\} \cap \{h(X) < 0\})}{P(h(X) < 0)} = \frac{P(\text{falen EN observatie})}{P(\text{observatie})} \quad (8)$$

Waarin $P(F|\epsilon)$ de bijgestelde faalkans is met F is falen en ϵ is de observatie, $P(\{g(X) < 0\})$ de kans op overschrijding van de grenstoestand ('falen in de beoordeling') en $P(\{h(X) < 0\})$ niet falen tijdens de observatie ('voldoet aan de observatie'). De teller van deze vergelijking geeft aan hoe de methode werkt, namelijk door voor de faalkans alleen parameter combinaties mee te nemen die aan de ene kant tot falen zouden leiden, en tegelijk wel aan de observatie condities moeten voldoen (ze moeten verklaarbaar zijn met wat in het veld is waargenomen).

De uitwerking kan op verschillende manieren gebeuren. Enkele mogelijkheden hiervan zijn:

- De exacte methode. Dit betreft directe toepassing van een betrouwbaarheidsmethode met het grenstoestandsmodel (hier: stabiliteitsanalyse), bijvoorbeeld met Monte Carlo Simulaties (MCS) of numerieke integratie (zie 8.4).
- De benadering met fragility curves (8.5). Dit is een benaderende methode welke als voordeel heeft dat er minder evaluaties van de grenstoestand functie nodig zijn. Wel moet er goed met niet-lineaire effecten worden omgegaan (zie 0). Als de methode

fragility curves adequaat wordt toegepast (zie oa. 6.5 en 8.5), zullen de uitkomsten doorgaans nagenoeg gelijk zijn aan de exacte methode.

- De probabilistische methode in het TRAS (ENW, 2009). Deze methode is ook gebaseerd om FORM en behoeft weinig evaluaties van de grenstoestandsfunctie. Deze methode heeft als voorwaarde dat de observatie minimaal net zo sterk is als de beoordeling, bij optreden van (al beperkte) degradatie kan de betrouwbaarheid aanzienlijk worden overschat (Schweckendiek ea, 2016).

Deze groene versie van de handreiking richt zich vooral op de methode fragility curves. Voor de gedetailleerde uitwerking van de verschillende methodes wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

7.3 Omgaan met onzekerheden in faalkans updating

7.3.1 Kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit

Binnen een faalkans updating analyse moet onderscheid worden gemaakt tussen kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit (7.2). Kennisonzekerheden (epistemische onzekerheden) zijn reduceerbaar. Het is dus van belang om de variabelen (stochasten) te identificeren die kennisonzekerheid representeren. Onderstaand schema in Tabel 7.1 kan hiervoor als een eerste inschatting worden gebruikt. Echter, het wordt sterk aangeraden om dit per case na te gaan. Enkele voorbeelden ter ondersteuning van de overweging of een variabele kennisonzekerheid representeert:

- **Schuifsterkte parameters:** Sterkte parameters veranderen over het algemeen weinig (of zijn sterk gecorreleerd) in de tijd. Onzekerheid ontstaat vooral door een gebrek aan kennis door een beperkt aantal metingen en meetonzekerheid. Schuifsterkte parameters kunnen dus doorgaans als kennisonzekerheid en dus volledig gecorreleerd in de tijd worden gemodelleerd. Let wel, dit betreft inherente grondeigenschappen, niet state parameters zoals de effectieve spanning die wel veranderen in de tijd.
- **Modelonzekerheid:** Modelonzekerheid heeft doorgaans zowel een kennisonzekerheidscomponent (gecorrleerd in de tijd) als een inherent onzekere component (ongecorreleerd in de tijd). Vaak wordt verondersteld dat modelonzekerheid volledig uit kennisonzekerheid bestaat, zeker als modelonzekerheid geen dominante rol speelt in de beschouwing. Waar modelonzekerheid overheerst moet de keuze goed worden doordacht aangezien modelonzekerheid beschouwen als kennisonzekerheid resulteert in een bijstelling van de faalkans Modelonzekerheid beschouwen als intrinsiek variabel is een veilige keuze in faalkans updating context, zodat deze niet (mogelijk) onterecht wordt bijgesteld en er te veel faalkans updating wordt berekend. Zie ook Schweckendiek en Kanning (2016) voor meer informatie.
- **Geo-hydrologische parameters:** de modelering van geo-hydrologische respons parameters kan van geval tot geval verschillen. Voor bijvoorbeeld de leklengtes kan worden gesteld dat deze (via stijghoogteresponsmetingen) kunnen worden bepaald. Als er geen verschillen zijn tussen de situatie waarin de metingen zijn uitgevoerd en de beoordelingscondities, dan kunnen deze als gecorreleerd worden verondersteld. Voor het freatisch vlak kunnen zowel de gecorreleerde situatie als de ongecorrleerde situatie voorkomen. Als het freatische vlak voornamelijk wordt bepaald door de buitenwaterstand, dan kan de hoogte van het freatische vlak worden gemodelleerd als functie van de buitenwaterstand en zijn de parameters die de relatieve response beschrijven volledig gecorreleerd. Als het freatisch vlak vooral door regenval wordt bepaald, kan deze in de tijd sterk verschillen en wordt er geen correlatie verwacht

tussen de hoogte van het freatisch vlak in de beoordelingscondities en het freatisch vlak in de observatie.

De variabelen in Tabel 7.1 worden doorgaans gebruikt in stabiliteitsanalyses, zie ook 6.1.1; de derde kolom geeft een eerste inschatting of per variabele kennisonzekerheid of intrinsieke variabiliteit dominant is.

Tabel 7.1 Overzicht variabelen in FU analyse met indicatie welke onzekerheden typisch als kennisonzekerheid en als intrinsieke variabiliteit kunnen verondersteld (per case te onderbouwen)

Variable	Categorie	onzekerheid
Su-ratio, S	Grondeigenschap	kennis
Sterkte toename exponent, m	Grondeigenschap	kennis
Grensspanning, σ_y	Grondeigenschap	kennis
Volumiek gewicht, γ	Grondeigenschap	kennis
Wrijvingshoek zand, ϕ	Grondeigenschap	kennis
Buitenwaterstand, h	Geo-hydrologisch	intrinsiek
Leklengte buiten, LLout	Geo-hydrologisch	kennis
Leklengte binnen, LLin	Geo-hydrologisch	kennis
Indringingslengte, IL	Geo-hydrologisch	kennis
Freatische lijn	Geo-hydrologisch	intrinsiek
Polder water level	Geo-hydrologisch	intrinsiek
Verkeersbelasting	Externe belasting	intrinsiek
Zettingen	Schematisering	kennis
Grondopbouw	Schematisering	kennis
Model onzekerheid	Model	kennis

7.3.2 Rekenen met scenario's

Een scenario is een mogelijke schematisering van de beoordeling of observatie (zie ENW, 2012). Scenario's kunnen worden toegepast in geval het niet praktisch is een variatie of onzekerheid in de fragility curve te modelleren. Dit kan bijvoorbeeld voor de freatische lijn het geval zijn of voor verkeersbelasting (er zijn bijvoorbeeld nog geen breed geaccepteerde kansverdelingen van de verkeersbelasting). Per scenario (bv. ondergrond) dient er een aanvullende aparte beoordeling en observatie schematisering te worden gemaakt, en een aparte stabiliteitsanalyse of faalkansanalyse. Hoe scenario's en scenariokansen kunnen worden gecombineerd in een faalkans updating analyse staat beschreven in Schweckendiek en Kanning (2016). Vaak is echter een pragmatische oplossing om de denkbare scenario's als gevoeligheidsanalyse te beschouwen om de robuustheid van het eindantwoord, de bijgestelde faalkans of betrouwbaarheidsindex, te onderbouwen.

7.3.3 Veranderingen tussen observatie en beoordelingscondities

Door tijdsafhankelijke effecten kan er een verschil ontstaan tussen de beoordeling en de observatie. Tijdsafhankelijke effecten houden in een afname of toename van sterkte (parameters) of belastingen in de tijd. Voorbeelden zijn baggeren vaargeul of erosie voorland waardoor de belasting toeneemt in de tijd of bodemdaling waardoor de geometrie verandert en hiermee de sterkte toe of afneemt in de tijd, afhankelijk van de lokale condities. Tijdsafhankelijke effecten kunnen expliciet worden meegenomen in een FU analyse door de deze zo goed mogelijk in te schatten en expliciet te modelleren in beoordeling en observatie; bij voorkeur met een beste schatting (best guess), in geval van grote onzekerheid eventueel met een conservatieve schatting (zie 7.4).

7.4 Conservatieve keuzes in faalkans updating

Idealiter worden in een faalkans (updating) analyse alle variabelen beschreven door een kansverdeling. In sommige gevallen is het echter niet redelijkerwijs mogelijk een verdeling te modelleren (bijvoorbeeld voor de freatische lijn kan dit het geval zijn). In dit geval kan worden teruggevallen op een conservatieve deterministische schatting. Voor de beoordeling en observatie is een conservatieve keuze echter tegengesteld. Voor de beoordeling is een keuze die resulteert in een lage stabiliteitsfactor conservatief, voor de observatie is een keuze die resulteert in een hoge stabiliteitsfactor echter conservatief.

Daar waar het voor een beoordelingsconditie vaak conservatief is om met een bijvoorbeeld een hoge verkeersbelasting te rekenen, is dit voor de modelering van de geobserveerde situatie niet conservatief aangezien je hiermee impliceert dat de dijk deze verkeersbelasting heeft overleefd. Voor het freatisch vlak geldt hetzelfde: een relatief hoge schematisering volgens het TR Waterspanningen bij Dijken, welke een conservatieve schematisering is voor de beoordeling, is juist niet conservatief voor de observatie. Immers, dit zou impliceren dat de dijk al een hoge freatische lijn heeft overleefd. Men kan dus door niet-conservatieve keuzes in het licht van een faalkans updating analyse een te grote bijstelling van de faalkans berekenen. Het maken van een conservatieve keuze is niet altijd evident. Verkeersbelasting kan bijvoorbeeld zowel positief als negatief op de stabiliteit werken, afhankelijk van de locatie. In twijfelgevallen kunnen verkennende analyses worden gemaakt, uiteindelijk gaat het immers om de effect op de stabiliteit of faalkans (gunstig of ongunstig).

8 Stap 3: Faalkans updating

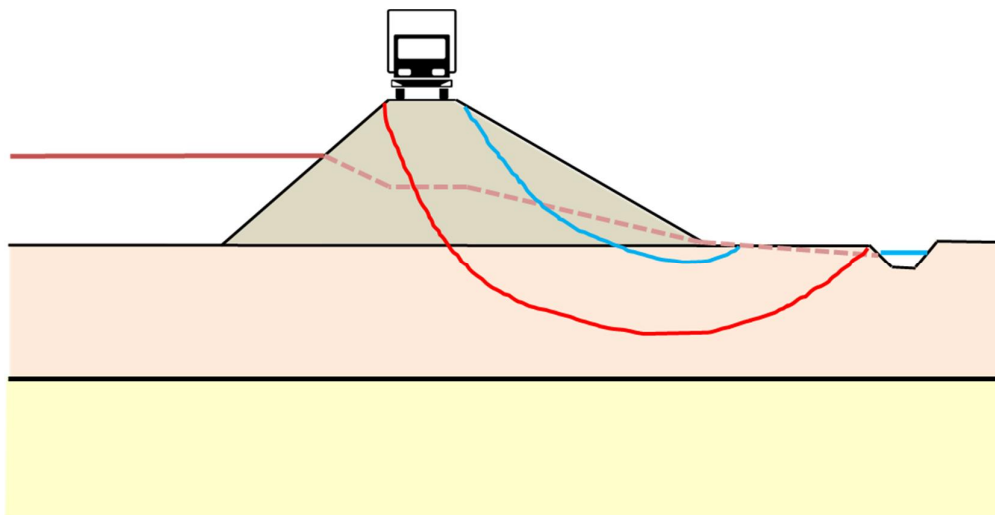
Stap 3: faalkans updating bestaat uit twee onderdelen:

- 1 Modellering van de observatie
- 2 Toepassen faalkans updating

8.1 Kritieke glijvlakken voor faalkans updating

Voor de methode fragility curves is het van belang alle mogelijke relevante kritieke glijvlakken te beschouwen en bij te stellen met de juiste observatie. Door het beschouwen van de relevante glijvlakken en bijbehorende observaties wordt voorkomen dat er onrechtmatig sterkte aan niet relevante observaties wordt ontleend. Dit kan worden gedaan door eerst alle mogelijke kritieke glijvlakken voor de beoordeling te beschouwen. Soms zijn er meerdere weliswaar duidelijk verschillende glijvlakken met vergelijkbaar lage stabiliteitsfactor, bijvoorbeeld een oppervlakkige en een diepe. Vervolgens kan de faalkans van elk kritiek glijvlak worden bijgesteld met een significante observatie. Hiertoe dient in de observatie hetzelfde glijvlak te worden beschouwd als het kritieke glijvlak in de beoordelingscondities. Een significante observatie is een observatie die informatie geeft over kritieke glijvlakken. Voor de exacte methode is het omgaan met de kritieke glijvlakken in de methode verwerkt, zie 8.4.

Kritieke glijvlakken voor de observatie hebben een andere lading dan voor de a-priori analyse. In de a-priori analyse wordt gekeken naar 1 of meerdere kritieke glijvlakken. In de observatie is het van belang dit ruimer te definiëren en meer glijvlakken te bekijken omdat sommige glijvlakken meer impact ervaren van updating van andere glijvlakken. Zo kan het zijn dat glijvlakken die voor de a-priori analyse minder kritisch zijn, het meest kritisch zijn na het beschouwen van de observatie. Dit wordt geïllustreerd met het voorbeeld in Figuur 8.1. De blauwe glijcirkel is a-priori de minst kritische maar ondervindt geen bijstellingseffect door de observatie van een verkeerslast. De rode glijcirkel is a-priori meer kritisch (hogere faalkans) maar ondervindt ook meer faalkans updating effect door de overleefde verkeersbelasting. De blauwe glijcirkel is dus na FU de maatgevende glijcirkel.



Figuur 8.1 Voorbeeld effect observatie verkeersbelasting op faalkans updating.

In essentie komt het er op neer dat het kritieke glijvlak, het glijvlak is dat na het meenemen van de observatie de maatgevende is. Idealiter worden alle mogelijk glijvlakken beschouwd. Praktisch is dit echter moeilijk in verband met de zeer lange rekentijden die hier mee gemoeid gaan. Wel is het mogelijk om meerdere mogelijke (a-posteriori) kritieke glijvlakken te beschouwen en deze zo te kiezen dat alle relevante glijvlakken worden beschouwd.

8.2 Modellering observatie

- 8.2.1 Het gaat bij de schematisering van de observatie om twee aspecten: de schematisering van de dijk ten tijde van de observatie en de geobserveerde belasting. Keuze observatie
- Allereerst dient er een keuze voor een te modelleren (overleefde) observatie te worden gemaakt. Dit kan een (hoge) overleefde historische waterstand zijn, of bijvoorbeeld dagelijkse omstandigheden. Ook andere belastingen dan de waterstand (bijvoorbeeld regenval, verkeer) kunnen van belang zijn voor de keuze van de observatie.

Overwegingen welke observatie het meeste effect zal hebben in een FU situatie zijn (zie ook stap 0):

- Nauwkeurigheid observatie: van dagelijkse omstandigheden is goed bekend, of kan dit worden door meting van de waterspanningen en overige belastingen. De nauwkeurigheid is minder voor een historische observatie, waarbij geen metingen van de waterspanningen voorhanden zijn en er niet precies bekend is wat de belasting was. De onzekerheden in de historische observatie dienen vaak (conservatief) verdisconteerd te worden, wat het effect van FU minder kan maken.
- Buitenwaterstand: een hogere historische waterstandsobservatie zal meer FU effect hebben dan een dagelijkse observatie. Hier speelt ook het watersysteem een rol: bij zeedijken duurt het hoogwater korter dan bij bijvoorbeeld meerdijken. Een observatie kan bij een zeedijk dus ook bij een kortere duur effect hebben.
- Verschil tussen observatie en beoordeling. Observaties uit het verleden hebben mogelijk een groter verschil in bijvoorbeeld geometrie door zettingen dan een dagelijkse observatie wat het effect van FU beperkt.
- Dominante belasting: het meenemen van een observatie van een belasting die het grootste effect heeft op de stabiliteit kan ook het grootste FU effect genereren.

Een aanpak voor de keuze tussen een dagelijkse en historische observatie kan zijn om eerst de dagelijkse omstandigheden te beschouwen en te bepalen of de dijk door FU voldoet. Als dit niet het geval is kan alsnog een historische situatie worden geanalyseerd. Voor het verzamelen van benodigde gegevens zal voor een historische observatie in het algemeen meer inspanning moeten worden geleverd. Voor meer inzicht in eventueel benodigde historische gegevens wordt verwezen naar het TRAS (ENW, 2009) of van Hoven (2016).

Indien er geen effectieve observatie is, kan worden overwogen om een observatie te creëren in de vorm van een proefbelasting. De omvang van een dergelijke belasting kan worden gedimensioneerd met een FU analyse, zoals ook gebeurt bij bijvoorbeeld proefbelastingen van funderingspalen (zie paragraaf 8.7).

8.2.2 Modelering sterkte parameters

Per sterkte parameter moet worden bepaald of deze dezelfde verdeling heeft als in de beoordeling. Dit zal voor de meeste sterktevariabelen het geval zijn. Vooral veroudering kan eventueel resulteren in een aanpassing van de verdeling, bijvoorbeeld door degradatie van veen (afname sterkte) of rijping van klei (toename sterkte). Als er een tijdsafhankelijke afname van sterkte is, moet worden bepaald of dit gemodelleerd kan worden en welke

onzekerheid dit toevoegt, zie ook 7.3.3. Een afname van de sterkte in de loop der tijd, resulteert er in dat de sterkte ten tijde van de observatie groter was dan in de beoordelingscondities. Een sterkte-toename kan mogelijk ook gemodelleerd worden op een conservatieve manier (zie 7.4).

8.2.3 Modelering belasting parameters

Net zoals bij de beoordeling gaat het er niet alleen om het in beeld brengen van de belastingen, maar vooral de belastingeffecten, zie 6.4. Dit is voor de observatie nog belangrijker aangezien belastingeffecten voor de beoordeling doorgaans worden afgedekt door een conservatieve keuze. Als wordt gerekend met conservatieve schattingen moeten de discussiepunten in 7.4 worden beschouwd.

Per belastingvariabele moet worden bepaald of deze dezelfde verdeling of deterministische schatting heeft als in de beoordeling, zie ook 7.1.3. Enkele aandachtspunten bij de modellering van belastingen zijn verder:

- Waterstanden: De kansverdeling van de buitenwaterstand ten tijde van de observatie is niet nodig voor een FU analyse. De geobserveerde waterstand moet wel gemodelleerd worden, eventueel met een onzekerheid als dit van toepassing is (bijvoorbeeld voor locatie waar geen lokale waterstandsmetingen beschikbaar zijn).
- Waterspanningen: De waterspanningen gegeven de geobserveerde belasting dienen te worden gemodelleerd. Dit kan bijvoorbeeld via het opgeven van freatisch vlak, leklengtes en indringingslengte, inclusief de onzekerheden hieromtrent. Onzekerheden zijn te baseren op metingen indien deze beschikbaar zijn, net als bij de beoordeling. In geval regenval dominant is voor de freatische lijn, moeten regenval effecten en de bijbehorende onzekerheden worden gemodelleerd, zie 8.2.5. In alle gevallen kan ook worden teruggevallen op een conservatieve keuze.

8.2.4 Verkeersbelasting

De verkeersbelasting verdient speciale aandacht. Er is beperkte informatie beschikbaar hoe een verkeersbelasting de grondspanningen beïnvloedt en hoe dit op een goede manier kan worden gemodelleerd in een lamellen model zoals Bishop. Het effect op de grondspanningen kan van meerdere factoren afhankelijk zijn, waaronder de snelheid van het verkeer en de aanwezigheid van een effectieve wegfundering of juist zonder fundering op een groene dijk. De effecten van verkeersbelasting kunnen worden gemodelleerd door de spanningsspreidingshoek en de consolidatiecoëfficiënt. Voor de beoordeling kan dit worden ondervangen door conservatieve aannames te doen. Voor de observatie is dit ingewikkelder. De meest conservatieve aanname (mits het verkeer op het actieve deel van de glijcirkel staat) is om in de observatie geen verkeersbelasting mee te nemen. Als het wenselijk is dat er wel verkeersbelasting in rekening wordt gebracht in de observatie, dient het effect van verkeersbelasting eerst goed onderzocht te worden. Bijvoorbeeld door het aanbrengen van een boven belasting en de spanningen in de grond te meten.

8.2.5 Regenval

Voor de effecten van regenval geldt iets vergelijkbaars als voor de verkeersbelasting: de effecten van regenval op de freatisch lijn zijn afhankelijk van verschillende factoren (initiële stand freatisch vlak, duur, intensiteit, doorlatendheid dijk). Voor de beoordeling wordt dit ondervangen door conservatieve (hoge) schattingen van het freatisch vlak. Voor de observatie is een conservatieve schatting echter een hele lage freatische lijn, waardoor de FU impact vermindert. Als de invloed van regenval sterk de FU impact beïnvloedt kan het lonen hier nader naar te kijken om de onzekerheden van regenval effecten te verkleinen.

8.2.6 3D geometrie effecten

De invloed van 3D effecten worden doorgaans niet in een beoordelingsanalyse beschouwd als deze een positief effect hebben op de stabiliteit. Voorbeelden hiervan zijn opritten en veranderingen in het dijkprofiel in de nabije omgeving van het beschouwde profiel. Voor een FU analyse is het van belang om na te gaan of de standaard 2D plane strain aanname valide is in zowel beoordeling als observatie, of dat 3D geometrie effecten mogelijk hebben bijgedragen aan het de overleefde situatie. Dat is doorgaans het geval als de lengte van het beschouwde stuk korter is dan verwachte afschuiflengte. Ter indicatie is dit orde 20 a 30 m voor ondiepe glijvlakken en orde 50 a 100 m voor diepe glijvlakken. In dat geval dienen deze in rekening te worden gebracht bij de schematisering van de observatie, zie 8.3.3.

8.3 Samenhang tussen beoordeling en observatie

8.3.1 Kennisonzekerheid of intrinsieke variabiliteit

Essentieel voor een FU analyse is inzicht in welke onzekerheden kennisonzekerheden zijn (reducerbaar, gecorreleerd in tijd) en welke intrinsieke variabiliteit representeren (niet reducerbaar, ongecorreleerd in tijd). Per variabele dient dit te worden nagegaan, zie Hoofdstuk 4 en paragraaf 7.3.

8.3.2 Verschillen tussen beoordeling en observatie

Voor de bepaling hoe de observatie verschilt van de beoordeling, is veroudering van belang. Met veroudering wordt bedoeld de tijdsafhankelijke toename of afname van sterkte en belastingparameters (zie ook 7.3.3) Enkele voorbeelden van veroudering zijn:

- Zettingen: effect op geometrie en laagdiktes
- Autonome bodemdaling: effect op laagdiktes
- Toegevoegde bovenbelasting: effect op POP / grensspanning
- Degradering humeuze/veenlagen: effect op schuifsterkteparameters
- Baggeren, erosie en sedimentatie: effect op leklengtes

De tijdsafhankelijke effecten van sterkte en belasting kunnen in rekening gebracht worden in de observatie modellering door te rekenen met aangepaste verdelingen of conservatieve schattingen.

8.3.3 Typische genegeerde sterktebijdrages

Er zijn een aantal sterkte bijdrages die typisch in een beoordeling worden verwaarloosd (zie ook Schweckendiek en Kanning, 2016), bijvoorbeeld:

- Sterkte in de onverzadigde zone
- Op- en afritten en overige 3D effecten
- "Dijkvernageling invloed" door de paalfundering van nabij gelegen panden. In Schweckendiek ea (2016) bleek dit effect beperkt
- Gewicht bebouwing in observatie en beoordeling, afhankelijk van positieve of negatieve bijdrage aan stabiliteit. Het effect van het gewicht van bebouwing is afhankelijk van de fundering. Als bebouwing op palen gefundeerd is zal deze beperkte invloed hebben doordat de belasting wordt afgedragen op het diepe zandpakket.
- Objecten op of naast de dijk (Niet Waterkerende Objecten; NWO).

Voor een beoordeling is deze verwaarlozing doorgaans conservatief. Zoals in bovenstaande sectie is besproken betekent het niet dat dit ook conservatief is in een FU analyse en dienen deze bijdrages in kaart te worden gebracht en waar nodig meegenomen in de FU analyse. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse kan worden ingeschat of de sterktebijdrages significant zijn en moeten worden meegenomen.

Er zijn verschillende methodes om de bewezen sterke analyses uit te voeren als de beoordeling en de observatie zijn gemodelleerd. De methode fragility curves en de exacte methode worden behandeld in dit hoofdstuk, voor meer informatie wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

8.4 Faalkans updating met exacte methode

Formule 8 (paragraaf 7.2) kan met de exacte methode worden opgelost. Hiervoor zijn verschillende technieken van toepassing, waarvan Monte Carlo Sampling (MCS) de bekendste is.

- **Monte Carlo Simulatie** analyses zijn doorgaans tijdrovend omdat de posterior betrouwbaarheid hoog is, waardoor er heel veel simulaties nodig zijn. Ook is het tijdrovend om de kritische glijcirkels te controleren. Voordeel van MCS is dat het een exacte methode is en dat kritische glijcirkels in beoordeling en observatie automatisch goed worden verwerkt. Voor de methode Monte Carlo kan, overeenkomstig een gangbare deterministische analyse, voor elke realisatie naar het “maatgevende glijvlak” (laagste stabiliteitsfactor) worden gezocht (bijvoorbeeld door gebruik te maken van een flexibel grid) in zowel de beoordeling als de observatie.
- **Numerieke Integratie** kan worden toegepast maar werkt alleen efficiënt bij weinig variabelen (3 a 4).
- **Subset Simulation** en **Importance Sampling** zijn mogelijke technieken om het exacte resultaat te bepalen met een relatief beperkt aantal berekeningen. Dit is echter nog niet uitvoerig getest.

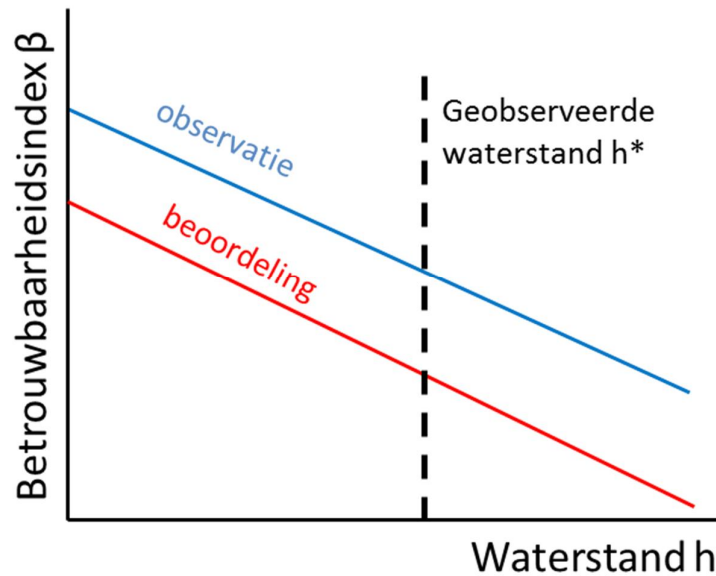
8.5 Faalkans updating met methode fragility curves

Voor meer informatie over de method fragility curves wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

8.5.1 Fragility curves in relatie tot observatie

Fragility curves geven de faalkans van de dijk als functie van buitenwatertand (h). Deze waterstand is dus de bij deze dijk behorende kritieke waterstand h_c (sterkte). De kritieke waterstand h_c is hiermee een overall sterkte term. Dit geeft de mogelijkheid om de sterkte in de beoordeling en de observatie te combineren. Binnen de methode fragility curves is dus nodig de fragility curve van de beoordeling en de observatie, alsmede de geobserveerde waterstand. Dit staat in onderstaande figuur schematisch weergegeven.

De verschillen tussen de beoordeling en de observatie curve kunnen ontstaan door tijdsafhankelijke verandering in één of meer parameters, bijvoorbeeld door maaiveldzetting of verouderingsprocessen in het algemeen, of door veranderd gebruik en mogelijk aangepaste verkeersbelasting (zie 7.3.3). Hierdoor kan de sterkte (en de betrouwbaarheid) groter zijn tijdens de observatie dan voor de beoordeling, maar ook andersom. De beoordeling- en observatiecurve liggen niet altijd parallel en boven elkaar zoals in de schematische weergave (Figuur 8.2). De vorm en ligging van de curves kan direct een indicatie geven van het verwachte effect (zie Schweckendiek en Kanning, 2016), bijvoorbeeld relatief weinig verwacht effect FU in geval van steile curves die uit elkaar liggen. In geval van twijfel over de nauwkeurigheid van de methode fragility curves, is een controleberekening met de exacte methode (bv. Monte Carlo) aan te raden.



Figuur 8.2 Schematische weergave fragility curves beoordeling en observatie condities

8.5.2 Te gebruiken technieken

In de methode fragility curves wordt de bijgestelde faalkans bepaald op basis van de twee fragility curves en de geobserveerde waterstand. Dit kan op basis van verschillende methodes, onder andere Monte Carlo Sampling en Numerieke Integratie. Zie voor meer informatie Schweckendiek en Kanning (2016).

8.5.3 Correlatie tussen de fragility curves

Bij fragility curves wordt gewerkt met een cumulatieve sterkte term (toenemende faalkans met de buitenwaterstand) zie paragraaf 8.5.1. Er kan echter een correlatie tussen de beoordeling en observatie fragility curves bestaan die kleiner is dan 1 (eigenlijk tussen de sterkte termen die de fragility curves representeren). Als de correlatie kleiner is dan 1 neemt de impact van FU af. Het wordt dan ook aangeraden deze correlatie altijd uit te rekenen en mee te nemen bij de faalkans updating. Zie Schweckendiek en Kanning (2016) hoe de correlatie kan worden meegenomen in de faalkans updating op basis van fragility curves.

Er kunnen twee redenen zijn waarom de beoordeling en observatie fragility curves niet volledig gecorreleerd zijn:

- 1 De parameters waaruit de fragility curves zijn opgebouwd zijn niet volledig gecorreleerd tussen beoordeling en observatie (zie 7.3.1).
- 2 De bijdragen van de parameters aan de faalkans (α) verschillen tussen beoordeling en observatie.

Voorbeelden hiervan staan in Schweckendiek e.a. (2016).

Aangezien een correlatie kleiner dan 1 altijd kan ontstaan, wordt aanbevolen de correlatie altijd uit te rekenen en toe te passen bij FU op basis van fragility curves.

De correlatie tussen beoordeling en observatie ($\rho_{beo,obs}$) kan worden berekend door:

$$\rho_{beo,obs} = \sum_{i=1}^q \alpha_{toe,i} \cdot \alpha_{obs,i} \cdot \rho_{toe,obs,i} \quad (9)$$

Hier is i de indicator voor de variabelen, q het aantal variabelen en $\alpha_{toe,i}$ de bijdrage van variabele i aan de faalkans in de beoordeling, $\alpha_{obs,i}$ de bijdrage van variabele i aan de faalkans in de observatie (volgen beide uit de FORM sommen) en $\rho_{beo,obs,i}$ de autocorrelatie van een variabele (zie 7.3.1). $\rho_{beo,obs,i}$ kan doorgaans verdedigbaar worden aangenomen als een waarde 1 (kennisonzekerheid, volledig gecorreleerd in de tijd) of 0 (intrinsieke variabiliteit, ongecorrleerd). $\rho_{beo,obs}$ neemt een waarde 1 aan als alle parameters volledige gecorreleerd zijn en als geldt $\alpha_{beo,i} = \alpha_{obs,i}$ voor alle i . Vergelijking (9) is niet toepasbaar in geval er correlatie tussen de variabelen is, zie Schweckendiek en Kanning (2016).

De waarden van α kunnen veranderen als functie van de waterstand. Dit kan ondervangen worden door ofwel te werken met een (over de waterstand) gemiddelde α , ofwel door α te interpoleren en voor elke waterstand de $\rho_{beo,obs}$ te bepalen, ofwel alfa's in ontwerp punt bepalen in geval van sterk dalende fragility curves (zie Schweckendiek en Kanning, 2016). De alfa's in het ontwerp punt hebben de voorkeur. $\rho_{beo,obs}$ wordt vervolgens gebruikt om de bijgestelde faalkans te berekenen. De toepassing van de methode fragility curves op basis van gecorreleerde fragility curves wordt verder beschreven in Schweckendiek en Kanning (2016).

8.6 Doorvertaling van doorsnede naar dijkstrekking

De FU analyse zoals in dit rapport beschreven is gebaseerd op representatieve doorsneden van het te beschouwen dijkvak. In deze paragraaf wordt behandeld in hoeverre de resultaten van de representatieve doorsneden mogen worden doorvertaald naar het hele dijkvak. Voor de faalkansanalyse van de beoordelingscondities is de schematisering niet anders dan voor normale faalkansanalyses of semi-probabilistische beoordelingen. Indien onzekerheden niet expliciet kunnen worden gemodelleerd, worden conservatieve keuzes gemaakt (althans in het kader van een beoordeling) door middel van deterministische schattingen (zie ook Schweckendiek et al. 2017).

Voor de observatie geldt een extra aandachtspunt voor de strekking binnen het dijkvak waarvoor de observatie wordt gemodelleerd (bv. een stuk groene dijk zijn tussen opritten of andere objecten in). Er geldt dat deze strekking een minimale lengte moet hebben waar ook een glijvlak had kunnen ontstaan. Afhankelijk van de geometrie gaat het om minimaal 50 á 100 m als typische lengte van een diep schuifvlak.

Voor de doorvertaling van de met representatieve doorsneden verkregen resultaten geldt het volgende principe (zie ook Teixeira en Rozenbrand, 2017):

Indien de FU analyse wordt uitgevoerd in het zwakste deelvak (d.w.z. hoogste faalkans) kan ervan worden uitgegaan dat de a-posteriori betrouwbaarheid in alle andere deelvakken minimaal de bijgestelde betrouwbaarheid van die a-priori zwakste vak is.

Met andere woorden: Indien de representatieve doorsnede van het dijkvak conservatief is geschematiseerd en andere doorsneden een hogere stabiliteit of a-priori betrouwbaarheid hebben, dan zal dat minimaal ook na de bijstelling zo zijn. Als de doorsnede op basis van de FU analyse worden goedgekeurd, dan geldt dat resultaat dus voor het hele vak.

Het kan wel zo zijn dat de relatieve afname in faalkans het grootst is voor het zwakste vak. Het zal echter nooit zo zijn dat de faalkans daardoor kleiner wordt dan die van andere

strekkings met stabiliteitsverhogende eigenschappen. De zwakste doorsnede in het vak blijft de zwakste doorsnede, ook na de faalkansbijstelling. Uiteraard moeten de eigenschappen van het hele dijkvak hiervoor zodanig vergelijkbaar of homogeen zijn dat de het effect van de overleefde condities ook in de andere doorsnedes dan de geanalyseerde verondersteld mag worden.

Om een voorbeeld te geven: Als we te maken hebben met een dijk die op sommige stukken door opritten extra wordt gesteund, maar die verder (statistisch) homogeen is, ligt de representatieve doorsnede in een strekking groene dijk tussen de opritten in. De strekking moet dus afhankelijk van de geometrie van dijk en schuifvlak minimaal 50 á 100 m lang zijn om voor een FU analyse in aanmerking te komen. De betrouwbaarheid is dan in de stukken met stabiliteitsverhogende opritten ook minimaal zo hoog als in de strekking groene dijk waarvoor de overleefde condities in rekening zijn gebracht.

In sommige gevallen kan het zijn dat door het beschouwen van een langer dijkvak met nogal wat verschillen in geometrie en eigenschappen veel conservatieve aannames moeten worden gemaakt ('gestapeld'). Als dit ertoe leidt dat niet aantoonbaar aan de faalkanseis wordt voldaan kan het zinvol zijn om het dijkvak in kleinere vakken in te delen.

Bovenstaand principe staat nader uitgelegd in Teixeira en Rozenbrand (2017) met voorbeelden ter onderbouwing.

8.7 Faalkans updating op basis van meerdere scenario's

Zoals in hoofdstuk 5 beschreven kan ook een faalkansbijstelling worden gemaakt op basis van scenario's, bijvoorbeeld voor scenario's van de grondopbouw. De scenario's dienen in een aparte schematisering te worden gemodelleerd. Voor elk scenario wordt een fragility curve opgesteld. Hierbij moet nog worden opgegeven:

- Scenario kansen. De kans van optreden van dit afwijkende scenario. De gesommeerde kans voor de scenario's is weer 1 (zie 7.3.2).
- Correlatie in de tijd van scenario's. Voor bijvoorbeeld ondergrondscenario's geldt dat deze niet zullen veranderen in de tijd en dus kennisonzekerheid (volledige gecorreleerd) zijn. Het freatisch vlak is doorgaans inherent variabel. De verwerking van correlatie tussen scenario's staat verder beschreven in Schweckendiek en Kanning (2016).

Op basis van deze informatie kan de bijgestelde faalkans door FU worden bepaald. Ook kunnen eventueel bijgestelde scenario kansen worden bepaald. Zie Schweckendiek en Kanning (2016). Wel dienen de in 8.6 beschreven overwegingen meegenomen te worden. De kans op een bepaald ondergrondscenario kan bijvoorbeeld door een overleefde situatie sterk verminderen.

8.8 Ontwerpen van een proefbelasting

In geval na stap 2 en 3 nog niet aan de eis wordt voldaan, kan ook een proefbelasting worden toegepast.

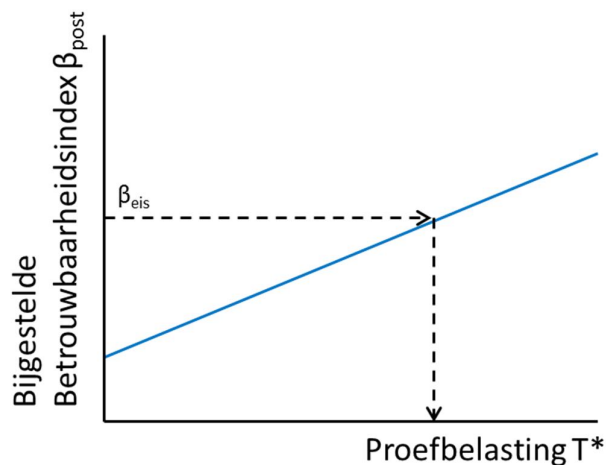
Er zijn meerdere proefbelastingen denkbaar, onder andere het aanbrengen van een bovenbelasting of het uitvoeren van infiltratieproeven voor de verzadigingsgraad van de dijk. Let wel, het gaat voor een faalkans updating steeds om de belasting effecten. Voor een bovenbelasting kunnen de belastingeffecten lastig te modelleren zijn (zie 8.2.4).

Voor het ontwerpen van een proefbelasting kunnen meerdere FU sommen worden gemaakt. Hiermee kan de relatie tussen door FU bijgestelde betrouwbaarheidsindex (β_{post}) en de proefbelasting (T^*) worden bepaald. Als de eis aan de dijk (β_{eis}) bekend is (Hoofdstuk 3), dan

kan zo de benodigde proefbelasting worden bepaald die moet worden overleefd om te voldoen aan de vereiste betrouwbaarheid; dit is schematisch weergegeven in Figuur 8.3.

Bij het uitvoeren van een proefbelasting zal goed moeten worden gekeken naar risico's en risicobeheersing. Of het risico acceptabel is, is aan de beheerder. Het wordt sterk aanbevolen om een goed monitoringprogramma op te zetten, zodat de onzekerheden van de observatie kunnen worden geminimaliseerd. Monitoring maakt ook onderdeel uit van de risicobeheersing.

Naast het toepassen van FU kan een proefbelasting ook worden gebruikt om de uitgangspunten van de schematisering bij te stellen om zo tot een scherpere a-priori betrouwbaarheid te komen in stap 2. Bijvoorbeeld door het meten van de effecten van infiltratie na golfoverslag in plaats van conservatief volledige verzadiging aan te nemen.



Figuur 8.3 Schematische weergave bepaling benodigde proefbelasting om te voldoen aan de vereiste betrouwbaarheid

9 Referenties

Calle, E. O. F. (1985). Probabilistic Analysis of Stability of Earth Slopes. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco: Balkema, Rotterdam.

CUR - Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (1997). Kansen in de civiele techniek - Deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie. CUR publicatie 190.

Deltares (2014). Dijken op Veen II - DoV werkwijze voor bepaling macrostabiliteit Markermeerdijk. Deltares rapport 1208254-032

ENW – Expertise Netwerk Waterkeren (2009). Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken. 27 maart 2009.

ENW – Expertise Netwerk Waterkeren (2012). Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. Oktober 2012.

Geodelft (1994). MPROSTAB – user's manual PC-MODEL – Probabilistic analysis of stability of earth slopes. Geodelft, the Netherlands

Jongejan, R. (2016). Correlaties in het tijdsdomein en reliability updating – Discussiememo. KPR memo 12-10-2016.

Kanning, W. en M. van der Krogt (2016). Pore water pressure uncertainties for slope stability. Memo 1230090-034-GEO-0008, Deltares.

Kanning, W., M. Huber, M. Van der Krogt, T. Schweckendiek en A. Teixeira (2015). Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability. Rapport 1220080-003-ZWS-0019, Deltares.

Kanning, W., E. Vastenburger, J. Kames en E. van der Heijden (2017). Bewezen Sterkte Regionale Keringen. Deltares rapport 1230894.

KPR – Kennisplatform Risicobenadering (2016). Factsheet Verkeersbelasting en macrostabiliteit. 21-07-2016.

Hoven, A. van (2016). POVM Beter benutten actuele sterkte KIJK, activiteit 5 – deel Historische gegevens. Deltares rapport 1220518-005

Rijkswaterstaat (2009). Van ruwe data tot overstromingsrisico - Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkringen binnen het project VNK2. November 2009.

Rijkswaterstaat (2015). Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014 - Behorende bij Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen (OI2014v3). Versie juli 2015.

Rozing, A., 2015. Onzekerheden Waterspanningen in WTI 2017. Memo 1220083-004-GEO-0003, Deltares

Schweckendiek, T. (2014). On reducing piping uncertainties. PhD thesis TU Delft

Schweckendiek, T. and M. Van der Krogt (2015). Verkenning Bewezen Sterkte Markermeerdijken Onderdeel vervolgonderzoek pompen+geotechniek. Rapport 1221189-000-GEO-0004, Deltares.

Schweckendiek, T en W. Kanning. (2016). Reliability updating using past performance - Background report. Rapport 1230090-038, Deltares.

Schweckendiek et al. (2016). Reliability updating using past performance – Test cases reports. Rapport 1230090-037, Deltares.

Schweckendiek, T, van der Krogt, M.G.m Rijnveld, B. en Teixeira, A. (2017). Handreiking Faalkansanalyses Macrostablieit. Rapport 11200575-016, Deltares.

TAW – Technische Adviescommissie Waterkeringen (2001). Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Juni 2001.

TAW – Technische Adviescommissie Waterkeringen (2004). Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken. September 2004.

TAW – Technische Adviescommissie Waterkeringen (2009). Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken.

Teixeira, A. en Rosenbrand, E. (2017). Doorvertaling van bewezen sterkte resultaten naar een dijkvak. Rapport 11200575-017, Deltares.

Van Duinen (2015). Modelonzekerheidsfactoren Spencer-Van der Meij model en ongedraineerde schuifsterkte. Rapport 1207808-001-GEO-0006, Deltares.

Van Deen, J. en A. van Duinen, (2016). Schematiseringshandleiding macrostablieit binnenwaarts. Rapport 1220083-008, Deltares.

VanMarcke, E. (1983). Random Fields: Analysis and Synthesis, Published by MIT Press, Cambridge MA, 1983.