

Handreiking Faalkans Updating

Macrostablieiteit Binnenwaarts



Handreiking Faalkans Updating

Macrostabieliteit Binnenwaarts

Auteur(s)

Mark van der Krogt
Ana Martins Teixeira
Wim Kanning
Timo Schweckendiek

Handreiking Faalkans Updating

Macrostablieit Binnenwaarts

Opdrachtgever	Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), De innovatieversneller (Div)
Contactpersoon	Dirk van Schie, Emiel Reeringh, Meindert Van
Referenties	Zie hoofdstuk 5
Trefwoorden	faalkans updating, reliability updating, bewezen sterkte, overleefde belasting, macrostablieit

Documentgegevens

Versie	4.0
Datum	25-10-2023
Projectnummer	11209051-002
Document ID	11209051-002-GEO-0002
Pagina's	30
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Mark van der Krogt	
	Ana Martins Teixeira	
	Wim Kanning	
	Timo Schweckendiek	

Samenvatting

Deze versie 4 van de handreiking Faalkans Updating (FU) heeft als doel de gebruiker te ondersteunen in het maken van faalkans updating analyses, ook wel bewezen sterkte analyses genoemd.

Deze handreiking bevat informatie, theoretische achtergronden en praktische aanbevelingen voor het uitvoeren van probabilistische analyses voor het bijstellen van de faalkansen (in het Engels: reliability updating) voor binnenwaartse macrostabiliteit van dijken, op basis van overleefde belastingcondities.

De handreiking omvat de volgende elementen:

- Een beschrijving van de FU aanpak (actuele sterkte stap 3),
- toepassingsvoorwaarden voor de methode
- handvatten om inzicht te krijgen in de kansrijkheid van FU,
- principes en de methodiek waarop FU gebaseerd is,
- handreikingen hoe om te gaan met onzekerheden en schematiserings-keuzes in het licht van bewezen sterkte.

De voorliggende versie betreft versie 4, een opschoningslag, en voegt geen inhoudelijke zaken toe ten opzichte van versie 3. Er zijn juist veel onderdelen uit weggelaten, welke ondertussen een plek hebben gekregen in andere documenten zoals publicatie POVM Actuele Sterkte (POVM, 2020) en de Handreiking faalkansanalyses macrostabiliteit (Van der Krogt et al, 2023a). De handreiking zal in de loop der tijd verder worden uitgebreid met ervaringen vanuit case studies en praktijktoepassingen. Daarnaast wordt een uitbreiding naar meer faalmechanismen en andere typen observaties beoogd.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	6
1.1 Wat is faalkans updating?	6
1.2 Aanleiding en status van de handreiking (groene versie)	6
1.3 Afbakening groene versie en samenhang met andere publicaties	7
1.4 Doel en doelgroep	8
1.5 Leeswijzer	8
2 Aanpak en kansrijkheid faalkans updating	9
2.1 Aanpak en toepassingsvoorwaarden	9
2.2 Inschatten kansrijkheid faalkans updating	9
2.2.1 Op basis van gevoeligheidsanalyses	9
2.2.2 Algemene factoren die de impact faalkans updating beïnvloeden	10
2.2.3 Specifieke gevallen die de impact van faalkans updating beïnvloeden	11
3 Principes van Faalkans Updating	13
3.1 Algemeen principe en reduceerbare onzekerheid	13
3.2 Methodiek	14
3.3 Omgaan met onzekerheden bij faalkans updating	14
3.3.1 Kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit	14
3.3.2 Rekenen met scenario's	16
3.3.3 Veranderingen tussen observatie en beoordelingscondities	16
3.3.4 Conservatieve keuzes in faalkans updating	16
4 Uitwerking van Faalkans Updating	18
4.1 Modelleren observatie	18
4.1.1 Keuze observatie	18
4.1.2 Modelleren	19
4.1.3 Kritieke glijvlakken voor faalkans updating	20
4.1.4 Samenhang tussen beoordeling en observatie	21
4.2 Toepassen faalkans updating met de exacte methode	22
4.3 Toepassen faalkans updating met fragility curves	22
4.3.1 Fragility curves in relatie tot observatie	22
4.3.2 Te gebruiken technieken	23
4.3.3 Correlatie tussen de fragility curves	23
4.3.4 Omgaan met meerdere scenario's	24
4.4 Doorvertaling van doorsnede naar dijkstrekking	24
4.5 Ontwerpen van een proefbelasting	25
4.6 Ervaringen vanuit projecten	26
5 Referenties	28

1 Inleiding

1.1 Wat is faalkans updating?

Het concept Faalkans Updating (FU) doelt op het gebruik van observaties zoals overleefde belastingen om de sterkte en de veiligheid van een dijk beter in te schatten. Faalkansanalyse en FU resulteren in een nauwkeuriger veiligheidsbeeld (aangescherpte faalkans) dan een reguliere semi-probabilistische analyse.

Naast het effect van overleefde condities op de faalkansschatting levert een faalkans (updating) analyse aanvullende meerwaarde op. Er wordt aanvullend 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. Daarnaast kunnen proefbelastingen benut worden, omdat deze met de methode expliciet kunnen worden meegenomen. Welke proefbelasting nodig is om tot goedkeuring van het profiel te komen kan vooraf worden bepaald.

Faalkans updating is dus voornamelijk bedoeld om toe te passen in geval een dijk niet aan de eis voldoet volgens een reguliere semi-probabilistische analyse, en de indruk bestaat dat met overleefde situaties of proefbelastingen een aangescherpte faalkans kan worden bereikt. Door het nauwkeuriger veiligheidsbeeld na faalkansanalyse of FU kan mogelijk wel aan de eis worden voldaan, waardoor deze technieken mogelijk ingrijpende dijkversterkingen kunnen verminderen of voorkomen.

1.2 Aanleiding en status van de handreiking (groene versie)

Het gebruik maken van FU is in 2015 in een stroomversnelling geraakt door een verkenning van de mogelijke toepassing hiervan op de Markermeerdijken (Schweckendiek en Van der Krogt, 2015). In navolging deze studie is door Rijkswaterstaat een meerjarig ontwikkeltraject voor de toepassing van FU opgezet, waaronder in 2016 een achtergrondrapport (Schweckendiek en Kanning, 2016a) en twee case studies van de Markermeerdijken (Schweckendiek et al. 2016).

De totstandkoming van de eerste groene versie van de handreiking faalkansanalyse en faalkans updating (Schweckendiek en Kanning, 2017) was onderdeel van het ontwikkeltraject Bewezen Sterkte van Rijkswaterstaat. In de navolgende jaren is de methode ook op andere projecten toegepast. De ervaringen uit deze projecten zijn meegenomen in updates van deze handreiking. De aanpassingen van de voorliggende versie (anno 2023) en voorgaande versies zijn onderstaand uitgebreid beschreven.

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. Deze handreiking is onderdeel geweest van het Expert Team Bewezen Sterkte. Commentaar van dit expert team is zo veel mogelijk verwerkt.

In groene versie 3 zijn toevoegingen gedaan vanuit het STOWA project 'Bewezen Sterkte Regionale Keringen' in 2017 (Kanning et al, 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.

Deze groene versie 4 betreft een opschoningslag, en voegt geen inhoudelijke zaken toe. Er zijn juist veel onderdelen uit weggelaten, welke ondertussen een plek hebben gekregen in andere documenten. Met name in de publicatie POVM Actuele Sterkte (POVM, 2020) en de Handreiking faalkansanalyses macrostabiliteit (Van der Krogt et al., 2023). Om dubbelingen te voorkomen gaat de voorliggende handreiking dus alleen in op faalkans updating.

Concreet betekent dat in deze versie het volgende is aangepast:

- (Voormalig) hoofdstuk 2 (Samenvatting stappen Actuele Sterkte) is verwijderd. De Actuele Sterkte methodiek is uitgebreider beschreven in (POVM, 2020).
- (Voormalig) hoofdstuk 3 (Veiligheidsfilosofie) is verwijderd. Dit is een algemeen uitgangspunt dat ook hoort bij faalkansanalyses. Het is opgenomen in (Van der Krogt et al., 2023).
- (Voormalig) hoofdstuk 4 (Inschatting kansrijkheid) is aangevuld met een korte introductie over de verschillende stappen binnen de aanpak voor FU.
- (Voormalig) hoofdstuk 5 (semi-probabilistische analyse) en hoofdstuk 6 (faalkansanalyse) zijn verwijderd. Deze tekst is nu beschikbaar in Handreiking faalkansanalyses (Van der Krogt et al., 2023), en aangescherpt op basis van nieuwe kennis en ervaringen.

Inhoudelijk zijn in deze versie enkele praktische ervaringen toegevoegd over speciale gevallen die de impact van FU beïnvloeden. Dit betreft ervaringen vanuit onder andere. het project Verkenning Bewezen Sterkte Vestingwallen te Hellevoetsluis, waar bewezen sterkte is toegepast om een dijkvak goed te keuren op basis van overleefde waterstanden in 1953.

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 ontwerp toepassingen zullen een plek krijgen in volgende versies van de handreiking.

1.3 Afbakening groene versie en samenhang met andere publicaties

De versie van de handreiking richt zich op 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 bij het nauwkeurig inschatten van de faalkans in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI).
2. Er worden uitsluitend observaties van overleefde observaties/belastingcondities behandeld.
3. Voor de stabiliteitsbepaling wordt uitgegaan van de binnen het Wettelijk Beoordelings- Instrumentarium (WBI2017) en Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) ontwikkelde methoden (bijv. 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.

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.

1.4 Doel en doelgroep

Deze handreiking Faalkans Updating (FU) heeft als doel de gebruiker te ondersteunen in het maken van FU analyses voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts van dijken. 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.

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 (Rijkswaterstaat, 2009), echter met de stabiliteitsmodellering zoals uitgewerkt in Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium¹. Aanbevolen wordt om de volgende documenten eerst te lezen, voor aan de slag te gaan met faalkans updating:

- Publicatie POVM Actuele Sterkte (POVM, 2020).
- Handreiking Faalkansanalyses Macrostabiliteit (Van der Krogt et al., 2023).

Zowel de probabilistische beoordelingsanalyse als FU analyses worden nog weinig toegepast in beoordelen en ontwerpen. Dit vereist onder andere kennis van probabilistische sommen. 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.

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de FU aanpak. Dit hoofdstuk gaat in op de toepassingsvoorwaarden van FU, welke factoren en gevallen bepalen of FU kansrijk is en hoe hier inzicht in gekregen kan worden. Hoofdstuk 3 beschrijft de principes en de methodiek waarop FU gebaseerd is, en geeft handreikingen hoe om te gaan met onzekerheden en schematiserings-keuzes in het licht van bewezen sterkte. Hoofdstuk 4 concretiseert tenslotte de uitwerking hiervan.

¹<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen>

2 Aanpak en kansrijkheid faalkans updating

2.1 Aanpak en toepassingsvoorwaarden

Het startpunt voor de toepassing van Faalkans Updating (FU) bestaat uit een inschatting van de impact / kansrijkheid. Dit gebeurt op basis van algemene en specifieke factoren, en door middel van gevoeligheidsanalyses, beschreven in dit hoofdstuk.

Vervolgens dient de geobserveerde/overleefde situatie in kaart gebracht te worden, en deze in een probabilistische berekening te worden gemodelleerd. Vervolgens kan de a-priori faalkans worden bijgesteld tot een a-posteriori kans. Voor een goede aansluiting op de methode voor FU beschreven in deze handreiking is het wenselijk om met fragility curves te werken, zie Van der Krogt et al (2023). Hoofdstukken 3 en 4 gaat respectievelijk in op de principes en de concrete uitwerking.

Het Bayesiaans bijstellen² 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 et al (2016) en Van der Krogt et al (2023).

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, dat pas bij hogere buitenwaterstanden optreedt) 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 4.2).

2.2 Inschatten kansrijkheid faalkans updating

2.2.1 Op basis van 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:

- Buitenwaterstand.
- Verkeersbelasting.
- Verzadiging t.g.v. infiltratie (bijvoorbeeld door overslag).
- Zettingen van het dijklichaam en het maaiveld.
- Ondergrondopbouw.

² Bayesiaans bijstellen (ook wel Bayesiaanse updating genoemd) is een methode om de waarschijnlijkheid van een bepaalde gebeurtenis of theorie aan te passen op basis van nieuwe informatie of bewijsmateriaal. De methode is gebaseerd op de Bayesiaanse statistiek, waarbij men een a priori kans of prior hanteert voordat men de gegevens bekijkt. Op basis van nieuwe informatie of gegevens wordt de prior bijgesteld tot een a posteriori kans of posterior.

- Schuifsterkte parameters (bv. verschil tussen gemiddeld en rekenwaarde).
- Grensspanningen.
- Volumegewicht.
- 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).
- Freatische lijn.
- Eventuele onverzadigde sterkte boven freatische lijn.

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

2.2.2 Algemene factoren die de impact faalkans updating beïnvloeden

In het algemeen wordt het meeste effect (grootste bijstelling van de berekende faalkans) van een FU analyse verwacht als:

- 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) die uit de a-priori faalkansanalyse komen.
- Er een significante observatie/belasting is van een dominante belasting of belastingeffect, dicht bij de karakteristieke belasting. Hiervoor is van belang dat de dominante variabelen worden bepaald (zie paragraaf 2.2). 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.
- Er een sterke gelijkheid is tussen de observatie en de beoordeling. Dat wil zeggen geen grote aanpassingen aan een dijklichaam, en geen significante afname van stabiliteit tussen observatie en beoordelingscondities, bijvoorbeeld door degradatie of sterke bodemdaling van het achterland.
- De stabiliteit van de dijk beperkt afhankelijk is van de geobserveerde belasting, bijvoorbeeld de buitenwaterstand of een andere dominante belasting. Dat uit zich in vlakke fragility curves (zie ook beschouwingen in Schweckendiek en Kanning, 2016).

Het is op voorhand niet te zeggen hoe bovenstaande van geval tot geval uitpakt, aangezien niet altijd alle beschreven gevallen van toepassing zijn. Hiervoor zijn analyses nodig. Sectie 2.2.3 gaat hier dieper op in. 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.

2.2.3 Specifieke gevallen die de impact van 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 dijktalud invloed op de stabiliteit heeft en of/hoe deze invloed in rekening kan worden gebracht, zie ook paragraaf 4.4. 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.

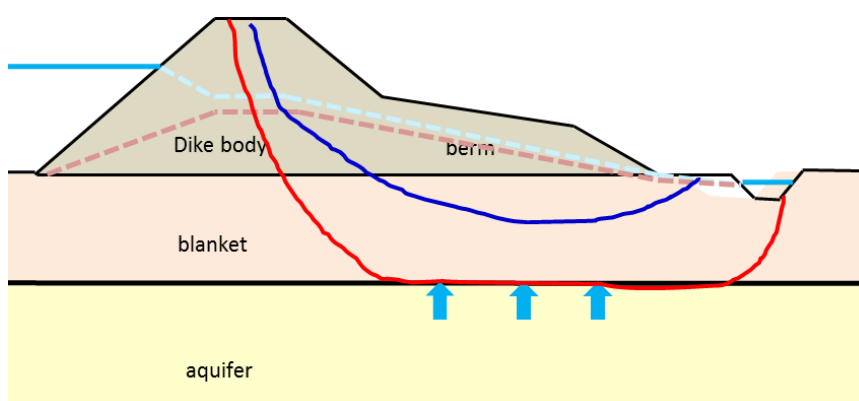
Dijkversterking

Faalkans updating is ook mogelijk in ontwerpcontext. Dit is vooral mogelijk als de grondspanningen niet te veel veranderen door de maatregel. Bijvoorbeeld wanneer de dijk verhoogd wordt en het talud verder niet veel verandert. De vaak kritische situatie van de uitvoeringsstabiliteit kan dan worden meegenomen als overleefde belasting om de faalkans na versterking op te waarderen. Een ander voorbeeld waarbij FU kan worden toegepast is bij een ontwerp met korte (ondiepe) damwanden. De diepe glijvlakken worden daar niet door beïnvloed, en kunnen dan met FU worden 'opgevaardeerd'.

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 paragraaf 4.1.3 worden richtlijnen gegeven hoe hiermee kan worden omgegaan. Dit is vooral van belang in geval er sterk niet lineaire effecten zijn. Enkele voorbeelden van sterk niet lineaire effecten die de impact van FU kunnen beperken zijn opbarsten, golfoverslag en voorlanden. Deze situaties worden onderstaand toegelicht.

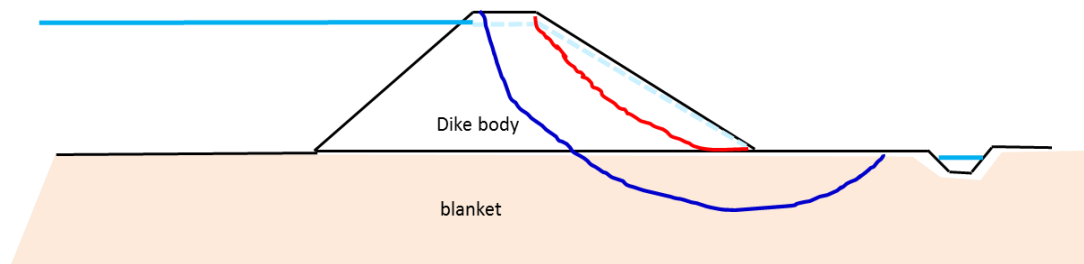
Bij dijken waar opbarsten of opdrijven relevant is, wordt doorgaans een volledig verlies van sterkte gemodelleerd in de beoordeling. Hierdoor kan de ligging van het glijvlak sterk veranderen, zie Figuur 2.1. In geval er bijvoorbeeld opdrijven optreedt in de beoordeling en het is onduidelijk of er opdrijven is opgetreden tijdens de observatie, zal er geen impact van FU zijn bij glijvlakken die door opdrijven worden beïnvloed (rood in Figuur 2.1), maar wel bij glijvlakken die niet door opdrijven worden beïnvloed (blauw in Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Te beschouwen glijvlakken voor opdrijven.

Als een extreem scenario van (volledige) verzadiging door infiltratie en golfoverslag bij hoge waterstanden de totale faalkans domineert, terwijl golfoverslag niet is waargenomen ten tijde van de observatie, kan dit de impact van FU sterk beperken. Bovendien kunnen glijcirkels tussen de twee situaties verschillen, waardoor de impact van FU beperkt wordt, zie het voorbeeld hieronder.

Voor bijvoorbeeld verzadiging kunnen er twee mogelijke situaties zijn, zie ook Figuur 2.2. 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.



Figuur 2.2 Kritieke glijcirkel met en zonder verzadiging.

Net als in bovenstaande voorbeelden, zal in het geval van hoge voorlanden de geohydrologische respons van stijghoogtes en freatische lijn fundamenteel verschillen tussen beoordeling en observatie. Bijvoorbeeld als er tijdens de observatie geen water op het voorland staat, en bij hogere waterstanden bij de beoordeling wel. Als de observatie niet zo extreem is als voor de beoordeling wordt rekening gehouden, dan zal er weinig effect van FU verwacht worden.

3 Principes van Faalkans Updating

3.1 Algemeen principe en reduceerbare onzekerheid

Het algemene principe van 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.

Het bijstellen van (faal)kansen gebeurt expliciet of impliciet (afhankelijk van de wiskundige uitwerking) door het niet plausibel verklaren van bepaalde waarden (of combinaties) van sterkte en belastingeffect parameters. 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 paragraaf 3.3.

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.

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).

3.2 Methodiek

In het algemeen moet de volgende vergelijking voor een FU analyse worden opgelost:

$$P(F|\epsilon) = \frac{P(F \cap \epsilon)}{P(\epsilon)} = \frac{P(\{g(X) < 0\} \cap \{h(X) < 0\})}{P(h(X) < 0)} = \frac{P(\text{falen EN observatie})}{P(\text{observatie})} \quad (1)$$

Waarin $P(F|\epsilon)$ de bijgestelde faalkans is met F is falen en ϵ is de observatie, $P(\{g(X) < 0\})$ de kans op onderschrijding van de grenstoestand ('falen in de beoordeling') en $P(\{h(X) < 0\})$ de kans op 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 parametercombinaties 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). Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar Schweckendiek en Kanning (2016).

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 4.2).
- De benadering met fragility curves: 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 2.2.3). Als de methode fragility curves adequaat wordt toegepast (zie onder andere 4.3), 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 et al, 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).

3.3 Omgaan met onzekerheden bij faalkans updating

3.3.1 Kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit

Binnen een FU analyse moet onderscheid worden gemaakt tussen kennisonzekerheden en intrinsieke variabiliteit. Kennisonzekerheden (epistemische onzekerheden) zijn reduceerbaar. Het is dus van belang om de variabelen (stochasten) te identificeren die kennisonzekerheid representeren. Onderstaand schema in Tabel 3.1 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:

- **Grondeigenschappen:** Eigenschappen van de grond 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 intrinsiek 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 FU 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.
Schematisering: De grondopbouw onder dijken is over het algemeen niet variabel in de tijd, maar wel onzeker. Bijvoorbeeld met verschillende ondergrondscenario's, dit betreft kennis onzekerheid. Zettingen en autonome bodemdaling zijn daarentegen doorgaans wel variabel in de tijd. Hoewel de *onzekerheid in geometrie* vaak een kleine invloed heeft op de stabiliteit, moeten verschillen in geometrie tussen het moment van beoordeling en observatie wel expliciet worden meegenomen, zie paragraaf 3.3.3 en 4.1.4.

De variabelen in Tabel 3.1 worden doorgaans gebruikt in stabiliteitsanalyses, zie bijvoorbeeld de Handreiking Faalkans analyse Macrostablieit (Van der Krogt et al., 2023). De derde kolom geeft een eerste inschatting of per variabele kennisonzekerheid of intrinsieke variabiliteit dominant is.

Tabel 3.1 Overzicht variabelen in FU analyse met indicatie welke onzekerheden typisch als kennisonzekerheid en als intrinsieke variabiliteit kunnen worden verondersteld (per case te onderbouwen).

Variabele	Categorie	onzekerheid
Su-ratio, S	Grondeigenschap	kennis
Sterkte toename exponent, m	Grondeigenschap	kennis
Pre-overburden pressure POP / Grensspanning, σ_y	Grondeigenschap	kennis
Volumiek gewicht, γ	Grondeigenschap	kennis
Cohesie, c	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
Modelonzekerheid	Model	kennis

3.3.2 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 FU 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.

3.3.3 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 paragraaf 3.3.4.

3.3.4 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 of hoge faalkans conservatief, voor de observatie is een keuze die resulteert in een hoge stabiliteitsfactor of lage faalkans 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 (TAW, 2004), 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 FU 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. Hetzelfde geldt voor het waterpeil is een binnendijkse sloot. In twijfelgevallen kunnen verkennende analyses worden gemaakt, uiteindelijk gaat het immers om de effect op de stabiliteit of faalkans (gunstig of ongunstig).

4 Uitwerking van Faalkans Updating

Faalkans updating bestaat uit twee onderdelen: modellering van de observatie (beschreven in paragraaf 4.1), en het toepassen van faalkans updating (beschreven in paragraaf 4.2 en 4.3). Voor een faalkans updating analyse is ook een faalkansanalyse van de beoordelingssituatie nodig, maar deze vindt al plaats in Actuele sterkte stap 2 (zie Van der Krogt et al, 2023).

4.1 Modellering observatie

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.

4.1.1 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 of 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 hoofdstuk):

- 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.
- Verskil 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) en POVM (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 4.4).

4.1.2 Modellingering

Modellingering sterkte: 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 paragraaf 3.3.3. 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 paragraaf 3.3.4).

Modellingering belasting: waterspanningen

Net zoals bij de beoordeling gaat het er niet alleen om het in beeld brengen van de belastingen, maar vooral de belastingeffecten. 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 paragraaf 3.3.4 worden beschouwd.

Per belastingvariabele moet worden bepaald of deze dezelfde verdeling of deterministische schatting heeft als in de beoordeling. 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 de paragraaf hieronder). In alle gevallen kan ook worden teruggevallen op een conservatieve keuze.

Modellingering belasting: Regenval

Voor de effecten van regenval geldt iets vergelijkbaars als voor de verkeersbelasting: de effecten van regenval op de freatische lijn zijn afhankelijk van verschillende factoren (initiële ligging freatisch vlak, duur, intensiteit, doorlatendheid dijk). Voor de beoordeling wordt dit ondervangen door conservatieve (hoge) schattingen van het freatisch vlak. Hierbij wordt over het algemeen uitgegaan van een normale hoeveelheid neerslag tijdens het winterseizoen, niet gecorreleerd met de buitenwaterstand.

Voor de observatie kan een inschatting van de freatische lijn gemaakt worden op basis van observaties. Bijvoorbeeld of het juist droog of erg nat was tijdens de overleefde situatie. Een conservatieve schatting voor FU betreft hier een lage freatische lijn. 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.

Modellingering belasting: Verkeer

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 lamellenmodel 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 spannings-spreidingshoek en de aanpassings/consolidatiepercentage. Voor de beoordeling kan dit worden ondervangen door conservatieve aannames te doen (waarbij een bovengrens van de faalkans wordt berekend).

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 bovenbelasting en de spanningen in de grond te meten. En met name of het belastingeffect van verkeersbelasting tijdens de observatie en beoordeling al dan niet verschillen. Ook kan de verkeersbelasting conservatief geschematiseerd worden (met een hoog aanpassings-/consolidatiepercentage), waarbij een lage faalkans wordt berekend wordt

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 à 30 m voor ondiepe glijvlakken en orde 50 à 100 m voor diepe glijvlakken. In dat geval dienen deze in rekening te worden gebracht bij de schematisering van de observatie, zie de typisch genegeerde sterkte-bijdrages in paragraaf 4.1.4.

4.1.3 Kritieke glijvlakken voor faalkans updating

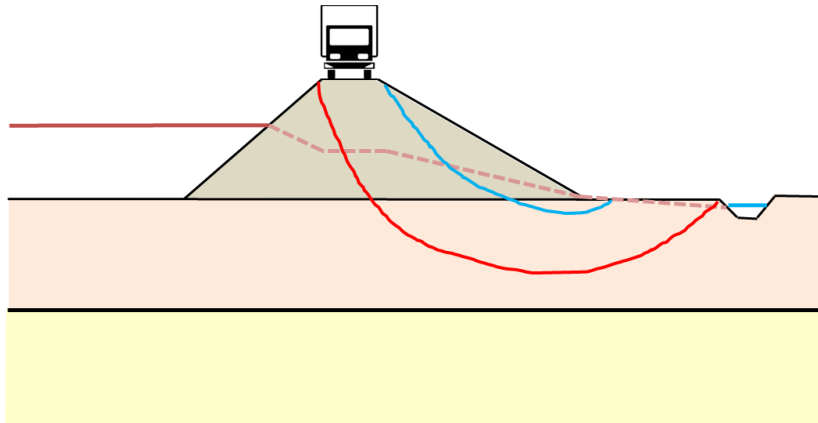
Voor de methode fragility curves is het van belang alle mogelijke relevante kritieke glijvlakken te beschouwen en bij te stellen met de juiste observatie. Door het beschouwen van de relevante glijvlakken en bijbehorende observaties wordt voorkomen dat er onrechtmatig sterkte aan niet relevante observaties wordt ontleend. Dit kan worden gedaan door eerst alle mogelijke kritieke glijvlakken voor de beoordeling én de observatie te beschouwen. Voor handvatten hiervoor verwijzen we naar de Handreiking Faalkansanalyse (Van der Krogt et al, 2023).

Soms zijn er meerdere weliswaar duidelijk verschillende glijvlakken met vergelijkbaar lage stabiliteitsfactor, bijvoorbeeld een oppervlakkige en een diepe (zie Figuur 4.1). 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 paragraaf 4.2.

Kritieke glijvlakken voor de observatie hebben een andere lading dan voor de a-priori analyse. In de a-priori analyse wordt gekeken naar één 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 4.1.

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 FU effect door de overleefde verkeersbelasting. De blauwe glijcirkel is dus na de maatgevende glijcirkel.



Figuur 4.1 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.

4.1.4 Samenhang tussen beoordeling en observatie

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 paragraaf 3.3.

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 paragraaf 3.3.3) Enkele voorbeelden van veroudering zijn:

- Zettingen: effect op geometrie en laagdiktes
- Autonome bodemdaling: effect op laagdiktes
- Toegevoegde bovenbelasting: effect op POP / grensspanning
- Degradatie 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.

Er zijn een aantal sterktebijdrages 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).

4.2 Toepassen faalkans updating met de exacte methode

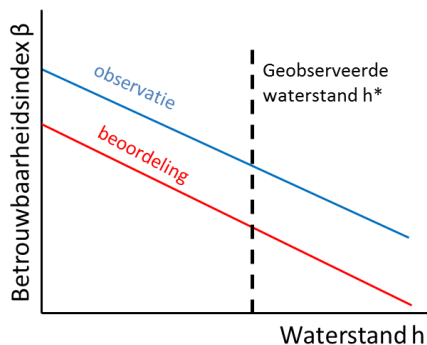
Formule (1) (paragraaf 3.2) kan met de exacte methode worden opgelost. Hiervoor zijn verschillende technieken van toepassing, waarvan Monte Carlo simulatie de bekendste is.

- Monte Carlo Simulatie (MCS) analyses zijn doorgaans tijdrovend omdat de vereiste 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 MCS 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 à 4).
- Subset Simulatie en Importance Sampling zijn technieken om faalkansen te berekenen met minder modelrealisaties dan Monte Carlo. De methoden zijn echter gebaseerd op conditionele/verschoven kansverdelingen en het doen van trekkingen in een ‘interessant gebied’. Voor faalkans updating is het niet altijd duidelijk waar dit interessante gebied is (namelijk falen in de beoordeling, én overleven tijdens de observatie). Daarom moeten bovenstaande technieken met voorzichtigheid worden toegepast.

4.3 Toepassen faalkans updating met fragility curves

4.3.1 Fragility curves in relatie tot observatie

Fragility curves geven de faalkans van de dijk als functie van buitenwaterstand (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 Figuur 4.2 schematisch weergegeven.



Figuur 4.2 Schematische weergave fragility curves beoordeling en observatie condities.

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 paragraaf 3.3.3). 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 4.2). 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 van 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.

4.3.2 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).

4.3.3 Correlatie tussen de fragility curves

Bij fragility curves wordt gewerkt met een cumulatieve sterkte term (toenemende faalkans met de buitenwaterstand) zie Van der Krogt et al. (2023). 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 FU. Zie Schweckendiek en Kanning (2016) hoe de correlatie kan worden meegenomen in de FU op basis van fragility curves.

Fragility curves voor de beoordeling en observatie fragility curves hoeven niet altijd volledig gecorreleerd met elkaar zijn. Dit kan het geval zijn als:

- De parameters waaruit de fragility curves zijn opgebouwd zijn niet volledig gecorreleerd tussen beoordeling en observatie (zie 3.3.1).
- De bijdragen van de parameters aan de faalkans (α) verschillen tussen beoordeling en observatie.

Voorbeelden hiervan worden genoemd in Schweckendiek et al (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:

$$\rho_{beo,obs} = \sum_{i=1}^q \alpha_{toe,i} \cdot \alpha_{obs,i} \cdot \rho_{toe,obs,i} \quad (2)$$

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 paragraaf 3.3.1). $\rho_{beo,obs,i}$ 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).

4.3.4 Omgaan met meerdere scenario's

Zoals in hoofdstuk 3 (paragraaf 3.3.2) 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 3.3.2).
- 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 scenariokansen worden bepaald. Zie Schweckendiek en Kanning (2016). Wel dienen de in paragraaf 4.4 beschreven overwegingen meegenomen te worden. De kans op een bepaald ondergrondscenario kan bijvoorbeeld door een overleefde situatie sterk verminderen.

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

4.4 Doorvertaling van doorsnede naar dijkstrekking

De FU analyse zoals in dit rapport beschreven is gebaseerd op representatieve doorsnedes van het te beschouwen dijkvak. In deze paragraaf wordt behandeld in hoeverre de resultaten van de representatieve doorsnedes 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 Van der Krogt et al., 2023).

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 doorsnedes 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 doorsnedes 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 strekkingen 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 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.

4.5 Ontwerpen van een proefbelasting

In geval na Actuele sterkte stappen 2 en 3 (Van der Krogt et al, 2023) nog niet aan de eis wordt voldaan, kan ook een proefbelasting worden toegepast.

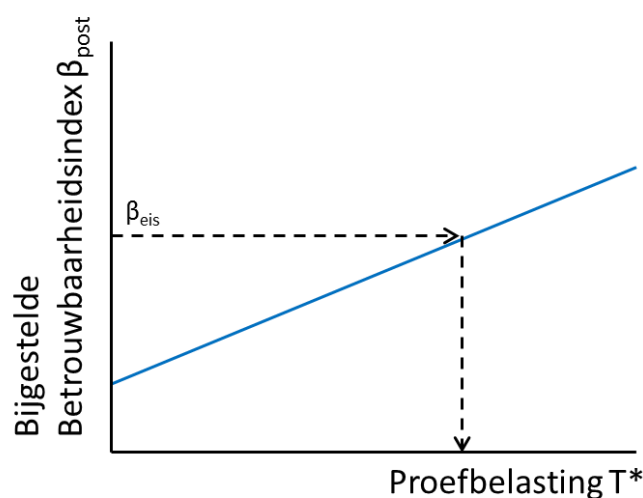
Er zijn meerdere proefbelastingen denkbaar, onder andere het aanbrengen van een bovenbelasting of het uitvoeren van infiltratieproeven voor de verzadigingsgraad van de dijk. Let wel, het gaat voor een FU steeds om de belastingeffecten. Voor een bovenbelasting kunnen de belastingeffecten lastig te modelleren zijn (zie paragraaf 3.3.4).

Voor het ontwerpen van een proefbelasting kunnen meerdere FU sommen worden gemaakt. Hiermee kan de relatie tussen door FU bijgestelde faalkans ($P(F|T^*)$) of 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 4.3.

Bij het uitvoeren van een proefbelasting zal goed moeten worden gekeken naar risico's en risicobeheersing van een eventuele afschuiving. Of het risico acceptabel is, is aan de beheerder. Het wordt sterk aanbevolen om een goed monitoringprogramma op te zetten, denkende aan bijvoorbeeld het meten van waterspanningen en deformaties, 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 actuele sterkte stap 2 (Van der Krogt et al, 2023). Bijvoorbeeld door het meten van de effecten van infiltratie na golfoverslag in plaats van conservatief volledige verzadiging aan te nemen.



Figuur 4.3 Schematische weergave bepaling benodigde proefbelasting om te voldoen aan de vereiste betrouwbaarheid.

4.6 Ervaringen vanuit projecten

In onder andere de nagenoemde twee projecten is 'faalkans updating' succesvol toegepast. Dit heeft aangetoond dat de 'Actuele Sterkte'-aanpak veelbelovend is voor het goedkeuren van de macrostabiliteit van dijken.

In het project Vestingwal Hellevoetsluis (Teixeira en Rozing (2019)) was de verwachting dat de dijk in 1953 een zwaardere belasting heeft doorstaan dan verwacht voor 2050. Tevens werden overige veranderingen in de tijd minimaal geschat. Dit gaf hoop dat de dijk sterk genoeg is.

Voor de situatie van 1953 waren echter geen metingen van de waterspanning beschikbaar. Hierdoor moest worden teruggevallen op - voor faalkans updating conservatieve - inschattingen voor de waterspanningen in de beoordeling en observatie. Hiermee kon één doorsnede worden goedgekeurd. Voor een andere doorsnede was er echter onvoldoende bewijs dat opbarsten (hoge stijghoogtes in de diepe zandlaag) tijdens de observatie was gebeurd. Het effect van faalkans updating (betrouwbaarheidsindex van 3.08 naar 3.37) was hiermee niet voldoende om aan de eis te voldoen.

In 2018 is gekeken hoe de resultaten van een infiltratieproef kan worden gebruikt om de faalkans te updaten. De uitgevoerde infiltratieproef toonde aan dat het binnentalud van dijk

een grote hoeveelheid water kan weerstaan zonder af te schuiven. Door het schematiseren van een observatie met de gemeten waterspanningen stijgt de berekende betrouwbaarheidsindex van 3.96 naar 4.98 (Deltares memo ref. 11202663-012-memo). Met informatie over de dijkopbouw langs het dijkvak, kan het resultaat op doorsnedeniveau doorvertaald worden naar een dijkvak.

Bovenstaande projecten tonen dus aan dat het belangrijk is om goed na te denken over hoe observaties worden gemodelleerd. Wat normaal gesproken als een voorzichtige keuze wordt gezien, kan veranderen bij het kijken naar de observatiesituatie. Ook is het essentieel om observaties te hebben van de belangrijkste belasting en het gedrag van een dijk, zoals infiltratie door overslag, opbarsten, of een verkeersbelasting.

5 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.
- ENW – Expertise Netwerk Waterkeren (2009). Technisch Rapport Actuele Sterkte van Dijken (TRAS). TAW/ENW publicatie 27 maart 2009 - [URL](#).
- ENW – Expertise Netwerk Waterkeren (2012). Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken. TAW/ENW publicatie Oktober 2012 - [URL](#).
- Kanning, W., E. Vastenburg, J. Kames en E. van der Heijden (2017). Bewezen Sterkte Regionale Keringen. Deltares rapport 1230894.
- POVM (2016). POVM Beter benutten actuele sterkte KJK, activiteit 5 – deel Historische gegevens. Auteur: A. van Hoven, rapport 1220518-005. [URL](#).
- POVM (2020). POVM Actuele Sterkte - Een publicatie van de POV Macrostabieleit. Auteurs: E. Rosenbrand en A. Rozing. Versie juni 2020. [URL](#).
- Rijkswaterstaat (2009). Van ruwe data tot overstromingsrisico - Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkringingen binnen het project VNK2. November 2009.
- Rijkswaterstaat (2016). Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014 - Behorende bij Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen (OI2014v4). Versie december 2016.
- Schweckendiek, T. (2014). On reducing piping uncertainties. PhD thesis TU Delft - [URL](#).
- Schweckendiek, T. en 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 1230090-033, Deltares - [URL](#).
- Schweckendiek T., Teixeira, A., Van der Krogt, M.G. en Kanning W.(2016). Reliability updating using past performance – Test cases reports. Rapport 1230090-037, Deltares - [URL](#).
- Schweckendiek, T. en W. Kanning. (2016a). Reliability updating using past performance - Background report. Rapport 1230090-038, Deltares - [URL](#).
- Schweckendiek T. en W. Kanning (2017). Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating. Groene versie Macrostabieleit Binnenwaarts. Versie 1, augustus 2016. Rapport 11200575-014-GEO-0001, Deltares - [URL](#).
- Schweckendiek, T, Van der Krogt, M.G. en Rijnveld, B. en Teixeira, A. (2017). Handreiking Faalkansanalyses Macrostabieleit. Rapport 11200575-016, Deltares - [URL](#).
- TAW. Technische Adviescommissie Waterkeringen (2004). Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken. September 2004.

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

Teixeira, A. en Rozing, A. (2019). Bewezen Sterkte Vestingwal Hellevoetsluis. Actuele Sterkte: Stap 1, 2 en 3.
Rapport 11203183-002-GEO-0008, Deltares.

Van der Krogt M.G., E. Mahmoudi, Hermann, K., Rijnveld, B. (2023). Handreiking Faalkansanalyse
Macrostablieit. Rapport 11209051-007-GEO-0001, Deltares.

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

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl