

Werken met faalpaden

Deel 1: naar een beter beeld van de overstromingskans



Werken met faalpaden

Deel 1: naar een beter beeld van de overstromingskans

Auteur(s)

A.J. Smale

R. Jongejan

B. van der Kolk




Werken met faalpaden

Deel 1: naar een beter beeld van de overstromingskans

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	mevrouw drs. A.L.T.C.M. Bizzarri
Referenties	
Trefwoorden	Kennis voor Keringen, faalpaden, overstromingskans

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	06-07-2022
Projectnummer	11206817-005
Document ID	11206817-005-GEO-0002
Pagina's	24
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	A.J. Smale  R. Jongejan B. van der Kolk	H. Knoeff 	G. de Vries 	

Samenvatting

Met de introductie van het WBI2017 is de overstap gemaakt van een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overschrijdingskans van een hydraulische belasting die veilig gekeerd moet kunnen worden naar een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overstromingskans. Hiervoor is het nodig om een realistische overstromingskans te kunnen bepalen. Het huidige beoordelingsinstrumentarium kan hiervoor als startpunt dienen, maar geeft ook ruimte voor aanscherpingen.

Relevante aanscherpingen verschillen (uiteraard) per dijk(vak), waardoor er geen generiek handelingsperspectief op te stellen is. Het is wel mogelijk om in generieke termen de mogelijkheden tot aanscherping te duiden, waarbij naast het nauwkeuriger beschouwen van het initiële mechanisme onderscheid wordt gemaakt in drie soorten aanscherpingen:

1. Rekening houden met vervolgprocessen na schade
2. Expliciet rekening houden met afhankelijkheden tussen doorsneden en faalmechanismen (of: faalkansen per mechanisme en doorsnede combineren in plaats van overstromingskansnormen ontleden tot doorsnede-eisen met lengte-effect-factoren en faalkansbudget)
3. Denken in scenario's

In deze rapportage worden deze aanscherpingen geschetst en in het bredere perspectief geplaatst. Voorbeelden van toepassing van deze aanscherpingen zijn te vinden in de andere deelrapporten behorende bij deze studie.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Doelstelling van deze rapportage	7
2	Concepten en terminologie	8
2.1	Overschrijdingskans versus overstromingskans	8
2.2	Verhaal van de kering	8
2.3	Faalpaden en gebeurtenissenbomen	9
3	Definities van gebeurtenissenbomen en faalpaden	10
3.1	Principes van gebeurtenissenbomen en faalpaden	10
3.2	Principes van foutenbomen (fault tree)	12
3.3	Foutenboom (fault tree) versus gebeurtenissenboom (event tree).	13
3.4	Definitie van overstromingskans op trajectniveau	14
3.5	Benadering overstromingskans	15
4	BOI: gebruik gebeurtenissenbomen en faalpaden voor een betere inschatting van de overstromingskans op trajectniveau	18
4.1	Inleiding	18
4.2	Aanscherping 1: rekening houden met vervolprocessen	19
4.3	Aanscherping 2: neem de afhankelijkheden tussen faalmechanismen/faalpaden zuiver mee	19
4.4	Aanscherping 3: denken in scenario's	20
5	Conclusies ten aanzien van werken met faalpaden/gebeurtenissenbomen	22
	Referenties	23

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Met de introductie van overstromingskansnormen en de vrijgave van het WBI2017 is de overstap gemaakt van een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overschrijdingskans van waterstanden die veilig gekeerd moeten kunnen worden naar een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overstromingskans.

De eis ten aanzien van de overstromingskans is afgeleid op basis van een maatschappelijke kosten-batenanalyse, zie IenM (2016). Deze kosten-batenanalyse heeft geleid tot een eis ten aanzien van de overstromings- of faalkans¹ op trajectniveau, uitgedrukt in een kans per jaar.

Als onderdeel van LBO-1 (eerste landelijke beoordeling op basis van overstromingskansen) dient de overstromingskans bepaald te worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI2017), Het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) wordt beschikbaar gesteld voor de bepaling van de overstromingskans van de dijktrajecten op peildatum 31 december 2022.

De instrumenten van het BOI zijn veelal gebaseerd op de instrumenten uit de periode voor vrijgave van WBI2017, waarbij een aanpak conform de overschrijdingskansbenadering werd gehanteerd. Voor vertaling van deze instrumenten naar toepassing bij overstromingskansbenadering zijn aannames/vereenvoudigen gebruikt. Denk hierbij aan het werken met semi-probabilistische rekenregels voor het schatten van faalkansen en het gebruik van een benaderingsmethode (assemblagetool) voor het combineren van kansen. Dit betekent dat de middels het WBI2017 bepaalde overstromingskans een benadering is van de werkelijke overstromingskans. Veelal is de overstromingskans bepaald met deze benadering conservatief ten opzichte van de werkelijke overstromingskans, maar dit geldt zeker niet altijd.

Voor een realistischer bepaling van de overstromingskans dienen alle relevante en achtereenvolgende gebeurtenissen beschouwd te worden welke kunnen leiden tot een overstroming. Een manier hierbij is het beschouwen van gebeurtenissen en/of foutenbomen, waarbij de verschillende gebeurtenissen die kunnen leiden tot een overstroming met elkaar in verband worden gebracht. Een faalpad beschrijft dan een lineaire reeks van achtereenvolgende gebeurtenissen van begin van schade tot overstroming.

In WBI2017 is voor de gedetailleerde toets een faaldefinitie gehanteerd die gebaseerd is op een beperkte gebeurtenisboom. In de Toets op Maat (ToM) moet eigenlijk verder worden gekeken wanneer beschouwing van vervolgmecanismen leidt tot ander veiligheidsoordeel. Doordat instrumenten hiervoor ontbreken wordt dit in de praktijk niet gedaan. Dit leidt ertoe dat het begin van schade veelal als overstroming wordt beschouwd omdat de kansen op de vervolgprocessen impliciet gelijk aan één worden verondersteld. Een realistischere overstromingskans wordt dan ook veelal verkregen door bijvoorbeeld de gebeurtenissenboom (locatie-specifiek) uit te breiden met vervolgprocessen. Een andere verbetering kan zijn om onzekerheden van de initiële mechanismen te verkleinen door betere beschrijving fysica of meer data van de aanwezige situatie. Een verbetering kan ook worden verkregen door afhankelijkheden tussen faalpaden zo zuiver mogelijk in rekening te brengen, zonder benaderingen zoals in de assemblagetool.

¹ Een faalkans is bepaald voor waterkeringen waarbij falen leidt tot een verhoging van de hydraulische belasting op achterliggende keringen

Opgemerkt wordt dat het voorgaande enkel betrekking heeft op de benaderingen in de probabilistische som. Naast de benaderingen in de probabilistische som geldt dat er ook aannames gedaan worden ten aanzien van de beschreven fysica of locatiespecifieke parameters. Ook het aanscherpen van de (kennis van de) fysica of locatiespecifieke parameters leidt tot een aanscherping van de overstromingskans. Soms zijn de hiermee te behalen aanscherpingen groter dan de aanscherpingen die behaald kunnen worden door een aanscherping van de probabilistische berekening.

1.2 Doelstelling van deze rapportage

Het doel van deze rapportage is om een toelichting gegeven op de belangrijkste aannames met betrekking tot het bepalen van de overstromingskans in het huidige BOI instrumentarium (gedetailleerde toets).

In het vervolg van de rapportage heeft tot doel om aan te geven welke wijze de overstromingskans (locatie-specifiek) aangescherpt zou kunnen worden teneinde een realistischer beeld van de overstromingskans te verkrijgen. Hierbij worden drie soorten van aanscherpingen beschreven. Nadere uitwerking of voorbeelden van deze aanscherpingen worden niet in dit rapport maar in de andere onderdelen gepresenteerd. Er wordt niet ingegaan op aanscherpingen die mogelijk zijn door meer inzicht in de fysica van initiële mechanismen of het verbeteren van schematisaties door inwinnen van meer data.

Dit rapport moet gezien worden als een groeidocument, waarbij (bv jaarlijks) op basis van ontwikkelingen in het BOI als ook kennisontwikkelingen de aannames en mogelijke aanscherpingen bijgewerkt worden. Vermoedelijk is dit rapport bij vrijgave reeds verouderd.

Deze rapportage is onderdeel van een set van rapportages welke bedoeld zijn om een beeld te schetsen van de beoogde uitwerking van het werken met faalpaden voor het bepalen van een realistische overstromingskans. Deze rapportage betreft Deel 1, waarin in generieke termen geschetst wordt hoe naar een realistischer beeld van de overstromingskans te komen. Naast deze overkoepelende rapportage zijn er ondersteunende rapportages beschikbaar welke een nadere invulling geven van de in deze rapportage beschreven aanscherpingen. Op het moment van schrijven van deze rapportage zijn twee aanvullende delen, te weten “Deel 2: rekening houden met afhankelijkheden” en “Deel 3: knopenkaarten”.

2 Concepten en terminologie

2.1 Overschrijdingskans versus overstromingskans

De overstap naar de overstromingskansbenadering betekent een wezenlijk andere kijk op waterveiligheid. In de overschrijdingskansbenadering beschreef de norm de overschrijdingskans van de hydraulische belasting die de kering veilig moest kunnen keren. Werkwijzen en instrumenten bij deze benadering waren erop gericht om aan te tonen dat de kans op schade of een doorbraak bij een bepaalde hydraulische belasting klein is. De huidige werkwijzen en instrumenten om de overstromingskans te bepalen zijn ontstaan vanuit de instrumenten van de overschrijdingskansbenadering. De overstromingskansbenadering gaat over het optreden van een overstroming doordat een kering waterkerend vermogen verliest (faalt). Beschrijven (verhalen) op welke wijze een overstroming kan optreden en het onderbouwen van de overstromingskans is hierbij belangrijk.

Tabel 2-1 ontwikkeling van overschrijdingskans- naar overstromingskansbenadering

Overschrijdingskansbenadering (Hier komen we vandaan)	Huidige structuur en (veel voorkomende) toepassing van gedetailleerde toets	Overstromingskansbenadering (Hier willen we naartoe)
Elk onderdeel van de kering wordt apart beschouwd en getoetst .	Elk onderdeel van de kering/mechanisme wordt apart beschouwd en van een duiding voorzien.	Elk onderdeel van de kering/mechanisme wordt apart beschouwd. Mogelijk (afhankelijk van de uiteindelijke MR) wordt al op dit niveau een duiding gegeven.
Per los mechanisme/onderdeel zijn eisen opgesteld waar aan moet worden voldaan. Daarbij werd meestal uitgegaan van een schadecriterium. De dijk moest onder maatgevende omstandigheden alle toegekende functies kunnen vervullen.	Alle onderdelen samen bepalen de overstromingskans van het traject. Kansen worden veelal geschat op basis van semi-probabilistische benaderingen en gecombineerd op basis van een benaderingsmethode. In de beoordelingen wordt nog veelal gekeken naar de kans op schade, ook al biedt de toets op maat de ruimte om verder te kijken dan de gedetailleerde rekenregels.	Alle onderdelen samen bepalen de overstromingskans van traject. Kansen worden bepaald middels probabilistische methoden en gecombineerd door expliciet rekening te houden met afhankelijkheden. In de beoordeling wordt -waar relevant- gekeken naar alle gebeurtenissen leidend tot overstroming.
Het gaat om rekenkundig (met modellen) aantonen dat losse onderdelen of mechanismen aan de gestelde eisen voldoen.	Uitstraling instrumentarium nodigt uit om met beschikbare modellen na te gaan of aan de eisen voor vakken en mechanismen wordt voldaan.	Uitstraling instrumentarium nodigt uit om de fysica centraal te stellen en modellen als hulpmiddelen te behandelen voor het bepalen van een realistische overstromingskans van het traject.

2.2 Verhaal van de kering

Bij de term “het verhaal van de kering” zijn verschillende beelden. Daarom stellen we hier eerst het achterliggende doel centraal: *Het uitvoeren van een lokale analyse van de gebeurtenissen die (kunnen) optreden en leiden tot een overstroming met grote schade en/of dodelijke slachtoffers tot gevolg.* Het verhaal van de kering gaat dus over het centraal stellen en begrijpen van de kering en de context waarin deze zich bevindt.

In de huidige beoordelingspraktijk en de structuur van de instrumenten staan veelal de losse onderdelen van de kering, de gedetailleerde toets en de modellen en rekenregels centraal.

Echter, door de gebeurtenissen die tot een overstroming leiden centraal te stellen en de verhalen, analyses én berekeningen te combineren ontstaat steeds beter inzicht in de overstromingskansen. Dit draagt bij aan een goed inzicht in de overstromingskansen en vergroot de uitlegbaarheid van resultaten. Dit is van belang voor het dagelijks beheer, in crisissituaties, voor beleidsevaluaties, en het beoordelen, plannen en ontwerpen van maatregelen.

2.3 Faalpaden en gebeurtenissenbomen

Een faalpad beschrijft een lineaire opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot een overstroming. Alle gebeurtenissen in het faalpad moeten optreden om een overstroming te veroorzaken. In Kanning et al. (2019) is een generieke aanpak beschreven voor een beschouwing van de overstromingskans met faalpaden.

Deze generieke aanpak bestaat uit 5 stappen die, afhankelijk van de toepassing, verder kunnen worden onderverdeeld:

1. Opstellen verhaal van de kering: vanuit eigenschappen systeem beschrijven van alle relevante wijzen (faalpaden) waarop een overstroming kan optreden.
2. Vaststellen bepalende faalpaden: selectie van die faalpaden die significant zullen bijdragen aan de overstromingskans
3. Uitwerken bepalende faalpad(en): uitwerken van submechanismen in een faalpad.
4. Analyse van bepalende faalpad(en)
5. Bepaling overstromingskans

Er zijn heel veel mogelijke faalpaden die potentieel kunnen leiden tot overstroming. Bij het werken met faalpaden is het daarom van belang om na te gaan welke bepalend zijn voor de overstromingskans. Veelal zullen slechts ene beperkt aantal faalpaden substantieel bijdragen aan de overstromingskans: overige faalpaden zijn wel mogelijk maar de kans dat deze tot een overstroming leiden is niet-substantieel.

3 Definities van gebeurtenissenbomen en faalpaden

Dit hoofdstuk is bedoeld om de verschillende definities, concepten en terminologie toe te lichten, zoals deze gedurende dit project gehanteerd worden. In het kader van overstromingskansen is een faalpad een reeks gebeurtenissen die tot overstroming leidt. Er zijn meerdere manieren om de relatie tussen die gebeurtenissen grafisch weer te geven waarvan foutenbomen en gebeurtenissenbomen de meest gangbare zijn. Het begrip “faalpad” is ontleend aan de structuur van gebeurtenissenbomen.

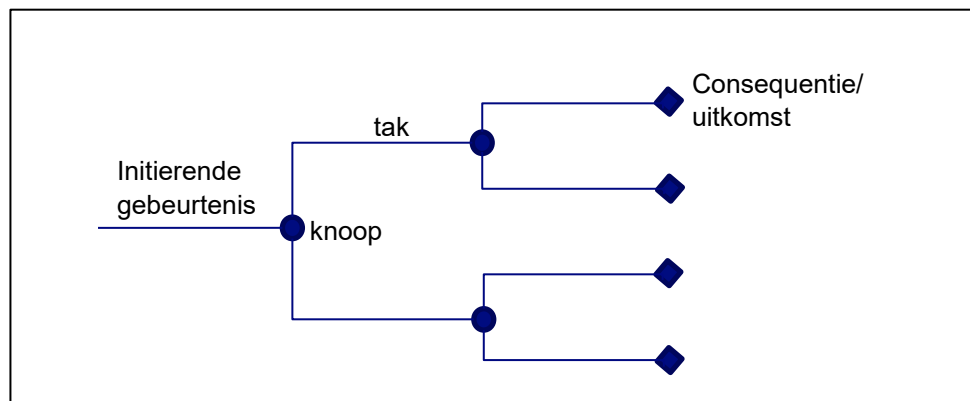
3.1 Principes van gebeurtenissenbomen en faalpaden

Het (formele) concept van gebeurtenissenbomen is hieronder weergegeven, zodat duidelijk wordt hoe faalpaden hieruit zijn afgeleid.

Een gebeurtenissenboom (event tree) bestaat uit een aantal vaste componenten:

- 1 De boom start (meestal links) met een initierende gebeurtenis (Engels: ‘initiating event’) die de trigger is van het faalproces.
- 2 De boom eindigt (meestal rechts) met mogelijke uitkomsten. Voor overstromingskansen zijn we meestal alleen geïnteresseerd in de ongewenste uitkomst ‘overstroming’.
- 3 Daartussen staan alle gebeurtenissen die de initiërende gebeurtenis kunnen opvolgen én relevant zijn voor het wel of niet optreden van de ongewenste uitkomst.
- 4 De gebeurtenissen (ook knopen genoemd) hebben een discreet aantal mogelijke uitkomsten (takken). Vaak is dit binair (twee takken); het wel/niet optreden van de gebeurtenis. Maar een knoop kan ook meerdere takken hebben; bijvoorbeeld verschillende gradaties van vervolgschade.

Figuur 3-1 Terminologie van gebeurtenissenbomen (Baecher & Christian, 2005)



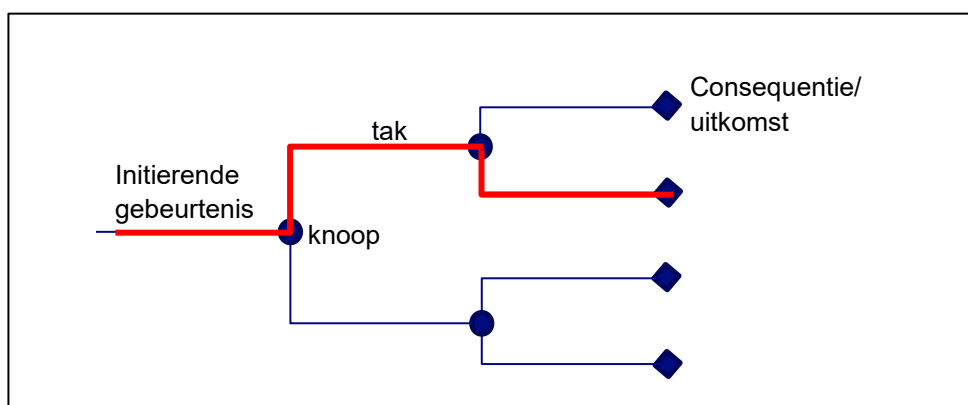
Voor de invulling van de knopen bestaat een aantal regels:

- De verschillende takken in een knoop moeten zo gedefinieerd zijn dat die uitkomsten elkaar uitsluiten en samen alle mogelijkheden afdekken (technisch: mutually exclusive & collectively exhaustive). De som van de kansen in een knoop is dus altijd 1.
- De waarschijnlijkheid van het optreden van de initiërende gebeurtenis is uitgedrukt als frequentie of kans per tijdseenheid (voor overstromingsrisico's wordt in de regel gewerkt met de tijdseenheid jaar).
- De waarschijnlijkheid van het optreden van de overige gebeurtenissen is uitgedrukt als een conditionele kans. Deze is conditioneel op alle voorgaande gebeurtenissen.

Faalpaden zijn lineaire combinaties van achtereenvolgend optredende gebeurtenissen die tot een overstroming leiden. Indien alle relevante gebeurtenissen zijn opgenomen en alle knooppansen gekwantificeerd, kan de overstromingskans als volgt worden bepaald:

- Bepaal de kans van optreden van ieder faalpad door het vermenigvuldigen van alle knooppansen in dat pad met de jaarlijkse kans op voorkomen van de initiële gebeurtenis²;
- Optellen van de kansen per faalpad.

Figuur 3-2 Linear faalpad (rode lijn) als onderdeel van gebeurtenissenbomen (Baecher & Christian, 2005)



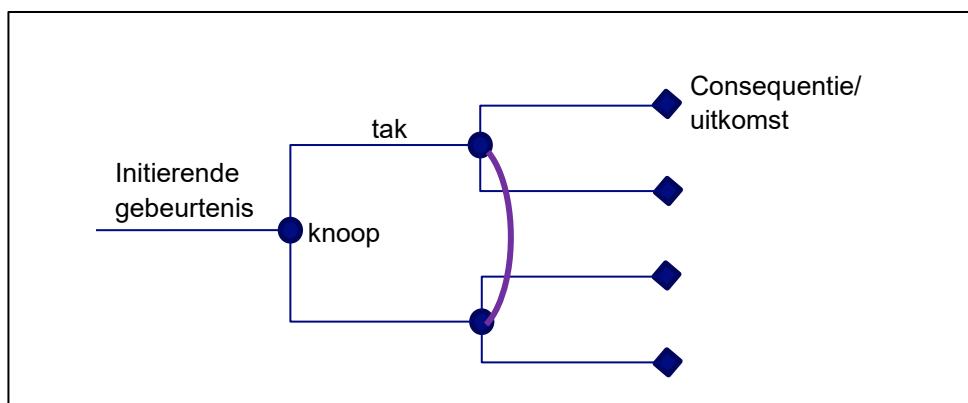
De kans op optreden van een faalpad is een product van de kansen op alle knopen in het pad, waarbij alle kansen behalve de kansen bij de eerste knoop conditionele kansen zijn (kansen gegeven het optreden van de voorgaande knopen).

Een gebeurtenissenboom groeit explosief bij een toenemend aantal (combinaties van) mogelijke gebeurtenissen die tot een overstroming kunnen leiden. Werken met gebeurtenissenbomen vraagt daarom continu om afwegingen tussen aan de ene kant de benodigde diepgang en mate van de detail en aan de andere kant de overzichtelijkheid van de gebeurtenissenboom.

In de praktijk worden bij het opstellen van gebeurtenissenbomen soms verbindingen gelegd tussen verschillende lineaire faalpaden (bijvoorbeeld na overslag van als gevolg van een verhoogde fretatische lijn stabiliteitsverlies optreden), zie bijvoorbeeld Figuur 3-4. Het leggen van een dergelijke verbinding is begrijpelijk, maar kan gemakkelijk leiden tot fouten. De conditionele kans op een gebeurtenis als 'doorgaande erosie' kan namelijk sterk afhankelijk zijn van de 'route daarnaartoe', d.w.z. de gebeurtenissen die eraan vooraf gingen. In voorkomende gevallen dient dan een tak te worden toegevoegd in plaats van het leggen van een verbinding tussen takken.

² Indien de jaarlijks kans zo groot is dat de initiële gebeurtenis ook regelmatig meerdere keren per jaar voorkomt kan het functioneler zijn om met *frequenties* te rekenen in plaats van jaarlijkse kansen.

Figuur 3-3 Voorbeeld van verbindingen tussen lineaire faalpaden (paarse lijn)



3.2 Principes van foutenbomen (fault tree)

Een foutenboom is, net als een gebeurtenissenboom, opgebouwd uit een aantal gebeurtenissen. De gebeurtenissen zijn zó geformuleerd dat er twee mogelijke uitkomsten zijn: de gebeurtenis treedt op, of de gebeurtenis treedt niet op. Gebeurtenissen zijn met elkaar verbonden in de boom door een “poort”. Er zijn twee soorten poorten: een “OF-poort” en een “EN-poort”.

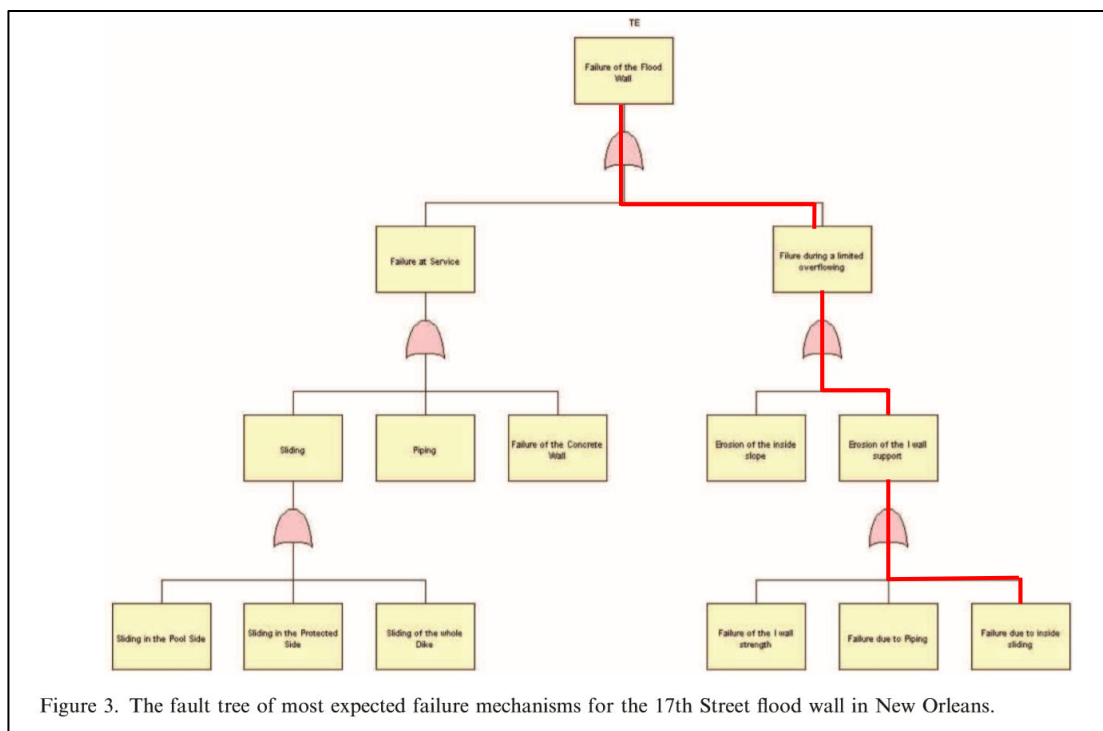
In geval van een “OF-poort” treedt de volgende gebeurtenis alleen op als tenminste één van de onderliggende gebeurtenissen optreedt. In geval van een “EN-poort” treedt de volgende gebeurtenis pas op als alle onderliggende gebeurtenissen optreden.

De foutenboom is doorgaans van boven naar beneden georiënteerd. Bovenin staat de “topgebeurtenis” waarvan de kans op optreden bepaald moet worden. Voor overstromingskansen zijn we meestal alleen geïnteresseerd in de (ongewenste) topgebeurtenis ‘overstroming’. Naar beneden toe vertakt de boom zich in allerlei onderliggende gebeurtenissen die gezamenlijk aanleiding kunnen geven tot de topgebeurtenis. Het combineren van gebeurtenissen door bovengenoemde poorten gebeurt dus van beneden naar boven.

Ook in foutenbomen zijn faalpaden te herkennen. Elke opeenvolging van gebeurtenissen die kan leiden tot de ongewenste topgebeurtenis is een faalpad. Elke OF-poort levert een nieuw faalpad of een nieuwe set faalpaden op. Faalpaden in gebeurtenissenbomen worden ook wel “cut sets” genoemd.

Hydra-Ring, het rekenhart van Riskeer, rekt volgens het principe van een foutenboom. In Hydra-Ring is een gebeurtenis bijvoorbeeld het optreden van een bepaald faalmechanisme bij een bepaald dijkvak. Vervolgens worden dijkvakken en faalmechanismen gecombineerd tot er 1 topgebeurtenis overblijft: het falen van de waterkering (een dijktraject). De topgebeurtenis die in de waterwet is vastgelegd is de overstromingskans: de kans op verlies aan waterkerend vermogen met een overstroming met substantiële schade en/of slachtoffers tot gevolg. In de praktijk zijn uit deze topgebeurtenis voor de gedetailleerde toets/het ontwerp van versterkingsmaatregelen per faalmechanisme veiligheidseisen afgeleid waarbij gebruik is gemaakt van een faalkansbegroting, een lengte-effect en een faaldefinitie.

Figuur 3-4 Voorbeeld van foutenboom (Rajabalinejad, van Gelder, Demirbilek, Mahdi, & Vrijling, 2010), met een willekeurig lineair faalpad weergegeven middels een rode lijn.



3.3 Foutenboom (fault tree) versus gebeurtenissenboom (event tree).

Wat zijn overwegingen voor het werken met een foutenboom of een gebeurtenissenboom? Beide concepten zijn in principe in elke omstandigheid toe te passen waar een faalkans berekend moet worden. Anders geformuleerd: beide methoden kunnen gebruikt worden om te beschrijven wat er moet gebeuren voordat er sprake is van een overstroming. Als beide methoden op onderling consistente wijze wordt toegepast zal dat in theorie ook moeten resulteren in faalkansen en overstromingskansen die gelijk zijn.

De keuze voor een methode zal daarom vooral gebaseerd worden op wat het meeste praktisch toepasbaar is en/of wat het beste aansluit bij de intuïtie van de gebruiker. Het zal dus deels een kwestie van smaak zijn wat de voorkeur heeft en deze voorkeur kan per situatie verschillen. Verder is de keuze ook afhankelijk van het doel: dient het bijvoorbeeld om de visualisatie/communicatie te ondersteunen, of gaat het om een blauwprint voor het rekenproces?

Het is de verwachting dat de gebeurtenissenboom over het algemeen beter aansluit bij de intuïtie van de meeste gebruikers van BOI dan de foutenboom (m.u.v. analyses van betrouwbaarheid sluiting, waar het gebruik van foutenbomen al decennia lang de standaard is). De gebeurtenissenboom wordt namelijk opgesteld vanuit een 'forward logic', d.w.z. vanaf de initiërende gebeurtenis(sen) stapsgewijs en volgordeijkheid in de tijd naar het moment van overstromen. De foutenboom werkt juist vanuit het principe van 'backward logic': het redeneert terug vanuit de overstroming waarbij wordt bepaald welke combinaties van gebeurtenissen tot deze overstroming geleid kunnen hebben.

Gelukkig is een harde keuze voor de ene of de andere methode niet nodig. Bij de bepaling van overstromingskansen kunnen foutenbomen en gebeurtenissenbomen namelijk moeiteloos met elkaar worden gecombineerd. Zo kunnen de sterke punten van beide methoden optimaal worden benut.

Bij de analyse van een specifiek faalmechanisme op een specifieke locatie zal het gebruik van gebeurtenissenbomen soms praktischer zijn vanwege de gemakkelijk te begrijpen 'forward logic'. Bij het analyseren van verschillende faalmechanismen op verschillende locaties kan een foutenboom echter praktischer zijn, omdat de initiërende gebeurtenis (het 'start of ophangpunt' van de gebeurtenissenboom) dan sterk kan verschillen, terwijl de ongewenste topgebeurtenis (het 'eind- of ophangpunt' van de foutenboom) steeds hetzelfde is (nl. overstroming). BOI en faalpaden

3.4 Definitie van overstromingskans op trajectniveau

Volgens artikel 1 van de Waterwet is de overstromingskans de kans op overstroming leidend tot substantiële schade of slachtoffers. De huidige normering hanteert als basis een maximaal acceptabel overstromingsrisico: de kans dat er een overstroming (falen van de kering) optreedt als gevolg van het falen (overschrijden grenstoestand) van de waterkering ergens op het traject door enig mechanisme. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de signaleringswaarde en de ondergrens. De signaleringswaarde dient als waarschuwing dat het waarschijnlijk is dat op enig moment in de (nabije) toekomst niet meer zal worden voldaan aan de ondergrens. Hierdoor wordt het mogelijk om op tijd maatregelen te treffen waardoor de overstromingskans niet groter wordt dan de ondergrenswaarde. De ondergrens betreft de wettelijke maximaal toelaatbaar overstromingskans op trajectniveau.

Voor de bepaling van de overstromingskans op trajectniveau wordt gekeken naar de kans op falen (een overstroming) als gevolg van één van de voor het beschouwde traject relevante mechanismen ergens langs het traject. Dit kan schematisch (in de vorm van een foutenboom) worden weergegeven, zoals in Figuur 3-5. De kans op falen van de kering wordt bepaald door de faalkansen van de individuele mechanismen te combineren, rekening houdend met de correlaties tussen mechanismen en doorsnedes/vakken, zie ook sectie 3.5.



Figuur 3-5: Foutenboom leidend tot overstroming op traject niveau als gevolg van de verschillende mechanismen

De hierboven gepresenteerde foutenboom kan ook worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. Uitgaande van de spelregels uit paragraaf 3.1 zou dat echter een enorme boom opleveren. Het optreden van een faalmechanisme maakt het optreden van andere faalmechanismen namelijk niet onmogelijk. Dit betekent dat elke unieke combinatie van wel/niet optredende faalmechanismen een andere tak oplevert in de gebeurtenissenboom. Anders wordt namelijk niet voldaan aan de voorwaarde dat de verschillende takken in een knoop zo moeten zijn gedefinieerd zijn dat die uitkomsten elkaar uitsluiten en samen alle mogelijkheden afdekken.

In het licht van de overstromingskansbendering geldt dat in theorie alle faalpaden leidend tot een overstroming onderdeel kunnen (of zelfs moeten) zijn van de overall gebeurtenissenboom/foutenboom. Echter, het gaat uiteindelijk om die faalpaden die in gebeurtenissenboom een substantiële bijdrage hebben aan de overstromingskans. Het hoeft dan ook niet altijd zo te zijn dat alle faalpaden worden meegenomen bij de bepaling van de overstromingskans: als van specifieke faalpaden duidelijk is dat deze geen substantiële bijdrage hebben, dan kunnen deze verwaarloosd worden. Ook is het mogelijk dat faalpaden niet compleet of in detail hoeven te worden afgelopen om te tonen dat de faalkansbijdrage zeer klein is. Omgekeerd geldt ook dat als er faalpaden relevant zijn anders dan de standaard faalpaden, dan kunnen (moeten) deze opgenomen worden in de overall gebeurtenissenboom.

3.5 Benadering overstromingskans

In het ideale geval zou de beoordeling van waterkeringen volledig probabilistisch plaatsvinden op trajectniveau: rekening houdend met de verschillende doorsnedes/vakken binnen een traject en rekening houdend met alle relevante faalpaden (inclusief vervolprocessen leidend tot overstroming) binnen de doorsnedes/vakken. Effectief betekent dit dat alle mogelijke faalpaden binnen een gebeurtenissenboom afgelopen moeten worden voor een traject.

In de praktijk zou dit betekenen dit dat voor N vakken binnen het traject³ en voor M faalmechanismen (of: faalpaden) de gecombineerde kans op overstroming moet worden bepaald. Visueel kan dit worden voorgesteld als Tabel 3-1. De overstromingskans kan vervolgens bepaald worden middels vergelijking (3.1), rekening houdend met de correlatie tussen de verschillende mechanismes en vakken/doorsnedes.

	Vak 1	Vak 2	...	Vak N
Mechanisme 1	$P_{vak1, mech 1}$	$P_{vak 2, mech 1}$		$P_{vak N, mech 1}$
Mechanisme 2	$P_{vak1, mech 2}$	$P_{vak 2, mech 2}$		$P_{vak N, mech 2}$
...				
Mechanisme M	$P_{vak1, mech M}$	$P_{vak 2, mech M}$		$P_{vak N, mech M}$

Tabel 3-1: Weergave van verschillende combinaties van falen per mechanisme en per vak

$$P_{overstroming, traject} = P\left(Falen_{vak 1, mech 1} \cup \dots \cup Falen_{vak N, mech M}\right) \tag{3.1}$$

Bij de ontwikkeling van het WBI2017 is weliswaar op bovenstaande basis-opzet aangesloten maar zijn er enkele zaken benaderend uitgewerkt:

1. *We kijken vaak naar het optreden van schade in plaats van overstroming:*
 Voor de meeste mechanismen wordt vooralsnog aangenomen dat de kans op schade praktisch gelijk is aan de kans op overstroming. In de praktijk is dit (lang) niet altijd het geval. Vaak is er nog meer voor nodig voordat daadwerkelijk sprake is van een overstroming: er dienen bepaalde vervolprocessen plaats te vinden. Echter, bij het opstellen van WBI2017 was er onvoldoende kennis en ervaring om dit op gestructureerde wijze mee te nemen. Het is mogelijk om in een beoordeling op maat wel rekening te houden met vervolprocessen.

³ Opgemerkt wordt dat de vakindeling per mechanisme wordt gemaakt en dat het niet noodzakelijkerwijs zo hoeft te zijn dat alle mechanismen dezelfde vakindeling hanteren. In deze generieke toelichting wordt er gemakshalve van uit gegaan dat voor alle mechanismen dezelfde vakindeling geldt.

2. *We maken veelal gebruik van semi-probabilistische rekenregels voor het schatten van faalkansen in plaats van volledig probabilistische beschrijvingen:*
 Zo worden voor verschillende mechanismen rekenwaarden gebruikt voor coëfficiënten die in de basis met een kansverdeling worden beschreven. Daarnaast zijn er mechanismen (bijvoorbeeld STBI en GEBU) waarbij een rekenwaarde van de belasting wordt gehanteerd in plaats van een volledig probabilistische benadering.

3. *We verscalen en combineren de per doorsnede bepaalde faalkansen per faalmechanisme tot overstromingskansen op basis van benaderingsmethode:*
 - *We maken gebruik van lengtefactoren om de doorsnede kans naar vak en trajectkans te vertalen en negeren daarmee (deels) de afhankelijkheden tussen doorsnedes/vakken:*
 Zoals in sectie 3.4 toegelicht is de norm aangaande overstromingskans vastgelegd op trajectniveau. In het WBI2017 is er voor gekozen om de faalkans per mechanisme op doorsnede-niveau te bepalen en deze vervolgens te assembleren met een benadering. Dit betekent dat de afhankelijkheden tussen verschillende doorsnedes (bijvoorbeeld onzekerheid in sterkte-eigenschappen van de ondergrond) in de assemblage verdisconteert wordt middels een lengte-effect factor per mechanisme:
 N_{mech} .

 - *We negeren bij het ontwerpen en bij de nadere duiding van het oordeel per vak en mechanisme (deels) de afhankelijkheden tussen mechanismen bij beoordelen (wel/niet volledig gecorreleerd) en ontwerpen (gebruik faalkansbegroting):*
 We benaderen bij het ontwerpen (en nadere duiding van het oordeel per vak en mechanisme) de kansbijdrage van de verschillende mechanismen aan de overstromingskans en onderlinge correlatie via een faalkansbegroting (ω_{mech}). Dit betekent dat een vaste bijdrage is van de mechanismen, terwijl dit in de praktijk ook zou kunnen verschillen. Een brede lage dijk heeft in de praktijk namelijk een grotere kans op falen door overslag dan door verlies van stabiliteit, maar met de faalkansbegroting is de relatieve kans op falen door deze mechanismen “vast gezet” voor alle typen dijken.

4. *We gaan (in de praktijk) vaak uit van de slechts denkbare situatie en veronderstellen dat deze constant is gedurende de beoordelingsperiode terwijl we eigenlijk de onzekerheden expliciet zouden moeten maken, denk bijvoorbeeld aan kwaliteit grasmatt:*
 Bij het beoordelen dienen sterkte-eigenschappen te worden toegekend aan de dijk welke niet constant zijn gedurende de beoordelingsperiode (denk bijvoorbeeld aan de graskwaliteit bij het mechanisme GEKB). In de praktijk zijn deze sterkte-eigenschappen onzeker. In de praktijk is het moeilijk om een verwachtingswaarde met spreiding te bepalen en als gevolg hiervan wordt vaak de slechts denkbare situatie gebruikt, wat kan leiden tot een overschatting van de overstromingskans. Andersom kan het negeren van de kans op schade ook leiden tot onderschatting van de overstromingskans.

De bovenstaande pragmatische benaderingen samengevat in Figuur 3-6, maken dat er niet altijd een realistisch beeld van de overstromingskans wordt verkregen of dat de duiding van de bepalende vakken en/of mechanismen niet nauwkeurig is. In de gevallen waar de gedetailleerde beoordeling geen recht doet aan de lokale situatie, dient een Toets op Maat te worden uitgevoerd om te komen tot een realistischer veiligheidsoordeel. Het gebruik van

gebeurtenissenbomen (en daaruit volgend faalpaden) kan helpen bij het aanscherpen van het veiligheidsoordeel.

Huidige werkwijze voor beoordelen

De huidige werkwijze is het beschouwen van alleen initiatie en we negeren:

- Kansbijdragen vervolgprocessen ($P_{\text{vervolg}} = 1$)
- Interacties tussen faalpaden/doorsnedes (wordt nu niet meegenomen, $p=0$ en/of N-factor)
- Variabiliteit van de staat van de kering gedurende de beoordelingsperiode

Faalpad	Initiatie	Vervolgmechanisme*	Kruinverlaging*	Bresgroei*	Π
Dijkerosie	$P_{1,\text{ini}}$	$P=1$	$P=1$	$P=1$	$P_{1,\text{vak}}$
Macro-stabiliteit	$P_{2,\text{ini}}$	$P=1$	$P=1$	$P=1$	$P_{2,\text{vak}}$
Piping	$P_{3,\text{ini}}$	$P=1$	$P=1$	$P=1$	$P_{3,\text{vak}}$
....	$P_{4,\text{ini}}$	$P=1$	$P=1$	$P=1$	$P_{4,\text{vak}}$
Σ					$P_{n,\text{vak}} < \text{norm}$

* Kans gegeven voorgaande processen

3

Figuur 3-6: Schematische weergave van huidige werkwijze voor beoordelen

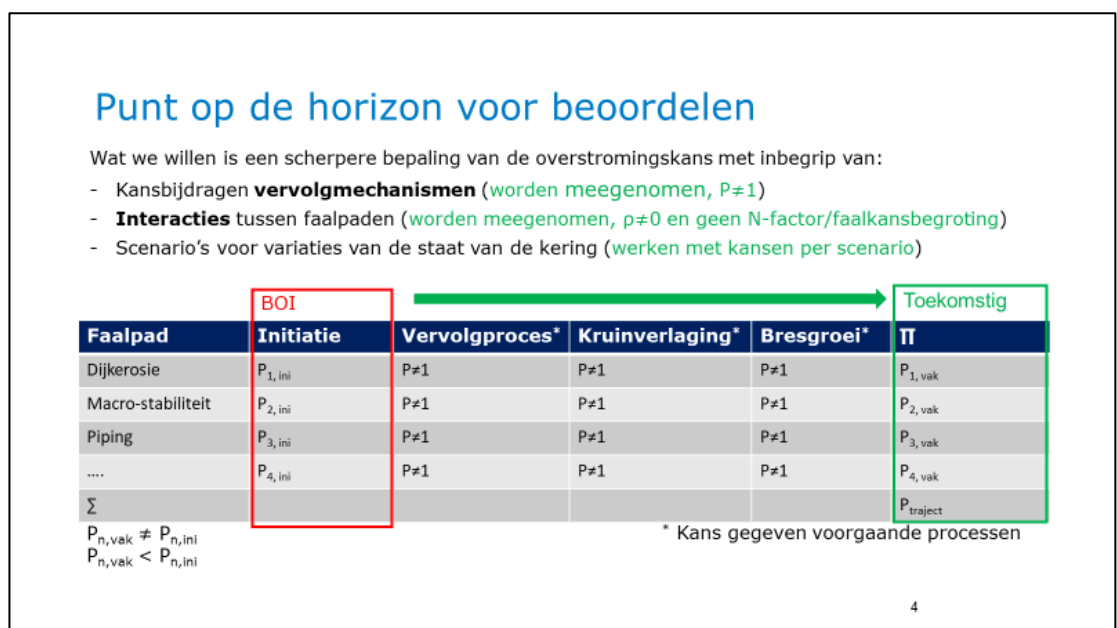
4 BOI: gebruik gebeurtenissenbomen en faalpaden voor een betere inschatting van de overstromingskans op trajectniveau

4.1 Inleiding

Op basis van de ervaringen van de eerste beoordeling op basis van overstromingskansen (LBO-1) blijkt dat meer "maatwerk" nodig is voor een scherpe bepaling van de overstromingskansen. Dit maatwerk kan tot stand worden gebracht door te denken in gebeurtenissenbomen en faalpaden (zie ook Figuur 4-1 voor een schets van het "punt op de horizon" voor beoordelen)⁴:

1. Voeg vervolprocessen toe aan faalpaden: allereerst kan ten opzichte van de gedetailleerde toets rekening worden gehouden met vervolprocessen (gebeurtenissenbomen na initiatie van schade).
2. Neem de afhankelijkheden tussen faalmechanismen/faalpaden zuiver mee: Gebruik geen benaderingsmethode (huidige Assemblagetool) bij het verscalen en combineren van faalkansen, maar ga uit van de daadwerkelijk aanwezige afhankelijkheden. Hiervoor kan Hydra-Ring worden gebruikt.
3. Voeg scenario-denken toe: In een gebeurtenissenboomanalyse kunnen knopen worden opgenomen met betrekking tot onzekerheid over de staat van de waterkering ten tijde van een hoogwaterbelasting (zoals door graverij, droogte).

In de hiernavolgende secties worden deze aanscherpingen van de beoordelingssystematiek nader toegelicht.



Figuur 4-1: Schematische weergave mogelijke aanscherpingen, "Punt op de Horizon"

⁴ In deze rapportage wordt er van uitgegaan dat voorafgaand aan deze drie stappen, als stap 0, een aanscherping van de gehanteerde locatie specifieke parameters (door meer data-inwinning) of een aanscherping van de beschrijving van de fysica heeft plaatsgevonden.

4.2 Aanscherping 1: rekening houden met vervolgprocessen

De eerste aanscherping heeft betrekking op bij het bepalen van de overstromingskans niet alleen de initiatie van schade in beschouwing te nemen maar ook de vervolggebeurtenissen die leiden tot een falen van de waterkering. In concreet betekent dat:

- In WBI2017 wordt de conditionele kans op falen door vervolgprocessen gegeven initiatie veelal gelijk gesteld aan 100%, ofwel: $P(\text{vervolgprocessen} | \text{initiatie}) = 1$. Dit leidt ertoe dat $P_{ini} = P_{faalpad}$, zie ook Tabel 4-1.
- De aanscherping van de overstromingskans wordt gerealiseerd door de conditionele kans op overstrooming door vervolgprocessen in rekening te brengen bij de voor de waterkering relevante faalpaden, zie Tabel 4-2. De conditionele kans van het vervolgproces is veelal ongelijk aan 1.

Gebeurtenissenboom	Faalpad	Initiatie	Vervolgprocessen*	Faalkans
Dijkerosie	GEKB	$P_{\text{GEKB,ini}}$	$P_{\text{GEKB,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{GEKB,ini}}$
	GEBU	$P_{\text{GEBU,ini}}$	$P_{\text{GEBU,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{GEBU,ini}}$
Stabiliteit	STBI	$P_{\text{STBI,ini}}$	$P_{\text{STBI,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STBI,ini}}$
	STBU	$P_{\text{STBU,ini}}$	$P_{\text{STBU,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STBU,ini}}$
Interne erosie	STPH	$P_{\text{STPH,ini}}$	$P_{\text{STPH,vervolg}} (=1)$	$P_{\text{STPH,ini}}$
.....				

Tabel 4-1: bepaling faalkans per faalpad conform WBI2017 aannames (* conditionele kans gegeven initiatie)

Gebeurtenissenboom	Faalpad	Initiatie	Vervolgprocessen*	Faalkans
Dijkerosie	GEKB	$P_{\text{GEKB,ini}}$	$P_{\text{GEKB,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEKB,ini}} * P_{\text{GEKB,vervolg}}$
	GEBU	$P_{\text{GEBU,ini}}$	$P_{\text{GEBU,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{GEBU,vervolg}}$
Stabiliteit	STBI	$P_{\text{STBI,ini}}$	$P_{\text{STBI,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STBI,vervolg}}$
	STBU	$P_{\text{STBU,ini}}$	$P_{\text{STBU,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STBU,vervolg}}$
Interne erosie	STPH	$P_{\text{STPH,ini}}$	$P_{\text{STPH,vervolg}} (\neq 1)$	$P_{\text{GEBU,ini}} * P_{\text{STPH,vervolg}}$
.....				

Tabel 4-2: bepaling faalkans per faalpad met aanscherping door meenemen kans dat vervolgprocessen leiden tot overstrooming (* conditionele kans gegeven initiatie)

4.3 Aanscherping 2: neem de afhankelijkheden tussen faalmechanismen/faalpaden zuiver mee

Naast het aanscherpen van de individuele faalpaden (startend vanuit het mechanisme dat leidt tot initiële schade) kan ook aangescherpt worden door de afhankelijkheden tussen mechanismen en doorsnedes zuiver mee te nemen. Op dit moment wordt gebruik gemaakt van een benadering voor het in rekening brengen van deze afhankelijkheden (opschaling in ruimte). Door deze afhankelijkheden zuiver mee te nemen wordt een realistischer beeld van de overstromingskans verkregen.

Effectief betekent dit dat de faalkansen per faalpad en per vak gecombineerd moeten worden op een volledig probabilistische wijze. Deze combinatie kan bereikt worden door volledig probabilistisch te rekenen.

Gebeurtenissenboom	Faalpad	Vak 1	Vak 2	...	Vak N	Traject
Dijkerosie	GEKB	$P_{\text{GEKB,vak 1}}$	$P_{\text{GEKB,vak 2}}$	....	$P_{\text{GEKB,vak N}}$	$P_{\text{GEKB,traject}}|P_{\text{vakken}}$
	GEBU	$P_{\text{GEBU,vak 1}}$	$P_{\text{GEBU,vak 2}}$	....	$P_{\text{GEBU,vak N}}$	$P_{\text{GEBU,traject}}|P_{\text{vakken}}$
Stabiliteit	STBI	$P_{\text{STBI,vak 1}}$	$P_{\text{STBI,vak 2}}$	....	$P_{\text{STBI,vak N}}$	$P_{\text{STBI,traject}}|P_{\text{vakken}}$
	STBU	$P_{\text{STBU,vak 1}}$	$P_{\text{STBU,vak 2}}$	....	$P_{\text{STBU,vak N}}$	$P_{\text{STBU,traject}}|P_{\text{vakken}}$
Interne erosie	STPH	$P_{\text{STPH,vak 1}}$	$P_{\text{STPH,vak 2}}$	....	$P_{\text{STPH,vak N}}$	$P_{\text{STPH,traject}}|P_{\text{vakken}}$
.....					
	P_{vak}	$P_{\text{vak1}}|P_{\text{mechs}}$	$P_{\text{vak2}}|P_{\text{mechs}}$	....	$P_{\text{vak N}}|P_{\text{mechs}}$	$P_{\text{traject}}|P_{\text{mechs,vakken}}$

Tabel 4-3: bepaling overstroomingskans door afhankelijkheden tussen gebeurtenissenbomen, faalpaden en vakken in rekening te brengen, met afhankelijkheden weergeven als p

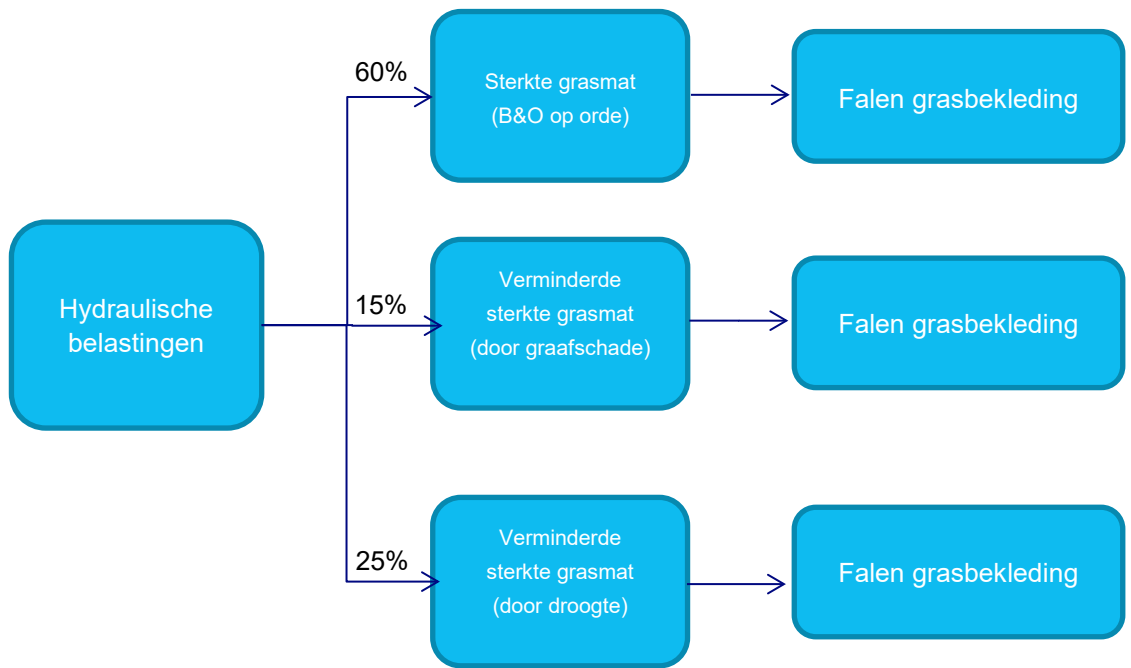
4.4 Aanscherping 3: denken in scenario's

Naast dat sprake kan zijn van vervolprocessen naar initiatie geldt dat ook sprake kan zijn van onzekerheden ten aanzien van invloeden op het optreden van een gebeurtenis in een faalpad. Bijvoorbeeld, de aanwezigheid van NWO's, niet ontdekte graverij of droogte kunnen invloed hebben op het optreden van een (initiële) mechanisme. Vanwege deze onzekerheid wordt voor de beoordeling vaak uitgegaan van een "worst case" scenario of wordt het invloed genegeerd. De overstroomingskansbenadering biedt echter de mogelijkheid om deze onzekerheid expliciet mee te nemen.

Het expliciet meenemen van deze onzekerheid is mogelijk door een gebeurtenissenboom te definiëren met verschillende paden voor verschillende toestanden/sterktes van de kering (scenario's), zie bijvoorbeeld Figuur 4-2. Vervolgens kan een kans worden toegekend aan het optreden van deze toestand en daarmee de kans op het initiële mechanisme gegeven rekening houdend met de kans op het scenario, zie Tabel 4-4. De individuele faalpaden kunnen tot slot gecombineerd worden tot 1 kans volgens vergelijking (4.1).

$$P_{\text{GEKB}} = P\left(Falen_{\text{GEKB,op orde}} \cup Falen_{\text{GEKB,graafschade}} \cup Falen_{\text{GEKB,droogte}}\right) \quad (4.1)$$

De in het initiërende mechanisme gehanteerde sterktebeschrijving kan conform het beschouwde scenario's worden aangepast om de kans op initiatie van schade te bepalen (en eventuele kans op vervolgschade) leidend tot een overstrooming.



Figuur 4-2: Voorbeeld gebeurtenissenboom met scenario's voor het falen van een grasbekleding

Gebeurtenissenboom	Faalpad	Toestand (scenario)	Initiatie	Faalkans $P_{\text{GEKB, scenario}}$
Dijkerosie	GEKB	Goed ($P_{\text{op orde}}$)	$P_{\text{GEKB, ini, op orde}}$	$P_{\text{op orde}} * P_{\text{GEKB, ini, op orde}}$
		Slecht ($P_{\text{graafschade}}$)	$P_{\text{GEKB, ini, graafschade}}$	$P_{\text{graafschade}} * P_{\text{GEKB, ini, graafschade}}$
		Slecht (P_{droogte})	$P_{\text{GEKB, ini, droogte}}$	$P_{\text{droogte}} * P_{\text{GEKB, ini, droogte}}$

Tabel 4-4: bepaling faalkans per faalpad rekening houdend met verminderde sterkte grasbekleding

5 Conclusies ten aanzien van werken met faalpaden/gebeurtenissenbomen

Met de introductie van het WBI2017 is de overstap gemaakt van een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overschrijdingskans naar een beoordeling van de waterkeringen op basis van een overstromingskans. Het huidige beoordelingsinstrumentarium kan als startpunt dienen voor het bepalen van realistische overstromingskansen, maar er is veelal ruimte voor aanscherping.

Relevante aanscherpingen verschillen (uiteraard) per dijk(vak), waardoor er geen generiek handelingsperspectief op te stellen is. Het is wel mogelijk om in generieke termen de mogelijkheden tot aanscherping te duiden, waarbij onderscheidt wordt gemaakt in drie soorten aanscherpingen:

1. Rekening houden met vervolprocessen na schade
2. Expliciet rekening houden met afhankelijkheden tussen doorsneden en faalmechanismen (of: faalkansen per mechanisme en doorsnede combineren in plaats van overstromingskansnormen ontleden tot doorsnede-eisen met lengte-effect-factoren en faalkansbudget)
3. Denken in scenario's

In deze rapportage zijn deze aanscherpingen geschetst en in het bredere perspectief geplaatst. Voorbeelden van toepassing van deze aanscherpingen zijn te vinden in de andere deelrapporten behorende bij deze studie.

Referenties

Baecher, G.B. and Christian, J.T. (2005) Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, West Sussex.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016). Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland. Nadine Slootjes en Herman van der Most. 28 juni 2016

Rajabali Nejad, M., van Gelder, P. H. A. J. M., Demirbilek, Z., Mahdi, T-F., & Vrijling, J. K. (2010). Application of the dynamic bounds method in the safety assessment of flood defences, a case study: 17th Street flood wall, New Orleans. *Georisk: Assessment and management of risk for engineered systems and geohazards*, 45(4), 157-173. <https://doi.org/10.1080/17499510903416170>

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