



ALGEMEEN

Handleiding Overstromingskansanalyse





Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat
Informatie	www.iplo.nl
Versie	Juli 2023

Voorwoord

Beste lezer,

Deze handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen is onderdeel van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.

Een van de doelstellingen van het programma BOI is het denken vanuit het gedrag van de kering en het werken met overstromingskansen beter mogelijk te maken. De inzet van het instrumentarium is flexibeler geworden. De beheerder maakt zelf de afweging welk model het meest geschikt is voor zijn kering. Ook wordt het volledige faalpad dat leidt tot een overstroming beschouwd.

Het 'papieren' instrumentarium is daarom opnieuw ingericht en bestaat nu uit de handleidingen Overstromingskansanalyse voor de verschillende typen keringen en de verschillende faalmechanismen én de Technische leidraden. De nog relevante onderdelen uit het WBI2017 uit bijlage III, de schematiseringshandleidingen en de leidraden en technische rapporten zijn hierin opgenomen.

Het gedrag van de kering centraal zetten klinkt logisch en past bij de ervaringen uit LBO-1. Deze stap lijkt dan ook eenvoudig: het basisinstrumentarium wijzigt inhoudelijk nauwelijks, de kering blijft hetzelfde en er zijn weinig nieuwe inzichten van de fysica. Toch hebben we bij de ontwikkeling van het instrumentarium en het opstellen van de handleidingen ervaren dat het in de praktijk lastig en soms theoretisch is. Het 'gedrag van de kering centraal' werkt namelijk door in het hele instrumentarium en vraagt dat er met een nieuwe blik naar wordt gekeken. Het kostte tijd om de nieuwe begrippen te doorgronden en op te schrijven. We zijn dan ook verschillende keren opnieuw begonnen.

Deze eerste groene versies zijn daarom nog niet perfect. De theoretische discussies zijn gevoerd, maar voor verdere aanvulling is het nodig dat praktijkervaring wordt opgedaan. Daarbij is het belangrijk dat we de nieuwe begrippen die steeds aan het eind van elke handleiding staan, consistent en eenduidig gebruiken.

We houden rekening met een continue doorontwikkeling van deze handleiding. Door praktijkervaringen toe te voegen gaan we ervan uit dat we de handleiding steeds completer en gebruiksvriendelijker kunnen maken. We willen u daarom vragen om zoveel mogelijk ervaringen, positief en negatief, met ons te delen. Dat kan via [het vragenformulier op de IPLO](#). Op Iplo, de pagina van het BOI-portaal, zal periodiek een samenvatting van opmerkingen, vragen en antwoorden worden gepubliceerd en waar nodig een lijst met errata. Op basis van de opmerkingen en ontwikkelingen van kennis en instrumenten wordt jaarlijks een afweging gemaakt of een nieuwe versie nodig is.

Dit document betreft de eerste groene versie van de handleiding. De kwaliteitsborging bestond uit een interne inhoudelijke review en controle op de consistentie over alle handleidingen vanuit het programma BOI. In 2024 worden een nieuwe versies voorzien waarin de eerste ervaringen zijn verwerkt, maar ook opmerkingen en aanbevelingen van ENW.

Het BOI-team

Inhoud

1	Inleiding	6
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	6
1.1.1	Procesinstrumentarium	6
1.1.2	Basisinstrumentarium	7
1.1.2.1	Handleidingen	7
1.1.2.2	Technische leidraden	7
1.1.2.3	Software en databases	8
1.1.3	Werkatelier	8
1.2	Verhaal van de kering	8
1.3	Doel handleiding	9
1.4	Leeswijzer van deze handleiding	10
2	Leidende principes	11
2.1	Een geloofwaardige overstromingskans	11
2.2	Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief	12
2.3	Het systeemgedrag staat centraal	13
3	Basisbegrippen	15
3.1	Faalmechanismen, faalpaden, mechanismen en gebeurtenissen	15
3.2	Directe en indirecte mechanismen	17
3.3	Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden	17
3.3.1	Gebeurtenissenbomen	17
3.3.2	Foutenbomen	19
3.3.3	Gebeurtenissenboom versus foutenboom	20
4	Overstromingskansanalyse als basis voor het beheersen van het overstromingsrisico	22
4.1	Overstromingskansanalyse als onderdeel van de actieve zorgplicht van de beheerder	22
4.1.1	Monitoring als onderdeel van de algemene zorgplicht	22
4.1.2	Aanleidingen voor een (gedeeltelijke) herbeoordeling	23
4.1.3	Overstromingskansanalyse bij ontwerp	23
5	Systeembegrip door het verhaal van de kering	25
5.1	De basis van het verhaal van de kering	25
5.1.1	Beschrijving van de waterkering (dijk/duin/kunstwerk)	26
5.1.2	Beschrijving van geologie en geohydrologie	26
5.1.3	Beschrijving van het hydrologische en hydraulische systeem	27
5.1.4	Kennis en ervaring van de beheerder	28
5.2	Van het verhaal naar overstromingskans	28
6	Principes van het schematiseren	30
6.1	Principes van schematiseren	30
6.2	Het proces van schematiseren	33
6.2.1	Selectie en analyse van relevante en dominante faalpaden	34
6.2.2	Opstellen van een vakindeling en keuze van een doorsnede	34
6.2.2.1	Opstellen van een vakindeling	34
6.2.2.2	Gemiddelde doorsnede of maatgevende doorsnede	34
6.2.2.3	De keuze van een gemiddelde doorsnede en de relatie tot het lengte-effect	36
6.2.2.4	De keuze van een maatgevende doorsnede en de relatie tot het lengte-effect	36

6.2.3	Het schematiseren van de gemiddelde doorsnede	36
6.2.4	Gevoeligheids- en hoekpuntenanalyses	37
6.2.5	Actualiseren schematisering op basis van nieuwe informatie	38
7	Uitvoeren van een overstromingskansanalyse	39
7.1	Procesmatige invulling van een overstromingskansanalyse	39
7.2	Selecteren van relevante faalmechanismen	40
7.3	Eerste inschatting overstromingskans	41
7.3.1	Bepalen hydraulische belasting	41
7.3.2	Bepaling overige belastingen	41
7.3.3	Bepaling faalkans	42
7.3.4	Mogelijke uitvoer op doorsnedeniveau	42
7.4	Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau	43
7.4.1	Bepaling faalkans per faalmechanisme per doorsnede	43
7.4.2	Vertaling naar trajectfaalkans	44
7.4.3	Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau	44
7.5	Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans	45
7.5.1	Aanscherping 1: Uitwerken van vervolgprocessen	45
7.5.2	Aanscherping 2: Verfijndere uitwerking initieel mechanisme en/of vervolgmechanismen	46
7.6	Plausibiliteit en duiding	47
8	Bepalen van de overstromingskans op trajectniveau	48
8.1	De overstromingskans: combinatie van kansbijdragen	48
8.1.1	Kansen combineren	48
8.1.2	Ruimtelijke correlatie en lengte-effecten	49
8.1.3	Ontwerpen en beoordelen	50
8.1.4	Assembleren en schematiseren	50
8.2	Inschatting van de faalkans per doorsnede	51
8.2.1	Faalkansen inschatten met een semi-probabilistische methode zonder kansschatting	51
8.2.2	In rekening brengen van vervolgmechanismen middels faalpaden	52
8.2.3	In rekening brengen van scenario's	52
8.3	Bepaling overstromingskans per vak	53
8.3.1	Wanneer hou ik rekening met correlaties en het lengte-effect binnen een vak?	53
8.3.2	Van kans per doorsnede naar een kans per vak	53
8.4	Bepalen overstromingskans op trajectniveau	55
8.4.1	Het combineren vakkansen tot een overstromingskans op trajectniveau	55
8.4.2	Combineren tot een faalkans per faalmechanisme	55
8.4.3	Lengte-effecten bij verschillende faalmechanismen	57
8.4.4	Combineren tot een overstromingskans van het dijktraject	58
8.4.5	Veiligheidsoordeel bij een beoordeling	58
	Bijlage A Begrippenlijst	60
	Bijlage B Afhankelijkheden bij het bepalen van een overstromingskans	62
	Afhankelijkheden tussen knopen in een faalpad	63
	Afhankelijkheden tussen twee of meer faalmechanismen	63
	Meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen	64

1 Inleiding

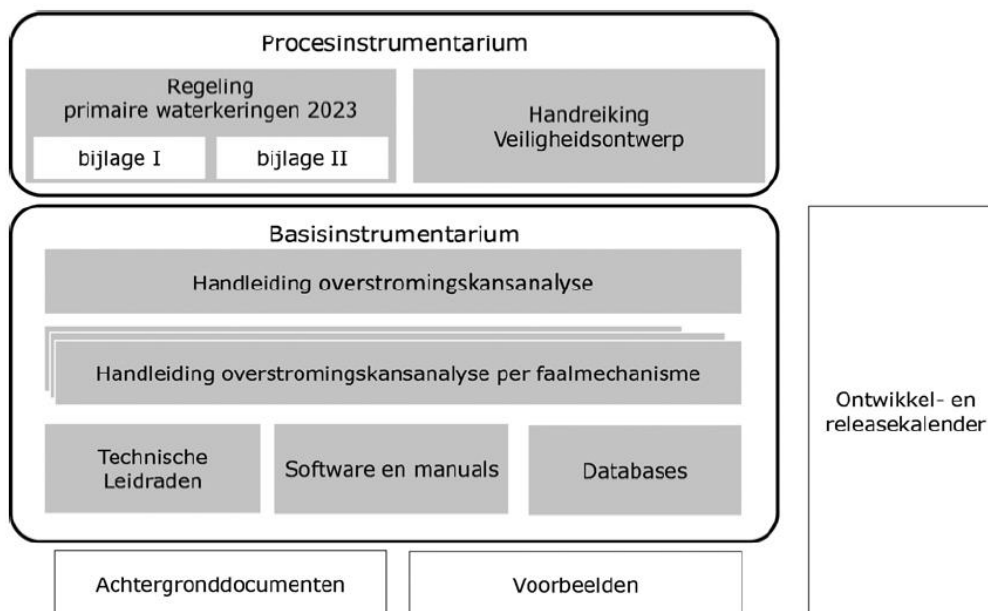
Deze handleiding beschrijft de aanpak voor een geloofwaardige, herleidbare en stabiele bepaling van de overstromingskans. Het verhaal van de kering staat daarbij centraal. De handleiding is geschreven om handvatten te bieden om in de beoordeling, of bij het maken van een ontwerp voor een versterking, de overstromingskans te bepalen.

De begrippenlijst in deze handleiding is hetzelfde als bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023, zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de veiligheidsbeoordeling op en stelt leidraden, handleidingen en software beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire keringen. Onder het beheer van een waterkering vallen alle activiteiten die erop gericht zijn de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten uitvoeren.

Als hulpmiddel bij de veiligheidsbeoordeling en het opstellen van een ontwerp voor een versterking stelt het Rijk het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) beschikbaar. Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten, zie **Fout!**



Figuur 1: Overzicht BOI

Ongeldige bladwijzerverwijzing..

1.1.1 *Procesinstrumentarium*

Voor het beoordelen bestaat het procesinstrumentarium uit de Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2023 en twee bijlagen:

- Bijlage I Procedure beoordeling primaire waterkeringen
Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Ook zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.

- Bijlage II Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen
In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

De handreiking Veiligheidsontwerp is het procesinstrumentarium dat vanuit BOI beschikbaar wordt gesteld. Deze handreiking geeft ondersteuning en licht de keuzes toe die voor waterveiligheid moeten worden gemaakt. Zowel in het ontwerpproces van het definiëren van de dijkversterkingsopgave in de trajectaanpak, als voor het realiseren van dijkversterkingsmaatregelen.

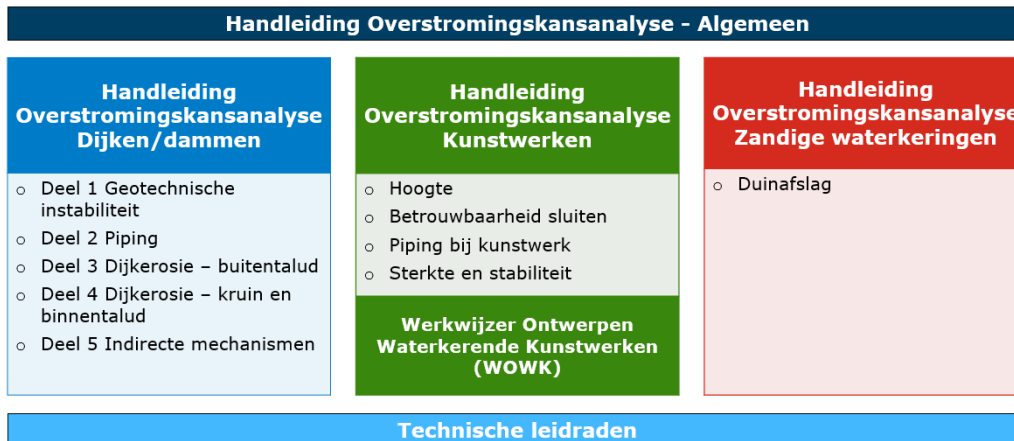
1.1.2 Basisinstrumentarium

Het basisinstrumentarium bestaat uit handleidingen, technische leidraden, software-applicaties en databases. Deze instrumenten kunnen worden gebruikt om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen.

1.1.2.1 Handleidingen

De handleidingen van het BOI ondersteunen bij het uitvoeren van de analyses om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen, zowel voor het uitvoeren van een beoordeling als een ontwerpverificatie. In de handleidingen worden alle keuzes, overwegingen en activiteiten beschreven die op basis van het verwachte gedrag van de waterkering nodig zijn om de overstromingskans te bepalen.

Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende handleidingen.



Figuur 2: Overzicht van de verschillende handleidingen

Deze handleiding Overstromingskansanalyse - Algemeen beschrijft de algemene aanpak van de bepaling van de overstromingskans van primaire waterkeringen. Daarnaast staan er handvatten in voor het opstellen van het verhaal van de kering (zie paragraaf 1.2), waarmee de waterkering in de context van de omgeving wordt bekeken. Hierbij is uitgegaan van drie leidende principes:

1. Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
2. Een geloofwaardige overstromingskans.
3. Het systeem staat centraal.

1.1.2.2 Technische leidraden

Naast handleidingen voor faalmechanismen maken ook technische leidraden onderdeel uit van het BOI. Technische leidraden bevatten informatie over onderdelen van de waterkering, mechanismen, sterkte en belastingen die samen bepalend zijn voor de overstromingskans. Ook gaan de technische leidraden in op

rekenmodellen en rekentechnieken die kunnen worden gebruikt voor het berekenen van overstromingskansen. De technische leidraden zijn te vinden op <https://tl.iplo.nl/>.

1.1.2.3 Software en databases

De modellen en applicaties die onderdeel uitmaken van het BOI, kunnen gebruikt worden om de kans van optreden van bepaalde mechanismen te berekenen. *Riskeer* is de user interface (UI) van de applicaties van het BOI. Riskeer voegt de resultaten van de verschillende faalpadanalyses samen om een inschatting te kunnen maken van de overstromingskans van het dijktraject.

1.1.3 *Werkatelier*

Deze handleiding is vooral gericht op de bepaling van de overstromingskans en *niet* op het proces. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage I en II van de Regeling en de afspraken die hierover zijn gemaakt in het draaiboek (Rijkswaterstaat, 2022a). In het draaiboek is een werkatelier gedefinieerd waarin een groep specialisten en beheerders onder leiding van een voorzitter een doelmatig en uitvoerbaar advies opstellen voor de bepaling van de overstromingskans van het dijktraject van de beheerder. Het doel hiervan is een verklaarbaar, consistent en stabiel resultaat van de beoordeling. Ook kan dit aanbevelingen geven voor het BOI.

1.2 **Verhaal van de kering**

Het verhaal van de kering draagt bij aan het begrijpen en kunnen duiden van de functie van het dijktraject in het systeem. Het geeft per dijktraject ook inzicht in de gebeurtenissen die leiden tot een overstroming. Gebeurtenissen- en foutenbomen zijn methoden die daarbij kunnen helpen.

Het verhaal bestaat uit een beschrijving van de waterkering, de ondergrond en de belastingen. Het wordt opgesteld op basis van bestaande informatie en geeft een overzicht van de ordening en interpretatie van de gegevens in het data- en informatiesysteem van de waterkering waar het een onderdeel van is. Dit verhaal bepaalt de ordening en de aard van gegevens die nodig zijn voor een analyse van de overstromingskans. Een actueel en volledig data- en informatiesysteem, waarin continu de laatste inzichten worden verwerkt, is een voorwaarde voor een plausibele uitkomst van een overstromingskansanalyse. Het verhaal van de kering is nooit af. Door nieuwe inzichten en ervaringen kan het verhaal wijzigen of worden aangescherpt.

Het verhaal van de kering bevat een aantal basiselementen:

- **Beschrijving van de waterkering:** De beschrijving van de eigenschappen van de waterkering die van belang zijn voor een overstromings- of faalkansanalyse, waarbij ook de relatie wordt gelegd met de historische achtergrond van de waterkering. Het gaat onder andere om de geometrie en de opbouw van de waterkering. Zoals bijvoorbeeld type bekledingen, waterkerende constructies en kunstwerken en niet-waterkerende objecten die de overstromings- of faalkans kunnen beïnvloeden.
- **Geologische en geohydrologische analyse:** Het analyseren van geologische tijdvakken en de geohydrologische en geotechnische eigenschappen van het ondergrondsysteem kwalitatief beschrijven.
- **Hydrologische en hydraulische analyse:** Het beschrijven van de hydraulische belasting van het dijktraject vanuit het watersysteem, waar nodig in combinatie met hydrologische gebeurtenissen, zoals extreme neerslag.

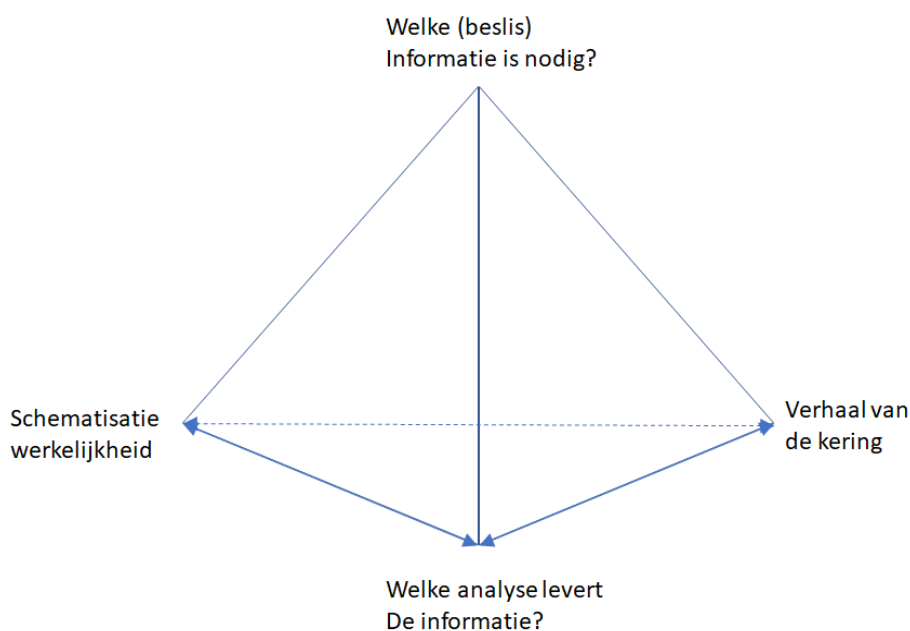
- **Kennis en ervaring van de keringbeheerder:** Inspecties van de waterkering hebben inzicht gegeven in het opgetreden van schade en vervormingen van de waterkering. Daarnaast heeft de keringbeheerder de waterkering eerder beoordeeld en mogelijk versterkt.

1.3 Doel handleiding

Deze handleiding beschrijft op hoofdlijnen hoe binnen het Nederlandse waterveiligheidsbeleid van de primaire keringen een overstromingskansanalyse wordt uitgevoerd en welke uitgangspunten daarbij een hoofdrol spelen (leidende principes). De handleiding legt de koppeling tussen het procesinstrumentarium en het basisinstrumentarium. Het doel van deze handleiding is voornamelijk om de gebruiker handvatten te bieden bij het maken van keuzes in een overstromingskansanalyse. Zonder hierbij recepten aan te bieden zodat er voldoende ruimte is voor de gebruiker om alle beschikbare kennis toe te passen.

Samenhang binnen een overstromingskansanalyse

Overstromingskansanalyses zijn de basis voor het beheersen van overstromingsrisico's. Afhankelijk van de informatievraag zal een analyse per situatie anders worden ingevuld. Afhankelijk van de beslisvraag wordt, op basis van het systeembegrip, een schematisering van de werkelijkheid gemaakt. Uiteindelijk bestaat een overstromingskansanalyse daarmee uit een samenhangend verhaal van de kering (zijnde het begrip van het systeemgedrag), bijpassende keuzes in de schematisering, en passende analyses/modellen zodanig dat die samen de informatie genereren voor het beoordelen of ontwerpen van een waterkering. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.



Figuur 4 Samenhang tussen onderdelen van overstromingskansanalyse en de doelstelling van de analyse

1.4 Leeswijzer van deze handleiding

De handleidingen zijn geschreven met het doel handvatten te bieden om in de beoordeling een geloofwaardige, herleidbare en stabiele overstromingskans te bepalen. De handleiding is geschreven voor een deskundig gebruiker die bekend is met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en modellen die van toepassing zijn voor deze handleiding. Deze handleiding bevat acht hoofdstukken.

De eerste vier hoofdstukken beschrijven de basis van overstromingskansanalyses. Hoofdstuk **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** en 3 gaan in op de leidende principes en de basisbegrippen in het opstellen van een overstromingskansanalyse. Hoofdstuk 4 beschrijft de toepassing van overstromingskansanalyses voor het beheersen van overstromingsrisico's

De laatste vier hoofdstukken geven, op basis van de samenhang die is weergegeven in bovenstaande figuur, meer praktische handvatten voor de analyse van de overstromingskans. In hoofdstuk 5 wordt het verhaal van de kering en een beschrijving van de werking van het systeem toegelicht. Daarna volgen in hoofdstuk 6 de basisprincipes van het schematiseren.

Hoofdstuk 7 beschrijft hoe relevante faalmechanismen geselecteerd kunnen worden en gaat in op de analyse van de relevante en de dominante faalmechanismen. Hoofdstuk 8 gaat in op de bepaling van de overstromingskans van een traject.

2 Leidende principes

Beheersen van overstromingsrisico's vindt plaats door continu de overstromingskans te monitoren en passende maatregelen te treffen waar nodig. Deze maatregelen kunnen betrekking hebben op beleid, beheer, vergunningverlening of versterking. De overstromingskans is geen constante waarde, maar deze wijzigt in de tijd door bijvoorbeeld klimaatverandering en veroudering. Daarnaast kan nieuwe kennis leiden tot nieuwe inzichten, wat het nodig maakt om de overstromingskans opnieuw te bepalen middels een overstromingskansanalyse. Zodoende is het monitoren van de omgevingswaarde een continu proces, waarbij de overstromingskans moet worden bepaald, en de impact van veranderingen daarop moet worden ingeschat op basis van de op dat moment meest actuele kennis.

Centraal bij een overstromingskansanalyse staat een aantal leidende principes die telkens terugkomen in de invulling van specifieke onderdelen:

1. Een geloofwaardige overstromingskans.
2. Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
3. Het systeemgedrag staat centraal.

2.1 Een geloofwaardige overstromingskans

Overstromingskansen moeten geïnterpreteerd worden als een *degree of belief*: het is gegeven de vrijwel altijd aanwezige onzekerheden de best mogelijke en geloofwaardige inschatting van de overstromingskans op basis van de beschikbare kennis en mogelijkheden. Deze wordt verkregen door alle kennis over het wel of niet optreden van een overstroming, inclusief alle onzekerheden daarover, mee te wegen in de bepaling van de kans. Een uitgebreidere beschrijving van dit zogenaamde 'subjectieve kansbegrip' is opgenomen in het Katern Veiligheidsanalyse (sectie Onzekerheden & Kansen).

Geloofwaardige overstromingskansen zijn de basis voor elk stabiel handelingsperspectief. Een belangrijk onderdeel van het bepalen van geloofwaardige overstromingskansen is het expliciet maken van alle relevante onzekerheden. Alleen op deze wijze kan goed worden onderbouwd dat de kans inderdaad een realistische inschatting van de overstromingskans is. Dit betekent niet dat altijd een geavanceerde probabilistische berekening nodig is om onzekerheden op de juiste wijze mee te nemen. De geloofwaardigheid hangt uiteindelijk sterk samen met het verhaal van de kering: wanneer (analyse van de) dominante faalpaden logisch aansluit op het verhaal van de kering en observaties tijdens eerdere hoogwaters, geeft dit uitlegbare resultaten en daarmee vertrouwen en geloofwaardigheid. Wat voor een geloofwaardige inschatting nodig is wordt bepaald door het gewenste handelingsperspectief (zie paragraaf 2.2). In onderstaand kader is een aantal voorbeelden genoemd van (on)geloofwaardigheid van overstromingskansen.

Voorbeelden van geloofwaardigheid van overstromingskansen

- Het is ongeloofwaardig als de pipingfaalkans van een dijkvak waar nooit wellen zijn waargenomen, groter is dan die van een naastgelegen dijkvak waar dit wel het geval is.

- Een verwaarloosbare pipingfaalkans is geloofwaardig voor een dijkvak met zand-op-zand.
- Een hoge faalkans voor graserosie buitentalud voor een kleidijk met mild golfklimaat is niet geloofwaardig.
- Een faalkans die binnen de ervaringshorizon ligt (bijvoorbeeld 1/10 per jaar), terwijl er nog nooit schades of vervormingen voor het betreffende faalpad zijn waargenomen tijdens hoogwatersituaties, is ongeloofwaardig.
- De sterkte van de grasmat wordt als gesloten zode geschematiseerd. Uit het verhaal van de kering blijkt dat er de afgelopen jaren veel problemen met de grasmat zijn geweest. Voor een actueel beeld van de overstromingskans is een schematiseringskeuze voor een gesloten zode en de daaruit bepaalde overstromingskans ongeloofwaardig.

In deze handleiding wordt vooral omgegaan met onzekerheden in het kader van een overstromingskansbepaling. Hierbij worden onzekerheden zoveel mogelijk expliciet gemaakt en meegenomen in de kansschatting. Vooral binnen een ontwerpsetting zijn er nog andere mogelijkheden om met onzekerheden om te gaan, bijvoorbeeld door deze te elimineren. Hiervoor wordt verder verwezen naar het Veiligheidsraamwerk van De InnovatieVersneller piping.

2.2 Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief

Een overstromingskansanalyse geeft, naast een beeld van de waterveiligheid, informatie voor activiteiten en maatregelen om de overstromingsrisico's te beheersen. De verschillende activiteiten voor het beheersen van overstromingsrisico's vragen andere informatie uit de overstromingskansanalyse om het handelingsperspectief te kunnen onderbouwen. Voor het definiëren van een beheer of versterkingsmaatregel is andere informatie nodig dan voor het bepalen van een landelijk veiligheidsbeeld. En voor het bepalen van een voorkeursalternatief is andere informatie nodig dan voor het maken van een onderhouds- of calamiteitenplan.

Het eindresultaat van een overstromingskansanalyse moet stabiel zijn in de zin dat het handelingsperspectief dat er uit volgt niet gevoelig is voor aannames en keuzes in bijvoorbeeld de schematisering. Wat dit inhoudt verschilt per situatie: voor een beoordeling geldt dat een stabiel veiligheidsoordeel (overstromingskans op trajectniveau) moet worden verkregen. Het kan wel voorkomen dat het bepalen van een maximale faalkans op basis van conservatieve aannames in de berekening al voldoende is om te onderbouwen dat de waterveiligheid in orde is: wanneer met een eenvoudige, conservatieve berekening kan worden aangetoond dat de faalkans van een kering klein is levert dat voldoende informatie op voor een beoordeling, maar de overstromingskans kan nog veel kleiner zijn. Wanneer een traject onvoldoende veilig wordt bevonden moet de overstromingskansanalyse ook inzicht geven in de versterkingsopgave voor het traject. In dat geval dient in ieder geval voor de dijkvakken die in aanmerking komen voor versterking een realistische overstromingskans te worden bepaald, en dienende achterliggende oorzaken van de (te) hoge faalkans worden geduid.

Een belangrijk hulpmiddel bij het bepalen of - en onderbouwen dat - een overstromingskansanalyse stabiel is, zijn gevoeligheidsanalyses: door te kijken naar de gevoeligheid van uitkomsten voor specifieke aannames kan worden onderbouwd dat bijvoorbeeld keuzes in schematisering geen invloed hebben op de uiteindelijke beslissing die op basis van de overstromingskansanalyse wordt genomen. Op deze

wijze kan er bijvoorbeeld voor worden gekozen om bepaalde onzekerheden wel of niet mee te nemen in een analyse (zie paragraaf 2.1). Dit resulteert in meer transparantie over aannames en de gevolgen daarvan voor de resultaten.

Voorbeelden bij een stabiel en transparant handelingsperspectief

- De overstromingskans van een dijktraject is kleiner dan de norm. Een relatief pipinggevoelig gedeelte draagt het meest bij aan de overstromingskans, op basis van een berekening met enkele voorzichtige aannames voor de in- en uittredepunten. Aanvullende analyses zijn niet nodig voor een stabiel handelingsperspectief (niet versterken). en zijn vanuit calamiteitenbeheer (inzicht in de sterkte bij hoogwater) niet gewenst).
- De overstromingskans van een dijktraject is groter dan de norm en er moet versterkt worden. Op een deel van het traject is er een veiligheidsopgave voor piping, maar deze is tot stand gekomen op basis van veilige aannames. Voor andere vakken binnen het traject is de overstromingskans ten gevolge van binnenwaartse macrostabiliteit groter dan de eis op trajectniveau – deze overstromingskans domineert de trajectfaalkans. Door inzet van een geohydrologische analyse wordt een realistische overstromingskans bepaald voor piping. Daarmee wordt onderbouwd dat ook het pipinggevoelige gedeelte van het traject moet worden versterkt. En is sprake van een realistische afstand tot de norm (wat resulteert in een realistische ontwerpogave). Op deze wijze wordt naast een stabiel trajectoordeel (gedomineerd door stabiliteit binnenwaarts) ook de veiligheidsopgave scherp in beeld gebracht.

2.3 Het systeemgedrag staat centraal

Een dijktraject staat niet op zichzelf, maar is een onderdeel van een watersysteem, waarbinnen de onderdelen elkaar beïnvloeden. De overstromingskansnormen zijn bepaald op dijktrajectniveau, en ook op vakniveau is de kering een onderdeel van een (water)systeem. Het verhaal van de kering heeft als doel dit systeem te begrijpen door het te beschrijven en is daarom een eerste belangrijke stap in de overstromingskansanalyse. Het gaat er daarbij niet om dat alle onderdelen van het systeem tot het fijnste detail uitgewerkt worden, maar juist dat de focus ligt op die onderdelen die voor een dijkvak de faalkans domineren (de zogenaamde dominante faalpaden), en op systeemniveau de trajectfaalkans het meest beïnvloeden.

Het resultaat van de overstromingskansanalyse moet passen bij het verhaal van de kering, dat wil zeggen dat de overstromingskans kan worden uitgelegd op basis van het narratief van hydraulische belastingen, van de ondergrond en van de kering (zie ook hoofdstuk 4). Het resultaat van de overstromingskansanalyse moet, met andere woorden, uitlegbaar zijn vanuit de kennis van het systeem.

Voorbeelden van het systeem centraal stellen

- Bij een dijktraject langs de kust wordt in de schematisering rekening gehouden met het getijdenzand in de ondergrond waardoor een voor het systeem realistische faalkans voor piping wordt bepaald.

- Bij een dijktraject in een stormgedomineerd watersysteem wordt gekozen voor een locatiespecifieke modellering van de freatische lijn bij (kortdurende) belasting bij het bepalen van de veiligheid voor binnenwaartse macro-instabiliteit.
- Bij een dijktraject in het bovenrivierengebied wordt windworp van aanwezige bomen en erosie van het binnentalud niet in samenhang beschouwd omdat de gecombineerde kans op hoogwater en hoge windsnelheden zeer klein is. Overloop zonder windworp is hier dominant.

3 Basisbegrippen

Bijlage I (Procedure beoordeling) en Bijlage II bij de Regeling geven een overzicht van begrippen die bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen een rol spelen (tevens opgenomen in Bijlage I bij deze handleiding). Dit hoofdstuk werkt enkele voor deze handleiding die gerelateerd zijn aan overstromingskansanalyses kort uit.

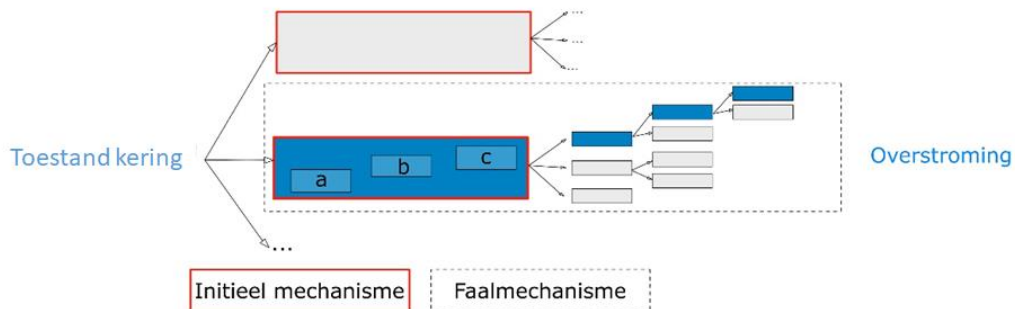
In paragraaf 3.1 worden de basisbegrippen faalmechanismen, faalpaden, mechanismen en gebeurtenissen toegelicht, in de paragraaf Directe en indirecte mechanismen het onderscheid tussen directe faalmechanismen en indirecte mechanismen, in paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** het verschil tussen generieke en specifieke faalmechanismen en in Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden de wijze van beschouwen door middel van gebeurtenissen- of foutenbomen.

3.1 Faalmechanismen, faalpaden, mechanismen en gebeurtenissen

De overstromings- of faalkans van een dijktraject wordt op basis van de analyse van faalmechanismen bepaald. Een faalmechanisme is de combinatie van alle faalpaden met een overeenkomend initieel mechanisme. Een faalpad beschrijft een lineaire opeenvolging van gebeurtenissen (ook wel knopen genoemd) of mechanismen die leidt tot een overstroming. Alle gebeurtenissen of mechanismen in het faalpad moeten optreden om een overstroming te veroorzaken. Onder een gebeurtenis wordt het proces van verandering van de ene toestand naar een nieuwe, daaropvolgende toestand verstaan. Mechanismen beschrijven de fysica van de verandering en kunnen bestaan uit één of meerdere gebeurtenissen.

Binnen een faalpad wordt onderscheid gemaakt tussen initieële mechanismen en vervolgmechanismen. Het initiële mechanisme is het eerste mechanisme in het faalpad. Het meest eenvoudige faalpad bestaat uit twee gebeurtenissen: gebeurtenis 1 - het initiële mechanisme, en gebeurtenis 2 – vervolgmechanisme tot falen.

In Figuur 5 is de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initieële) mechanismen schematisch weergegeven. Alle faalpaden binnen het gestippelde kader vormen het faalmechanisme, waarbij het initiële mechanisme bestaat uit drie gebeurtenissen 'a-b-c'. Na het initiële mechanisme zijn er verschillende faalpaden mogelijk die tot een overstroming leiden. Een voorbeeld van een faalpad is de in 'blauw' aangegeven reeks gebeurtenissen. In paragraaf 3.3 wordt hier verder op ingegaan.



Figuur 5 Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen.

Overstromingskansanalyses worden in veruit de meeste gevallen uitgevoerd uit voor situaties met extreme hydraulische belastingen die, bij falen van de kering, leiden tot een overstroming. In bijzondere gevallen kunnen dit ook bijvoorbeeld aardbevingen of leidingbreuk zijn. Het optreden van een extreme hydraulische belasting is geen verandering van de toestand van de kering en daarmee geen aparte knoop. (De kans op) het optreden van de belasting is onderdeel van het initiële mechanisme. Het startpunt van een faalpadanalyse is dus de kering in een bepaalde toestand. Wanneer deze toestand onzeker is kan dit worden meegenomen door verschillende toestanden mee te nemen, bijvoorbeeld als gevolg van eerder opgetreden indirecte mechanismen (zie ook paragraaf 3.2).

Voor de bepaling van de overstromings- of faalkans zijn de initiële mechanismen gebundeld in Tabel 1.

Tabel 1 Lijst van initiële mechanismen (Tabel 5.1 van Bijlage II (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Regeling).

Aanzet tot falen	Initiële mechanismen
De waterkering faalt door golfaanval op het buitentalud	<ul style="list-style-type: none"> Falen asfaltbekleding door golfklappen Falen asfaltbekledingen door wateroverdruk Erosie van grasbekleding, met inbegrip van overgangsconstructies Afschuiving van grasbekleding Instabiliteit steenzetting
De waterkering faalt door water dat over de waterkering stroomt	<ul style="list-style-type: none"> Afschuiven grasbekleding Erosie van kruin en binnentalud, met inbegrip van overgangsconstructies Binnenwaartse macro-instabiliteit, met inbegrip van afschuiving binnenbekleding bij overslag
De waterkering faalt door hoge waterspanningen in en onder de waterkering	<ul style="list-style-type: none"> Piping Binnenwaartse macro-instabiliteit Micro-instabiliteit, met inbegrip van opdrukken binnenbekleding
Het waterkerende kunstwerk faalt	<ul style="list-style-type: none"> Hoogte kunstwerk Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk Piping bij kunstwerk Sterkte en stabiliteit puntconstructies
De zandige waterkering (duin) faalt	<ul style="list-style-type: none"> Duinafslag

3.2 Directe en indirecte mechanismen

In de Regeling wordt onderscheid gemaakt tussen directe en indirecte mechanismen. Directe mechanismen zijn (faal)mechanismen die kunnen leiden tot een overstroming, waarbij het initiële mechanisme wordt veroorzaakt door een extreme hydraulische belasting. Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen, maar eerder tot een gewijzigde staat van de kering en zijn daarmee in feite scenario's voor de staat van de kering aan het begin van een storm of hoogwater.

Wanneer de indirecte mechanismen de overstromings- of faalkans beïnvloeden kunnen deze door middel van scenario's bij directe faalmechanismen in rekening gebracht worden. Een scenario beschrijft de geometrie of staat van de waterkering die ontstaat na het optreden van een indirect mechanisme. De kans van een scenario wordt bepaald door de kans van optreden van het indirecte mechanisme, de kans dat schade wordt waargenomen en de kans dat deze op tijd wordt hersteld.

Tabel 2 bevat voorbeelden van indirecte mechanismen. De keringbeheerder kan deze lijst aanvullen met andere voor het dijktraject relevante indirecte mechanismen.

Tabel 2 Lijst indirecte mechanismen (Tabel 5.2 van Bijlage II (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Regeling.

Type	Indirect mechanisme
Niet-waterkerende objecten	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanismen veroorzaakt door: <ul style="list-style-type: none"> ○ bebouwing ○ begroeiing ○ kabels en leidingen ○ windturbines
Voorland en havendammen	<ul style="list-style-type: none"> • Afschuiving voorland • Zettingsvloeiing • Golfafslag van voorland • Bezwijken havendammen
Overig	<ul style="list-style-type: none"> • Afschuiving buitentalud • Graverij

3.3 Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden

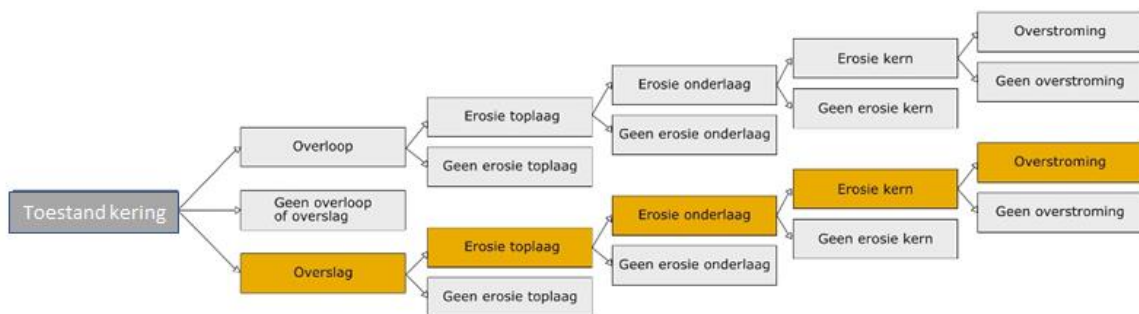
Om te komen tot een geloofwaardige inschatting van de overstromingskans op trajectniveau, is het behulpzaam om de faalpaden en faalmechanismen te structureren. Gebeurtenissenbomen en foutenbomen zijn methoden die daarbij kunnen helpen. Elk van deze methoden heeft zijn voor- en nadelen.

3.3.1 Gebeurtenissenbomen

De faalpaden die behoren bij een faalmechanisme vormen samen een gebeurtenissenboom. Een gebeurtenissenboom, zie Figuur 6 voor een uitgewerkt voorbeeld, bestaat uit een aantal vaste componenten:

1. De boom start met een initieërende mechanisme, zie paragraaf 3.1.
2. De boom eindigt met mogelijke uitkomsten. Voor overstromingskansen is alleen de ongewenste uitkomst 'overstroming' relevant.

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 aantal mogelijke uitkomsten (takken). Vaak is dit binair: het wel of niet optreden van de gebeurtenis. Maar een knoop kan ook meerdere takken hebben, bijvoorbeeld: verschillende gradaties van een gebeurtenis (zoals een afschuiving die de kruin doorsnijdt, een afschuiving van het binnentalud of geen afschuiving).
5. Gebeurtenissen op hetzelfde niveau in een boom sluiten elkaar per definitie uit, en dekken alle mogelijkheden af (zie ook het kader voor aandachtspunten bij het definiëren van gebeurtenissen). De som van de kans op gebeurtenissen op hetzelfde niveau is daarmee per definitie 1 (Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive).
6. De kans op de initiërende gebeurtenis (initiërend mechanisme) is een kans met een tijdseenheid (bijvoorbeeld een randvoorwaardencombinatie die 1 keer per 1000 jaar voorkomt). De kansen op de knopen zijn conditioneel aan de voorgaande knopen.



Figuur 6 Voorbeeld van een gebeurtenissenboom van een overstroming na falen van het kruin en/of binnentalud door overloop/overslag

Aandachtspunten bij het definiëren van gebeurtenissen

- Gebeurtenissen moeten onderscheidend zijn. Niet drie keer min of meer dezelfde gebeurtenis achter elkaar. Dan leidt tot onrealistisch lage faalkansen.
- Na een gebeurtenis kan een nieuwe fysieke toestand van de waterkering ontstaan (waarbij de kans aangeeft of deze nieuwe toestand wel of niet optreedt):
 - a) Het is van belang om te zorgen dat een knoop niet bestaat uit een combinatie van fysieke processen die (gedeeltelijk) onafhankelijk van elkaar kunnen optreden en leiden tot verschillende toestanden van de waterkering.
 - b) Mechanismen die samen zorgen voor een nieuwe toestand (en die dus afhankelijk zijn) moeten bij elkaar in een knoop zitten.
 - c) Fysieke processen die achter elkaar optreden en waarvan het optreden wordt bepaald door dezelfde kenmerken van de kering worden in eerste instantie bij elkaar gevoegd in een knoop. Deze knoop kan in een later stadium worden uitgewerkt waarbij op dat moment rekening moet worden gehouden met correlaties, de duur en volgordelijkheid van de processen. Een voorbeeld is een pipinganalyse waarbij in een vervolganalyse tijdsafhankelijke pipegroei wordt meegenomen. In eerste instantie worden

opbarsten, heave en piping gezamenlijk beschouwd als initieel mechanisme, maar in de vervolganalyse moet ook het moment van optreden van deze mechanismen worden bepaald, daarom worden ze afzonderlijk beschouwd.

- Vaak is er sprake van onzekerheid in de bodemopbouw, maar er kunnen ook andere onzekerheden een rol spelen. Eén van de manieren om met deze discrete onzekerheid om te gaan is het definiëren van onafhankelijke scenario's. Wanneer het optreden van een fysisch proces afhankelijk is van scenario's (een scenario treedt dus wel of niet op maar nooit een beetje) worden deze als aparte knoop geschematiseerd zodat ze probabilistisch kunnen worden meegenomen, door het toekennen van een kans aan de verschillende scenario's.
- Fysische processen die achter elkaar optreden en waar voor de losse processen niet meer informatie is dan voor het totaal, worden bij elkaar gevoegd. Concreet betekent dit dat processen niet in meer detail worden uitgewerkt dan de stand van de kennis toelaat.

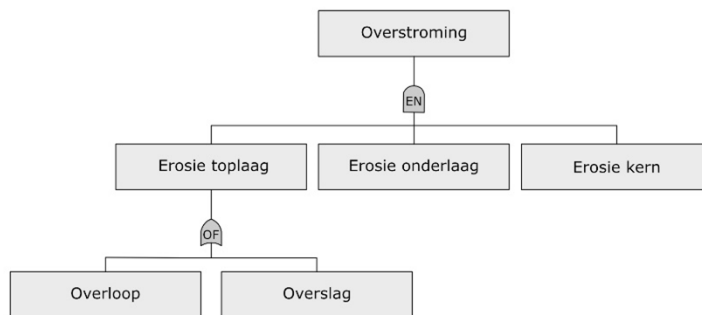
3.3.2 *Foutenbomen*

Een andere manier om het verhaal van de kering te structureren in gebeurtenissen die tot overstrooming leiden is het gebruik van foutenbomen. In Figuur 7 is een foutenboom weergegeven voor hetzelfde faalmechanisme als in Figuur 6.

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 ("waar"), of de gebeurtenis treedt niet op ("niet waar"). Gebeurtenissen zijn met elkaar verbonden in de boom door een "poort". Er zijn twee soorten poorten: een "OF-poort" en een "EN-poort". Dankzij deze verbinding kunnen gebeurtenissen gecombineerd worden tot een gezamenlijke gebeurtenis die wederom dezelfde twee mogelijke uitkomsten heeft ("waar" of "niet waar").

In geval van een "OF-poort" is de gezamenlijke gebeurtenis waar als tenminste één van de onderliggende gebeurtenissen waar is. In geval van een "EN-poort" is de gezamenlijke gebeurtenis alleen waar als alle onderliggende gebeurtenissen waar zijn.

De foutenboom is doorgaans van boven naar beneden georiënteerd. Bovenin staat de "topgebeurtenis" waarvan de kans op optreden bepaald moet worden. Voor overstroomingskansen zijn we geïnteresseerd in de 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. Een keten van gebeurtenissen leidend tot de topgebeurtenis, vormt het faalpad.



Figuur 7 Foutenboom voor een overstroming door erosie van kruin/binnentalud door overloop/overslag

3.3.3 Gebeurtenissenboom versus foutenboom

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 ingeschat 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 worden toegepast zal dat ook moeten resulteren in faalkansen en overstromingskans die gelijk zijn. De keuze voor een methode zal daarom vooral gebaseerd worden op wat het meeste praktisch toepasbaar is.

De gebeurtenissenboom sluit intuïtief beter aan bij het werken vanuit het gedrag van de kering. De gebeurtenissenboom wordt namelijk opgesteld vanuit 'forward logic', dat wil zeggen vanaf de initiërende gebeurtenis(sen) stapsgewijs en volgordelijkheid in de tijd naar het moment van overstromen. De beschrijving van een faalmechanisme is gebaseerd op een gebeurtenissenboom.

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.

Het voordeel van een foutenboom is dat deze in het algemeen compacter is (zie ook Figuren 6 en 7). Dit heeft twee redenen:

1. Bij een foutenboom is het geen voorwaarde dat gebeurtenissen "mutually exclusive" zijn (volledig onafhankelijk). De kans op een extreme belasting kan daarom meegenomen worden in de knopen zelf. Bij gebeurtenissenbomen moet de belasting gediscretiseerd worden in de boom, waarna de verschillende faalpaden conditioneel zijn op een belastingniveau. Daardoor wordt de boom snel erg groot, vooral bij complexe belastingmodellen.
2. Bij een foutenboom is het geen voorwaarde dat de gebeurtenissen "collectively exhaustive" zijn (alle mogelijkheden afdekken). De kansen hoeven dus ook niet op te tellen tot 1, waarmee automatisch ook niet alle gebeurtenissen te hoeven worden beschouwd.

Foutenbomen liggen vaak ook aan de basis van software waarin gestructureerd alle bijdragen van mogelijke oorzaken aan een faalkans worden opgeteld. Hydra-Ring, het rekenhart van Riskeer, rekent volgens het principe van een foutenboom.

In het algemeen kan worden gesteld dat gebeurtenissenbomen duidelijke voordelen hebben door de betere aansluiting op menselijke intuïtie, terwijl foutenbomen geschikter zijn als basis voor een rekenmodel. Gebeurtenissenbomen staan aan de basis van het beoordelings- en ontwerpproces. Daarbij moet worden opgemerkt dat het ten allen tijde gaat om een andere vorm van notatie van hetzelfde probleem. Daarom kan een gebeurtenissenboom ook worden omgeschreven naar een foutenboom, bijvoorbeeld wanneer dit rekentechnisch handiger is.

4 Overstromingskansanalyse als basis voor het beheersen van het overstromingsrisico

4.1 **Overstromingskansanalyse als onderdeel van de actieve zorgplicht van de beheerder**

Het beheersen van overstromingsrisico's vindt plaats door continu de overstromingskans te monitoren. Door monitoring wordt bewaakt dat de primaire waterkeringen voldoen aan de omgevingswaarde. Deze monitoring wordt uitgevoerd volgens bij ministeriële regeling gestelde regels en bestaat uit het bepalen van de overstromings- of faalkans op basis van metingen, berekeningen en modellen. De metingen, berekeningen en modellen die worden ingezet om de overstromings- of faalkans te bepalen zijn voor elk dijktraject anders. Dit is afhankelijk van de lokale situatie (belasting, type keringen en de samenstelling en opbouw van de ondergrond) die bepaalt welke faalmechanismen bijdragen aan de overstromingskans en welke modellen toepasbaar zijn.

De overstromings- of faalkans is geen constante waarde, maar verandert in de tijd, bijvoorbeeld door klimaatverandering, bodemdaling en veroudering. Ook beleidswijzigingen, zoals de afvoerverdeling of het al dan niet treffen van noodmaatregelen in Duitsland kunnen de overstromings- of faalkans beïnvloeden. Daarnaast leidt de ontwikkeling van nieuwe kennis over het gedrag van de kering tot andere inzichten in de overstromings- of faalkans. Tot slot kunnen ook veranderingen in het watersysteem of de kering zelf zorgen voor een aanpassing in de overstromings- of faalkans.

Het monitoren van de omgevingswaarde is daarmee een continu proces dat zowel bestaat uit het rekenkundig bepalen van de overstromings- of faalkans (de overstromingskansanalyse) als het meten van de impact van veranderingen (in zowel het fysieke domein als in het kennisdomein) op de berekende overstromings- of faalkans en indien nodig aanpassen van de rekenkundig bepaalde kans.

Wanneer niet aan de overstromingskansen wordt voldaan moeten passende maatregelen worden getroffen. Deze maatregelen kunnen betrekking hebben op beleid, beheer, vergunningverlening of versterking en deze worden onderbouwd op basis van de analyse van overstromingskansen. In onderstaande paragrafen is de context voor een aantal situaties nader uitgewerkt.

4.1.1 *Monitoring als onderdeel van de algemene zorgplicht*

Op basis van de Omgevingswet is het monitoren van de omgevingswaarde (overstromingskans) van primaire waterkeringen een continu proces wat onder andere bestaat uit het tenminste eenmaal per twaalf jaar uitvoeren van een beoordeling van de overstromingskans en het regelmatig bepalen van de impact van veranderingen op de bepaalde overstromingskans. Het bepalen van de impact van veranderingen is onderdeel van de taken in het kader van de algemene zorgplicht, die de beheerder heeft onder de Omgevingswet. Ook het uitvoeren van noodzakelijk beheer en onderhoud en andere activiteiten, zoals calamiteitenzorg, zijn onderdeel van deze algemene zorgplicht. Hiervoor is het van belang dat de staat van de kering zoals geschematiseerd in de beoordeling aansluit bij de dagelijkse beheerpraktijk.

De beheerders stellen jaarlijks een veiligheidsrapportage primaire waterkeringen op met daarin een actueel en integraal veiligheidsbeeld van de waterkeringen in het

beheergebied van de beheerder. Het veiligheidsbeeld is onder anderen gebaseerd op de resultaten van de uitgevoerde beoordeling(en). Daarbij is dus van belang dat het verhaal van de kering (zie Hoofdstuk 5) een continu en up-to-date beeld geeft van de staat en kenmerken van de kering.

4.1.2 *Aanleidingen voor een (gedeeltelijke) herbeoordeling*

Het veiligheidsbeeld in de veiligheidsrapportage kan aanleiding geven om een dijktraject (deels) opnieuw te beoordelen.

Veranderingen op en rondom de waterkering, zoals bijvoorbeeld schades aan de bekleding of onverwacht (on)gunstige uitkomsten van dijkmonitoring, kunnen aanleiding zijn om de analyse van een aantal faalmechanismen opnieuw uit te voeren om te bepalen welke invloed deze hebben op de overstromingskans.

Ook nieuwe kennis van belastingen en sterkte kan aanleiding geven voor een herijking van de beoordeling. Om de beheerder te ondersteunen bij het bepalen of nieuwe kennis aanleiding is voor een herbeoordeling wordt als onderdeel van de releases van het Basisinstrumentarium een inschatting van de consequenties voor beoordelingsresultaten gegeven.

De invloed van veranderingen in de staat van de waterkering, en de invloed van nieuwe kennis bepalen de geldigheid van de beoordeling.

Plan van aanpak van de beoordeling van een dijktraject

De monitoring van de overstromingskans van een waterkering is een continu proces waarbij gebruik wordt gemaakt van alle beschikbare informatie. In het plan van aanpak van een overstromingskansanalyse wordt aangegeven hoe deze gegevens worden gebruikt. Vervolgens moet op basis van de beslisvraag worden beschouwd:

1. Op welke punten aanvullende informatie leidt tot een scherper beeld;
2. Op welke punten de situatie is gewijzigd ten opzichte van de eerdere beoordeling/analyse.

Een belangrijk startpunt van een eerdere beoordeling is de schematisering en dijkvakindeling (met onderliggende informatie) die daarbij is gehanteerd. Op basis van het verhaal van de kering, de beslisvraag en nieuwe ontwikkeling (bijvoorbeeld nieuwe kennis) moet voor de relevante faalmechanismen per dijkvak worden gemotiveerd of de bijdrage aan de overstromingskans moet worden verscherpt en of nieuwe informatie hiervoor nodig is.

4.1.3 *Overstromingskansanalyse bij ontwerp*

In de aanloop naar een dijkversterking wordt vanuit het veiligheidsbeeld bepaald waar in het dijktraject maatregelen nodig zijn, welke maatregelen dat zijn, en worden deze uitgewerkt en gerealiseerd. Ook bij ontwerp(verificatie) is dus een overstromingskansanalyse noodzakelijk, naast een afweging van andere aspecten die bij ontwerp een rol spelen (bijv. duurzaamheid en ruimtelijke kwaliteit). Overstromingskansanalyse bij ontwerp kijkt meer vooruit dan bij een beoordeling.

De wijze waarop dit wordt ingevuld(ook voor andere aspecten), en waarop de keuzes worden gebaseerd en onderbouwd, zijn nader beschreven in de handleidinghandleiding Veiligheidsontwerp. Daarbij wordt opgemerkt dat bij

ontwerpen doorgaans anders wordt omgegaan met overstromingskansanalyses waarbij er robuuster wordt omgegaan met onzekerheden.

5 Systeembegrip door het verhaal van de kering

De kern van een overstromingskansanalyse is dat een goed begrip van het systeem leidt tot een geloofwaardige inschatting van de overstromingskans, die het handelingsperspectief ondersteunt. Een belangrijk middel daarbij is het 'verhaal van de kering'. Het verhaal van de kering is een systematische beschrijving van de kenmerken van de kering en de directe omgeving. De kenmerken betreffen belasting- en sterkte eigenschappen en bijgaande Historische informatie kan hierbij worden gebruikt als daarmee het gedrag van de kering beter kan worden beschreven. De volgende onderdelen zijn doorgaans opgenomen in het verhaal van de kering:

- Beschrijving van de waterkering (geometrie, opbouw, ondergrond, etc.);
- Beschrijving van het systeem waarin deze functioneert (watersysteem, achterliggend boezemsysteem etc);
- Beschrijving van de omgeving;
- Geologische en geohydrologische analyse;
- Hydrologische en hydraulische analyse;
- Kennis en ervaring van de beheerder.

Het verhaal van de kering is input voor zowel het bepalen en analyseren van relevante faalmechanismen en dominante faalpaden, als voor de duiding en uitleg bij resultaten. Het is ook een vertaling van de situatie in het veld en de (modelmatige) analyses die voor beoordeling of ontwerp van waterkeringen zijn uitgevoerd. Hierdoor is het verhaal van de kering zowel de basis als begin en eindpunt van de monitoring van de veiligheid van primaire waterkeringen (zie ook paragraaf 4.1.1).

Door nieuwe inzichten en ervaringen kan het verhaal wijzigen of worden aangescherpt. Een goed data-en informatiesysteem, waarin continu de laatste inzichten worden verwerkt, is daarbij zeer belangrijk. In dit hoofdstuk beschrijven we een aantal belangrijke aandachtspunten bij het beschrijven van de kering in zijn context (paragraaf 5.1), en hoe dit systeembegrip de basis voor een overstromingskansanalyse vormt (paragraaf 5.2).

Voor het opstellen van het verhaal van de kering en het uitvoeren van een overstromingskansanalyse is goede en lokale kennis van de waterkering een vereiste. Dit draagt bij aan het beter begrijpen van het waterkeringssysteem en de 'finesses' daarvan. Dat begrip is essentieel bij het komen tot een geloofwaardige analyse en uitlegbaar resultaat wat bijdraagt aan een gedragen handelingsperspectief. Daarbij is niet 1 blauwdruk van een verhaal van de kering te geven, soms kan het verhaal over kilometers lengte hetzelfde zijn (denk bijv. aan keringen rond inpolderingen), waar op sommige plaatsen de historische ontwikkeling heeft geresulteerd in een zeer divers en heteroog beeld (bijv. op sommige plaatsen in het rivierengebied).

5.1 De basis van het verhaal van de kering

Een goed begrip van het systeem is noodzakelijk voor het uitvoeren van een goede overstromingskansanalyse. Het (water)systeem is in Bijlage I bij de Regeling omschreven als het samenhangende geheel van één of meer oppervlaktewaterlichamen en grondwaterlichamen, met bijbehorende bergingsgebieden, waterkeringen en ondersteunende kunstwerken.

De beschrijving van het (water-) en keringensysteem bestaat daarmee uit in ieder geval de volgende vier belangrijkste onderdelen:

1. Beschrijving van de waterkering (geometrie, opbouw, ondergrond, etc.).
2. Geologische en geohydrologische analyse.
3. Hydrologische en hydraulische analyse.
4. Kennis en ervaring van de beheerder.

In navolgende paragrafen zijn deze onderdelen kort toegelicht en volgen enkele aandachtspunten voor het opstellen van het verhaal. Voor mechanisme-specifieke aspecten wordt verwezen naar de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme en de Technische leidraden.

5.1.1 *Beschrijving van de waterkering (dijk/duin/kunstwerk)*

De huidige primaire waterkeringen zijn vaak in de loop van eeuwen ontstaan. De geschiedenis van de waterkering bepaalt de mogelijke kenmerken die in een traject aanwezig kunnen zijn. De kenmerken van de kering die van belang zijn voor de overstromingskans volgen uit de faalpaden die per faalmechanisme zijn beschreven in de handleidingen per faalmechanisme.

In veel gevallen zal op basis van eerdere analyses voor beoordeling en ontwerp al een beschrijving voorhanden van de waterkering. Wanneer geen versterkingswerkzaamheden zijn uitgevoerd, kunnen de analyses als vertrekpunt dienen en vervolgens worden geactualiseerd. Daarbij is het van belang autonome ontwikkelingen zoals kruindaling, gebiedsontwikkeling (nieuwe niet waterkerende objecten, NWO's), patronen en ervaringen over het functioneren van de waterkering uit inspecties, uitgevoerd onderhoud en ontwikkelingen van het riviersysteem (bijvoorbeeld in de voorlandgeometrie) in kaart te brengen en te verwerken als onderdeel van de beschrijving van de waterkering. Voor duinen geldt dit bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van het duinprofiel.

De beschrijving van de waterkering in het geval van een recente dijkversterking zal met name worden gebaseerd op as-built of revisie-aanlegtekeningen, maar tegelijkertijd moet goed worden geverifieerd of de kering zich daadwerkelijk zo ontwikkeld heeft als voorzien. Aandachtspunten daarbij zijn bijvoorbeeld ontwikkeling van de grasbekleding en vervormingen tijdens en na de uitvoering. Op soortgelijke wijze kan de ontwikkeling langer geleden ook relevant zijn: bijvoorbeeld de opbouw (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een zandcunet), en andere historisch relevante ontwikkelingen.

Specifiek voor kunstwerken geldt dat het van belang is ook inzicht te verkrijgen in het sluitprotocol, het dagelijks beheer en de bediening, alsmede eventuele veranderingen daarin in het verleden.

5.1.2 *Beschrijving van geologie en geohydrologie*

De ondergrond bestaat uit een opeenstapeling van lagen met verschillende eigenschappen. De mogelijke ondergronden die onder een dijktraject aanwezig zijn, kunnen worden beschreven vanuit de geologische geschiedenis. Een dergelijke beschrijving leidt tot mogelijke scenario's van de bodemopbouw. Het SOS (Stochastische Ondergrond Schematisering) is hiervan een voorbeeld.

De algemene geologische beschrijving kan worden verfijnd met lokale informatie (sonderingen, boringen, geofysisch onderzoek, peilbuisgegevens, ...) over de bodemopbouw. Lokale informatie kan worden gebruikt om ondergrondscenario's uit

te sluiten of scenariokansen aan te passen. Ook historische waarnemingen (bijvoorbeeld zandmeevoerende wellen) kunnen hiervoor worden gebruikt.

In veel gevallen zijn in het kader van een eerdere beoordeling of het meest recente dijkversterkingsontwerp al beschrijvingen en analyses van lokale geologie, genese en geohydrologie voorhanden. Deze kunnen vaak verklarend zijn voor waargenomen gedrag in de praktijk (vervormingen, wel/geen wellen) en voor het voorspellen van de relevantie van faalmechanismen.

Naast het aanscherpen van data en informatie moet ook worden gekeken naar nieuwe inzichten, bijvoorbeeld ten aanzien van anisotropie van zandlagen of modellering van tijdsafhankelijke processen. Dergelijke nieuwe inzichten kunnen aanleiding zijn de beschrijving van geologie en geohydrologie uit te breiden.

Nadere uitwerking van faalmechanismespecifieke aandachtspunten bij de beschrijving van de geo(hydro)logie is te vinden in de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme.

5.1.3 *Beschrijving van het hydrologische en hydraulische systeem*

De hydraulische belastingen worden, afhankelijk van het gebied, bepaald door de windsnelheid en windrichting, rivierafvoeren, meerpeilen en/of de sluiting van stormvloedkeringen. Met behulp van het Basisinstrumentarium kunnen voor alle locaties in de hydraulische randvoorwaarden-database de hydraulische belastingen worden bepaald. Dit Basisinstrumentarium bouwt voort op specifieke aannames ten aanzien van bijvoorbeeld systeemwerking, bodemligging en de bijdrage/statistiek van de verschillende factoren die de hydraulische belastingen bepalen (bijv. rivierafvoer, stormverloop, windkracht). Deze zijn beschreven in Hoofdstuk 4 van Bijlage II.

Echter, voor het verhaal van de kering kunnen bijvoorbeeld systeemmaatregelen op langere termijn zorgen voor veranderende hydraulica. Daarbij valt te denken aan bijvoorbeeld rivierverruiming, veranderende bodemligging of aanpassing van (het sluitregime van) stormvloedkeringen. Het is dus belangrijk om rekening houden met het toepassingsgebied van de hydraulische belastingen die met het Basisinstrumentarium worden bepaald.. Met name bij een ontwerp is het van belang deze systeemmaatregelen goed in beeld te hebben en de effecten daarvan op het ontwerp te kunnen duiden. Dit kan verder gaan dan de in het Basisinstrumentarium aangereikte middelen.

In de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme wordt, vanuit de faalpaden, aangegeven welke eigenschappen van hydraulische belastingen relevant zijn voor de bepaling van overstromingskansen. Op basis hiervan kan worden onderbouwd welke hydraulische databases en instrumenten uit het BOI valide zijn en wanneer systeemmaatregelen mogelijk significant effect hebben op faalmechanismen.

Het verhaal van de hydraulica bestaat daarmee uit verschillende lagen die leiden tot een antwoord op de vraag: hoe leidt een extreme situatie tot belasting op de kering?

1. De hydraulische en hydrologische belastingen (bijvoorbeeld neerslag) op systeemniveau en hoe die de beschouwde locatie beïnvloeden. De basis hiervoor zijn de hydraulische databases als onderdeel van het basisinstrumentarium. Hierbij is inzicht in (het effect van) systeemmaatregelen van belang.

2. Hoe onder de lokale omstandigheden de belasting in het systeem (bijvoorbeeld hoogwaterstand op de rivieras) zich vertaalt naar een (externe) belasting op de kering, veelal gedefinieerd bij de buitenteen van de kering. Daarbij zijn onder meer voorland, voorliggende dammen, en eventuele vegetatie dijklichaam van belang.
3. Hoe de externe belastingen bij de teen van de kering en de eigenschappen van de kering op elkaar inwerken, en leiden tot interne belastingen of belastingeffecten. Denk aan zaken als golf(klap)drukken, overslagdebieten, waterspanningen, etc.

Opgemerkt wordt dat in analyses van overstromingskansen vaak uitgegaan wordt van twee soorten grenstoestandsfuncties: cumulatieve grenstoestandsfuncties waarbij de duur van de belasting van belang is (bijvoorbeeld falen van de grasbekleding door golfklap), en grenstoestandsfuncties waar een kritieke waarde al dan niet met enige vertraging wordt overschreden (bijvoorbeeld macrostabiliteit).

5.1.4 *Kennis en ervaring van de beheerder*

Vanuit de beheerpraktijk is veel kwalitatieve (ervaring) maar ook kwantitatieve (bijvoorbeeld inspectieresultaten) kennis beschikbaar over waterkeringen. Juist deze beheerderservaring is een essentieel onderdeel van het verhaal van de kering. Deze ervaringen kunnen bijvoorbeeld onzekerheden of het functioneren van de keringen wegnemen of kunnen gebruikt worden om de resultaten van een overstromingskansanalyse nader te duiden.

We onderscheiden bij dit onderdeel kennis en ervaring die voortkomen uit observaties en gegevens tijdens hoogwatersituaties en onder dagelijkse omstandigheden.

Tijdens hoogwatersituaties wordt veel inzicht opgedaan in het gedrag van de kering tijdens een specifieke hoogwatersituatie, bijvoorbeeld in de vorm van opgetreden schades tijdens hoogwater (bijvoorbeeld schade aan de bekleding of zandmeevoerende wellen). Echter, juist ook het niet optreden van schade kan informatie geven over het functioneren van de kering: wanneer onder bepaalde omstandigheden bijvoorbeeld geen kwelwater wordt waargenomen kan dit leiden tot verbeterd inzicht in het faalmechanisme piping, en wanneer bij een overgangsconstructie de grasbekleding niet beschadigd is tijdens een storm kan dit leiden tot een verbeterde schematisering van deze overgangen.

Gedurende een beoordelingsperiode van twaalf jaar wordt doorgaans de gehele kering een of meer keer per jaar geïnspecteerd. Dit levert inzicht op in bijvoorbeeld de lange termijn ontwikkeling van de bekleding en eventuele schades die incidenteel of vaker optreden. Het beeld van de beheerder van de staat van de kering, die kan fluctueren in de tijd, is een belangrijk onderdeel van het verhaal van de kering: dat er variatie optreedt in bijvoorbeeld de staat van de grasbekleding moet worden meegenomen in het verhaal van de kering en is onderdeel van de overstromingskansanalyse, indien dit de faalkans significant kan beïnvloeden.

5.2 **Van het verhaal naar overstromingskans**

In de voorgaande paragrafen zijn vier onderdelen van de beschrijving van het (water)systeem beschreven. Uiteindelijk moeten deze gegevens zodanig worden samengebracht, dat helder kan worden bepaald welke informatie relevant is. Vragen die hierbij helpen zijn bijvoorbeeld:

- op welke faalmechanismen hebben deze conclusies invloed
- hoe kan op basis hiervan een overstromingskansanalyse worden uitgevoerd.

Concreet betekent dit dat voor elk van de faalmechanismen die zijn opgenomen in Bijlage II, op kwalitatieve wijze kan worden aangegeven hoe deze voor het dijktraject kunnen resulteren in een overstroming.

Om te komen tot een aanpak die leidt tot een passende overstromingskansanalyse zijn in de handleidingen per faalmechanisme daarom de volgende punten opgenomen:

1. Per (generiek) faalmechanisme is een beschrijving gegeven van de faalpaden die aangeven welke gebeurtenissen na een initieel mechanisme nodig zijn voor een overstroming.
2. De aspecten zijn benoemd die vanuit ondergrond, waterkering en belasting bepalend zijn voor het optreden van een overstroming, gegeven een gebeurtenis.
3. Beslisregels zijn gegeven waarmee kan worden onderbouwd wanneer een faalmechanisme niet bijdraagt aan de overstromingskans.
4. Instructies zijn gegeven hoe met eenvoudige rekenmodellen een eerste analyse van de overstromingskans kan worden gemaakt. .
5. Handvatten zijn gegeven hoe en welke aanvullende analyses kunnen worden ingezet om de overstromingskans van het faalmechanisme nauwkeuriger te bepalen (hoofdzakelijk: toepassen nauwkeuriger fysisch model van initieel mechanisme, toepassen geavanceerde (probabilistische) rekentechnieken om onzekerheden scherper en correlaties tussen faalmechanismen nauwkeuriger mee te nemen, of het meenemen van vervolgmecanismen in een faalpadanalyse).

Aanvullend worden, waar relevant, specifieke faalmechanismen en indirecte mechanismen die voortkomen uit de beschrijving van het verhaal van de kering benoemd en geconcretiseerd. Het kan daarbij bijvoorbeeld gaan om belangrijke indirecte mechanismen, of bijvoorbeeld de aanwezigheid van langsconstructies.

Opgemerkt moet worden dat een faalmechanisme relevant is wanneer het optreden ervan niet kan worden uitgesloten. De beslisregels op basis waarvan faalmechanismen wel of niet als relevant worden aangemerkt hebben dan ook sterk het karakter van de vroegere eenvoudige toets.

6 Principes van het schematiseren

Bij schematiseren wordt de beschikbare informatie over de kering geselecteerd, geïnterpreteerd en gecombineerd tot een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Meestal is het doel hiervan om een analyse te maken met een rekenmodel. Een goede schematisering vertaalt de werkelijkheid naar een model, met begrip van relevante onzekerheden (ook buiten het model), en zonder de werkelijkheid geweld aan te doen.

Het is belangrijk dat schematiseringskeuzes transparant en herleidbaar vanuit het verhaal van de kering zijn onderbouwd, zodat de uiteindelijke beslissingen herleidbaar en uitlegbaar zijn. De wijze van schematisering sluit daarbij aan op wat nodig is voor een transparant handelingsperspectief, en kan daarom verschillend ingestoken worden voor bijvoorbeeld ontwerp of beoordeling.

Dit hoofdstuk beschrijft achtereenvolgens:

1. Een viertal principes bij het schematiseren voor het bepalen van de overstromingskans
2. Het schematiseringsproces op hoofdlijnen en de omgang met de bestaande schematiseringen
3. Per stap in het proces een korte weergave van het karakter van die stap en hoe de principes in die stap hun praktische toepassing vinden.

Een uitwerking van het schematiseren per faalmechanisme is te vinden in de Handleidingen per faalmechanisme en de Technische Leidraden.

6.1 Principes van schematiseren

Schematiseren is een doorlopend en iteratief proces waarin informatie die nodig is voor het beheersen van overstromingsrisico's wordt gegenereerd via een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Bij het schematiseren speelt een viertal principes een belangrijke rol:

1. **Beslisprobleem centraal:** welk doel dient de schematisering?

Beslisproblemen kunnen bijvoorbeeld zijn:

- De selectie van relevante faalmechanismen.
- Het inschatten van de kans op een initieel mechanisme via een modelanalyse.
- Het bepalen van de bijdrage van een faalpad aan de overstromingskans.

Door de informatie die nodig is voor het beslisprobleem leidend te laten zijn, wordt helder welke analyses nodig zijn om tot die informatie te komen en welke schematiseringskeuzes die analyses vragen.

Bij de analyse van een initieel mechanisme zal de schematisering sterk 'modelgestuurd' zijn: de gegevens worden bewerkt tot voor het model geschikte invoer.

2. **Van grof naar fijn werken:** welke informatie is nodig om tot een stabiel resultaat te komen, gegeven het doel? Welke analyse moet worden uitgevoerd en hoe moet de werkelijkheid vertaald worden om deze analyse goed te kunnen uitvoeren?

Schematiseren heeft een iteratief karakter: grof beginnen en verfijnen waar het nodig is. Verfijning kan daarbij onder andere worden bereikt door het toepassen van een nauwkeuriger analyse of het verzamelen van extra informatie waardoor de invoer nauwkeuriger kan worden bepaald. Daarbij is steeds de vraag van belang: draagt verfijning bij aan een stabiel handelingsperspectief en een geloofwaardige overstromingskans?

3. **Expliciet omgaan met onzekerheden:** voor het onderbouwen van een stabiel eindresultaat.

Essentieel in het van grof naar fijn werken is de omgang met onzekerheden. In het verleden werden bij grove analyses vaak (meestal) conservatieve keuzes gemaakt en bij verfijndere analyses werden de onzekerheden steeds meer expliciet gemaakt. Bij de hier gebruikte overstromingskansbenadering past het expliciet omgaan met onzekerheden. Op basis van het verhaal van de kering moeten bandbreedtes worden ingeschat die de onzekerheden realistisch beschrijven. Vervolgens kan er onderbouwd een keuze worden gemaakt hoe met deze onzekerheden kan worden omgegaan. Soms is een voorzichtige, conservatieve, keuze verdedigbaar: zo kan bijvoorbeeld wanneer een faalmechanisme relatief minder relevant lijkt, met weinig inspanning worden aangetoond dat een faalkans(bijdrage) verwaarloosbaar klein is. Wanneer parameters relevant zijn en een faalmechanisme bijdraagt aan de overstromingskans van het dijktraject levert het rekenen met goed onderbouwde en gekwantificeerde onzekerheden een geloofwaardiger resultaat. Gevoeligheidsanalyses geven vervolgens aan of het zin heeft deze onzekerheden te verkleinen. Bij het ontwerp kunnen conservatieve uitgangspunten doelmatig zijn om het risico op een korter dan verwachte levensduur te verkleinen. Argumentatie voor eventuele daaruit volgende meerkosten kan worden onderbouwd met een LCC-analyse.

Met onzekerheden kan bij het schematiseren op verschillende manieren worden omgegaan:

- Het verdisconteren in scenario's (zie onderstaand kader)
- Het hanteren van kansverdelingen (zie onderstaand kader)
- Het uitvoeren van gevoeligheids- of hoekpuntenanalyses
- Het maken van afspraken, bijvoorbeeld: de afvoer bij Lobith is niet hoger dan 18.000 m³/s en dat dus de Duitse dijken overlopen bij hogere afvoeren.

Omgaan met onzekerheid – scenario's

Scenario's hebben betrekking op de situaties die aanwezig kunnen zijn voordat een hoogwatergolf optreedt (en dus onafhankelijk zijn van een hoogwatergolf). Met behulp van scenario's kunnen verschillende mogelijke situaties (gewogen) worden meegenomen in een overstromingskansanalyse. In dit kader geven we enkele voorbeelden van toepassing.

Ondergrondscenario's

Een eerste mogelijkheid om met onzekerheden om te gaan is het schematiseren van verschillende scenario's binnen een vak. Dit speelt met name een rol bij ruimtelijk discrete veranderingen (het is niet zeker of en waar de verandering plaatsvindt). Een voorbeeld is een verandering in de bodemopbouw, afgeleid op basis van een geotechnisch lengteprofiel wat afgeleid is uit puntwaarnemingen (zoals boringen en sonderingen). De

onzekerheid die gepaard gaat met de interpolaties (overgangen tussen grondsoorten) en interpretatie van de boringen en sonderingen (benoemen grondsoort), kan worden verdisconteerd door het hanteren van scenario's. Hierbij kan de waarschijnlijkheid van een scenario worden ingeschat op basis van geo(morfo)logische kennis en gebiedskennis. De som van de scenario's is altijd 1.

Scenario's voor indirecte mechanismen en geplande noodmaatregelen

Iets vergelijkbaars geldt voor het in rekening brengen van de indirecte mechanismen en geplande noodmaatregelen.

Een indirect faalmechanisme kan, in veel maar niet alle gevallen onafhankelijk van hoogwater, leiden tot een verandering van de geometrie, bijvoorbeeld door het afschuiven van het voorland of door een erosiekrater na het falen van een drukleiding. De geometrieverandering is discreet: het treedt wel of niet op, met een ingeschatte scenariokans. Dit vormt het startpunt voor de analyse van een faalmechanisme.¹

Bij noodmaatregelen gaat het om 'voorzien maatregelen' – waarvoor een protocol beschikbaar is met een zeker doel, op een zekere locatie en interventiewaarde. Ook voor deze maatregelen geldt dat er een kans is dat ze wel of niet (tijdig en correct) aanwezig zijn op de bestemde plek. Ook dit kan als scenario in rekening worden gebracht in een analyse van een faalmechanisme.

Scenario's in relatie tot de vakindeling

Vanuit het oogpunt van een uitlegbare en herleidbare overstromingskansinschatting, verdient het de voorkeur belangrijke ruimtelijk zekere veranderingen (het is zeker of en waar de verandering plaatsvindt) te verdisconteren in de vakindeling. Denk daarbij aan veranderingen in de zichtbare ruimte zoals geometrie, oriëntatie, en de opbouw van de ondergrond (bijv. locatie van een zandbaan).

Omgaan met onzekerheid – bandbreedtes en kansverdelingen

Kansverdelingen zijn een geschikt middel om de onzekerheden over bijvoorbeeld parameters weer te geven en mee te nemen in analyses. De volledige bandbreedte is lastig te definiëren als er geen datasets zijn om deze te onderbouwen. In deze gevallen kan deze worden weergegeven op basis van het verschil tussen de 95%-ondergrens en 5%-bovengrens. Deze bandbreedte kan weer worden vertaald in een standaarddeviatie. Hoe groter de bandbreedte, hoe minder de verwachtingswaarde zegt over de situatie.

Zie ook paragraaf 6.2.

¹ Opgemerkt moet worden dat er pragmatisch moet worden omgesprongen met het definiëren van scenario's als direct of indirect. Zo kan falen van een leiding in een waterkering onafhankelijk van een hoogwater plaatsvinden, maar ook tijdens een hoogwater, of zelfs (deels) veroorzaakt worden door vervormingen van de kering als gevolg van hoogwater. Het is dan zaak om af te wegen welke situatie het belangrijkste is voor de faalkans, en op basis daarvan onderbouwd te kiezen hoe dit het best kan worden meegenomen. De Regeling biedt ruimte om indirecte mechanismen als direct mechanisme mee te nemen.

4. **Consistent schematiseren:** keuzes op dezelfde manier maken, voor uitlegbaarheid en geloofwaardigheid.

Bij het schematiseren is het van belang kruisvalidaties ('cross-checks') reflectiemomenten in te bouwen vanuit de vragen: is de schematisering van het faalmechanisme consistent (niet tegenstrijdig) met andere faalmechanismen? En: is de schematisering consistent met het verhaal van de kering?

Er is maar één werkelijkheid. Het kan dus niet zo zijn dat op één locatie voor het faalmechanisme dijkerosie, bij gebrekkige gegevens, het dijksmateriaal geschematiseerd wordt als zand, terwijl voor de analyse van macrostabiliteit het dijksmateriaal als klei wordt geschematiseerd. Deze onzekerheden kunnen met behulp scenario's expliciet worden meegenomen.

Omdat het schematiseringsproces nauw verwant is aan het verhaal van de kering is het belangrijk dat tijdens het schematiseren de verschillende deskundigen met elkaar in gesprek blijven over te maken keuzes in het licht van het verhaal van de kering, waarbij gemaakte keuzes herleidbaar worden vastgelegd en op deze wijze de consistentie in schematisering (ook tussen verschillende faalmechanismen) wordt bewaakt.

Aan de hand van het in paragraaf 6.2 beschreven proces van schematiseren, worden deze principes nader uitgewerkt in paragrafen 6.2.1 t/m 6.2.5.

6.2 Het proces van schematiseren

In het algemeen worden de volgende stappen doorlopen bij het schematiseren:

1. Selectie en analyse van relevante faalmechanismen of dominante faalpaden en van gebeurtenissen daarbinnen.
2. Het opstellen van een vakindeling en de keuze voor een representatieve doorsnede.
3. Het schematiseren van de representatieve doorsnede.
4. Hoekpunten- of gevoeligheidsanalyses om na te gaan of verdere verfijning van de schematisering zinvol is.
5. Actualiseren schematisering op basis van nieuwe informatie.

In de praktijk begint een schematiseringsproces niet met een leeg vel papier. Meestal is er een schematisering beschikbaar uit een eerdere beoordelingsronde of ontwerp beschikbaar, waarin bovengenoemde stappen (deels) doorlopen zijn. Het is van belang de bestaande schematisering aan te passen indien nodig. Dat kan blijken aan de hand van de volgende controlevragen, die bij elke stap in het schematiseringsproces kunnen worden gesteld:

- Is er nieuwe informatie?
- Is de bestaande schematisering incorrect op grond van de genoemde principes?
- Is verfijning van de schematisering zinvol?

Wanneer een van deze vragen positief beantwoord worden, is het nodig om te onderzoeken of aanpassing van de schematisering kan leiden tot een significant andere overstromingskans en bijbehorend handelingsperspectief. Wanneer ook die vraag positief wordt beantwoord is dat aanleiding om de bestaande schematisering aan te passen.

6.2.1 *Selectie en analyse van relevante en dominante faalpaden*

Zoals in 5.1 beschreven bepalen de dominante faalpaden respectievelijk de overstromingskans en de dimensies van versterkingsmaatregelen. Onderdeel van het schematiseringsproces is daarom de keuze van de relevante en dominante faalmechanismen.

Het selecteren van relevante faalmechanismen gebeurt op basis van het verhaal van de kering (zie paragraaf 5.2).

De schematisering van relevante faalpaden richt zich op de vraag of een mechanisme in het faalpad kan optreden en tot overstroming kan leiden. Beslisregels kunnen betrekking hebben op het initiële mechanisme maar ook op vervolgmecanismen. Denk bijvoorbeeld aan het identificeren van zand-op-zand situaties op grond waarvan piping kan worden uitgesloten of verholen keringen waar macro-instabiliteit niet kan voorkomen. Hulpmiddel daarbij zijn de in de mechanisme-specifieke handleidingen beschreven beslisregels.

Van belang is het werken van grof naar fijn, expliciet rekening houdend met onzekerheden. Begin met de beslisregels die makkelijk te achterhalen zijn en win alleen extra informatie in als dit effectief is. Soms is het uitvoeren van een eenvoudige analyse doelmatiger dan het verzamelen van informatie voor een beslisregel.

De analyse van de relevante faalmechanismen (met de focus op de initiële mechanismen) betreft een eerste analyse van de overstromingskans door het betreffende faalmechanisme, gegeven de gebruikte informatie en de expliciet gemaakte onzekerheden. De analyse van relevante faalmechanismen is de basis voor de selectie van de faalpaden die dominant zijn voor de overstromingskans of veiligheidsopgave.

Waar relevantie van een mechanisme betrekking heeft op het kunnen uitsluiten van een mechanisme (of niet), gaat het bij dominante faalmechanismen om relevante faalmechanismen die een bepalende bijdrage leveren aan de overstromingskans en/of bepalend zijn voor het handelingsperspectief (bijv. de veiligheidsopgave). In het iteratief en van grof-naar-fijn werken binnen een overstromingskansanalyse gaat het dan bijv. om de faalmechanismen met de grootste faalkans, maar voor een beperkt aantal vakken. Dominantie moet daarmee ook gezien worden in het licht van de leidende principes: wanneer een faalmechanisme op een bepaald dijkvak invloed heeft op de geloofwaardigheid van de overstromingskans (op trajectniveau) of op het eindresultaat/handelingsperspectief is het dominant.

6.2.2 *Opstellen van een vakindeling en keuze van een doorsnede*

6.2.2.1 Opstellen van een vakindeling

Het verhaal van de kering vormt de basis voor de vakindeling bij de analyse van de relevante mechanismen. Uit het verhaal van de kering volgt welke kenmerken bepalend zijn voor het optreden van een gebeurtenis. De vakindeling wordt gemaakt op basis van deze kenmerken. Vaak is uit een eerdere beoordeling al een vakindeling beschikbaar als startpunt.

6.2.2.2 Gemiddelde doorsnede of maatgevende doorsnede

Er kan op twee manieren geschematiseerd worden:

- A. Op basis van een gemiddelde doorsnede .

- B. Op basis van de maatgevende doorsnede (vaak de zwakste doorsnede in een vak).

Dit is gekoppeld aan de bepaling van het lengte-effect, zie ook paragraaf 8.1.2. Immers, als een zwakste doorsnede wordt geschematiseerd hoeft er minder lengte-effect in rekening te worden gebracht.

Bij het schematiseren van een gemiddelde doorsnede is het uitgangspunt dat binnen een vak de variatie van de voor het faalmechanisme relevante aspecten van de kering zodanig klein is, dat een uitspraak over de faalkans van een beschouwde (willekeurige) doorsnede geldig is voor alle denkbare doorsnedes binnen het vak.

Bij het schematiseren van de maatgevende doorsnede wordt gezocht naar de doorsnede met de hoogste faalkans binnen een vak. Belangrijk is dat dit alleen kan in geval de overige doorsnedes geen bijdrage hebben aan de faalkans; dit kan dus alleen wanneer er heel duidelijk zwakke plekken zijn. Aandachtspunt is wel dat moet worden gezocht naar een fysisch mogelijke combinatie van parameters, dus niet een dunste deklaag bij dijkpaal 1 combineren met een stijl talud bij dijkpaal 100 voor een stabiliteitsanalyse.

Welke van beide opties het best is hangt sterk af van de lokale situatie en het mechanisme. Dit is uitgewerkt in de handleidingen per faalmechanisme. Bij het beschikbaar komen van meer gedetailleerde ondergrondinformatie blijkt vaak dat het moeilijk is om op basis van een gemiddelde doorsnede te werken; een maatgevende doorsnede is dan vaak beter te onderbouwen. Zie ook paragraaf 8.3.1 over de interactie tussen deze keuze en lengte-effecten.

Een vak kan daarnaast worden begrensd door een verandering in de systeemkenmerken die in hoofdstuk 5 beschreven zijn: geo(hydro)logie, kenmerken van de waterkering en hydraulica of op basis van beheerderskennis en -ervaring.

Aandachtspunten bij vakindeling

Er zijn drie aandachtspunten bij de vakindeling:

1. Het verhaal van de kering resulteert in één grove vakindeling op basis van belangrijke systeemkenmerken. Voor verschillende faalmechanismen kunnen, indien nodig, vervolgens verschillende vakindelingen worden opgesteld, omdat de ruimtelijke variatie van relevante kenmerken per faalmechanisme kan verschillen.
2. Of een verandering significant is, en dus leidt tot het opdelen van een vak in meerdere vakken, hangt af van het effect op de overstromingskans. Binnen het van grof naar fijn itereren tot een geloofwaardige overstromingskans zullen vakgrenzen dus worden aangescherpt/aangepast. Bovenstaande criteria vormen geen uitputtende 'checklist' die, wanneer alles is afgevinkt, automatisch leidt tot een goede vakindeling. Het is belangrijk bij de toepassing van de criteria in de totstandkoming van de vakindeling, continu te spiegelen aan het verhaal van de kering en daarbij aansluiting te zoeken. Uit het verhaal van de kering kunnen aanvullende criteria volgen of kan blijken dat sommige criteria niet relevant zijn.
3. De minimale omvang van de vakken hangt samen met het faalmechanisme waarvoor de vakindeling wordt opgesteld. Het verdient de voorkeur om geen vakken te schematiseren die kleiner zijn dan de schaalgrootte van het mechanisme wanneer falen optreedt. Bijvoorbeeld bij binnenwaartse macro-instabiliteit zouden geen vakken kleiner dan 50 meter geschematiseerd worden, om de simpele reden dat een afschuiving typisch over circa 50 meter plaatsvindt. Daarnaast moet worden gekeken naar de gebruikte

onafhankelijke lengte (parameter b bij de bepaling van het lengte-effect, zie paragraaf 8.2). Als het vak veel kleiner is dan deze parameter b , moet hier er weer rekening worden gehouden bij het assembleren van de vakken, zie paragraaf 8.2.3).

De handleidingen per faalmechanisme geven een meer gedetailleerde beschrijving van de werkwijze om te komen tot een vakindeling.

6.2.2.3 De keuze van een gemiddelde doorsnede en de relatie tot het lengte-effect

Het doel hierbij is om een doorsnede te schematiseren die representatief is voor het vak. In de praktijk werken we vaak van grof naar fijn. Er kan binnen een vak in eerste instantie, bij een grove indeling, wél significante variatie aanwezig zijn (bijv. dat er sprake is van meerdere ondergrond-opbouwen binnen een dijkvak). In dat geval is de keuze van (de locatie van) een doorsnede waarop een analyse van het faalmechanisme wordt uitgevoerd relevant. Hierbij is de kernvraag: wat is een gemiddelde doorsnede? Dus: welke schematisatie geeft een analyseresultaat dat geldig is voor het hele vak?

Een aanpak die past bij een overstromingskansanalyse is om uit te gaan van de verwachtingswaarde: de gemiddelde doorsnede voor de overstromingskans. Merk op dat dit niet de doorsnede is met de meest "gemiddelde" kering-eigenschappen; als gevolg van onzekerheden zal voor de overstromingskans een gemiddelde doorsnede vaak de doorsnede zijn die qua *eigenschappen* in meerdere of mindere mate aan de ongunstige kant uitvallen. Het is daardoor niet op voorhand altijd duidelijk welke doorsnede "gemiddeld" is voor de voor de overstromingskans – zeker als meerdere aspecten van belang zijn de faalkans: dit is afhankelijk is van verschillende variabelen en bijbehorende onzekerheden, en daarom is het soms nodig om meerdere doorsnedes te analyseren om dit te bepalen. Dit kan bijvoorbeeld door verschillende doorsnedes te schematiseren en door te rekenen die voor een bepaald aspect uit de schematisatie ongunstig zijn (bijv. een doorsnede met de ongunstige geometrie en de doorsnede met de ongunstigste ondergrondsopbouw). Een goed startpunt is de verwachtingswaarde en deze doorsnede te analyseren. Als een niet verwaarloosbare bijdrage van de overstromingskans verwacht wordt, is belangrijk om niet een schematisatie op te stellen waarbij ongunstige keuzen vanuit verschillende doorsnedes gecombineerd wordt tot in één fictieve doorsnede. Deze aanpak leidt in de regel tot onrealistisch hoge overstromingskansen voor die schematisatie.

Vervolgens kan met een hoekpuntenanalyse de gevoeligheid voor de variatie binnen het vak worden onderzocht. Als het resultaat (significant) gevoelig blijkt voor de variatie, is dit aanleiding om het vak op te knippen of eventueel een andere doorsnede te kiezen.

6.2.2.4 De keuze van een maatgevende doorsnede en de relatie tot het lengte-effect

De andere aanpak is om in eerste aanleg uit te gaan van de maatgevende doorsnede. In dat geval dient geen lengte-effect binnen het dijkvak in rekening te worden gebracht, zie ook paragraaf 8.2. Als er twijfel is of helemaal de maatgevende doorsnede in beeld is, kan ook worden gekozen om een klein lengte-effect toe te passen om deze twijfel af te dekken.

6.2.3 *Het schematiseren van de gemiddelde doorsnede*

Nadat de vakindeling is opgesteld en de te analyseren doorsnedes zijn gekozen, kan de doorsnede zelf geschematiseerd worden. Het gaat daarbij om mechanismespecifieke keuzes en afwegingen en betreft veelal een modelgestuurde

schematisering. Dat wil zeggen: de vereiste modelinvoer is bepalend voor wat en hoe geschematiseerd wordt.

In meer detail is dit beschreven in de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme en de Technische leidraden.

6.2.4 *Gevoeligheids- en hoekpuntenanalyses*

Gevoeligheidsanalyses zijn - gegeven alle onzekerheden - een onmisbaar onderdeel voor een stabiele veiligheids- en versterkingsopgave.

Gevoeligheids- of hoekpuntenanalyses geven inzicht in de significantie van een onzekerheid, gegeven het doel van een stabiel eindresultaat, en geeft inzicht in nut en noodzaak voor het verfijnen van de schematisering.

In de overstromingskansbenadering worden onzekerheden expliciet meegenomen. Om een overstromingskans te berekenen wordt gerekend met verwachtingen en bandbreedten. De verwachting betreft een realistische waarde, maar is *exclusief* het effect van de mee te nemen onzekerheden. De bandbreedte geeft de spreiding rond deze verwachting aan. De volledige bandbreedte is vaak lastig vast te stellen in. In de praktijk wordt vaak het verschil tussen de 95%-ondergrens en 5%-bovengrens gehanteerd.

Wanneer weinig informatie bekend is, zijn schematiseringen van overstromingskansanalyses grof en wordt gerekend met grote onzekerheden. Dit leidt tot globale overstromingskansen die nog sterk kunnen veranderen op basis van nader onderzoek. Door meer informatie in te winnen worden onzekerheden kleiner en kan een scherpere overstromingskans worden bepaald. Het inwinnen van extra gegevens kost tijd en geld. Gevoeligheidsanalyses kunnen worden gebruikt om na te gaan of meer informatie en een scherpere overstromingskans leidt tot andere handelingsperspectieven. Bijvoorbeeld door in een gevoeligheidsanalyse de mogelijk impact van aanvullend onderzoek te verkennen op de overstromingskans. Deze mogelijk impact kan vervolgens worden vergeleken met de kosten voor extra onderzoek om een beslissing te nemen over het nut en noodzaak daarvan.

Voor de beoordeling is het belangrijk dat de informatie die hieruit volgt stabiel genoeg is om vervolgprocessen, zoals het programmeren en realiseren van versterkingsmaatregelen of opstellen van een landelijk veiligheidsbeeld in te richten. Dat betekent dat moet worden voorkomen dat op basis van het resultaat uit de beoordeling een verkeerde beslissing wordt genomen omdat blijkt dat de overstromingskans in werkelijkheid veel groter of kleiner is. De stabiliteit van het eindoordeel kan worden onderzocht door gevoeligheidsanalyses uit te voeren met zowel conservatieve als optimistische inschattingen van de belangrijkste onzekerheden (van de dominante parameters), voor zover deze reduceerbaar zijn via nader onderzoek.

Bij versterkingsprojecten is het daarentegen belangrijk om zeker te weten dat er een veiligheidsopgave is. Het is dus belangrijk om aan het begin van het project zogenaamde 'false negatives' te voorkomen. De kans hierop kan worden onderzocht door in gevoeligheidsanalyses uit te gaan van optimistische uitgangspunten. Wanneer hieruit volgt dat de opgave verdwijnt bij optimistische uitgangspunten is het belangrijk om extra informatie te winnen waarmee aangetoond kan worden dat er zeker een opgave is.

Wanneer een veiligheidsopgave stabiel is, wordt een ontwerp gemaakt. Als in de loop van de tijd blijkt dat een uitgangspunt verkeerd is gekozen, heeft dat effect op

de levensduur. Het is waarschijnlijk dat de werkelijke levensduur langer is dan de vooraf aangenomen levensduur omdat in het ontwerp (over het algemeen) een enigszins conservatieve set aan uitgangspunten wordt toegepast. Bij het ongunstiger uitvallen van een uitgangspunt zal de levensduur afnemen. De 'ideale' uitgangspunten zijn sterk afhankelijk van de situatie en het type maatregel. Bij hoge initiële projectkosten is het vaak handig om bij onzekerheden iets veiliger te kiezen en de levensduur langer.

Het komt vaak voor dat bij gevoeligheidsanalyses als basis wordt uitgegaan van een set conservatieve uitgangspunten, waarbij in de analyse elke keer één uitgangspunt minder conservatief wordt gekozen. Deze werkwijze geeft te pessimistisch beeld. Beter is het om in gevoeligheidsanalyses uit te gaan van een basis met realistische tot licht conservatieve waarden waarbij met een variabele (of gecorreleerde set variabelen) wordt gevarieerd. Het is immers niet aannemelijk dat alle variabelen in de praktijk tegelijk ongunstig of gunstiger zijn dan verwacht.

6.2.5 *Actualiseren schematisering op basis van nieuwe informatie*

Als nieuwe informatie of kennis daartoe aanleiding geeft, wordt de schematisering aangepast en de overstromingskans geactualiseerd. Daarbij gelden de controlevragen zoals genoemd in paragraaf 6.1.

7 Uitvoeren van een overstromingskansanalyse

7.1 Procesmatige invulling van een overstromingskansanalyse

Op basis van begrip van het systeem (opgebouwd in het verhaal van de kering, zie hoofdstuk 5), kan een overstromingskansanalyse worden uitgevoerd. In eerste instantie worden de relevante faalmechanismen uitgewerkt, en op basis hiervan worden de dominante faalmechanismen bepaald. Deze zijn bepalend voor eventuele vervolganalyses voor bepalen van overstromingskans en veiligheidsopgave of de dimensionering van versterkingsmaatregelen. Voor ontwerpen en beoordelen werkt dit wel verschillend uit, zie paragraaf 8.1.3.

Het proces van een overstromingskansanalyse is bij uitstek iteratief, waarbij op verschillende momenten een afweging wordt gemaakt of verdere analyse zinvol is. De leidende principes uit Hoofdstuk Leidende principes staan daarbij centraal: zodra een het handelingsperspectief voor het systeem afdoende kan worden onderbouwd op basis van een geloofwaardige overstromingskansanalyse, is de bepaalde overstromingskans van de waterkering in principe voldoende ver uitgewerkt.

De relevante aspecten voor de kwaliteitsborging van de resultaten van een overstromingskansanalyse bij de beoordeling zijn beschreven in Bijlage I bij de Regeling. De relevante aspecten voor kwaliteitsborging voor ontwerp staan beschreven in de Handreiking Veiligheidsontwerp.

Dit hoofdstuk beschrijft op hoofdlijnen het proces van selectie en analyse van relevante faalmechanismen en de daarbij belangrijke aandachtspunten. Specifieke aspecten met betrekking tot het bepalen van overstromingskans op trajectniveau komen in Hoofdstuk 8 aan de orde.

De volgende stappen worden doorlopen bij het bepalen van een overstromingskans (in het proces is het mogelijk dat deze stappen meerdere malen – iteratief – doorlopen worden):

1. Selectie relevante faalmechanismen (paragraaf 7.2)
2. Analyse relevante faalmechanismen op basis van de initiële mechanismen (paragraaf 7.3)
3. Eerste analyse overstromingskans op trajectniveau (Hoofdstuk 8).
4. Vervolganalyse dominante faalpaden (paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**)
5. Bepalen overstromingskans op trajectniveau (Hoofdstuk 8)

Algemene aandachtspunten bij het geschetste proces:

- Een risico is de zogenaamde doelredenering: het resultaat van de analyse wordt (onbewust) gestuurd door een vooraf verwachte uitkomst. Bijvoorbeeld een lage of juist hoge verwachte faalkans op basis van het verhaal van de kering.
- De beheerder heeft de vrijheid om de methodiek waarmee een overstromingskans zelf vorm te: dit kan met verschillende typen modellen en/of op basis van 'expert judgement'. In de handleidingen per faalmechanismen zijn de modellen die vanuit het basis instrumentarium beschikbaar zijn gesteld beschreven. Dit maakt het voor de hand liggend om bij de (eerste) analyse van de overstromingskans gebruik te maken van de beschreven modellen (bijvoorbeeld probabilistische berekeningen voor

erosie kruin- en binnentalud). Een risico bij het toepassen van generieke instrumenten uit het Basisinstrumentarium is dat bepalende locatiespecifieke kenmerken aan het begin van de analyse onvoldoende zijn meegenomen of dat de modellen niet passend zijn bij de karakteristieken van de kering (die volgen uit het verhaal van de kering). Daarom zijn in de faalmechanisme specifieke handleidingen modellen beschreven die kunnen worden toegepast bij nadere analyses.

- Het is daarom van belang om een iteratief proces te doorlopen waarbij aan het eind de aannames van het begin worden gecheckt en waar nodig aangepast.

7.2 Selecteren van relevante faalmechanismen

In de handleidingen per faalmechanisme zijn beslisregels gegeven die kunnen worden gebruikt om de relevante faalmechanismen te selecteren. Onderscheid wordt gemaakt tussen absolute en relatieve beslisregels. Absolute beslisregels geven aan of een mechanisme (fysisch) wel of niet van kan optreden, relatieve beslisregels geven aan of de kans van optreden van een mechanisme verwaarloosd kan worden. De beslisregels in handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme zijn niet uitputtend. De beheerder wordt gevraagd en heeft expliciet de vrijheid om aanvullend op de generieke handvatten op basis van het verhaal van de kering locatie-specifieke afwegingen te maken om te onderbouwen of een faalmechanisme wel of niet relevant is.

Globaal gezien is er een aantal 'typen' beslisregels op basis waarvan faalmechanisme als niet-relevant dan wel verwaarloosbaar kunnen worden beschouwd:²

- Beslisregels op basis van fysica van initiële mechanismen:
 - Op basis van fysische onmogelijkheden (bijvoorbeeld piping bij zand op zand, micro-instabiliteit bij een kleidijk)
 - Op basis van generieke geometriekenmerken (bijvoorbeeld afschuiven buitentalud bij een hoog voorland, instabiliteit van een zeer flauw binnentalud)
 - Op basis van afmetingen (bijvoorbeeld erosie van een kleilaag bij kleine golven)
- Beslisregels op basis van historische analyses: op basis van een eerdere beoordeling (met voldoende veilig oordeel), in combinatie met onderbouwing dat er geen (significante) wijzigingen zijn opgetreden in rekenregels en randvoorwaarden, en onderbouwing dat er vanuit beheer geen onverwacht gedrag is waargenomen, kan worden onderbouwd dat een faalmechanisme niet relevant is voor het verkrijgen van een geloofwaardige overstromingskans.
- Beslisregels op basis van onmogelijke vervolgmecanismen: op basis van de knopenkaarten³ voor verschillende mechanismen is er ook inzicht in de

² De beslisregels hebben typisch het karakter van de vroegere 'eenvoudige toets'.

³ De knopenkaart geeft overzicht van instrumenten en rekenregels welke gebruikt kunnen worden om na te gaan (i) of het zinnig is om vervolgprouwen in rekening te brengen en (ii) op welke wijze de bijdrage van de vervolgprouwen in gekwantificeerd kan worden. In het kennisprogramma Kennis voor Keringen is in 2022 een eerste versie van de knopenkaart opgesteld. Deze kan via IPLO worden opgevraagd.

Het in rekening brengen van vervolgprouwen is nog sterk in ontwikkeling. Dat betekent dat een overzicht van beschikbare instrumenten snel achterhaald zal zijn. Ook is door het opstellen van dit document duidelijk geworden dat er nog kennisleemtes zijn die opgepakt moeten worden. Praktische toepassingen zullen meer inzicht geven in de

mogelijke vervolgmecanismen. Ook hiervoor kunnen de eerder genoemde beslisregels worden toegepast. Een belangrijk aspect is om te beschouwen of het optreden van vervolgmecanismen realistisch is. Een mogelijk voorbeeld is het optreden van piping, bij een zeedijk: de belastingduur is hier zo kort dat de kans op doorgroei van een pipe gedurende één (of enkele) storm(en) onder bepaalde omstandigheden zeer onwaarschijnlijk is. Soortgelijke redeneringen zijn denkbaar bij de combinatie van graserosie buitentalud bij keringen met bijvoorbeeld langsconstructies.

Belangrijk om op te merken is dat de selectie van relevante faalmechanismen zowel per vak als op trajectniveau kan worden ingestoken. Op een duintraject zijn de geotechnische faalmechanismen piping en binnenwaartse macrostabiliteit niet relevant. Ook eerdere beoordelingen kunnen bij deze selectie worden gebruikt: wanneer bijvoorbeeld voor erosie van kruin en binnentalud in een eerdere beoordeling op een groot deel van het traject een zeer kleine faalkans is bepaald kan dit voor een groot deel van het traject als niet relevant worden aangemerkt. Wanneer er op een specifiek dijkvak veel problemen zijn met graverij kan graverij als indirect mechanisme alleen op dit vak (en eventueel de omliggende vakken) als relevant worden aangemerkt.

7.3 Eerste inschatting overstromingskans

7.3.1 *Bepalen hydraulische belasting*

Voor de meeste overstromingen is het optreden van een extreme hydraulische belasting een voorwaarde. Zonder extreme hydraulische belastingen zal geen overstroming optreden.

De hydraulische belasting is geen binaire variabele. In principe zijn er oneindig veel mogelijke belastingen. Voor de initiële mechanismen is in de handleidingen overstromingskansanalyse per faalmechanisme beschreven hoe de belasting kan worden bepaald.

Het Basisinstrumentarium bevat instrumenten in de vorm van software en databases voor het afleiden van hydraulische belastingen. De databases zijn voor verschillende zichtjaren beschikbaar via het Informatiepunt Leefomgeving.

Bij een analyse van vervolgmecanismen moet op basis van de fysica een logische aanpak worden gekozen voor het omgaan met hydraulische belasting. Hoe dit vormgegeven kan worden is nader uitgewerkt in paragraaf 7.4.

7.3.2 *Bepaling overige belastingen*

Waterkeringen kunnen ook blootgesteld worden aan andersoortige belastingen, te denken valt aan verkeersbelasting, ijsbelasting of belasting door aardbevingen. Het belangrijkste aandachtspunt is dat er enkel wordt gerekend aan realistische belastingcombinaties. Zo is de combinatie van een hoge verkeersbelasting en hoogwater meestal niet realistisch voor de beoordeling. Een scenario met hoge verkeersbelasting en dagelijkse of licht verhoogde waterstanden is wel realistisch.⁴

situaties waarbij het meenemen van vervolgprocessen zinnig is. Om deze redenen moet de knopenkaart als een groeidocument worden gezien, dat desgewenst periodiek aangevuld/bijgewerkt dient te worden.

⁴ Zie voor een verdere voorbeelduitwerking de factsheet van Kennisplatform Risicobenadering over de combinatie van macrostabiliteit en verkeersbelasting: https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/157199/2016_07_28kpr-factsheetmacrostabiliteitenverkeersbelasting.pdf

Evenzo is het onwaarschijnlijk dat een aardbeving tegelijk optreedt met een extreem hoogwater, maar kan het bij een kering die continu belast wordt wel relevant zijn om een combinatie van normale waterstand en een aardbevingsbelasting te beschouwen in het kader van de beoordeling.

7.3.3 *Bepaling faalkans*

De handleidingen per faalmechanisme beschrijven de wijze waarop de faalkans door het initiële mechanisme kan worden bepaald. In het algemeen gelden de volgende aandachtspunten:

- De staat van de waterkering op de peildatum, op basis van het verhaal van de kering. Er zijn verschillende tijdsafhankelijke factoren die de sterkte van de waterkering bij een extreme hydraulische belasting onzeker maken, bijvoorbeeld:
 - Optreden van een indirect mechanisme
 - Schades aan de waterkering, bijvoorbeeld als gevolg van graverij
 - Variërende kwaliteit van de graszode
 - Gepland onderhoud of werken van derden

Hoofdstuk 6 beschrijft hoe deze zaken als scenario in rekening kunnen worden gebracht.

- De vervolgebeurtenissen in de faalpaden worden pas beschouwd bij analyse van de dominante faalpaden (indien dit een zinvolle aanscherping is). Echter, wanneer een vervolgmechanisme dominant en bepalend is voor de overstromingskans kan het doelmatig zijn om voor het initiële mechanisme aan te nemen dat het sowieso optreedt (kans = 1), en in eerste instantie te focussen op het bepalende vervolgmechanisme. Een voorbeeld is bijvoorbeeld erosie van een keileemkade: de erosiebestendigheid daarvan is mogelijk dermate groot dat het vervolgproces van erosie van de keileem veel belangrijker is voor de overstromingskans dan het falen van de erop aangebrachte bekleding.

7.3.4 *Mogelijke uitvoer op doorsnedeniveau*

Analyses van initiële mechanismen geven niet in alle gevallen een faalkans als uitvoer. In deze paragraaf beschrijven we kort welke soorten uitvoer mogelijk zijn en hoe hiermee kan worden omgegaan zodanig dat deze uitvoer toch als faalkans(schatting) kan worden meegenomen in de bepaling van de overstromingskans op trajectniveau.

Naast faalmechanismen waar direct (met een probabilistische berekening) een faalkans wordt bepaald, zijn er verschillende faalmechanismen waar doorgaans niet probabilistisch maar semi-probabilistisch wordt gerekend.

In de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme staat per faalmechanisme in detail beschreven hoe vanuit de uitvoer van de berekening van het initiële mechanisme een faalkans op doorsnedeniveau kan worden bepaald.

Daarbij onderscheiden we de volgende hoofdroutes voor het bepalen van een doorsnedefaalkans:

- Er wordt een probabilistische analyse uitgevoerd op basis waarvan de faalkans direct uitvoer van de berekening is. Een voorbeeld is de in het Basisinstrumentarium gefaciliteerde probabilistische berekening voor erosie van kruin en binnentalud.

- Er wordt een semi-probabilistische analyse uitgevoerd. Omdat semi-probabilistische analyses gestoeld zijn op een kalibratiestudie met onderliggende probabilistische berekeningen is het in een aantal gevallen wel mogelijk om op basis van een semi-probabilistische berekening een schatting van de faalkans te geven. Dit is een verwachtingswaarde van de faalkans gegeven de veiligheidsfactor. In het Basisinstrumentarium wordt bijvoorbeeld op een dergelijke semi-probabilistische berekening voor binnenwaartse macro-instabiliteit gefaciliteerd. Deze faalkans moet geïnterpreteerd worden als een verwachte faalkans op basis van de analyses uit de kalibratiestudie en het resultaat voor de specifieke som. Opgemerkt moet worden dat in sommige gevallen de spreiding in dergelijke kalibratiestudies groot is (bijvoorbeeld bij binnenwaartse macro-instabiliteit), en in andere gevallen klein (bijvoorbeeld voor duinafslag).
- In sommige gevallen is het bij een semi-probabilistische analyse niet direct mogelijk om met behulp van extrapolatie een faalkans te bepalen omdat er geen relatie uit de kalibratiestudie voor handen is. De faalkans moet dan worden geschat door de analyse te herhalen bij verschillende herhalingstijden, met bijbehorende hydraulische belastingen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het semi-probabilistische model voor duinafslag.
- In sommige gevallen is geen (semi-)probabilistisch model voor handen. In dat geval kan door middel van 'expert judgement' dan wel een niet-(semi-) probabilistische analyse bepaald worden of deze wel of niet dominant is. Wanneer dit niet het geval is wordt geen faalkans bepaald.⁵ Wanneer een dergelijk mechanisme wel dominant is moet met een nadere analyse een faalkans worden onderbouwd. Hiervoor is vaak specialistische kennis nodig. Bij de beoordeling kan een geschikte methode hiervoor in het werkatelier worden bepaald.
Een voorbeeld waarbij geen (semi-)probabilistisch model beschikbaar is, is micro-instabiliteit. Of dit faalmechanisme dominant is afhankelijk van het gewenste handelingsperspectief. Afwegingen daarbij zijn uitgewerkt in de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme.

Wanneer vervolgmecanismen worden meegenomen (in de analyse van dominante faalpaden) geldt in principe dat hiervoor alleen een conditionele kans (gegeven voorgaande knopen, zie paragraaf Gebeurtenissenbomen) als resultaat van een berekening kan worden gegeven. Vervolgens kunnen deze als conditionele kans verwerkt worden in de inschatting van de doorsnedefaalkans.

7.4 Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau

7.4.1 *Bepaling faalkans per faalmechanisme per doorsnede*

Op basis van de analyse van de initiële mechanismen kan per doorsnede worden bepaald wat de faalkans per faalmechanisme is. Deze analyse wordt gefaciliteerd in Riskeer. Daarbij is de kans van optreden van de vervolgprocessen gelijk gesteld aan 1 en worden faalpaden in eerste instantie als onafhankelijk beschouwd.

⁵Belangrijk om op te merken is dat hier verstandig mee moet worden omgegaan omdat de faalkans zo 'van de radar kan verdwijnen'. Ter illustratie: wanneer op ieder vak falen door micro-instabiliteit 'net niet' dominant is, kan het toch van belang zijn op trajectniveau. In dat geval moet het wel nader worden uitgewerkt.

Tabel 3 schetst een voorbeeld van een resultaat op doorsnedeniveau. Merk op dat de bijdrage van indirecte mechanismen al wel kan worden meegenomen in de analyse (zie paragraaf 3.2)

Tabel 3 Voorbeeld resultaat van analyse op doorsnedeniveau.

Faal-mechanisme	Indirect mechanisme		Initiële mechanisme	Vervolgproces 1		Vervolgproces 2	
Dijkerosie	Graverij	P = ...	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1	Kruinverlaging + Bresgroei	P = 1
			P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
			P _{ini} = ...	Afschuiving	P = 1		P = 1
	Geen graverij	P = ...	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
			P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
			P _{ini} = ...	Afschuiving	P = 1		P = 1
Macro-stabiliteit binnenwaarts			P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1	P = 1	
			P _{ini} = ...	Doorgaande pipegroei	P = 1	P = 1	

7.4.2

Vertaling naar trajectfaalkans

Na vertaling van de doorsnedefaalkansen per faalmechanisme naar faalkansen per faalmechanisme op vakniveau moeten de faalkansen worden samengevoegd tot een overstromingskans op trajectniveau. Daarbij wordt ook de overstromingskans per vak en de overstromingskans per faalmechanisme op trajectniveau bepaald. Zo kan worden bepaald welke faalmechanismen per vak, en over het gehele traject een grote bijdrage geven aan de overstromingskans. Zodoende vormt dit de basis voor het bepalen van de dominante faalpaden.

Om dit proces te faciliteren en al in vroegtijdig stadium inzicht te krijgen in de grootste bijdragen aan de overstromingskans worden de kansen in Riskeer ingedeeld in een kleurschaal die inzichtelijk maakt hoe de kansbijdrage van een specifiek vak of faalmechanisme zich verhoudt tot de norm van het dijktraject.

7.4.3

Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau

De dominante faalpaden zijn de faalpaden met de grootste bijdrage aan de overstromingskans van een dijktraject en deze moeten verder worden uitgewerkt zodanig dat een geloofwaardige overstromingskans wordt bepaald, als basis voor een transparant handelingsperspectief. Voor de bepaling en de duiding van de overstromingskans wordt een inschatting gemaakt of het uitvoeren van nadere analyses van de dominante faalpaden kan leiden tot een significante aanscherping van hun bijdragen aan de overstromingskans en de veiligheidsopgave van het dijktraject.

De selectie en analyse van dominante faalpaden is afhankelijk van locatie specifieke omstandigheden. In de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme zijn beschikbare modellen aangegeven voor de analyse van een aantal mechanismen, er zijn echter geen algemeen toepasbare instrumenten in BOI beschikbaar om de analyse van vervolgprocessen uit te kunnen voeren. Er worden wel voortdurend kennis en modellenontwikkeld die 'op maat' kunnen worden toegepast. Hiervoor is vaak specialistische kennis nodig en overzicht van de laatste ontwikkelingen. Om deze reden en om consistente keuzes te kunnen maken wordt

de beheerder bij deze stap in het beoordelingsproces ondersteund door het werkatelier. Bij ontwerp kan advies worden gevaagd aan het Adviesteam Dijkontwerp.

7.5 Mogelijkheden voor aanscherping overstromingskans

Er zijn verschillende manieren om de bepaalde overstromingskans aan te scherpen door de analyse van de dominante faalpaden. Dit wordt in de handleidingen per faalmechanisme in meer detail beschreven. Op hoofdlijnen zijn er vier aanscherpingen mogelijk die in de volgende paragrafen en in Hoofdstuk 8 aan de orde komen:

1. Uitwerken van vervolgprocessen
2. Verfijnder uitwerken initieel mechanisme
3. Meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen
4. Probabilistisch combineren van faalgebeurtenissen op trajectniveau

Aanscherpingen 3 en 4 relateren niet aan een specifiek faalmechanisme op dijkvakniveau, maar juist aan de combinatie daarvan op trajectniveau. Dit is nader uitgewerkt in Hoofdstuk 8.

Welke aanscherpingen het meest kansrijk zijn, is afhankelijk van de locatie. Met gevoeligheidsanalyses kan de mogelijke impact worden ingeschat. Naast bovenstaande opties is het ook mogelijk om na te gaan of er modellen buiten BOI of lopende kennisontwikkelingen toepasbaar zijn of op termijn beschikbaar komen. Hier wordt in de handleidingen per faalmechanisme verder op ingegaan.

7.5.1 Aanscherping 1: Uitwerken van vervolgprocessen

Bij de analyse van relevante faalmechanismen zijn de kansen van optreden van vervolgprocessen gelijk gesteld aan 1. Om de faalkans aan te scherpen kunnen de vervolgprocessen die de grootste bijdrage leveren aan de overstromingskans van het traject verder worden uitgewerkt.

Faal-mechanisme	Indirect mechanisme		Initiërend mechanisme		Vervolgproces 1		Vervolgproces 2	
Dijkerosie	Graverij	P =	GEBU	$P_{ini} = \dots$	Kliferosie	$P \leq 1$	Kruinverlagin g + Bresgroei	$P \leq 1$
		...	GEKB	$P_{ini} = \dots$	Kliferosie	$P \leq 1$		$P \leq 1$
				$P_{ini} = \dots$	Afschuiving	$P \leq 1$		$P \leq 1$
	Geen graverij	P =	GEBU	$P_{ini} = \dots$	Kliferosie	$P \leq 1$		$P \leq 1$
		...	GEKB	$P_{ini} = \dots$	Kliferosie	$P \leq 1$		$P \leq 1$
				$P_{ini} = \dots$	Afschuiving	$P \leq 1$		$P \leq 1$
Macro-stabiliteit binnenwaters			STBI	$P_{ini} = \dots$	Kliferosie	$P \leq 1$		$P \leq 1$
			STPH	$P_{ini} = \dots$	Doorgaande pipegroei	$P \leq 1$		$P \leq 1$

Tabel 3 Voorbeeld resultaat van analyse op doorsnedeniveau na uitwerking vervolgprocessen.

Bij het uitwerken van de vervolgprocessen moet in de modellering rekening worden gehouden met wat beschreven staat in paragraaf Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden.

Voor de bepaling van de conditionele kansen kan soms gebruik gemaakt worden van modellen, of dit kan op basis van expert judgement worden gedaan (met inachtneming van de aandachtspunten in paragraaf 6.2.4 over gevoeligheids- en hoekpuntenanalyses).

Bij de modellering van een combinatie van gebeurtenissen kan dit worden geschematiseerd met behulp van een gebeurtenissenboom, maar in sommige gevallen, met name bij het combineren van verschillende modellen voor verschillende processen kan een foutenboom of integrale benadering voordeel bieden. Dit is met name het geval wanneer er sterke afhankelijkheden zijn tussen knopen in het faalpad.

Wanneer gekeken wordt naar een faalpad met meerdere knopen is het ook van belang dat de belasting (inclusief duur) op een realistische wijze wordt meegenomen: een vervolgproces kan pas beginnen wanneer een eerdere knoop is gefaald, zodoende zal de belastingduur en mogelijk ook het belastingniveau anders zijn bij vervolgprocessen. Bij het uitwerken van vervolgprocessen is het belangrijk aandacht te hebben voor de onderlinge interactie tussen faalmechanismen. Het is belangrijk om de sterkte die hieruit volgt maar één keer mee te nemen. Zo is het bijv. in het rivierengebied mogelijk om bij waterstanden lager op het talud de sterkte van het dijklichaam mee te nemen in het spoor dijkerosie en bij de extreemste waterstanden de volledige sterkte van het dijklichaam mee te nemen bij geotechnische instabiliteit (en vervolgafschuivingen mee te meenemen). Het is minder waarschijnlijk dat extra sterkte van bijv. een kleikern zowel bij dijkerosie als voor vervolgafschuivingen mee te nemen als sprake is van dezelfde waterstanden.

7.5.2 *Aanscherping 2: Verfijndere uitwerking initieel mechanisme en/of vervolgmechanismen*

De analyse van de initiële mechanismen in de dominante faalpaden kan worden aangescherpt. Daarvoor zijn drie hoofdlijnen:

- Het beter uitwerken van de schematisering: door het expliciet meenemen van onzekerheden waarvoor in de eerste analyses grove aannames zijn gehanteerd. Denk daarbij aan het (alsnog) meenemen van het effect van voorliggende dammen en voorlanden op de hydraulische belasting, de modellering van de kwaliteit van de graszode of de aannames t.a.v. bodemopbouw, sterkte-eigenschappen of bijvoorbeeld de invloed van anisotropie op het faalgedrag. Ook kunnen overleefde belastingen gebruikt worden om de onzekerheid over de sterkte te verminderen.
- Het beter toepassen van nauwkeurigere modellen: in geavanceerde rekenmodellen kan de fysica in meer detail worden geschematiseerd. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het inzetten van de eindige elementenmethode.
- Het inzetten van een geavanceerdere rekentechniek: door een probabilistische berekening in plaats van een semi-probabilistische of andersoortige berekening uit te voeren kunnen onzekerheden beter en scherper worden meegenomen. Met name bij bijvoorbeeld semi-probabilistische berekeningen waar een grote spreiding is in de kalibratierelaties (bijvoorbeeld binnenwaartse macrostabiliteit) is dit een kansrijke aanscherping.

7.6 Plausibiliteit en duiding

Om betekenis te geven aan de overstromingskans is van belang om de plausibiliteit te onderbouwen en het resultaat te duiden. Zowel de controle op plausibiliteit als het duiden van de resultaten gebeurt na elke analyse, dus wordt op verschillende momenten gedaan.

Plausibiliteit

Bij plausibiliteit gaat het om het beoordelen of het resultaat aannemelijk is. De volgende vragen kunnen worden gesteld om de plausibiliteit te controleren:

- In hoeverre komen de uitkomsten overeen met die van vergelijkbare locaties in Nederland?
- Passen de uitkomsten van de modelberekeningen bij waarnemingen? Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de gebiedskennis van de beheerder of andere bronnen zoals de wellendatabase (zie <https://www.wellocaties.app/>).
- In hoeverre komen de uitkomsten overeen met die van eerdere analyses?
- Kunnen de uitkomsten worden verklaard vanuit het verhaal van de kering?

Eventuele aanvullende handvatten zijn opgenomen in de specifieke handleidingen.

Duiding

Bij duiding gaat om het verklaren van de resultaten. Dit kan aan de hand van de volgende generieke vragen:

- Hoe vergelijkt de uitkomst met de verwachtingen (bijvoorbeeld het verhaal van de kering)? En wat verklaart de verschillen?
- Wat verklaart eventuele onderlinge verschillen tussen de verschillende keringen of kunstwerken?
- Zijn er nieuwe inzichten en/of kennisontwikkelingen die de uitkomsten (sterk) kunnen beïnvloeden.
- Hoe komen de aangehouden uitgangspunten, onzekerheden en omgangswijze met onzekerheden overeen met eerdere toetsingen, beoordelingen, monitoringsverslagen, versterkingen?

Consequenties voor beslisvraag

Als het resultaat plausibel is en kan worden geduid dan kunnen de consequenties voor de beslisvraag worden vastgesteld. Dit ligt in principe buiten de reikwijdte van deze handleiding. Voor de beslisvraag kunnen vanuit de gevolgde inhoudelijke stappen wel essentiële vragen worden beantwoord:

- Wat is het handelingsperspectief?
- Welke onzekerheden beïnvloeden dit perspectief?
- Hoe belangrijk zijn deze onzekerheden voor dit perspectief?
- Hoe stabiel is het handelingsperspectief?

8 Bepalen van de overstromingskans op trajectniveau

8.1 De overstromingskans: combinatie van kansbijdragen

Een waterkering kan als gevolg van verschillende faalmechanismen bezwijken. Bovendien verschilt de (faalkans)bijdrage daarvan van locatie tot locatie. Om deze reden wordt bij de bepaling van een overstromingskans onderscheid gemaakt tussen verschillende faalmechanismen en vakken. Om te komen tot een schatting van de overstromingskans van een dijktraject, moeten de bijdragen van al deze faalmechanismen en vakken worden gecombineerd (geassembleerd).

Om te komen tot een overstromingskansschatting van een dijktraject, worden op verschillende niveaus kansen gecombineerd:

- Bij het bepalen van de faalkans per doorsnede voor een faalmechanisme (aan de hand van de analyse van dominante faalpaden). Zie paragraaf 8.2.
- Bij het bepalen van de faalkans per vak voor een faalmechanisme (paragraaf 8.3).
- Bij het bepalen van een faalkans per traject voor een faalmechanisme (paragraaf 8.4).
- Bij het bepalen van de gecombineerde faalkans van een traject (als gevolg van de bijdrage van alle relevante faalmechanismen), zie paragraaf 8.4.

8.1.1 *Kansen combineren*

Bij het combineren van faalkansbijdragen speelt de afhankelijkheid en correlatie van de verschillende stochastische variabelen (zie paragraaf 8.1.2 en Bijlage B) een belangrijke rol. Er bestaan verschillende methoden voor het combineren van kansen, waarin deze afhankelijkheden op verschillende wijze in rekening worden gebracht. Het gebruik van een specifieke methode hangt onder andere af van de beschikbare informatie.

Probabilistisch combineren van kansen

Allereerst kunnen de bijdragen op probabilistische wijze worden gecombineerd. Dit kan door alle mogelijke bijdragen (mechanismen en vakken) in één enkel probabilistisch model te beschouwen. Naarmate de trajectlengte en/of hoeveelheid mogelijke faalmechanismen toeneemt wordt dit echter steeds lastiger.

Ook is het mogelijk om de verschillende berekende (kans)bijdragen te combineren, rekening houdend met afhankelijkheden en correlaties. In de praktijk is dit een vaker gebruikte manier om de beschikbare (correlatie)informatie mee te nemen. Hydra-Ring, het rekenhart van Riskeer, biedt hiertoe de mogelijkheid door de implementatie en beschikbaarheid van de Hohenbichler-Rackwitz methode. Voorwaarde voor het gebruik van deze methode is wel dat van alle mogelijke bijdragen aan de gecombineerde faalkans ook de invloed(scoëfficiënten) en correlatielengten van alle stochasten bekend is.

Voor een deel van de berekeningen (zoals de faalkansbepaling voor het faalmechanisme grasbekleding erosie kruin en binnentalud, piping of verschillende manieren van falen van een kunstwerk) wordt deze methode ontsloten door Riskeer voor het bepalen van een faalkans per doorsnede. Ook in andere gevallen (bijvoorbeeld voor het combineren van kansbijdragen per vak tot de faalkans per traject) is het voor experts mogelijk deze methode te benutten.

Rekenkundig/semi-probabilistisch

Indien van minimaal één van de bijdragen geen invloedscoëfficiënten kunnen worden benoemd, is het niet meer mogelijk om probabilistisch te combineren en moet worden overgestapt op het rekenkundig of semi-probabilistisch combineren van kansen. Dit komt snel voor, bijvoorbeeld bij het gebruik van scenario's voor het meenemen van de invloed van indirecte mechanismen, door het gebruik van een semi-probabilistische benadering voor de faalkans per doorsnede of als er geen probabilistisch model beschikbaar is die geschikt is voor de specifieke situatie. In veel gevallen kan dit ook leiden tot een goede inschatting van de gecombineerde faalkans.

Rekenkundig combineren kan op verschillende manieren:

- Combineren van scenario's.
Scenario's worden vaak gebruikt om het effect van indirecte mechanismen of om mogelijke verschillende grondsamenstellingen in rekening te brengen. In dit geval wordt de kans bepaald dat een bepaalde (aanvangs)situatie zich voordoet. Voor verschillende situaties wordt een kans bepaald om deze vervolgens naar ratio van de kans van optreden te combineren.
- Combineren onder de aanname van volledige afhankelijkheid.
Als de bijdragen volledig afhankelijk zijn (zoals bijvoorbeeld bij het combineren van vakken voor faalmechanismen die sterk afhankelijk zijn van de waterstand), wordt de gecombineerde kans bepaald door de bijdrage met de grootste kans. De zwakste schakel dus. In de praktijk wordt dit berekend op basis van de doorsnede met de grootste faalkans, vermenigvuldigd met een lengte-effect factor voor het dijktraject.
- Combineren onder de aanname van volledig onafhankelijke stochasten.
Als er juist sprake is van onafhankelijkheid (vaak een goede benadering bij het combineren van vakken voor de geotechnische mechanismen), kunnen alle bijdragen afzonderlijk van elkaar voorkomen en moeten ze dus ook allen worden meegenomen. De ruimtelijke correlatie van de stochasten wordt bij deze rekenkundige methode alleen in rekening gebracht binnen de grenzen van een vak middels een lengte-effect factor.

Als gevolg van deze benodigde vereenvoudiging leveren deze methoden dus altijd een grovere schatting van de gecombineerde kans. Door het maken van een goede afweging voor gebruik van de juiste methode (en de benodigde lengte-effectfactor, zie ook paragraaf 8.1.2) kan echter in veel gevallen ook met deze methoden een goede benadering van de gecombineerde faalkans worden gedaan en is de meerwaarde van een probabilistische analyse beperkt.

8.1.2 *Ruimtelijke correlatie en lengte-effecten*

Bij het combineren van kansen om te komen tot een overstromingskans is het goed meenemen van afhankelijkheden tussen de verschillende faalkansbijdragen van belang. Een belangrijke vorm van afhankelijkheid zijn de ruimtelijke correlaties. Deze zorgen voor het zogenaamde lengte-effect. Het begrip lengte-effect wordt verder uitgelegd in de Technische Leidraad, katern Veiligheidsfilosofie. Bijlage B geeft tevens meer toelichting en achtergrond bij het meenemen van afhankelijkheden bij het combineren van kansen.

Lengte-effecten beschrijven hoe de faalkans van een waterkering toeneemt met de lengte hiervan. Lengte-effecten ontstaan doordat (voornamelijk) sterkte-eigenschappen een korte ruimtelijke correlatieafstand hebben ten opzicht van de ruimtelijke schaal waarnaar wordt gekeken (meestal een vak of traject). Een correlatieafstand geeft aan hoe een stochast over deze lengte vergelijkbaar is en

niet teveel kan verschillen, zoals bijvoorbeeld een waterstand die 100 meter verder niet ineens een meter anders kan zijn. Door kleine correlatieafstanden kunnen er dus meerdere onafhankelijke realisaties zijn de sterkte binnen de beschouwde ruimtelijke schaal. Met als resultaat een toename van de kans met de lengte.

Lengte-effecten zijn vooral significant voor de geotechnische mechanismes die gedomineerd worden door sterkte onzekerheden⁶. Vooral omdat de meeste sterkte eigenschappen relatief kleine correlatieafstanden hebben (bijvoorbeeld, de doorlatendheid van de ondergrond kan om de ongeveer 400m helemaal anders zijn). Bij meer belasting gedomineerde mechanismes is het lengte-effect een stuk minder aangezien de belastingen (zoals de waterstand) vaak correlatielengtes hebben van vele kilometers.

Er wordt vaak onderscheid gemaakt tussen:

1. Lengte-effecten binnen een dijkvak. Deze ontstaan als de sterkte-eigenschappen een kleinere correlatie-lengte hebben dan de vaklengte.
2. Lengte-effecten bij het combineren van dijkvakken tot een trajectkans. Er wordt doorgaans zo geschematiseerd dat de sterkte-eigenschappen tussen dijkvakken onafhankelijk. Daardoor blijft er doorgaans maar een beperkt correlatie tussen vakken over, tenzij de belastingen (die vaak een grote ruimtelijke correlatie vertonen) veel invloed hebben op de faalkans.

8.1.3 *Ontwerpen en beoordelen*

Voor wat betreft de omgang met lengte-effecten is er een verschil tussen beoordelen en ontwerpen.

Bij beoordelen wordt doorgaans een doorsnedekans bepaald, welke met behulp van assemblage in Riskeer eerst wordt gecombineerd tot een faalkans per vak en vervolgens tot een trajectkans. Er zijn, zoals in voorgaande paragrafen beschreven, verschillende mogelijkheden om het lengte-effect daarin mee te nemen.

Bij ontwerpen wordt doorgaans op een doorsnede-eis voor een mechanisme ontworpen:

$$P_{eis,drsn.mech} = \omega \cdot P_{eis,traject} / N_{tr}$$

Hierin geldt:

- | | | |
|----------|---|---|
| N_{tr} | = | Lengte-effect factor van doorsnede naar dijktraject. |
| ω | = | Faalkansbegroting, voor een overzicht van de uitgangswaarden wordt verwezen naar de Handleiding Veiligheidsontwerp. |

8.1.4 *Assembleren en schematiseren*

Er is een sterk verband tussen schematiseren (vooral vakindeling, maar ook parameterbepaling) en de manier waarop het lengte-effect in assemblage kan worden meegenomen. In theorie wordt bij een overstromingskansanalyse de faalkans van een gemiddelde doorsnede bepaald, wat zoveel wil zeggen als dat het een verder statistisch homogeen vak representeert (schematisatie op basis van een andere doorsnede binnen het vak zou tot hetzelfde resultaat leiden). Dit betekent dat bij elke variatie (bijv. kopsloten bij piping) een apart vak moet worden geschematiseerd, en dat doorsnedes niet ongunstig geschematiseerd zijn (zie paragraaf 6.2.2). In de praktijk zijn beide aannames vaak lastig te realiseren.

⁶ Zie bijvoorbeeld het ENW rapport "Piping: realiteit of rekenfout"

Een belangrijk onderscheid is het verschil tussen het gebruik van een (statistisch) gemiddelde doorsnede of een zwakste doorsnede. De meeste theorie en toepassing is gebaseerd op het bepalen van het lengte-effect bij een gemiddelde doorsnede. Het is echter vaak vooraf moeilijk te bepalen wat een gemiddelde doorsnede is. Daarnaast zijn veelal niet alle gegevens voorhanden om een gemiddelde inschatting te maken van de statistische kenmerken van de bepalende parameters. Het kan dan makkelijker zijn om een zwakste doorsnede te bepalen. Hierbij is een zwakste doorsnede de doorsnede met de grootste faalkans, welke niet alleen door sterkteparameters wordt bepaald maar waar ook geometrie en belastingparameters (bijv. strijklengte) een rol spelen. In dit geval kunnen invoerparameters makkelijker worden gerelateerd aan de waarden die in het veld worden gemeten. In het geval er grote zekerheid is dat de zwakste doorsnede bekend is, wordt het lengte-effect dat in rekening moet worden gebracht steeds kleiner ($N = 1$).

8.2 Inschatting van de faalkans per doorsnede

Bij het maken van een eerste inschatting van de overstromingskans wordt gewerkt met verschillende (type) modellen en methoden. Iedere methode levert een resultaat dat kan verschillen zoals aangegeven in paragraaf 7.3.4. In de specifieke handleidingen wordt nader ingegaan op de beschikbare methoden en mogelijke types resultaat.

8.2.1 *Faalkansen inschatten met een semi-probabilistische methode zonder kansschatting*

Voor sommige initiële mechanismen is een semi-probabilistisch model beschikbaar, zonder dat daaruit ook een kansschatting volgt. In dat geval kan op iteratieve wijze toch een faalkans worden bepaald. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de faalmechanismen duinafslag, bezwijken van asfalt- of grasbekleding op het buitentalud of wanneer er sprake is van het falen van een steenzetting.

Het principe van een iteratieve bepaling van de faalkans is dat voor verschillende kansen met behulp van het semi-probabilistische voorschrift wordt bepaald of een kering faalt of niet. Voor iedere kans wordt dan aan de hand van het semi-probabilistische voorschrift rekenwaarden bepaald voor alle stochasten (belastingen en sterkte). Vervolgens wordt met het sterktemodel bepaald of een kering onder die omstandigheden faalt. Door deze kansen efficiënt te kiezen kan na enkele "berekeningen" de range worden aangegeven waarbinnen de faalkans naar alle waarschijnlijkheid gevonden kan worden.

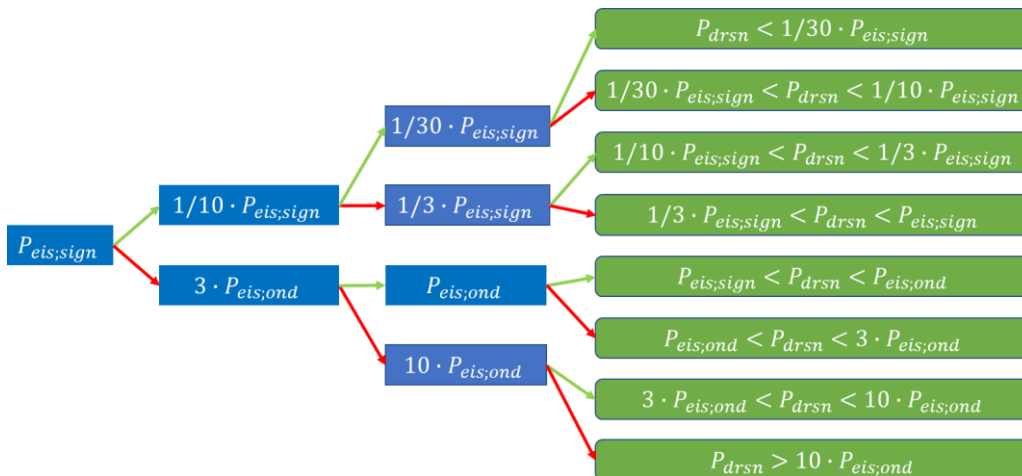
Bij het iteratief bepalen van een overstromingskans kunnen de volgende keuzes worden gemaakt:

1. Binnen welke klassen (ranges) de inschatting van de faalkans voldoende specifiek is.
Deze keuze is onder andere afhankelijk van de gewenste informatie. Voor vakken die niet dominant zijn, is een minder nauwkeurige schatting noodzakelijk dan voor dominante bijdragen aan de overstromingskans. Daarnaast speelt bij het kiezen van de boven- en ondergrens ook de toepasbaarheid van het semi-probabilistisch rekenvoorschrift een rol.
2. Welke kans wordt gebruikt voor de eerste berekening?
Hiervoor geldt dat naarmate deze kans dichter bij de uiteindelijke faalkans ligt, er minder iteratieslagen nodig zullen zijn. Het verdient dus aanbeveling om bij de keuze van de startkans gebruik te maken van het verhaal dat voor deze kering is opgesteld en de reeds beschikbare informatie.
3. Met welke stappen wordt de iteratie doorlopen.

Deze keuzes worden door de beheerder gemaakt op basis van het gewenste detailniveau van de benodigde informatie en de reeds beschikbare informatie. Als voorbeeld kan worden gekozen voor een indeling gerelateerd aan de trajectnorm(en):

- $1/30 \cdot P_{eis;sign}$
- $1/10 \cdot P_{eis;sign}$
- $1/3 \cdot P_{eis;sign}$
- $P_{eis;sign}$
- $P_{eis;ond}$
- $3 \cdot P_{eis;ond}$
- $10 \cdot P_{eis;ond}$
- 1

Als wordt gestart met een kans gelijk aan de signaleringswaarde, kan volgens Figuur 3 via iteraties een inschatting worden gemaakt van de faalkans voor de betreffende doorsnede.



Figuur 3 Voorbeeld van een iteratieschema waarbij met verschillende kansen middels het semi-probabilistisch voorschrift de faalkans van een doorsnede wordt bepaald.

8.2.2 In rekening brengen van vervolgmecanismen middels faalpaden

Wanneer vervolgmecanismen worden beschouwd kan de bijdrage daarvan op de overstromingskans op verschillende manieren in rekening worden gebracht. Een belangrijk hulpmiddel is de beschouwing van de dominante faalpaden. Het combineren van de kansbijdragen van verschillende knopen en met name de omgang met onzekerheden en afhankelijkheden is een onderwerp waar nog veel onderzoek naar wordt gedaan. In deze handleiding worden daarom nog geen handvatten geboden. In Bijlage B is een beschrijving opgenomen van belangrijke overwegingen die daarbij een rol spelen.

8.2.3 In rekening brengen van scenario's

In veel gevallen is er sprake van het mogelijk gebruik van scenario's om bijvoorbeeld indirecte mechanismen in rekening te brengen. De meest gebruikte methode om scenario's in rekening te brengen is door het inschatten van de kans van optreden van ieder scenario (waarbij de kansen samen opgeteld gelijk zijn aan 1.0). Vervolgens kunnen de faalkansen van ieder scenario worden vermenigvuldigd

met de kans van optreden van het betreffende scenario om deze vervolgens te sommeren.

Als voorbeeld worden drie scenario's geschetst met een faalkans en kans van optreden zoals in onderstaande tabel weergegeven.

Scenario	Kans van optreden van een scenario	Faalkans doorsnede gegeven een scenario
Scenario 1	0,2	$1.3 \cdot 10^{(-5)}$
Scenario 2	0,5	$2.6 \cdot 10^{(-6)}$
Scenario 3	0,3	$6.5 \cdot 10^{(-4)}$

De faalkans voor deze doorsnede wordt bepaald als gewogen gemiddelde:

$$P_{drsn} = 0.2 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5} + 0.5 \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} + 0.3 \cdot 6.5 \cdot 10^{-4} = 2.0 \cdot 10^{-4}$$

8.3 Bepaling overstromingskans per vak

Bij het bepalen van de overstromingskans van een dijkvak is het belangrijk om na te gaan in welke mate het lengte-effect een rol speelt. Indien dit niet (of nauwelijks) het geval is, kan worden aangenomen dat de kans berekend voor de gemiddelde doorsnede gelijk is aan de faalkans van het dijkvak. Indien het lengte-effect ook binnen een vak een rol speelt, moet dit worden verdisconteerd.

8.3.1 Wanneer hou ik rekening met correlaties en het lengte-effect binnen een vak?

De mate waarvan sprake is van een lengte-effect binnen een vak wordt vooral bepaald door twee zaken:

1. Betreft de geschematiseerde doorsnede een statistisch homogene of gemiddelde doorsnede van het vak, of is er juist op voorhand duidelijk dat de geschematiseerde doorsnede slechts op 1 locatie voor kan komen en geeft het de zwakste locatie binnen een vak weer? Ook kan het mogelijk zijn dat de geschematiseerde doorsnede representatief is voor slechts een deel van het vak en dat de rest van het vak een relatief beperkte bijdrage levert aan de overstromingskans. Op basis van het antwoord op deze vraag kan het nodig zijn om het lengte-effect in rekening te brengen (representatief voor het gehele vak) of in mindere mate tot niet.
2. Hoe groot is de ruimtelijke variatie van de belangrijkste stochasten/parameters? De waterstand bijvoorbeeld varieert in de praktijk weinig over grotere lengten. Als gevolg daarvan is er binnen een vak in mindere mate sprake van een lengte-effect als het om waterstand gaat (N=1). Geotechnische parameters variëren juist vaker op korte afstand, waardoor de waarde in een andere doorsnede in hetzelfde vak anders zou kunnen zijn. Als gevolg daarvan is het juist wel belangrijk om het lengte-effect binnen een vak in rekening te brengen.

8.3.2 Van kans per doorsnede naar een kans per vak

Bij het in rekening brengen van het lengte-effect gelden de algemene principes zoals beschreven in paragraaf 8.1.1. Dit betekent dat het mogelijk is om een probabilistische benadering te doen. In veel gevallen is het echter ook zeer goed mogelijk om met een rekenkundige / semi-probabilistische benadering tot een goede kansinschatting te komen.

Omdat voor ieder faalmechanisme de mate waarin het lengte-effect speelt verschilt, biedt Riskeer de volgende mogelijkheden om het lengte-effect binnen een dijkvak te verdisconteren:

1. Uitgaande van de uitgangswaarde voor de lengte-effect factor per traject zoals beschreven in paragraaf 8.4.3 (voor geotechnische mechanismen)⁷.
2. Uitgaan van volledige correlatie binnen het vak ($N_{dv}=1$), de vakkans is gelijk aan de doorsnedekans.
3. Handmatig invullen van een faalkans per vak en doorsnede. Dit kan op verschillende manieren tot stand komen. Bijvoorbeeld:
 - a. Door gebruik te maken van dezelfde formule als 1, maar dan met een eigen inschatting van a (gebruik van b als uitgangswaarde is in de meeste gevallen een goede benadering).
 - b. Door een probabilistische analyse uit te voeren voor een vak.

Voor het in rekening brengen van het lengte-effect binnen een dijkvak bij geotechnische mechanismen kan gebruik worden gemaakt van de volgende vergelijking (door Riskeer gebruikt bij mogelijkheid 1, maar ook onderdeel van mogelijkheid 3a):

$$N_{dv} = \max\left(1, \frac{a_{dv}L_{dv}}{b}\right) \text{ en } P_{f,vak} = N_{dv} \cdot P_{f,dsn}$$

Waarin:

N_{dv}	=	Lengte-effect factor van doorsnede naar dijkvak.
a_{dv}	=	Deel van het dijkvak wat gevoelig is voor het mechanisme[-].
b	=	Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject [m]. Voor piping is de uitgangswaarde 300 meter, voor macrostabiliteit 50 meter.
L_{dv}	=	Lengte van het dijkvak zoals ingevoerd door de gebruiker [m].
$P_{f,vak}$	=	Faalkans van het dijkvak [-].
$P_{f,dsn}$	=	Faalkans van de doorsnede [-].

Daarbij moet opgemerkt worden dat de factoren a en b samenhangen met de schematisering en de daarbij gemaakte keuzes, en dat voor de factor a niet zonder meer de waarden kunnen worden gebruikt die de mechanismegevoelige lengte van een dijktraject weergeven, omdat de grondslag onder deze factor strijdig is met de wijze van schematiseren.⁸ Bij bepaling van het lengte-effect binnen een vak is het daarom theoretisch incorrect om gebruik te maken van dezelfde factor (a) als bij bepaling van het lengte-effect binnen een traject. Voor de factor a zal de beheerder daarom vaak een onderbouwde keuze moeten maken. Verdere handleidingen voor het bepalen van de factor a zijn nu nog niet beschikbaar.

Doorgaans wordt het lengte-effect binnen een vak vooral in rekening gebracht voor geotechnische mechanismen. Om het lengte-effect binnen een vak mee te nemen kan een aanname worden gedaan die in lijn is met de schematiseringskeuzes die zijn gemaakt:

- Als de gekozen doorsnede voldoende conservatief is gekozen, geldt $N = 1$ (merk op dat dit wel gedegen onderbouwning vereist t.a.v. het conservatisme i.r.t. ruimtelijke variaties, zie ook paragraaf 6.2.2 (geldt voor alle faalmechanismen)).

⁷ Hierbij moet worden opgemerkt dat deze uitgangswaarde niet zondermeer kunnen worden gebruikt voor het in rekening brengen van het lengte-effect binnen een vak.

⁸De factor a bij macrostabiliteit bedraagt 0,033. Dat zou betekenen dat standaard slechts 1/30^e van een redelijk homogeen dijkvak maatgevend is voor falen.

- Als bijv. bij piping sprake is van enkele kopsloten op een dijkvak, en elders een verwaarloosbare faalkans, dan kan de factor a vakspecifiek worden bepaald zodanig dat deze de mechanismegevoelige lengte van de kopsloten weergeeft. Op soortgelijke wijze kan door middel van de factor a rekening worden gehouden met duidelijke variaties binnen een dijkvak, zonder dat hier direct opknippen noodzakelijk is.
- Als geen onderbouwing kan worden gegeven voor een factor a binnen het dijkvak, geldt $a=1$, en wordt de vakfaalkans bepaald met eerder genoemde formule. Het is dan raadzaam om, zeker bij macrostabiliteit, zowel een boven- als ondergrens te bepalen van de faalkans met en zonder deze opschaling zodanig dat het effect op de berekende overstromingskansen inzichtelijk wordt gemaakt.
- Als $a < 1$ geldt dus dat het dijkvak niet statistisch homogeen geschematiseerd is. Hoewel deze homogeniteit de basis is van veel theorie blijkt uit bovenstaande dat dit vaak niet haalbaar is omdat dit anders zou leiden tot heel veel heel kleine vakken en een grote informatiebehoefte, terwijl het gebruik van vakken waarvoor geldt dat $a < 1$ vaak ook tot goede resultaten leiden.

Tot slot dient te worden opgemerkt dat wanneer wordt gekozen voor het verfijnen van de analyse door faalkansen op doorsnedeniveau te combineren tot een overstromingskans middels Hydra-Ring, in de schematisering wel alle dijkvakken moeten worden opgeknipt op basis van relevante variaties (bijvoorbeeld kopsloten). Binnen Hydra-Ring bestaat niet de mogelijkheid om een gevoelige lengte per vak aan te geven.

In de handleidingen "Overstromingskansanalyse per faalmechanisme" worden nadere handvatten gegeven voor het bepalen van het lengte-effect.

8.4 Bepalen overstromingskans op trajectniveau

8.4.1 *Het combineren vakkansen tot een overstromingskans op trajectniveau*

Om te komen tot een overstromingskans van het dijktraject worden twee stappen gezet:

1. Het combineren van alle kansen per vak of doorsnede per faalmechanisme.
2. Het combineren van de kansen per faalmechanisme tot een overstromingskans.

In beide stappen gelden bij het combineren van kansen dezelfde basisprincipes als benoemd in paragraaf 8.1.1. In veel gevallen zal niet voor ieder vak een probabilistisch bepaalde faalkans beschikbaar zijn. Hoewel het deel waarvoor dat wel het geval is ook probabilistisch gecombineerd zou kunnen worden, blijkt in de praktijk meestal dat één van de rekenkundige manieren om de kansen te combineren tot een realistische faalkans voor het faalmechanisme leidt. Het probabilistisch combineren van de vakken waarvoor dit mogelijk is wordt dan als optimalisatie gezien.

8.4.2 *Combineren tot een faalkans per faalmechanisme*

Bij het combineren van de kansen per vak of doorsnede tot een faalkans per faalmechanisme kan gebruik worden gemaakt van de mogelijkheid om vakken waarvoor ook invloedscoëfficiënten bekend zijn op een probabilistische manier te combineren. Vakken waarvoor dit niet het geval is, zullen op een rekenkundige manier moeten worden gecombineerd. Overigens levert in veel gevallen een rekenkundige combinatie van alle kansbijdragen vaak ook een goede schatting van de faalkans per faalmechanisme.

Bij het rekenkundig combineren moet een keus worden gemaakt om dit te doen op basis van de aanname dat de relevante stochasten volledig wel of juist volledig niet zijn gecorreleerd.

- Volledig gecorreleerd

Indien sprake is van een grote ruimtelijke correlatie van de bepalende stochasten, kan worden gekozen voor het combineren op basis van de aanname dat de vakken volledig zijn gecorreleerd. Dit geldt vaak voor faalmechanismen waarbij bijvoorbeeld de waterstand een belangrijke rol speelt. In dat geval volstaat het om de faalkans van het faalmechanisme gelijk te stellen aan de grootste faalkans *per doorsnede* ($P_{f,i}$) vermenigvuldigd met een lengte-effect parameter (N_{tr}) die de relatie legt tussen de betreffende kans per doorsnede en die per traject voor het beschouwde faalmechanisme.

$$P_f = \max_{1 < i < m} P_{f,drsn,i} \cdot N_{tr}$$

Bepaling van de lengte-effect factor voor het traject (N_{tr}) is afhankelijk van het faalmechanisme en wordt nader beschreven in paragraaf 8.4.3.

- Ongecorrleerd

In dit geval worden alle vakken onafhankelijk van elkaar gecombineerd en is de faalkans voor het faalmechanisme gelijk aan 1 min het product van alle kansen op "niet-falen" (1 min de kans op falen) van de individuele *vakken*

$$P_{f;traject;mech} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{f,vak,i})$$

In dit geval wordt er niet gerekend met een lengte-effectfactor voor het traject.

Het maken van de juiste keuze voor het rekenkundig combineren van de vakken is aan de waterkeringbeheerder. Een goed uitgangspunt dat daarbij kan worden gehanteerd is: als de waterstand dominant is en er dus een grote correlatie is tussen de vakken, dan is de eerste optie waarschijnlijk de beste benadering. In geval de sterkte dominant is en er dus geen/weinig correlatie is tussen de vakken, dan is de tweede optie een betere benadering van de gecombineerde faalkans. In geval golven dominant zijn, dan ligt het aan de lokale situatie. Bijvoorbeeld als het erg bochtig is, is er meer onafhankelijkheid dan bij een rechte dijk.

Binnen Riskeer kunnen de kansen van de verschillende vakken of doorsneden worden gecombineerd tot een faalkans per faalmechanisme. Om dit te faciliteren worden de volgende mogelijkheden aangeboden:

1. Bepaal de trajectfaalkans voor het faalmechanisme op basis van onafhankelijkheid van dijkvakken (Ongecorrleerd).
2. Bepaal de trajectfaalkans voor het faalmechanisme⁹ op basis van de grootste doorsnedefaalkans en de lengte-effect parameter (volledig gecorreleerd).
3. Zelf de trajectkans bepalen. Dit geeft de mogelijkheid om, buiten Riskeer om, de kansen te combineren (bijvoorbeeld op basis van een redenering of een probabilistische analyse met Hydra-Ring) en het resultaat in Riskeer te registreren.

In de praktijk wordt als eerste benadering vaak gekozen voor het rekenkundig combineren van de kansbijdragen. Probabilistisch combineren van (een deel van) de

⁹ Opgemerkt moet worden dat bij (bijna) volledig gecorreleerde faalmechanismen (bijv. Hoogte Kunstwerken en Gras Erosie Kruin- en Binnentalud) de mechanismen samen moeten worden beschouwd.

kansbijdragen kan een nauwkeuriger schatting van de faalkans opleveren, maar vereist wel inzicht in de correlatie en relatieve bijdrage van de verschillende stochasten (en dus ook probabilistische berekeningen per doorsnede en dijkvak).

Probabilistisch combineren op deze wijze is met name een interessante mogelijkheid tot aanscherping van de faalkans per faalmechanisme onder de volgende condities:

- De faalkans van verschillende dijkvakken wordt sterk bepaald door dezelfde (ruimtelijk gecorreleerde) stochast, bijvoorbeeld de belasting, terwijl de aannames in de basisregels van het assembleren iets anders suggereren. Bijvoorbeeld een aantal dijkvakken waar de onzekerheid in de belasting zeer dominant is voor falen door binnenwaartse macro-instabiliteit.
- De faalkansen van verschillende dijkvakken die mogelijk gecorreleerd zijn, zijn van dezelfde orde grootte. Dit laatste is belangrijk, want zelfs wanneer er grote correlatie is tussen dominante onzekerheden, zal bij een groot verschil in doorsnedefaalkansen de aanscherping van het probabilistisch combineren beperkt zijn omdat de zwakste doorsnede domineert.

Tot slot moet worden opgemerkt dat het probabilistisch combineren bij een recent versterkt traject en/of een ontwerpsituatie vaak meer aanscherping zal opleveren dan bij een beoordeling: omdat bij een beoordeling vaak sprake is van enkele (dominante) zwakke doorsnedes zal de invloed van correlatie tussen doorsnedes op de trajectfaalkans minder groot zijn. Omdat bij een ontwerp vaak wordt uitgegaan van vergelijkbare eisen aan doorsnedes zullen na uitvoering van een versterking de faalkansen van doorsnedes van dezelfde orde grootte zijn, met een sterker lengte-effect tot gevolg.

8.4.3 *Lengte-effecten bij verschillende faalmechanismen*

Het meenemen van een lengte-effect bij de vertaling van de vakfaalkansen naar een faalkans per faalmechanisme zoals in de voorgaande paragraaf beschreven heeft tot gevolg dat er verschillende overwegingen zijn waarvan het belang en resultaat verschillen per faalmechanisme:

- Bij de geotechnische mechanismes stabiliteit en piping is de onafhankelijkheid van vakken vaak een goed uitgangspunt. In dat geval hoeft er geen lengte-effect te worden bepaald.
- Bij mechanismen gerelateerd aan falen van de bekleding en erosie van het dijklichaam is het lengte-effect beperkt en wordt alleen bepaald door het aantal onafhankelijke belastingrichtingen (veroorzaakt door bijvoorbeeld een verandering van oriëntatie van de dijknormaal). Als in de toekomst met grotere kritieke overslagdebieten (en meer onzekerheid hierover) wordt gerekend, kan dit veranderen, omdat dan ook de invloed van sterkteparameters met een relatief korte correlatielengte een belangrijker rol zou kunnen gaan spelen.
- Voor de zandige kust wordt doorgaans gerekend met een zwakste doorsnede en is de waterstand de stochast met de meeste invloed. Deze heeft, zeker aan de kust, een grote correlatie. Daarnaast is de profielvorm van het duin van belang. In de praktijk wordt vaak gezocht naar de doorsnede in een vak met het zwakste profiel. Dit zou pleiten voor het gebruik van een lengte-effect factor $N=1$. Om rekening te houden met resterende onzekerheden (en het feit dat niet overal op voorhand de doorsnede met de grootste bijdrage aan de faalkans is aan te geven of andere parameters toch een grotere rol kunnen spelen) wordt in de handleiding voor zandige keringen geadviseerd om als uitgangswaarde te kiezen voor $N = 1,2$.

De bepaling van N_{tr} (voor zowel het ontwerpen als beoordelen) verschilt verder per faalmechanisme en is afhankelijk van verschillende factoren (waaronder de correlatielengte van de meest dominante stochasten). In de specifieke handleidingen wordt nader ingegaan op de bepaling van deze factor. Vooralsnog zijn hiervoor alleen methoden beschikbaar die een eerste grove schatting geven. Deze methoden zijn ook opgenomen in Riskeer en helpen bij het kiezen van een uitgangswaarde voor het in rekening brengen van het lengte-effect (zie Tabel 4).

Faalmechanisme	Lengte-effect parameter N
Piping, stabiliteit binnentalud ¹⁰	$N_{tr} = 1 + a \cdot L_{traject}/b$
Asfalt golfklap	$N_{tr} = \max\{1, L_{traject}/\Delta L\}$
Grasbekleding erosie kruin en binnentalud, Grasbekleding erosie buitentalud, Hoogte kunstwerken	Waarde van N wordt geselecteerd uit een lijst (afhankelijk van het dijktraject)
Steenzettingen	Vaste waarde, $N_{tr} = 4.00$
Piping kunstwerk	Vaste waarde, $N_{tr} = 1.00$
Sterkte en stabiliteit van puntconstructies	Vaste waarde, $N_{tr} = 3.00$
Duinafslag	Vaste waarde, $N_{tr} = 1.20$
Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk	$N_{tr} = 2NA \cdot C$
Andere faalmechanismen	Zelf onderbouwen

Tabel 4 – Bepaling van uitgangswaarden voor het in rekening brengen van het lengte-effect per faalmechanisme.

De formule voor geotechnische mechanismen maakt gebruik van de volgende termen:

- a = Deel van het dijktraject dat gevoelig is voor het mechanisme [-].
- b = Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject [m].
- $L_{traject}$ = Lengte van het dijktraject [m].

Voor de getalswaarden van de factoren a en b wordt verwezen naar de handleidingen van de mechanismes. Hierbij moet worden opgemerkt dat in veel gevallen voor deze mechanismen kan worden uitgegaan van niet-gecorrleerde bijdragen van de verschillende vakken en dat er in dat geval geen noodzaak is om N_{tr} te bepalen (en gebruiken). Voor asfaltbekledingen (AGK) geldt een aanpak waarbij de bijdragende lengte ΔL wordt bepaald. Voor de mechanismen grasbekleding erosie binnentalud (GEKB), buitentalud (GEBU) en hoogte kunstwerk (HTKW) worden realistische waarden voor N_{tr} in een lijst gespecificeerd (meest tussen 1 en 3). De waarden voor steenbekleding (ZST) is gelijk aan $N_{tr}=4$. Voor Piping bij kunstwerken is $N_{tr} = 1$ door de beperkte lengte van het kunstwerk. Voor Sterkte en stabiliteit kunstwerk, puntconstructie (STKWp) is N_{tr} weer iets groter.

8.4.4 Combineren tot een overstromingskans van het dijktraject

Om vervolgens de totale trajectfaalkans te bepalen worden de bijdragen van verschillende faalmechanismen gecombineerd. Hierbij wordt aangenomen dat de verschillende faalmechanismen onderling onafhankelijk zijn en dat dus op dezelfde manier kan worden gecombineerd als met niet-gecorrleerde bijdragen per vak (zie paragraaf 8.4.2). Riskeer biedt geen mogelijkheid om hiervan af te wijken.

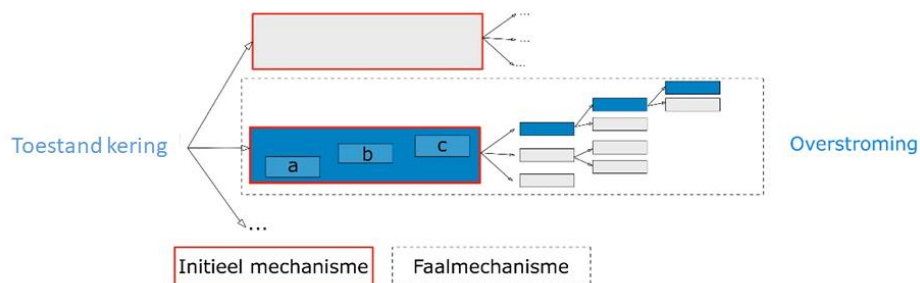
8.4.5 Veiligheidsoordeel bij een beoordeling

¹⁰ Alleen nodig indien de aanname is dat alle vakken gecorrleerd zijn.

Wanneer de overstromingskansanalyse is uitgevoerd conform de leidende principes uit Hoofdstuk 2 kan op basis van de faalkans op trajectniveau een veiligheidsoordeel worden bepaald. Daarbij wordt de faalkans op trajectniveau ingedeeld in één van de categorieën uit Tabel 4.1 zoals opgenomen in Bijlage I.

Bijlage A Begrippenlijst

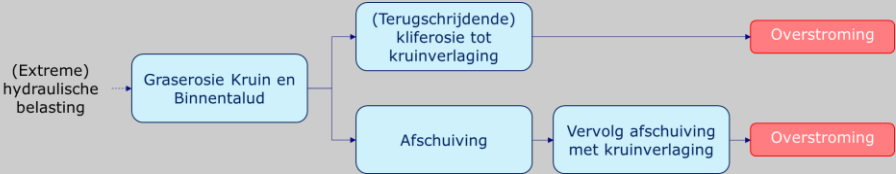
Deze begrippenlijst is hetzelfde als in bijlage I en II van de Regeling primaire waterkeringen 2023.



Figuur 4: Schematische weergave van de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen en (initiële, vervolg) mechanismen

Tabel 5: Begrippenlijst. Voor deze termen is de definitie is contextafhankelijk, geen absoluut begrip. Het betekent dat binnen het beoordelingsproces de term wordt gebruikt met de betreffende definitie. De definities van deze termen zijn uitgewerkt in bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling)

Naam	Omschrijving en voorbeelden
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme. <i>Voorbeeld: gestippelde kader in Figuur 4</i>
Faalpad*	Een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 4 in blauw aangegeven reeks van gebeurtenissen/ mechanismen</i>
Gebeurtenis*	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Een gebeurtenis of knoop geeft de stap in het proces aan (zie ook mechanisme). <i>Voorbeeld: in Figuur 4 zijn a-b-c drie gebeurtenissen binnen het initiële mechanisme (met een rode rand aangegeven)</i>
Mechanisme	Proces van verandering van een toestand naar een nieuwe, opvolgende toestand. Mechanisme wordt gebruikt om de fysica te beschrijven en kan bestaan uit een gebeurtenis of uit een aaneenschakeling van meerdere gebeurtenissen (zie ook gebeurtenis). <i>Voorbeeld: in Figuur 4 zijn mechanismen in blauw aangegeven. Samen vormen ze een faalpad, Het initiële mechanisme in Figuur 4 bestaat uit drie gebeurtenissen.</i>
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in een faalpad <i>Voorbeeld: in Figuur 4 aangegeven met een rode rand</i>
Vervolgmechanismen*	De mechanismen die de initiërende mechanisme opvolgen. Samen leiden ze tot overstroming of falen van de waterkering. <i>Voorbeeld: in Figuur 4 zijn voorbeelden van vervolgmechanismen in een faalpad in blauw aangegeven. De vervolg mechanismen volgen op het met een rode rand aangegeven initiële mechanisme.</i>

<p>Directe mechanismen</p>	<p>Directe mechanismen zijn mechanismen binnen een faalpad die kunnen leiden tot een overstroming en die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van directe mechanismen zijn de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling. Directe mechanismen kunnen ook een vervolgmecanisme zijn. Bijvoorbeeld het optreden van een afschuiving binnentalud na erosie van kruin en binnentalud.</i></p>
<p>Indirecte mechanismen</p>	<p>Indirecte mechanismen leiden niet direct tot falen maar eerder tot een gewijzigde staat van de waterkering. Ze hebben hierdoor invloed op het gedrag van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.</p> <p><i>Voorbeelden van indirecte mechanismen zijn gegeven Tabel 5.2 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling</i></p>
<p>Generieke faalmechanismen</p>	<p>Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke faalmechanismen. De generieke faalmechanismen die worden beschouwd in de overstromingskansanalyse zijn gebundeld rondom de initiële mechanismen in Tabel 5.1 van Bijlage II van de Regeling (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling.</p> <p><i>Voorbeeld van een generiek faalmechanisme gebundeld rond Grasbekleding erosie kruin en binnentalud als initieel mechanisme</i></p> 
<p>Specifieke faalmechanismen</p>	<p>Specifieke faalmechanismen zijn locatiespecifiek. Specifieke faalmechanismen kunnen het gevolg zijn van een optreden van een direct of indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme is het falen van innovaties.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanismen, die het gevolg is van het optreden van een direct mechanisme, is het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie.</i></p> <p><i>Voorbeeld van een specifiek faalmechanisme die het gevolg is van een indirect mechanisme is het falen van een waterkering als gevolg aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding.</i></p>
<p>Scenario</p>	<p>Een scenario beschrijft een mogelijke geometrie of staat van de waterkering die wordt gebruik als uitgangspunt voor een overstromingskansanalyse. Verschillende scenario's kunnen een bijdrage leveren aan de overstromingskans van een waterkering. Een scenario kan onder anderen betrekking hebben op onzekerheden over de ondergrond of op een gewijzigde staat van de waterkering die kan ontstaan na het optreden van een indirect mechanisme.</p> <p><i>Voorbeeld van scenario's bij een overstromingskansanalyse: scenario's voor toestand grasbekleding</i></p> 

Bijlage B Afhankelijkheden bij het bepalen van een overstromingskans

Bij het inschatten van de faalkans per doorsnede wordt gekeken naar het initiële mechanisme en de bijdrage van eventuele vervolgmecanismen. De verschillende knopen in een faalpad kunnen (in theorie) volledig afhankelijk, deels afhankelijk en volledig onafhankelijk zijn. De mate van afhankelijkheid bepaald de relatieve bijdrage van iedere gebeurtenis.

- Wanneer de gebeurtenissen volledig afhankelijk zijn is de kans dat één van de mechanismen optreedt gelijk aan de grootste kans van de individuele gebeurtenissen. De kans dat alle gebeurtenissen optreden is in dat geval gelijk aan de kleinste kans van de individuele gebeurtenissen.
- Wanneer de gebeurtenissen volledig onafhankelijk zijn is de kans dat alle gebeurtenissen optreden gelijk aan het product van de individuele kansen. De kans dat één van de gebeurtenissen optreedt is gelijk aan de som van alle individuele gebeurtenissen minus het product van de individuele gebeurtenissen.
- Wanneer de gebeurtenissen deels afhankelijk van elkaar zijn kan de kans dat één van de gebeurtenissen of de gebeurtenissen optreden worden berekend door correlaties tussen de gebeurtenissen mee te nemen.

In werkelijkheid zijn knopen, faalpaden en faalmechanismen deels afhankelijk van elkaar. Voor het inschatten van de invloed van afhankelijkheden zijn er een aantal opties:

- Het meest eenvoudig is het werken met een onder- en bovengrensschatting. Een ondergrens van de faalkans wordt dan verkregen met het product van de kansen van alle knopen of faalmechanismen, een bovengrens door de kans van de knoop of faalmechanisme met de grootste kans te nemen.
- Een alternatief is om de correlatie tussen knopen dan wel faalmechanismen mee te nemen in een probabilistische analyse. Daarbij kan bijvoorbeeld middels een Monte Carlo analyse een groot aantal trekkingen worden gedaan van alle stochasten, waarvoor telkens wordt bepaald of falen optreedt of niet. Vervolgens kan op basis hiervan de totale faalkans van het faalmechanismen, en van de individuele knopen worden bepaald. Deze methode is tamelijk rekenintensief.
- Binnen Hydra-Ring, het probabilistische rekenhart van Riskeer, is met de Hohenbichler-Rackwitz methode een methodiek voorhanden waarmee grenstoestandsfuncties van verschillende knopen op efficiëntere wijze kunnen worden gecombineerd. Belangrijk aandachtspunt hierbij is dat dit alleen werkt in combinatie met een geschematiseerde statistisch homogene doorsnede. Deze aanpak is echter (nog) niet generiek voor handen voor faalpadanalyses maar in principe goed toepasbaar wanneer de verschillende deelmechanismen kunnen worden gestructureerd in een foutenboom.

Opgemerkt moet worden dat bovenstaand enkele hoofdlijnen zijn gegeven. Het is bijvoorbeeld ook mogelijk om enkel voor een deel van een faalpad waar mogelijk sterke correlatie is een boven- en ondergrens te bepalen, en verder te rekenen met de aanname van onafhankelijke knopen.

Zodoende moeten keuzes worden gemaakt over de manier waarop met afhankelijkheden wordt omgegaan. In onderstaande paragrafen werken we de soorten afhankelijkheden nader uit voor:

1. Afhangelijkheden tussen knopen in een faalpad.
2. Afhangelijkheden tussen faalpaden en faalmechanismen.

Afhankelijkheden tussen knopen in een faalpad

Binnen een faalpad kunnen conditionele kansen van de verschillende knopen variëren omdat het gaat over kansen *gegeven* alles wat eraan vooraf ging. Bij het vaststellen van de conditionele kansen spelen twee verschillende soorten afhankelijkheden een rol:

1. Fysische afhankelijkheid tussen knopen: de uitkomst van een knoop geeft de staat van een kering aan. Daarbij is de fysische uitkomst van de ene knoop cruciaal voor het überhaupt kunnen optreden van het vervolgproces. Een eerste voorbeeld is opbarsten in relatie tot piping: de kans op piping is conditioneel aan het optreden van opbarsten, maar zonder opbarsten is piping niet mogelijk. Concreet: de kans $P(\text{piping}|\text{geen opbarsten}) = 0$. Er is dus sprake van directe afhankelijkheid van de fysische beschrijving van de knopen '(geen) opbarsten' en 'piping'. Een ander voorbeeld is erosie van de grasbekleding op het buitentalud door golfklap, in relatie tot erosie van de onderlagen. Zonder dat de toplaag faalt, kan de onderlaag niet falen ($P(\text{onderlaag faalt}|\text{toplaag faalt niet}) = 0$). Ook hier is sprake van een fysische afhankelijkheid.
2. Afhangelijkheid door gedeelde onzekere parameters: twee verschillende knopen maken gebruik van dezelfde variabele of van twee verschillende variabelen die onderling gecorreleerd zijn. Dit speelt met name een rol bij deelmechanismen die gedomineerd worden door de belasting. Het eerder genoemde voorbeeld van erosie van een grasbekleding is hier ook illustratief voor: omdat dit een cumulatief faalmechanisme betreft (falen is afhankelijk van de belastingduur) is de hoogte van de belasting direct gerelateerd aan falen van de toplaag, en daarmee met de effectieve belasting op de onderlaag (combinatie van golfregime met een bepaalde duur). Een ander voorbeeld is dat een hoge waterstand langs de kust doorgaans gepaard gaat met hoge windsnelheden. Dit kan tot gevolg hebben dat bomen eerder omwaaien, waardoor de dijk beschadigd raakt. Als beide processen (omwaaien van een boom en optreden van een hoge waterstand) onderdeel zijn van één faalpad is het mogelijk relevant om deze afhankelijkheid mee te nemen.

Afhankelijkheden door gedeelde onzekere parameters zullen meestal voorkomen door correlaties tussen belastingparameters in verschillende knopen. Andere voorbeelden zijn:

1. Waterstand en golfhoogte.
2. Golfhoogte en golfperiode.
3. Waterstand en verval waterstand (bij kunstwerken).
4. Waterstand en locatie freatische lijn.

Afhankelijkheden tussen twee of meer faalmechanismen

Ook tussen faalmechanismen kunnen afhankelijkheden zijn. Voor de eenvoud richten we ons hier primair op afhankelijkheden tussen faalmechanismen in dezelfde doorsnede of op hetzelfde dijkvak. Opgemerkt moet worden dat er alleen correlaties zijn tussen verschillende faalmechanismen, en niet tussen faalpaden die onderdeel

zijn van hetzelfde faalmechanisme (de gebeurtenissen moeten elkaar dan immers uitsluiten (zie paragraaf 3.3)). Voorbeelden zijn gegeven in het kader.

Statistische afhankelijkheden (gedeelde onzekere variabelen) tussen verschillende faalmechanismen kunnen van significante invloed zijn op de totale faalkans van het dijktraject. Correlaties tussen faalmechanismen op doorsnede of vakniveau worden veroorzaakt door gedeelde variabelen. Voorbeelden zijn de hydraulische belastingen, maar ook parameters als de doorlatendheid beïnvloeden verschillende faalmechanismen.

De wijze van in rekening brengen is vergelijkbaar met paragraaf de afhankelijkheden tussen knopen: de eerste stap om de invloed in te schatten is door middel van een boven- en ondergrensschatting respectievelijk op basis van de som en het maximum van de faalkansen van verschillende faalmechanismen. Wanneer dit voldoende aanleiding geeft, kunnen in een nadere uitwerking achtereenvolgens de correlatie tussen de belastingparameters, en eventueel ook die tussen sterkteparameters worden meegenomen. Voordeel van enkel de correlatie tussen belastingparameters beschouwen is dat eenvoudig gebruik gemaakt kan worden van 'fragility curves'. Wanneer ook correlatie tussen sterkteparameters moet worden meegenomen zijn Monte Carlo analyse (rekenintensief) of gebruik van Hydra-Ring (nog niet generiek beschikbaar) mogelijk.

Pragmatisch gezien moet worden opgemerkt dat de invloed van correlatie tussen faalmechanismen vaak relatief beperkt zal zijn: wanneer er in een doorsnede of vak bijvoorbeeld drie faalmechanismen een exact gelijke faalkans hebben is het verschil tussen onder- en bovengrens een factor 3.

Meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen

In werkelijkheid komt het niet vaak voor dat op een dijktraject meerdere mechanismen in dezelfde doorsnede ongeveer dezelfde faalkans hebben. Het verschil tussen de onder- en bovengrenzen horend bij (on)afhankelijkheid is dan beperkt. Meenemen van de invloed van correlaties voegt het meeste toe wanneer:

- Er sterke correlatie is tussen sterkteparameters van verschillende mechanismen, bijvoorbeeld de doorlatendheid van het zandpakket kan invloed hebben op zowel piping als binnenwaartse macro-instabiliteit.
- Er sterke correlatie is tussen de belasting bij verschillende mechanismen: dit geldt bijvoorbeeld bij erosie van het buiten- en binnentalud door golfaanval of overslag.

Dergelijke correlaties kunnen, op basis van onderliggende probabilistische berekeningen worden meegenomen met behulp van Hydra-Ring.

Voorbeelden van afhankelijkheden tussen faalmechanismen

- Gedeelde variabelen: de buitenwaterstand speelt een rol bij alle faalmechanismen en dus ook bij erosie binnentalud en bij macro-instabiliteit. Als de waterstand hoog is neemt de kans op optreden van beide mechanismen toe. Er bestaat dus een afhankelijkheid tussen de gebeurtenissen. Omdat de waterstand naar verwachting onderdeel uitmaakt van alle faalpaden is er dus altijd sprake van afhankelijkheid tussen twee faalpaden.
- Correlaties tussen verschillende variabelen in verschillende paden: de grootte van het overslagdebiet is bepalend voor het faalmechanisme "erosie

binnentalud", terwijl de verkeersbelasting van invloed is op het faalmechanisme "macro-instabiliteit". Als er hoge golven over de dijk slaan is het overslagdebiet groot, maar zal de verkeersbelasting juist laag zijn omdat er onder dergelijke omstandigheden (bijna) geen verkeer zal zijn. Het optreden van "erosie binnentalud" heeft op dit onderdeel dus een verlagend effect op de kans op optreden van "macro-instabiliteit".

- Causale afhankelijkheid of interactie: tegelijkertijd zijn er ook redenen waarom het optreden van "erosie binnentalud" juist een verhogend effect heeft op de kans op optreden van "macro-instabiliteit", bijvoorbeeld door infiltratie van het overslaande water en daarmee verzadiging van het binnentalud. En omgekeerd: als macro-instabiliteit optreedt ontstaat er schade aan het binnentalud, waardoor de kans op erosie van het binnentalud toeneemt.



Foto voorzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat - Ruimte voor de Rivier / Ruimte voor de Rivier
Foto achterzijde: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Jan van den Broeke



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Deltares