



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

RWS INFORMATIE

Handleiding overstromingskansanalyse

Datum	juli 2022
Versie	0.8
Status	CONCEPT

DISCLAIMER

Dit document is alleen bedoeld voor de uitvoerbaarheidstoets van LBO2

Achtergrond

Op 1 januari 2023 treedt een nieuwe de ministeriële regeling Veiligheid primaire waterkeringen in werking. Deze regeling bevat de nadere regels voor het beoordelen van de primaire waterkeringen voor de tweede landelijke beoordelingsronde op basis van overstromingskansen (LBO2). De wijzigingen in de regeling ten opzichte van de vigerende regeling voor de LBO1 zijn onderdeel van de doorontwikkeling van het WBI2017 naar het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI).

De wijzigingen van de ministeriële regeling zijn erop gericht om:

1. Het gedrag van de kering centraal te zetten bij het bepalen van overstromingskansen voor de beheersing van overstromingsrisico's en niet de modellen leidend te laten zijn.
2. Beoordelen als integraal onderdeel van het beheer van de kering te zien, en minder als een apart spoor. Dit vraagt een andere manier van denken en werken.

Daarvoor wordt in de tweede beoordelingsronde het instrumentarium gesplitst in een proces- en basisinstrumentarium. Het procesinstrumentarium bevat het proces en de randvoorwaarden voor het uitvoeren van een beoordeling en veiligheidsonderzoek van een verbetermaatregel. Dit deel van het instrumentarium wijzigt niet gedurende de beoordelingsperiode. Het basisinstrumentarium bevat de inhoudelijke instrumenten waarmee een overstromingskans kan worden bepaald. Met een jaarlijkse release van het instrumentarium worden gebruikservaringen, nieuwe kennis en inzichten toegevoegd, waardoor het mogelijk wordt continu een actuele en realistische overstromingskans te bepalen, gebaseerd op de nieuwste kennis.

Reorganisatie

Om de wijzigingen in de ministeriële regeling en de nieuwe manier van denken en werken te ondersteunen, vindt een reorganisatie van het "papier" instrumentarium plaats, die moet leiden tot een vernieuwde set handleidingen. Deze reorganisatie omvat meer dan alleen het verplaatsen van teksten. De veranderingen in de handleidingen ondersteunen de andere denk- en werkwijze die onder andere wordt omschreven in de hierboven genoemde wijzigingen. Ook als de modellen ongewijzigd blijven is de beschreven aanpak anders.

Deze reorganisatie is in volle gang en de verwerking van de voorgenoemde wijzigingen worden steeds concreter en completer. Ze zijn echter nog niet volledig. Daarom is gekozen om in de uitvoerbaarheidstoets slechts enkele onderdelen van het basisinstrumentarium beschikbaar te stellen om inzicht te geven in de opbouw van het instrumentarium. Een van deze onderdelen is de concepthandleiding Overstromingskansanalyse. Deze handleiding is onderdeel van het basisinstrumentarium, maar is in feite de koppeling tussen het proces- en het basisinstrumentarium.

Voorziene wijzigingen

Ten opzichte van de conceptversie van deze handleiding zijn de volgende veranderingen voorzien:

- De uitvoerbaarheidstoets leidt voor een aantal onderdelen die in deze handleiding worden beschreven tot een nadere uitwerking, die wordt verwerkt in een volgende versie van de handleiding.

- Afhechting van lopende, inhoudelijke discussies, bijvoorbeeld de vorm en functie van de duidingscategorieën.
- Consistentie en volledigheid in de handleidingen, bijvoorbeeld voor indirecte mechanismen en werken met scenario's (wat staat in deze handleiding en wat in de handleidingen per faalmechanisme).

Inhoud

1	Inleiding	7	
1.1	Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)	7	
1.1.1	Procesinstrumentarium	7	
1.1.2	Basisinstrumentarium	8	
1.2	Doel handleiding	9	
1.3	Samenhang binnen een overstromingskansanalyse	9	
2	Leidende principes	11	
2.1	Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief		11
2.2	Een geloofwaardige overstromingskans	12	
2.3	Het systeemgedrag staat centraal	13	
3	Basisbegrippen	14	
3.1	Faalmechanismen, faalpaden, mechanismen en gebeurtenissen		14
3.2	Directe en indirecte mechanismen	15	
3.3	Generieke en specifieke faalmechanismen	15	
3.4	Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden		17
3.4.1	Gebeurtenissenbomen	17	
3.4.2	Foutenbomen	19	
3.4.3	Gebeurtenissenboom versus foutenboom		19
4	Overstromingskansanalyse als basis voor het beheersen van het overstromingsrisico	21	
4.1	Overstromingskansanalyse als onderdeel van de actieve zorgplicht van de beheerder		21
4.1.1	Monitoring als onderdeel van de algemene zorgplicht	21	
4.1.2	Aanleidingen voor een (gedeeltelijke) herbeoordeling	22	
4.1.3	Overstromingskansanalyse bij ontwerp	22	
5	Systeembegrip door het verhaal van de kering	23	
5.1	De kering in zijn context – de basis van het verhaal van de kering		23
5.1.1	Beschrijving van de waterkering (dijk/duin/kunstwerk)	24	
5.1.2	Beschrijving van geologie en geohydrologie	24	
5.1.3	Beschrijving van het hydrologische en hydraulische systeem	25	
5.1.4	Kennis en ervaring van de beheerder	26	
5.2	Van het verhaal naar overstromingskans	26	
6	Principes van het schematiseren	28	
6.1	Principes van schematiseren	28	
6.2	Het proces van schematiseren	31	
6.2.1	Selectie en analyse van relevante en dominante faalpaden	31	
6.2.2	Opstellen van een vakindeling en keuze van een representatieve doorsnede	32	
6.2.3	Het schematiseren van de representatieve doorsnede	33	
6.2.4	Gevoeligheids- en hoekpuntenanalyses	33	
6.2.5	Actualiseren schematisering op basis van nieuwe informatie	35	
7	Uitvoeren van een overstromingskansanalyse	36	
7.1	Procesmatige invulling van een overstromingskansanalyse	36	
7.2	Selecteren van relevante faalmechanismen	37	
7.3	Analyse van relevante faalmechanismen op basis van initiële mechanismen	38	

7.3.1	Bepalen hydraulische belasting	38
7.3.2	Bepaling overige belastingen	38
7.3.3	Bepaling faalkans	38
7.3.4	Mogelijke uitvoer op doorsnedeniveau	39
7.4	Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau	41
7.4.1	Bepaling faalkans per faalmechanisme per doorsnede	41
7.4.2	Vertaling naar trajectfaalkans en gebruik van duidingsklassen	41
7.4.3	Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau	41
7.5	Vervolganalyse dominante faalpaden	42
7.5.1	Aanscherping 1: Uitwerken van vervolgprocessen	42
7.5.2	Aanscherping 2: Verfijndere uitwerking initieel mechanisme en/of vervolgmechanismen	43
8	Bepalen van de overstromingskans op trajectniveau	44
8.1	Afhankelijkheden tussen faalpaden en gebeurtenissen	45
8.1.1	Afhankelijkheden tussen knopen in een faalpad	46
8.1.2	Afhankelijkheden tussen twee of meer faalmechanismen	47
8.1.3	Aanscherping 3: meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen	47
8.2	Bepalen overstromingskans op trajectniveau	48
8.2.1	Ruimtelijke correlaties bij dijktrajecten	48
8.2.2	Omgaan met het lengte-effect binnen een dijkvak	48
8.2.3	Assembleren van faalpaden op vakniveau tot een overstromingskans op trajectniveau	50
8.2.4	Aanscherping 4: Probabilistisch combineren van faalmechanismen op trajectniveau	51
8.2.5	Veiligheidsoordeel bij een beoordeling	51
Bijlage	Begrippenlijst uit Bijlage XXXIIA	53

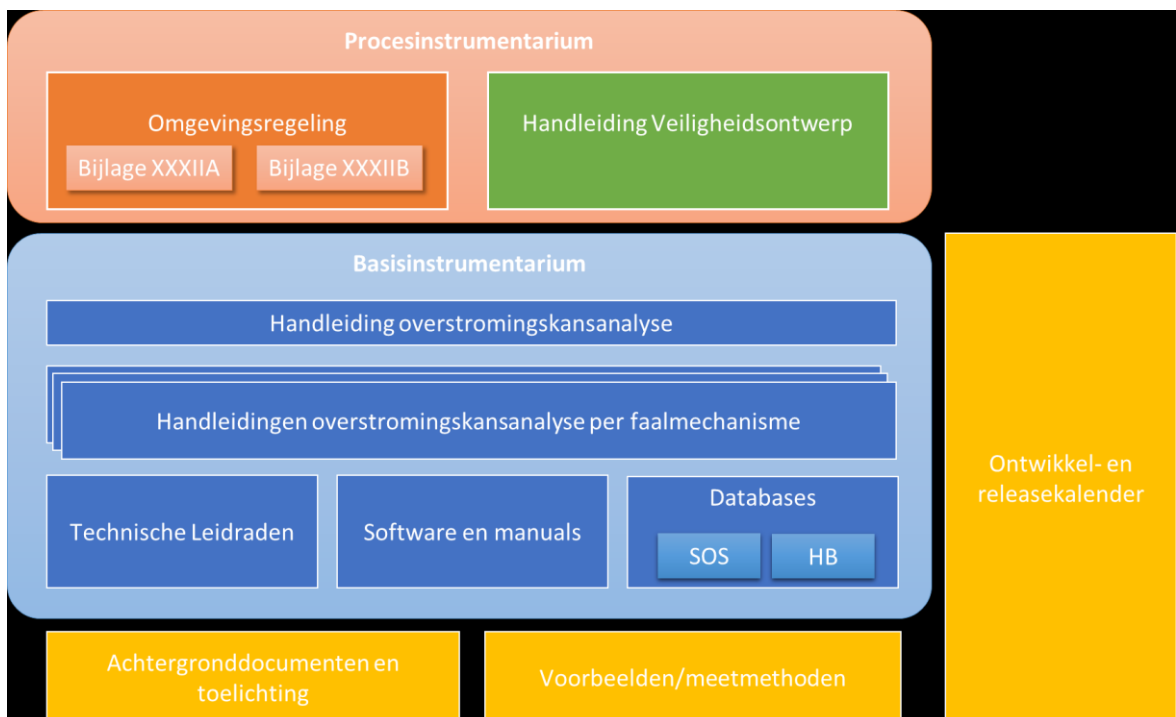
1 Inleiding

Om overstromingsrisico's te beheersen wordt de waterveiligheid continue gemonitord. Door de beheerder van waterkeringen wordt de impact van activiteiten rondom de waterkering en in het watersysteem op de overstromingskans continue bepaald. Indien nodig worden maatregelen genomen.

Voor het beheersen van overstromingsrisico's is inzicht in de overstromingskans nodig. Voor het bepalen van de overstromingskans, het ontwerp van maatregelen en het beheer van primaire waterkeringen stelt het Rijk een Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium beschikbaar.

1.1 Het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI)

Het Rijk stelt de regels voor het uitvoeren van de beoordeling op en stelt leidraden beschikbaar voor het ontwerp en het beheer van primaire waterkeringen. Onder het beheer van een waterkering wordt het geheel van activiteiten verstaan dat erop gericht is de bestaande kering zijn functies duurzaam te laten vervullen. In de praktijk gebeurt dit door het beschikbaar stellen van het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI).



Figuur 1 Overzicht proces- en basisinstrumentarium BOI.

Het BOI bestaat uit proces- en basisinstrumenten.

1.1.1 Procesinstrumentarium

Voor het beoordelen bestaat het procesinstrumentarium uit twee bijlagen bij de Omgevingsregeling:

Bijlage XXXIIA (Procedure beoordeling primaire waterkeringen)

Deze bijlage beschrijft de te volgen procedure in de beoordeling van een dijktraject. Tevens zijn de eisen aan de rapportage opgenomen.

Bijlage XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling primaire waterkeringen)

In deze bijlage worden de randvoorwaarden beschreven voor het bepalen van de overstromings- of faalkans van een dijktraject.

Voor het ontwerpen bestaat uit procesinstrumentarium uit de Handleiding Veiligheidsontwerp. Deze handleiding biedt ondersteuning en toelichting bij de keuzes die rondom waterveiligheid moeten worden gemaakt in het ontwerpproces van het definiëren van de dijkversterkingsopgave in de trajectaanpak tot 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 dijktraject te bepalen. In onderstaande figuur is deze indeling weergegeven.

Handleidingen

De handleidingen ondersteunen bij het uitvoeren van de analyses om de overstromingskans van een dijktraject te bepalen, voor zowel 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 worden geacht om de overstromingskans te bepalen.

De voorliggende handleiding Overstromingskansanalyse sluit aan bij de stappen van de beoordeling zoals deze worden beschreven bij de in Bijlage XXXIIA (Procedure beoordeling) bij de Omgevingsregeling en op de keuzes die in de Handleiding veiligheidsontwerp worden beschreven.

De invulling van een overstromingskansanalyse per faalmechanisme, staan beschreven in de Handleidingen overstromingskansanalyse per faalmechanisme. Deze handleidingen beschrijven hoe van grof naar fijn en vanuit de context van de waterkering de overstromingskans per faalmechanisme kan worden bepaald, conform de leidende principes die in deze handleiding zijn beschreven. Figuur 2 geeft een overzicht van de verschillende handleidingen die binnen BOI programma zijn opgesteld.



Figuur 2 Overzicht van verschillende handleidingen

Technische leidraden

Technische leidraden bevatten informatie over de sterkte van (onderdelen van) waterkeringen en de belastingen die kunnen voorkomen op een waterkering. Ook gaan de technische leidraden in op de (faal)mechanismen van de verschillende typen waterkeringen en wordt informatie geboden over de verschillende rekenmodellen om deze (faal)mechanismen te berekenen. De Technische leidraden zijn te vinden op [Technische leidraden - Technische Leidraden \(iplo.nl\)](#)

Software en databases

Het BOI bevat ook modellen, applicaties en databases die kunnen worden gebruikt om de overstromingskans te berekenen. Het betreft generieke modellen waarvan de toepasbaarheid per situatie moet worden gemotiveerd. Locatiespecifieke modellen zijn veelal geen onderdeel van het BOI. Een bijzondere applicatie betreft Riskeer. Riskeer is de user interface voor overstromingskansanalyses op trajectniveau. Riskeer voegt de resultaten van de verschillende faalmechanismen samen tot een inschatting van de overstromingskans van het dijktraject. De databases bevatten de hydraulische belastingen voor de verschillende watersystemen en de scenario's voor de schematisering van de ondergrond (SOS).

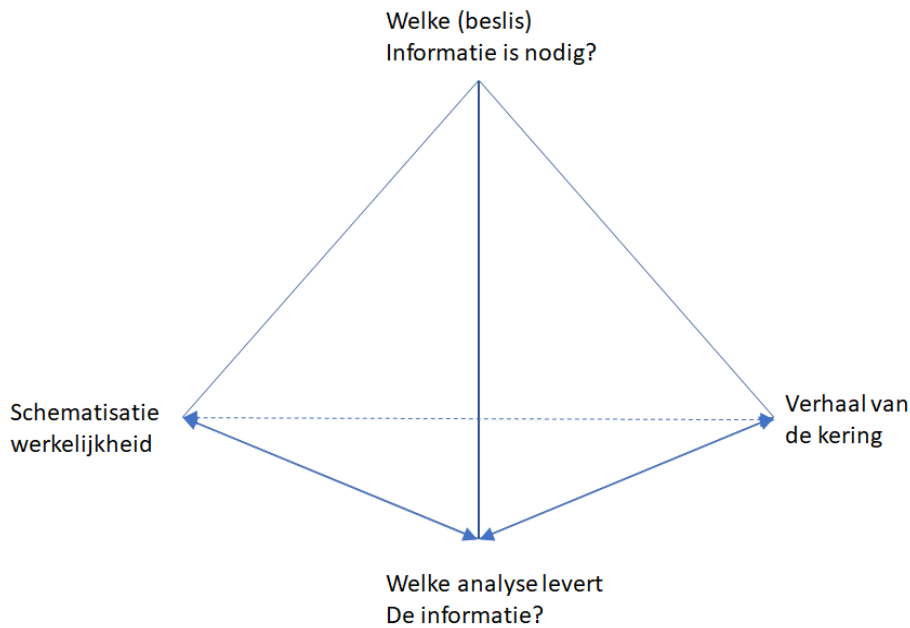
1.2 Doel handleiding

Deze handleiding beschrijft op hoofdlijnen hoe binnen het Nederlandse waterveiligheidsbeleid een overstromingskansanalyse wordt uitgevoerd en welke uitgangspunten daarbij een hoofdrol spelen (leidende principes). De handleiding legt de koppeling tussen het procesinstrumentarium en het basisinstrumentarium.

PM aanvullen

1.3 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 die samen de informatie genereren voor het beoordelen of ontwerpen van een waterkering. Dit is geïllustreerd in Figuur 3.



Figuur 3 Samenhang tussen onderdelen van overstromingskansanalyse en de doelstelling van de analyse

Deze handleiding bevat acht hoofdstukken:

De eerste vier hoofdstukken beschrijven de basis van overstromingskansanalyses. Hoofdstuk 2 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 faalpaden geselecteerd kunnen worden en gaat in op de analyse van de relevante en de dominante faalpaden. 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 stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief.
2. Een geloofwaardige overstromingskans.
3. Het systeemgedrag staat centraal.

2.1 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 dan wel 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 een gering voldoende veilig 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 zal de analyse op onderdelen in meer detail moeten worden uitgevoerd.

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 **Fout! Ongeldige**

bladwijzerverwijzing.) 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).
- 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 er zijn wat onzekerheden niet expliciet meegenomen. Elders is in enkele vakken de overstromingskans ten gevolge van een binnenwaartse macrostabiliteit groter dan de eis op trajectniveau. Door inzet van een geohydrologische analyse wordt onderbouwd dat ook het pipinggevoelige gedeelte van het traject moet worden versterkt. Op deze wijze wordt naast een stabiel trajectoordeel (gedomineerd door stabiliteit binnenwaarts) ook de veiligheidsopgave scherp in beeld gebracht.

2.2 Een geloofwaardige overstromingskans

Overstromingskansen moeten geïnterpreteerd worden als een *degree of belief*: het is de best mogelijke 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).

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. Wat voor een geloofwaardige inschatting nodig is wordt bepaald door het gewenste handelingsperspectief (zie paragraaf Een stabiel eindresultaat en transparant handelingsperspectief). 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, geeft dit uitlegbare resultaten en daarmee vertrouwen en geloofwaardigheid. 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 (bijvoorbeeld langs een rivier) 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. De bepaalde overstromingskans is ongeloofwaardig.

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 vakkniveau 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 XXXIIA (Procedure beoordeling) en Bijlage XXXIIB bij de Omgevingsregeling 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.

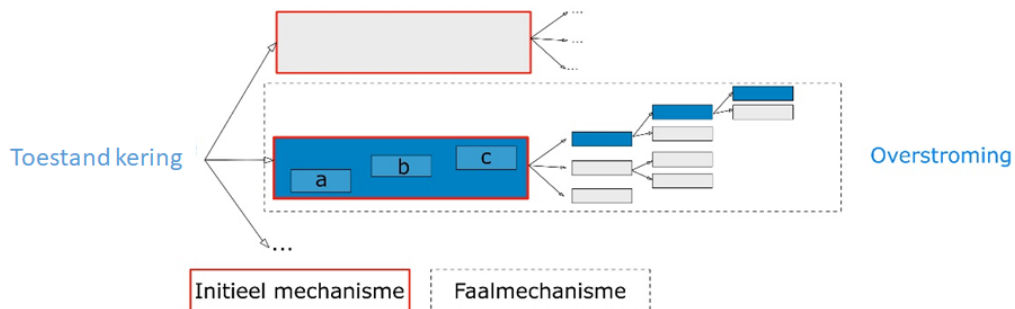
In de paragraaf **Fout! Ongeldige bladwijzerverwijzing.** worden de basisbegrippen faalmechanismen, faalpaden, mechanismen en gebeurtenissen toegelicht, in de paragraaf Directe en indirecte mechanismen het onderscheid tussen directe faalmechanismen en indirecte mechanismen, in paragraaf Generieke en specifieke faalmechanismen 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 – vervolgproces tot falen. Het initiële mechanisme betreft het eerste mechanisme in het faalpad.

In figuur 4 is de relatie tussen faalmechanisme, faalpaden, gebeurtenissen (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.



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

Overstromingskansanalyses worden uitgevoerd uit voor situaties met extreme hydraulische belastingen die, bij falen van de kering, leiden tot een overstroming. Daarbij is het optreden van een extreme hydraulische belasting 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).

3.2 Directe en indirecte mechanismen

In de Omgevingsregeling 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.

3.3 Generieke en specifieke faalmechanismen

Bij overstromingskansanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen generieke en specifieke (faal)mechanismen.

Voor de bepaling van de overstromings- of faalkans worden de generieke faalmechanismen beschouwd die gebundeld zijn rondom de initiële mechanismen in Tabel 1. Zodoende zijn generieke faalmechanismen ook altijd directe faalmechanismen. Bij het selecteren van de relevante faalmechanismen voor een dijktraject kan de uitwerking van de generieke faalmechanismen worden gebruikt die opgenomen is in het Basisinstrumentarium (PM zie 'knopenkaart'),

Tabel 1 Lijst van initiële mechanismen (Tabel 5.1 van Bijlage XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling)

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

Specifieke faalmechanismen zijn vaak locatiespecifiek. Voorbeelden van specifieke directe faalmechanismen zijn het falen van een waterkering als gevolg van het falen van een langsconstructie of het falen van innovaties. In dergelijke gevallen zijn generieke faalmechanismen onvoldoende om het faalgedrag van de kering goed te beschrijven. Specifieke mechanismen worden bepaald op basis van het verhaal van de kering.

Opgemerkt moet worden dat er ook specifieke indirecte mechanismen mogelijk zijn. Te denken valt bijvoorbeeld aan de invloed van ernstige droogte op de kwaliteit van een grasbekleding bij een droogtegevoelige kering. 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 XXXIIB (Randvoorwaarden beoordeling) bij de Omgevingsregeling)

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 windmolens
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

Indien een indirect mechanisme meerdere directe faalmechanismen beïnvloedt en in belangrijke mate de overstromingskans bepaalt, kan ervoor worden gekozen om in de analyse het indirecte faalmechanisme als direct initieel mechanisme te beschouwen en de mechanismen die in eerste instantie als direct faalmechanisme werden beschouwd als vervolgmecanismen – **PM Voorbeeld toevoegen**

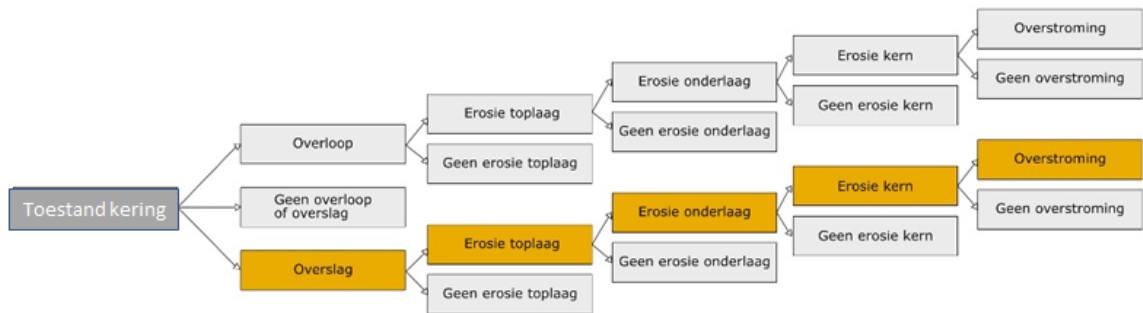
3.4 Gebeurtenissenbomen, foutenbomen en faalpaden

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

3.4.1 Gebeurtenissenbomen

De faalpaden die behoren bij een faalmechanisme vormen samen een gebeurtenissen-boom. Een gebeurtenissenboom, zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** voor een uitgewerkt voorbeeld, bestaat uit een aantal vaste componenten:

1. De boom start met een initiërende gebeurtenis die de trigger is van het faalproces.
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 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 5 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 eigenschappen 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 grote onzekerheden een rol spelen. Een manier om met deze 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.
- Fysieke 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.

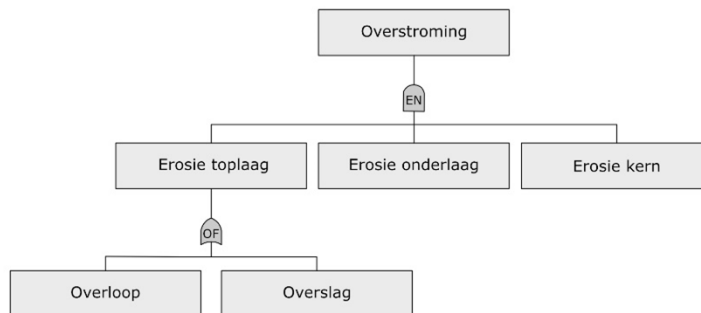
3.4.2 Foutenbomen

Een andere manier om het verhaal van de kering te structureren in gebeurtenissen die tot overstroming leiden is het gebruik van foutenbomen. In Figuur 5 is een foutenboom weergegeven voor hetzelfde faalmechanisme als in Figuur 4.

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 overstromingskansen 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 5 Foutenboom voor een overstroming door erosie van kruin/binnentalud door overloop/overslag

3.4.3 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 overstromingskansen 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 Figuur 4 en Figuur). 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 gediscrètiseerd 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.

Een nadere toelichting op het gebruik van gebeurtenissenbomen en foutenbomen is gegeven in het Katern Veiligheidsanalyse (PM) van de Technische leidraden.

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 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).

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*

PM

5 Systeembegrip door het verhaal van de kering

De kern van een goede 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', een beschrijving van de werking van het systeem (de kering en zijn omgeving).

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.

Het verhaal van de kering is nooit af, 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 De kering in zijn context – de basis van het verhaal van de kering), en hoe dit systeembegrip de basis voor een overstromingskansanalyse vormt (paragraaf Van het verhaal naar overstromingskans).

Voor het opstellen van het verhaal van de kering en het uitvoeren van een overstromingskansanalyse helpt het in het algemeen om met een veldbezoek te beginnen. 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.

5.1 De kering in zijn context – 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 XXXIIA bij de Omgevingsregeling omschreven als het samenhangende geheel van één of meer oppervlaktewaterlichamen en grondwaterlichamen, met bijbehorende bergingsgebieden, waterkeringen en ondersteunende kunstwerken.

Dit maakt dat de beschrijving van het (water)systeem bestaat uit een combinatie van vier onderdelen:

1. Beschrijving van de waterkering.
2. Geologische en geohydrologische analyse.
3. Hydrologische en hydraulische analyse.
4. Kennis en ervaring van de beheerder.

Deze zijn de belangrijkste elementen voor de beschrijving van het systeem in het verhaal van de kering. In navolgende paragrafen zijn deze onderdelen kort toegelicht. Hieronder volgen enkele aandachtspunten voor het opstellen van het verhaal. Voor mechanismespecifieke 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 eigenschappen die in een traject aanwezig kunnen zijn. De eigenschappen van de kering die van belang zijn voor de overstromingskans volgen uit de faalpaden die per faalmechanisme zijn beschreven in de handleidingen per faalmechanisme.

Op basis van de eerdere analyses voor beoordeling en ontwerp is al een beschrijving voorhanden van de waterkering. Wanneer er geen versterkingswerkzaamheden zijn uitgevoerd, kan deze worden overgenomen en geactualiseerd. Daarbij is het van belang autonome ontwikkelingen zoals kruindaling, gebiedsontwikkeling (nieuwe niet waterkerende objecten, NWO's), patronen en opvallende zaken 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 ontwerp- en as-built tekeningen, 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 grondsoorten. 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.

Of deze scenario's relevant zijn hangt per faalmechanisme af van de daarvoor relevante eigenschappen/onderdelen. Dit is per faalmechanisme beschreven in de handleidingen per faalmechanisme.

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 scenario's aan te passen. Ook historische waarnemingen (bijvoorbeeld zandmeevoerende wellen) kunnen hiervoor worden gebruikt.

Naast het aanscherpen van data en informatie moet ook worden gekeken naar nieuwe wetenschappelijke/inhoudelijke 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.

In veel gevallen zijn in het kader van een eerder 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.

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

PM nog aanvullen waar nodig

5.1.3 Beschrijving van het hydrologische en hydraulische systeem

De hydraulische belastingen worden bepaald door rivierafvoeren en stormen. Het gedrag van een rivierafvoer wordt door vele factoren bepaald; deze factoren beïnvloeden de relatie tussen de aanvoer van water (neerslag, sneeuwsmelt, kunstmatige wateraanvoer) en het afvoerloop. Ook het gedrag van stormen wordt door verschillende factoren bepaald (windrichting, stormduur, windkracht).

Met behulp van het Basisinstrumentarium kunnen voor elke locatie 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 XXXIIB.

Echter, vanuit de context van het verhaal van de kering kunnen bijvoorbeeld systeemmaatregelen op langere termijn zorgen voor veranderende hydraulica. Daarbij valt te denken aan bijv. rivierverruiming, veranderende bodemligging of aanpassing van (het sluitregime van) stormvloedkeringen. Het is dus belangrijk om na te gaan in hoeverre de hydraulische belastingen die met het Basisinstrumentarium worden bepaald valide zijn voor het uitvoeren van een overstromingskansanalyse. Met name in de context van ontwerp is het van belang systeemmaatregelen goed in beeld te hebben en de effecten daarvan op het ontwerp minimaal kwalitatief 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 twee 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 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 belasting op de kering. Daarbij zijn onder meer voorland, voorliggende dammen, eventuele vegetatie en het geohydraulische gedrag van ondergrond en dijklichaam van belang.

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 wordt overschreden (bijvoorbeeld macrostabiliteit). In sommige gevallen zal een faalpad bestaan uit een combinatie van beide typen.

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. Tegelijkertijd moet in ogenschouw worden gehouden dat de ervaring van de beheerder doorgaans ten hoogste een periode van 20-30 jaar beslaat, terwijl overstromingskaneisen vaak twee of meer ordes kleiner zijn. Dit maakt kennis van de beheerder van de toestand en gedrag onder normale omstandigheden heel waardevol, maar betekent ook dat de waarde begrenzingen kent en dat een beheerder over falen van de kering bij belastingen met een terugkeertijd kleiner dan eens per 100 jaar moeilijk vooraf kan inschatten.

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 op coherente en gestructureerde wijze worden samengebracht; zodanig dat helder kan worden bepaald welke informatie relevant is, op welke faalmechanismen deze invloed heeft en hoe op basis hiervan een overstromingskansanalyse kan worden uitgevoerd. Concreet betekent dit dat voor elk van de faalmechanismen die zijn opgenomen in Bijlage XXXIIB op kwalitatieve wijze kan worden aangegeven (of en) hoe deze, voor de specifieke context van het dijktraject, kunnen resulteren in een overstroming.

In de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme wordt daarom:

1. Per (generiek) faalmechanisme de faalpaden beschreven die aangeven welke gebeurtenissen na een initieel mechanisme nodig zijn voor een overstroming.
2. Voor alle gebeurtenissen aangegeven welke aspecten vanuit ondergrond, waterkering en belasting bepalend zijn voor het optreden van een overstroming.
3. Beslisregels gegeven waarmee kan worden onderbouwd wanneer een faalmechanisme niet bijdraagt aan de overstromingskans.
4. Instructies gegeven hoe met eenvoudige rekenmodellen een eerste kans van optreden van het initiële mechanisme kan worden bepaald.
5. Handvatten 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 vervolgmechanismen 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.

6 Principes van het schematiseren

Bij schematiseren wordt de beschikbare informatie over de kering geselecteerd, geïnterpreteerd en gecombineerd tot een vereenvoudiging van de werkelijkheid.

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
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 Overstromingskansanalyse 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 een overstromingskans benadering 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.

Omgang met onzekerheid – scenario's

PM Aanscherpen

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, veelal 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.

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 significante 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, et cetera.

De handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme geven een meer specifieke beschrijving van de omgang met scenario's.

Omgaan met onzekerheid – bandbreedtes en kansverdelingen

PM nog aanvullen.

Om een overstromingskans te berekenen wordt gerekend met verwachtingen en bandbreedten. De verwachting is de waarde die een variabele 'gemiddeld genomen' zal aannemen. Het betreft een realistische waarde. De bandbreedte is het verschil tussen de karakteristieke waarden van een variabele die normaal gesproken kan optreden, bijvoorbeeld het verschil tussen de 95%-ondergrens en 5%-bovengrens. Wanneer de bandbreedte groot is, zegt de verwachting niet veel over de werkelijk aanwezige waarde.

Zie ook paragraaf 6.6.

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

Bij het schematiseren is het van belang 'cross-checks' en 'flash backs' 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 dijkmateriaal geschematiseerd wordt als zand, terwijl voor de analyse van macrostabiliteit het dijkmateriaal 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 of 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

Bij de bepaling van overstromingskansen en het dimensioneren van versterkingsmaatregelen bepalen de dominante faalpaden respectievelijk de overstromingskansen en de dimensies. Onderdeel van het schematiseringsproces is daarom de keuze van de relevante en dominante faalmechanismen.

Het selecteren van relevante faalmechanismen gebeurt op basis van het (gestructureerde) verhaal van de kering, paragraaf 4.2.

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 paragraaf 8.3 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 eenvoudiger 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.

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

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 eigenschappen bepalend zijn voor het optreden van een gebeurtenis. De vakindeling wordt gemaakt op basis van deze eigenschappen. Vaak is uit een eerdere beoordeling al een vakindeling beschikbaar als startpunt.

De bijdrage aan de overstromingskans van het dijktraject van een bepaald faalmechanisme is een aggregatie van alle ruimtelijk variërende onzekerheden binnen het dijktraject en hun invloed op de faalkans. Een manier om rekening te houden met de ruimtelijke variabiliteit is het opstellen van een vakindeling.

Theoretisch zou de faalkans van een dijktraject kunnen worden bepaald met het doorrekenen van één representatieve doorsnede, en het meenemen van alle relevante ruimtelijke onzekerheden. Praktisch is dit door de grote hoeveelheid ruimtelijke variaties niet werkbaar, daarom wordt een dijktraject meestal opgeknipt in losse dijkvakken.

Uitgangspunt is 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. Indien hiervan afgeweken wordt moet dit op onderbouwde wijze worden meegenomen bij het verdisconteren van de ruimtelijke onzekerheid (lengte-effecten, zie ook paragraaf 8.2).

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

Hierbij drie aandachtspunten:

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 eigenschappen per faalmechanisme kan verschillen.
2. Of een verandering significant is, en dus leidt tot het opdelen van een vak in meerder 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.

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

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

In een homogeen vak kan iedere willekeurige doorsnede gekozen worden voor het uitvoeren van de analyse van het faalmechanisme – er is immers geen significante variatie binnen het vak (het vak is 'statistisch homogeen').

In de praktijk werken we echter vaak van grof naar fijn. Er kan binnen een vak in eerste instantie, bij een grove indeling, wél significante variatie aanwezig zijn. 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 representatieve doorsnede? Dus: welke doorsnede 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. Het is echter niet op voorhand altijd duidelijk welke doorsnede dat is: dit is afhankelijk is van verschillende variabelen en daarom is het soms nodig om meerdere doorsnedes te analyseren om dit te bepalen. Een goed startpunt is een 'best guess' van de verwachtingswaarde en deze doorsnede te analyseren. 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.

6.2.3 Het schematiseren van de representatieve 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 moeten onzekerheden expliciet worden meegenomen. Om een overstromingskans te berekenen wordt gerekend met verwachtingen en bandbreedten. De verwachting is de waarde die een variabele 'gemiddeld genomen' zal aannemen. Het betreft een realistische waarde. De bandbreedte is het verschil tussen de karakteristieke waarden van een variabele die normaal gesproken kan optreden, bijvoorbeeld het verschil tussen de 95%-ondergrens en 5%-bovengrens. Wanneer de bandbreedte groot is, zegt een analyse op basis van de verwachting minder over de mogelijke range van uitkomsten.

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.

Voor de beoordeling is het belangrijk dat de informatie die hieruit volgt stabiel genoeg is om vervolgpacten, 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 eendoordeel kan worden onderzocht door bij onzekerheden van dominante parameters die reduceerbaar zijn door nader onderzoek, gevoeligheidsanalyses uit te voeren met zowel conservatieve als optimistische inschattingen.

Bij versterkingsprojecten is het 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 zeker is, wordt een ontwerp gemaakt met een bepaalde levensduur. Als in de loop van de tijd blijkt dat een uitgangspunt verkeerd is gekozen heeft dat effect op de levensduur. Wanneer wordt gerekend met een ongunstig klimaatscenario is de kans groter dat de levensduur in werkelijkheid langer is dan wanneer wordt gerekend met een gemiddeld klimaatscenario. 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.

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 een verkeerd, te pessimistisch beeld. Beter is het om in gevoeligheidsanalyses uit te gaan van een basis met realistische 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

Met voldoende begrip van het systeem (op basis van het verhaal van de kering, zie hoofdstuk Overstromingskansanalyse als basis voor het beheersen van het overstromingsrisico

7.2 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 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.

7.2.1 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).

7.2.2 *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:

3. Op welke punten aanvullende informatie leidt tot een scherper beeld?
4. 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.

7.2.3 *Overstromingskansanalyse bij ontwerp*

PM

Systeembegrip door het verhaal van de kering), kan een overstromingskansanalyse worden uitgevoerd. De aanpak is iteratief van karakter: 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.

Hierbij geldt dat niet begonnen wordt met niets –meestal is er een overstromingskansanalyse uit een eerdere beoordeling of versterking beschikbaar. Dit vormt het vertrekpunt voor de analyse. Afhankelijk van het handelingsperspectief van de analyse en/of nieuwe inzichten wordt gekeken welke faalmechanismen nader beschouwd moeten worden.

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 XXXIIA bij de Omgevingsregeling. 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:

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 7.5)
5. Bepalen overstromingskans op trajectniveau (Hoofdstuk 8)

Algemene aandachtspunten bij het geschetste proces:

- Een risico is de zogenaamde *narrative bias* of 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.
- In principe is er vrijheid in de methodiek waarmee een overstromingskans wordt bepaald: dit kan met verschillende typen modellen en op basis van 'expert judgement'. Tegelijkertijd worden in het Basisinstrumentarium specifieke analyses gefaciliteerd, wat het voor de hand liggend maakt om zoveel mogelijk van deze analyses gebruik te maken (bijvoorbeeld probabilistische berekeningen voor erosie kruin- en binnentalud). Een risico bij het toepassen van generieke instrumenten uit het Basisinstrumentarium is dat bepalende locatiespecifieke eigenschappen aan het begin van de analyse onvoldoende worden meegenomen waardoor verkeerde dominante faalpaden worden geselecteerd
- 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.

7.3 Selecteren van relevante faalmechanismen

In de handleidingen Overstromingskansanalyse 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. Opgemerkt moet worden dat de beslisregels in handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme niet perse uitputtend zijn, en dat er op basis van het verhaal van de kering ook locatiespecifiek maatwerk mogelijk is.

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

- 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 geometrie (bijvoorbeeld afschuiven buitentalud bij een hoog voorland, instabiliteit van een zeer flauw binnentalud)
 - Op basis van andere afmetingen (bijvoorbeeld erosie van een kleilaag bij kleine golven)
 - Er is geen steenzetting aanwezig waardoor deze bekleding niet kan falen
- 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 knopenkaarten voor verschillende mechanismen is er ook inzicht 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.

7.4 Analyse van relevante faalmechanismen op basis van initiële mechanismen

7.4.1 *Bepalen hydraulische belasting*

Voor de meeste overstromingen is het optreden van een extreme hydraulische belasting een voorwaarde. Zonder extreme hydraulische belastingen zal bijna nooit een overstroming met catastrofale gevolgen 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 7.5.1.

7.4.2 *Bepaling overige belastingen*

PM

7.4.3 *Bepaling faalkans*

De handleidingen overstromingskansanalyse 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 een zinvolle aanscherping). Echter, wanneer een vervolgmecanisme dominant en bepalend is voor de overstromingskans kan er voor worden gekozen om voor het initiële mechanisme aan te nemen dat het sowieso optreedt (kans = 1), en kan in eerste instantie gefocust worden op het bepalende vervolgmecanisme. 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.

7.4.4 *Mogelijke uitvoer op doorsnedeniveau*

PM toelichting duidingsklassen

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.

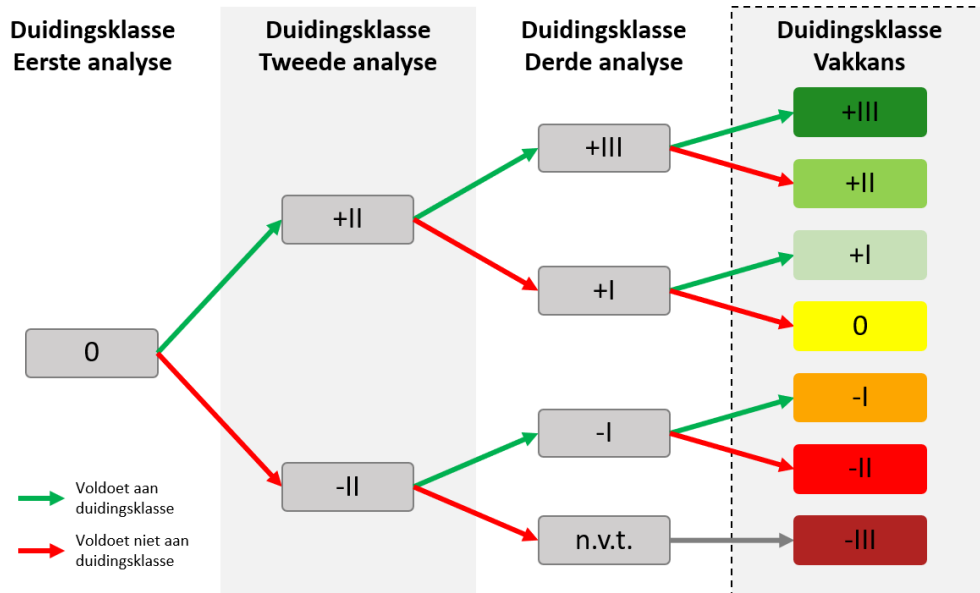
Daarbij onderscheiden we de volgende hoofdroutes voor het bepalen van een doorsnedefaalkans:

- In sommige gevallen 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.
- In sommige gevallen 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 sommige 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. Dan moet door het doen van de analyse met hydraulische belastingen bij verschillende terugkeertijden de orde grootte van de faalkans worden ingeschat. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het semi-probabilistische model voor duinafslag. Voor deze analyse kan worden voortgebouwd op de duidingsklassen (zie kader).
- 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.¹ 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.

¹Belangrijk 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.

Bepaling van de orde grootte van de doorsnede faalkans zonder kalibratierelatie

In drie stappen, zie figuur 7, kan de duidingsklasse van het vak worden bepaald (merk op dat hier is aangenomen dat vakkans en doorsnedekans gelijk zijn). Stapsgewijs kan met de belastingen horend bij een specifieke duidingsklasse in maximaal drie iteraties de duidingsklasse op vakkniveau worden bepaald. De te hanteren randvoorwaarden zijn beschreven in de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme.



Figuur 7 Aanpak voor het inschatten van de faalkans van een vak/doorsnede wanneer een semi-probabilistische berekening niet direct kan worden vertaald naar een faalkans.

Wanneer vervolgemechanismen 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 duidingsklasse/doorsnedefaalkans.

7.5 Bepalen dominante faalpaden op trajectniveau

7.5.1 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 vervolprocessen gelijk gesteld aan 1 en worden faalpaden in eerste instantie als beschouwd.

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		Initiele mechanisme		Vervolgproces 1		Vervolgproces 2	
		P = ...		P _{ini} = ...		P = 1		P = 1
Dijkerosie	Graveri j	P = ...	GEBU	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1	Kruinverlagin g + Bresgroei	P = 1
			GEKB	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
				P _{ini} = ...	Afschuiving	P = 1		P = 1
	Geen graveri j	P = ...	GEBU	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
			GEKB	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1		P = 1
				P _{ini} = ...	Afschuiving	P = 1		P = 1
Macro-stabiliteit binnenwaters			STBI	P _{ini} = ...	Kliferosie	P = 1	P = 1	
Piping			STPH	P _{ini} = ...	Doorgaande pipegroei	P = 1	P = 1	

7.5.2 Vertaling naar trajectfaalkans en gebruik van duidingsklassen

Na vertaling van de doorsnedefaalkansen per faalmechanisme naar faalkansen per faalmechanisme op vakniveau worden de faalkansen geassembleerd tot een overstromingskans op trajectniveau. Daarbij wordt ook de overstromingskans per vak en de overstromingskans per faalmechanisme op trajectniveau bepaald. Deze kunnen worden weergegeven door duidingsklassen (zie paragraaf 7.3.4). Op basis van deze duidingsklassen kan worden bepaald welke faalmechanismen per vak, en over het gehele traject de grootste bijdrage geven aan de overstromingskans. Zodoende vormt dit de basis voor het bepalen van de dominante faalpaden.

7.5.3 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 relevante 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 kennis en modellen continue ontwikkeld 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.

7.6 Vervolanalyse dominante faalpaden

Er zijn verschillende manieren om de bepaalde overstromingskans aan te scherpen door de analyse van de dominante faalpaden. 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.

7.6.1 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.

Tabel 4 PM

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

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 Procesmatige invulling van een). Het inschatten van bandbreedtes kan helpen bij het kwantificeren van onzekerheid over een proces, en het krijgen van gevoel voor de impact van verdere aanscherping (zie ook 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 (zie ook paragraaf 8.1)

PM Aanvullen voor belastingen

7.6.2 Aanscherping 2: Verfijndere uitwerking initieel mechanisme en/of vervolgmecanismen

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 voorzichtige aannames zijn gehanteerd. Denk daarbij aan het definiëren van andere uitvoerpunten voor 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 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.

8 Bepalen van de overstromingskans op trajectniveau

Bij het bepalen van de overstromingskans op trajectniveau moet rekening worden gehouden met afhankelijkheden en correlaties. In de analyses van initiële mechanismen worden eenvoudige aannames gedaan over de afhankelijkheden tussen gebeurtenissen binnen faalpaden, tussen faalpaden onderling, en tussen doorsnedes. Vaak zijn deze aannames behoorlijk accuraat, maar in sommige gevallen zijn aanscherpingen mogelijk die leiden tot een betere inschatting van de overstromingskans op trajectniveau.

In 8.1 gaan wordt nader ingegaan op de afhankelijkheden tussen faalpaden in dezelfde doorsnede, en tussen gebeurtenissen in hetzelfde faalpad. Paragraaf 8.2 gaat in op het bepalen van de overstromingskans op trajectniveau en hoe deze op basis van verschillende beoordelingsresultaten kan worden bepaald. Onderstaand kader beschrijft enkele basisprincipes bij het meenemen van afhankelijkheden.

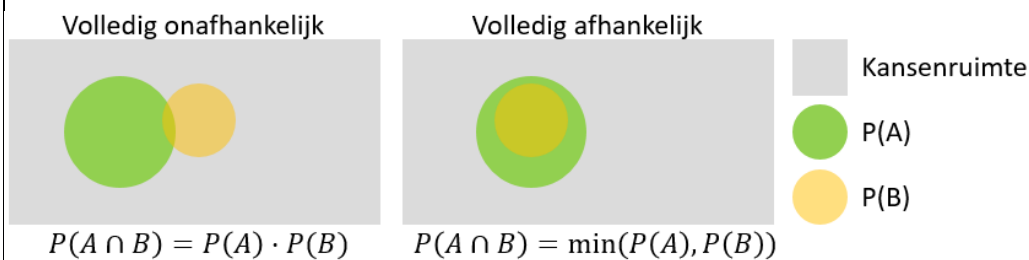
Basisprincipes bij het meenemen van afhankelijkheden

Het meenemen van statistische afhankelijkheden tussen faalpaden in een doorsnede, tussen knopen in faalpaden en tussen dijkvakken werkt volgens enkele basisprincipes, voor specifieke details wordt verwezen naar de Technische Leidraden – Katern Veiligheidsanalyse (PM).

Als eerste wordt een parallelsysteem beschouwd, bijvoorbeeld een faalpad. In een dergelijk systeem moeten alle gebeurtenissen optreden om tot de topgebeurtenis (falen) te komen. Wanneer gebeurtenissen (zeg A en B) volledig onafhankelijk zijn wordt de kans op de combinatie van de gebeurtenissen bepaald middels de formule $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$. Wanneer gebeurtenissen volledig afhankelijk zijn wordt de kans op de topgebeurtenis.

Dit is geïllustreerd in Figuur 8. Merk op dat bij volledige onafhankelijkheid er nog steeds de kans bestaat dat beide gebeurtenissen optreden (deze is wel klein). Gebeurtenissen zijn in dit geval immers niet 'Mutually Exclusive'.² Op basis van de van toepassing zijnde kans $P(A \cap B)$ kan de conditionele kans als volgt worden bepaald:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$



Figuur 8 Illustratie van (on)afhankelijkheid in een parallelsysteem zoals een faalpad.

²Bij mutual exclusion (elkaar uitsluiten), bijvoorbeeld tussen knopen in faalpaden horend bij hetzelfde faalmechanisme, geldt dat de cirkels geen overlap hebben (of het een, of het ander gebeurt).

Wanneer cirkels niet aan een van beide grenzen voldoen, geldt dat de correlatie tussen de parameters kan worden meegenomen met bijvoorbeeld een integrale Monte Carlo analyse of met benaderingsmethoden zoals beschikbaar in Hydra-Ring (zie ook de volgende paragrafen). Op deze wijze kan nauwkeuriger de kans $P(A \cap B)$ worden bepaald.

Afhankelijkheden kunnen ook optreden in een seriesysteem. Daarbij geldt dat als 1 van de elementen faalt de topgebeurtenis van het systeem optreedt (een overstroming). Een voorbeeld van een seriesysteem is een dijktraject met verschillende dijkvakken. Deze dijkvakken kunnen volledig (on)afhankelijk zijn, maar ook deels gecorreleerd. Daarbij geldt dat wanneer dijkvakken volledig (on)afhankelijk zijn de faalkans P_f van een systeem met N onafhankelijke dijkvakken kan worden bepaald middels de formule:

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i})$$

Waarbij $P_{f,i}$ de faalkans van dijkvak i is. Wanneer dijkvakken volledig afhankelijk zijn geldt dat:

$$P_f = \max_{i=1}^N (P_{f,i})$$

Opnieuw geldt dat een boven- en ondergrens vaak inzicht geven in het belang van deze benadering. Indien deze veel invloed heeft op de faalkans kunnen de combinatietechnieken in Hydra-Ring worden benut om tot een betere inschatting van de trajectfaalkans te komen (zie ook paragraaf 8.1.3).

8.1 Afhankelijkheden tussen faalpaden en gebeurtenissen

Gebeurtenissen kunnen volledig afhankelijk, deels afhankelijk en volledig onafhankelijk zijn. Wanneer de gebeurtenissen volledig afhankelijk zijn is de kans dat een van de mechanismen optreedt gelijk aan de grootste kans van de twee individuele gebeurtenissen. De kans dat allebei de gebeurtenissen optreden is in dat geval gelijk aan de kleinste kans van de twee individuele gebeurtenissen. Wanneer de gebeurtenissen volledig onafhankelijk zijn is de kans dat beide gebeurtenissen optreden gelijk aan het product van de individuele kansen. De kans dat een van de gebeurtenissen optreedt is gelijk aan de som van de twee individuele gebeurtenissen minus het product van de individuele gebeurtenissen. Wanneer de gebeurtenissen deels afhankelijk van elkaar zijn kan de kans dat een van beide gebeurtenissen of beide 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 n 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 middels een Monte Carlo analyse een groot aantal trekkingen worden gedaan van alle stochaste, 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. 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 het 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

Voorbeelden van afhankelijkheden binnen faalpaden

[PM]

8.1.1 Afhangelijkheden 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.

8.1.2 *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 3.4)). 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 8.1.1: de eerste stap om de invloed in te schatten is door middel van een boven- en ondergrensschatting 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) mogelijkheden.

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.

8.1.3 *Aanscherping 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.

8.2 Bepalen overstromingskans op trajectniveau

8.2.1 Ruimtelijke correlaties bij dijktrajecten

Niet alleen in de doorsnede is sprake van correlaties (tussen faalpaden en knopen), maar ruimtelijke afhankelijkheid speelt een belangrijke rol bij de uiteindelijke bepaling van de veiligheid van het dijktraject als geheel. Wanneer het falen van dijkvakken volledig gecorreleerd is bepaalt het zwakste dijkvak de overstromingskans van het traject. Wanneer falen van dijkvakken volledig onafhankelijk is, bepaalt de som van de faalkansen de overstromingskans van het traject. Bij het bepalen van de faalkansen per traject onderscheiden we hier twee stappen: het opschalen van een faalkans op doorsnedeniveau naar vakniveau en het combineren van faalkansen van faalmechanismen op individuele dijkvakken tot een overstromingskans op trajectniveau.

8.2.2 Omgaan met het lengte-effect binnen een dijkvak

Voor vakken waarbij de ruimtelijke variatie beperkt is (bijvoorbeeld bij overslag) kan de faalkans van de doorsnede gelijk worden gesteld aan de faalkans voor het dijkvak. Echter, bij piping en macrostabiliteit is er sprake van een sterk lengte-effect, ook binnen het dijkvak. Daardoor kan de faalkans voor een doorsnede niet zonder meer gelijk worden gesteld aan die van het dijkvak.

In theorie wordt bij een overstromingskansanalyse de faalkans van een representatieve doorsnede bepaald, wat zoveel wil zeggen als dat het een verder statistisch homogeen vak representeert. 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). In de praktijk zijn beide aannames vaak lastig te realiseren.

Wanneer er sprake is van een sterk lengte-effect binnen een dijkvak kan dit in rekening gebracht worden met de volgende formule:

$$N_{dv} = \max\left(1, \frac{a_{dv} L_{dv}}{b}\right)$$

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 defaultwaarde 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(skeuzes), 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.³ De factor b is wel bruikbaar als default parameter voor piping en macrostabiliteit. 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:

- Wanneer bekend is dat de gekozen doorsnede conservatief is gekozen hoeft niet te worden opgeschaald van doorsnede naar dijkvakniveau (merk op dat dit wel gedegen onderbouwing vereist t.a.v. het conservatisme i.r.t. ruimtelijke variaties, zie ook paragraaf Opstellen van een vakindeling en keuze van een representatieve doorsnede).
- Wanneer bijv. bij piping sprake is van enkele kopsloten op een dijkvak, en elders een verwaarloosbare faalkans, 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.

³De factor a bij macrostabiliteit bedraagt 0,033. Dat zou betekenen dat standaard slechts 1/30^e van een verder redelijk homogeen dijkvak maatgevend is voor falen.

- Wanneer 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 met en zonder deze opschaling zodanig dat het effect op de berekende overstromingskansen inzichtelijk wordt gemaakt.

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.

8.2.3 Assembleren van faalpaden op vakniveau tot een overstromingskans op trajectniveau

Op basis van de ingeschatte faalkansen voor verschillende doorsneden en vakken (zie paragrafen Bepaling faalkans per faalmechanisme per doorsnede en Omgaan met het lengte-effect binnen een dijkvak) kan per faalmechanisme de faalkans op trajectniveau worden bepaald. Daarvoor geldt de volgende stapsgewijze aanpak:

1. Bepaal de trajectfaalkans voor het mechanisme op basis van onafhankelijkheid van dijkvakken: door middel van formule **XX** kunnen de faalkansen van de dijkvakken worden gecombineerd. Dit is voor faalmechanismen met een groot lengte-effect vaak een accurate benadering.
2. Bepaal de trajectfaalkans voor het mechanisme op basis van de grootste doorsnedefaalkans en het lengte-effect: voor mechanismen met een relatief klein lengte-effect leidt de aanpak onder stap 1 snel tot een overschatting. Daarom wordt ook de faalkans berekend door de grootste doorsnedefaalkans op het traject te vermenigvuldigen met het geschatte lengte-effect, oftewel, door middel van de volgende formule:

$$P_f = \max_{i=1}^j (P_{f,i}) \cdot N_{tr}$$

met

$$N_{tr} = \max\left(1, \frac{a_{tr} L_{tr}}{b}\right)$$

waarbij:

N_{tr}	=	Lengte-effect factor van doorsnede naar dijktraject.
a_{tr}	=	Deel van het dijktraject wat gevoelig is voor het mechanisme [-].
b	=	Lengtemaat die de intensiteit van het lengte-effect weergeeft binnen de mechanismegevoelige lengte van het dijktraject [m].
L_{tr}	=	Lengte van het dijktraject [m].
$P_{f,i}$	=	Faalkans van dijkvak i [-].
P_f	=	Faalkans van het dijktraject [-].
j	=	Totaal aantal dijkvakken

De waarden voor a_{tr} , b en N_{tr} zijn gegeven in de handleidingen Overstromingskansanalyse per faalmechanisme.

3. De te hanteren trajectfaalkans voor een mechanisme is het minimum van de kansen onder stap 1 en 2. Voor mechanismen met een sterk lengte-effect is dat doorgaans de kans uit stap 1, voor mechanismen met een beperkt lengte-effect de bij stap 2 berekende faalkans.

Om vervolgens de trajectfaalkans te bepalen worden mechanismen gecombineerd onder de aanname dat deze onafhankelijk zijn (formule **XX**). Wanneer geen (geïmpliceerde) faalkans kan worden bepaald (bijvoorbeeld in geval van geen (semi-)probabilistische berekening), maar het wel een dominant faalpad betreft, geldt dat eerst een faalkans dient te worden bepaald, alvorens een overstromingskans op trajectniveau kan worden bepaald.

8.2.4 Aanscherping 4: Probabilistisch combineren van faalmechanismen op trajectniveau

Bij het assembleren van faalkansen van doorsnede naar vak naar trajectniveau wordt een aantal aannames gedaan ten aanzien van de (on)afhankelijkheid van mechanismen en doorsnedes. Deze aannames leiden vaak tot redelijk accurate resultaten, maar in sommige gevallen kan het interessant zijn om de correlatie tussen faalmechanismen of tussen vakken onderling expliciet mee te nemen. Dit kan bijvoorbeeld met de in Hydra-Ring beschikbare routines voor het combineren van (grenstoestandsfuncties van) faalmechanismen.

Het combineren van faalmechanismen (zie hiervoor Aanscherping 3: meenemen van afhankelijkheden tussen faalmechanismen) dan wel vakken kan zowel voor een deel als voor het geheel van het traject worden ingezet. Voorwaarde is dat de onderliggende berekeningen ook probabilistisch zijn.

Probabilistisch combineren op deze wijze is met name een interessante aanscherping 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. Zelfs wanneer er grote correlatie is tussen dominante onzekerheden zal bij een groot verschil in doorsnedefaalkansen de winst van het probabilistisch combineren beperkt zijn omdat de zwakste doorsnede domineert.

Tot slot moet worden opgemerkt dat het probabilistisch combineren bij een ontwerpsituatie vaak meer winst 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 systeemfaalkans 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.

8.2.5 Veiligheidsoordeel bij een beoordeling

Wanneer de overstromingskansanalyse is uitgevoerd conform de leidende principes uit Hoofdstuk 2 kan op basis van de combinatie/assemblage van doorsnedes en vakken tot een overstromingskans op trajectniveau een veiligheidsoordeel worden bepaald. Daarbij wordt het dijktraject ingedeeld in één van de categorieën uit Tabel 4.1 zoals opgenomen in Bijlage XXXIIA. De duidingsklassen per faalpad/dijkvak

geven daarbij meer inzicht in de dominante faalpaden en de eventuele veiligheidsopgave indien het dijktraject niet voldoet aan de omgevingswaarde.

Bijlage Begrippenlijst uit Bijlage XXXIIA

Begrip	Begripsomschrijving
Beoordeling	Het bepalen van de overstromings- faalkans van een dijktraject in relatie tot de omgevingswaarde en signaleringsparameter.
Beoordelingsperiode	De periode waarin de beoordelingsregels van de Omgevingsregeling van kracht zijn. De Omgevingsregeling (inclusief bijlagen XXXIIA en XXXIIB) heeft betrekking op de tweede Landelijke Beoordeling op basis van Overstromingskansen (LBO2). De beoordelingsperiode LBO2 is 2023-2035.
Dijktraject	Gedeelte van een primaire waterkering dat afzonderlijk genormeerd is.
Faalkans	Kans op een ongewenste gebeurtenis (falen). In het Besluit kwaliteit leefomgeving (hierna Bkl) wordt de omgevingswaarde van voorliggende waterkeringen uitgedrukt in een 'faalkans per jaar'. Dit is de kans op de ongewenste gebeurtenis dat de kering faalt waardoor de hydraulische belasting op een achterliggend dijktraject substantieel wordt verhoogd.
Faalmechanisme*	De verzameling faalpaden met een gemeenschappelijk initieel mechanisme.
Faalpad*	Een gehele keten van opeenvolgende gebeurtenissen of mechanismen die samen leiden tot een overstroming of falen van de waterkering.
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).
Initieel mechanisme*	Eerste mechanisme in het faalpad
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). Wordt onderscheid gemaakt tussen 'directe mechanismen', die worden veroorzaakt door een (extreme) hydraulische belasting en 'indirecte mechanismen', die betrekking hebben op gebeurtenissen die van invloed zijn op de situatie van de waterkering tijdens een extreme hydraulische belasting.
Omgevingswaarde	Een omgevingswaarde legt de kwaliteit vast voor de fysieke leefomgeving. Voor waterveiligheid zijn de omgevingswaarden waaraan dijktrajecten in 2050 moeten voldoen vastgelegd in het Bkl. De omgevingswaarde voor de meeste dijktrajecten is de maximale toelaatbare 'overstromingskans per jaar'. Voor een aantal dijktrajecten is een andere of aanvullende omgevingswaarde in het Bkl vastgelegd (zie tabel 1.1).
Overstromingskans	De kans op verlies van waterkerend vermogen waardoor het door het dijktraject beschermde gebied overstroomt op een manier waarop en in een mate waarin dat leidt tot dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade.
Plan van aanpak	Plan van aanpak met de strategie voor de beoordeling van een dijktraject

Planning van de beoordeling	De globale planning van de beoordeling van de dijktrajecten in beheer van de beheer.
Signaleringsparameter	Gebuurte term om 'de andere parameter voor de signalering over de veiligheid van een dijktraject' aan te duiden. De monitoring van de omgevingswaarden in relatie tot de signaleringsparameters zorgt ervoor dat tijdig maatregelen kunnen worden getroffen om de veiligheid van de primaire waterkeringen te borgen.
Verslag	De aanbiedingsbrief samen met de rapportage van de beoordeling van een dijktraject die de beheerder uitbrengt aan de minister over de monitoring van de omgevingswaarde.
Vervolgmechanismen*	De mechanismen die de initiële mechanisme opvolgen. Samen leiden ze tot overstrooming of falen van de waterkering.
Watersysteem	Het watersysteem is een samenhangend geheel van één of meer oppervlaktewaterlichamen en grondwaterlichamen, met bijbehorende bergingsgebieden, waterkeringen en ondersteunende kunstwerken.