



## **Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen**



## COLOFON

<b>Titel</b>	Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen
<b>Opdrachtgever</b>	HWBP-De Innovatieversneller   Piping
<b>Auteur(s)</b>	Wim Kanning (Deltares), Stephan Rikkert (Deltares)
<b>Foto omslag</b>	<a href="https://www.timesleader.com/news/local/660713/levee-systems-relief-wells-set-for-inspection">https://www.timesleader.com/news/local/660713/levee-systems-relief-wells-set-for-inspection</a>
<b>Kenmerk</b>	Veiligheidsraamwerk DIV Piping versie 1.1
<b>Inhoudelijke kwaliteitsborging</b>	Deltares, begeleidingsteam
<b>Datum</b>	21-12-2023
<b>Status</b>	V1.1



**De Innovatie  
versneller**

H/WBP voor sterke dijken

## Inhoudsopgave

<b>1 Inleiding</b> .....	<b>7</b>
1.1 Aanleiding en doel .....	7
1.2 Het veiligheidsraamwerk binnen De Innovatie Versneller .....	7
1.3 Totstandkoming versie 1.1 .....	8
1.4 Aansluiting bestaande methodes en praktijk .....	9
1.5 Afbakening en doelgroep .....	9
1.6 Toepassing veiligheidsraamwerk .....	9
<b>2 Veiligheidsraamwerk</b> .....	<b>10</b>
2.1 Begrippen en definities .....	10
2.2 Overzicht aanpak .....	10
2.3 Stap 1: Verhaal van de maatregel .....	11
2.4 Stap 2: Systeemeisen .....	11
2.5 Stap 3: Systeembeschrijving .....	12
2.6 Stap 4: Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) .....	12
2.7 Stap 5. Faalkansanalyse .....	13
2.8 Stap 6. Verificatie .....	13
<b>3 Stap 2 Systeemeisen</b> .....	<b>14</b>
3.1 Overstromingskansen .....	14
3.1.1 Trajecteisen .....	14
3.1.2 Veiligheid onderbouwen .....	14
3.1.3 Overstromingskansen op mechanisme- en doorsnedeniveau .....	14
3.1.4 Faalkansbegroting .....	15
3.1.5 Lengte-effect .....	15
3.1.6 Toepassing overstromingskansen voor pipingmaatregelen .....	16
3.2 Faalkansen in ruimte .....	16
3.3 Faalkansen in tijd .....	17
3.3.1 Lifecyclemonitoring .....	17
3.3.2 Jaarkans, conditionele kans of levensduurkans .....	18
<b>4 Stap 3: Systeembeschrijving</b> .....	<b>19</b>
4.1 Algemeen .....	19
4.2 Fysieke decompositie .....	19
4.3 Functionele decompositie .....	21



<b>5</b>	<b>Stap 4 FMECA</b>	<b>24</b>
5.1	<i>Aanpak onderbouwen veiligheid</i>	24
5.1.1	FMECA voor onderbouwen veiligheid	24
5.1.2	Onderbouwen veiligheid	24
5.1.3	Omgaan met onzekerheid	25
5.1.4	Kennisontwikkeling	25
5.2	<i>De FMECA aanpak</i>	26
5.2.1	FMECA voor overzicht gebeurtenissen	26
5.2.2	Maatregelen	28
5.2.3	Kennisontwikkeling	30
5.3	<i>Gebeurtenissen op basis van systeembeschouwing</i>	30
5.4	<i>Effecten</i>	31
5.5	<i>Kansen</i>	31
5.6	<i>Onderbouwen veiligheid gedurende de levensduur</i>	32
<b>6</b>	<b>Stap 5: Faalkansanalyse</b>	<b>33</b>
6.1	<i>Algemeen</i>	33
6.1.1	Doel	33
6.1.2	Systeemkansen	33
6.1.3	Bronnen	33
6.2	<i>Foutenbomen</i>	33
6.3	<i>Gebeurtenissenboom</i>	36
6.4	<i>Kwantitatieve onderbouwingen kansen</i>	38
6.4.1	Algemeen	38
6.4.2	Opstellen proevenverzamelingen	39
6.4.3	Bestaande kennis en kalibratierelaties	39
6.4.4	Kentallen	39
6.4.5	Uitvoeringscontroles en proefbelastingen	40
6.4.6	Monitoring en herstel	40
6.4.7	Maakbaarheidsproeven	42
6.4.8	Referentieprojecten en ervaring	42
6.4.9	Expert schattingen	42
6.5	<i>Faalkansanalyse</i>	42
6.5.1	Betrouwbaarheid gebeurtenis	43
6.5.2	Betrouwbaarheid systeem	43
6.5.3	Software	43
6.5.4	Schematiseringsfactor	43
6.6	<i>Interacties en correlaties</i>	44
6.6.1	Algemeen	44
6.6.2	Combineren gecorreleerde parallel- en seriesysteem	44
6.6.3	Afhankelijkheid hoogwater	45
<b>7</b>	<b>Stap 6: Verificatie veiligheid</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Bronnen</b>	<b>48</b>



**De Innovatie  
versneller**

HWBP voor sterke dijken

## 1 Inleiding

### 1.1 Aanleiding en doel

Het beoordelen en ontwerpen van reguliere faalmechanismen volgens de overstromingskansbenadering is binnen het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium [1]) redelijk ontwikkeld. In Nederland ligt een groot veiligheidsvraagstuk rondom het faalmechanisme piping. Voor dit vraagstuk worden steeds meer innovatieve oplossingen ontwikkeld om de dijksterkte te vergroten. De fysica bij het toepassen van innovatieve pipingmaatregelen is echter anders. Op dit moment mist er een generiek raamwerk om de veiligheid van innovaties in het algemeen en voor pipingmaatregelen in het bijzonder binnen de overstromingskansbenadering te onderbouwen. Het effect hiervan is dat er een onnodige drempel ontstaat voor het toepassen van innovaties om piping te voorkomen. Te conservatieve keuzes kunnen leiden tot onnodig hoge investeringskosten van maatregelen of deze zelfs onrendabel maken. Andersom kan een onjuiste of incomplete inschatting van de veiligheid ook leiden tot een te optimistisch beeld van het effect van de innovatieve maatregel op de veiligheid.

In deze publicatie is daarom een algemeen veiligheidsraamwerk opgesteld. Dit raamwerk kan worden gebruikt bij het ontwikkelen van innovatieve pipingmaatregelen. Het raamwerk is bedoeld voor het onderbouwen van de veiligheid en geeft de achtergronden voor een veiligheidsanalyse voor ontwerp en beoordeling van een maatregel tegen piping van een waterkerende grondconstructie. Het doel hiervan is enerzijds dat innovatieve maatregelen beter ontworpen en beoordeeld kunnen worden, investeringskosten te beperken en anderzijds dat er uniformiteit in de ontwikkelingen van pipingmaatregelen ontstaat. De verwachting is dat dit raamwerk een bijdrage levert aan een bredere implementatie van innovatieve pipingmaatregelen.

Dit is ingevuld in dit veiligheidsraamwerk door het opzetten van een eenduidige structuur voor het onderbouwen van de veiligheid en het bieden van handvatten om hier invulling aan te geven. Hierbij streven we naar een vergelijkbaar niveau van onderbouwing als voor de traditionele berm als kwelwegverlengende pipingmaatregel: er gelden geen strengere eisen voor innovatieve maatregelen, wel kan het lastiger zijn om de veiligheid te onderbouwen bij gebrek aan ervaring. In deze publicatie worden handvatten gegeven hoe hiermee om te gaan.

De term 'innovatieve pipingmaatregel' wordt in dit veiligheidsraamwerk breed geïnterpreteerd en gaat over alle pipingmaatregelen, waarvan de traditionele bermverlenging al in het BOI [1] is uitgewerkt. Dit gaat dus enerzijds over reeds toegepaste pipingmaatregelen, zoals stalen heaveschermen, anderzijds over nog niet toegepaste maatregelen, zoals Soilmix heaveschermen. Een onderscheid moet worden gemaakt met *beheersmaatregelen*, welke in dit veiligheidsraamwerk worden gebruikt als maatregelen om (ongewenste) gebeurtenissen ten aanzien van de *pipingmaatregel* te ondervangen.

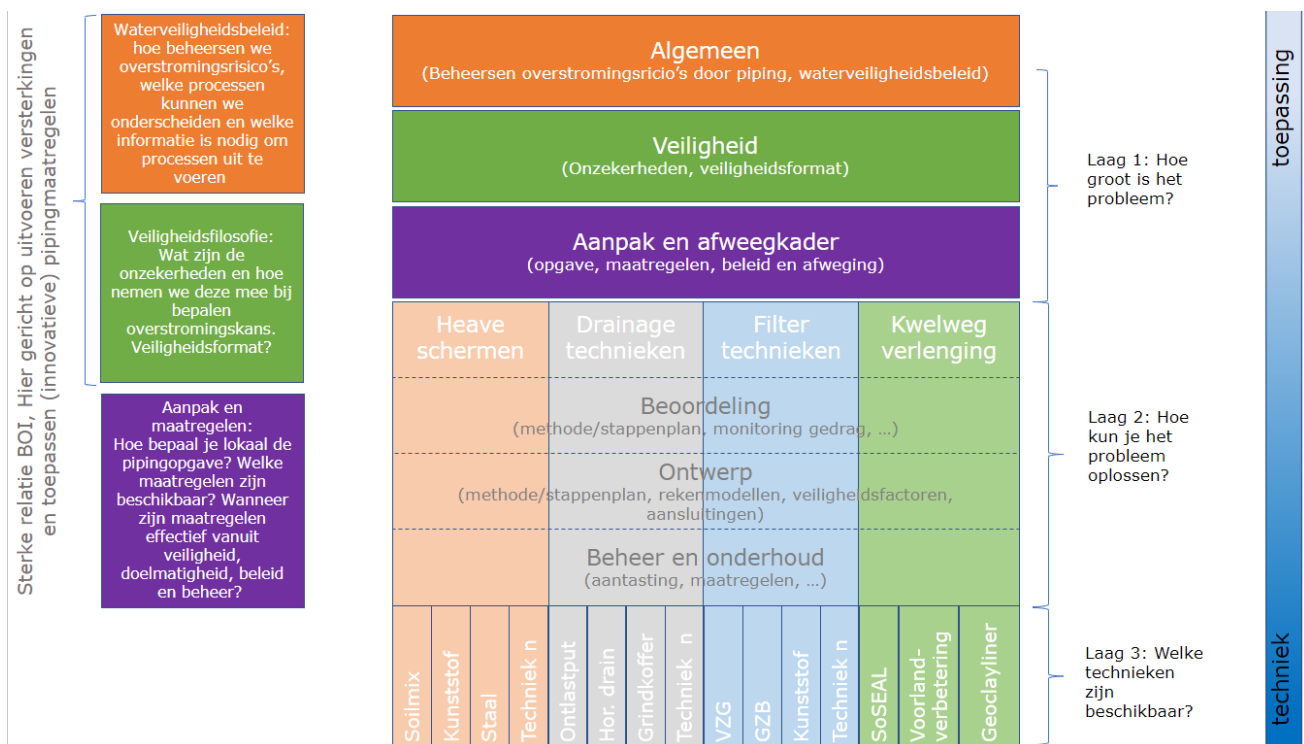
Conform de Waterwet [2] wordt in dit veiligheidsraamwerk de omgevingswaarde uitgedrukt in een overstromingskans. De optredende kans moet lager zijn dan deze overstromingskans die per normtraject is vastgelegd. Om de optredende kans in te schatten, wordt in [1] gebruik gemaakt van modellen die voor de verschillende faalmechanismen zijn ontwikkeld. Hierin worden onzekerheden in sterkte en belasting expliciet meegenomen. Het veiligheidsraamwerk bouwt hier op voort.

### 1.2 Het veiligheidsraamwerk binnen De Innovatie Versneller

Dit veiligheidsraamwerk is opgesteld in het kader van de innovatieversneller (DIV). De Innovatieversneller (DIV) maakt deel uit van de Kennis- en Innovatieagenda van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). DIV stimuleert en versnelt de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het HWBP. De DIV structuur en de plaats van dit veiligheidsraamwerk hierin staan in Figuur 1-1 (groene blok 'veiligheid'). Een van de doelen van dit veiligheidsraamwerk is zorgdragen voor consistentie binnen de DIV publicaties op het gebied van veiligheid. Het is voorzien dat het huidige raamwerk in de toekomst wordt verbeterd en aangevuld op basis van ervaringen met de toepassing ervan. Het veiligheidsraamwerk

volgt direct op de aanpak en biedt de basis voor het afweegkader en de onderliggende publicaties en Ontwerp-, Beoordeling-, en OnderhoudsRichtlijn (OBOR's, onderste rij in Figuur 1-1).

Het veiligheidsraamwerk dient als basis van de DIV publicaties Heaveschermen [3] en Filtertechnieken [4], en kan ook worden gebruikt voor de publicaties Kwelwegverlenging en Drainagetechnieken. De inhoud van dit veiligheidsraamwerk is afgestemd met de trekkers van de publicaties Heaveschermen en Filtertechnieken. Daarnaast is het veiligheidsraamwerk de basis voor de onderliggende OBOR's. Verder is het raamwerk afgestemd met projecten zoals heaveschermen bij dijktraject Gorinchem-Waardenburg (GOWA), ProLock voor Salmsteke (onderdeel Sterke Lekdijk), SoSeal voor Sterke Lekdijk en Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) bij Zwolle-Olst om enerzijds een zo uniform mogelijke toepassing te krijgen en anderzijds het raamwerk te testen, aan te vullen en aan te scherpen. Aangezien de verschillende projecten veelal voorliepen op de ontwikkeling van het raamwerk, zal niet alles perfect op het raamwerk aansluiten.



Figuur 1-1 Structuur DIV piping. Het veiligheidsraamwerk zoals beschreven in deze publicatie is het groene blok 'veiligheid'.

### 1.3 Totstandkoming versie 1.1

Dit veiligheidsraamwerk is opgesteld door Wim Kanning en Stephan Rikkert, beiden van Deltares. Zij zijn ondersteund door een begeleidingsgroep bestaande uit experts op veiligheidsgebied: Ruben Jongejan (Jongejan RMC), Wouter Jan Klerk (Deltares). Kwaliteitsborging vindt in eerste instantie plaats via de interne kwaliteitsborging van Deltares, de begeleidingsgroep en binnen DIV. Daarnaast zijn het Adviesteam Dijkontwerp (AD) en het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) om advies gevraagd. Welke in beide gevallen positief waren. De opmerkingen van het AD zijn verwerkt in deze versie 1.1. De opmerkingen van het ENW zijn [hier](#)<sup>1</sup> gepubliceerd en ook verwerkt in dit document.

Dit veiligheidsraamwerk betreft versie 1.1. Deze is zo goed mogelijk toepasbaar gemaakt voor de voorziene technieken. Toekomstige ervaringen en meer voorbeelden worden zo nodig in het document verwerkt.

<sup>1</sup> <https://www.enwinfo.nl/adviezen/advies-div-publicaties-obor-vzg/>



#### **1.4 Aansluiting bestaande methodes en praktijk**

Een belangrijk uitgangspunt bij het opstellen van dit veiligheidsraamwerk was om zo goed als mogelijk aan te sluiten bij bestaande methodes en gangbare praktijken. Maatregelen voor piping (maar ook voor andere faalmechanismen) kunnen doorgaans niet binnen de bestaande modellen worden geïmplementeerd. Daarom is maatwerk nodig. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van elementen uit de Prestatiegestuurde Risicoanalyses (PRA) van Rijkswaterstaat [5] welke voor gestructureerde risicoanalyses voor infrastructuurprojecten wordt gebruikt. Dit sluit ook aan bij wat gangbaar is voor waterkerende kunstwerken [6] en wat internationaal gangbaar is in bijvoorbeeld de procesindustrie.

De normen (overstromingskansen) en technieken om te onderbouwen dat hieraan wordt voldaan volgen rechtstreeks uit het BOI (Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium) [7]. Het raamwerk in dit document sluit ook zo goed mogelijk aan bij de Handreiking Overstromingskansanalyse [8] welke een onderdeel van het BOI is. Ook de filosofie van het BOI, zoals het redeneren vanuit het verhaal van de kering, wordt zo veel mogelijk gevolgd.

#### **1.5 Afbakening en doelgroep**

Het veiligheidsraamwerk is ontwikkeld voor (innovatieve) pipingmaatregelen toegepast op groene dijken (waterkerende grondlichamen). Hier zijn de voorbeelden in kaders ook voor gekozen. Het raamwerk is alleen van toepassing op groene dijken, andere waterkeringen zoals waterkerende kunstwerken vallen buiten de scope.

Er wordt enkel gekeken naar de effecten op waterveiligheid. Effecten van een maatregel op het milieu en de omgeving worden buiten beschouwing gelaten. Naast eisen aan veiligheid zijn er ook overige eisen aan innovaties, zoals bruikbaarheidsgrenstoestandseisen. Deze zijn belangrijk binnen projecten, maar vallen buiten de scope van het veiligheidsraamwerk en worden in de publicatie Afweegkader behandeld. In de publicatie Afweegkader (Figuur 1-1) wordt ook ingegaan op overige ontwerp- en beheervraagstukken zoals uitbreidbaarheid, kosten en monitoring.

Het veiligheidsraamwerk is ontwikkeld voor iedereen die bezig is met het toepasbaar maken van innovatieve pipingmaatregelen. Primair gaat het hierbij om ontwerpers, maar ook om personen en organisaties die hier in bredere zin bij betrokken zijn. Bijvoorbeeld bij de goedkeuring, toepassing, beoordeling, beheer en onderhoud van deze maatregelen.

#### **1.6 Toepassing veiligheidsraamwerk**

In de publicaties en de ontwerp- en beoordelingsrichtlijnen (OBOR's) is dit veiligheidsraamwerk herkenbaar toegepast en onderbouwd hoe aan de veiligheidseisen wordt voldaan. Hierbij worden in de publicaties achtergronden gegeven en worden de OBOR's gebruikt voor het ontwerp. De zogenaamde FMECA in het veiligheidsraamwerk (zie hoofdstuk 5) geeft hierin een overzicht van alle gebeurtenissen die mogelijk effect hebben op de veiligheid en hoe de veiligheid door elke gebeurtenis wordt beïnvloed. Sommige gebeurtenissen kunnen relatief eenvoudig worden ondervangen, andere gebeurtenissen zijn niet te voorkomen en vergen een nadere beschouwing, bijvoorbeeld via een faalkansanalyse. Onderbouwd moet worden dat de faalkans voldoende klein is. Deze onderbouwing kan in ontwerp-, uitvoering- en beheerhoofdstukken verder worden uitgewerkt. De onderbouwing kan ook worden gebruikt voor de (door)ontwikkeling van pipingmaatregelen.

## 2 Veiligheidsraamwerk

### 2.1 Begrippen en definities

Aangezien er conform [7] aan overstromingskansen moet worden voldaan, is het veiligheidsraamwerk in dit document ook kwantitatief. Dit sluit aan het BOI [1] en bij de PRA van Rijkswaterstaat [5] waar voor de kritieke delen van infrastructuur een kwantitatieve risicoanalyse wordt geadviseerd. Enkele belangrijke onderdelen van een kwantitatieve risicoanalyse zijn:

- **Een kwantitatieve Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (FMECA):** dit is doorgaans een eerste stap in een systeembetrouwbaarheidsstudie. De FMECA bevat een overzicht van componenten en subsystemen om manieren van falen te identificeren. Elke manier van falen en de effecten daarvan op andere componenten in het systeem worden vastgelegd in een tabel. Vervolgens wordt er per mogelijke manier van falen en potentiële gevolgen een inschatting gemaakt van de relevantie of prioriteit [5] [9]. Een uitgebreide toelichting van FMECA's staat in hoofdstuk 5.
- **Een foutenboom:** een foutenboom is opgebouwd uit een aantal gebeurtenissen, die zo geformuleerd zijn dat er altijd twee mogelijke uitkomsten zijn: de gebeurtenis treedt wel op of de gebeurtenis treedt niet op. De gebeurtenissen zijn verbonden door een poort: een 'OF'-poort of een 'EN'-poort. Gebeurtenissen die met een 'EN'-poort zijn verbonden moeten allemaal plaatsvinden voordat de bovenliggende gebeurtenis plaatsvindt. In het geval van een 'OF'-poort, hoeft slechts één van de gebeurtenissen plaats te vinden, waardoor de bovenliggende gebeurtenis plaats vindt [10] [9]. In Hoofdstuk 6.2 worden foutenbomen verder toegelicht. Deze worden ook verder in de technische leidraden van het BOI beschreven [1].
- **Een gebeurtenissenboom:** een gebeurtenissenboom is een andere manier om de gebeurtenissen die tot falen kunnen leiden te ordenen dan de foutenboom. Een gebeurtenissenboom bestaat uit een initiërende gebeurtenis die een breed spectrum aan uitkomsten kan hebben, waaronder falen. De boom vertakt zich steeds verder in verschillende gebeurtenissen (ook wel knopen) en eindigt in mogelijke uitkomsten [10] [9]. Hoofdstuk 6.3 bevat een uitgebreidere toelichting op gebeurtenissenbomen.
- **Een faalpadanalyse:** een faalpad beschrijft een opeenvolging van gebeurtenissen of mechanismen die leidt tot een overstroming. Binnen een faalpad worden initiële en vervolgmecanismen geïdentificeerd, waarbij het initiële mechanisme het eerste mechanisme in het faalpad is [8]. Een gebeurtenissenboom is dus een verzameling faalpaden met dezelfde begin gebeurtenis. Een faalpad is een tak binnen een gebeurtenissenboom. Op een vergelijkbare manier kan ook een faalpad uit een foutenboom worden afgeleid. De faalpadanalyse is geen expliciete stap in de handreiking Prestatiegestuurde Risicoanalyses [5], maar is daarmee wel nauw verbonden via de gebeurtenissen- en/of foutenboom en gangbaar bij waterkeringen [10] en daarom opgenomen in de hier beschreven aanpak. In hoofdstuk 6 wordt uitgebreid ingegaan op faalpaden.

De genoemde onderdelen vormen de basis voor het veiligheidsraamwerk, waarmee elk systeem (hier de pipingmaatregel) kan worden getoetst aan de systeemeisen.

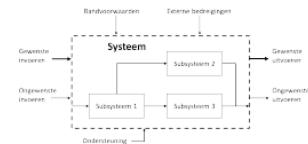
### 2.2 Overzicht aanpak

Dit veiligheidsraamwerk gaat specifiek over (innovatieve) pipingmaatregelen. Innovatie houdt hier in dat het gaat om een nieuwe techniek en/of een nieuw product, waarmee geen of nauwelijks ervaring is, althans niet als pipingmaatregel. Dit houdt doorgaans in dat een maatregel zich niet eenvoudig laat beschouwen met de bestaande rekenregels.

Het veiligheidsraamwerk voor pipingmaatregelen bestaat uit een zestal stappen. Een overzicht van deze stappen is te zien in Figuur 2-1. Door deze stappen te doorlopen kan op een consistente manier worden onderbouwd of de maatregel aan de eisen voldoet. In de volgende paragrafen worden deze stappen

beknopt toegelicht. In latere hoofdstukken wordt er per stap een gedetailleerdere uitwerking van de stappen gegeven, inclusief verschillende voorbeelden.

- 1** Verhaal van pipingmaatregel
- 2** Systeemeisen
- 3** Systeembeschrijving overzicht functioneren en mogelijk falen
  - Fysieke decompositie
  - Functionele decompositie
- 4** FMECA gestructureerd veiligheid onderbouwen
  - Iteratieve, kwalitatieve aanpak om belangrijkste gebeurtenissen te identificeren
  - Ontwerp, beheer en uitvoering
- 5** Faalkansanalyse uitwerken belangrijkste gebeurtenissen
  - Foutenbomen
  - Gebeurtenissenbomen
  - Maatregelen
- 6** Verificatie overzicht en evaluatie
  - Onderbouwen hoe aan eisen wordt voldaan
  - Overzicht van bedreigingen en maatregelen



Overzicht	A. Direct Veiligheids aanpak	B. Samen werkend aanpak	C. Samen werkend aanpak	D. Samen werkend aanpak	Maatregel aanpak
1. Ontwerp fase	Mogelijke oorsaken	CEC	Beoordeling van aanpak	Wat of hoe?	Wat of hoe?
2. Uitvoering fase	A.1. Ontwerp fase	B.1. Uitvoering fase	B.2. Uitvoering fase	B.3. Uitvoering fase	B.4. Uitvoering fase



*Figuur 2-1 Overzicht van de stappen in het veiligheidsraamwerk voor innovatieve pipingmaatregelen*

*Deze stappen worden gedurende het ontwerpproces doorlopen tot een voldoende veilig ontwerp is gevonden.*

### 2.3 Stap 1: Verhaal van de maatregel

Deze stap heeft als doel om de context te schetsen en omvat een (korte) introductie van het versterkingsproject en de (innovatieve) pipingmaatregel. Hierin wordt in algemene bewoordingen uiteengezet wat de uitdagingen zijn binnen het project en waarom een pipingmaatregel hier mogelijk toepasbaar is. Vervolgens wordt de maatregel zelf ook in algemene bewoordingen toegelicht, en hoe dit past binnen de context van de kering. Daarmee relateert dit aan het verhaal van de kering uit het BOI. Illustraties kunnen daarbij erg helpen. Daarnaast is het belangrijk een overzicht te geven van welke ervaringen er zijn met deze maatregel: is het concept compleet nieuw of is het al vaker toegepast? Een belangrijk aspect hierbij is dat de afbakening helder wordt weergegeven: wat is het toepassingsgebied, wat zijn de grenzen aan ondergrondtypes, etc.?

### 2.4 Stap 2: Systeemeisen

Een waterkering moet voldoen aan de voorgeschreven veiligheidsnorm, uitgedrukt in een jaarlijkse overstroomingskans. Wanneer de kering aan deze eis voldoet, is de jaarlijkse kans op een overstrooming dusdanig klein, dat die kans acceptabel wordt geacht. De norm hangt grotendeels af van de gevolgen van een overstrooming. Daarbij is rekening gehouden met zowel de economische schade als de kans op overlijden.

Voor dit raamwerk is het vooral relevant dat de normen zijn vastgesteld voor dijktrajecten, die lengtes kunnen hebben van wel enkele tientallen kilometers, terwijl de versterkingsmaatregelen vaak op veel kleinere schaal hoeven worden toegepast. Idealiter worden de kansen van alle vakken/doorsnedes (met of zonder maatregel) gecombineerd tot een trajectkans. De gestelde norm op trajectniveau kan eventueel

ook vertaald worden naar een vak- of doorsnede-eis, afhankelijk van op welk niveau de pipingmaatregel zal worden toegepast.

## 2.5 Stap 3: Systeembeschrijving

De systeembeschrijving heeft als doel om gestructureerd in kaart te brengen waar de maatregel uit bestaat en hoe de beschouwde pipingmaatregel functioneert. De systeembeschrijving dwingt de ontwerper en/of beoordelaar van de dijk om uit te zoomen en bijvoorbeeld het voorland en het waterbeheer (in de tijd) te betrekken bij het vraagstuk. Dit wordt op een gestructureerde manier gedaan door het systeem te ontleden in de vorm van een decompositie. Deze decompositie kan vanuit zowel fysiek als functioneel perspectief worden uitgevoerd. Deze decompositie, in combinatie met een analyse van onderlinge relaties tussen componenten, dragen bij aan het in kaart brengen van gebeurtenissen die van belang zijn voor de veiligheid. Hier wordt ook geformuleerd wat de wenselijke toestand van het systeem is, als alles naar behoren werkt.

## 2.6 Stap 4: Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA)

Op basis van stap 3 kunnen alle gebeurtenissen (van gewenst en ongewenst gedrag) van de verschillende componenten worden geïdentificeerd. Deze gebeurtenissen kunnen vervolgens in een FMECA worden uitgewerkt.

Om de betrouwbaarheid te kunnen onderbouwen, is het essentieel om vanuit de in stap 3 geïdentificeerde componenten en onderlinge relaties te formuleren hoe het systeem behoort te functioneren en welke (ongewenste) gebeurtenissen (Failure Modes) kunnen leiden tot ongewenst functioneren (Effects). Dit kan worden gedaan op basis van faalpaden. Voor elke combinatie van gebeurtenis en gevolg wordt de relevantie (Criticality) geanalyseerd. Gezamenlijk is dit de FMECA, zie ook paragraaf 2.1. Aan de hand hiervan wordt inzichtelijk gemaakt waar uitdagingen liggen voor de veiligheid van het systeem. Aanvullend wordt gekeken of en hoe een failure mode aan de hand van een maatregel kan worden verholpen of de kans erop voldoende kan worden gereduceerd. De FMECA kan worden opgesteld aan de hand van een matrix. Een voorbeeld van hoe een FMECA eruit kan zien, is weergegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Voorbeeld FMECA

Gebeurtenis S				A. Effect (onderbouwing)	B. Kans (onderbouwing)	C. Relevantie (onderbouwing)	Maatregel (onderbouwing)
#	Component (Functie)	Mogelijke falen	CAT	Beschrijving + inschatting P(F/S)	P(S) of kwalitatief	Op basis effect en kans. Verwaarloosbaar of opnemen in foutenboom.	
A		A.0 in staat zoals ontworpen	O				
		A.1 niet in staat zoals ontworpen	O				
		A.2 ...	O				
B			B				
C			U				
D							

## **2.7           Stap 5. Faalkansanalyse**

Als er niet op basis van eenvoudige analyses of beheersmaatregelen met de FMECA kan worden onderbouwd dat een gebeurtenis een voldoende kleine kans heeft of een relatief kleine bijdrage ten opzichte van andere gebeurtenissen aan de overstromingskans, dan moet dit met (probabilistische) faalkansanalyses verder worden geanalyseerd.

## **2.8           Stap 6. Verificatie**

Tenslotte wordt samengevat of en in welke mate het systeem aan de eisen voldoet. Er wordt hierbij een overzicht van bedreigingen en bijbehorende maatregelen getoond. De aandacht moet vooral liggen op het identificeren van de mogelijke gebeurtenissen. Relevante gebeurtenissen moeten worden uitgesloten, of onderbouwd zijn met een kansinschatting.

## 3 Stap 2 Systeemeisen

### 3.1 Overstromingskansen

#### 3.1.1 Trajecteisen

De veiligheidsnorm die aan primaire waterkeringen wordt gesteld, is uitgedrukt in een jaarlijkse overstromingskans ( $P_{eis,traject}$ ). Deze kans is per dijktraject bij wet vastgelegd en is grotendeels gebaseerd op de potentiële gevolgen van een overstroming [11].

#### 3.1.2 Veiligheid onderbouwen

Er zijn de volgende manieren om de veiligheid te onderbouwen.

- A. Alle kansen van alle mechanismen en onderdelen van het traject combineren, en verifiëren op basis van de overstromingskansnorm. Zie verder Hoofdstuk 6 voor aanwijzingen hiervoor;
- B. Alle kansen voor piping voor alle onderdelen van het traject combineren en spiegelen aan de overstromingskans op trajectniveau (faalkansbegroting nodig).
- C. Faalkans voor piping op doorsnedeniveau spiegelen aan de overstromingskans voor piping op doorsnedeniveau (faalkansbegroting + lengte-effectfactor nodig)

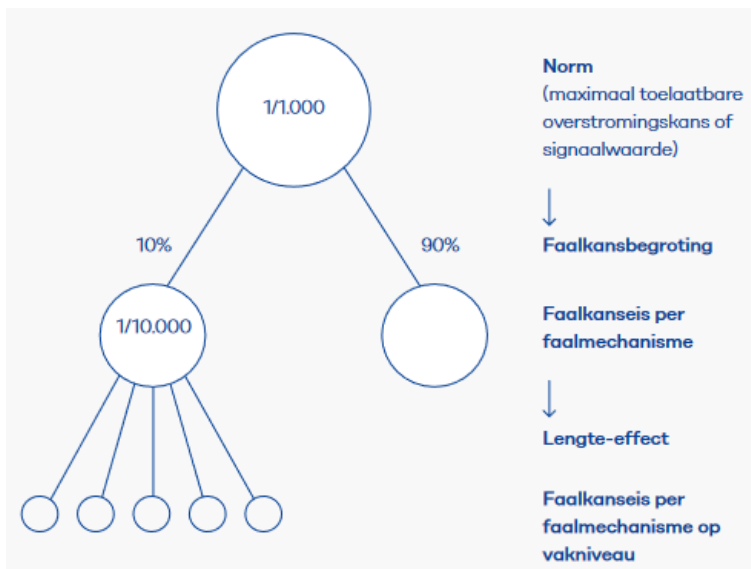
Hierin is A het netste en meest scherp, B en C zijn het meest praktische, zeker bij het analyseren van een pipingmaatregel omdat dan niet naar overige mechanismes en vakken hoeft te worden gekeken. Opties B en C zijn wel conservatiever, afhankelijk van de keuzes in faalkansbegroting en lengte-effect. Dit wordt in de paragrafen 3.1.3 tot 3.1.7 verder behandeld. Een aanvullend voordeel van optie C is dat het hier bij beschikbaarheid van kalibratie-relaties gebruik kan worden gemaakt van semi-probabilistische analyses

#### 3.1.3 Overstromingskansen op mechanisme- en doorsnedeniveau

Om een kering op een bepaald faalmechanisme te beoordelen of ontwerpen volgens opties B of C, moet de overstromingskansnorm worden vertaald naar een specifieke overstromingskans voor de pipingmaatregel. Dit kan aan de hand van een aantal stappen, zoals weergegeven in Figuur 3-1:

- Een faalkansbegroting om de faalkans per mechanisme te bepalen, in dit geval de pipingmaatregel;
- Een lengte-effect factor om de doorsnede-eis te bepalen.

Het achterliggende idee is dat verschillende mechanismen en doorsnedes/vakken een kering kunnen doen falen. De overstromingskansnorm moet daarom over de verschillende faalmechanismen en vakken/doorsnede worden verdeeld, zodat als aan al de individuele mechanisme-eisen wordt voldaan, ook aan de totale overstromingskans wordt voldaan. Met hierbij de nuance dat in het BOI voor beoordelen niet meer wordt gewerkt met een faalkansbegroting en lengte-effecten om de doorsnede-eisen te bepalen aangezien bij beoordelen de trajectkans wordt bepaald via het assembleren van doorsnede- en vakresultaten [1].



Figuur 3-1 Van norm naar overstromingskans per faalmechanisme voor een representatieve doorsnede [11]

Het opdelen van de faalkans tot een eis op doorsnedeniveau volgens de standaardmanier is conservatief. De standaardmanier **voor groene dijken** om een doorsnede-eis ( $P_{eis,dsn}$ ) te berekenen is als functie van de trajecteis ( $P_{eis,traject}$ ):

$$P_{eis,dsn} = \omega \cdot P_{eis,traject} / N \quad (3.1)$$

Er is een aantal aspecten die anders ingevuld kunnen of moeten worden voor pipingmaatregelen, ervan uitgaande dat een eis op doorsnedeniveau wordt gebruikt (zie ook 3.1.2):

- Faalkansruimtefactor ( $\omega$ ), zie 3.1.4;
- Lengte-effectfactor ( $N$ ), zie 3.1.5 en 3.2.
- Verschillende elementen, zie 3.1.6;

### 3.1.4 Faalkansbegroting

De faalkansbegroting moet situatie-specifiek worden afgeleid. In het verleden werd voor het faalmechanisme piping gerekend een faalkansruimte  $\omega$  van 24% [12]. Er kan ook met een andere begroting gerekend worden. De faalkansbegroting hangt af van het relatieve belang van het mechanisme voor de overstromingskans. Bijvoorbeeld, als het traject pipinggevoelig is, zorgt de keuze voor een relatief grote faalkansruimte voor piping voor een relatief minder strenge ontwerpeis, waardoor maatregelen eerder aan de eisen zullen voldoen.

### 3.1.5 Lengte-effect

Het lengte-effect wordt nu voor groene dijken standaard meegenomen door de factor  $N$ :

$$N = \max(1, 1 + \frac{a \cdot L}{b}) \quad (3.2)$$

Waarin  $a$  het percentage is van de lengte van het traject dat aan de overstromingskans bijdraagt (defaultwaarden op basis van het BOI: 0,5 voor benedenriviereengebied, 0,9 voor bovenriviereengebied) en  $b$  de zogenaamde equivalent onafhankelijke lengte in meter (default is 300 m voor groene dijken, zie [1]). De defaults zijn veilige beginwaarden welke aangepast mogen worden. Voor pipingmaatregelen moeten de lengte-effecten passend zijn bij het ruimtelijk schaalniveau van de faalkansanalyse. Hoe kleiner het ruimtelijk schaalniveau van het mechanisme ( $b$ ), hoe groter de lengte-effectfactor. En hoe groter het

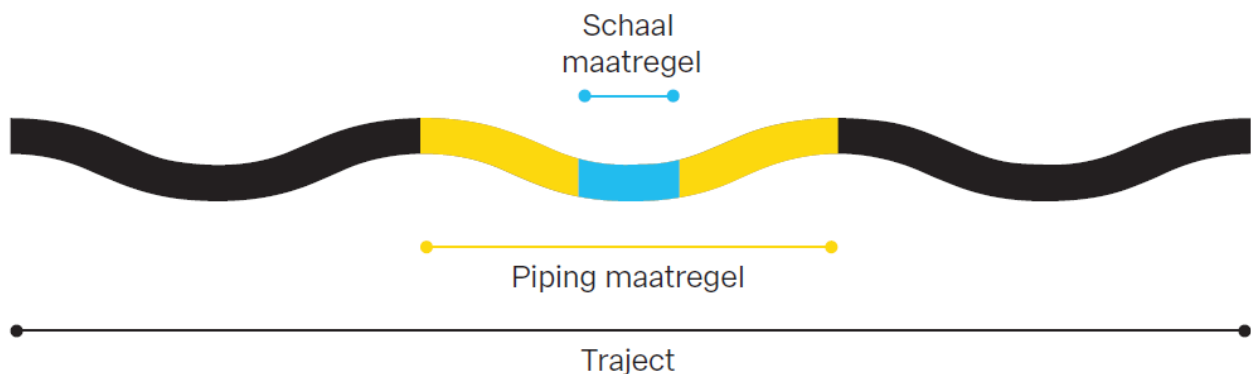
ruimtelijk schaalniveau (of bij een grote ruimtelijke correlatie), hoe kleiner de lengte-effect factor. Zie verder paragraaf 3.2.

### 3.1.6 Toepassing overstromingskansen voor pipingmaatregelen

Een aanbeveling voor het gebruik van overstromingskansen voor pipingmaatregelen kan zijn om voor ontwerpen een stapsgewijze aanpak te gebruiken. En zo eerst via optie C (doorsnede-eisen op basis van lengte-effect en faalkansbegroting) te bepalen of aan de doorsnede-eis voldaan kan worden. Om vervolgens met optie B of A (direct bepalen trajectkansen) het ontwerp verder te optimaliseren. Voor beoordelen kan dan conform het BOI [1] optie C worden gebruikt waarbij de aannames voor assemblage (en dan voor het lengte-effect) goed moeten worden afgestemd op de pipingmaatregel.

## 3.2 Faalkansen in ruimte

Door ruimtelijke variabiliteit is de faalkans van een pipingmaatregel afhankelijk van de lengte waarover de maatregel wordt toegepast. Voor het schaalniveau dat bekeken wordt, is een passende eis nodig. Om die te bepalen moet eerst worden bepaald hoe groot het lengte-effect grofweg is. Dit wordt geïllustreerd met Figuur 3-2.



Figuur 3-2 Illustratie lengte-effecten piping maatregel

Van belang hierin zijn de lengte waarin de maatregel wordt toegepast (oranje in Figuur 3-2) en de (ruimtelijke onafhankelijke) schaal van de maatregel (blauw in Figuur 3-2). Het gaat dus vooral om de bepaling van de schaal van de maatregel. Deze is de factor  $b$  voor groene dijken (zie formule 3.2). Hoe kleiner  $b$  (door kleine correlatielengtes van de belangrijkste parameters), hoe groter het lengte-effect. Zie verder [13] voor de bepaling van lengte-effecten. Praktische gezien moet dus een inschatting worden gemaakt van de ruimtelijk onafhankelijke schaal van de maatregel. Dit kan worden gedaan door eerst te bepalen wat de belangrijkste parameters zijn voor de faalkans en vervolgens een inschatting te maken van hoe snel deze ruimtelijk fluctueren en hier het gecombineerde (gewogen) effect van de bepalen.

Vervolgens is het van belang te identificeren op welk schaalniveau de faalkansanalyse plaatsvindt. Wordt de faalkansanalyse uitgevoerd voor bijvoorbeeld een enkele damwandplank of een heel dijkvak met schermen van 50 of 500 meter (met bijbehorende verdelingen van de stochasten). Dit bepaalt direct hoeveel lengte-effect in rekening moet worden gebracht bij het bepalen van de faalkans: op een doorsnede-berekening moet meer lengte-effect in rekening worden gebracht aan de zijde van de faalkans dan op een berekening die van toepassing is op de schaal van de hele dijkvak (het lengte-effect is dan al deels meegenomen bij de bepaling van de faalkansprestatie van het dijkvak). Hierbij is het van belang ook het effect op de overstromingskans in het oog te houden: pas bij grote veranderingen in  $b$  (met meer dan een factor 2) is er een significante verandering in de overstromingskans; enige onnauwkeurigheid in de schatting van het lengte-effect is dus niet erg zolang de orde grootte goed is.

Een voorbeeld voor de bepaling van het lengte-effect staat weergegeven in Figuur 3-3.



Dit betreft een hypothetisch geval voor de bepaling van lengte-effecten voor gaten in een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG). Stel hierbij dat:

- de dominante onzekerheid in een VZG de aansluiting tussen twee doeken is,
- deze aansluiting elke 200 meter wordt gemaakt,
- de faalkansbepaling dus geldt voor strekkingen van 200 meter,
- falen van het VZG direct falen door piping inhoudt
- het falen van de aansluitingen volledig onafhankelijk is (onwaarschijnlijk aangezien ze door zelfde machine worden gemaakt, in dezelfde grond zitten, etc.).

Dan is een eerste schatting van de schaal van de maatregel 200 meter. Als het VZG over 2000 m wordt toegepast, is de lengte-effect factor dus 10. De werkelijkheid zal genuanceerder zijn omdat de kans op piping gegeven falen van het VZG niet 1 is en het dus meer gaat om de kans op samenvallen van een zwakke plek voor piping EN het falen van een aansluiting (beide moeten optreden voor het falen van de pipingmaatregel).

*Figuur 3-3 Voorbeeld lengte-effect door gaten in een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG).*

### **3.3 Faalkansen in tijd**

#### *3.3.1 Lifecyclemonitoring*

Gedurende de levensduur van een maatregel spelen een aantal aspecten:

- De pipingmaatregel kan verouderen, de sterkte kan afnemen en de faalkans verandert hierdoor in de tijd. Bijvoorbeeld door geleidelijke verstopping van een filter of door corrosie. Verstopping kan worden tegengegaan door het systeem tijdig door te spoelen. Door tijdige detectie en passende beheer- en onderhoudsmaatregelen kunnen de negatieve effecten van veroudering worden ondervangen of gereduceerd. Hiermee wordt de noodzaak van een goed instandhoudingsplan nogmaals benadrukt.
- Door bewezen sterkte worden onzekerheden over (sterkte)eigenschappen in de loop der tijd kleiner. De faalkans kan hierdoor doorgaans kleiner worden, maar het tegenovergestelde is ook mogelijk (bij 'bewezen zwakte'). Dit is soms lastig te kwantificeren, maar kan een significante impact hebben. Zie verder [14].

Bij onzekerheid als gevolg van veroudering is het van belang of er sprake is van merkbaar of niet-merkbaar falen, en wat de inspectie- en onderhoudsstrategie is (inspecteren en ingrijpen, periodiek preventief vervangen, etc.). Hiervoor is het van belang een goed instandhoudingsplan op te stellen, zie ook paragraaf 5.6. Binnen de POV Macrostabieleit [15] is hier een aanpak voor ontwikkeld op basis van lifecyclemonitoring, zie ook Figuur 3-4 .



Figuur 3-4 Lifecyclemonitoring waarin de kering in een samenspel van beheer, afkeur, ontwerp en uitvoering op orde wordt gehouden [15]

### 3.3.2 Jaarkans, conditionele kans of levensduurkans

De eis ( $P_{eis,traject}$ ) is in de Waterwet [2] uitgedrukt als een kans per jaar. Het is van belang dat in de verschillende analyses correct met de tijdsdimensie wordt omgesprongen. We onderscheiden de volgende typen kansen:

- Jaarkans: De jaarlijkse kans van optreden. De eisen in de Waterwet zijn als jaarkans uitgedrukt, de waterstandsstatistiek betreft daarom vaak jaarmaxima.
- Conditionele kans: De kans op het falen van een onderdeel van een pipingmaatregel *gegeven* een voorgaande gebeurtenis (bijv. het optreden van een hoogwater) is een conditionele kans.
- Eisen in de Eurocode en hieruit volgende partiële factoren zijn gebaseerd op kansen voor referentieperiodes groter dan of gelijk aan een jaar. Zie [11] voor een beschrijving van jaar- en levensduurkansen.

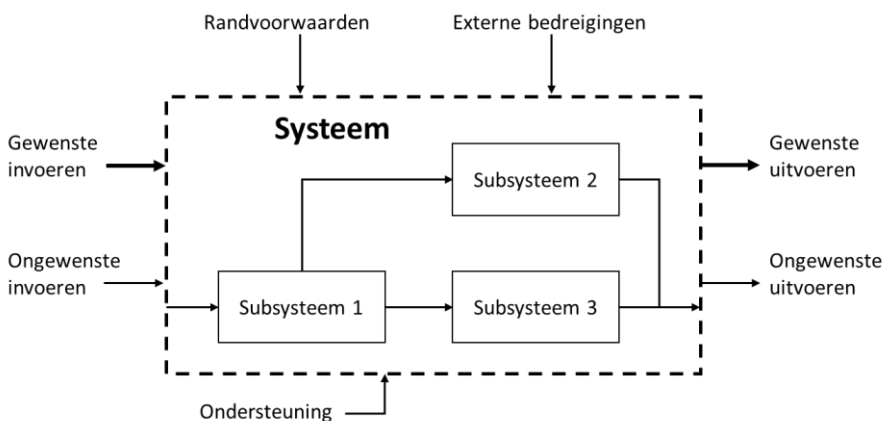
Bij het combineren van kansen moet goed rekening worden gehouden met deze dimensies. Als de faalkans volgt uit een vermenigvuldiging van kansen, dan moet het resultaat van de vermenigvuldiging de dimensie 1/jaar bezitten. Een van de kansen moet een jaarkans zijn, de rest conditionele kansen. Meerdere jaarkansen vermenigvuldigen kan niet zomaar. Bijvoorbeeld de jaarlijkse kans op het gelijktijdig optreden van een 1/100 [per jaar] rivierafvoer en een 1/100 [per jaar] windbelasting is veel kleiner dan  $1/100 * 1/100$  omdat beide van relatief korte duur zijn en onafhankelijk van elkaar. De kans van gelijktijdig optreden van hoogwater en een bepaalde windbelasting moet dus worden bepaald door de kans op een bepaalde windbelasting conditioneel aan de 1/100 jaar waterstand te bepalen.

## 4 Stap 3: Systeembeschrijving

### 4.1 Algemeen

Het doel van de systeembeschrijving is om het systeem te ontleden in fysieke en functionele kenmerken zodat op basis hiervan in stap 4 gestructureerd kan worden bepaald hoe het systeem mogelijk kan falen. Dit wordt in dit hoofdstuk gedaan op basis van een fysieke decompositie (paragraaf 4.2) en een functionele decompositie (paragraaf 4.3).

De pipingmaatregel, maar eigenlijk het geheel van de kering inclusief de pipingmaatregel, kan worden beschouwd als een technisch systeem. Rausand en Hoyland [9] definiëren een technisch systeem als: *“een compositie (op elke schaal van complexiteit) van personeel, procedures, materialen, gereedschap, materieel, faciliteiten en software. De elementen van deze compositie worden gezamenlijk ingezet in een beoogde operationele of ondersteunende omgeving om een bepaalde taak uit te voeren of om een bepaald doel of eis te halen of steun te bieden”*.



*Figuur 4-1 Een technisch systeem met haar grenzen en raakvlakken (gebaseerd op Rausand en Hoyland, [9])*

In het geval van de pipingmaatregel is het doel duidelijk: de maatregel moet bijdragen aan de verbetering van de betrouwbaarheid van de kering en het verminderen van de kans op falen door piping. Door een vergelijkbaar schema van de maatregel af te leiden (zie Figuur 4-1), kan een eerste indruk worden verkregen van de interactie van het systeem met de omgeving:

- Welke invoeren leiden tot welke uitvoeren (al dan niet gewenst of ongewenst)?
- Wat zijn de randvoorwaarden?
- Welke ondersteuning heeft het systeem nodig?
- Wat zijn externe bedreigingen?

Het systeem kan vervolgens worden ontleed vanuit een fysiek (of constructief) perspectief en vanuit een functioneel perspectief. Het fysieke perspectief ontleedt voornamelijk de losse fysieke elementen van het systeem, terwijl het functionele perspectief vooral gaat over de verschillende functies van het systeem en hoe deze worden vervuld. Het ontleden van het systeem en het beschrijven van de relaties tussen componenten en functies ondersteunen bij het identificeren van mogelijke gebeurtenissen die tot falen kunnen leiden.

### 4.2 Fysieke decompositie

Bij de fysieke decompositie wordt beschreven hoe het systeem er uit ziet en welke onderdelen van belang zijn. Hierbij worden alle fysieke componenten van het systeem opgesomd en kort toegelicht. Deze paragraaf bevat ter illustratie enkele elementen van reeds aanwezige fysieke elementen, nieuwe

elementen die onderdeel zijn van de maatregel, en materieel dat nodig is voor het aanbrengen van de maatregel.

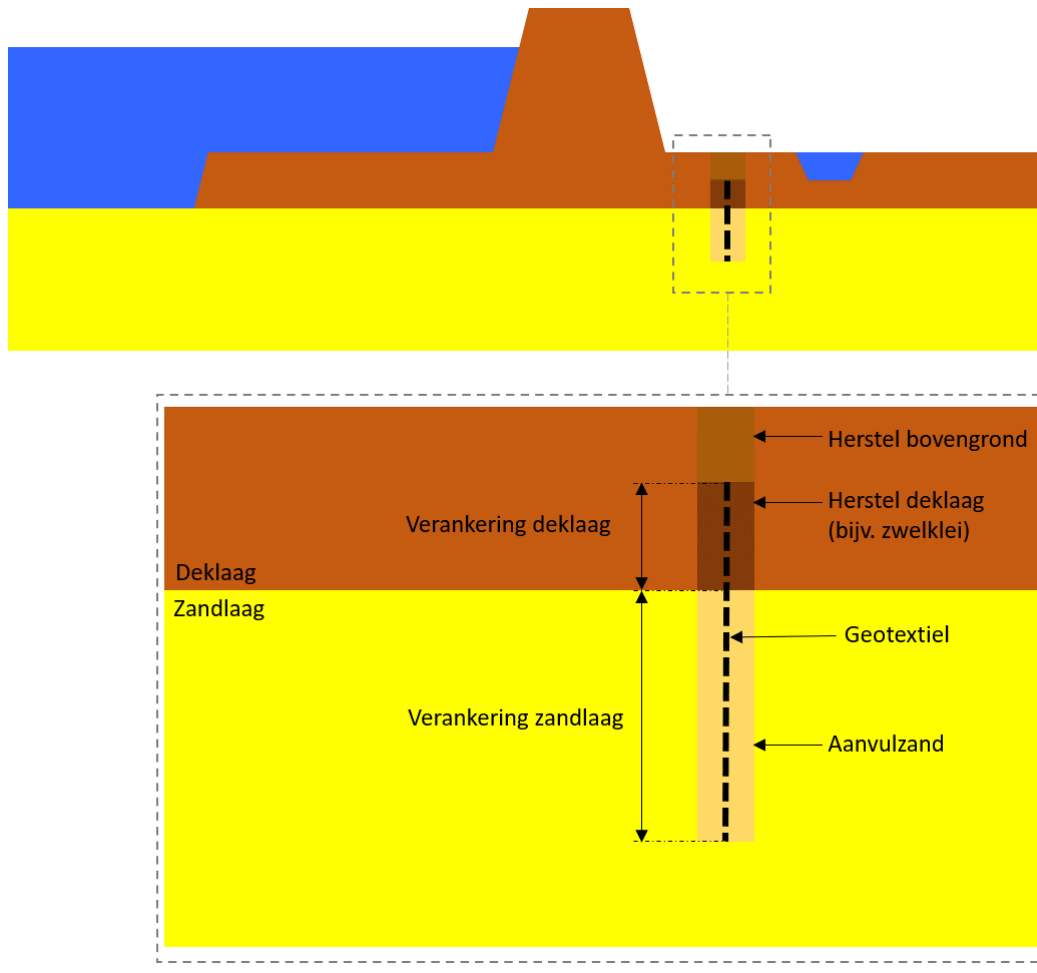
Een aantal voorbeelden van fysieke componenten zijn weergegeven in Figuur 4-2 (in woorden) en in Figuur 4-3 (situatietekening van een Verticaal Zanddicht Geotextiel; VZG).

Dit kader geeft voorbeelden van fysieke onderdelen van een (innovatieve) maatregel. Uiteraard is de lijst met voorbeelden niet compleet, maar dient deze vooral om de gebruiker op gang te helpen.

<b>Reeds aanwezige onderdelen</b>	<b>Nieuwe elementen die onderdeel zijn van de pipingmaatregel</b>
De bestaande kering / dijklichaam: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodemopbouw</li> <li>• Geometrie</li> </ul>	Sleuf (grofzandbarrière)
Het achterland / de polder: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grondwaterstand</li> <li>• Maaiveldniveau</li> <li>• Aanwezige elementen in het achterland, zoals een weg, bebouwing, bomen</li> </ul>	Grof zand (grofzandbarrière)
Ondergrond: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventueel aanwezige deklaag</li> <li>• Eventueel aanwezige watervoerende lagen</li> <li>• Eventueel aanwezige slecht-doorlatende lagen</li> </ul>	Stalen damwand, kunststof damwand
Voorland	Filterconstructie
Waterstand (normaal, laag, hoog)	Drainageconstructie
Grondwater	Sensoren ten behoeve van monitoring
Polderwater	Inspecteur (die gedurende de levensduur inspecteert of innovatie naar behoren functioneert)

*Figuur 4-2 Overzicht van mogelijke componenten in een fysieke decompositie*

Dit kader geeft de situatie weer van een geïmplementeerde VZG. De situatieschets geeft een overzicht, en een close-up van de maatregel en bijbehorende componenten.



Figuur 4-3 Fysieke decompositie van een VZG [17].

### 4.3 Functionele decompositie

De volgende stap is om, op basis van de fysieke compositie, te bepalen wat de functies zijn van de verschillende componenten. Dit is de functionele decompositie. Het gaat hierbij om de beschrijving van alle functies van het systeem, (deels) gekoppeld aan de fysieke componenten. Rausand en Hoyland [9] beschrijven de volgende doelen van een functionele analyse:

1. Het identificeren alle functies van het systeem;
2. Het identificeren van de functies die nodig zijn voor de verschillende operationele toestanden van het systeem;
3. Het voorzien van een hiërarchische decompositie van de systeemfuncties;
4. Het beschrijven van hoe elke functie is gerealiseerd;
5. Het identificeren van de relatie tussen functies;
6. Het identificeren van raakvlakken met andere systemen en met de omgeving.

Uiteindelijk gaat het er voor pipingmaatregelen vooral om een goede beschrijving hoe de maatregel zou moeten functioneren gedurende de verschillende fases in de levensduur. Voorbeelden van een functionele decomposities zijn te zien in Figuur 4-4 en Figuur 4-5. Vanuit de fysieke en functionele analyse kan op een gestructureerde manier worden gewerkt naar een FMECA (Hoofdstuk 5) door voor de componenten en

functies te bepalen hoe zij tot falen kunnen leiden of aan falen kunnen bijdragen. Gidswoorden als 'niet', 'wel', 'te veel', 'te weinig', 'te hoog' of 'te laag' kunnen daarbij helpen. Enkele voorbeelden:

1. Heavescherm is **niet** stabiel, wat bijvoorbeeld kan leiden tot bovenloopsheid en voorloopsheid [3].
2. Verticaal zanddicht geotextiel is **niet lang genoeg** toegepast, wat kan leiden tot achterloopsheid [17].
3. Geotextiel **niet goed** ingeklemd in aanvulklei, wat kan leiden tot bovenloopsheid [17].

#### **Voorbeeld uitwerking functionele decompositie (grofzandbarrière)**

De hoofdfunctie van de kering is water tegenhouden. De innovatieve maatregel Grofzandbarrière (GZB) heeft als **hoofdfunctie**: *terugschrijdende erosie voorkomen/reduceren*. In dit voorbeeld focussen we gemakshalve enkel op functioneren tijdens hoogwater. Onder normale omstandigheden of tijdens laagwater is functioneren van de GZB minder relevant.

#### **Subfuncties** van de GZB:

- a. *Doorlaten van water*: doordat de GZB uit grof zand bestaat, kan water stromen door de ruimte tussen de zandkorrels. Omdat deze ruimte groter is dan bij fijn zand, heeft grof zand een hogere doorlatendheid dan fijn zand.
- b. *Voorkomen van doorontwikkeling van een pipe*: het grove zand in de GZB heeft een hogere weerstand tegen erosie (korrels zijn groter en zwaarder) en spoelen dus minder gemakkelijk uit dan het fijne zand. Er zijn dus veel hogere stroomsnelheden nodig om deze zandkorrels in beweging te krijgen.
- c. *Zorgen dat het grootste deel van het verval plaatsvindt bovenstrooms van de barrière (dus tussen de barrière en het buitenwater)*: dit wordt gerealiseerd door de hogere doorlatendheid in de barrière, omdat het materiaal grover is dan in de omliggende watervoerende laag.

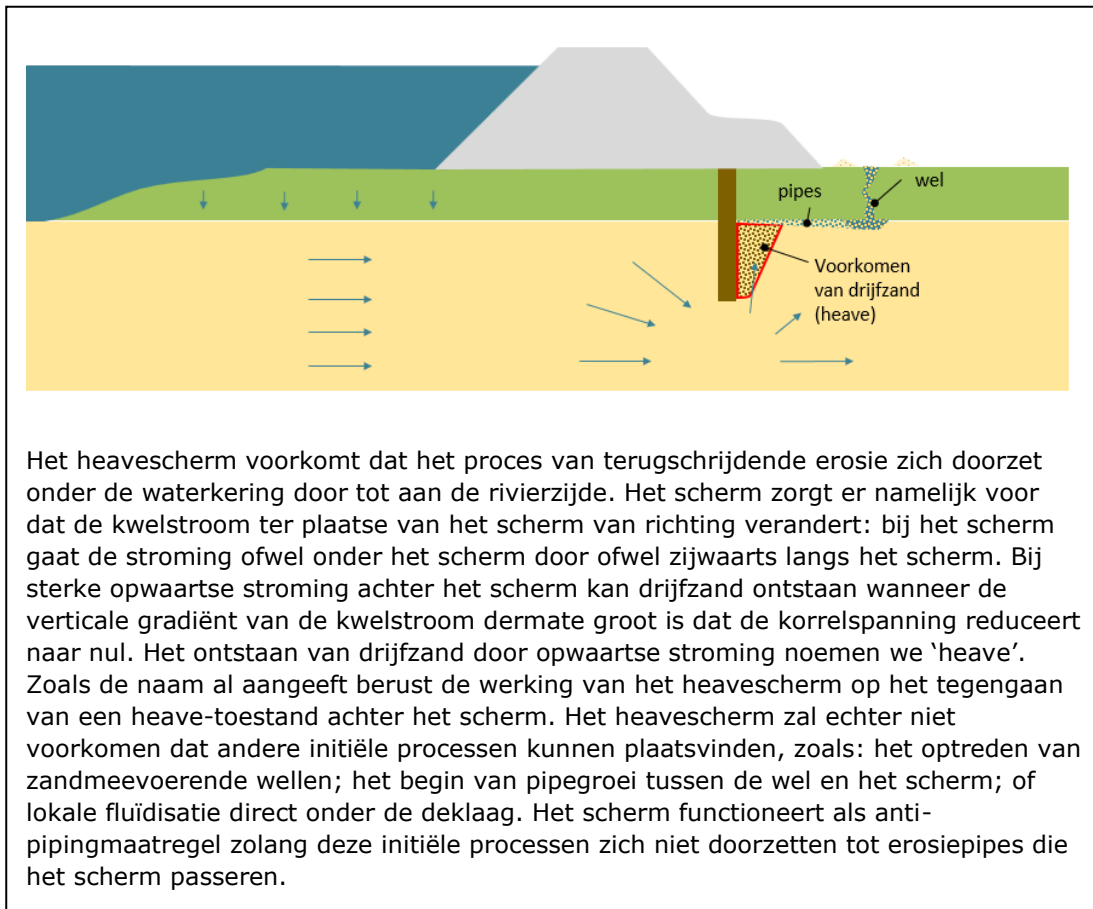
#### **Onderlinge relaties tussen functies**

Subfunctie a en subfunctie b zijn gerelateerd: als de GZB verstopt leidt dit een andere weerstand tegen het voorkomen van een pipe. Er moet worden gezocht naar wat gebeurt er met subfunctie b als de doorlatendheid hoger of lager wordt? Hoe goed wordt functie b dan nog vervuld? En andersom, wat is het effect van subfunctie b op subfunctie a? Indien er een relatie is, omschrijf hem dan.

Op dezelfde manier kunnen de relaties tussen de andere functies worden onderzocht. Dit kan helpen om een inschatting te krijgen van alle gebeurtenissen. Primair hierin is echter dat wordt gekeken naar de verstoorde functies; daarna naar de precieze onderlinge relaties.

*Figuur 4-4. Voorbeeld uitwerking functionele decompositie (grofzandbarrière).*

Voor complexe systemen kan het handig zijn om de functies in een boomstructuur weer te geven (een functieboom) of het function analysis system technique (FAST). Een andere manier is het gebruik van functionele blokdiagrammen. Voor meer informatie over deze methodes wordt verwezen naar [9].



Het heavescherm voorkomt dat het proces van terugschrijdende erosie zich doorzet onder de waterkering door tot aan de rivierzijde. Het scherm zorgt er namelijk voor dat de kwelstroom ter plaatse van het scherm van richting verandert: bij het scherm gaat de stroming ofwel onder het scherm door ofwel zijwaarts langs het scherm. Bij sterke opwaartse stroming achter het scherm kan drijfzand ontstaan wanneer de verticale gradiënt van de kwelstroom dermate groot is dat de korrelspanning reduceert naar nul. Het ontstaan van drijfzand door opwaartse stroming noemen we 'heave'. Zoals de naam al aangeeft berust de werking van het heavescherm op het tegengaan van een heave-toestand achter het scherm. Het heavescherm zal echter niet voorkomen dat andere initiële processen kunnen plaatsvinden, zoals: het optreden van zandmeevoerende wellen; het begin van pipegroei tussen de wel en het scherm; of lokale fluïdisatie direct onder de deklaag. Het scherm functioneert als anti-pipingmaatregel zolang deze initiële processen zich niet doorzetten tot erosiepipes die het scherm passeren.

Figuur 4-5 Voorbeeld functionele decompositie van een heavescherm [3]

## 5 Stap 4 FMECA

### 5.1 Aanpak onderbouwen veiligheid

#### 5.1.1 FMECA voor onderbouwen veiligheid

Voor het onderbouwen van de veiligheid is het van belang om de belangrijkste gebeurtenissen te identificeren voor Ontwerp, Beheer en Uitvoering van de pipingmaatregel. Dit wordt gedaan met een zogenaamde FMECA (Failure Mode, Effect, Criticality Analysis). De FMECA methode is een (semi-quantitatieve) aanpak om gebeurtenissen (gewenst functioneren en falen; Failure Modes) van de pipingmaatregel en alle componenten hiervan vooraf te identificeren. Dit kan op basis van de systeemanalyse in het vorige hoofdstuk. En op basis hiervan de gevolgen (Effect) van deze gebeurtenissen en de relevantie (Criticality) te analyseren. Aan de hand hiervan wordt inzichtelijk gemaakt hoe de veiligheid kan worden onderbouwd en waar uitdagingen liggen voor de veiligheid van het systeem. Aanvullend wordt gekeken of en hoe een gebeurtenis aan de hand van een maatregel kan worden verholpen of de kans erop voldoende kan worden gereduceerd. De FMECA wordt verder beschreven in paragraaf 5.2.

#### 5.1.2 Onderbouwen veiligheid

De grote vraag is nog wel: wanneer is de relevantie (combinatie van kans en effect) laag genoeg om deze niet verder mee te hoeven nemen? Er gelden strenge, kwantitatieve eisen voor waterkeringen. Er moet uiteindelijk worden voldaan aan een strenge eis. Dit betekent niet dat overal een probabilistische analyse voor moet worden gedaan, maar wel dat er een grote bewijslast is. Namelijk een valide, objectieve, navolgbare en herleidbare onderbouwing. Voor technieken waarbij de veiligheid niet voldoende kan worden onderbouwd, waarin rekening is gehouden met ontwerpmaatregelen (mitigatie), uitvoeringscontroles, referentieprojecten en/of monitoring, kan het dus ook nog zo zijn dat de pipingmaatregel niet voldoende veiligheid garandeert.

Er zijn meerdere mogelijkheden om te onderbouwen dat aan de overstromingskansen wordt voldaan.

1. Door het op **basis van het effect uitsluiten** van een gebeurtenis in de FMECA, zie ook paragraaf 5.4.
2. Een **kwantitatieve bepaling van kansen** van de relevante gebeurtenissen, gecombineerd in een faalkansanalyse (zie Hoofdstuk 6). Er zijn verschillende mogelijkheden tot kwantificering van kansen: op basis van statistische gegevens, empirische of analytische modellen en kwantificering op basis van engineering judgement. Dit wordt verder behandeld in paragraaf 5.5 en 6.4.
3. Op basis van gemaakte **ontwerpkeuzes** onderbouwen dat de onzekerheid voldoende wordt weggenomen. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden:
  - a. Door conservatieve uitgangspunten te definiëren in plaats van alle mogelijke scenario's door te rekenen om aan te tonen dat een gebeurtenis niet bijdraagt. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 5-1;
  - b. Het gebruik van fysische boven- of ondergrenzen;
  - c. Veilige afmeting kiezen (gangbaar voor ontgrondingskuilen);
  - d. Beperken toepassingsbereik en daarmee een beperking van ontwerpconfiguraties;
  - e. Een beheersmaatregel kiezen als deze goedkoper is dan nadere analyse;
  - f. Relatief beoordelen gebeurtenissen. Alleen voor de gebeurtenissen die de overstromingskansen bepalen is een kwantitatieve onderbouwing nodig.



Voor SoSeal wordt de veiligheid in deze fase van het project vooral bepaald door de gebeurtenis pipegroei tot voorbij de SoSeal barrière, zie Figuur 6-3. Om de veiligheid te onderbouwen is een aanpak ontwikkeld om met voldoende zekerheid te kunnen onderbouwen dat de pipe niet binnen een zone rondom de barrière groeit. De aanpak bestaat uit een D-Geo Flow analyse waarbij bij Waterstand Bij Norm (WBN) de pipelengte bepaald wordt, in combinatie met conservatieve schematiseringskeuzes. De pipelengte moet voldoende afstand bij de barrière vandaan blijven omdat er dan andere processen gaan spelen die niet in D-Geo Flow zitten. De verwachting is dat zo voldoende veilige SoSeal barrières ontworpen kunnen worden. Mocht dit lokaal niet kunnen, dan moet terug worden gevallen op andere gebeurtenissen zoals monitoring.

Figuur 5-1 Voorbeelden onderbouwen veiligheid SoSeal .

### 5.1.3 Omgaan met onzekerheid

Onzekerheden in de pipingmaatregel zorgen (mogelijk) voor een te hoge kans van optreden van een ongewenste gebeurtenis. Er zijn verschillende mogelijkheden om met deze onzekerheden om te gaan (zie [18]):

- **Accepteren** in geval combinatie van kans en effect voldoende klein is. Het bepalen van het relatieve belang van een gebeurtenis kan hierbij een belangrijke tool zijn;
- Het **reduceren** van onzekerheid door het doen van metingen of het toepassen van monitoring, in combinatie met het treffen van beheersmaatregelen als dat nodig blijkt;
- Een **mitigerende maatregel** treffen waardoor de kans en/of het effect voldoende klein worden;
- Een **substitutie maatregel** treffen waardoor een onzekerheid wordt weggenomen en daarmee andere onzekerheden dominant worden.

#### Voorbeeld omgaan met onzekerheden pipingmaatregelen

- De kans op opbarsten van de deklaag aan de rivierzijde van een damwand kan worden *geaccepteerd* op basis van een opbarstberekening;
- SoSeal is een injectiemethode waarmee op basis van geïnjecteerd materiaal de doorlatendheid van een zandlaag kan worden gereduceerd. De onzekerheid of een SoSeal barrière voldoende waterremmend is kan worden *gereduceerd* met het doen van stijghoogtemetingen;
- De kans op het uit het slot lopen van een damwand kan worden *gemitigeerd* met voorzichtiger intrillen;
- De kans op relatief kleine gaten in een SoSeal scherm voor de werking als heavescherm kan niet eenvoudig voldoende klein worden. Als *substitutie* wordt SoSeal daarom toegepast als waterremmende zone waarbij vooral relatief grote gaten van belang zijn. Deze onzekerheid is kleiner en kan eventueel gemonitord kan worden.
- Maakbaarheidsproeven kunnen helpen met het reduceren van de kans dat er in de uitvoering iets misgaat.

Figuur 5-2 Voorbeeld omgaan met onzekerheden pipingmaatregelen

### 5.1.4 Kennisontwikkeling

Naast de verschillende mogelijkheden om de veiligheid kwalitatief en kwantitatief te onderbouwen in ontwerp, uitvoering en beheer, kan ook kennisontwikkeling een belangrijk handelingsperspectief zijn. Dit kan de betreffende onzekerheden zodanig reduceren zodat aan de eisen wordt voldaan. Hier kan mee worden ontworpen door onzekerheden te accepteren hangende het onderzoek en te werken met terugvalopties. Bij kennisontwikkeling kan het gaan om bijvoorbeeld labproeven of maakbaarheidsproeven. Ter illustratie bleek bij een maakbaarheidsproef van kunststof heaveschermen een significant aantal planken uit het slot te zijn gelopen. Dit hoeft niet erg te zijn als het effect maar beperkt is. De

uitvoeringsproef kan vervolgens worden gebruikt om uitvoeringsprocedures te verbeteren. In geval van kunststof heaveschermen door deze samen met een moederplank te plaatsen.

## 5.2 De FMECA aanpak

### 5.2.1 FMECA voor overzicht gebeurtenissen

De FMECA kan worden opgesteld aan de hand van een tabel. Een vereenvoudigd voorbeeld van hoe een FMECA eruit kan zien, is weergegeven in Tabel 5-1. Voorbeelden van FMECA's voor pipingmaatregelen staan in Figuur 5-3 en Figuur 5-4. De FMECA bouwt hiermee voort op de systeembeschrijving van hoofdstuk 4. De FMECA bestaat uit een de volgende elementen: de gebeurtenis, het effect, de kans, de relevantie en de mogelijke maatregel. In Tabel 5-1 staat weergegeven in welke paragraaf de verschillende elementen worden behandeld. Het idee is dat de FMECA stapsgewijs en op een gestructureerde wijze ingevuld wordt.

Paragraaf 5.3				Par. 5.4	Par. 5.5	Par. 5.6	Par. 5.2.2
Gebeurtenis S				A. Effect (onderbouwing)	B. Kans (onderbouwing)	C. Relevantie (onderbouwing)	Maatregel (onderbouwing)
#	Component (Functie)	Mogelijke falen	CAT	Beschrijving + inschatting P(F S)	P(S) of kwalitatief	Op basis effect en kans. Verwaarloosbaar of opnemen in foutenboom.	
A		A.0 in staat zoals ontworpen	O				
		A.1 niet in staat zoals ontworpen	O				
		A.2 ...	O				
B			B				
C			U				
D							

Tabel 5-1 Generieke FMECA =, met hierin onderscheid naar ontwerp (O), uitvoering (U) en beheer (B), zie kolom CAT. Boven de FMECA staat in welke paragraaf de betreffende component wordt uitgewerkt.

Met behulp van de FMECA worden:

- Alle gebeurtenissen (S) beschouwd,
- De effecten (A) ervan in beeld gebracht: het gaat vooral om een beschrijving hiervan en waar nodig en mogelijk een inschatting van de kans op falen gegeven S, P(F|S). De bepaling van P(F|S) kan lastig zijn omdat deze afhankelijk is meerder gebeurtenissen/componenten waardoor het eenvoudiger is om eerst een goede beschrijving te bepalen. Gebeurtenissenbomen en faalpaden zijn hierbij een belangrijke manier om de verschillende effecten in beeld te brengen;
- De kans van optreden (B) van de gebeurtenis S (P(S)) bepaald;
- De relevantie (C) bepaald op basis van het effect en de kans van de gebeurtenis.

In combinatie met mogelijke maatregelen kan vervolgens worden onderbouwd dat aan veiligheidseisen wordt voldaan. Grofweg kan dit op drie manieren:

1. Onderbouwen dat de combinatie van kans en effect (samen de relevantie C) voldoende klein is zonder maatregel. Vooral voor het effect van een gebeurtenis kan vaak op basis van een beschrijving worden onderbouwd dat een gebeurtenis niet relevant is zodat niet hoeft te worden teruggevallen op een meer complexe kansbepaling. Ook kan naar de relatieve bijdrage van de gebeurtenissen worden gekeken.
2. Maatregelen nemen die de kans of het effect zodanig verkleinen dat de kansbijdrage niet relevant is;
3. In een faalkansanalyse onderbouwen dat aan de veiligheidseis wordt voldaan.

Het idee hierachter is dat veel gebeurtenissen relatief eenvoudig kunnen worden ondervangen met een beheersmaatregel of uitgesloten kunnen worden op basis van kans en/of effect (bijvoorbeeld op basis van eerdere ervaringen), zodat uiteindelijk in de faalkansanalyse alleen wordt ingezoomd op de belangrijkste gebeurtenissen. *Alle gebeurtenissen waarvan de relatieve bijdrage niet klein genoeg is, moeten worden meegenomen worden in een faalkansanalyse.* Van belang hierbij is dat de gebeurtenissen elkaar ook kunnen beïnvloeden, de relatie met andere faalpaden is dus van belang, zie hoofdstuk 6. In Figuur 5-3 staat een voorbeeld FMECA voor een granulaire filter en in Figuur 5-4 een voorbeeld voor een heavescherm.

Onderstaand staat een versimpeld deel van een FMECA waarin wordt gekeken naar een granulaire filter.

Gebeurtenis S				A. Effect (onderbouwing)	B. Kans (onderbouwing)	C. Relevantie (onderbouwing)	Maatregel (onderbouwing)
#	Component (Functie)	Mogelijke falen	CAT	Beschrijving + inschatting P(F/S)	P(S) of kwalitatief	Op basis effect en kans. Verwaarloosbaar of opnemen in foutenboom.	
A	Granulaire filter (water doorlaten, korrels tegenhouden)	A.1 Verstopen	B	Te hoge waterspanning, niet verwaarloosbaar effect	Grote kans	Meenemen in foutenboom	Monitoring
		A.2 Korrels doorlaten	O	Filter functioneert niet met piping als gevolg. Niet verwaarloosbaar effect	Verwaarloosbare kans bij goed ontwerp	Niet relevant als ontworpen volgens vigerende methodes	Ontwerpen als gesloten filter

*Figuur 5-3 Vereenvoudigd voorbeeld FMECA granulaire filter*

**Voorbeeld FMECA voor heaveschermen**

Onderstaand staat een deel van de FMECA voor heaveschermen, zoals gepubliceerd in [3], waarin kan worden onderbouwd of het heavescherm aan de veiligheidseisen voldoet. Dit sluit aan op de systeembeschrijving van Figuur 4-5. Door bepaalde ontwerp-, uitvoering- of beheersmaatregelen toe te passen, kan de kans op bepaalde gebeurtenissen of bedreigingen als voldoende klein worden beschouwd. In dat geval is geen verdere faalpadanalyse meer nodig voor de desbetreffende gebeurtenis.

Gebeurtenis of bedreiging		Bedoeld functioneren en disfunctioneren scherm	Effect gegeven optreden van gebeurtenis <b>P(F S)</b>	Kans op optreden van gebeurtenis <b>P(S)</b>	Relevantie	Maatregel
1	Onderloopsheid bij intact scherm	Bedoeld functioneren (op ontworpen)	Kans op onderloopsheid  <i>Schatting</i> $P(F_{OLH} S_1)$ <i>ondersteund met berekeningen en gebruikelijke ontwerpeisen</i>	Kans scherm intact  $P(S_1) = ca. 1$	Bepalend voor ontwerp  <i>Schatting</i> <i>o.b.v.</i> $P(F_{OLH} S_1)$ <i>vooral bedoeld als referentie voor andere kansbijdragen</i>	Geen
...	...	...	...	...	...	...
6	Doorloopsheid Piping door opening scherm	Disfunctioneren	Interne erosie door opening  <i>Schatting</i> $P(F_{DLH} S_6)$ <i>ondersteund met berekeningen en beschouwing</i>	Scherm laat zand door (bijv uit het slot lopen)  <i>Schatting</i> $P(S_6)$ <i>ondersteund door casuïstiek</i>	Bedoeld voor prioritering, vergelijk met ontwerp  <i>Schatting</i> <i>o.b.v.</i> $P(F_{DLH} S_6)$ en $P(S_6)$	Beheersmaatregel (bijv slotverklidders / monitoring) of ontwerploop indien nodig
...	...	...	...	...	...	...
9	Onderloopsheid door fluidiseren vanwege harde gronden ondergrond	Disfunctioneren	Onderloopsheid onder scherm  <i>Schatting</i> $P(F_{OLH} S_9)$ <i>ondersteund met berekeningen en beschouwing</i>	Kans op fluidiseren om op diepte te komen  <i>Schatting</i> $P(S_9)$ <i>ondersteund door casuïstiek</i>	Bedoeld voor prioritering, vergelijk met ontwerp  <i>Schatting</i> <i>o.b.v.</i> $P(F S_9)$ en $P(S_9)$	Beheersmaatregel of ontwerploop (bijv. hogere porositeit)

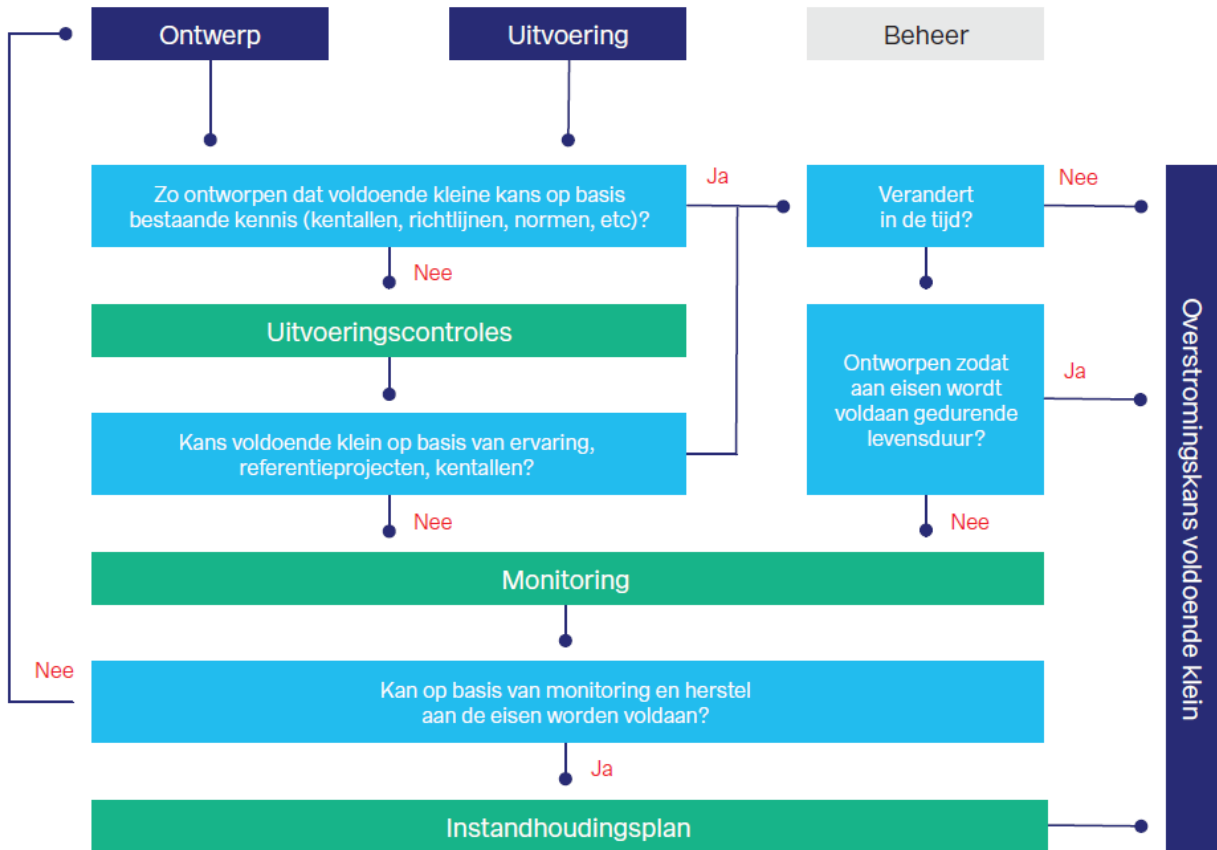
Figuur 5-4 Voorbeeld FMECA voor stalen heavescherm, overgenomen uit [3].

### 5.2.2 Maatregelen

Er zijn verschillende mogelijkheden voor maatregelen, waarvan de belangrijkste zijn:

- Ontwerpmaatregelen (op basis van bestaande kennis, kentallen);
- Uitvoeringscontroles;
- Monitoring en herstel.

Deze zijn niet in alle gevallen allemaal nodig. Een opzet van een stroomschema betreffende de samenhang tussen de verschillende mogelijkheden (in groen) staat in Figuur 5-5.



*Figuur 5-5 Eerst stappenplan voor onderbouwen veiligheid*

Het kan ook mogelijk zijn dat op basis van maatregelen in ontwerp, uitvoering en beheer en niet mogelijk is om te onderbouwen dat aan de eisen wordt voldaan. Het kan dan betekenen dat de maatregel (lokaal) niet toepasbaar is, of dat er meer kennisontwikkeling nodig is. In de volgende paragrafen worden nader ingegaan op de verschillende mogelijkheden voor het onderbouwen van de veiligheid.

Verder kunnen gebeurtenissen relatief beoordeeld worden. de VZG [17].

In onderstaande tabel staan drie voorbeelden van hoe de veiligheid is onderbouwd bij de OBOR VZG [17] voor gebeurtenissen van ontwerp (O), Uitvoering (U) en beheer (B). Voor de andere gebeurtenissen en de verdere details van de onderbouwing wordt verwezen naar [17].

Bedreigingen beheer (categorie 3)	Gevolg	Mogelijkheden in analyse	Uitwerking in paragraaf
<b>O8.</b> Uittredepunt (bovenstrooms) tussen geotextiel en waterkering	Voorloopsheid	Opbarstbeschouwing voor gebied tussen VZG en waterkering	4.3.3 van [17]
<b>U2.</b> Schade aan geotextiel tijdens uitvoering	Doorloopsheid	<b>Uitsluiten:</b> - <b>Mitigeren:</b> voldoende sterk geotextiel kiezen, uitvoering zo inrichten dat kans op schade geminimaliseerd wordt. <b>Monitoren:</b> geotextiel voor en tijdens aanbrengen controleren op schade	4.4.3 van [17]
<b>B3.</b> Beschadiging geotextiel door wortelgroei	Doorloopsheid	<b>Uitsluiten:</b> analyse (gemiddelde) grondwaterstand i.r.t. flora <b>Mitigeren:</b> zone vrijhouden van begroeiing, worteldoek <b>Monitoren:</b> (jaarlijkse) inspectie, hoogwaterinspectie	4.6.5 van [17]

Figuur 5-6 Voorbeelden onderbouwen veiligheid VZG [17].

### 5.2.3 Kennisontwikkeling

Naast de verschillende mogelijkheden om de veiligheid kwalitatief en kwantitatief te onderbouwen in ontwerp, uitvoering en beheer, kan ook kennisontwikkeling een belangrijk handelingsperspectief zijn. Dit kan de betreffende onzekerheden zodanig reduceren zodat aan de eisen wordt voldaan. Hier kan mee worden ontworpen door onzekerheden te accepteren hangende het onderzoek en te werken met terugvalopties. Bij kennisontwikkeling kan het gaan om bijvoorbeeld labproeven of maakbaarheidsproeven. Bijvoorbeeld bij een maakbaarheidsproef van kunststof heaveschermen bleek een significant aantal uit het slot te zijn gelopen. Gebeurtenissen

### 5.3 Gebeurtenissen op basis van systeembeschouwing

De gebeurtenissen volgen uit de systeembeschrijving (zie stap 3). Per component en functie kan worden geïdentificeerd wat er mogelijk mis kan gaan om zo een complete lijst met gebeurtenissen te krijgen. En verder kan onderscheid worden gemaakt tussen de verschillende faalpaden (voorloopsheid, doorloopsheid, etc.). Falen kan optreden omdat het ontwerp niet sterk genoeg is, of omdat de pipingmaatregel er niet bij ligt zoals in het ontwerp bedoeld, bijvoorbeeld door fouten in uitvoering of beheer. Hier wordt verschillend mee omgegaan, daarom kan het nuttig zijn onderscheid te maken in gebeurtenissen in:

- Ontwerp (bijvoorbeeld voorloopsheid);
- Uitvoering (bijvoorbeeld installatiefouten);
- Beheer (bijvoorbeeld veroudering).

De gebeurtenissen en de bijbehorende effecten kunnen gestructureerd in beeld worden gebracht op basis van gebeurtenisbomen en de hieruit volgende relevante faalpaden. Wanneer de kans op een initiële gebeurtenis al voldoende klein is, is het niet nodig om alle faalpaden bij die initiële gebeurtenis uitgebreid te beschouwen. Wanneer vervolgebeurtenissen relevant kunnen verschillende faalpaden worden onderscheiden. Zo kunnen van grof naar fijn relevante faalpaden worden gedefinieerd. De relevante faalpaden die na de FMECA overblijven kunnen in stap 5 dan worden geanalyseerd.

Voor algemene of projectspecifieke gebeurtenissen wordt verder verwezen naar de DIV publicaties en OBOR's. Het wordt aanbevolen niet standaard check-lists met gebeurtenissen af te lopen maar vooral per nieuwe pipingmaatregel goed na te denken welke gebeurtenissen kunnen optreden. Enkele generieke

gebeurtenissen die belangrijk zijn, zijn de interacties met andere faalmechanismes (bijvoorbeeld grote vervorming door instabiliteit kunnen een filter beschadigen) en overgangen tussen pipingmaatregelen of tussen maatregel en groene waterkering.

Naast de gebeurtenissen die volgen uit de systeembeschrijving is het ook nodig na te denken over externe gebeurtenissen zoals graverij, vandalisme en begroeiing. Als het effect van deze gebeurtenissen op het functioneren van de maatregel groot is, is het nodig hier een maatregel tegen te treffen.

#### 5.4 Effecten

Het effect van een gebeurtenis beschrijft hoe een gebeurtenis kan leiden tot falen van de kering. Er moet dus in kaart worden gebracht welke effecten een gebeurtenis kan hebben. Daarnaast kan het nodig zijn om een kansschatting van het effect te geven ( $P(F|S)$ ) welke nodig is voor het bepalen van de relevantie. Dit is soms erg lastig vanwege de relatie met andere gebeurtenissen; ook is het niet altijd nodig en is een beschrijving van het effect voldoende.

Er zijn verschillende mechanismes mogelijk die in het ontwerp, uitvoering of beheer een rol kunnen spelen. Deze mechanismen vormen samen met vervolgmecanismes faalpaden en kunnen allemaal mogelijke effecten zijn. Zowel als de maatregel er ligt conform ontwerp als in geval van afwijkingen hiervan.

Mogelijke effecten kunnen gestructureerd worden afgelopen op basis van een **gebeurtenissenboom** en hieruit volgende **faalpaden**. Het algemene faalpad voor piping is gegeven in 5.4.2. Faalpaden die verder voor de meeste pipingmaatregelen aandacht verdienen, zijn:

- Onderloopsheid
- Voorloopsheid
- Achterloopsheid
- Doorloopsheid
- Bovenloopsheid

Voor voorbeelden van gebeurtenissenbomen wordt verder verwezen naar paragraaf 6.3.

#### 5.5 Kansen

Er zijn verschillende bronnen van onzekerheid die de kansen bepalen. Het is dan ook belangrijk goed in kaart te brengen wat de bronnen van onzekerheid zijn. Afhankelijk van de bron kan er op verschillende manieren met de onzekerheid worden omgegaan zoals besproken in paragraaf 5.1.3. Daarbij is het vaak van belang welk deel van de onzekerheid reduceerbaar is en hoe. Bijvoorbeeld, als de belangrijkste bron van onzekerheid meetonzekerheid is, dan is deze te verkleinen door metingen vaker te herhalen (bij toevallige meetfouten) of door een andere meetmethode te gebruiken (als de meetfouten systematisch zijn). Als onzekerheden gekwantificeerd worden, kan dat onder op basis van data-analyse via bijvoorbeeld de momentenmethode, of Bayesiaanse parameterschatting; zie CUR [19]. Het effect van een onzekerheid op de faalkans van een component of systeem wordt verder behandeld in paragraaf 6.5. Zie verder paragraaf 6.4 voor andere mogelijkheden tot het kwantitatief bepalen van kansen van gebeurtenissen.

Het is niet altijd nodig om alle onzekerheden te kwantificeren, zoals ook besproken in (zie paragraaf 5.1.2). Bijvoorbeeld:

- Als op een kwalitatieve manier wordt onderbouwd dat de onzekerheden tot voldoende kleine kansen of effecten leiden (zie paragraaf 5.1.2); Bijvoorbeeld een klein gat in een bentonietmat in het voorland zal geen effect hebben op de grondwaterstroming en dus is de relevantie voldoende klein en is een kansinschatting hiervoor niet nodig;
- Als wordt ingeschat dat kans en effect niet leiden tot voldoende kleine relevantie en er vervolgens gekozen voor bijvoorbeeld een substitutie maatregel (zie paragraaf 5.1.3) waardoor een inschatting van de kans niet meer nodig is;

- Als kan worden onderbouwd dat een gebeurtenis relatief onbelangrijk is ten opzichte van andere gebeurtenissen en dus geen bijdrage levert aan de overstromingskans.

### **5.6 Onderbouwen veiligheid gedurende de levensduur**

Zoals beschreven in paragraaf 3.3 kan de veiligheid gedurende de levensduur veranderen, meestal afnemen door degradatie. Een instandhoudingsplan is daarom een integraal onderdeel van het ontwerp.

De veiligheid van een maatregel kan afnemen in de loop der jaren door bijvoorbeeld corrosie, verstopping of begroeiing. Een eerste stap van een instandhoudingsplan is het maken van een inventarisatie van welke tijdsafhankelijke aspecten mogelijk zijn en het inschatten van verouderingsgedrag. Vervolgens moet worden gekeken welke monitoringsmogelijkheden er zijn, zie ook paragraaf 6.4.6. Idealiter resulteert dit in een risico-gestuurd beheers- en onderhoudsconcept. Aangezien het instandhoudingsplan onderdeel is van de veiligheid van de maatregel, moet deze daarna door de beheerorganisatie worden uitgevoerd om de veiligheid te kunnen onderbouwen. Het is dan ook van belang om de beheerorganisatie te betrekken bij het opstellen van het instandhoudingsplan.

Aangezien er bij groene dijken niet wordt teruggevallen op noodmaatregelen voor het onderbouwen van veiligheid wordt dit voor pipingmaatregel ook niet verder behandeld. Dit neemt niet weg dat conform groene dijken er in de praktijk wel noodmaatregelen worden toegepast als dit nodig mocht zijn.



## 6 Stap 5: Faalkansanalyse

Dit Hoofdstuk richt zich op voornamelijk kwantitatieve manieren om de faalkans te bepalen. Zoals besproken in paragraaf 5.1.2 en 5.1.3 zijn er ook andere manieren om de veiligheid te onderbouwen en om te gaan met onzekerheid.

### 6.1 Algemeen

#### 6.1.1 Doel

Het doel van de faalkansanalyse is om voor de gebeurtenissen die uit de FMECA zijn overgebleven te onderbouwen of aan de overstromingskansen wordt voldaan. Het gaat hierbij om:

- Bepalen totale faalkans van de waterkering inclusief pipingmaatregel;
- Bepalen relevantie van een gebeurtenis (S) door middel van kans en effect of door middel van een beschrijving/onderbouwing;
- Bepalen kans van optreden van een gebeurtenis P(S).

#### 6.1.2 Systeemkansen

Aangezien er vaak verbanden zijn tussen de gebeurtenissen is het raadzaam om het totaal van relevante gebeurtenissen uit de FMECA in een fouten- of gebeurtenissenboom te zetten zodat er een totaaloverzicht wordt verkregen. En op basis hiervan kan de systeemkans worden bepaald. Systeemanalyses kunnen worden gedaan op basis een gebeurtenissenboom of een foutenboom. Een gebeurtenissenboom is praktisch in geval verschillende gebeurtenissen een logische volgorde hebben om tot falen te komen. Foutenbomen kunnen handiger zijn dan gebeurtenissenbomen als er verschillende gebeurtenissen kunnen leiden tot een vervolgebeurtenis, dus als één event meerdere oorzaken kan hebben (veel OF-poorten). Gebeurtenissenbomen zijn dan snel omvangrijk en onoverzichtelijk. Ook zijn foutenbomen vaak handig bij modelleren. De uitwerking van foutenbomen en gebeurtenissenbomen volgt in de volgende paragrafen 6.2 en 6.3 en worden verder behandeld in [8].

#### 6.1.3 Bronnen

De volgende bronnen kunnen worden geraadpleegd voor inspiratie en onderbouwing van een faalkansanalyse:

- [5] Handreiking prestatiegestuurde risicoanalyses (PRA) voor algemene toepassing foutenbomen en gebeurtenissenbomen;
- [8] Handleiding overstromingskansanalyse voor toepassing faalpaden analyses bij waterkeringen;
- [21] POV Kabels en Leidingen voor het onderbouwen van de veiligheid op basis van faalpaden en kentallen;
- [22] Recente veiligheidsanalyses van de Oosterscheldekering met gedetailleerde systeemanalyses.
- [23] Conceptuele analyse van het gebruik van de faalpaden-methodiek;
- [24] Faalpaden voor piping;

### 6.2 Foutenbomen

“Een foutenboomanalyse (Fault tree analysis, FTA) is een analyse, die de kans op falen van het systeem (de kans op de ongewenste topgebeurtenis) berekent door uit te gaan van de kansen op falen van de afzonderlijke systeemelementen.” [5]. Een foutenboom heeft altijd de volgende onderdelen:

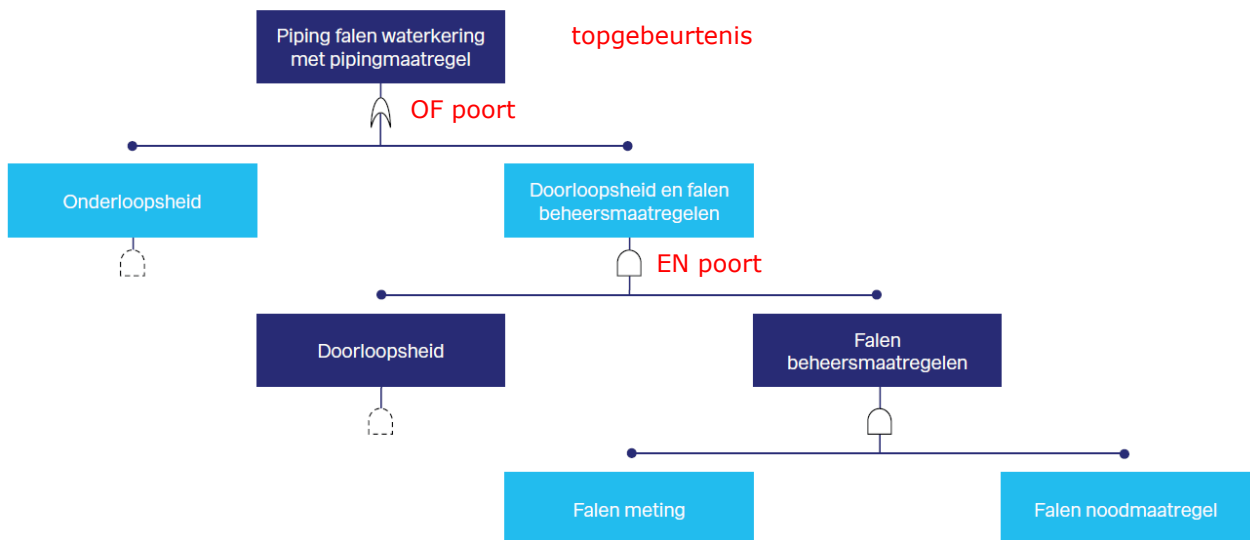
- Een **ongewenste topgebeurtenis**: binnen de scope van dit veiligheidsraamwerk is dat het falen van de waterkering met pipingmaatregel door piping, maar breder kan ook worden gekeken naar falen van de waterkering.
- **Basisgebeurtenissen**:
- Logische **poorten** om de gebeurtenissen aan de topgebeurtenis te verbinden:
  - EN
  - OF

Belangrijke aandachtspunten bij het opstellen zijn: “De topgebeurtenis is altijd het niet voldoen aan een functionele eis of het falen van een systeem. In een foutenboom komen geen ‘positieve’ gebeurtenissen voor. Een foutenboom wordt van boven naar beneden opgezet, tegen de procesflow in. De topgebeurtenis wordt via tussenstappen steeds verder gedecomposeerd tot het niveau van de basisgebeurtenissen.” [5]. Deze tussenstappen zijn belangrijk omdat zo een zo helder en bruikbaar mogelijke foutenboom ontstaat. Barrières (gebeurtenissen) voor extra veiligheid (bijvoorbeeld monitoring en herstel) kan je los modelleren onder EN-poorten of al meenemen bij de kans optreden van een gebeurtenis.

Onderstaand (Figuur 6-1) staat een generieke voorbeeldfoutenboom voor een pipingmaatregel, inclusief in rood de belangrijke onderdelen. Hierin staan slechts 2 mogelijke faalpaden (onderloopsheid en doorloopsheid). Voor beide getoonde faalpaden (en de overige faalpaden) moet er meer gebeuren voordat deze tot falen leiden (bijvoorbeeld het opbarsten van de deklaag); dit is voor de eenvoud allemaal niet meegenomen). Het voorbeeld laat zien dat doorloopsheid tot falen leidt, als zowel doorloopsheid optreedt, monitoring faalt en de beheersmaatregel faalt. Aan al deze knoppen kan gedraaid worden om de veiligheid te onderbouwen. Daarnaast zijn voorbeelden van foutenbomen voor heaveschermen en SoSeal gegeven in respectievelijk Figuur 6-2 en Figuur 6-3.

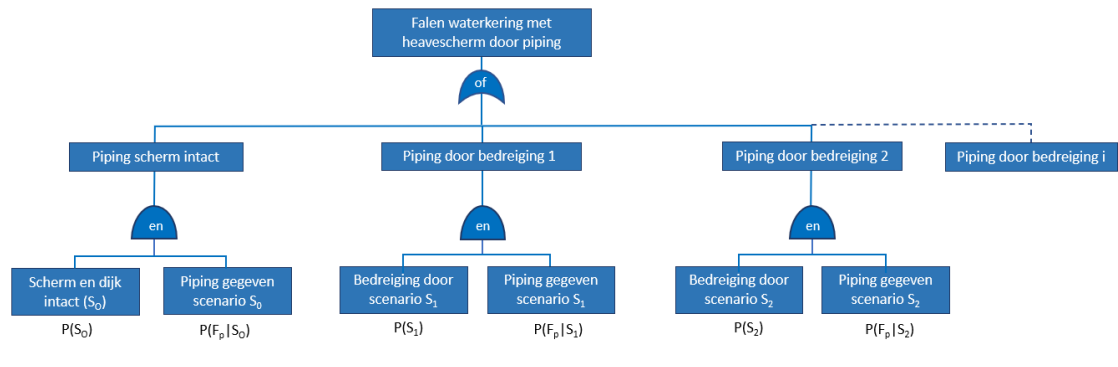
Voor meer achtergronden wordt verwezen naar:

- Handleiding overstromingskansanalyse [8].
- CUR 190 (CUR, 1997).



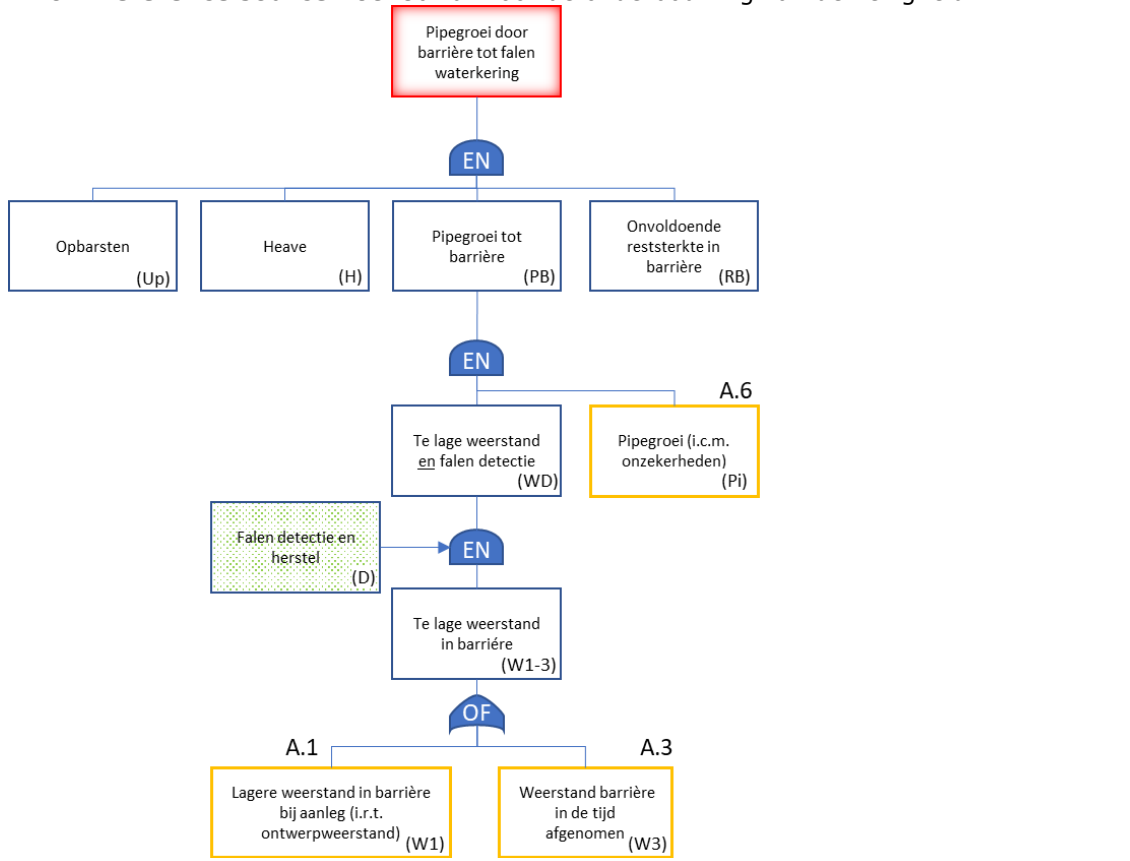
*Figuur 6-1 Voorbeeld foutenboom met onderloopsheid en doorloopsheid en pipingmaatregel inclusief in rood de belangrijke onderdelen*

Op basis van de FMECA voor heaveschermen zijn foutenbomen opgesteld. Een generieke vorm staat in onderstaande figuur. Per bedreiging (voorloopsheid etc) zijn vervolgens aparte foutenbomen gemaakt. En er is een aanpak ontwikkeld om met de eerste knoop om te kunnen gaan. Zie verder de publicatie heaveschermen [3].



Figuur 6-2 Voorbeeld foutenboom heaveschermen [3]

Voor SoSeal (bron: SoSeal - Project Specifieke Ontwerprichtlijn (WAM). 80% versie 19-04-2023) is op basis van een FMECA gebleken dat er nog drie relevante gebeurtenissen zijn. Deze zijn als A.1, A.3 en A.6 samen weergegeven in een foutenboom. Hieruit blijkt dat er verschillende gebeurtenissen moeten optreden voordat falen (topevent in rood) optreedt. Aangezien er nog kennisvragen zijn rondom monitoren en knopen A.1 en A.3, wordt de veiligheid voornamelijk onderbouwd op basis van de kans op gebeurtenis A.6. Zie verder **Error! Reference source not found.** voor de onderbouwing van de veiligheid.



Figuur 6-3 Voorbeeld foutenboom SoSeal

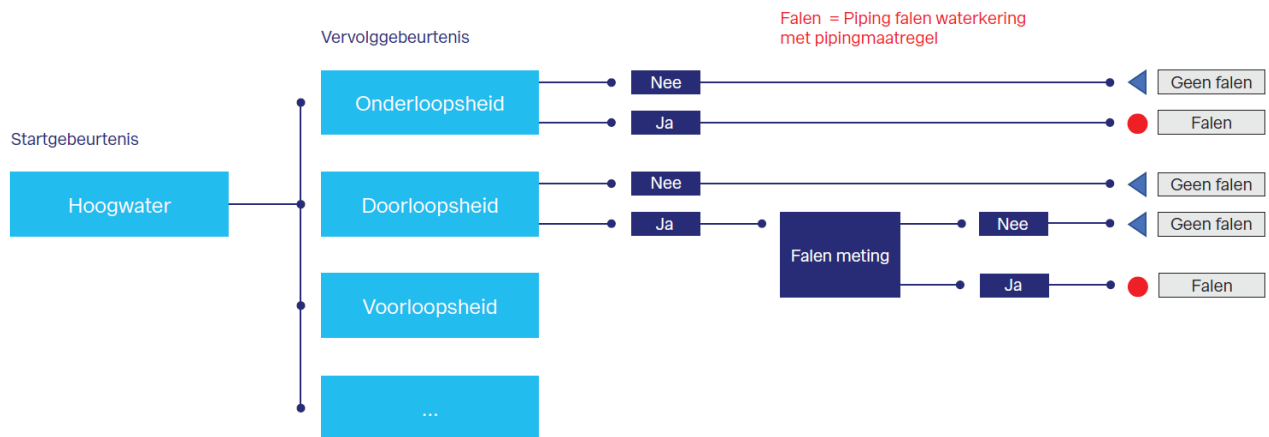
### 6.3 Gebeurtenissenboom

Een gebeurtenissenboom is een manier om weer te geven hoe verschillende gebeurtenissen resulteren in falen. De faalpaden zijn alle combinaties van gebeurtenissen die tot falen leiden. Anders dan een foutenboom begin je bij een gebeurtenissenboom met een initiërende gebeurtenis en loop je vervolgens alle gebeurtenissen af die kunnen resulteren in falen. Alle gebeurtenissen moeten optreden voordat falen kan optreden. Zie [8] voor meer achtergrond en voorbeelden.

Enkele aandachtspunten bij het opzetten van een gebeurtenissenboom:

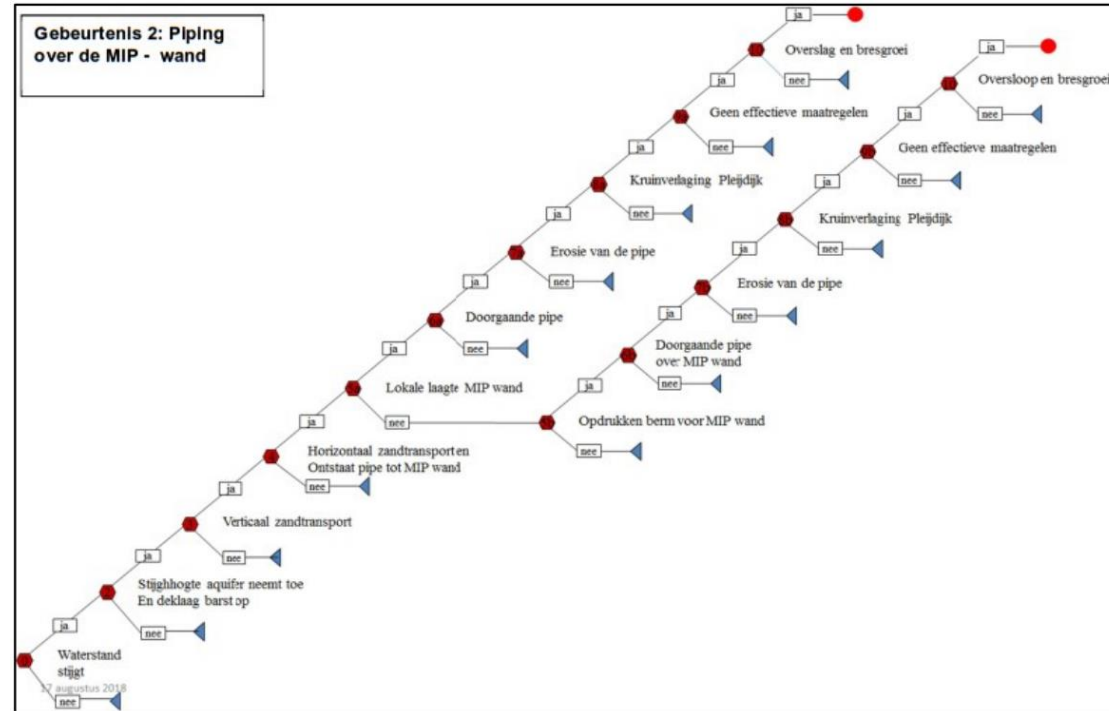
- Een gebeurtenissenboom begint altijd met een startgebeurtenis, de rest zijn gevolg gebeurtenissen; deze staan allen uitgedrukt als knopen;
- De startgebeurtenis is doorgaans een gebeurtenis uitgedrukt met een jaarkans, de gevolggebeurtenissen zijn conditionele kansen (de kansen die horen bij een knoop tellen dus op tot 1 als alle gebeurtenissen zijn meegenomen).
- De som van de kansen van alle faalpaden is de totale faalkans.

Een voorbeeld van een generieke, sterk vereenvoudigde gebeurtenissenboom staat in onderstaande figuur. In Figuur 6-5 en Figuur 6-6 staan 2 voorbeelden van toepassingen van gebeurtenissenbomen.



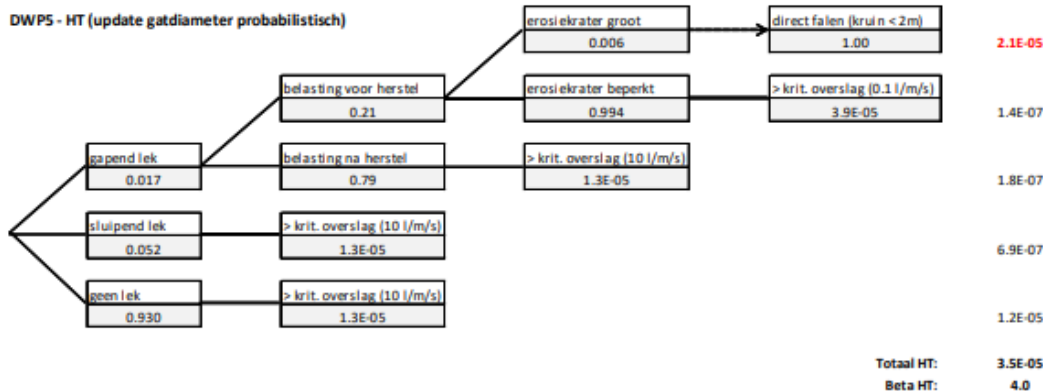
*Figuur 6-4 Generieke gebeurtenissenboom pipingmaatregel inclusief in rood de belangrijke onderdelen (falen is falen waterkering door piping, met pipingmaatregel)*

In onderstaande figuur staat een gebeurtenissenboom voor een Mixed in Place (MIP) wand. Hierbij is vooral de gebeurtenis lekkage langs MIP wand uitgewerkt. Het valt op dat er nog veel gebeurtenissen moeten optreden voordat falen optreedt.



Figuur 6-5 Voorbeeld gebeurtenissenboom Mixed-in-place [25].

In onderstaande figuur staat een uitgewerkte gebeurtenissenboom voor leidingfalen en het effect hiervan op macrostabiliteit buitenwaarts op basis van [26] binnen de POV Kabels en Leidingen. De principes zijn vergelijkbaar met piping. Pipingfalen is onafhankelijk van de waterstand verondersteld, waardoor alleen de kans op een krater of toegenomen waterdruk moet worden bepaald. De getallen laten zien hoe zo een totale faalkans kan worden bepaald.



De kansen van de initiërende gebeurtenissen gebaseerde op statistiek van leiding falen (gapend lek, sluipend lek, geen lek). De kansen op belasting voor herstel zijn gebaseerd op basis van belasting- en reparatiestatistieken. De kans op een grote of kleine krater is bepaald op basis van een verdeling van kratergroottes. De kans op afschuiving is bepaald op basis van stabiliteits-analyses als functie van kratergrootte en waterstand.

Figuur 6-6 Voorbeeld gebeurtenissenboom falen leiding [26]

## 6.4 Kwantitatieve onderbouwingen kansen

In deze paragraaf worden verschillende mogelijkheden behandeld om kwantitatieve kansen en kansverdelingen te bepalen voor de individuele gebeurtenissen. Een andere manier is via faalkansanalyses, deze wordt besproken in paragraaf 6.5.

### 6.4.1 Algemeen

Volgens Rijkswaterstaat (2017) zijn er de volgende manieren om de veiligheid de onderbouwen: via statistisch valide onderbouwde praktijkgegevens van het betreffende component, leveranciersgegevens, algemeen geaccepteerde faaldata, faaldatabase RWS en expert judgement. Op basis van hiervan kan het (kwantitatief) onderbouwen van de veiligheid vervolgens op basis van de volgende manieren:

- Proevenverzamelingen, zie paragraaf 6.4.2;
- Bestaande kennis en kalibratierelaties, zie paragraaf 6.4.3;
- Kentallen, zie paragraaf 6.4.4;
- Uitvoeringscontroles en proefbelastingen, zie paragraaf 6.4.5;
- Monitoring, zie paragraaf 6.4.6;
- Maakbaarheidsproeven, zie paragraaf 6.4.7;
- Referentieprojecten, paragraaf 6.4.8;
- Expert schattingen, paragraaf 6.4.9.

Of een combinatie van bovenstaande. In alle gevallen is het van belang dat de dimensie van de beschouwde kans helder is: gaat het om jaarkansen (zoals de eis is gedefinieerd), of kansen per vraag (bijvoorbeeld de kans op falen van een pomp gegeven dat deze wordt geactiveerd), of kansen met een andere ruimte- en of tijdseenheid. Dit is vooral van belang voor het combineren van kansen en het onderbouwen van de veiligheid.

Als niet expliciet de prestatie aan een kans kan worden gekoppeld, is het wel van belang expliciet alle onzekerheden te identificeren, inclusief mogelijke bandbreedte, en een keuze te maken hoe hier mee te gaan. Voorbeelden hoe in dit geval de veiligheid kan worden onderbouwd staan in paragraaf 5.1.2.

#### 6.4.2 *Opstellen proevenverzamelingen*

Het opstellen van regionale of lokale proevenverzamelingen is de meest gangbare manier voor grondparameters om kansverdelingen te bepalen. Het effect van meer metingen op de reductie van onzekerheden volgt hier ook direct uit. Zie bijvoorbeeld [27] voor meer achtergrond bij het gebruik van proevenverzamelingen. Naast grondparameters kan deze aanpak ook voor andere parameters in pipingmaatregelen worden toegepast zoals verdichtingsgraden of het aantal benodigde proefnemingen voor de bepaling van correctiefactoren bij paalfunderingen [36].

#### 6.4.3 *Bestaande kennis en kalibratierelaties*

Voor verschillende gebeurtenissen kan voor het onderbouwen van de veiligheid worden teruggevallen op bestaande kennis. Bronnen hiervoor zijn bijvoorbeeld:

- i. Verificaties uit BOI [1], bijvoorbeeld voor opbarsten/voorloopsheid; Onderdeel hiervan zijn de relaties tussen veiligheidsfactor en jaarlijkse faalkans uit de kalibratiestudies.
- ii. Bestaande kennis uit eerdere studies; bijvoorbeeld de studie van Calle en Sellmeijer uit 1998 [29] die de basis vormt voor de rekenwaarde van de kritieke heave-gradiënt bij schermen van 0.5 kan (in aangepaste vorm) worden gebruikt bij het onderbouwen van de veiligheid voor heaveschermen.
- iii. EuroCode 7 of de corresponderende NEN normen;
- iv. CUR richtlijnen, bijvoorbeeld [28];
- v. Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken [27];
- vi. Kennis voor Keringen informatie, bijvoorbeeld voor het veilig omgaan met voorlanden [31].

AD (i) Een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van kalibratierelaties is dat hier een **jaarlijkse** faalkans wordt bepaald op basis van een berekende veiligheidsfactor (of vice-versa). Kalibratierelaties kunnen dus niet direct worden toegepast om een conditionele kans mee te bepalen. In geval men op zoek is naar conditionele kansen zal een aparte faalkansanalyse gegeven een bepaalde waterstand moeten worden gedaan. Kalibratierelaties kunnen ook andersom worden gebruikt: door een semi-probabilistische bepaalde veiligheidsfactor voor opbarsten, heave of terugschrijdende erosie om te rekenen naar een jaarlijkse faalkans zodat geen probabilistische analyses nodig zijn. Zie ook paragraaf 6.5.4. Door de kalibratierelaties zo andersom te gebruiken is een eerste schatting van een jaarlijkse faalkans te verkrijgen. Uiteindelijk verdient een probabilistische analyse altijd de voorkeur, gelet op de mogelijk zeer grote onnauwkeurigheid van dit gebruik van kalibratierelaties.

#### 6.4.4 *Kentallen*

Het kan hierbij gaan om leveranciersgegevens, algemeen geaccepteerde faaldata en de faaldatabase van Rijkswaterstaat. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Faaldata bases, bijvoorbeeld:
  - De RWS faaldatabase [30] welke wordt gebruikt voor kunstwerken, deze gaat vooral in op elektrisch en werktuigbouwkundig falen;
  - Kabels en leidingen [21] waarin onder meer gekeken wordt naar kentallen van leidingfalen en de effecten hiervan op de veiligheid
  - De prestaties van ontlastputten ('Relief wells') waarin wordt gekeken naar onder meer verstopping;
  - De Leidraad Kunstwerken [31] gericht op faaldata van onderdelen van waterbouwkundige kunstwerken;
  - Het Oreda Handbook [32] gericht op faaldata in de offshore industrie;
  - Het EIReDA handboek [33] gericht op faaldata voor componenten in energieopwekking en transport;

- Het RWS OPSCHep model [34] voor de invloed van menselijk handelen.
- Leveranciersgegevens, vooral voor structurele componenten zijn deze vaak beschikbaar.
- Ervaringen uit aanpalende vakgebieden, bijvoorbeeld voor filters ervaringen uit de drinkwaterindustrie.

Aandachtspunten hierbij zijn:

- Tijdsdimensie: gaat het om een faalfrequentie/faaltempo (kans per tijdseenheid) of om een kans per aanroep?
- Ruimtedimensie: gaat het om een kans per meter of een kans per element?
- Systeem: gaat om het om falen van een element of een systeem van meerdere elementen?

Het is vooral belang dat de kentallen aansluiten bij wat wordt gevraagd in de onderbouwing van de veiligheid. Dus dat het kental niet een kans per jaar is, terwijl de faalkansanalyse een conditionele kans per aanroep vraagt. En dat het kental niet een kans per meter is terwijl een kans per dijkvak wordt gevraagd.

#### 6.4.5 *Uitvoeringscontroles en proefbelastingen*

Er zijn verschillende uitvoeringscontroles mogelijk om te onderbouwen dat het betreffende element is aangebracht zoals voorzien, te denken valt aan:

- Slotverklikkers voor damwanden: een veelgebruikte methode in geval uit het slot lopen een belangrijke bedreiging is. Met als kanttekening dat de kans van het ongemerkt uit het slot lopen niet tot 0 reduceert met een slotverklikker. Zie bijvoorbeeld [36] en [40] voor meer informatie over de toepassing van slotverklikkers;
- Uitvoeringsprotocollen: Deze zijn vaak in de loop der tijd ontwikkeld om controleren of een maatregel is uitgevoerd zoals voorzien. Bijvoorbeeld door te monitoren hoeveel materiaal (bijvoorbeeld filtermateriaal voor een GZB) is gebruikt, of door drukken te monitoren tijdens de uitvoering.
- Boringen: voor grondverbeteringstechnieken (bijvoorbeeld SoSeal; Mixed-In-Place) kunnen boorkernen worden gestoken om de continuïteit en kwaliteit van de maatregel aan te tonen. De benodigde meetdichtheid hangt af van de verwachte interval in mogelijke defecten.
- Inspecties: visuele of andere inspecties kunnen worden uitgevoerd om te onderbouwen dat een maatregel correct is uitgevoerd. Met daarbij inachtnemend dat dit soort inspecties hun eigen meetonnauwkeurigheid hebben;

Idealiter resulteert een uitvoeringscontrole direct in een verwaarloosbare kans van de gebeurtenis waar deze bij hoort. De uitvoeringscontrole is echter ook vaak niet 100% zeker, de betrouwbaarheid hiervan moet dus ook expliciet worden meegenomen. Uitvoeringscontroles, net zoals monitoring, kunnen dus een expliciet onderdeel van het ontwerp worden. En dienen ook zo te worden vastgelegd en steekproefsgewijs te worden gevalideerd.

Daarnaast zijn proefbelastingen en controleproeven een goede mogelijkheid om aan te tonen dat een maatregel goed is uitgevoerd. Dit is gangbaar bij bijvoorbeeld paalfunderingen, zie [35] voor handvatten over hoe om te gaan met proefbelastingen voor paalfunderingen, inclusief statistische overwegingen. Ook voor ankers van damwanden worden handvatten gegeven voor verschillende controleproeven (soort en aantal) in [36].

#### 6.4.6 *Monitoring en herstel*

Monitoring kan nodig zijn voor het onderbouwen van de veiligheid als ontwerp- en uitvoeringscontroles niet voldoende of te kostbaar zijn om de veiligheid te onderbouwen. Voor monitoring is het van belang dat ongewenste gebeurtenissen opgemerkt kunnen worden. Bij veel maatregelen (heaveschermen, GZB, VZG) zullen zandmeevoerende wellen optreden, terwijl dit niks zegt over het functioneren van de maatregel.



Monitoring staat niet op zichzelf maar moet altijd in samenhang met herstel (door middel van een herstel- of beheersmaatregel) worden.

Aandachtspunten bij een goed monitorings- en herstelplan zijn:

- Wat is meetbaar?
- Is er een verschil meetbaar tussen het falen en niet-falen van een component?
- Bij welke waterstand is dit?
- Hoe groot zijn mogelijke afwijkingen, welke resolutie van metingen is nodig om dit te kunnen detecteren?
- Hoe groot is de meetonzekerheid?
- Is er een handelingsperspectief, bijvoorbeeld herstel van de pipingmaatregel voordat er hoogwater optreedt, of een andere beheersmaatregel?
- Hierbij moet rekening worden gehouden met de kans op falen van de herstel- of beheersmaatregel.

Generiek geldt dat gaten in lange wanden of schermen niet eenvoudig uit te sluiten zijn met monitoring. Er zijn doorgaans geen goede technieken beschikbaar die met voldoende ruimtelijke dichtheid gaten kunnen detecteren. Daarnaast is er ook vaak een significante belasting (hoogwater) nodig om een eventueel gat te kunnen detecteren, waarna het de vraag is of er nog een herstelmaatregel mogelijk is. Zie ook Figuur 6-7 voor een verdere duiding met een voorbeeld.

Gaten in een heavescherm (bijvoorbeeld door uit slot lopen van planken) kunnen een belangrijke bedreiging zijn. Deze zijn vaak in eerste instantie niet merkbaar, tenzij uitvoeringscontroles worden uitgevoerd (bijv. slotverklidders worden toegepast om deze kans te reduceren). Het gaat dan om niet-merkbaar falen. Monitoring van waterspanningen is waarschijnlijk niet haalbaar met voldoende zekerheid omdat het een erg lokaal fenomeen is en je hierdoor geen significant signaal kan meten onder dagelijkse omstandigheden en pas bij kritische omstandigheden (misschien) een meting mogelijk is, maar dan is het de vraag of er nog herstel mogelijk is. Voor de onderbouwing van veiligheid kan in dit geval dus beter niet op monitoring worden vertrouwd, maar beter op het effect van gaten: kleine gaten door een enkele plank uit het slot zullen niet snel zorgen voor een groot effect, dit gebeurt pas bij grote gaten en meerdere planken uit het slot, wat weer erg onwaarschijnlijk is.

*Figuur 6-7 Voorbeeld monitoren gaten in heavescherm*

De aanwezigheid van waterremmende of afsluitende lagen daarentegen kan eenvoudiger met monitoring worden aangetoond. Deze kan met stijghoogtemetingen waarschijnlijk al bij relatief kleine waterstandsverschillen worden aangetoond, in welk geval er mogelijk een beheersmaatregel getroffen kan worden.

Of de kans op verstopping van een filter met monitoring onderbouwd kan worden hangt af van het soort filter. Sommige technieken met filters (zoals Prolock, zie Figuur 6-8, DMC) kunnen aan een pomp gekoppeld worden waarmee kan worden gecheckt of er een verstopping is. Er zijn ook technieken waarbij de filter weer geregenereerd kan worden. Voor andere filters (zoals GZB) geldt dit niet en wordt de monitoring gezocht in het aanbrengen van gekleurd zand boven de filter wat als eventueel waarschuwing kan dienen.

Bij het ProLock systeem kan de waterspanning worden gemeten en kan met een ontrekkingsproef worden bepaald of het filter nog functioneert zoals ontworpen en niet verstopt is geraakt. Als er een verstopping wordt gedetecteerd kan het filter worden geregenereerd. Door de met enige regelmaat te doen kan de kans op verstopping worden geminimaliseerd. De frequentie van testen kan in een lifecyclebenadering worden uitgewerkt waarbij wordt gekeken naar de verwachte tijd tot verstopping, kosten van monitoring en de levensduur van het scherm.

*Figuur 6-8 Voorbeeld monitoring: Monitoren verstopping ProLock*

#### 6.4.7 *Maakbaarheidsproeven*

Als er geen ervaringen met een techniek zijn of de toepassing ervan bij waterkeringen wordt vaak een maakbaarheidsproef uitgevoerd. Deze dient vooral voor het identificeren van mogelijke faaloorzaken/ongewenste gebeurtenissen maar zal als alleenstaande onderbouwing van de veiligheid snel onvoldoende zijn. Wel kan deze worden gebruikt als een van de onderdelen van de onderbouwing van de veiligheid (door het identificeren van gebeurtenissen), waarbij goed nagedacht moet worden hoe de toepassing in het veld verschilt van de situatie bij de uitvoeringsproef.

#### 6.4.8 *Referentieprojecten en ervaring*

Referentieprojecten zijn projecten waarbij een vergelijkbare maar net andere techniek of toepassing is gebruikt. Het voordeel hiervan is de ervaring: de techniek is al vaker toegepast waardoor er uitvoeringsprotocollen zijn er mogelijk prestatie- of faaldata beschikbaar is. Deze ervaring moet vervolgens zorgvuldig worden doorvertaald naar toepassing voor de pipingmaatregel. Afhankelijk van hoeveel de referentieprojecten lijken op de voorziene toepassing kan een referentieproject meer of minder invloed hebben. In Figuur 6-9 staat een voorbeeld van het gebruik van een referentieproject.

Bij de Herbert Hoover Dike (HHD) in Florida, de Verenigde Staten van Amerika, is een reservoir omringd door dijken. Om interne erosie tegen te gaan is hier een wand (cutoff wall) gemaakt vergelijkbaar met het SoilMix systeem. Er is contact geweest met de projectorganisatie. Zij hebben bijvoorbeeld boringen toegepast elke 70m en deze getest op doorlatendheid en met video op scheuren. Daarnaast staat er een continu verval op de dijk, waardoor goed visueel kan worden gezien dat de wand goed functioneert. De ervaringen (uitvoeringsmethode, uitvoeringscontroles, as-built controles, monitoring) kunnen mogelijk worden vertaald naar de Nederlandse situatie voor het onderbouwen van de veiligheid. Zie voor verdere informatie: <https://www.geosyntec.com/projects/item/728-herbert-hoover-dike-rehabilitation-reach-1-seepage-cutoff-wall-at-lake-okeechobee-florida>

*Figuur 6-9 Voorbeeld: referentieproject Herbert Hoover Dike*

#### 6.4.9 *Expert schattingen*

Expert schattingen (expert judgment) zullen vaak nodig zijn om bijvoorbeeld te onderbouwen dat kansen verwaarloosbaar klein zijn. Dit kan op verschillende manieren, bijvoorbeeld door eerdere ervaringen te kwantificeren. Het is vooral van belang zo transparant mogelijk te maken hoe tot een kansschatting is gekomen. Expert opinion elicitation (EOE) is een gestandaardiseerde methode om kansen te bepalen op basis van gekalibreerde experts. Dit wordt hier verder niet behandeld aangezien hier voor Nederlandse waterkeringen nog nauwelijks ervaring mee is en er dus zeer terughoudend met EOE moet worden omgegaan in deze context.

### 6.5 **Faalkansanalyse**

Voor het bepalen van kansen van gebeurtenissen of het hele systeem kan naast de methodes uit voorgaande paragraaf (voor individuele gebeurtenissen) ook een faalkansanalyse of betrouwbaarheidsanalyse worden uitgevoerd. In deze paragraaf worden beknopt de principes

weergegeven, voor meer informatie wordt verwezen naar bijvoorbeeld PRA [5], CUR190 [35], handreiking faalkansanalyse [36], etc.

#### 6.5.1 *Betrouwbaarheid gebeurtenis*

De betrouwbaarheid (uitgedrukt als faalkans) van een element (gebeurtenis) wordt gegeven door onderstaande formule:

$$P_f = P(Z < 0) \quad (6.1)$$

Waarbij  $Z$  de grenstoestandfunctie is waarin alle sterkte en belastingvariabelen zijn meegenomen als stochastische verdelingen of deterministische parameters. De bepaling van de verdelingen kan op verschillende manieren, zie paragraaf 5.5 en de voorgaande paragraaf 6.4.

#### 6.5.2 *Betrouwbaarheid systeem*

Voor de betrouwbaarheid van een systeem kan onderscheid worden gemaakt tussen:

- Parallelsysteem (EN poort in een foutenboom): falen treedt op als alle gebeurtenissen optreden. De systeemkans is het product van de gebeurteniskansen in geval van onafhankelijke gebeurtenissen.
- Seriesysteem (OF poort in een foutenboom): falen treedt op als een van de gebeurtenissen optreedt. De systeemkans is ongeveer de som van de gebeurteniskansen in geval van onafhankelijke gebeurtenissen en kleine kansen.

Voor een parallelwerking met onafhankelijke gebeurtenissen neemt de veiligheid snel toe met het aantal gebeurtenissen door de vermenigvuldiging van kansen. In geval van seriesysteem met onafhankelijke gebeurtenissen neemt de systeemfaalkans juist toe met het aantal gebeurtenissen door de sommatie van kansen.

#### 6.5.3 *Software*

Er zijn verschillende programma's beschikbaar om de faalkansen van een element of een systeem te berekenen, bijvoorbeeld op basis van foutenbomen of op basis van evaluaties van grenstoestandfuncties. Enkele softwarepakketten zijn:

- Fault Tree+ voor het uitrekenen van foutenbomen;
- PTK (Freeware Deltares) voor de betrouwbaarheid van systeem en element <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/probabilistic-toolkit-ptk>;
- Prob2B (TNO) voor de betrouwbaarheid van systeem en element;
- OpenEarth, FERUM (Matlab) voor betrouwbaarheidsanalyses op basis van grenstoestandfuncties (kan zowel systeem als element zijn).
- UQPy, OpenTurns, Pyre (Python) voor betrouwbaarheidsanalyses op basis van grenstoestandfunctie (kan zowel systeem als element zijn).
- The U.S. Army Corps of Engineers (USACE) biedt verschillende hulpmiddelen aan op: <https://www.rmc.usace.army.mil/Software/>, met hierin software voor:
  - Excel-tool voor het snel tekenen van faalpaden, met voorbeelden
  - Het fitten van verdelingen van belastingparameters (bijv. waterstand, debiet, golfhoogte) op tijdreeksen/historische data (RMC-BestFit)
  - Kwantitatieve risicoanalyse (Quantitative Risk Assessment Calcs Suite).

Hierin zijn de USACE software, Fault-Tree+, PTK en Prob2B het eenvoudigst te hanteren door de gebruikers interfaces. De Python en Matlab pakketten zijn iets lastiger te gebruiken maar bieden meer mogelijkheden. In alle gevallen geldt dat bij twijfel over het gebruik het best specialistisch advies kan worden ingewonnen.

#### 6.5.4 *Schematiseringsfactor*

De schematiseringsfactor kan worden gebruikt voor semi-probabilistische onderbouwing van de veiligheid en is gangbaar voor bijvoorbeeld het meenemen ondergrond scenario's [1]. Onzekere gebeurtenissen

kunnen via deze aanpak (inclusief een inschatting van de kans hiervan) relatief eenvoudig worden meegenomen met behulp van een zogenaamd rekenblokje [37] voor semi-probabilistische analyses. In dit rekenblokje, een excelsheet, kan op basis van een inschatting van de scenario-kansen en het effect van deze kansen op de berekende veiligheidsfactor een minimaal benodigde schematiseringsfactor worden bepaald welke nodig is om de schematiseringsonzekerheid (uitgedrukt in scenario's) te ondervangen. Een belangrijk aandachtspunt is dat achterliggend deze aanpak de kalibratierelaties worden gebruikt, bijvoorbeeld de relatie tussen de berekende veiligheidsfactor voor piping en de faalkans. Als de pipingmaatregel hier sterk vanaf wijkt, is het rekenblokje niet meer geldig en moet worden teruggevallen op een volledige probabilistische analyse. Deze probabilistische aanpak volgt dezelfde aanpak als het rekenblokje, waarbij in plaats van kalibratie-relaties probabilistische analyses worden gebruikt. Een belangrijk aandachtspunt is dat er in het rekenblokje wordt gerekend met een kans op jaarbasis en dus niet geschikt is voor de bepaling conditionele kansen.

## 6.6 Interacties en correlaties

### 6.6.1 Algemeen



**Interacties** treden op als het optreden van een gebeurtenis een andere gebeurtenis positief dan wel negatief beïnvloedt, bijvoorbeeld als verstopping leidt tot hogere waterspanningen onder een deklaag en daarmee opbarsten en/of instabiliteit van het talud. Interactie (causaliteit) impliceert **afhankelijkheid**. Een praktische manier om met interacties om te gaan is door te verkennen welke mogelijke interacties er zijn en wat het effect is van interacties op de totale faalkans. Dit kan door eerst te kijken naar de extremen: geen effect van interacties en de slechtst mogelijke combinatie van interacties. Als dit leidt tot grote verschillen kan met gevoeligheidsanalyses worden onderzocht waar de belangrijkste interacties plaatsvinden. Als de effecten van deze interacties op de kans (en daarmee het ontwerp) groot zijn, is het raadzaam een meer gedetailleerde analyse uit te voeren. Anders kan worden volstaan met een worst-case scenario. Zie ook [45] voor meer informatie over omgang met interacties.

Afhankelijkheid kan ook het gevolg zijn van **correlatie** zonder causaliteit, bijvoorbeeld als meerdere elementen in een systeem een gedeelde variabele hebben waardoor er afhankelijkheid tussen de elementen ontstaat, bijvoorbeeld bij opbarsten en terugschrijdende erosie waar de buitenwaterstand in beide gevallen een belastingvariabele is. Het negeren van afhankelijkheden kan leiden tot conservatisme of optimisme, daarom moet goed naar afhankelijkheden worden gekeken. Beide zijn van belang voor het bepalen van de totale faalkans van het systeem (de pipingmaatregel). In de volgende paragraaf wordt ingegaan op het effect van correlaties op de betrouwbaarheid van systemen. Een praktisch voorbeeld hoe kan worden omgegaan met correlaties staat in paragraaf 6.6.3.

### 6.6.2 Combineren gecorreleerde parallel- en seriesysteem

Voor zowel een parallelsysteem als een seriesysteem kunnen grenzen worden aangegeven als er sprake is van correlatie: voor onafhankelijkheid, volledige afhankelijkheid en elkaar uitsluitende gebeurtenissen, zie onderstaande tabel.

$P_{t,system}$  (with  $n$  components):

system	gate	operator	components		
			mutually exclusive	independent	fully dependent
series	 OR	$\cup$	$\sum_{i=1}^n P_i$ (upper bound)	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$	$\max\{P_i\}$ (lower bound)
parallel	 AND	$\cap$	0 (lower bound)	$\prod_{i=1}^n P_i$	$\min\{P_i\}$ (upper bound)

Figuur 6-10 Elementaire grenzen serie- en parallelsysteem, zie [35] voor meer informatie (Tabel overgenomen uit [39])

### 6.6.3 *Afhankelijkheid hoogwater*

Een van de belangrijkste redenen van (gedeeltelijke) correlatie tussen gebeurtenissen is het hoogwater, aangezien dit vaak de oorzaak van falen is van verschillende elementen. Daarom is het vaak niet zonder meer mogelijk om de kansen van basisgebeurtenissen bij parallelwerking te vermenigvuldigen (dat gaat immers uit van onafhankelijkheid).

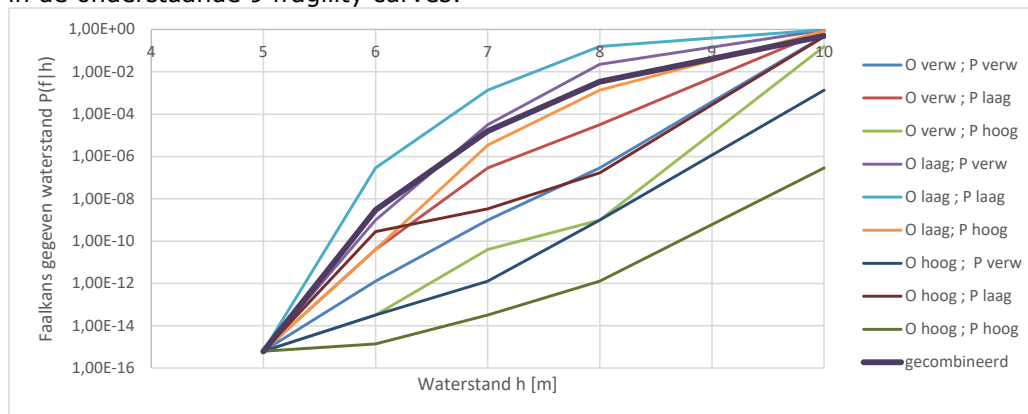
Een mogelijkheid om hier mee om te gaan is via zogenaamde fragility curves. Een fragility curve geeft de faalkans als functie van de waterstand en kan worden opgebouwd door bij de verschillende waterstanden de conditionele faalkans te bepalen. In geval er verschillende gebeurtenissen als enige correlatie de waterstand hebben kan met deze afhankelijkheid om worden gegaan door eerst fragility curves per gebeurtenis te bepalen, en deze te per waterstand als onafhankelijk te combineren om zo een gecombineerde fragility curve op te bouwen. Een voorbeeld hiervan staat in [48]. Door de gecombineerde fragility curve te combineren met de kansverdeling van de waterstand wordt de jaarlijkse faalkans verkregen, zie ook [36]. Hiermee wordt de afhankelijkheid door de waterstand goed meegenomen terwijl dit eenvoudiger is dan het integraal meenemen van de waterstand in de faalkansanalyse. Andere voordelen van fragility curves zijn dat deze inzicht geven in het gedrag en dat conditionele kansen soms eenvoudiger te bepalen zijn dan jaarkansen. Fragility curves kunnen zowel op basis van een foutenboom als op basis van een gebeurtenissenboom worden bepaald.

In Figuur 6-11 staat een voorbeeld hoe fragility curves kunnen worden bepaald, gecombineerd en hoe dit leidt tot een jaarlijkse faalkans. In dit voorbeeld wordt gewerkt met onafhankelijke schematiseringsscenario's waardoor de fragility curves niet nodig zijn om de afhankelijkheid door de buitenwaterstand te ondervangen. Wel toont het voorbeeld de aanpak aan en maken de fragility curves de berekening relatief eenvoudig.

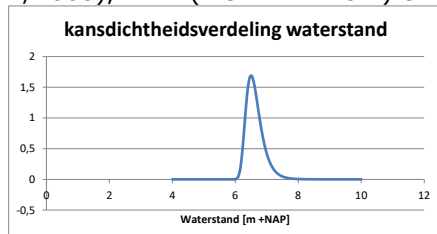
Onderstaand wordt voor heaveschermen een hypothetisch voorbeeld uitgewerkt hoe op basis van fragility curves met meerdere schematiseringsscenario's kan worden gewerkt. Er zijn schematiseringsscenario's voor de weerstand in het opbarstkanaal (O) en voor de weerstand in de pipe (P). Beide hebben invloed op de optredende heave gradiënt over het scherm. In beide gevallen kan de weerstand laag (hier aangenomen kans: 10%), verwachting (kans: 80%) en hoog (kans 10%) zijn. Dit levert dus 9 schematiseringsscenario's op. Per scenario kan een fragility curve worden bepaald door bij verschillende waterstanden de optredende gradiënt  $i_{optr}$  (gegeven dit scenario) te bepalen. De faalkans per waterstand wordt bepaald door de volgende grenstoestandsfunctie  $Z$  te evalueren:

$$Z = i_c - i_{optr}$$

Waarin  $i_c$  de kritieke heavegradient is (gemodelleerd als een stochast). Dit resulteert in de onderstaande 9 fragility curves:



Door de 9 fragility curves per waterstand te combineren, gewogen naar de kans van optreden, wordt de gecombineerde fragility curve verkregen. Bijvoorbeeld het geval waarin O en P allebei een verwachtingswaarde hebben, heeft een kansbijdrage van  $0.8 \cdot 0.8 = 0.64$ . Door de gecombineerde curve met de onderstaande kansdichtheidsverdeling van de waterstand combineren de totale kans verkregen [36]. In onderstaand voorbeeld is de aanpak uit [39] gevolgd waarbij de kansdichtheidfunctie van de waterstand wordt bepaald op basis van de norm (hier: 1/1000), WBN (hier: NAP +8m) en decimeringshoogte (hier: 5m).



In dit geval is de totale faalkans  $2,4E-05$ , dus hoger dan de kans die bij verwachtingswaarden van de scenario's hoort, maar lager dan het slechtste scenario (kans = 0,0013). Of dit voldoende is om aan de overstromingskansen (hier: 1/1000 per jaar voor het hele traject) te voldoen ligt aan onder meer de lengte-effecten en wordt niet verder uitgewerkt.

Figuur 6-11 Voorbeeld bepaling kritieke gradiënten van een heave scherm met meerdere scenario's

## 7 Stap 6: Verificatie veiligheid

Het raamwerk is opgesteld ter ondersteuning bij het onderbouwen van de veiligheid van pipingmaatregelen. Deze laatste stap geeft een overzicht van de doorlopen stappen, en de daaruit volgende veiligheidsbeoordeling. Concreet wordt de volledig ingevulde FMECA nog eens nagelopen, en worden de resultaten van de faalpadenanalyse samengevat. Op basis hiervan wordt een reflectie gegeven op het resultaat. De volgende vragen kunnen centraal worden gesteld (lijst kan worden aangevuld of gewijzigd naar inzicht van de gebruiker):

- Is de orde grootte van de faalkans aannemelijk?
- Wat zijn kritische punten in het ontwerp?
- Wat blijft er nog over aan kritische punten?
- Wat hebben we geleerd?
- Zijn er analogieën? Hoe doen die het? Zijn verschillen begrijpelijk?
- Evalueren of de uiteindelijke veiligheid (met maatregel) beter wordt dan zonder maatregel.

De uitwerking van het raamwerk en daarmee ook deze laatste stap zijn projectspecifiek. Daarom zijn er nog geen voorbeelden gegeven. De verificatie van de veiligheid kan nuttige inzichten opleveren voor verdere ontwikkeling en toepassing van de maatregel.

## 8 Bronnen

- [1] Rijkswaterstaat, Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor primaire waterkeringen.
- [2] Rijksoverheid, „Waterwet,” 2021. [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2021-07-01>.
- [3] DIV|Piping, HwBP, „Publicatie Heaveschermen,” 2023.
- [4] DIV|Piping, HwBP, „Publicatie Filtertechnieken,” 2023.
- [5] Rijkswaterstaat, „Handleiding prestatiegestuurde risicoanalyses (PRA),” 2018.
- [6] RWS-WVL Waterkeringen, „Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken –Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie,” 2018.
- [7] Staatscourant, *Regeling van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat, van 12 april 2023, nr. IENW/BSK-2023/94660, houdende vaststelling van regels inzake de beoordeling van de veiligheid van primaire waterkeringen (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2023)*, 2023.
- [8] Rijkswaterstaat, „Handleiding overstromingskansanalyse,” 2022.
- [9] M. Rausand, A. Barros en A. Hoyland, „System reliability theory: models, statistical methods, and applications,” John Wiley & Sons, 2003.
- [10] L. Hüsken, F. Diermanse, A. van der Meer, A. te Nijenhuis, R. Jongejan en J. Pol, „Conceptuele analyse van het gebruik van de faalpadenmethodiek voor het bepalen van overstromingskansen in Nederland,” Deltares, Delft, 2020.
- [11] M. Kok, M. Nieuwjaar, R. Jongejan en I. Táncoz, „Grondslagen voor hoogwaterbescherming,” Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het Expertise Netwerk Waterveiligheid, 2027.
- [12] H. Knoeff, „Factsheet Faalkansbegroting,” Kennisplatform Risicobenadering, 2016.
- [13] F. Diermanse, K. Roscoe, J. Lopez de la Cruz, H. Steenbergen en T. Vrouwenvelder, „Hydra Ring Scientific Documentation,” Deltares, 2013.
- [14] A. Teixeira, T. Schweckendiek, M. van der Krogt en W. Kanning, „Reliability updating for slope stability of dikes: test cases report,” Deltares, Delft, 2016.
- [15] POV Macrostabieleit, „POVM Langsconstructies - Een publicatie van de POV Macrostabieleit,” 2020.
- [16] B. v. Meekeren en G. v. Rinsum, OBOR VZG, Waterschap Drents Overijsselse Delta- projectnummer P0020293, 8 juni 2023.
- [17] B. v. Meekeren en G. v. Rinsum, OBOR VZG, Waterschap Drents Overijsselse Delta- projectnummer P0020293, 8 juni 2023.
- [18] W. J. Klerk, „Decisions on life-cycle reliability of flood defence systems,” 2022.
- [19] R. Cooke, „Experts in Uncertainty - Opinion and Subjective Probability in Science,” 1992.
- [20] CUR, „CUR 192 Kansen in de civiele techniek - Deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie,” 1997.
- [21] POV Kabels & leidingen, „Veiligheidsraamwerk POV Kabels & leidingen,” 2020.
- [22] Rijkswaterstaat, TNO, HKV en IV-Infra, „Oosterscheldekering - De beoordeling van het grootste Deltawerk,” 2023.
- [23] E. Rosenbrand, H. Knoeff, M. Hijma en E. v. Onselen, „Gebiedsspecifieke Faalpaden voor Piping,” Deltares, aug. 2020.
- [24] H. Knoeff en E. Rosenbrand, „Faalpaden voor piping,” 2020.
- [25] R. WVL, U. v. Waterschappen en Deltares, Handleiding DOT – Groene versie, juni 2020.
- [26] T. Schweckendiek en A. van der Meer, „Faalkansanalyse bij dijkontwerp Zeeburgereiland met parallelle waterleiding,” Deltares, Delft, 2018.



- [27] E. Calle, W. Kanning en T. Schweckendiek, Characteristic values of soil properties in Dutch codes of practice : theoretical backgrounds and assumptions, Deltares, 2021.
- [28] CUR, CUR166 - Damwandconstructies (deel 1 en 2), 2021.
- [29] E. Calle en J. Sellmeijer, PROBABILISTISCHE GEVOELIGHEIDSANALYSE HEAVE - Fase 5: eindrapportage, Geodelft, rapport 370250/54, 1998.
- [30] Rijkswaterstaat , „Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken – Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie. Groene versie,“ 2018.
- [31] Deltares, Onderzoek rapport Voorlanden - KVK2022, Deltares rapport 1208057-046-GEO-0002, 2023.
- [32] E. Rosenbrand en W. Kanning, „Omgaan met piping onzekerheden,“ Deltares, Delft, z.d..
- [33] De Innovatieversneller, „Toepassen D-Geo Flow bij CUB,“ 2022.
- [34] Rijkswaterstaat, „Faaldatabase RWS ON, RWS GPO, versie 1.0,“ 2016.
- [35] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, „Leidraad Kunstwerken,“ 2003.
- [36] OREDA, „OREDA Offshore Reliability Data Handbook,“ DNV, Hovik, 2002.
- [37] H. Procaccia, S. Arsenis en P. Aufort, „European Industry Reliability Data Bank (The): EIReDA,“ CUP, 1998.
- [38] Rijkswaterstaat, „RWS Opschepmodel versie 2.0,“ 2013.
- [39] J. Bredeveld, Inventarisatie slotverklikkers, Geodelft, rapport CO-410040-0005, 2005.
- [40] H. Dekker, H. Heijmans en F. Hoefsloot, Geslaagde damwandproef in Limburg, Geotechniek, april 1999, 1999.
- [41] NEN, NPR 7201:2017 - Geotechniek - Bepaling van het axiaal draagvermogen van funderingspalen door middel van proefbelastingen, NEN, 2020.
- [42] CUR, „Kansen in de civiele techniek Deel 1: probabilistisch ontwerpen in theorie. CUR 190.,“ 1997.
- [43] Deltares, „Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating,“ 2017.
- [44] Helpdesk Water, „Rekenblokje schematiseringsfactoren piping,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/142605/rekenblokje\\_schematiseringsfactoren\\_piping\\_2017.xls](https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/142605/rekenblokje_schematiseringsfactoren_piping_2017.xls)
- [45] J. Pol. en .. e.a., The effect of interactions between failure mechanisms on the reliability of flood defenses, Reliability Engineering & System Safety, 231, 2023.
- [46] J. Pol, P. Kindermann., M. van der Krogt, V. van Bergeijk, G. Remmerswaal, W. Kanning, S. Jonkman en M. Kok, „The effect of interactions between failure mechanisms,“ 2022.
- [47] T. Schweckendiek, „On reducing piping uncertainties,“ 2014.
- [48] K. Bischiniotis, W. Kanning, S. J. en M. Kok, Cost-optimal design of river dikes using probabilistic methods, 2016.
- [49] H. Schelfhout, W. Kanning en A. Rippi, „Veiligheidsbenadering JLD-dijkstabilisator,“ Deltares, Delft, 2016.
- [50] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Factsheet ‘Verhaal van de kering’,“ 2020.
- [51] A. Koelewijn, „Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren. Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB,“ Deltares, Delft, 2021.
- [52] USACE, „Document A6,“ [Online]. Available: <https://www.iwrlibrary.us/#/series/Best%20Practices-Manual>.