

FOUTENBOOMMETHODE: INTEGRAAL IN BEELD BRENGEN VAN WATEROVERLASTRISICO'S



RAPPORT

2025
39

FOUTENBOOMMETHODE: INTEGRAAL IN BEELD
BRENGEN VAN WATEROVERLASTRISICO'S

RAPPORT

2025

39

ISBN 978.94.6479.109.9



COLOFON

Amersfoort, oktober 2025

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Martijn Peters (Sweco)
Thijs Vrinds (Sweco)
Julia de Niet (Sweco)
Tijmen Blom (Sweco)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Bas van de Pas (provincie Noord-Holland)
Sabine Voermans (provincie Zuid-Holland)
Bas Agerbeek (provincie Overijssel)
Marcel Boomgaard (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Ellen Vonk (Waterschap Rivierenland)
Henk van Hemert (STOWA)
Rob Hermans STOWA
Michelle Talsma (STOWA)

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-39
ISBN 978.94.6479.109.9

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

FOUTENBOOMMETHODE: INTEGRAAL IN BEELD BRENGEN VAN WATER GERELATEERDE RISICO'S

Dit rapport betreft een handleiding die gebruikers helpt bij het uitvoeren van een zogenoemde foutenboommethode. Het uitvoeren van deze methode, waarbij wateroverlastrisico's integraal in beeld worden gebracht, leidt tot een ruimere blik op maatregelen om deze risico's te beperken. Het biedt meer ruimte aan een breed scala aan gevolgbeperkende maatregelen: van de (her)inrichting van het gebied tot de bescherming van specifieke objecten.

Wateroverlast kent in de praktijk verschillende oorzaken, zoals het overstromen van waterkeringen, het inunderen van sloten, hoge grondwaterstanden, regenwater op het maaiveld en het overlopen van riolen. Deze verschillende oorzaken van wateroverlast hebben ieder hun eigen veiligheids- en risicobenadering, met ieder eigen ontwerprichtlijnen en normeringen. De uitdaging is om alle oorzaken en de gevolgen ervan in samenhang te bekijken.

Om die samenhang te bewerkstelligen, moet de interactie tussen de verschillende (deel)systemen en oorzaken in beeld worden gebracht. In de jaarwisseling van 2023 op 2024 hebben we kunnen zien hoe belangrijk dat is. Combinaties van opstuwing, hoge afvoeren in de grote rivieren en grote afvoeren vanuit de regionale systemen leidden destijds tot spannende situaties. Ook de interactie tussen de afvoer van (afstromend) regenwater uit de gebouwde omgeving naar het regionaal watersysteem vraagt om samenhangende keuzes van gemeenten en waterschappen. Die samenhang wordt mogelijk met behulp van de foutenboommethode. Een samenhangende, integrale benadering van wateroverlastrisico's helpt ook om belanghebbenden, zoals burgers, bedrijven en eigenaren van kritische voorzieningen, meer inzicht te geven en bewust te maken van de risico's van wateroverlast op een specifieke plek.

De beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater adviseerde in 2022 om de normering van wateroverlast met het oog op bovenstaande te verbreden naar een meer risicogerichte benadering. Dit geeft beter inzicht in de kans van optreden van de verschillende oorzaken van wateroverlast en de gevolgen daarvan. Bovendien wordt het makkelijker om gebiedsgericht maatwerk te leveren.

STOWA heeft het advies van de beleidstafel voor een meer integrale benadering opgepakt met een aantal pilots. In een van deze pilots is de methodiek van de foutenboommethode gebruikt. Een van de aanbevelingen van vanuit alle pilots was het verder uitwerken en praktisch toepasbaar maken van de foutenboommethode. Dat is gebeurd, en met dit rapport hebt u een praktische handleiding in handen.

Een belangrijke aanbeveling voor waterschappen en gemeenten is om — met de foutenboommethode — samen op een meer integrale manier naar risico's te kijken en risicoreductie van gewenste maatregelen daarop af te stemmen.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

STOWA IN HET KORT

KENNIS OVER WATER, VOOR NU ÉN LATER

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer – kortweg STOWA – is het kennisplatform van regionale waterbeheerders in Nederland. Vanuit ons kantoor in Amersfoort werken we aan het ontwikkelen, verzamelen, verspreiden en implementeren van toegepaste kennis. Die kennis hebben waterbeheerders nodig om de opgaven waar zij voor staan, goed uit te kunnen voeren. Of het nu gaat om klimaatadaptatie (zowel stedelijk als landelijk gebied), een goede waterkwaliteit, duurzame en effectieve afvalwaterzuivering, veilige dijken en kaden, energietransitie of circulaire economie.

Het soort kennis dat wij ontwikkelen, is breed: technisch en natuurwetenschappelijk, maar soms ook bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk. Om te zorgen dat die kennis maximaal kan worden toegepast in de praktijk, presenteren we onze onderzoeksresultaten indien mogelijk in de vorm van praktische handreikingen, tools en instrumenten. Ook faciliteren we met het oog op kennisdoorwerking Communities of Practice en organiseren we daarvoor allerlei bijeenkomsten en webinars. Via onze eigen en andermans media geven we uitleg over de achtergronden bij ons werk.

STOWA werkt vraaggestuurd. We inventariseren welke kennisvragen waterbeheerders hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers: universiteiten, kennisinstituten, kennisbedrijven of adviesbureaus. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van gezamenlijke kennisprojecten op ons. Maar wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de projectresultaten de deelnemers praktische handelingsperspectieven bieden. Ieder project wordt om die reden begeleid door een commissie waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden vastgesteld door programmacommissies, waar waterbeheerders ook zitting in hebben.

STOWA is onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan waterbeheerders te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast een cijfermatige jaarrekening ook een directieverslag opgenomen over de stichting en haar activiteiten. Het budget bedraagt jaarlijks ongeveer 20 miljoen euro. Onze deelnemers leggen gezamenlijk ieder jaar ongeveer 10 miljoen in als structurele bijdrage. Daarnaast ontvangen we jaarlijks ongeveer 10 miljoen euro in de vorm van bijdragen aan afzonderlijke projecten.

FOUTENBOOMMETHODE: INTEGRAAL IN BEELD BRENGEN VAN WATEROVERLASTRISICO'S

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	1
1.3	Leeswijzer	2
2	DE TOEPASSING	3
3	THEORIE	5
3.1	Foutenboommethode	5
3.2	Niveaus in de foutenboom	6
3.2.1	Niveau 1 – Topgebeurtenis	7
3.2.2	Niveau 2 – Deelsystemen	7
3.2.3	Niveau 3 – Faalmechanismen	7
3.2.4	Sturende mechanismen (invloed van weersomstandigheden)	7
3.3	Rekenen met foutenbomen	8
3.3.1	Rekenkundige verbindingen (Poorten)	8
3.3.2	Limit State functies	10
3.3.3	Faalkansen van kunstwerken	13
3.4	Betrouwbaarheidsbenadering	14
3.5	Schaderisico	16
3.5.1	Economisch optimum maatregel	16
3.5.2	Vermeden kosten en kosteneffectiviteit	17
3.6	Schaalbaarheid	18

4	FOUTENBOOMMETHODE TOEGEPAST	20
4.1	Systeem en object beschrijving	20
4.2	Foutenboom	21
4.2.1	Niveau 1	22
4.2.2	Niveau 2	23
4.2.3	Niveau 3 / Niveau 4	23
4.3	Koppeling maatregelen	27
4.4	Schaderisico en economisch optimum	30
5	AANBEVELINGEN	32
6	REFERENTIES	34
BIJLAGE 1	THEORIE FOUTENBOOM	35
BIJLAGE 2	FOUTENBOOM CASUS	36
BIJLAGE 3	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN STOWA PILOT 2023	49

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Een integrale risicoanalyse wateroverlast biedt een waterbeheerder de mogelijkheid om de uitdagingen omtrent wateroverlast en waterveiligheid in zijn geheel te beoordelen, waarbij de onderlinge afhankelijkheden en interacties van verschillende watersystemen worden meegewogen. De foutenboommethode is een middel om de risico's op wateroverlast/overstromingen in beeld te brengen en effectieve maatregelen voor het totale risico te nemen.

De laatste jaren is meer onderzoek gedaan naar het toepassen van een integrale aanpak voor het in kaart brengen en beheersen van wateroverlast. Hiermee wordt afgeweken van de nu gebruikelijke sectorale aanpak (vanuit de verschillende verantwoordelijke beheerders) voor bijvoorbeeld regionale keringen en stedelijke wateroverlast. Sinds 2018 is STOWA betrokken bij verkennende studies naar en de ontwikkeling van een integrale risicoanalyse voor wateroverlast. Als onderdeel daarvan is er in 2023 een pilot uitgevoerd bij Waterschap Hunze en Aa's om een methode voor integrale risicoanalyse verder te ontwikkelen (Sweco, 2023). Deze foutenboommethode is daar een vervolg op. Middels de foutenboommethode worden de terugkeertijden van verschillende overstromingsdieptes bepaald. De methode kan worden gebruikt om de (kosten)effectiviteit van verschillende maatregelen af te wegen.

Naast deze foutenboommethode, is er een QuickScan opgesteld (Sweco, 2024). Met de QuickScan kan snel worden bepaald of een integrale analyse meerwaarde biedt of dat één deelsysteem de dominante bron van schaderisico is. Voordat de hele integrale risicoanalyse wordt uitgevoerd, wordt geadviseerd om eerst de QuickScan uit te voeren.

1.2 DOEL

Het doel van de integrale risicoanalyse middels de foutenboommethode is het bepalen van het risico op overstroming van een gebied waarmee vervolgens de effectiviteit van maatregelen afgewogen kan worden. Het is een technisch hulpmiddel om inzichten van risico's en investeringen in het heden en in de toekomst te verkrijgen.

Voorliggend document betreft een handleiding. Met deze handleiding wordt de gebruiker geholpen om de foutenboommethode op te stellen en een analyse uit te voeren.

1.3 LEESWIJZER

Deze handleiding is bedoeld voor gebruikers om de foutenboommethode toe te kunnen passen. Daarom worden in deze handleiding zowel de theorie als de toepassing verder toegelicht. De handleiding is als volgt opgebouwd:

- hoofdstuk 2: De toepassing van de foutenboommethode;
- hoofdstuk 3: Theorie van de foutenboommethode, verschillende definities en aanvullende achtergrondinformatie;
- hoofdstuk 4: Het toepassen van de foutenboommethode middels voorbeelden;
- hoofdstuk 5: Aanbevelingen.

Omdat delen van de handleiding een hoog theoretisch gehalte hebben, bevat de handleiding kaders waarin aan de hand van rekenvoorbeelden de toepassing van de theorie verder wordt toegelicht.

2

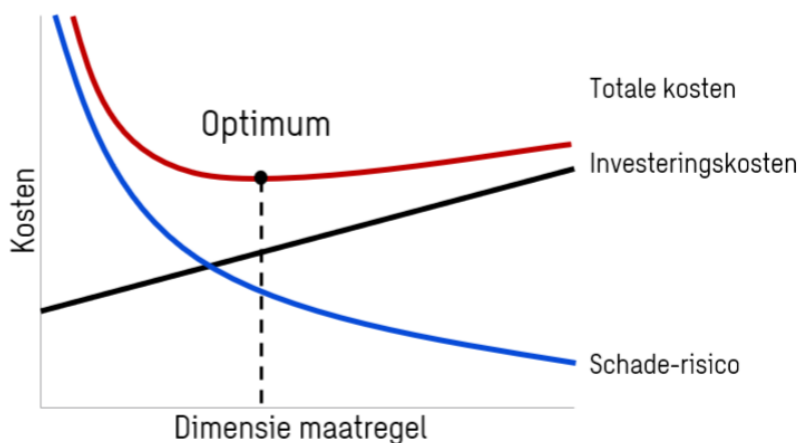
DE TOEPASSING

In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op de vragen waarom en wanneer je de integrale risicoanalyse kan toepassen. In het kort kan je een integrale risicoanalyse uitvoeren wanneer je het totale risico op overstroming of wateroverlast van een specifiek gebied wil bepalen en/of op zoek bent naar kosteneffectieve maatregelen om het risico te mitigeren. Uit de QuickScan komt naar voren of een integrale risicoanalyse een toegevoegde waarde heeft (Sweco, 2024).

WAAROM EEN INTEGRALE RISICOANALYSE?

Het voordeel van het toepassen van een integrale risicoanalyse is dat het inzicht geeft in het totale risico op overstroming in een gebied en dat maatregelen effectief afgewogen kunnen worden op het totale risico. Tot nu toe is het gebruikelijk dat de verantwoordelijke beheerders de risico's inschatten en maatregelen dimensioneren voor de individuele delen van het watersysteem (regionale keringen, oppervlaktewater en stedelijk/riool-systeem). Hierdoor is er vaak beperkt zicht op het totale risico op overstroming binnen een gebied. Daarnaast wordt, wanneer sectoraal naar een gebied wordt gekeken, de effectiviteit van de maatregelen enkel op dat deelsysteem getoetst. Het kan zijn dat een bepaalde maatregel per deelsysteem relatief duur is, maar door integraal te kijken kan de maatregel toch de meest kosteneffectieve maatregel blijken.

Figuur 2.1 Economisch optimum van een maatregel



WANNEER KAN IK DE INTEGRALE RISICOANALYSE TOEPASSEN?

Een integrale risicoanalyse is interessant om uit te voeren om het risico op overstroming van een bepaald gebied vanuit verschillende deelsystemen te bepalen. Bij de integrale risicoanalyse wordt gekeken naar diverse deelsystemen, zoals waterkeringen, oppervlaktewater en stedelijk water. Om te bepalen of een integrale risicoanalyse mogelijk van toegevoegde waarde is, wordt aanbevolen om eerst de QuickScan uit te voeren. Hieruit volgt of de deelsystemen als combinatie bijdragen aan het totale risico of dat één deelsysteem dominant is.

Als één deelsysteem dominant is, heeft de integrale risicoanalyse beperkte voordelen ten opzichte van een sectorale risicoanalyse.

Een andere randvoorwaarde voor het toepassen van de risicoanalyse is dat er gekeken wordt naar een specifiek gebied. Door het gebied goed in te kaderen (hier helpt de QuickScan ook mee), kan de risicoanalyse effectief en betrouwbaar uitgevoerd worden. Daarbij moet aange-merkt worden dat het niet aan te raden is om primaire keringen mee te nemen in de analyse; faalmechanismen, gekoppeld aan primaire keringen, staan niet in verhouding tot ingrepen in het regionale watersysteem.

WAT HEB IK NODIG OM DE ANALYSE UIT TE VOEREN?

Om de integrale risicoanalyse uit te kunnen voeren, is vooral veel informatie vanuit de verschillende deelsystemen nodig. Daarom wordt aangeraden om verschillende experts (onder andere hydrologen en waterveiligheidsspecialisten) met kennis van het gebied te betrekken. Daarnaast wordt ook aanbevolen om een specialist te betrekken met kennis van faalkansen en het kwantificeren van risico's. De theorie in hoofdstuk 3 helpt verder met de wiskundige onderbouwing en methode voor het bepalen van de risico's.

Daarnaast is een goede en duidelijke afbakening van het gebied noodzakelijk voor de risico-analyse. Het wordt sterk aanbevolen om GIS hiervoor te gebruiken. Daarnaast kan GIS ook goed gebruikt worden voor het bepalen van maaiveldhoogtes, oppervlaktes en om objecten in kaart te brengen.

Voor het uitvoeren van de foutenboommethode wordt geadviseerd om de Limit State functies middels een programmeertaal (zoals Python) uit te werken. Het is ook mogelijk om dit, tot op zekere hoogte, uit te voeren middels Microsoft Excel.

WAT KAN IK MET HET SCHADERISICO?

Eén van de resultaten van de foutenboommethode is het schaderisico. Het schaderisico is de geschatte materiële schade (directe schade) per jaar. Dus als de kans op schade eens per tien jaar is, dan is het jaarlijkse schaderisico de schade gedeeld door tien. Het schaderisico getal geeft inzicht in de schadekosten met inachtneming van de kans op voorkomen. Hierdoor kunnen de schades door wateroverlast en overstromingen eerlijk met elkaar worden vergeleken. Daarnaast kunnen de effecten van maatregelen gekwantificeerd worden.

WAAROM HET GEBRUIK VAN EEN FOUTENBOOM VOOR DE RISICOANALYSE?

Een foutenboom is een methode om inzichtelijk de stappen te definiëren die nodig zijn om tot falen van een systeem te komen. Vervolgens kunnen de kansen van elke stap gecombineerd worden om een faalkans te berekenen. Door navolgbaar alle schakels tot falen te definiëren met de bijbehorende kansen, kunnen gericht effectieve maatregelen worden bedacht. Zo kan bijvoorbeeld uit een foutenboom naar voren komen dat een hoog risico gepaard gaat met het niet op tijd sluiten van een stuw. Door het sluiten te automatiseren of de stuw uit te rusten met extra sensoren, kan het risico op een effectieve manier worden gereduceerd.

3

THEORIE

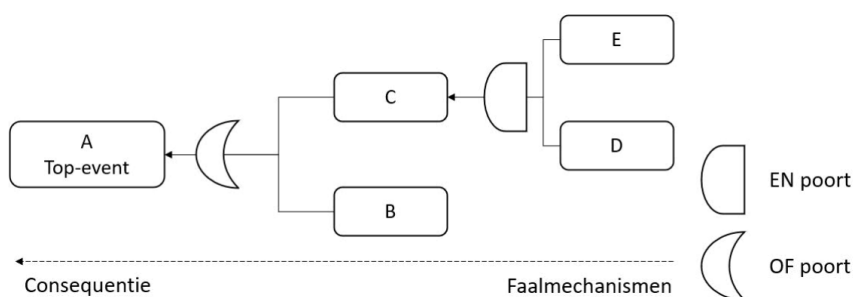
In dit hoofdstuk worden de theorie en verschillende componenten van de foutenboom-methode op hoofdlijnen toegelicht.

3.1 FOUTENBOOMMETHODE

De (probabilistische) benadering met behulp van foutenbomen is een methode die wordt gebruikt in betrouwbaarheids- en risicoanalyses om de waarschijnlijkheid van een 'ongewenste gebeurtenis' te modelleren en te kwantificeren. Deze 'ongewenste gebeurtenis' wordt gedefinieerd door de topgebeurtenis in de foutenboom en signaleert of het systeem of object faalt. De foutenboom is een grafische weergave van verschillende faalmechanismen en omstandigheden die kunnen leiden tot deze topgebeurtenis.

In Figuur 3.1 is een versimpelde weergave van een foutenboom opgenomen. In deze weergave is de topgebeurtenis gedefinieerd door 'A'. Hieraan zijn verschillende faal-mechanismen ('B' en 'C') verbonden die kunnen leiden tot het optreden van de topgebeurtenis. Deze twee faalmechanismen zijn verbonden aan de topgebeurtenis door een 'OF-poort'. Als één van de twee faalmechanisme optreedt, zal de topgebeurtenis ook optreden en het systeem falen. In de figuur is daarnaast een 'EN-poort'-verbinding opgenomen. Faalmechanisme 'C' is door deze poort verbonden met de onderliggende faal-mechanismen 'D' en 'E'. Voordat faalmechanisme 'C' optreedt, dienen zowel 'D' en 'E' gelijktijdig op te treden. Deze 'poorten' of verbindingen beschrijven de rekenkundige relatie van de onderliggende faalmechanismen en bijbehorende faalkansen met de topgebeurtenis. Hierdoor kan uiteindelijk de faalkans van de topgebeurtenis berekend worden.

Figuur 3.1 Conceptuele foutenboom met drie niveaus



Een foutenboom bestaat uit verschillende componenten. In onderstaande paragrafen worden de componenten nader toegelicht:

- niveaus van gebeurtenissen (paragraaf 3.2);
- rekenkundige relaties en Limit State functies (paragraaf 3.3);
- betrouwbaarheidsbenadering (paragraaf 3.4);
- schaderisico (paragraaf 3.5);
- schaalbaarheid (paragraaf 3.6).

In hoofdstuk 4 worden de componenten aan de hand van een voorbeeld nader geïllustreerd.

3.2 NIVEAUS IN DE FOUTENBOOM

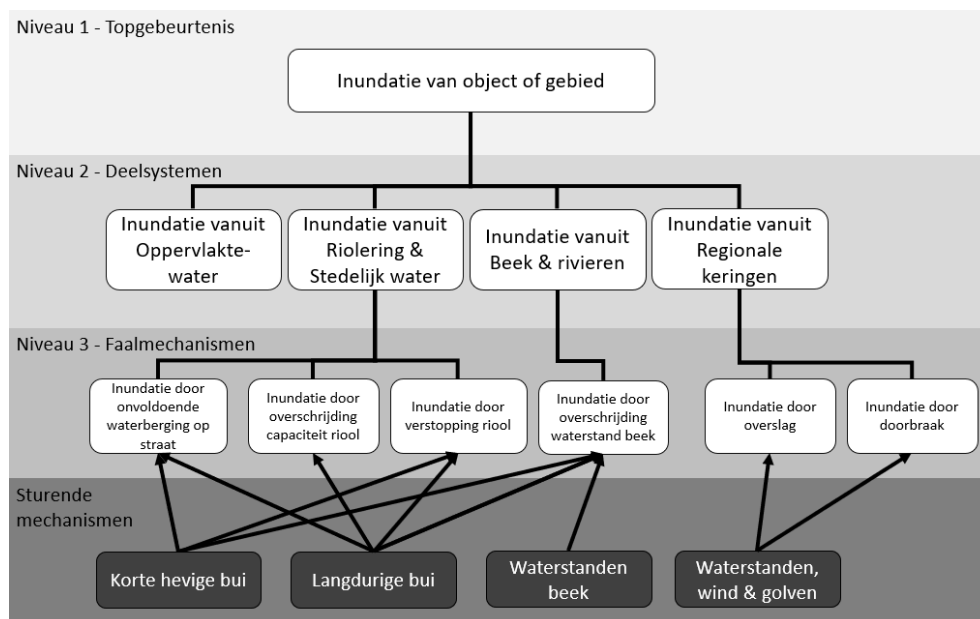
Een foutenboom is opgebouwd uit verschillende niveaus. Het opstellen en de indeling van de foutenboom, onderliggende faalmechanismen en niveaus staan vrij aan de gebruiker. Het bovenste niveau, de topgebeurtenis, beschrijft het falen van het systeem. In de toepassing van de methode voor wateroverlast wordt de topgebeurtenis omschreven als de gebeurtenis dat overstroming voor een object of een gebied optreedt.

De onderliggende niveaus schematiseren het type deelsysteem. In voorgaande pilot zijn een viertal deelsystemen geïdentificeerd waaruit overstroming van het object of gebied kan ontstaan:

- deelsysteem 'Riolering en stedelijk water';
- deelsysteem 'Oppervlaktewater';
- deelsysteem 'Beken en rivieren';
- deelsysteem 'Regionale keringen'.

In het derde niveau worden de faalmechanismen, gekoppeld aan het type deelsysteem, beschreven. Deze faalmechanismen beschrijven de fysieke eigenschappen van het object of gebied en vertalen deze naar een 'Limit State' functie (LMS, zie paragraaf 3.3.2). De LMS is een rekenkundige vergelijking waarmee voor het specifieke faalmechanisme berekend wordt of en in welke mate overstroming optreedt. De LMS of het faalmechanisme wordt onderliggend gevoed door 'sturende mechanismen'. Tot deze sturende mechanisme behoren bijvoorbeeld waterstanden met terugkeertijden, buien, windopzet en golfopslag en zijn de sturende factoren die kunnen leiden tot overstroming van het object. In Figuur 3.2 is de verdeling in verschillende niveaus voor beeldvorming schematisch weergegeven. In opvolgende paragrafen worden de componenten verder toegelicht.

Figuur 3.2 Voorbeeld schematische weergave onderverdeling niveaus



3.2.1 NIVEAU 1 – TOPGEBEURTENIS

De topgebeurtenis beschrijft of falen van het object of gebied optreedt. Voor een integrale risicoanalyse wateroverlast heeft dit over het algemeen betrekking op overstroming van een object of gebied. In de topgebeurtenis komen de faalkansen, voortkomend uit de verschillende deelsystemen, samen en worden ze gebundeld tot een faalkans.

3.2.2 NIVEAU 2 – DEELSYSTEMEN

Gekoppeld onder de topgebeurtenis, bevinden zich de verschillende deelsystemen waaruit overstromingen of wateroverlast kan ontstaan. In het samenstellen van een foutenboom voor een specifiek object of gebied dient bekeken te worden welke deelsystemen van belang zijn. Vervolgens kan per aanwezig deelsysteem in kaart gebracht worden door welke faalmechanisme wateroverlast kan ontstaan. Deze faalmechanismen worden gebundeld aan het gekoppelde deelsysteem.

3.2.3 NIVEAU 3 – FAALMECHANISMEN

Faalmechanismen beschrijven de wijze waarop overstroming kan ontstaan. In een faalmechanisme worden de fysieke eigenschappen van het object, gebied of systeem gekoppeld en gerelateerd aan sturende mechanismen. De koppeling tussen deze eigenschappen en mechanismen gebeurt in deze methode door middel van 'Limit State' functies (LMS). In een Limit State functie wordt de 'resistentie' (R) van een object, systeem of gebied gerelateerd aan de 'krachten' (S) die daarop werken en vertaald naar een functie: $Z = R - S$. Als $Z < 0$, zal het faalmechanisme optreden. De werkingen van Limit State functies wordt nader toegelicht in paragraaf 3.3.2.

3.2.4 STURENDE MECHANISMEN (INVLOED VAN WEERSOMSTANDIGHEDEN)

Hoewel wateroverlast vanuit verschillende deelsystemen en oorzaken kan ontstaan, zijn er altijd externe factoren (buiten het systeem) nodig om het systeem te laten falen en de topgebeurtenis te laten optreden. We noemen dit sturende mechanismen. Voorbeelden hiervan zijn neerslag, een hoge zeespiegel, fluctuerende waterstanden op rivieren, beken en boezemsystemen. Bodemdaling kan hier in principe ook onderdeel van uitmaken. Deze sturende

mechanismen nemen plaats in de 'S'-parameter in de Limit State functies (zie paragraaf 3.3.2).

Het koppelen van faalmechanismen en deelsystemen aan de topgebeurtenis en onderling verloopt door middel van 'poorten'. Deze poorten beschrijven de rekenkundige relatie met een bovenliggend niveau. In paragraaf 3.3.1 worden verschillende type poorten nader toegelicht. Het bundelen en relateren van fysieke eigenschappen en sturende mechanismen gebeuren door het toepassen van Limit State functies. In paragraaf 3.3.2 wordt de LMS nader toegelicht.

Bij het vormen van de foutenbomen en verbinden van faalmechanismen kan gebruik gemaakt worden van verschillende type 'poorten'. Deze poorten definiëren de rekenkundige relatie van onderliggende faalmechanismen aan het bovenliggende faalmechanisme. De werking hiervan wordt in onderstaande tekst nader toegelicht.

3.3 REKENEN MET FOUTENBOMEN

3.3.1 REKENKUNDIGE VERBINDINGEN (POORTEN)

OF-poort

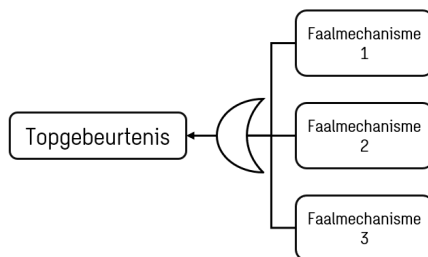
De OF-poort beschrijft de relatie tussen twee of meerdere faalmechanismen, waarbij het optreden van één van deze faalmechanisme tot het optreden van de topgebeurtenis leidt. De rekenkundige formule van de faalkans voor deze verbinding wordt gegeven door:

$$P(F) = P(FM1 \cup FM2 \cup FM3 \dots \cup FMn)$$

Als de faalmechanismen onafhankelijk zijn van elkaar, wordt de faalkans van de topgebeurtenis gegeven door:

$$P_{ftopgebeurtenis} = 1 - [1 - Pf1] * [1 - Pf2] * [1 - Pf3]$$

Figuur 3.3 OF-poort



EN-poort

De EN-poort beschrijft de relatie tussen twee of meerdere faalmechanismen, waarbij de topgebeurtenis enkel optreedt indien de onderliggende faalmechanismen tegelijkertijd optreden. De rekenkundige formule van de faalkans voor deze verbinding wordt gegeven door:

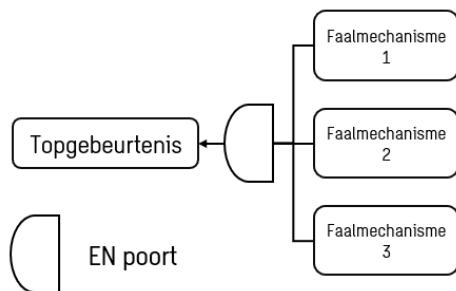
$$P(F) = P(FM1 \cap FM2 \cap FM3 \dots \cap FMn)$$

Als de faalmechanismen onafhankelijk van elkaar zijn, wordt de faalkans van de topgebeurtenis gegeven door:

$$P_{ftopgebeurtenis} = Pf1 * Pf2 * Pf3$$

Figuur 3.4

EN-poort

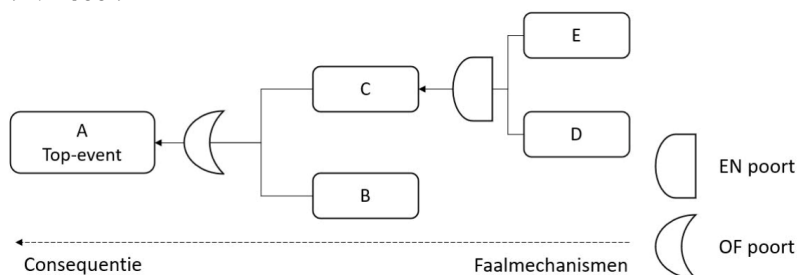


In Kader 3.1 is een rekenvoorbeeld van een OF- en EN-poort opgenomen.

Kader 3.1

Rekenvoorbeeld versimpelende foutenboom

REKENVOORBEELD



In de figuur, bijgeleverd in dit rekenvoorbeeld, is een foutenboom weergegeven waar bij het top-event 'A' verbonden is met een OF-poort aan een tweetal faalmechanismen; 'B' en 'C'. In dit voorbeeld is het mechanisme C verder vertakt via een EN-poort met faalmechanismen 'D' en 'E'. De twee verschillende poorten beïnvloeden de rekenregels. Er wordt aangenomen dat de faalmechanismen onafhankelijk zijn van elkaar. Stel dat de faalmechanismen van B, D en E gelijk zijn aan:

1. Pf_B is gelijk aan 1:3 per jaar;
2. Pf_D is gelijk aan 1:10 per jaar;
3. Pf_E is gelijk aan 1:5 per jaar;

Dan is de kans op faalmechanisme C, waarbij D en E met een EN-poort zijn verbonden, als volgt te berekenen:

$$Pf_C = Pf_D * Pf_E = 1:10 * 1:5 = 1:50 \text{ per jaar}$$

Vervolgens kan consequentie A, waarbij B en C met een OF-poort zijn verbonden, te berekenen:

$$Pf_A = 1 - [1 - Pf_B] * [1 - Pf_C] = 1 - [1 - 1:3] * [1 - 1:50] = 1:2,86 \text{ per jaar}$$

Overige poorten

Naast bovengenoemde poorten, zijn er nog andere type poorten. Deze poorten zijn over het algemeen minder toepasselijk bij het definiëren van watersystemen. In onderstaande opsomming een overzicht van enkele overige poorten. In bijlage 1 worden deze nader toegelicht.

- prioriteit EN-poort;
- stempoort;
- exclusieve OF-poort;
- verbiedende poort.

Afhankelijkheid tussen faalmechanismen

Naast het type verbinding tussen faalmechanismen, is de mate van afhankelijkheid tussen de faalmechanismen van belang. In Tabel 3.1 is de rekenkundige relatie op basis van afhankelijkheid opgenomen.

Tabel 3.1 Rekenkundige relatie op basis van de mate van afhankelijkheid tussen faalmechanismen

Type Poort	Sluiten elkaar uit	Onafhankelijk	Volledig afhankelijk
OF	$\sum_{i=1}^n P_i$ (bovengrens)	$1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$	$\text{Max}\{P_i\}$ (ondergrens)
EN	0 (ondergrens)	$\prod_{i=1}^n P_i$	$\text{Min}\{P_i\}$ (bovengrens)

3.3.2 LIMIT STATE FUNCTIES

Om de fysieke eigenschappen van het systeem of faalmechanismen te vertalen naar een rekenkundige formule, wordt gebruik gemaakt van 'Limit State functies' (LMS). Een LMS definieert of een faalmechanisme optreedt aan de hand van een grenswaarde die mogelijk overschreden wordt. De functie is generiek te schrijven als:

$$Z = R - S$$

In deze formule is de 'R' de resistentie van het object en 'S' de optredende 'kracht'. De resistentie (R) van het object is vaak een vooraf bepaalde grenswaarde, die gebaseerd is op de fysieke eigenschappen van het object of karakteristieken die voor het faalmechanisme van belang zijn. De maaiveldhoogte of de hoogte van een kering zijn hiervan voorbeelden. In de formule kunnen verschillende eenheden (m^2 , m^3/s , m^3 , m etc.) opgenomen worden. Uiteindelijk dient uit de LMS een inundatiediepte (in m, cm of mm) te volgen. Afhankelijk van de toegepaste formule, dient mogelijk een verrekening plaats te vinden om de inundatiediepte te verkrijgen.

De optredende kracht (S) is in de praktijk juist variabel, die soms groter en soms kleiner is, zoals bijvoorbeeld een waterstand of verschillende soorten buien, gekoppeld aan een herhalingsdure (kans van optreden).

Wanneer de optredende kracht (S) groter is dan de resistentie (R) zal het faalmechanisme optreden ($Z < 0$). De parameters R en S dienen de werking van het fysieke systeem, en dus het faalmechanisme, goed te beschrijven. Het toepassen van een LMS op een fysiek object wordt beschreven aan de hand van een voorbeeld (zie Kader 3.2).

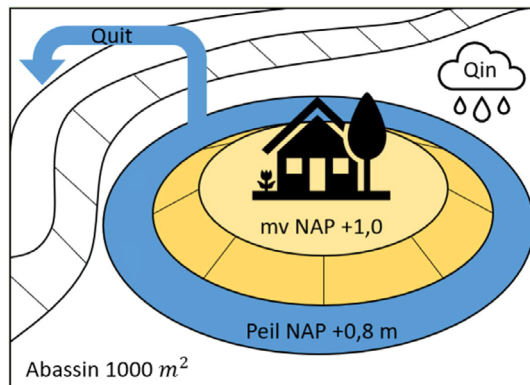
Kader 3.2

Voorbeeld toepassing Limit State functie

REKENVOORBEELD

Voor een object wordt het faalmechanisme 'overstroming door regenval' beschouwd, waarvoor geen modelberekeningen voorhanden zijn. Het faalmechanisme treedt op wanneer de waterstand ten gevolge van neerslag hoger is dan het maaiveld ter hoogte van het object.

Het object is in dit voorbeeld een woning dat op een verhoogd maaiveld van NAP +1,0 m ligt. Het gehanteerde waterpeil ligt op NAP +0,8 m. Het bassin waarin het object ligt, heeft een oppervlakte van 1.000 m² en wordt enkel gevuld door regenval. Door middel van een gemaal kan het regenwater uit het bassin gepompt worden, met een maximale capaciteit van 100 m³/u. Met deze eigenschappen kan de LMS van dit faalmechanisme als volgt gedefinieerd worden.

**Resistentie (R)**

De resistentie van het object is de hoogte van het maaiveld. Waterstanden lager dan maaiveld leiden immers niet door 'overstroming door regenval'.

Optredende kracht (S)

De optredende kracht in het rekenvoorbeeld is de waterstand in het bassin. Deze wordt beschreven als het waterpeil plus het neerslagvolume dat niet door het gemaal kan worden weggepompt.

In formulevorm is de LMS te schrijven als:

$$R = NAP + 1,0m ; S = NAP + 0,8m + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A_{bassin}} * \Delta T$$

$$Z = NAP + 1,0m - (0,8m + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A_{bassin}} * \Delta T)$$

Er kunnen ook situaties optreden waardoor de werking van het huidige systeem verandert. Zoals bijvoorbeeld het technisch falen van een pomp (faalmechanisme). Als de pomp faalt, zal de afwateringscapaciteit wegvallen. De Limit State functie uit Kader 3.2 zal dan veranderen naar:

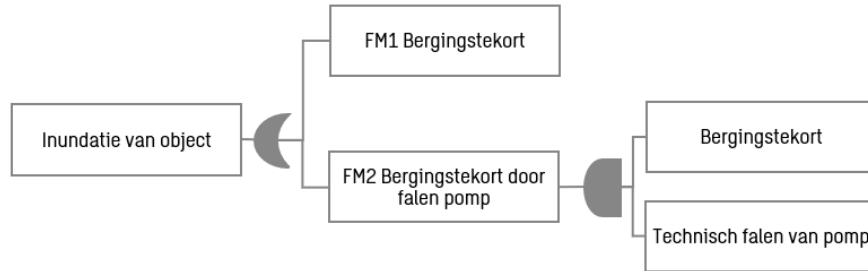
$$Z = NAP + 1,0m - (0,8m + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A_{bassin}} * \Delta T)$$

Overstroming zal in deze situatie enkel optreden als $Z < 0$ en technisch falen van de pomp optreedt. Deze situatie is dus verbonden door een EN-poort. Aan de gebeurtenis van 'technisch falen van de pomp' wordt een kans van optreden verbonden. Deze kans is afhankelijk van verschillende elementen. In paragraaf 3.3.3 worden enkele 'basiswaarden' voor soortgelijke componenten gegeven. In Kader 3.3 is hiervan een voorbeeld uitgewerkt.

Kader 3.3

Voorbeeld toepassing Limit State functie en faalmechanismen

REKENVOORBEELD



In de figuur is een foutenboom weergegeven waarbij de topgebeurtenis verbonden is met een OF-poort aan een tweetal faalmechanismen: FM1 en FM2. Beide hebben betrekking tot het bergingstekort van het object, zoals beschreven in Kader 3.2. De LMS voor FM1 komt overeen met dat van Kader 3.2.

$$Z = NAP + 1,0m - (0,8m + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A, bassin} * \Delta T)$$

Bij FM2 faalt de pomp en valt de afwateringscapaciteit weg:

$$Z = NAP + 1,0m - (0,8m + \frac{Q_{in} - Q_{uit}}{A, bassin} * \Delta T)$$

Stel nu dat overstroming bij FM1 optreedt als een bui met een herhalingstijd van eens in de 100 jaar voordoet.

- Pf_{FM1} is gelijk aan 1:100 per jaar

Omdat de pomp bij FM2 niet functioneert door technisch falen, treedt overstroming op bij een bui met een herhalingstijd van eens in de 50 jaar. De kans op technisch falen van de pomp is aangenomen op eens per 10 keer een gevraagde inzet. De faalkansen voor de twee faalmechanismen zijn verbonden door een EN-poort, de faalkans is dan:

- Pf_{FM2} is gelijk aan 1:50 maal 1:10 is 1:500 per jaar;

Dan is de kans waarbij de topgebeurtenis optreedt, is dan gelijk aan:

$$Pf_{top} = 1 - [1 - Pf_{FM1}] * [1 - Pf_{FM2}] = 1 - [1 - 1:100] * [1 - 1:500] = 1:83 \text{ per jaar}$$

Bij regionale keringen is het lastig om een goede Limit State functie op te stellen voor alle scenario's van de dijkdoorbraak. Bij regionale waterkeringen wordt er gesproken over IPO-klassen. De IPO-klasse bevat een normfrequentie met een bijbehorende toelaatbare kans op dijkdoorbraak van 0,2x de normfrequentie (STOWA, 2015). Bijvoorbeeld als de kering een IPO-klasse III heeft, dan is de normfrequentie 1/100 per jaar en is de toelaatbare kans op een

dijkdoorbraak 1/500 per jaar. De kans op een dijkdoorbraak is vervolgens een combinatie van stabiliteit, overslag en overige faalmechanismen (onder ander erosie en ontgronding door bomen).

Kader 3.4

Rekenvoorbeeld LMS regionale waterkering

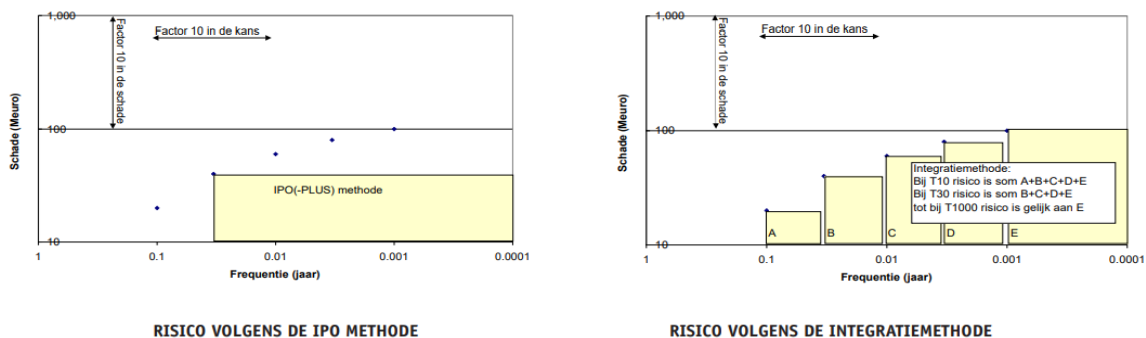
REKENVOORBEELD LIMIT STATE REGIONALE WATERKERING

In de pilot (Sweco, 2023) is een Limit State functie opgenomen voor falen van de kering door overtopping. Daarbij is het uitgangspunt dat door windopzet hoge golven ontstaan die over de kering komen, waarbij het binnentalud erodeert. Het resultaat is een overstroming gelijk aan het boezempeil.

$$Z = H_{\text{maaiveld,object}} - (H_{\text{boezem}} + H_{\text{golven}})$$

De kans op een dijkdoorbraak is afhankelijk van de waterstand in de rivier/boezem. Echter kan falen van de waterkeringen ook komen door extreme verkeersbelasting of ontgronding van een omgevallen boom. Hierdoor is het lastig om een exacte terugkeertijd van het falen van de waterkering te bepalen bij verschillende waterstanden. Vanwege de hoge onzekerheden over de overstromingskansen bij regionale keringen wordt geadviseerd om de schade bij één overstromingsdiepte, behorende bij één terugkeertijd, te bepalen. Dit is conform de IPO-methode, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 3.5.

Figuur 3.5 Risico bepalen bij regionale waterkering (STOWA, 2008)



3.3.3 FAALKANSEN VAN KUNSTWERKEN

Aan kunstwerken die invulling geven aan de werking van de (water)deelsystemen, kunnen faalkansen verbonden worden. Zo kan het uitvallen van een pomp of gemaal leiden tot het optreden van inundatie of leidt het niet sluiten van een stuw tot de instroom van water en een waterstandsstijging. De kans van optreden van (technisch) 'falen' van deze kunstwerken kan sterk variëren per type, locatie en aantal inzetvragen. Uit verschillende bronnen kan enige inzage in deze faalkansen verkregen worden. In Tabel 3.2 zijn enkele faalkansen van deze kunstwerken opgenomen. Deze faalkansen dienen als 'startwaarden', maar de gebruiker dient deze aan te scherpen zodat ze toegespitst zijn voor het studiegebied. Tevens is de lijst niet uitputtend, de tabel geeft een indicatie van een ordegrootte per type kunstwerk op basis van literatuur.

Tabel 3.2 **Indicatie faalkansen voor kunstwerken per soort falen. In de derde kolom wordt, indien beschikbaar, ook een conservatieve inschatting gegeven (tussen haken)**

Type	Soort falen	Faalkans (conservatieve inschatting)
Keermiddel Schuif	Per sluitvraag	$1,42 \times 10^{-5}$ ($2,84 \times 10^{-5}$) (RWS-WVL, 2019)
Keermiddel Terugslagklep	Per sluitvraag	$1,42 \times 10^{-6}$ ($2,75 \times 10^{-6}$) (RWS-WVL, 2019)
Gemalen (ref. IJmuiden, herstelduur halve dag)	• 1 maalgang • 2 maalgangen • 3 maalgangen • 4 maalgangen • 5/6 maalgangen	• $7,07 \times 10^{-3}$ (RWS, 2021) • $1,27 \times 10^{-5}$ • $4,48 \times 10^{-5}$ • $3,45 \times 10^{-4}$ • $5,63 \times 10^{-5}$

Door de tabel met verder onderzoek te verreiken kan voor een specifieke casus de gevoeligheid van een kunstwerk op het risico van overstromingen nauwkeuriger gedefinieerd worden. Zo kan extensief beheer en een onderhoudsplan resultaten in lagere faalkansen van kunstwerken, wat op zijn beurt resulteert in een lager schaderisico.

3.4 BETROUWBAARHEIDSBENADERING

Voor invulling van de parameters in de Limit State functies kunnen verschillende 'levels' van betrouwbaarheid toegepast worden. Deze hebben met name betrekking op de sturende mechanismen. In onderstaande opsomming worden verschillende betrouwbaarheidsbenaderingen toegelicht:

- **Level 0 – Deterministisch**
In een level I methode worden deterministische waarden en berekeningen aangenomen.
- **Level I – Semi-probabilistisch**
In een level II methode worden de onzekere parameters, zoals 'R' en 'S' in de Limit State functies, gemodelleerd door één karakteristieke waarde met partiele (veiligheids) factoren.
- **Level II – Probabilistische benadering**
In een level II methode worden de onzekere parameters, zoals 'R' en 'S' in de Limit State functies, gemodelleerd door de gemiddelden (μ) en standaarddeviaties (σ). Deze 'stochasten' worden over het algemeen aangenomen met een 'normale waarschijnlijkheidsverdeling'.
- **Level III – Numeriek**
Een level III methode is een probabilistische risicoanalyse, waarbij de parameters, zoals 'R' en 'S', in de Limit State functies, gemodelleerd worden door waarschijnlijkheidsverdelingen (zoals bijvoorbeeld in level II). Vervolgens worden uit de verdelingen van de parameters 'N' trekkingen genomen (bijvoorbeeld 10.000). Het aantal trekkingen waarin $Z < 0$ ($R < S$), bepaalt de faalkans. Een Monte Carlo-simulatie is hiervan een voorbeeld.
- **Level IV – Risico gebaseerd**
Een level IV methode betreft de consequenties (schade) en de kans op schade (risico). Door schade te vermenigvuldigen met het risico, wordt schaderisico verkregen. Op deze manier kunnen verschillende maatregelen tegen elkaar op economische basis afgewogen worden en worden onzekerheden, kosten en baten in beschouwing genomen.

In de methode, zoals deze beschreven wordt in deze handleiding, zijn verschillende vormen mogelijk. De meest eenvoudige toepassing is het gebruik van deterministische waarden (level 0). Hierin wordt een vaste waarde voor de resistentie (R) aangenomen, zoals de maaiveldhoogte van een object, en wordt de optredende 'kracht' (S) vormgegeven door een vaste waarde van het binnenkomende water, zoals omschreven in Kader 3.2¹:

$$R = 1,0m \text{ [NAP+m]}$$

$$S = 0,8m + \frac{Regen \cdot A_{mv}}{A_{bassin}} * \Delta T \text{ [NAP+m]}$$

$$Z = 1,0m - (0,8m + \frac{Regen \cdot A_{mv}}{A_{bassin}} * \Delta T) \text{ [NAP+m]}$$

Door een kans van optreden te koppelen aan het binnenkomende water (Q_{in}), zoals hevige regenbuien met verschillende herhalingstijden van bijvoorbeeld T=100 jaar, T=250 jaar en T=1.000 jaar, wordt een kans van falen en de overstromingsdiepte verkregen. Deze benadering beweegt richting een semi-probabilistische benadering (level I).

Als het voorbeeld voor vier verschillende buien wordt uitgewerkt, worden verschillende resultaten verkregen. Stel dat de volgende parameters worden aangenomen: oppervlakte van het instromend gebied (A_{mv}) is 2.000 m² en het oppervlakte van de watergangen (A_{bassin}) is 1.000 m², dan wordt een overstromingsdiepte verkregen van:

- bij een bui met T=100 jaar, 1 uur, 57,7 mm/u (STOWA, 2024);
Z > 0, geen overstroming;
- bij een bui met T=250 jaar, 1 uur, 74,5 mm/u (STOWA, 2024);
Z > 0, geen overstroming;
- bij een bui met T=1.000 jaar, 1 uur, 110,6 mm/u (STOWA, 2024);
Z = -0,02 m met een kans van optreden van 1:1.000 (1/jaar);
- bij een bui met T=1.000 jaar, 2 uur, 64,0 mm/u (STOWA, 2024);
Z = -0,06 m met een kans van optreden van 1:1.000 (1/jaar).

Hieruit kan opgemaakt worden dat het systeem alleen bij buien met grote herhalingstijden zal optreden, maar dat tegelijkertijd een bepaalde mate van onzekerheid aanwezig is. Zo zijn de overstromingsdiepten voor de twee buien met een herhalingstijd van T=1.000 jaar verschillend. De keuze in herhalingstijden en duur van de buien zijn dus van belang voor de uitkomst. Voor een nauwkeuriger beeld kunnen meerdere en verschillende typen buien gemodelleerd worden. Zo kunnen de neerslagstatistieken uit 'Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2024' (STOWA, 2024) ingevoegd en gemodelleerd worden.

Bij een numerieke analyse (level III) kunnen neerslagstatistieken vertaald worden naar probabilistische verdelingen, zoals beschreven in 'Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019' (STOWA, 2019). Uit deze probabilistische verdelingen kunnen vervolgens strekkingen (bijvoorbeeld N=10.000) genomen kunnen worden. Deze strekkingen kunnen vervolgens op eenzelfde wijze door de Limit State functies gevoerd worden. Het aantal simulaties waarin Z < 0 (overstroming treedt op) gedeeld door het totaal aantal simulaties, geeft de faalkans. Deze toepassing is erg vergelijkbaar met een Monte-Carlo simulatie. Deze benadering heeft ook betrekking op andere sturende mechanismen. Zo kunnen waterstandsstatistieken en variaties in bodemdaling meegenomen worden.

Het inpassen van een numerieke analyse en de gevoeligheid in het selecteren van verschillende buien dient(en) in voorliggende methode nog verder ontwikkeld te worden.

¹ Voor vereenvoudiging is de afwateringscapaciteit door een gemaal uit de vergelijking gehaald.

3.5 SCHADERISICO

De methode leent zich ervoor om overstromingsdiepten, voorkomend uit de Limit State functies (parameter 'Z'), te vertalen naar een schadebedrag. Door hieraan de kans van optreden toe te voegen, wordt het schaderisico verkregen ($Schaderisico = Kans \times Schade$). De kans op schade wordt bepaald door de Limit State functies. Daarnaast kan een onderscheid gemaakt worden in 'directe' en 'indirecte' schade. Directe schade omvat de materiele schade aan objecten. Indirecte schade omvat schade, zoals emotionele, herstel-kosten en buiten gebruik name van het object. In de methode wordt momenteel enkel directe schade opgenomen.

Het schadebedrag wordt vastgesteld door verschillende type objecten en schadefuncties te koppelen aan de overstromingsdiepten, voortkomend uit de Limit State functies. In zowel de Waterschadeschatter (STOWA, 2013) als de Schade- en Slachtoffer Module (SSM) zijn verschillende schadefuncties in relatie tot overstromingsdiepte opgenomen. In de Waterschadeschatter wordt schade bepaald door het type object, de overstromingsduur, de overstromingsdiepte en het seizoen. In de Schade- en Slachtoffer Module wordt enkel gekeken naar het type object en de overstromingsdiepte. Daarnaast worden de schade-functies in de Waterschadeschatter gegeven tot een maximale overstromingsdiepte van 30 centimeter. In de Schade- en Slachtoffer Module lopen deze schadefuncties door tot zeer grote overstromingen.

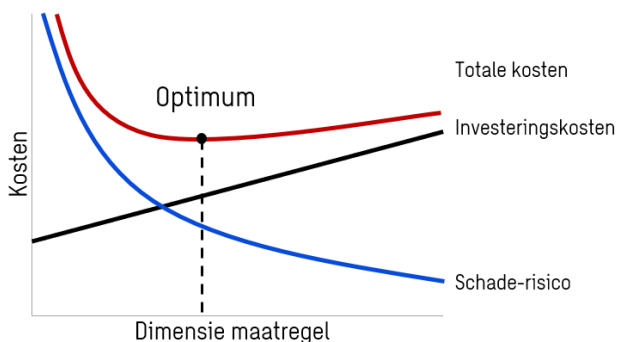
$$schade = max.potentiële\ schade * \gamma_{diepte} * \gamma_{duur} * \gamma_{periode}$$

Maatregelen in de verschillende deelsystemen zorgen ervoor, indien effectief, dat de overstromingsdiepten en kans van optreden verlaagd worden. Dit vertaalt zich vervolgens in een lager schaderisico dan in de situatie zonder maatregel. Het schaderisico geeft hierdoor een waarde waarmee de effectiviteit van verschillende maatregelen tegen elkaar afgezet kunnen worden. Zo kan dezelfde maatregel maar met oplopende dimensie of orde grootte door middel van een economisch optimum vergeleken worden (paragraaf 3.5.1) en kunnen verschillende type maatregelen door middel van vermeden kosten met elkaar vergeleken worden (paragraaf 3.5.2).

3.5.1 ECONOMISCH OPTIMUM MAATREGEL

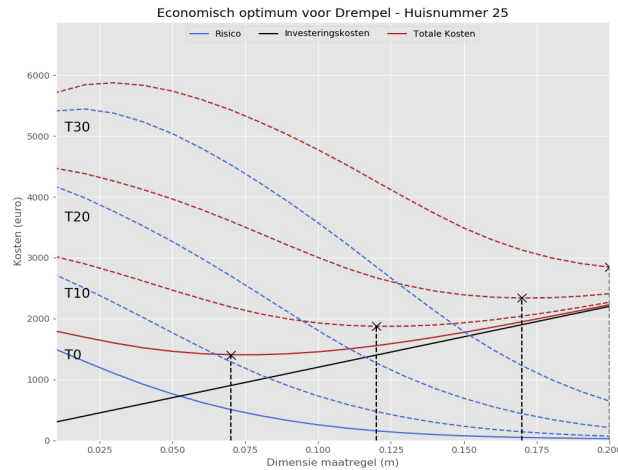
Bij een economisch optimum worden de investerings- en/of onderhoudskosten van één type maatregel voor een toenemende dimensie of orde grootte in kaart gebracht. Tegelijkertijd wordt voor de maatregel en per stap in dimensie het schaderisico berekend. Deze twee samen vormen de totale kosten (zie Figuur 3.6). Het minimum van de totale kosten is de meest economische voordelige investering.

Figuur 3.6 Economisch optimum principe



Over tijd kan echter bijvoorbeeld het klimaat veranderen, waardoor grotere of vaker overstrooming zal optreden. Door het economisch optimum voor verschillende zichtjaren te bepalen, wordt inzichtelijk gemaakt wat de economisch voordeligste investering is in relatie tot het schaderisico. In Figuur 3.7 is het verloop van het economisch optimum tot een tijdshorizon van 30 jaar gevisualiseerd. In het voorgaande STOWA pilot onderzoek is dit nader toegelicht (Sweco, 2023, p. 57).

Figuur 3.7 Economisch optimum bij verschillende zichtjaren



3.5.2 VERMEDEN KOSTEN EN KOSTENEFFECTIVITEIT

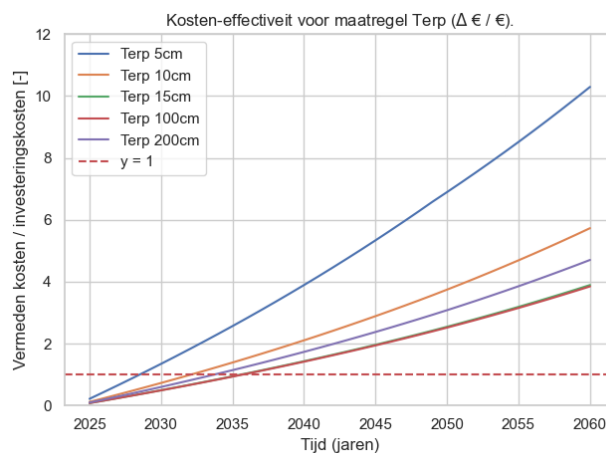
Bij een vergelijking op basis van vermeden kosten wordt het schaderisico bedrag van een maatregel vergeleken met de situatie waarin geen maatregelen getroffen zijn; de baseline. Door de vermeden kosten ($\Delta\epsilon$) te delen door de investerings- en onderhoudskosten (ϵ) wordt de kosteneffectiviteit van de maatregel inzichtelijk gemaakt. Hiermee wordt een eenheidsloos getal verkregen, zoals in onderstaande formules gegeven:

$$\text{Vermeden kosten } [\Delta\epsilon] = \text{schaderisico}_{\text{baseline}} [\epsilon] - \text{schaderisico}_{\text{maatregel}} [\epsilon]$$

$$\text{Kosteneffectiviteit } [-] = \frac{\text{Vermeden kosten } [\Delta\epsilon]}{\text{Investeringskosten } [\epsilon]}$$

Als de verhouding tussen de vermeden kosten en de investeringskosten gelijk is aan 1, wordt het 'break-even' punt bereikt. In Figuur 3.8 is een illustratie van de kosteneffectiviteit van verschillende maatregelen over tijd opgenomen.

Figuur 3.8 Voorbeeld verhouding vermeden kosten en investeringskosten



3.6 SCHAALBAARHEID

De beschreven methode is toepasbaar om een individueel object of meerdere objecten in een systeem te benaderen.

- Een individueel object
Bij het beschouwen van een individueel object, wordt de maaiveldhoogte van het object in beschouwing genomen. Omsluitende verhogingen, zoals kades of verschillen in de maaiveldhoogte, dienen hierin meegenomen te worden. Dit kan bijvoorbeeld door het toepassen van een 'Prioriteit EN-poort' of door het aanbrengen van voorwaardelijkheden in de berekening.
- Meerdere objecten in hetzelfde systeem
 - Objecten individueel benaderen
Door aan elk individueel object een eigen maaiveldhoogte te koppelen. Omsluitende verhogingen, zoals kades of verschillen in de maaiveldhoogte, dienen hierin meegenomen te worden.
 - Objecten als een geheel benaderen
Door voor alle objecten een gemiddelde maaiveldhoogte aan te nemen en het gebied als het ware plat te slaan. Omsluitende verhogingen, zoals kades of verschillen in de maaiveldhoogte, dienen hierin meegenomen te worden.

In de methode kunnen daarnaast verschillende type maatregelen opgenomen worden. Deze maatregelen werken elk anders op het reduceren van, of kans op, overstroming. Als een individueel object in beschouwing genomen wordt, vallen grote systeemmaatregelen, zoals het versterken van regionale keringen, vaak af. De kosten van deze maatregelen zijn niet in verhouding met het reductiepotentieel in schaderisico van een individueel object. Dit terwijl dergelijke maatregelen wel effectief kunnen zijn voor meerdere objecten. In Kader 3.5 wordt dit nader toegelicht, voor verdere duiding wordt verwezen naar het voorgaande STOWA pilot-onderzoek (Sweco, 2023, p. 58).

Kader 3.5

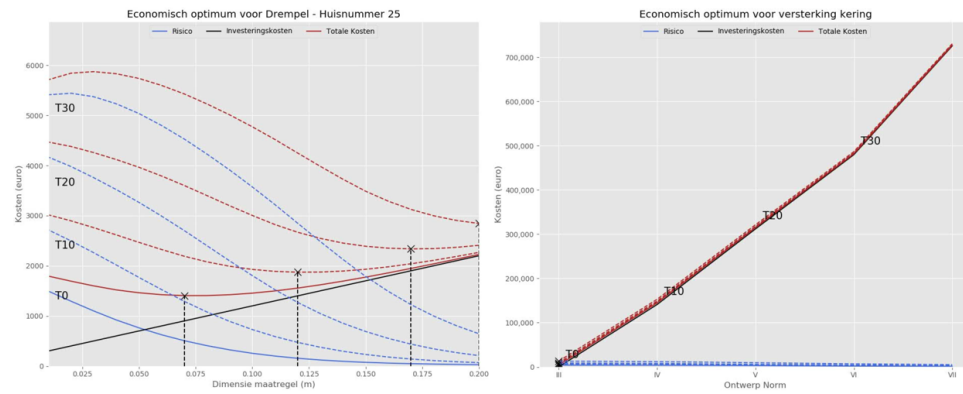
Rekenvoorbeeld van schaalbaarheid en verschil in kosteneffectiviteit van maatregelen

REKENVOORBEELD

In de STOWA-pilot (Sweco, 2023, p. 58) is het verschil in de werking van locatiespecifieke maatregelen tegen systeemmaatregelen toegelicht. In dit voorbeeld worden twee maatregelen met elkaar vergeleken: het aanleggen van een drempel voor één woning en het verhogen van de IPO-klasse van de regionale kering. In onderstaande afbeelding zijn de investeringskosten (zwart), het schaderisico (blauw) en de totale kosten (rood) in relatie tot de dimensie van de maatregel opgenomen om het economisch optimum van de maatregel te bepalen. Daarnaast is er een tijdsfactor aan toegevoegd om bodemdaling over tijd mee te nemen.

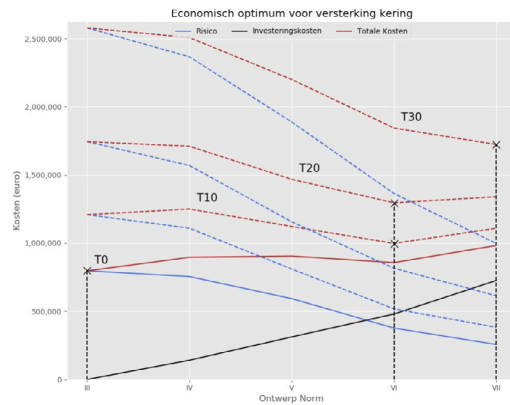
Als de figuren met elkaar vergeleken worden, liggen de investeringskosten en het schaderisico voor één object voor een locatiespecifieke maatregel (aanleggen van een drempel) in verhouding met elkaar, terwijl de investeringskosten in relatie tot het schaderisico bij het versterken van de regionale kering niet in verhouding liggen en dus niet kosteneffectief zullen zijn.

Figuur 3.9 Economisch optimum voor het aanleggen van een drempel (links) en het versterken van de regionale kering (rechts) voor één object



Om systeemmaatregelen (bijvoorbeeld versterken regionale kering) mee te wegen, dient het schaderisico van alle objecten binnen het gebied in beschouwing genomen worden. Daarom is de berekening voor het kosten-optimum van de regionale kering vergroot van 1 object naar 20.000 objecten. Het schaderisico (blauw) is nu in verhouding met de investeringskosten (zwart), waardoor de maatregel over tijd als kosteneffectief gezien kan worden.

Figuur 3.10 Economisch optimum voor het versterken van de regionale kering voor 20.000 objecten



4

FOUTENBOOMMETHODE TOEGEPAST

In dit hoofdstuk wordt de theorie uit hoofdstuk 3 verder toegelicht aan de hand van een casus. Deze casus is afkomstig uit één van de voorgaande pilotstudies voor STOWA voor het ontwikkelen van een integrale risicoanalyse methode (Sweco, 2023). In dit hoofdstuk wordt eerst het systeem en object beschreven (paragraaf 4.1), waarna de foutenboom en duiding bij de faalmechanismen gegeven worden en de Limit State functies uitgeschreven worden (paragraaf 4.2). Hierna volgt een duiding bij het koppelen van maatregelen aan de foutenboom-methode (paragraaf 4.3); en de reductie van het schaderisico van maatregelen (paragraaf 4.4).

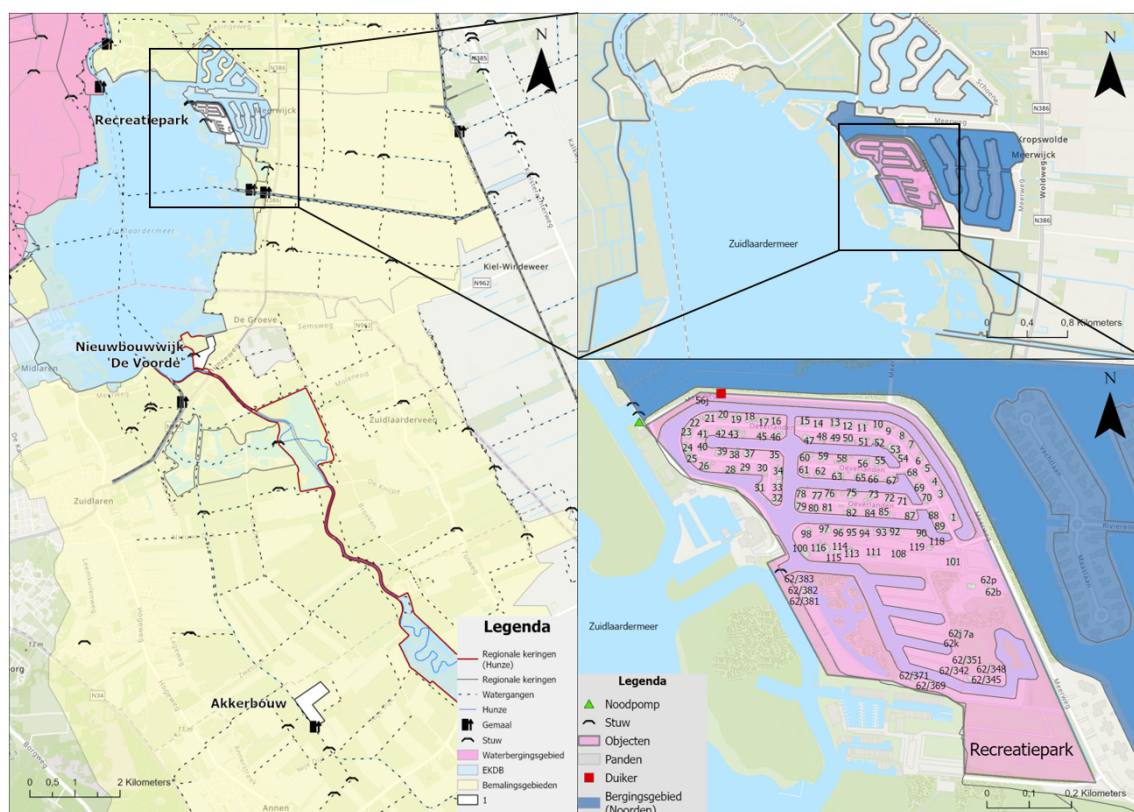
4.1 SYSTEEM EN OBJECT BESCHRIJVING

Als casus wordt een recreatiepark, gelegen aan het Zuidlaardermeer, in provincie Groningen genomen. Dit gebied kan vrij afwateren op het Zuidlaardermeer, dat onderdeel uitmaakt van het boezemsysteem. Het gebied is qua watersysteem te onderscheiden in:

- Eemskanaalboezem: waar het Zuidlaardermeer onderdeel van uitmaakt.
De Eemskanaalboezem verzorgt de afwatering van een groot deel van Waterschap Hunze en Aa's en heeft zijn afvoerpunt bij Delfzijl. Hier vindt afwatering plaats naar het buitenwater (De Eems) door middel van spuien en in hoogwatersituaties is er mogelijkheid om te malen.
- Bergingsgebied: gebied dat wordt ingezet om water (uit de Eemskanaalboezem) te bergen.
- Bemalingsgebied: gebied waar het water op peil gehouden wordt door een gemaal dat het water uit de polder naar de Hunze/de Eemskanaalboezem pompt.
- Vrij afwaterend gebied: gebied waar het water onder vrij verval afstroomt naar de Hunze.

In Figuur 4.1 is een overzichtskaart van de relevante elementen en de casus opgenomen. De objecten in het recreatiepark (circa 75 ha.) bestaan enkel uit recreatiewoningen. De woningen liggen direct aan watergangen, die verbonden zijn met het Zuidlaardermeer (onderdeel van de Eemskanaalboezem) en, met een duiker, verbonden zijn met het bergingsgebied ten noorden van het recreatiepark. Het recreatiepark wordt door een regionale kering en stuwen beschermd voor hoge waterstanden op het Zuidlaardermeer. Onder dagelijkse omstandigheden kan het water vrij afwateren op de Eemskanaalboezem. Bij hoogwater op de boezem worden de stuwen gesloten. Bij calamiteiten kan een noodpomp geplaatst worden om overtollig water uit het bergingsgebied (circa 152 ha) op het Zuidlaardermeer te lozen. De randen van de blauwe en roze gebieden in Figuur 4.1 (rechtergedeelte) liggen hoger (laagste punt circa NAP+1,2 m) dan het achterliggende maaiveld (gemiddeld circa NAP+0,8 m). Er wordt aangenomen dat regenwater vanuit dit achterliggende gebied niet het bergingsgebied en recreatiepark kan instromen.

Figuur 4.1 Overzichtskaart van het gebied, de casus en (water)gebiedstypen. Oppervlakte van het recreatiepark is ca. 75 ha. Oppervlakte van het bergingsgebied ca. 152 ha



In het gebied zijn 'slechts' twee van de deelsystemen aanwezig (van de mogelijke deelsystemen, zoals beschreven in paragraaf 3.2): 'oppervlaktewater' (lokale watersgangen en het bergingsgebied) en 'regionale keringen' (gelegen tussen de boezem en het object). Het recreatiepark beschikt niet over een rioleringsstelsel.

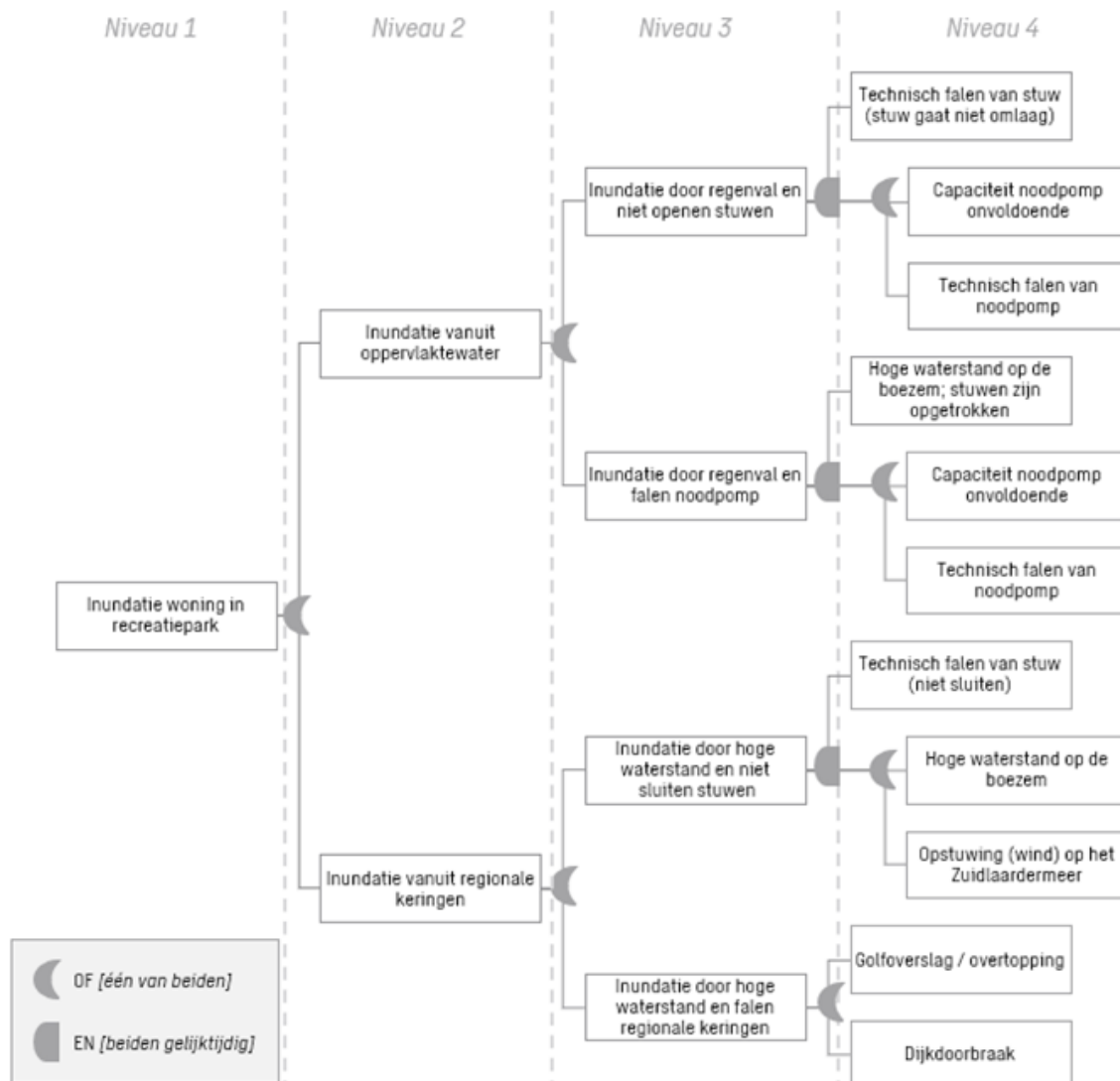
4.2 FOUTENBOOM

Bij het opstellen van de foutenboom kunnen verschillende keuzes gemaakt worden. In deze paragraaf, en aan de hand van de casus wordt dit per niveau inzichtelijk gemaakt. In Figuur 4.2 is de foutenboom voor de casus weergegeven. De verschillende niveaus worden stapsgewijs toegelicht. Voor deze casus is de keuze gemaakt om vier niveaus toe te passen.

1. Alle deelsystemen van het watersysteem uit de pilot zijn in de boom opgenomen (niveau 2).
2. Voor ieder deelsysteem is bekeken hoe er wateroverlast zou kunnen optreden vanuit dat systeem (niveau 3).
3. Er is bepaald welke events op moeten treden om de wateroverlast in niveau 3 plaats te laten vinden (niveau 4).
4. Voor alle events in niveau 4 wordt bekeken wat de sturende mechanismen zijn. Eventueel kan in dit stadium in kaart worden gebracht wat de correlatie is tussen de events op niveau 3 en 4. Echter wordt niet expliciet met deze correlatie gerekend; deze zit namelijk al verwerkt in de modellen waaruit de kans op voorkomen van de events in niveau 4 afgeleid wordt.

5. Ten slotte dient voor ieder object het event SMART gemaakt te worden: vanaf welke drempelwaarde (waterstand, afvoer, duur, etc.) leidt het event tot de beschreven schade. Deze stap is nodig om te bepalen bij welke waarden een kans op voorkomen dient te worden afgeleid. Deze stap is tevens nodig voor het rekenen met de Limit State Functies (zie 3.3).

Figuur 4.2 Foutenboom voor de casus 'Recreatiepark aan het Zuidlaardermeer'

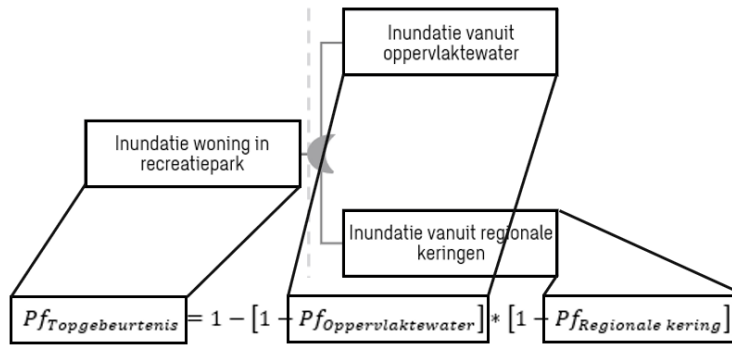


4.2.1 NIVEAU 1

De topgebeurtenis beschrijft het inunderen van een specifiek object (één woning) of meerdere objecten in het recreatiepark. Ook is er de optie om het gehele recreatiepark als 'een' object te zien (zie paragraaf 0). De topgebeurtenis kan in de casus optreden door overstrooming uit de deelsystemen oppervlaktewater OF regionale keringen. De faalkans-berekening wordt dan gevormd door:

$Pf_{Topgebeurtenis} = 1 - [1 - Pf_{Oppervlaktewater}] * [1 - Pf_{Regionale kering}]$, zoals weergegeven in Figuur 4.3.

Figuur 4.3 Relatie faalmechanismen en faalkansberekening



4.2.2 NIVEAU 2

Onderliggend aan de topgebeurtenis, kunnen twee deelsystemen toegekend worden: oppervlaktewater en regionale keringen. Deze twee deelsystemen vormen het tweede niveau binnen de foutenboom. Overstroming van de deelsystemen kan optreden door onderliggende faalmechanisme uit niveau 3. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

Figuur 4.4 Relatie faalmechanismen en faalkansberekening

$$Pf_{Oppervlaktewater} = 1 - [1 - Pf_{inundatie door regenval en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie door regenval en noodpomp}]$$

OF

$$Pf_{Regionale kering} = 1 - [1 - Pf_{inundatie hoge waterstand en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie hoge waterstanden en kering}]$$

4.2.3 NIVEAU 3 / NIVEAU 4

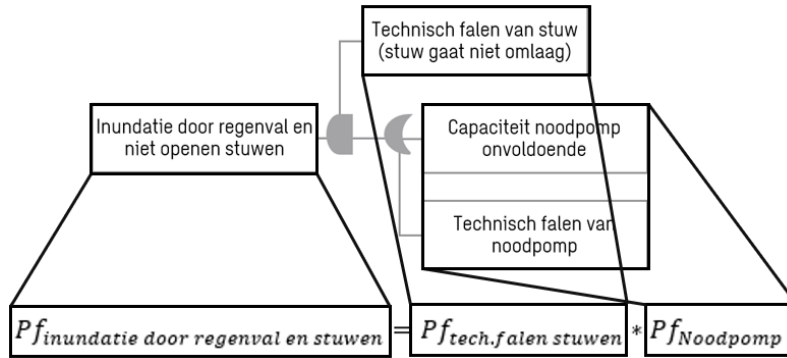
In het derde niveau wordt een eerste onderscheid in type faalmechanismen gemaakt. Deze onderscheiding is te verdelen onder de twee deelsystemen. In onderstaande paragrafen worden de gebeurtenissen 'inundatie door regenval en niet openen stuwen' en 'inundatie door regenval en noodpomp' beschreven. In bijlage 2 wordt de totstandkoming hiervan en van het deelsysteem regionale keringen nader toegelicht. Zoals benoemd in paragraaf 3.3.2, is het van belang om de Limit State functies om te rekenen naar een inundatiediepte.

4.2.3.1 OPPERVLAKTEWATER

In het deelsysteem zijn twee onderliggende faalmechanismen gedefinieerd. Deze faalmechanismen zijn nagenoeg identiek. Echter, zullen de twee faalmechanismen verschillend functioneren bij andere soorten buien. In het faalmechanisme 'Overstroming door regenval en falen van de noodpomp' functioneren de stuwen naar behoren en zullen deze openen zodra het boezempeil onder het sluitpeil zakt. Hierdoor kan overtollig water afgewaterd worden. Dit faalmechanisme zal met name gevoelig zijn voor kortdurende buien met hoge regenintensiteit.

In het faalmechanisme 'Overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen' functioneren de stuwen niet meer en zullen deze niet openen wanneer het boezempeil onder het sluitpeil zakt. Hierdoor kan water over een langdurige periode accumuleren in het bergend gebied. Met dit faalmechanisme wordt de gevoeligheid voor langdurige buien met een lagere regenintensiteit meegenomen.

OVERSTROMING DOOR HEVIGE REGENVAL EN NIET OPENEN VAN STUWEN



In dit faalmechanisme openen de stuwen niet, waardoor regenval in het bergingsgebied zal accumuleren en vrij afwateren niet mogelijk is. Als de noodpomp niet functioneert (technisch falen) of de pompcapaciteit onvoldoende is en het waterpeil de maaiveldhoogte overschrijdt, zal overstroming optreden. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

$Pf_{\text{inundatie door regenval en stuwen}} = Pf_{\text{tech.falen stuwen}} * Pf_{\text{Noodpomp}}$, zoals weergegeven in Figuur 4.4.

waarin:

1. de kans op technisch falen van de stuw gegeven wordt door:

$$Pf_{\text{tech. stuwen}} = Pf_{\text{stuwen openen niet}} * Pf_{\text{Waterstand Boezem} > \text{Sluitpeil}}$$

2. de kans op overstroming bij een pompcapaciteitstekort OF technisch falen van de pomp gegeven wordt door:

$$Pf_{\text{Noodpomp}} = 1 - [1 - Pf_{\text{inundatie tekort capaciteit noodpomp}}] * [1 - Pf_{\text{inundatie bij tech. falen noodpomp}}]$$

Dekansopfalenvan $Pf_{\text{inundatie tekort capaciteit noodpomp}}$ en $Pf_{\text{inundatie bij tech.falen noodpomp}}$ worden bepaald door elk een Limit State functie. Deze LMS relateren het inkomend water door regenval aan het bergend volume van het gebied, het maaiveldhoogte van het object en de afvoercapaciteit. Om een overstromingsdiepte te extraheren wordt, bij overschrijding van het bergende volume, het volume aan inkomend water verdeeld over het totale oppervlakte.

De LMS voor $Pf_{\text{inundatie tekort capaciteit noodpomp}}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstroming optreden. Waarin:
 - $R = V_{\text{berging}} = A_{\text{berging}} * (H_{\text{maaiveld}} - H_{\text{peil}}) [\text{m}^3]$;
 - $S = V_{\text{inkomend}} = (Q_{\text{in}} - Q_{\text{uit}}) * \Delta T [\text{m}^3]$;
 - $\Delta T = \min(\text{duur reparatie stuwen of duur van de bui}) [\text{uur}]$.

De LMS voor $Pf_{\text{inundatie bij tech. falen noodpomp}}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, waarin:
- $R = V_{\text{berging}} = A_{\text{berging}} * (H_{\text{maaiveld}} - H_{\text{peil}})$ [m³];
- $S = V_{\text{inkomend}} = Q_{\text{in}} * \Delta T$ [m³];
- $\Delta T = \min(\text{duur reparatie stuwen of duur van de bui})$ [uur];
- Vermenigvuldigd met de kans op technisch falen van de pomp
 - $Pf_{\text{tech. falen noodpomp}} = 1/250$ [per vraag].

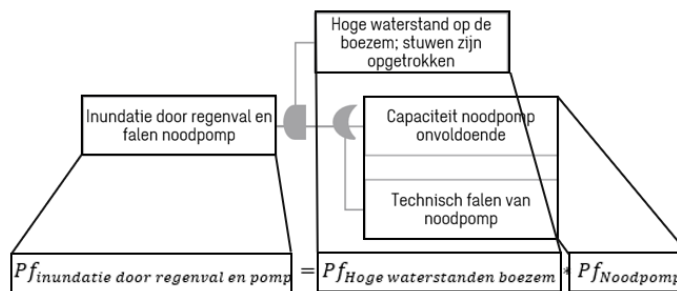
De Limit State functie beschrijft nu het resultaat in kubieke meters water. Om de overstromingsdiepte te verkrijgen, wordt een verrekening toegepast. Er wordt hierbij aangenomen dat het water zich gelijkmatig verdeelt over het oppervlakte. De functie is dan te herschrijven als: $Z = \frac{R - S \text{ (m3)}}{\text{Oppervlakte (m2)}}$, als $Z < 0$, zal overstroming optreden.

OVERSTROMING DOOR REGENVAL EN FALEN VAN DE NOODPOMP (SAMENGEVAT)

De faalkansberekening wordt gevormd door:

$Pf_{\text{inundatie door regenval en pomp}} = Pf_{\text{Hoge waterstanden boezem}} * Pf_{\text{Noodpomp}}$, zoals weergegeven in Figuur 4.5.

Figuur 4.5 Faalmechanisme 'overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen'



Waarin de kans op overstroming bij een pompcapaciteitstekort OF technisch falen van de pomp gegeven wordt door:

$$Pf_{\text{Noodpomp}} = 1 - [1 - Pf_{\text{inundatie tekort capaciteit noodpomp}}] * [1 - Pf_{\text{inundatie bij tech. falen noodpomp}}]$$

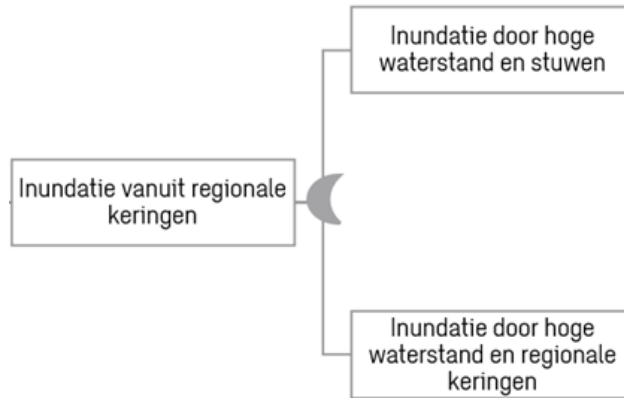
De LMS voor $Pf_{\text{inundatie tekort capaciteit noodpomp}}$ en $Pf_{\text{inundatie bij tech. falen noodpomp}}$ zijn overeenkomend bij het faalmechanisme 'Overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen'. De tijdsfunctie is nu echter gelijk aan de duur van de bui: ΔT , duur van de bui [uur].

De Limit State functie beschrijft nu het resultaat in kubieke meters water. Om de overstromingsdiepte te verkrijgen, wordt een verrekening toegepast. Er wordt hierbij aangenomen dat het water zich gelijkmatig verdeelt over het oppervlakte. De functie is dan te herschrijven als: $Z = \frac{R - S \text{ (m3)}}{\text{Oppervlakte (m2)}}$, als $Z < 0$, zal overstroming optreden.

4.2.3.2 REGIONALE KERINGEN

Overstroming vanuit het systeem 'regionale keringen' kan optreden door hoge waterstanden op de boezem (Zuidlaardermeer), gecombineerd met het falen van de regionale kering of door het niet sluiten van de aanwezige stuwen (zie Figuur 4.6). De faalkansberekening wordt gegeven door:

Figuur 4.6 Faalmechanisme 'overstroming door hoge waterstanden, falen stuwen en regionale kering'



$$Pf_{\text{Regionale kering}} = 1 - [1 - Pf_{\text{inundatie hoge waterstand en stuwen}}] * [1 - Pf_{\text{inundatie hoge waterstanden en kering}}]$$

Onderstaand worden de faalkansenberekening en LMS samengevat. Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar bijlage 2.

OVERSTROMING DOOR HOGE WATERSTANDEN OP DE BOEZEM EN HET FALEN VAN DE STUWEN (STUWEN SLUITEN NIET)

$$Pf_{\text{inundatie door hoge waterstand en stuwen}} = Pf_{\text{tech. falen stuwen}} * Pf_{\text{hoge waterstand}}$$

Waarin:

1. de kans op technisch falen van de stuw gegeven wordt door:

$$Pf_{\text{tech. stuwen}} = 2,84 * 10^{-5} \text{ [per vraag]}$$

2. de kans op hoge waterstanden op de boezem gegeven wordt door:

$$Pf_{\text{waterstand boezem}} = 1 - [1 - Pf_{\text{hoge waterstand boezem}}] * [1 - Pf_{\text{hoog water en opstuwing}}]$$

De LMS voor $Pf_{\text{inundatie door hoge waterstand en stuwen}}$ is dan een relatie tussen de waterstandhoogte en het maaiveld en kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden. Waarin:
- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) \text{ [NAP+m]}$;
- $S = H_{\text{waterpeil}} \text{ [NAP+m]}$.

OVERSTROMING DOOR FALEN VAN DE REGIONALE KERING

$$P_{finundatie\ regionale\ keringen} = 1 - [1 - P_{f_{overtopping}}] * [1 - P_{f_{doorbraak\ door\ instabiliteit}}]$$

Waarin:

1. de kans op overtopping van de kering gegeven wordt door:

$$P_{f_{overtopping}} = faalkansruimtefactor * normering$$

2. de kans op een dijkdoorbraak gegeven wordt door:

$$P_{f_{doorbraak\ door\ instabiliteit}} = faalkansruimtefactor * normering$$

De LMS voor $P_{finundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ falen\ regionale\ kering}$ is dan een relatie tussen de waterstandhoogte en het maaiveld en kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden.

Waarin:

- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) [\text{NAP}+m]$;
- $S = \text{Hwaterpeil bij de norm } [\text{NAP}+m]$.

4.3 KOPPELING MAATREGELEN

In deze paragraaf wordt aan de hand van enkele typen maatregelen geschetst hoe deze effect hebben op de Limit State functies, en wordt een voorbeeld gegeven hoe het effect van een maatregel op het schaderisico bepaald kan worden met de methode. Hieronder worden vier maatregelen beschreven die het schaderisico van een studiegebied kunnen verlagen. De maatregelen zijn op hoofdlijnen beschreven en daarna is de LMS gegeven in lijn met de voorbeeldcasus.

Versterken regionale keringen

Regionale dijkversterking beschermt de bestaande polders en laaggelegen gebieden tegen overstromingen. Het versterken van de kering (verhoging van de IPO-klasse) verlaagt de initiële overstromingskans van het gehele gebied achter de kering. Falen van een regionale kering kan optreden door onder andere een dijkdoorbraak. Bij falen van de kering kunnen waterstanden stijgen tot het waterpeil in het aangrenzende gebied.

In het voorbeeld in dit hoofdstuk heeft deze maatregel betrekking op overstroming vanuit regionale keringen, in relatie tot hoge waterstanden en het niet sluiten van stuwen of tot hoge waterstanden en falen regionale keringen. Bij het verhogen van de IPO-klasse wordt de normering van de kering aangepast. Een aanpassing van de normering heeft niet gelijk betrekking op de onderliggende LMS die de overstromingsdiepte definieert, maar wel op de kans van optreden. Daarmee wordt bij het verhogen van de IPO-klasse de herhalingstijd, zoals beschreven in paragraaf 3.3.2, aangepast. De LMS zal hetzelfde blijven.

Ophoging maaiveld bij kritieke objecten

De maatregel is gericht op het verhogen van de bescherming van kritieke of waardevolle objecten tegen overstromingen. Er worden verhoogde platforms, of terpen, gecreëerd waarop een object of functie geplaatst wordt. Door deze objecten op een hoger niveau te plaatsen, zijn ze beschermd tegen overstroming als gevolg van extreme weersomstandigheden of overstromingen door een dijkdoorbraak. Deze maatregel faalt als de waterstanden boven de verhoging uitkomen, vanaf dat moment neemt de schade toe in lijn met de waterstanden

boven het talud. Door kritieke objecten te verhogen, neemt de resistentie tegen wateroverlast toe. Dit heeft invloed op de resistente R . In het voorbeeld in dit hoofdstuk heeft deze maatregel betrekking op overstroming vanuit het oppervlaktewater en op overstroming vanuit regionale keringen, deze maatregel beperkt de gevolgen van overstroming.

Invoegen van de maatregel gebeurt op verschillende wijze voor de twee deelsystemen. In het deelsysteem oppervlaktewater wordt overstromingsdiepte gerelateerd aan het bergings-tekort. Het verhogen van het maaiveld voor een object wordt daarom verrekend na het vaststellen van $Z < 0$. Aan de LMS wordt dan een 'als' statement toegevoegd:

- $Z = R - S$, als $Z < 0$, dan is de overstromingsdiepte gelijk aan $Z - R_maatregel$.

Bij het deelsysteem kan de maatregel wel eenvoudig aan de LMS toegevoegd worden:

- $R = \max(\text{Hoogte kade}; \text{Hoogte maaiveld object} + R_maatregel) [\text{NAP} + \text{m}]$.

Bij het invoegen van maatregelen moet dus gekeken worden naar hoe de LMS is opgesteld, of de eenheden overeenkomen en of de LMS met maatregel de fysische werkelijkheid beschrijft. Dit laatste is met name belangrijk omdat maatregelen die op het eerste gezicht overeenkomen met elkaar, kunnen verschillen in werking op de overstromingsdiepte. In Kader 4.1 is een voorbeeld hiervan opgenomen.

Kader 4.1

Voorbeeld functioneren maatregelen

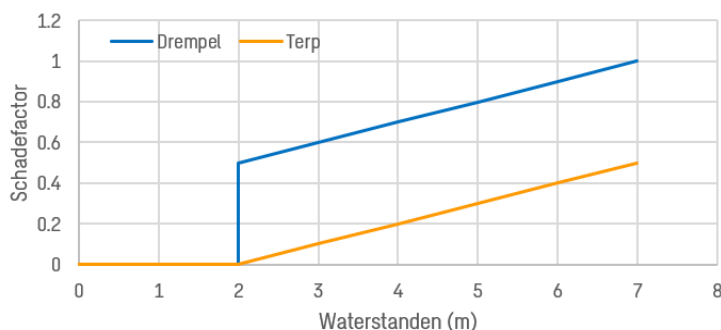
REKENVOORBEELD

Stel dat een nieuw te bouwen object beschermd kan worden door twee verschillende maatregelen: bouwen op een terp (maaiveldverhoging) of het aanleggen van een drempel.

Bij de terp zal een overstroming tot de hoogte van de terp voorkomen worden en bij het verder toenemen van de overstromingsdiepte leiden tot een lagere netto overstromingsdiepte.

Bij het aanleggen van een drempel zal een overstroming tot de drempelhoogte voorkomen worden maar bij het verder toenemen van de overstromingsdiepte leiden tot eenzelfde overstromingsdiepte als een situatie zonder maatregel.

De maatregelen zullen uiteindelijk leiden tot verschillende overstromingsdiepte en dus schadefactoren waarmee het schaderisico wordt vastgesteld zoals in onderstaande figuur.



Bergingscapaciteit voor lokale wateropvang

Deze maatregel is gericht op het robuuster inrichten, zodat de kans op wateroverlast vanuit hemelwater beperkt wordt. De maatregel functioneert door het creëren van voldoende opslagcapaciteit voor regenwater in het oppervlaktewatersysteem, waardoor de kans op overstroming verkleind wordt. Hier kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het vergroten van de maximale waterkolom of het aanwijzen en inrichten van (nood)overloopgebieden, zoals lokaal beschikbare parken, om tijdelijk overtollig water op te vangen.

De limieten van deze maatregel liggen bij extreme situaties, waarbij het benodigde bergingsvolume de beschikbare bergingscapaciteit overstijgt. Zodra de buffer vol is, kan er geen water meer worden opgevangen wat wateroverlast tot gevolg heeft. De dimensionering van de bergingscapaciteit is afhankelijk van de specifieke omstandigheden in de wijk en de normatieve buien. Wanneer de bergingscapaciteit overschreden (dus wanneer de buffers vol zijn) wordt, kan er niet langer water worden opgevangen en treedt het faalmechanisme op. In de LMS wordt de waarde van de resistentie R door de maatregel vergroot. In het voorbeeld in dit hoofdstuk heeft deze maatregel betrekking op overstroming vanuit het oppervlaktewater, in relatie tot hoge waterstanden op de boezem of onvoldoende capaciteit van de noodpomp.

De maatregel verkleint de kans op overstroming én de overstromingsdiepte. Dit is als volgt uitgedrukt:

$$R_{\text{maatregel}} = \text{toegevoegde bergingsvolume [m3]}$$

$$S = \text{Volume water invoer} = V_{\text{regen}} - V_{\text{uit}} \text{ [m3]}$$

$$R = \text{Bergingsvolume} = \text{Bergingsvolume}_{\text{oud}} + R_{\text{maatregel}} \text{ [m3]}$$

Afwateringscapaciteit vergroten

Deze maatregel is gericht op het verbeteren of vergroten van de waterafvoer uit het studiegebied, waarmee de kans op wateroverlast vanuit hemelwater vermindert. De afwateringscapaciteit vergroten, heeft ook zijn limieten. Er komt een punt waarop het aanbod van water de capaciteit van de pompen en/of watergangen overstijgt. Hierbij moet ook worden meege-nomen dat in een poldergebied de rioolbuizen voor de afwatering in zo'n geval ook hun limieten bereiken. In de LMS heeft het opvoeren van het afwateringssysteem invloed op de resistente 'R'. Door het afvoeren van het water wordt de waarde van het watervolume verlaagd. Wanneer de toevoer van water (Q_{in}) de afvoer (Q_{uit}) overschrijdt, treedt er falen op. In het voorbeeld in dit hoofdstuk heeft deze maatregel betrekking op overstroming vanuit oppervlaktewater, in relatie tot het technisch falen van de noodpomp of onvoldoende capaciteit van de noodpomp. De maatregel verkleint de kans op overstroming én de overstromingsdiepte. Dit is als volgt uitgedrukt:

$$R_{\text{maatregel}} = \text{toename afwateringscapaciteit in het gebied in m3/s}$$

$$S = Q_{in} = \text{hemelwater toevoer [m3/s]} = (\text{neerslag[m]} * A[m^2]) / dt [s]$$

$$R = Q_{uit} = \text{hemelwater afvoer [m3/s]} = Q_{uit_huidig} + R_{\text{maatregel}}$$

Bij de inpassing van maatregelen is het van belang om na te gaan of voldoende oplossingsruimte binnen het studiegebied beschikbaar is. In Kader 4.2 is hiervan een voorbeeld uitgewerkt.

Kader 4.2

Ruimtegebruik in vierkante meters per waterbergingsmaatregel om een bepaalde bergingsopgave te realiseren

REKENVOORBEELD

Voor een casus is het benodigde oppervlakte per waterbergingsmaatregel voor het realiseren van een berging (in mm) per vierkante meter uitgewerkt. Tegelijkertijd dient er rekening gehouden te worden met de beschikbare oplossingsruimte. Zo is voor de casus in kaart gebracht wat het beschikbare dakoppervlakte in de huidige situatie is en hoeveel oppervlakte aan publieke ruimte beschikbaar is om als waterberging te functioneren (wadi's o.i.d.). In onderstaande tabel is opgenomen hoeveel oppervlakte nodig is om te voorzien in een bepaalde mate van berging (in mm) voor het gehele studiegebied. Rode cijfers signaleren een gebrek aan oplossingsruimte om de mate van berging te realiseren.

Berging (mm)	Wadi's met drainage	Groene daken	Regenton	Waterdaken/ blauwe daken	Waterpleinen	Waterabsorberende/ bergende verharding	bergings-kelder
10	92.689	499.093	92.689	432.548	46.344	811.027	16.221
20	185.378	998.187	185.378	865.095	92.689	1.622.053	32.441
30	278.066	1.497.280	278.066	1.297.643	139.033	2.433.080	48.662
40	370.755	1.996.373	370.755	1.730.190	185.378	3.244.106	64.882
50	463.444	2.495.466	463.444	2.162.738	231.722	4.055.133	81.103

4.4 SCHADERISICO EN ECONOMISCH OPTIMUM

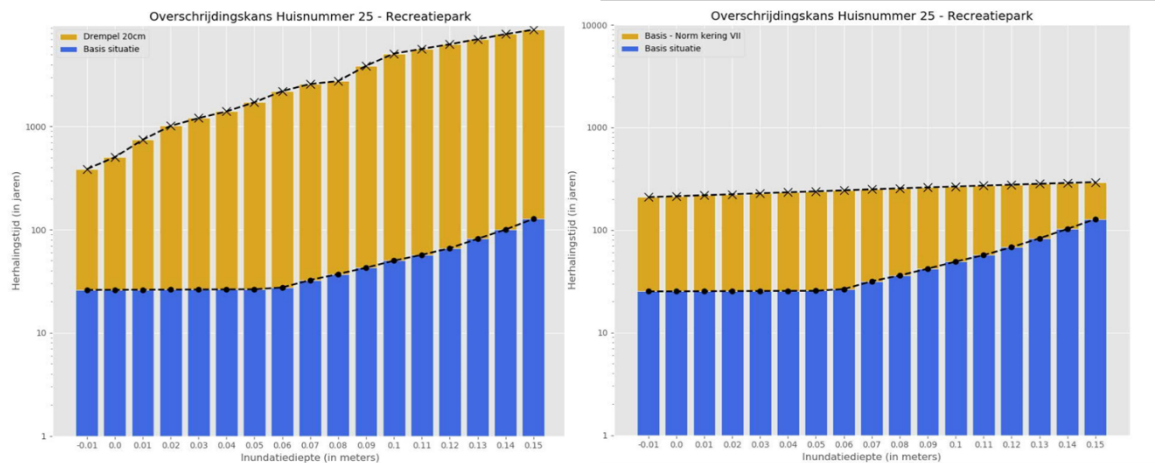
In het voorgaande STOWA-pilot (Sweco, 2023) zijn vervolgens met waterstandsstatistieken en verschillende soorten buien de berekeningen uitgevoerd. Door de resulterende overstromingsdiepten en kansen te verbinden aan de waarde van het object, wordt het schaderisico verkregen (zoals beschreven in paragraaf 3.5). In de pilot zijn destijds twee type maatregelen gemodelleerd: het aanleggen van een drempel en verhogen normering van de regionale kering. Voor beide is het economisch optimum en kosteneffectiviteit in kaart gebracht. Om dit te illustreren, zijn enkele stappen uit de pilot in deze paragraaf opgenomen. Voor een nadere duiding wordt verwezen naar de pilot (Sweco, 2023).

In Figuur 4.7 is de werking van beide maatregelen op de overschrijdingskansen per overstromingsdiepte gevisualiseerd. De blauwe balken visualiseren de kans van optreden en overstromingsdiepte van de topgebeurtenis voor de huidige situatie, de geelgekleurde balken de situatie met maatregel. Hieruit kan opgemaakt worden dat het aanleggen van een drempel de herhalingstijd van overstroming significant meer vergroot dan het verhogen van de normering van de regionale kering. Dat terwijl de kosten voor het verhogen van IPO-klasse aanzienlijk zullen zijn ten opzichte van het aanleggen van een drempel rond één woning. Het is echter belangrijk om bij een dergelijke overkoepelende maatregel niet enkel het effect op één enkele woning te beschouwen, maar over alle woningen in het recreatie-park. De kering beschermt namelijk alle woningen in het recreatiepark, zoals eerder benoemd in paragraaf 190. Bij het bepalen van het economisch optimum, is hiermee rekening gehouden. Voor het versterken van de regionale kering is het effect over alle objecten in het recreatie-park meegenomen.

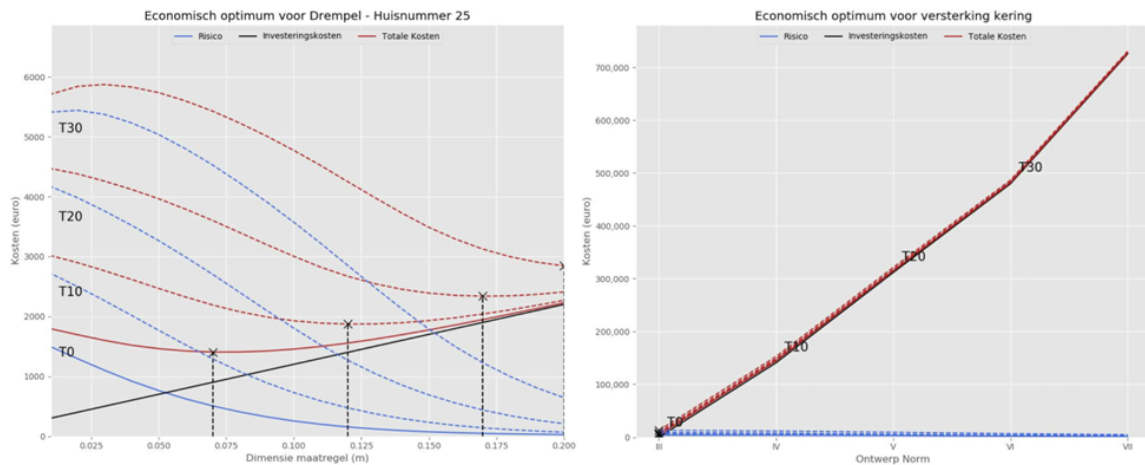
In Figuur 4.8 is het economisch optimum voor beide maatregelen weergegeven. Hieruit kan eenvoudig opgemaakt worden dat het versterken van de regionale kering voor het recreatie-park geen kosteneffectieve investering is, aangezien de investeringskosten een factor 100 hoger zijn dan de reductie in schaderisico. Dit resultaat is te verwachten, aangezien binnen het recreatiepark maar vijf objecten gesitueerd zijn op een relatief laag maaiveld.

Klimaatverandering, extreme bodemdaling of een toename in het aantal objecten of de waarde daarvan in het recreatiepark zouden kunnen leiden tot een ander resultaat. Op het effect van bodemdaling na, is dit niet nader in de pilot onderzocht. De linker figuur geeft vanuit kostenperspectief een beeld van de optimale dimensies van een drempel in relatie tot verschillende maatgevende buien. Als een T10 bui gehanteerd wordt als maatgevende bui, is een drempel van ongeveer 12 cm het meest kostenefficiënt.

Figuur 4.7 Overschrijdingskans en overstromingsdiepte van de huidige situatie (blauw) en met maatregel (geel).
Links: aanleggen van een drempel. Rechts: verhogen van de normering van de regionale kering



Figuur 4.8 Economisch optimum voor de maatregel 'aanleggen drempel' (links) en 'Verhogen normering regionale kering' (rechts). Op de horizontale as wordt de dimensie van de maatregel geschematiseerd en op de verticale as de kosten in euro's



5

AANBEVELINGEN

In deze handleiding wordt een methode, afkomstig uit de STOWA-pilot 'Integrale risicoanalyse wateroverlast', toegelicht die middels foutenbomen de overstromingsdiepten en risico's, voortkomend uit verschillende (water)deelsystemen, inzichtelijk maakt. Door de overstromingsdiepten en risico's te verbinden aan het type object, kan met behulp van de Waterschadeschatter of de Schade- en Slachtoffermodule het schaderisico verkregen worden. Door het schaderisico van de bestaande situatie (*lees; situatie zonder maatregelen*) te vergelijken met een situatie waarin maatregelen geïmplementeerd zijn, kan de kosten-effectiviteit van maatregelen bepaald worden. De methode biedt hiermee een wijze waarop maatregelen in verschillende deelsystemen op een integrale manier tegen elkaar afgewogen kunnen worden. Daarmee wijkt de methode af van de huidige sectorale blik vanuit de individuele waterbeheersorganisaties. Daarnaast brengt het inzicht in de oorsprong van overstromingsdiepten en risico's op overstromingen voor verschillende deelsystemen.

De methode bevat echter nog elementen of vraagstukken die vragen om een verdere uitwerking. In de STOWA-pilot 'Integrale risicoanalyse wateroverlast' zijn enkele conclusies, aannames en aanbevelingen gegeven (zie ook bijlage 3). Aanvullend hierop, worden in onderstaande opsomming enkele belangrijke punten toegevoegd:

- Het gebruik en toepassen van een 'Level III' benadering (zie Paragraaf 3.4) kan verder onderzocht worden. De voorgestelde methode leent zich goed om gebruikt te worden bij dergelijke probabilistische simulaties. In de voorgaande pilotstudie (Sweco, 2023) is deze benadering in enige mate toegepast. Echter, met een theoretische probabilistische verdeling voor regenintensiteit. Voor een betere duiding kunnen de neerslagstatistieken uit onder andere 'Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019' (STOWA, 2019) toegepast te worden.
- De methode leent zich goed om het effect van onder andere bodemdaling en klimaatverandering op te nemen. Beide thema's kunnen gekoppeld aan de tijd in de Limit State functies of kunnen de herhalings tijden verwerkt worden. Dit is echter in voorliggende handleiding niet uitgewerkt. Het toevoegen van deze thema's om het schaderisico en de kosteneffectiviteit van maatregelen in een studiegebied over tijd te genereren, kan verder inzicht bieden in investerings- of verdichtingsopgaven.
- Om het schaderisico vast te stellen, worden de schadefuncties en bijbehorende objectwaarden uit de Waterschadeschatter of Schade- en Slachtermodule toegepast. De gegevens uit deze modules zijn toepasbaar voor heel Nederland, maar niet specifiek toegespitst op een specifieke locatie of kritiek object (onder andere ziekenhuizen, middenspanningsstations). Aangezien deze schadefuncties en de waarde van objecten in grote mate de hoogte van het schaderisico bepalen, zit hierin een zekere gevoeligheid. Zo kan gesteld worden dat de waarde van een woning in landelijk gebied lager zal liggen dan in een sterk verstedelijkt gebied. Deze gevoeligheid is momenteel niet beschouwd in voorliggende methode.
- De gepresenteerde methode vraagt om een nieuwe manier van werken. Om deze methode breed toegepast te krijgen, kunnen extra voorbeeldcasussen helpen bij het presenteren van de meerwaarde. Daarom wordt aangeraden om geleerde lessen uit volgende casussen

waar de methode is toegepast, gebruikt worden om de methode verder te ijken en, waar nodig, aan te passen.

- Het wordt aangeraden om de gepresenteerde integrale risicoanalyse toe te passen bij de herbeoordeling van gebieden. Omdat de methode informatie over de verschillende deelwatersystemen vraagt, en mogelijk maatregelen in verschillende deelwatersystemen oplevert, is het aan te raden om de herbeoordeling dan ook met betrokkenheid van de verschillende waterbeheerders te doorlopen.

Voorliggende handleiding biedt een basis vanuit waar de gepresenteerde methode toegepast, aangescherpt en verrijkt kan worden. Om de methode, en de uitlegbaarheid hiervan, verder uit te breiden, wordt er aanbevolen om de handleiding als een 'levend document' te onderhouden. Door de methode op verschillende casussen toe te passen, worden meer inzichten en voorbeelden van het opstellen van de methode verkregen. Deze casussen en de invulling hiervan kunnen dienen om voorliggende handreiking te verrijken. Dit zal de navolgbaarheid van de methode vergroten en de toepassing van de methode door een gebruiker aantrekkelijker maken.

6

REFERENTIES

RWS. (2021). *Slim Watermanagement - impactanalyse van maatregelen gemaal IJmuiden op de faalkans van het NZK/ARK.*

RWS-WVL. (2019). *Standaard faalkansen voor frequent sluitende keermiddelen.*

STOWA. (2008). *Richtlijn - Normering keringen langs regionale rivieren.*

STOWA. (2013). *Waterschadeschatter.* Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

STOWA. (2015). *Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen (LTVRW).*

STOWA. (2019). *Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019.*

STOWA. (2024). *Beoordeling neerslagstatistiek. Meteo-onderzoek ten behoeve van het waterbeheer. Deelrapport 1.*

Sweco. (2023). *Pilot integrale aanpak risicoanalyse wateroverlast, Uitwerking pilotlocatie 'de Hunze'.* STOWA.

Sweco. (2024). *Handleiding Quick-Scan Integrale risicoanalyse wateroverlast - Foutenbomen.*

BIJLAGE 1

THEORIE FOUTENBOOM

OVERIGE POORTEN

Naast bovengenoemde poorten, zijn er nog andere type poorten. Deze poorten zijn over het algemeen minder toepasselijk bij het definiëren van watersystemen. Deze overige type poorten zijn hieronder kort toegelicht:

- **Prioriteit EN-poort**
De prioriteit EN-poort moet een specifieke volgorde van onderliggende faal-mechanismen optreden alvorens de topgebeurtenis optreedt. Deze poort kan toegepast worden als de volgorde van falen van de faalmechanismen belangrijk is. De faalkans-berekening voor de topgebeurtenis is afhankelijk van de faalkansen van de faal-mechanismen, de volgorde waarin deze moeten optreden en eventueel de onderlinge afhankelijkheid.
- **Stempoot**
Een stempoot vereist dat een bepaald aantal (k) van de n-invoergebeurtenissen optreedt om de topgebeurtenis te laten plaatsvinden. Bijvoorbeeld, een 2-out-of-3 poort betekent dat minstens twee van de drie invoergebeurtenissen moeten optreden om de topgebeurtenis te veroorzaken. Deze poort wordt vaak gebruikt in systemen met redundantie, waarbij meerdere componenten moeten falen voordat het systeem als geheel faalt.
- **Exclusieve OF-poort**
Een exclusieve OF-poort laat de topgebeurtenis optreden als precies één van de faal-mechanismen plaatsvindt. Als meer dan één faalmechanisme optreedt, treedt de topgebeurtenis niet op. Dit type poort wordt gebruikt wanneer het systeem zo is ontworpen dat alleen één specifieke gebeurtenis het falen veroorzaakt, maar niet meerdere tegelijkertijd.
- **Verbiedende poort**
Deze poorten vereisen een bepaalde voorwaarde of 'inhibitor' om actief te zijn, naast het optreden van het faalmechanisme. De topgebeurtenis treedt alleen op als het faal-mechanisme optreedt en de 'inhibit'-voorwaarde waar is. De kansberekening houdt rekening met zowel de faalkans op falen van de ingang als de waarschijnlijkheid dat de inhibit-voorwaarde waar is.

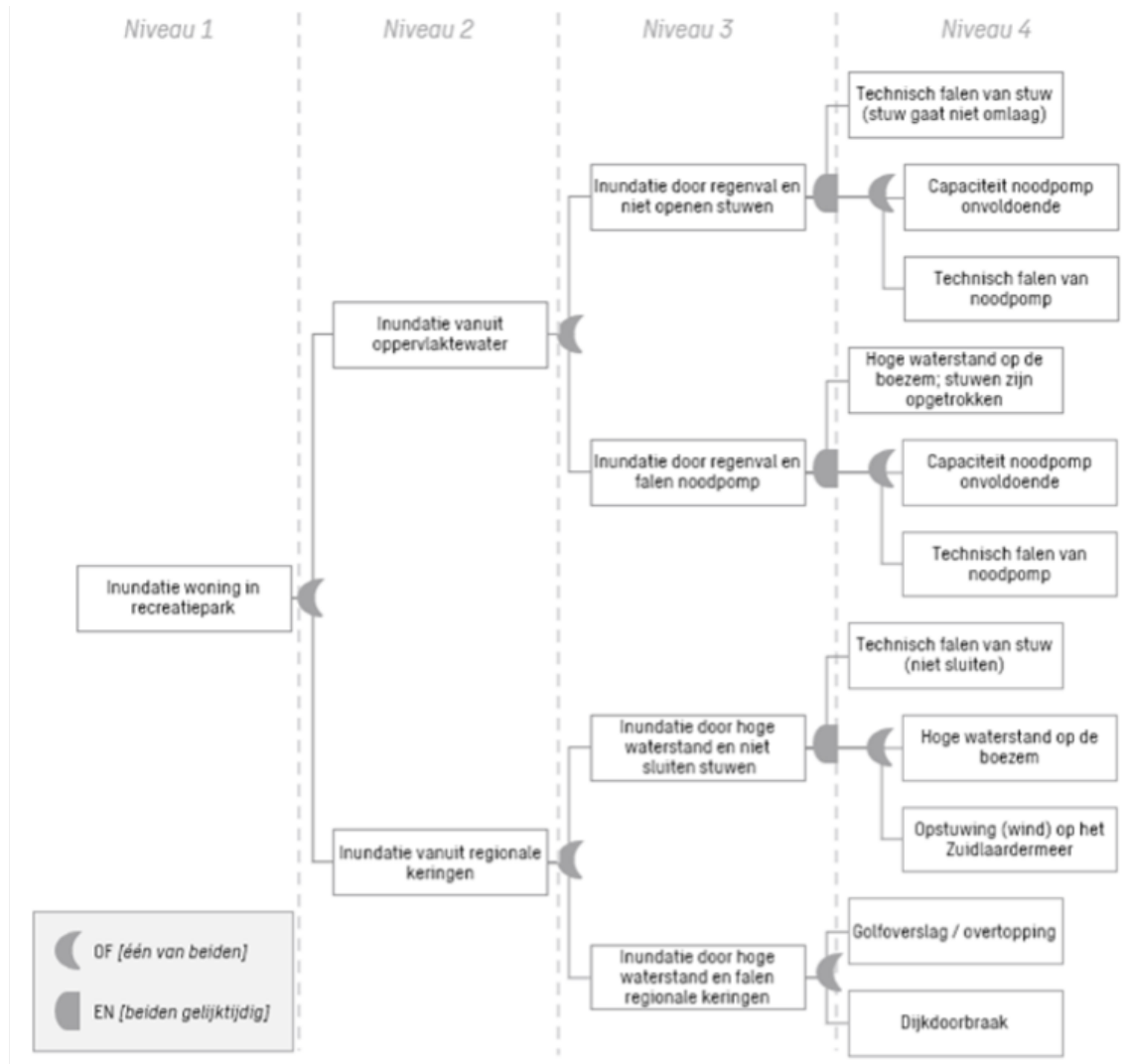
BIJLAGE 2

FOUTENBOOM CASUS

Bij het opstellen van de foutenboom kunnen verschillende keuzes gemaakt worden. In deze paragraaf, en aan de hand van de casus, wordt dit per niveau inzichtelijk gemaakt. In Figuur B1 is de foutenboom voor de casus weergegeven. De verschillende niveaus worden stapsgewijs toegelicht. Voor deze casus is de keuze gemaakt om vier niveaus toe te passen.

1. Alle deelsystemen van het watersysteem uit de pilot zijn in de boom opgenomen (niveau 2).
2. Voor ieder deelsysteem is bekeken hoe er wateroverlast zou kunnen optreden vanuit dat systeem (niveau 3).
3. Er is bepaald welke events op moeten treden om de wateroverlast in niveau 3 plaats te laten vinden (niveau 4).
4. Voor alle events in niveau 4 wordt bekeken wat de sturende mechanismen zijn. Eventueel kan in dit stadium in kaart worden gebracht wat de correlatie is tussen de events op niveaus 3 en 4. Echter wordt niet expliciet met deze correlatie gerekend; deze zit namelijk al verwerkt in de modellen waaruit de kans op voorkomen van de events in niveau 4 afgeleid wordt.
5. Ten slotte dient voor ieder object het event SMART gemaakt te worden: vanaf welke drempelwaarde (waterstand, afvoer, duur, etc.) leidt het event tot de beschreven schade. Deze stap is nodig om te bepalen bij welke waardes een kans op voorkomen dient te worden afgeleid. Deze stap is tevens nodig voor het rekenen met de Limit State Functies (zie 3.3).

Figuur B.1 Foutenboom voor de casus 'Recreatiepark aan het Zuidlaardermeer'

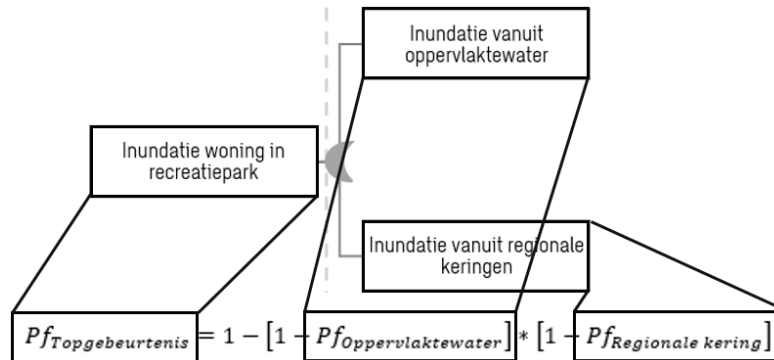


NIVEAU 1

De topgebeurtenis beschrijft het inunderen van een specifiek object (één woning) of meerdere objecten in het recreatiepark. Ook is er de optie om het gehele recreatiepark als 'een' object te zien (zie paragraaf 0). De topgebeurtenis kan in de casus optreden door overstroming uit de deelsystemen oppervlaktewater OF regionale keringen. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

$Pf_{Topgebeurtenis} = 1 - [1 - Pf_{Oppervlaktewater}] * [1 - Pf_{Regionale kering}]$, zoals weergegeven in Figuur B.2.

Figuur B.2 Relatie faalmechanismen en faalkansberekening



NIVEAU 2

Onderliggend aan de topgebeurtenis, kunnen twee deelsystemen toegekend worden: oppervlaktewater en regionale keringen. Deze twee deelsystemen vormen het tweede niveau binnen de foutenboom. Overstroming van de deelsystemen kan optreden door onderliggende faalmechanisme uit niveau 3. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

$$Pf_{Oppervlaktewater} = 1 - [1 - Pf_{inundatie door regenval en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie door regenval en noodpomp}]$$

OF

$$Pf_{Regionale kering} = 1 - [1 - Pf_{inundatie hoge waterstand en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie hoge waterstanden en kering}]$$

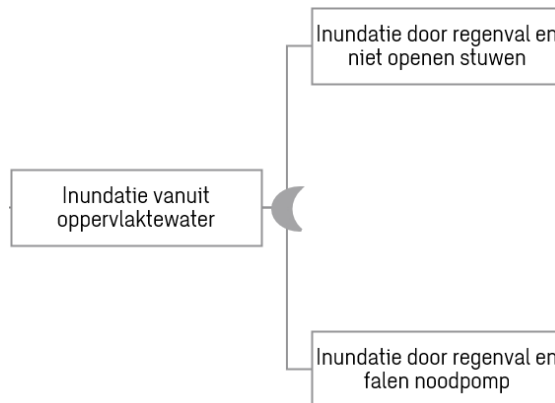
NIVEAU 3 / NIVEAU 4

In het derde niveau wordt een eerste onderscheid in type faalmechanismen gemaakt. Deze onderscheiding is te verdelen onder de twee deelsystemen. In onderstaande verdeling worden de gebeurtenissen per deelsysteem beschreven en worden de randvoorwaarden voor het optreden van het faalmechanisme beschreven.

Oppervlaktewater

Overstroming vanuit het oppervlaktewater kan in de casus optreden door twee primaire gebeurtenissen (zie Figuur B3). De faalkansberekening wordt gegeven door:

Figuur B.3 Faalmechanisme 'overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen'

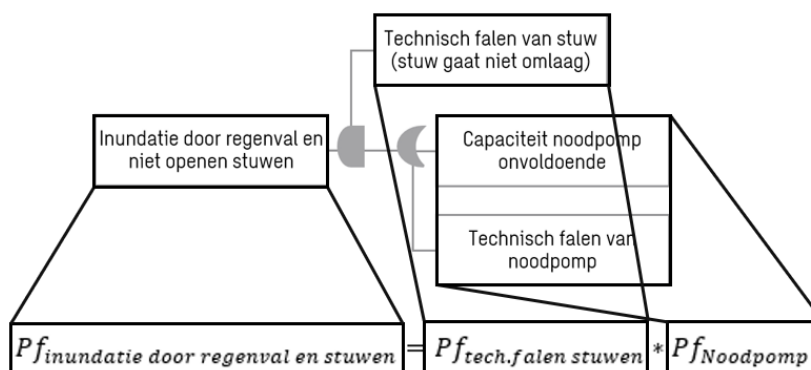


$$Pf_{Oppervlaktewater} = 1 - [1 - Pf_{inundatie\ door\ regenval\ en\ stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie\ door\ regenval\ en\ noodpomp}]$$

Overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen

In dit faalmechanisme openen de stuwen niet, waardoor regenval in het bergingsgebied zal accumuleren en vrij afwateren niet mogelijk is. Als de noodpomp niet functioneert (technisch falen) of de pompcapaciteit onvoldoende is en het waterpeil de maaiveldhoogte overschrijdt, zal overstroming optreden. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

Figuur B.4 Relatie faalmechanismen en faalkansberekening



$Pf_{inundatie\ door\ regenval\ en\ stuwen} = Pf_{tech.falen\ stuwen} * Pf_{Noodpomp}$, zoals weergegeven in Figuur B4.

waarin:

1. de kans op technisch falen van de stuw gegeven wordt door:

$$Pf_{tech. stuw} = Pf_{stuw openen niet} * Pf_{Waterstand Boezem > Sluitpeil}$$

2. de kans op overstrooming bij een pompcapaciteitstekort OF technisch falen van de pomp gegeven wordt door:

$$Pf_{Noodpomp} = 1 - [1 - Pf_{inundatie tekort capaciteit noodpomp}] * [1 - Pf_{inundatie bij tech. falen noodpomp}]$$

1. De kans op falen van $Pf_{stuw openen niet}$ wordt bepaald door een vooraf bepaalde kans, vermenigvuldigd met het aantal jaarlijkse sluit/openingsvragen van de stuwen. $Pf_{Waterstand Boezem > Sluitpeil}$ wordt bepaald door waterstandstatistieken, in relatie tot het sluitpeil. Het sluitpeil is vastgesteld op NAP+0,7m.

- $Pf_{stuw openen niet} = 2,84 * 10^{-5}$ [per vraag];
- $Pf_{Waterstand Boezem > NAP+0,7 m; Jaarbasis} = 2,597$ [1/jaar];
- $Pf_{tech. stuw} = 7,375 * 10^{-5}$ [1/jaar].

2. De kans op falen van $Pf_{inundatie tekort capaciteit noodpomp}$ wordt bepaald door een Limit State functie. $Pf_{inundatie bij tech. falen noodpomp}$ wordt bepaald met behulp van een Limit State functie en de kans op technisch falen van de noodpomp. Deze LMS relateert het inkomend water door regenval aan het bergend volume van het gebied, het maaiveldhoogte van het object en de afvoercapaciteit. Om een overstromingsdiepte te extraheren, moet – bij overschrijding van het bergende volume – het volume aan inkomend water verdeeld worden over het totale oppervlakte.

De LMS voor $Pf_{inundatie tekort capaciteit noodpomp}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstrooming optreden.

Waarin:

- $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil})$ [m³]
Beschrijft het waterbergende capaciteit van de watergangen en het bergingsgebied tot maaiveldhoogte, waarin:
 - ✓ $A_{berging}$, oppervlakte van de watergangen en het bergingsgebied [m²];
 - ✓ $H_{maaiveld}$, hoogte van het maaiveld [NAP+m];
 - ✓ H_{peil} , peilhoogte bij sluiten van de stuwen [NAP+m].
- $S = V_{inkomend} = (Q_{in} - Q_{uit}) * \Delta T$ [m³], bijbehorend met een herhalingsstijds voor verrekking naar schaderisico
Beschrijft het inkomend water door regenval over tijd en ook het uitgaande water wat gepompt wordt door de noodpomp², waarin:
 - ✓ Q_{in} , regenintensiteit maal het oppervlakte [m³/u];
 - ✓ Q_{uit} , pompcapaciteit van de noodpomp [m³/u];
 - ✓ ΔT , min(duur reparatie stuwen of duur van de bui) [uur].

- 2 Het toevoegen van noodpomp (Q_{uit}) aan de 'loading' (S) in deze functie is een praktische keuze. Er kan beargumenteerd worden dat de noodpomp onder de resistentie (R) gevoegd moet worden.

De LMS voor $Pf_{\text{inundatie bij tech. falen noodpomp}}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, waarin:
- $R = V_{\text{berging}} = A_{\text{berging}} * (H_{\text{maai veld}} - H_{\text{peil}}) [\text{m}^3]$
 - Beschrijft het waterbergende capaciteit van de watergangen en het bergingsgebied tot maaiveldhoogte, waarin:
 - A_{berging} , oppervlakte van de watergangen en het bergingsgebied $[\text{m}^2]$
 - $H_{\text{maai veld}}$, hoogte van het maaiveld $[\text{NAP} + \text{m}]$
 - H_{peil} , peilhoogte bij sluiten van de stuwen $[\text{NAP} + \text{m}]$
- $S = V_{\text{inkomend}} = Q_{\text{in}} * \Delta T [\text{m}^3]$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schaderisico
 - Beschrijft het inkomend water door regenval over tijd zonder pompcapaciteit, waarin:
 - Q_{in} , regenintensiteit maal het oppervlakte $[\text{m}^3/\text{u}]$
 - ΔT , min(duur reparatie stuwen of duur van de bui) $[\text{uur}]$
- Vermenigvuldigd met de kans op technisch falen van de pomp
 - $Pf_{\text{tech. falen noodpomp}} = 1/250$ [per vraag]

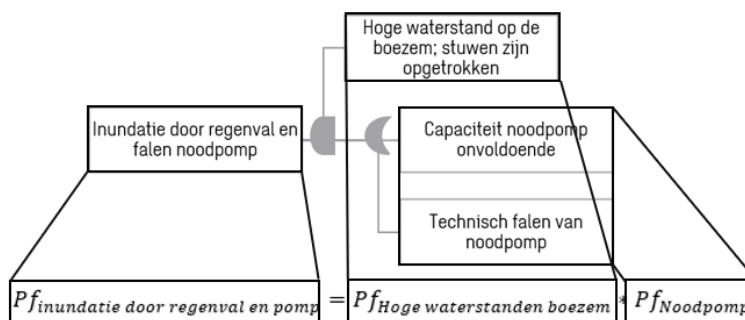
De Limit State functie beschrijft nu het resultaat in kubieke meters water. Om de overstroomingsdiepte te verkrijgen, wordt een verrekening toegepast. Er wordt hierbij aangenomen dat het water zich gelijkmatig verdeelt over het oppervlakte. De functie is dan te herschrijven als: $Z = \frac{R - S (\text{m}^3)}{\text{Oppervlakte} (\text{m}^2)}$, als $Z < 0$, zal overstrooming optreden.

De LMS kan in principe op verschillende manier geschreven worden. Dit is aan de gebruiker, maar hierbij dienen de fysieke karakteristieken en werking van het watersysteem zo realistisch mogelijk in kaart gebracht te worden.

Overstroming door regenval en falen van de noodpomp

In dit faalmechanisme zijn de stuwen opgetrokken door hoge waterstanden op het Zuidlaardermeer (boezem), waardoor regenval in het bergingsgebied zal accumuleren en vrij afwateren niet mogelijk is. Als de noodpomp niet functioneert (technisch falen) of de pompcapaciteit onvoldoende is en het waterpeil de maaiveldhoogte overschrijdt, zal overstrooming optreden. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

Figuur B.5 Faalmechanisme 'overstroming door hevige regenval en niet openen van stuwen'



$Pf_{\text{inundatie door regenval en pomp}} = Pf_{\text{Hoge waterstanden boezem}} * Pf_{\text{Noodpomp}}$, zoals weergegeven in Figuur B.5.

waarin:

1. de kans op hoge waterstanden op de boezem gegeven wordt door:

$$Pf_{Waterstand\ Boezem>Sluitpeil}$$

2. de kans op overstrooming bij een pompcapaciteitstekort OF technisch falen van de pomp gegeven wordt door:

$$Pf_{Noodpomp} = 1 - [1 - Pf_{inundatie\ tekort\ capaciteit\ noodpomp}] * [1 - Pf_{inundatie\ bij\ tech.\ falen\ noodpomp}]$$

1. $Pf_{Waterstand\ Boezem>Sluitpeil}$ wordt bepaald door waterstandstatistieken, in relatie tot het sluitpeil. Het sluitpeil is vastgesteld op NAP+0,7m.

- $Pf_{Waterstand\ Boezem>NAP+0,7\ m; Jaarbasis} = 2,597$ [1/jaar]

2. De kans op falen van $Pf_{inundatie\ tekort\ capaciteit\ noodpomp}$ wordt bepaald door een Limit State functie. $Pf_{inundatie\ bij\ tech.\ falen\ noodpomp}$ wordt bepaald met behulp van een Limit State functie en kans op technisch falen van de noodpomp. Deze LMS relateren het inkomend water door regenval aan het bergend volume van het gebied, het maaiveldhoogte van het object en de afvoercapaciteit. Om een overstromingsdiepte te extraheren, moet bij overschrijding van het bergende volume het volume aan inkomend water verdeeld worden over het totale oppervlakte.

De LMS voor $Pf_{inundatie\ tekort\ capaciteit\ noodpomp}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstrooming optreden. Waarin:
 - $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil})$ [m³]
 - Beschrijft het waterbergende capaciteit van de watergangen en het bergingsgebied tot maaiveldhoogte, waarin:
 - $A_{berging}$, oppervlakte van de watergangen en het bergingsgebied [m²]
 - $H_{maaiveld}$, hoogte van het maaiveld [NAP+m]
 - H_{peil} , peilhoogte bij sluiten van de stuwen [NAP+m]
 - $S = V_{inkomend} = (Q_{in} - Q_{uit}) * \Delta T$ [m³], bijbehorend met een herhalingstijd voor verrekening naar schaderisico
 - Beschrijft het inkomend water door regenval over tijd en ook het uitgaande water wat gepompt wordt door de noodpomp³, waarin:
 - Q_{in} , regenintensiteit maal het oppervlakte [m³/u]
 - Q_{uit} , pompcapaciteit van de noodpomp [m³/u]
 - ΔT , duur van de bui [uur],

De LMS voor $Pf_{inundatie\ bij\ tech.\ falen\ noodpomp}$ kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, waarin:
 - $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil})$ [m³]
 - Beschrijft het waterbergende capaciteit van de watergangen en het bergingsgebied tot maaiveldhoogte, waarin:
 - $A_{berging}$, oppervlakte van de watergangen en het bergingsgebied [m²]
 - $H_{maaiveld}$, hoogte van het maaiveld [NAP+m]
 - H_{peil} , peilhoogte bij sluiten van de stuwen [NAP+m]
- 3 Het toevoegen van noodpomp (Q_{uit}) aan de 'loading' (S) in deze functie is een praktische keuze. Er kan beargumenteerd worden dat de noodpomp onder de resistentie (R) gevoegd moet worden.

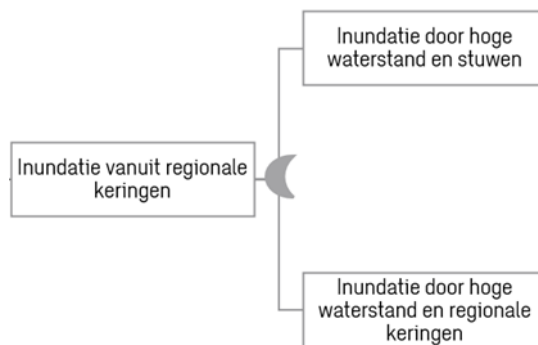
- $S = V_{\text{inkomend}} = Q_{\text{in}} * \Delta T$ [m³], bijbehorend met een herhalings-tijd voor verrekening naar schaderisico
 - Beschrijft het inkomend water door regenval over tijd zonder pompcapaciteit, waarin:
 - Q_{in} , regenintensiteit maal het oppervlakte [m³/u]
 - ΔT , duur van de bui [uur]
- Vermenigvuldigd met de kans op technisch falen van de pomp
 - $Pf_{\text{tech. falen noodpomp}} = 1/250$ [per vraag]

De Limit State functie beschrijft nu het resultaat in kubieke meters water. Om de overstromings-diepte te verkrijgen wordt, een verrekening toegepast. Er wordt hierbij aangenomen dat het water zich gelijkmatig verdeelt over het oppervlakte. De functie is dan te herschrijven als: $Z = \frac{R - S \text{ (m}^3\text{)}}{\text{Oppervlakte (m}^2\text{)}}$, als $Z < 0$, zal overstroming optreden.

Regionale keringen

Overstroming vanuit het systeem 'regionale keringen' kan optreden door hoge waterstanden op de boezem (Zuidlaardermeer), gecombineerd met het falen van de regionale kering of door het niet sluiten van de aanwezige stuwen (zie Figuur B.6). De faalkansberekening wordt gegeven door:

Figuur B.6 Faalmechanisme 'overstroming door hoge waterstanden, falen stuwen en regionale kering'



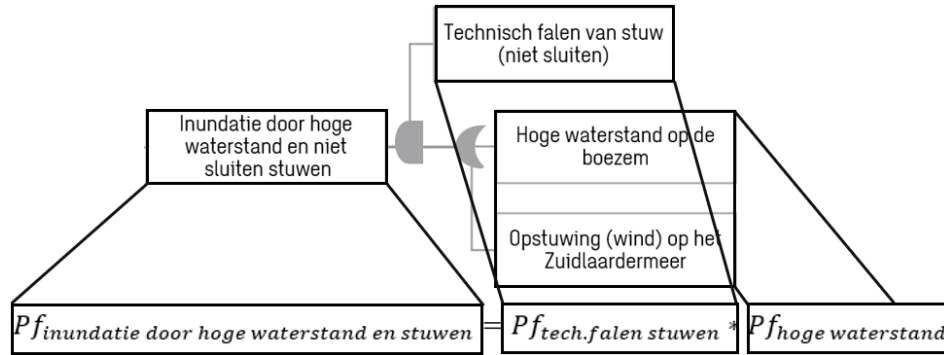
$$Pf_{\text{Regionale kering}} = 1 - [1 - Pf_{\text{inundatie hoge waterstand en stuwen}}] * [1 - Pf_{\text{inundatie hoge waterstanden en kering}}]$$

Overstroming door hoge waterstanden op de boezem en het falen van de stuwen (stuwen sluiten niet)

In dit faalmechanisme zijn de waterstanden op het Zuidlaardermeer (boezem) hoger dan het sluitpeil en sluiten de stuwen niet waardoor de hoge waterstanden op de boezem doorwerken in de watergangen van het recreatiepark. De faalkansberekening wordt dan gevormd door:

$Pf_{\text{inundatie door hoge waterstand en stuwen}} = Pf_{\text{tech. falen stuwen}} * Pf_{\text{hoge waterstand}}$, zoals weergegeven in Figuur B.7.

Figuur B.7 Relatie faalmechanisme en faalkansberekening



waarin:

1. de kans op technisch falen van de stuw gegeven wordt door:

$$Pf_{tech. stuwen} = 2,84 * 10^{-5} \text{ [per vraag]}$$

2. de kans op hoge waterstanden op de boezem gegeven wordt door:

$$Pf_{waterstand\ boezem} = 1 - [1 - Pf_{hoge\ waterstand\ boezem}] * [1 - Pf_{hoog\ water\ en\ opstuwing}]$$

De LMS voor $Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ stuwen}$ is dan een relatie tussen de waterstandhoogte en het maaiveld en kan geschreven worden als:

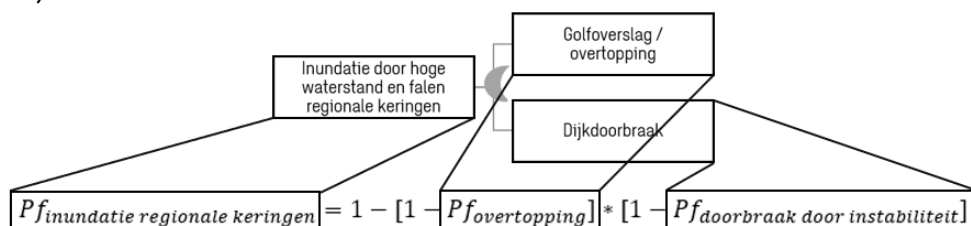
- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden. Waarin:
- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) \text{ [NAP+m]}$
- $S = H_{waterpeil} \text{ [NAP+m]}$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schade-risico.

Overstroming door falen van de regionale kering

In dit faalmechanisme faalt de regionale kering en treedt overstroming van het recreatiepark op door golfoverslag of een dijkdoorbraak. Golfoverslag zal enkel plaatsvinden als de waterstanden en/of golven op het Zuidlaardermeer hoger zijn dan de kruinhoogte. Er is voor gekozen om dit niet in een onderliggend faalmechanisme op te nemen vanwege de leesbaarheid. Deze afhankelijkheid zit gebonden in het faalmechanisme 'golfoverslag'. Hetzelfde geldt voor een dijkdoorbraak, echter, is deze afhankelijk van hydraulische belastingen vanuit het Zuidlaardermeer. De faalkansberekening wordt dan gegeven door:

$$Pf_{inundatie\ regionale\ keringen} = 1 - [1 - Pf_{overtopping}] * [1 - Pf_{doorbraak\ door\ instabiliteit}], \text{ zoals weergegeven in Figuur B.8.}$$

Figuur B.8 Faalmechanisme 'overstroming door hoge waterstanden op de boezem en het falen van de stuwen (stuwen sluiten niet)'



waarin:

1. de kans op overtopping van de kering gegeven wordt door:

$$P_{f_{\text{overtopping}}} = f_{\text{aalkansruimtefactor}} * \text{normering}$$

2. de kans op een dijkdoorbraak gegeven wordt door:

$$P_{f_{\text{doorbraak door instabiliteit}}} = f_{\text{aalkansruimtefactor}} * \text{normering}$$

De LMS voor $P_{f_{\text{inundatie door hoge waterstand en falen regionale kering}}}$ is dan een relatie tussen de waterstandhoogte en het maaiveld en kan geschreven worden als:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden. Waarin:
- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) [\text{NAP} + \text{m}]$
- $S = \text{Hwaterpeil bij de norm} [\text{NAP} + \text{m}]$, bijbehorend met een herhalingstijd voor verrekening naar schaderisico.

De kans op overstroming vanuit het deelsysteem regionale keringen kan ook gegeven worden door een algemene kans, zoals beschreven in paragraaf 3.3.2:

“De IPO-klasse bevat een normfrequentie met een bijbehorende toelaatbare kans op dijkdoorbraak van 0,2x de normfrequentie (STOWA, 2015). Bijvoorbeeld als de kering een IPO-klasse III heeft, dan is de normfrequentie 1/100 per jaar en is de toelaatbare kans op een dijkdoorbraak 1/500 per jaar. De kans op een dijkdoorbraak is vervolgens een combinatie van stabiliteit, overslag en overige faalmechanismen (o.a. erosie en ontgronding door bomen).”

SAMENVATTING

NIVEAU 1

$$Pf_{Topgebeurtenis} = 1 - [1 - Pf_{Oppervlaktewater}] * [1 - Pf_{Regionale kering}]$$

NIVEAU 2

$$Pf_{Oppervlaktewater} = 1 - [1 - Pf_{inundatie door regenval en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie door regenval en noodpomp}]$$

OF

$$Pf_{Regionale kering} = 1 - [1 - Pf_{inundatie hoge waterstand en stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie hoge waterstanden en kering}]$$

NIVEAU 3 – OPPERVLAKTEWATER

$$Pf_{inundatie door regenval en stuwen} = Pf_{tech.falen stuwen} * Pf_{Noodpomp}$$

OF

$$Pf_{inundatie door regenval en pomp} = Pf_{Hoge waterstanden boezem} * Pf_{Noodpomp}$$

NIVEAU 4 – OPPERVLAKTEWATER – OVERSTROMING DOOR REGENVAL EN STUWEN

$$Pf_{inundatie door regenval en stuwen} = Pf_{tech.falen stuwen} * Pf_{Noodpomp}$$

waarin:

$$Pf_{tech. stuwen} = Pf_{stuwen openen niet} * Pf_{Waterstand Boezem > Sluitpeil}$$

$$Pf_{Noodpomp} = 1 - [1 - Pf_{inundatie tekort capaciteit noodpomp}] * [1 - Pf_{inundatie bij tech. falen noodpomp}]$$

Met LMS 1 in $Pf_{inundatie tekort capaciteit noodpomp}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstroming optreedt.
Waarin:
 - $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil}) [m^3]$
 - $S = V_{inkomend} = (Q_{in} - Q_{uit}) * \Delta T [m^3]$, bijbehorend met een herhalingstijd voor verrekening naar schaderisico
 - $\Delta T = \min(\text{duur reparatie stuwen of duur van de bui}) [\text{uur}]$

Met LMS 2 in $Pf_{inundatie bij tech. falen noodpomp}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstroming optreden.
Waarin:
 - $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil}) [m^3]$
 - $S = V_{inkomend} = Q_{in} * \Delta T [m^3]$, bijbehorend met een herhalingstijd voor verrekening naar schaderisico
 - $\Delta T = \min(\text{duur reparatie stuwen of duur van de bui}) [\text{uur}]$

NIVEAU 4 – OPPERVLAKTEWATER – OVERSTROMING DOOR REGENVAL EN POMP

$$Pf_{inundatie\ door\ regenval\ en\ pomp} = Pf_{Hoge\ waterstanden\ boezem} * Pf_{Noodpomp}$$

Waarin:

$$Pf_{Hoge\ waterstanden\ boezem} = Pf_{Boezempeil > sluitpeil}$$

$$Pf_{Noodpomp} = 1 - [1 - Pf_{inundatie\ tekort\ capaciteit\ noodpomp}] * [1 - Pf_{inundatie\ bij\ tech.\ falen\ noodpomp}]$$

Met LMS 3 in $Pf_{inundatie\ tekort\ capaciteit\ noodpomp}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstroming optreedt.

Waarin:

- $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil}) [m^3]$
- $S = V_{inkomend} = (Q_{in} - Q_{uit}) * \Delta T [m^3]$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schaderisico
- ΔT = duur van de bui [uur]

Met LMS 4 in $Pf_{inundatie\ bij\ tech.\ falen\ noodpomp}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water buiten de watergangen treden en overstroming optreedt.

Waarin:

- $R = V_{berging} = A_{berging} * (H_{maaiveld} - H_{peil}) [m^3]$
- $S = V_{inkomend} = Q_{in} * \Delta T [m^3]$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schaderisico
- ΔT = duur van de bui [uur]

NIVEAU 3 – REGIONALE KERINGEN

$$Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ stuwen} = Pf_{tech.falen\ stuwen} * Pf_{hoge\ waterstand}$$

OF

$$Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ falen\ dijk} = Pf_{tech.falen\ stuwen} * Pf_{hoge\ waterstand}$$

NIVEAU 4 – REGIONALE KERINGEN – OVERSTROMING DOOR HOGE WATERSTANDEN EN NIET SLUITEN STUWEN

$$Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ stuwen} = Pf_{tech.falen\ stuwen} * Pf_{hoge\ waterstand}$$

Waarin:

1. De kans op technisch falen van de stuw wordt gegeven door:

$$Pf_{tech.\ stuwen} = 2,84 * 10^{-5} \text{ [per vraag]}$$

2. De kans op hoge waterstanden op de boezem wordt gegeven door:

$$Pf_{waterstand\ boezem} = 1 - [1 - Pf_{hoge\ waterstand\ boezem}] * [1 - Pf_{hoog\ water\ en\ opstuwing}]$$

Met LMS 5 in $Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ stuwen}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden.

Waarin:

- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) [NAP+m]$
- $S = H_{waterpeil} [NAP+m]$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schade-risico

NIVEAU 4 – REGIONALE KERINGEN – OVERSTROMING DOOR HOGE WATERSTANDEN EN FALEN REGIONALE KERING

$$Pf_{inundatie\ regionale\ keringen} = 1 - [1 - Pf_{overtopping}] * [1 - Pf_{doorbraak\ door\ instabiliteit}]$$

Waarin:

1. de kans op overtopping van de kering gegeven wordt door:

$$Pf_{overtopping} = faalkansruimtefactor * normering$$

2. de kans op een dijkdoorbraak gegeven wordt door:

$$Pf_{doorbraak\ door\ instabiliteit} = faalkansruimtefactor * normering$$

De LMS 6 in $Pf_{inundatie\ door\ hoge\ waterstand\ en\ falen\ regionale\ kering}$:

- $Z = R - S$, als $R < S$ zal het water hoger staan dan de kade en de hoogte van het maaiveld van het object en zal overstroming optreden.

Waarin:

- $R = \max(\text{Hoogte kade; Hoogte maaiveld object}) [\text{NAP} + m]$
- $S = \text{Hwaterpeil bij de norm } [\text{NAP} + m]$, bijbehorend met een herhalingsstijd voor verrekening naar schaderisico

BIJLAGE 3

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

STOWA PILOT 2023

Deze bijlage is een kopie uit de pilotstudie (Sweco, 2023). Verwijzingen in onderstaande tekst dienen gevonden te worden in de betreffende rapportage.

In deze bijlage worden de conclusies gepresenteerd op basis van de bevindingen in deze pilot-case. Daarnaast wordt ingegaan op de gemaakte aannames, om vervolgens af te sluiten met aanbevelingen richting een integrale benadering van wateroverlast.

CONCLUSIES

De methodiek

In deze pilot is een methodiek gepresenteerd om vanuit een geaccepteerd schaderisico tot een basisbeschermingsniveau te komen. Hiervoor worden op objectniveau (bijvoorbeeld een woning of een perceel akkerbouw) schadefuncties opgesteld, waarbij de relatie wordt beschreven tussen de grootte van de schadefactor (inundatiediepte, -duur en -seizoen) en de opgetreden schade. Met deze relatie kan de verwachte schade worden bepaald, die vervolgens verdisconteerd wordt met het geaccepteerde schaderisico. Dit levert een geaccepteerde herhalings tijd voor inundatie. Hierbij wordt afgeweken van de huidige praktijk, omdat het beschermingsniveau geen ondergrens stelt aan een minimale herhalings tijd voor wateroverlast. In de huidige normen is zo'n ondergrens wel opgenomen. Voor nadere toelichting, zie paragraaf 3.5.1.

Vervolgens kan middels de foutenboommethodiek het huidige en toekomstige systeem getoetst worden aan het basisbeschermingsniveau. Middels een foutenboom dienen eerst alle mogelijke faalpaden (oorzaken die leiden tot wateroverlast) in beeld gebracht te worden, waarbij meerdere deelsystemen aan de orde kunnen zijn. Middels probabilistische berekeningen kunnen deze faalpaden omgezet worden naar kans op voorkomen en herhalings tijden. Deze kunnen vervolgens worden vergeleken met het basisbeschermingsniveau. Voor nadere toelichting, zie paragraaf 3.5.

Als laatste kan de foutenboommethodiek ook gebruikt worden om de (kosten-)effectiviteit van verschillende maatregelen tegen elkaar af te wegen. Hiervoor kan voor ieder object bepaald worden hoe een maatregel een mechanisme in de foutenboom beïnvloedt en welke impact dit heeft in de reductie van het risico (= kans maal gevolg) van wateroverlast voor het object. Aan de hand van het economisch optimum worden de baten (reductie van schade) gewogen tegenover de benodigde investering. Hiermee ontstaat een gestandaardiseerde KPI waarmee verschillende maatregelen gescoord kunnen worden.

Kansen en kanttekeningen van een integrale benadering van wateroverlast

De gepresenteerde methodiek maakt het mogelijk om voor een object helder in beeld te krijgen vanuit welke huidige deelsystemen in het watersysteem wateroverlast valt te verwachten. Door deze oorzaken in een foutenboom weer te geven, worden de soms ingewikkelde onderlinge relaties blootgelegd. De methodiek biedt als bijkomend voordeel dat ook de bijdrage van de verschillende watersystemen (lokaal/regionaal/stedelijk) op de uiteindelijke kans op wateroverlast gekwantificeerd kunnen worden.

Hierdoor wordt ook inzichtelijk welk deelsysteem maatgevend is voor (de kans op) wateroverlast bij een specifiek object en daarmee het meest doeltreffend is om aanpassingen in door te voeren. Het biedt tevens handvatten voor watersysteembeheerders om het gesprek met elkaar aan te gaan. Door wateroverlast integraal te benaderen, ontstaat de mogelijkheid om effectievere maatregelen op basis van een risico-gestuurde aanpak. Daarmee wordt afgestapt van het nastreven van verschillende sectorale normen, terwijl sommige normen wellicht te streng blijken in relatie tot de andere watersysteemnormen.

Tegelijkertijd leidt een integrale aanpak onvermijdelijk tot meer complexiteit, vergeleken met de huidige sectorale aanpak. Zowel op inhoudelijk als bestuurlijk vlak worden er dimensies toegevoegd aan het begrip wateroverlast. Bestuurlijk moeten er bijvoorbeeld keuzes gemaakt worden, zoals het vaststellen van het geaccepteerd schaderisico of het verdelen van verantwoordelijkheden. Inhoudelijk moeten verschillende expertises aan één tafel aansluiten om de kennis van het gehele watersysteem waar een object aan blootgesteld is, te bundelen, waarbij niet alleen inundatiediepte een rol speelt maar ook aspecten, als duur en periode (seizoen).

AANNAMES

Om uiteindelijk tot een kwantitatief resultaat te komen, is een grote set aan informatie nodig. In deze pilot bleek dat een uitdaging te zijn, gezien de doorlooptijd van het project. Om resultaten te verkrijgen die nodig zijn om de methodiek te kunnen testen, zijn er daarom diverse aannames gedaan. Deze aannames hebben vooral invloed op de **kwantitatieve** uitkomsten van deze pilot. De methodiek is hier niet door beïnvloed.

Basisbeschermingsniveau

In paragraaf 2.3 wordt ingegaan op het beschermingsniveau. Daarbij is gebruik gemaakt van eenheidsprijzen, schadefactoren en schadefuncties vanuit de Waterschadeschatter. Het is bekend dat deze informatie in de Waterschadeschatter is afgeleid voor de specifieke toepassingen binnen de Waterschadeschatter onder bepaalde randvoorwaarden, hiervoor wordt verwezen naar de Waterschadeschatter (STOWA, 2013). Daarbinnen valt de toepassing in deze pilot niet. De resultaten zijn daarmee niet direct toepasbaar op een praktijksituatie. Onder de noemer van een pilot waarbij het om de methode en niet om de nauwkeurigheid van de uitkomsten gaat, is vastgesteld dat de informatie uit de Waterschadeschatter voor deze casus representatief genoeg is. Wanneer de uitkomsten van de methode betrouwbaar worden geacht, wordt aangeraden om de aannames die uit de Waterschadeschatter zijn overgenomen, kritisch te beoordelen.

Foutenboommethode

In het samenstellen van de methode zijn enkele aannames gemaakt. Hiervan worden een aantal voorbeelden gesommeerd, welke opgedeeld zijn in drie paragrafen:

- sturende mechanisme;
- Limit State functies;
- faalkansen.

Sturende mechanismen

Bij het opstellen van de sturende mechanismen (bijlage 4), zijn enkele versimpelingen aangebracht. Zo is de regenintensiteit (en de tijdsduur hiervan) opgenomen door middel van twee normaalverdelingen. Deze zijn echter niet onderbouwd. Het sturend mechanisme van windopzet is deels op beschikbare gegevens van een nabijgelegen weerstation gebaseerd, de windrichting is echter geïntegreerd door een willekeurige invalshoek voor elke iteratie in de simulatie. De resultaten van de methode in deze pilot zullen dan ook niet geheel de werkelijke situatie representeren. Voor een praktische toepassing is het wenselijk deze mechanismen nader te definiëren.

Limit State functies

Voor de Limit State functie 'Doorbraak regionale kering door instabiliteit' is er aangenomen dat de kering zou kunnen doorbreken bij een waterstand van NAP +1,158 m (bijlage 4). Deze waarde is echter niet geverifieerd door middel van een stabiliteitsberekening. Zoals te lezen is in paragraaf 6.2.2, levert dit faalmechanisme een significant aandeel van de totale overschrijdingskansen van inundatie. Een stabiliteitsberekening zou uitsluitsel kunnen geven of de weerstand (R) van de kering correct is aangenomen. Mocht de weerstand hoger zijn dan momenteel meegenomen, zou dit mogelijk een groot effect kunnen hebben op de resultaten van paragraaf 3.4, aangezien een 'lichtere' of geen maatregel toegepast zou kunnen worden. Dit reduceert de benodigde investeringskosten om het object aan het basisbeschermingsniveau te laten voldoen.

Faalkansen

Voor enkele vooraf bepaalde faalkansen, zoals gedefinieerd in paragraaf 3.3, zijn aannames gemaakt. Het faalmechanisme 'Technisch falen noodpomp' is hier een voorbeeld van. Op basis van expert judgement is hiervoor een technische faalkans van 1/250 per vraag aangenomen. Doordat in dit voorbeeld de bijdrage voor de totale overschrijdingskansen van het Lokaal watersysteem significant lager is dan het Boezemsysteem (zie figuur 1.3), zullen wijzigingen van deze vastgestelde faalkans weinig invloed hebben op de totale overschrijdingskansen, tenzij de technische faalkans significant toe -of afneemt en/of de faalkans door andere mechanismen in dezelfde ordegrootte vallen als die van het Lokaal watersysteem.

Bodemdaling

Voor de berekeningen is rekening gehouden met een jaarlijkse bodemdaling van 3,8 mm, vastgesteld in paragraaf 5.2. De bodemdaling beïnvloedt de kans op inundatie, omdat deze het maaiveld van het object, in de LMS gedefinieerd als 'R', beïnvloedt. De herhalingstijden van inundatie zullen in tijd toenemen door een toenemende bodemdaling in tijd. Dit heeft op zijn beurt weer effect op het risico en zal de kans op schade vergroten. Indien de werkelijke jaarlijkse bodemdaling lager zal zijn, zal de kans op schade verkleinen en vice versa voor een hogere daling. Bij het toetsen van het basisbeschermingsniveau ten opzichte van de gesimuleerde overschrijdingskansen van inundatie dient rekening gehouden te worden met veranderlijkheden in de ordegrootte van de jaarlijkse bodemdaling.

Indien verwacht wordt dat de jaarlijkse bodemdaling zal versnellen, is het aangeraden om 'zwaardere' maatregel(en) te treffen die deze onzekerheid kan opvangen. Mocht het tegenovergestelde het geval zal c.q. een vertragende jaarlijkse bodemdaling, liggen er kansen om de benodigde investeringskosten te verminderen door een 'lichtere' maatregel te treffen. Een zelfde soort redenering is toepasbaar als een veranderlijk klimaat wordt beschouwd. Deze toetsing is echter niet ondernomen in deze pilot en dient verder uitgewerkt te worden.

AANBEVELINGEN

Op basis van de bevindingen in deze pilot worden een aantal aanbevelingen gedaan:

1. Er wordt aanbevolen om de schaalsprong van object naar gebied verder uit te werken. Hierbij zullen naar verwachting verschillende uitdagingen ontstaan. Met name het vaststellen van een beschermingsniveau voor een heel gebied is tijdens de pilot lastig gebleken. Het recreatiepark in de toegepaste methode fungeert in feite als een bouwsteen om het schaderisico hiervan te bepalen. In principe zouden meerdere bouwstenen aan de methode toegevoegd kunnen worden om een groter oppervlakte te kunnen beslaan. Voor de verdere uitwerking van de schaalsprong kan gebruik worden gemaakt van de handvatten uit dit rapport.
2. Er wordt aanbevolen om het aantal gemaakte aannames zoveel mogelijk te reduceren. Hiervoor dienen de aannames verder uitgewerkt te worden door bijvoorbeeld het toevoegen van een niveau in de foutenboom. Aangeraden wordt om gebruik te maken van modelresultaten om de parameters in de foutenboom (m.n. de Limit State functies) nauwkeuriger te maken (denk hierbij aan overstromings- en neerslagmodellen die veelal bij waterschappen beschikbaar zijn), maar ook de faalkansen van technische componenten (pompen en stuwen) te onderzoeken. Naar verwachting zal dit leiden tot andere faalkansen dan in die in dit rapport gepresenteerd zijn.
3. Er wordt aanbevolen om, wanneer de aannames zijn gereduceerd, de methodiek toe te passen op de beoordeling van meerdere maatregelen die wateroverlast kunnen beperken. In deze pilot is gebleken dat het recreatiepark een dermate klein gebied is, waar in de huidige situatie één dominante oorzaak lijkt te zijn van wateroverlast, dat het afwegen van maatregelen weinig complex bleek. Door de toetsing uit te voeren op een groter gebied (waarbij rekening gehouden wordt met aanbeveling 1), kunnen mogelijk uitdagingen ontstaan die in deze pilot niet tegen zijn gekomen. Bij deze toetsing van maatregelen kan tevens gestuurd worden op complexere toekomstige ontwikkelingen.