

# Pilot integrale aanpak risicoanalyse wateroverlast

Uitwerking pilotlocatie 'de Hunze'



<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Beschrijving van de wijziging</b>
C0.1	9-11-2022	Start rapportage
C0.2	01-12-2022	Onderzoeksvraag 1
C0.3	14-12-2022	Onderzoeksvraag 2
C0.4	23-12-2022	Hoofdstuk 3 geschreven en uitgewerkt tot het rekenvoorbeeld van de foutenboom voor het recreatiepark
C0.5	10-01-2023	Interne feedback doorgevoerd
C0.6	21-2-2023	Interne concept rapportage afgerond
C1.0	24-02-2023	Concept rapportage opgesteld
D1.0	06-04-2023	Definitieve rapportage opgesteld

**Sweco Nederland B.V.**  
**Onderwerp**

Pilot integrale aanpak risicoanalyse  
wateroverlast

**Projectnummer**

51012259

**Gecontroleerd door**

Maurits Kampen & Riekje Rusticus

**Klant**

STOWA

**Versie**

1.0

**Vrijgegeven door**

Arjen van den Ouden

**Datum**

06-04-2023

**Auteur**

Niels Welsch & Thijs Vrinds

**Documentnummer**

NL23-648800269-47631



# Inhoudsopgave

1.	Introductie .....	6
1.1	Aanleiding .....	6
1.2	Doelstelling .....	7
1.3	Onderzoeksvragen .....	7
1.4	Pilotlocatie .....	8
1.5	Begrippen .....	8
1.6	Leeswijzer .....	10
2.	Uitdrukken van het (basis)beschermingsniveau .....	11
2.1	Objecten .....	11
2.1.1	Aanpak .....	11
2.1.2	Gebieden .....	11
2.1.3	Objecten .....	12
2.1.4	Overzicht .....	12
2.1.5	Keuze .....	12
2.2	Schade eenheden .....	12
2.3	Beschermingsniveau .....	13
2.3.1	Geaccepteerd schaderisico voor één object .....	13
2.3.2	Van schade-risico naar beschermingsniveau (per object) .....	14
2.3.3	Uitlegbaarheid van het beschermingsniveau .....	18
2.3.4	Opschalen van het basisbeschermingsniveau van object naar gebied .....	19
2.3.5	Het beschermingsniveau in het kader van Water en Bodem sturend als basis .....	20
2.4	Bepaling basisbeschermingsniveau voor de drie objecten binnen het pilotgebied .....	21
2.4.1	Recreatiewoning .....	21
2.4.2	Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer .....	23
2.4.3	Nieuwbouwwijk 'De Voorde' .....	27
3.	Vertaling van basisbeschermingsniveau naar het watersysteem .....	29
3.1	De foutenboommethode .....	29
3.1.1	Niveaus in de foutenboom .....	30
3.1.2	Invloed van weersomstandigheden (sturende mechanismen) .....	30
3.1.3	Correlatie tussen omstandigheden en deelsystemen .....	31
3.1.4	Rekenen met de foutenboom .....	31
3.2	Foutenbomen .....	37
3.2.1	Recreatiewoningen .....	38
3.2.2	Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer .....	38
3.2.3	Nieuwbouwwijk 'De Voorde' .....	39
3.3	Uitwerking foutenboom voor het recreatiepark .....	39

3.3.1	Object specificatie.....	40
3.4	Gesimuleerde foutenboom inundatiekansen .....	42
3.5	Vergelijking basisbeschermingsniveau t.o.v. overschrijdingskansen .....	45
3.5.1	Vergelijk met huidige normeringen .....	45
4.	Geobserveerde aandachtspunten .....	46
4.1	Algemene aandachtspunten .....	46
4.2	Afstemming tussen overheden en verantwoordelijkheden .....	46
4.3	Politiek-bestuurlijke overwegingen bij gebiedsgerichte keuzes .....	47
4.4	Uitlegbaarheid .....	48
5.	Geobserveerde opgave van het huidige beschermingsniveau in relatie tot de overschrijdingskansen.....	50
5.1	Opgave voor het huidige klimaat en in 2050.....	50
5.2	Bodemdaling .....	51
6.	Welke maatregelen kunnen <i>de kans van optreden en gevolgen van</i> wateroverlast bij de locatie/het gebied beïnvloeden? .....	52
6.1	Geïdentificeerde maatregelen.....	52
6.2	Selectie en toetsing maatregelen.....	54
6.2.1	Selectie maatregelen .....	54
6.2.2	Toetsing maatregelen .....	54
6.2.3	Economisch optimum maatregelen .....	57
6.2.4	Effectiviteit maatregelen .....	60
6.3	Aanbeveling toe te passen maatregel.....	62
7.	Conclusies en aanbevelingen .....	63
7.1	Conclusies.....	63
7.1.1	De methodiek.....	63
7.1.2	Kansen en kanttekeningen van een integrale benadering van wateroverlast.....	64
7.2	Aannames .....	64
7.2.1	Basisbeschermingsniveau .....	64
7.2.2	Foutenboommethode.....	65
7.2.3	Bodemdaling .....	66
7.3	Aanbevelingen.....	66
8.	Literatuurlijst .....	68
Bijlage 1.	Overzicht gebieden en objecten .....	69
Bijlage 2.	Geaccepteerd schaderisico .....	72
Bijlage 3.	Schadefuncties .....	74
Bijlage 4.	Uitgangspunten foutenboom.....	77
Bijlage 5.	Probabilistische relaties tussen faalmechanismen .....	84



# 1. Introductie

## 1.1 Aanleiding

Op het gebied van wateroverlast en waterveiligheid is er sprake van verschillende ontwikkelingen. Zo zijn er recent studies gedaan naar de normeringsmethode van regionale keringen en de veiligheidsbenadering. Tegelijkertijd zijn er discussies over de provinciale normen wateroverlast en de toekomstbestendigheid daarvan.

Behalve de ontwikkelingen binnen de huidige veiligheidsmethodiek, wordt sinds de laatste jaren onderzoek gedaan naar het toepassen van een meer integrale aanpak voor het in kaart brengen en beheersen van wateroverlast. Hiermee wordt afgeweken van de nu gebruikelijke sectorale aanpak 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.

In het licht van deze ontwikkelingen heeft STOWA het doel om de methode van integrale risicoanalyse wateroverlast weer een stap verder te brengen en toe te werken naar een reproduceerbare en in de praktijk toepasbare methodiek. Hiermee sluit STOWA aan bij aanbeveling 17 van de Beleidstafel Wateroverlast van maart 2022. Door middel van een aantal pilotgebieden wordt getracht de methodiek vorm te geven en toe te passen. Deze rapportage beschrijft het proces, afwegingen en de tot stand gekomen methodiek voor het pilotgebied 'de Hunze'.

Kader 1. Uitsnede uit aanbeveling 17 van het eerste advies Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater.

---

### **Aanbeveling 17:**

#### **Verbeter de toepassing normering wateroverlast uit regionale watersystemen (strategisch)**

*De beleidstafel adviseert de toepassing normering wateroverlast uit regionale watersystemen te verbeteren door waterschappen en STOWA de mogelijkheden te laten verkennen van een integrale risicobenadering, waarbij naast inundatie vanuit regionale watersystemen ook naar de risico's voor overlast door falen van regionale waterkeringen en water op straat (riolering) wordt gekeken.*

---

## 1.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om een methodiek te ontwikkelen voor een integrale aanpak voor de risicoanalyse wateroverlast. Binnen het totale project worden door vier partijen voor verschillende pilotgebieden een methodiek uitgewerkt en getest. In deze pilot is een deel van het stroomgebied van de Hunze, een beek binnen het beheergebied van Waterschap Hunze en Aa's, het pilotgebied.

## 1.3 Onderzoeksvragen

In deze rapportage wordt geprobeerd antwoord te geven op zes onderzoeksvragen die door STOWA zijn opgesteld in de opdrachtformulering. Het betreft de volgende hoofdvragen.

### Onderzoeksvraag 1

*Hoe druk je binnen een integrale risicobenadering het (basis)beschermingsniveau op een locatie in het gebied uit en hoe bepaal je het?*

### Onderzoeksvraag 2

*Hoe maak je de vertaling van het (locatie specifieke) beschermingsniveau naar de kans op het falen van een deelsysteem binnen het watersysteem? En hoe maak je vervolgens de vertaling naar de kans van het optreden van een relevante weersomstandigheid?*

### Onderzoeksvraag 3

*Welke aandachtspunten komen naar voren in het proces, bij de uitvoering van de methodiek (onderzoeksvraag 1 en 2)?*

### Onderzoeksvraag 4

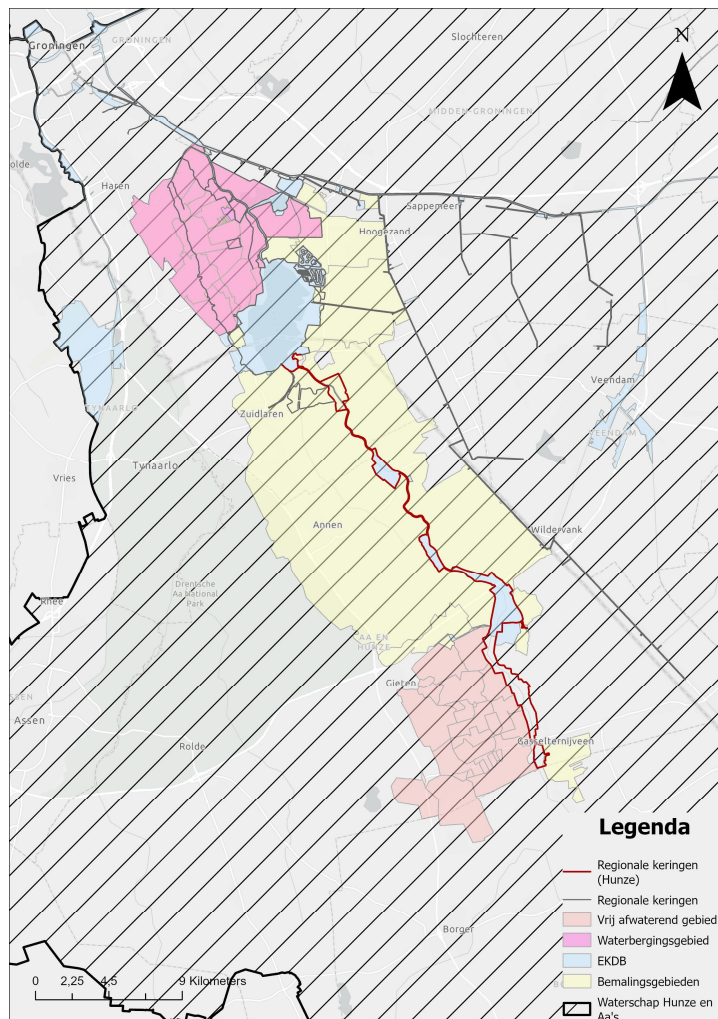
*Welke opgave doet zich voor wanneer de huidige situatie in het gebied wordt vergeleken met het gewenste (basis)beschermingsniveau zoals gedefinieerd voor onderzoeksvraag 1 en 2?*

### Onderzoeksvragen 5 en 6

*Welke maatregelen kunnen de kans van optreden van wateroverlast bij de locatie/het gebied beïnvloeden? Welke maatregelen kunnen de gevolgen van wateroverlast bij de locatie/het gebied beïnvloeden? Welke maatregelen zijn het meest kosteneffectief?*

## 1.4 Pilotlocatie

De pilot bevindt zich in de directe omgeving van de Hunze binnen de grenzen van Waterschap Hunze en Aa's. In Figuur 1 is een overzichtskaart van het gebied te beschouwen. In deze kaart zijn enkele gebieden belicht die binnen de scope van de pilot vallen. In paragraaf 2.1.2 worden deze gebieden verder toegelicht.



Figuur 1. Overzichtskaart van de pilot binnen het Waterschap Hunze en Aa's. NB. Het waterbergingsgebied in het NO is ingetekend op basis van de peilgebiedsgrenzen. In verband met keringen is het feitelijke bergingsgebied kleiner.

## 1.5 Begrippen

In dit rapport worden onderstaande begrippen regelmatig gebruikt:

*Integraal risico* staat voor het totale risico van de verschillende onderdelen van het watersysteem, de ruimtelijke omgeving en de crisisbeheersing. Risico is gedefinieerd als kans maal gevolg. De kans gaat over de frequentie van optreden van een bepaalde mate van wateroverlast. De gevolgen kunnen worden uitgedrukt in allerlei parameters, zoals de inundatiediepte, inundatie



duur, stroomsnelheid, schade in euro's, etc. De gevolgen worden niet alleen bepaald door het ontwerp van het water(keringen)systeem, maar ook het ontwerp van de ruimtelijke omgeving. Daarnaast kan de crisisbeheersing bijdrage aan (de reductie van) het risico.

Het *beschermingsniveau* is de mate waarin een gebied, object, gebouw of perceel wordt beschermd tegen wateroverlast door verschillende (deel)systemen. Het beschermingsniveau is ook wel het acceptabel risico te noemen. Hieronder verstaan we een normatieve waarde die, impliciet of expliciet, wordt geaccepteerd, omdat maatregelen dan niet meer effectief zijn (de kosten wegen niet op tegen de baten). Het beschermingsniveau of acceptabel risico kan ook gebruikt worden als ontwerpcriterium voor een gebied. In dat geval dient dit als basis voor de uitwerking van eisen aan het voorkomen van wateroverlast en de bijdragen van de ruimtelijke omgeving of crisisbeheersing. Momenteel wordt het risico impliciet geaccepteerd, waarbij er voor de verschillende watersystemen, de riolering en de inrichting van de buitenruimte ontwerpcriteria of concepten zijn.

Onder het *watersysteem* verstaan we het waterhuishoudkundige stelsel van watergangen, sloten, gemalen en waterkeringen. Veel van deze systemen zijn ontworpen aan de hand van normen, bijvoorbeeld inundatienormen met een bepaalde frequentie afhankelijk van het landgebruik of de ontwerpnormen voor regionale keringen. Soms worden aanvullende maatregelen genomen om aan deze eisen te voldoen. Zo maakt een bergingsgebied onderdeel uit van het watersysteem. Grondwater beschouwen we niet als onderdeel van het watersysteem.

Onder de *ruimtelijke inrichting* verstaan we de inrichting van het maaiveld. Deze inrichting bepaalt in belangrijke mate de afvoer- en bergingscapaciteit van regenwater dat valt en uiteindelijk afstroomt naar het watersysteem. Het gaat hier dus o.a. om berging van regenwater buiten het watersysteem, zonder dat regenwater overlast veroorzaakt in kritieke functies als woningen, bedrijfspanden etc. Het gaat hier bijvoorbeeld om de berging van extreme neerslag op straat (tussen stoepranden) of in gebieden die waterproof zijn ingericht (waterplein).

Onder *gevolgbeperking* verstaan we de maatregelen die de overheid en eigenaren nemen om de gevolgen van het falen van een (deel)systeem te beperken. Dat kan zijn preventief (voordat falen systeem optreedt), bijvoorbeeld via het beschermen van specifieke objecten, de inrichting van de openbare en particuliere ruimte en gebouwen. Gevolgbeperking achteraf (na afloop van falen systeem) richt zich op calamiteit Zorg of crisisbeheersing.

*Wateroverlast* kan komen door extreme neerslag wat leidt tot verschillende vormen van wateroverlast. Wateroverlast kan bijvoorbeeld worden uitgedrukt in een overstromingsdiepte en een overstromingsduur op een specifieke locatie. Binnen dit onderzoek beschouwen we binnen de integrale aanpak wateroverlast het overlopen van riolen door extreme neerslag, het overlopen van sloten en watergangen en het doorbreken van regionale waterkeringen. Primaire keringen laten we buiten beschouwing, omdat hiervoor de eisen nationaal geregeld zijn en het schaalniveau en het slachtofferrisico van een overstroming bij primaire keringen veel groter is dan bij wateroverlast in de meeste andere gevallen. Ook grondwater laten we buiten beschouwing.

## 1.6 Leeswijzer

De rapportage geeft antwoorden op de onderzoeksvragen zoals STOWA deze heeft opgesteld, zie paragraaf 1.3. Ieder hoofdstuk geeft daarbij antwoord op één van de onderzoeksvragen. Alle hoofdstukken zijn op dezelfde manier ingedeeld: eerst wordt de methode theoretisch toegelicht, vervolgens wordt de methode toegepast op de verschillende objecten.

In de blauwe kaders worden aanvullingen en kanttekeningen bij de beschreven methode uitgelicht.

De groene kaders bieden rekenvoorbeelden van de (soms) abstracte theorie.

Het volgende hoofdstuk heeft betrekking op het basisbeschermingsniveau (onderzoeksvraag 1). Hoofdstuk 3 gaat in op de faalmechanismen vanuit de deelsystemen (onderzoeksvraag 2). De aandachtspunten die naar voren komen bij de methode worden in hoofdstuk 4 (onderzoeksvraag 3) toegelicht. In hoofdstuk 5 wordt de huidige situatie met de toekomstige situatie vergeleken (onderzoeksvraag 4). Hoofdstuk 6 gaat vervolgens in op de afweging en (kosteneffectieve) beoordeling van maatregelen (onderzoeksvraag 5 en 6). Hoofdstuk 7 sluit af met een conclusie en algemene aanbevelingen die in de pilot naar voren zijn gekomen.

## 2. Uitdrukken van het (basis)beschermingsniveau

De eerste fase van de pilot heeft als doel om het (basis)beschermingsniveau op een locatie binnen het gebied uit te drukken in de context van een integrale risicobenadering voor wateroverlast. Naar verwachting is het maatschappelijk aanvaardbaar beschermingsniveau per locatie/object verschillend. Daarom zijn eerst drie objecten gedefinieerd die in deze pilot bekeken worden.

### 2.1 Objecten

#### 2.1.1 Aanpak

Om tot een selectie van interessante objecten te komen, is het projectgebied vanuit twee perspectieven bekeken:

- Welke deel(water-)systemen binnen het watersysteem zijn er in het pilotgebied aanwezig? Hierbij valt te denken aan een bemalingsgebied, bergingsgebied, vrij afwaterend gebied, etc.
- Welke objecten zijn er binnen het pilotgebied aanwezig? Voorbeelden zijn, woningen, industrie, landbouw, etc.

Deze gebieden zijn op kaart ingetekend. Door deze twee 'lagen' op elkaar te leggen ontstaat er een set aan objecten die gedefinieerd worden op basis van hun functie en ligging binnen het gebied. Uit deze set zijn vervolgens drie objecten geselecteerd. Deze keuze is onder andere gebaseerd op de objecten bij andere pilot gebieden (overlap voorkomen). De keuze wordt verder toegelicht in paragraaf 2.1.5.

#### 2.1.2 Gebieden

Binnen het pilotgebied is er onderscheid gemaakt in de volgende gebieden:

- De 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;

De ligging van deze gebieden zijn weergegeven Figuur 1 (volgende pagina).

### 2.1.3 Objecten

De objecten binnen het pilot gebied zijn afgeleid uit de landgebruikkaart (LGN7) en gebiedskennis van het Waterschap en Sweco. Bij de bepaling van alle relevante objecten binnen het gebied is er rekening gehouden met objecten waarbij sprake kan zijn van schade door wateroverlast. Objecten waar geen wateroverlast kan optreden zijn niet meegenomen in dit onderzoek, omdat de pilot zich specifiek richt op wateroverlast. Een voorbeeld hiervan is (niet-beschermde) natuur.

### 2.1.4 Overzicht

De verkregen gebieden en objecten zijn vervolgens op elkaar gelegd, om zo tot een lijst met objecten in bepaalde gebieden te komen. Dit overzicht is opgenomen in Bijlage 1, Tabel 9.

### 2.1.5 Keuze

Vanuit het overzicht is een set objecten geselecteerd om in deze pilot centraal te stellen. Daarbij is rekening gehouden met de maatschappelijke relevantie van objecten (natuur is minder vitaal dan een drinkwaterwinning), het aantal faalmechanismen waaraan het object is blootgesteld (risico vanuit meerdere deelsystemen maakt de aanpak interessanter) en of het type object al bij andere pilots onderzocht wordt (om overlap te voorkomen). Sweco heeft hierbij een voorstel gedaan door objecten een prioriteit mee te geven. In afstemming met het waterschap en STOWA zijn drie objecten gekozen, zie Figuur 2:

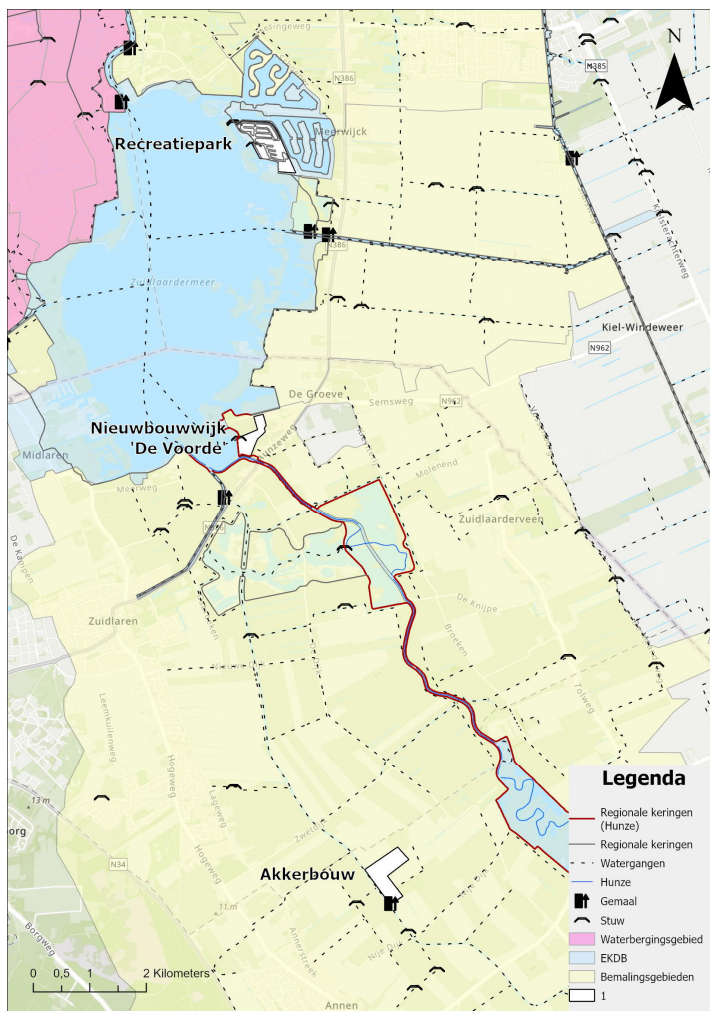
1. Het recreatiepark in het noordoosten van het Zuidlaardermeer vrij afwaterend op boezem;
2. Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer;
3. Nieuwbouwwijk 'De Voorde' ten noorden van waterwinning De Groeve vrij afwaterend op boezem

## 2.2 Schade eenheden

Voor het bepalen van de schade eenheden wordt de Waterschadeschatter (STOWA, 2013) als leidraad gebruikt. In deze schatter zijn verschillende schadefuncties bepaald afhankelijk van verschillende schade eenheden, zoals o.a. inundatie, voor een variatie van objecten. Zodoende worden de volgende eenheden binnen deze pilot beschouwd:

1. Duur (in uren)
2. Diepte (in meters)
3. Seizoen (maand)

In Bijlage 1, Tabel 9, zijn de bovenstaande eenheden gekoppeld aan de te beschouwen objecten onder de kolom “Eenheden t.b.v. beschermingsniveau”. Daarnaast zijn in Bijlage 3 de verschillende schadefuncties voor verschillende objecten opgenomen.



Figuur 2 Overzichtkaart inclusief drie geselecteerde objecten.

## 2.3 Beschermingsniveau

### 2.3.1 Geaccepteerd schaderisico voor één object

Als uitgangspunt wordt per object een geaccepteerd schaderisico aangenomen. Dit schaderisico is initieel gedefinieerd als een bedrag in euro's per jaar. Bij het bepalen van het uitgangspunt wordt er onderscheid gemaakt tussen het gederfde inkomsten en het verlies van eigendommen of schade hieraan. Zo wordt er bijvoorbeeld als uitgangspunt aangenomen dat het geaccepteerd is dat de inboedel van een woning eens in de 100 jaar verloren mag gaan (1:100 p/j) en gederfde inkomsten van commerciële praktijken ook eens in de 100 jaar (1:100 p/j).

De Waterschadeschatter (STOWA, 2013) legt de financiële basis om dit geaccepteerde schaderisico verder te definiëren. In Bijlage 2 is uitgebreid uitgelegd hoe dit leidt tot de onderstaande geaccepteerd schaderisico voor de drie objecten, geselecteerd in paragraaf 2.1.3.

1. *Recreatiepark noordoosten van het Zuidlaardermeer;*  
€201,- per woning p/j
2. *Akkerbouw (granen) in het bemalingsgebied Oostermoer;*  
€210,- p/j/object (het object is een perceel van 3,4 ha)
3. *Nieuwbouwwijk 'De Voorde' ten noorden van waterwinning De Groeve;*  
€162,50 per woning p/j

Voordat dit geaccepteerd schade risico gebruikt wordt om het basisbeschermingsniveau af te leiden, is het zaak om het verkregen geaccepteerd schade-*risico* te beoordelen. De vertaling van de norm en objectwaarde levert mogelijk verrassende inzichten. Omdat dit geaccepteerd schaderisico de basis vormt voor het basisbeschermingsniveau dient er draagvlak te zijn voor dit bedrag. Het wordt daarom aanbevolen om de verkregen schade risico's op politiek-bestuurlijk vlak te beoordelen. Indien nodig kan het bedrag dan naar boven of beneden worden bijgesteld.

### 2.3.2 Van schade-*risico* naar beschermingsniveau (per object)

Het schade-*risico* heeft als eenheid [*euro/object/jaar*]. Deze eenheid is abstract en is lastig uit te leggen als een mate waarin een object tegen wateroverlast wordt beschermd. Het schade-*risico* zegt immers niets over de situatie in de praktijk die leidt tot de schade in euro's. Het beschermingsniveau duidt dit beter: het beschrijft "de mate waarin een object wordt beschermd tegen wateroverlast". Door het geaccepteerde schade-*risico* om te zetten naar een beschermingsniveau wordt een financiële beleidsafweging vertaald naar maatgevende situaties in de praktijk. In welke eenheden het beschermingsniveau wordt uitgedrukt, is per object bepaald in paragraaf 2.1.5. Denk hierbij bijvoorbeeld aan [*x cm gedurende y dagen per z jaar*].

Het afleiden van het basisbeschermingsniveau wordt gedaan aan de hand van schadebedragen en -functies, zoals die zijn opgenomen in de Waterschadeschatter (STOWA, 2013). In deze rapportage heeft STOWA, op basis van eerdere kennistrajecten, een methode beschreven om schade voor verschillende types landgebruik te kwantificeren aan de hand van een gestandaardiseerde methode. De beschreven methodiek wordt in deze pilot toegepast om het beschermingsniveau af te leiden. Op hoofdlijnen wordt eerst de schade aan een object voor verschillende combinaties van schade-eenheden bepaald, waarvoor vervolgens -middels het geaccepteerde schade-*risico*- een geaccepteerde herhalingsijd wordt bepaald.

#### Schade aan objecten

De eerste stap in het afleiden van het beschermingsniveau is het vaststellen van de schade aan een object voor verschillende schade-eenheden (inundatiedieptes, -duur en seizoenen). Welk van deze drie schade-eenheden relevant zijn voor een object, is afhankelijk van het object. Hiervoor kan de Waterschadeschatter (en achtergrondrapportage) gebruikt worden. De Waterschadeschatter bepaalt de schade aan de hand van een maximale potentiële schade vermenigvuldigd met drie schadefactoren (voor de drie schade-eenheden). Daarnaast kent de waterschadeschatter ook indirecte schade. Deze schade is van tijdelijke aard: het zijn kosten die gemaakt worden

gedurende de hersteltijd die nodig is om object te repareren. Een voorbeeld hiervan zijn de gederfde inkomsten wanneer een recreatiewoning niet verhuurd kan worden omdat deze hersteld moet worden. Deze wordt in de berekening echter achterwege gelaten omdat deze een extra dimensie toevoegt. Hoe er moet worden omgegaan met het toevoegen van extra dimensies wordt later toegelicht. In formulevorm is dit op te schrijven als:

$$\text{schade} = \text{max.potentiële schade} * \gamma_{\text{diepte}} * \gamma_{\text{duur}} * \gamma_{\text{periode}} \quad (1)$$

Waarin de letter  $\gamma$  staat voor de schadefactor en het subscript de oorsprong beschrijft.

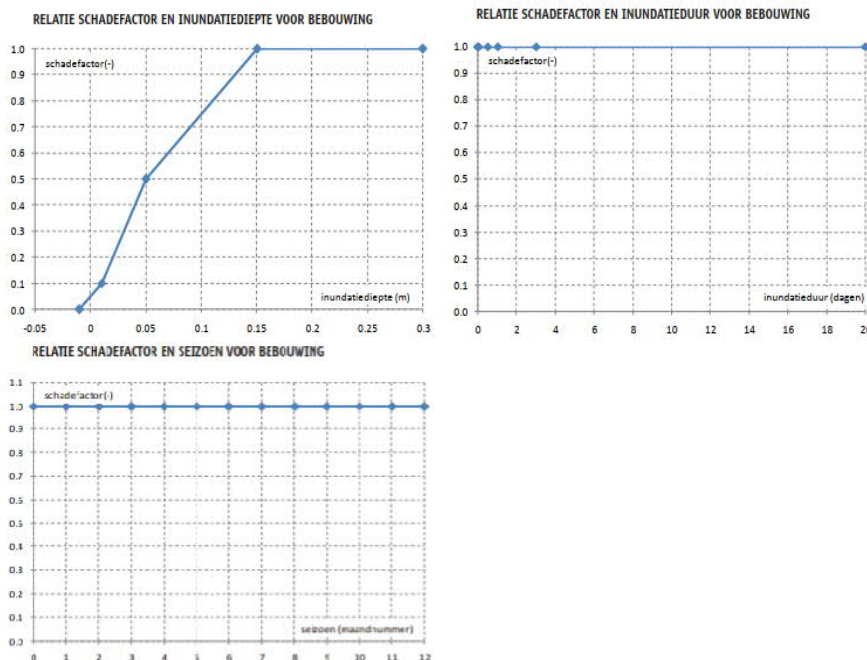
#### *Maximale potentiële schade*

De maximale potentiële schade voor objecten is ook bepaald in de Waterschadeschatter. Dit kan een eenheidsprijs per oppervlak zijn. Voor de bepaling van het beschermingsniveau is het belangrijk dat deze schade wordt bepaald voor het gehele object. Een woning heeft bijvoorbeeld een schade van €250,00 per m<sup>2</sup>. In de berekening moet deze schade vermenigvuldigd worden met de oppervlakte van de woning om tot een schadebedrag voor het object te komen. Een andere benadering kan ook zijn om de vervangingswaarde of maatschappelijke waarde van een object als maximale potentiële schade vast te stellen. Dit kan bijvoorbeeld in het geval van de stikstoffabriek in Groningen ter plaatse van Zuidbroek.

#### *Schadefactoren*

Hoe de schadefactor zich verhoudt tot de schade-eenheid is in de Waterschadeschatter beschreven in zogenoemde schadefuncties. Een voorbeeld van de schadefuncties voor bebouwing is weergegeven in

Figuur 3. Hierin is voor verschillende inundatiedieptes, -duraties en seizoenen een schadefactor bepaald. De inundatieduur en seizoen zijn voor de schade aan dit object niet relevant, dus zijn deze constant 1. Alle schadefuncties zijn te bekijken in Bijlage 3.



Figuur 3. Relatie schadefactoren en inundatiediepte, -duur en seizoen voor bebouwing (STOWA, 2013).

Uit de maximale potentiële schade en de schadefactoren volgt een kwantificering van schade aan het object voor verschillende groottes van de betreffende schade-eenheden. Daarbij wordt aangeraden om de groottes van schade-eenheden zodanig te kiezen dat ze realistisch zijn en betekenis hebben voor de gebruiker van het object.

### Beschermingsniveau

Vanuit deze schades kan het beschermingsniveau worden afgeleid. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het eerder bepaalde geaccepteerde schade-risico. Door de schade aan het object te delen door het geaccepteerde schade-risico verkrijgt men een geaccepteerde herhalingstijd. Dit is gelijk aan het beschermingsniveau. In formulevorm kan dit worden genoteerd als:

$$\text{Beschermingsniveau} = \frac{\text{schade aan object}}{\text{geaccepteerd schade risico}} \quad (2)$$

Met het beschermingsniveau in [1/jaar], de schade aan het object in [€] en het geaccepteerde schade-risico in [€/jaar]. In Kader 2 is een rekenvoorbeeld gegeven voor een woning.

Wanneer het verkregen geaccepteerd schade-risico (paragraaf 2.3.1) zonder aanpassing wordt overgenomen, ontstaat een cirkel bij het bepalen van het basisbeschermingsniveau. Dit omdat de methode voor het bepalen van het geaccepteerd schade-risico en het basisbeschermingsniveau tegengesteld zijn aan elkaar.



## Kader 2. Rekenvoorbeeld voor het bepalen van het basisbeschermingsniveau van een woning

### Rekenvoorbeeld

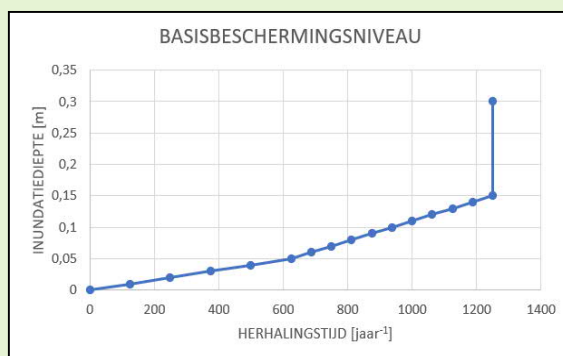
Een woning is te beschouwen als een object van het type ‘bebouwing’. Uit de literatuur blijkt dat de gemiddelde schade bij bebouwing neerkomt op €250,00 per m<sup>2</sup> (STOWA, 2013). Als we uitgaan van een vloeroppervlak van 50 m<sup>2</sup>, is de maximale potentiële schade €12.500,00. In dit rekenvoorbeeld stellen we dat het geaccepteerd schade-risico is vastgesteld op €10 per jaar. Dit is een keuze gebaseerd op beleid.

De schade aan het objecttype ‘bebouwing’ is alleen afhankelijk van de inundatiediepte: de inundatieduur en de periode wanneer de inundatie optreedt heeft geen invloed op de schade op basis van de huidige implementatie van de Waterschadeschatter. In de praktijk zal bij een zeer lange inundatieduur vervangende woonruimte moeten worden gezocht. Dit is in dit rekenvoorbeeld niet meegenomen. Hierdoor blijft er één schadefactor over die de relatie tussen maximale potentiële schade en de werkelijke schade beschrijft.

Nu kan voor verschillende inundatiedieptes bepaald worden wat de schade is, zie Tabel 1 (kolom 1-3). Delen we de schade (€) door het geaccepteerde schaderisico (€/jaar), dan verkrijgen we voor elke inundatiediepte de geaccepteerde herhalingsstijd (*jaar*). De resulterende grafiek waarin inundatiediepte is uitgezet tegen de herhalingsstijd is het basis beschermingsniveau voor een woning, in dit geval uitgaande van een geaccepteerd schade-risico van €10 per jaar.

Tabel 1. Van inundatiediepte naar beschermingsniveau.

Inundatie diepte	Factor	Schade	Kans op voorkomen	
			<i>kans</i>	<i>Herhalings-tijd</i>
<i>m</i>	-	€		
0	0	0		0
0,01	0,1	1250	0,00800	125
0,02	0,2	2500	0,00400	250
0,03	0,3	3750	0,00267	375
0,04	0,4	5000	0,00200	500
0,05	0,5	6250	0,00160	625
0,06	0,55	6875	0,00145	687,5
0,07	0,6	7500	0,00133	750
0,08	0,65	8125	0,00123	812,5
0,09	0,7	8750	0,00114	875
0,1	0,75	9375	0,00107	937,5
0,11	0,8	10000	0,00100	1000
0,12	0,85	10625	0,00094	1062,5
0,13	0,9	11250	0,00089	1125
0,14	0,95	11875	0,00084	1187,5
0,15	1	12500	0,00080	1250
0,3	1	12500	0,00080	1250



Figuur 4. Het basisbeschermingsniveau voor de woning bij een geaccepteerd schade-risico van €10 per jaar.

### 2.3.3 Uitlegbaarheid van het beschermingsniveau

Een van de wensen aan de vertaalslag van geaccepteerd schade-risico naar het beschermingsniveau is dat het uitlegbaar is. De gepresenteerde methode vertaalt een relatief abstract begrip (schade in euro's) naar een situatie die voor de gebruiker van een object begrijpelijk is (situatie in de praktijk). Voor ieder object wordt namelijk inzichtelijk gemaakt wat de herhalingsstijd is van een fysieke situatie.

Voor objecten die van één schade-eenheid afhankelijk zijn, is het beschermingsniveau het eenvoudigst uit te leggen. Op basis van bovenstaande methode kan namelijk een uitkomst zijn: "eens per 375 jaar mag er 3 centimeter water in de woning staan". Of "eens per 500 jaar mag er 4 centimeter water in de woning staan". Dit is overzichtelijk te presenteren in een grafiek zoals in het Kader 2. Deze vorm van de presentatie van data is in lijn met het zogenoemde 'WaterRisicoProfiel' uit de klimaat effect atlas en een eerdere studie door HKV naar een integrale risicoanalyse.

Bij objecten die afhankelijk zijn van twee factoren wordt het beschermingsniveau aangeduid als een combinatie van beide factoren. Dit levert dus een matrix op waarin het beschermingsniveau (= de maximaal geaccepteerde herhalingsstijd voor iedere combinatie van optredende schade) is weergegeven. Dit maakt de uitlegbaarheid complexer: een matrix is minder gemakkelijk te lezen dan een grafiek. Dit kan mogelijk worden afgevangen door te bekijken of het mogelijk is om de schade-functies te vereenvoudigen. Bij infrastructuur kan bijvoorbeeld gesteld worden dat een inundatieduur tussen nul en één dag ook als volledige schade gezien kan worden. Hierdoor valt er een schadefactor weg (wordt constant 1), waardoor het beschermingsniveau wel weer in één grafiek te duiden is.

Voor objecten waarbij de schade van drie factoren afhankelijk is (bijv. gewassen), krijgt het beschermingsniveau een derde dimensie. Ook hier wordt in het kader van uitlegbaarheid geadviseerd om de schadefuncties te vereenvoudigen waar mogelijk. Indien dit niet mogelijk is, kan de uitlegbaarheid worden vergroot door een beschermingsniveau-matrix op te stellen voor een specifieke waarde van één van de schade-eenheden. Bijvoorbeeld: voor gewassen zou het beschermingsniveau kunnen worden weergegeven in de zomer, winter en de lente. Een andere optie kan zijn om eerst de dominante schade-factor vast te stellen: het kan zijn dat sommige schade-factoren vanaf een bepaalde waarde geen rol meer spelen. In dat geval kan de beschermingsniveau-matrix versimpeld worden. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in paragraaf 2.4.2.2.

Het voordeel van het specifiek vereenvoudigen van de schadefuncties is dat het voor de beheerder van een object ook mogelijk is om het beschermingsniveau voor een specifieke situatie te bepalen. Bijvoorbeeld een agrariër is benieuwd wat het beschermingsniveau is voor zijn land waar hij in augustus aardappels teelt. Dan kan hij/zij aan de hand van het geaccepteerde schade-risico, de schade en de schadefuncties van STOWA (2013) zelf berekenen wat de geaccepteerde herhalingsstijd (beschermingsniveau) is voor een bepaalde inundatiediepte en -duur.

## 2.3.4 Opschalen van het basisbeschermingsniveau van object naar gebied

Bovenstaande methode biedt de mogelijkheid om het basisbeschermingsniveau van een individueel object (één gebouw, één perceel akkerbouw) te bepalen. De methode omvat echter nog geen methode om een schaa sprong te maken van een enkel object naar een gebied. De uitdaging die hierbij komt kijken is de uniformering van objecten. Immers; niet alle woningen zijn gelijk. En wat als een gebied meerdere type objecten beslaat? In deze paragraaf wordt een mogelijke aanpak van het opschalen van object naar gebied toegelicht.

Om de schaa sprong van een los object naar een gebied te maken voor het beschermingsniveau zullen de schades en geaccepteerde schaderisico's van verschillende objecten met elkaar verdisconteerd worden. Wanneer de methode in 2.3.3 wordt toegepast, kan dit gedaan worden bij het vaststellen van het geaccepteerde schade-risico en de schade aan objecten voordat het schade-risico en de schade samen worden omgerekend tot een beschermingsniveau. In de volgende secties wordt de methode toegelicht, daarna volgt een rekenvoorbeeld.

### 2.3.4.1 Geaccepteerd schade-risico per gebied

De eerste stap in het opschalen van een object naar een gebied is het bepalen van het geaccepteerd schade-risico per gebied. Net als bij het vaststellen van dit risico per object, is het geaccepteerde schade-risico voor het gebied opnieuw een beleidsmatige afweging. Deze afweging kan op verschillende manieren tot stand komen. Dit is mede afhankelijk van de beweegreden om het beschermingsniveau van een gebied te bepalen en de grootte van het gebied waarvoor dit beschermingsniveau tot stand komt. Er kan bijvoorbeeld gekozen worden om een maatgevend schade-risico per eenheid (bijv. ha of km<sup>2</sup>) te hanteren, waarbij het kleinste geaccepteerd schade-risico wordt toegepast op het hele gebied. Een andere optie zou kunnen zijn om het schade-risico gewogen te middelen op basis van aanwezigheid van verschillende objecten binnen het gebied.

Kader 3. Kanttekening gebiedsgrenzen basisbeschermingsniveau.

#### **Gebiedsgrenzen van het basisbeschermingsniveau**

*Wanneer een geaccepteerd schade-risico voor een gebied opgesteld wordt, ontkomt men niet aan het vaststellen van de gebiedsgrenzen. Er is geen eenduidige methode voor het bepalen van de gebiedsgrens: dit is afhankelijk van het doel van het beschermingsniveau. Wanneer het doel is om te bepalen of een bepaalde investering in het verlagen van wateroverlast verantwoord is, wordt aanbevolen om de gebiedsgrens te leggen op de gebiedsgrenzen van het faalmechanisme dat het grootste gebied beïnvloedt (bijv. een dijkkring). Hierdoor wordt voorkomen dat investeringskosten verdeeld moeten worden over objecten binnen en buiten het gebied waarvoor het beschermingsniveau tot stand komt. Wanneer het doel van het basisbeschermingsniveau niet is om een kosten-baten analyse te maken, is het mogelijk om het gebied te compartimenteren op basis van de aanwezigheid van aanwezige hoogtes in het gebied. Het vraagstuk hoe je investeringskosten binnen en buiten het gebied moet verdelen speelt dan immers niet.*

#### 2.3.4.2 Groeperen van objecten met gelijke schadefuncties

Wanneer het geaccepteerde schade-risico voor een gebied bekend is, kunnen de individuele objecten binnen het gebied bekeken worden. Wanneer het beschermingsniveau voor een gebied bepaald wordt, wordt aangeraden om de objecten binnen een gebied te groeperen op basis van de schadefactoren die op het object van toepassing zijn. Voorbeelden zijn om alle woningen als één object te beschouwen (het vloeroppervlak wordt dan gesommeerd) en alle landbouwgrond waar tarwe wordt verbouwd als één te beschouwen (het aantal ha. wordt gesommeerd). Bij het groeperen van objecten kan het nuttig zijn rekening te houden met ruimtelijke eigenschappen van het gebied die de schade aan objecten kunnen beïnvloeden (zie het kader in 2.3.4.3).

#### 2.3.4.3 Schade per gebied

Vervolgens wordt de schade aan iedere groep objecten bij elkaar opgeteld. In deze stap is het dus essentieel om tot één schade te komen afhankelijk van de verschillende schadefactoren. Waar in de methode in paragraaf 2.3.3 de schade dus geldt voor één object, wordt schade nu op dezelfde manier in kaart gebracht voor het hele gebied. De schade is dus de som van alle schades binnen het gebied voor iedere combinatie van schadefactoren. Deze methode wordt op dit moment ook toegepast in de huidige versie van de Waterschadeschatter. Deze combineert een inundatiekaart met een landgebruikskaart.

Kader 4. Kanttekening uniformiteit binnen een gebied.

##### **Uniformiteit van objecten binnen een gebied**

*In deze stap kan rekening gehouden worden met omgevingsfactoren die invloed hebben op de schade van een object. Een voorbeeld hiervan is hoogteverschil binnen een gebied. Wanneer veel hoogteverschil aanwezig is binnen een gebied is het belangrijk om de schade-functies te definiëren op basis van inundatiediepte bij een object, niet als schade bij een absolute waterstand. Op die manier wordt voor ieder object rekening gehouden met de object-specifieke eigenschappen (zoals maaiveldhoogte) en ontstaan er geen over- en/of onderschattingen in de schade.*

#### 2.3.4.4 Beschermingsniveau

De laatste stap -van schade naar beschermingsniveau- werkt op dezelfde manier als bij één enkel object: de schades voor iedere combinatie van schadefactoren wordt gedeeld door het geaccepteerd schade-risico van het gehele gebied. Het resultaat is nu een beschermingsniveau voor het gehele gebied.

### 2.3.5 Het beschermingsniveau in het kader van Water en Bodem sturend als basis

Niet alles kan meer overal: in het coalitieakkoord 2021-2025 is afgesproken dat Water en Bodem sturend moet worden bij de verdere ruimtelijke ontwikkelingen in Nederland. Samengevat houdt dit in dat bij toekomstige ruimtelijke ontwikkelingen niet alles zomaar meer kan: water en bodem zouden moeten gaan sturen op welke ruimtelijke ontwikkelingen waar nog mogelijk zijn. De kern van de praktische uitwerking van deze doelstelling is dat we niet zonder meer het systeem aanpassen aan de gewenste functies. Het systeem gaat onder de

noemer water en bodem sturend bepalen welke functies nog mogelijk zijn in een bepaald gebied of regio en randvoorwaardes opleggen aan de ruimtelijke ontwikkelingen.

Het basisbeschermingsniveau en de integrale benadering van wateroverlast geeft hier invulling aan. Door een geaccepteerd schade-risico en de waarde van een object op voorhand vast te stellen, is de uitkomst een beschermingsniveau (een geaccepteerde herhalingstijd op schade). In tegenstelling tot de sectorale aanpak waarbij juist de norm (het beschermingsniveau) vast staat en het systeem wordt ingericht op het behalen van de norm. Wanneer het beschermingsniveau dat uit de analyse komt niet acceptabel is, vanwege bijvoorbeeld vereiste investeringskosten om de ontwikkeling of het gebied aan te passen, kan het object niet ontwikkeld worden op de bekeken locatie of dient het geaccepteerde schade-risico verhoogd te worden. Op die manier gaat het systeem sturen op de ontwikkeling van objecten in plaats van andersom.

## 2.4 Bepaling basisbeschermingsniveau voor de drie objecten binnen het pilotgebied

Ten behoeve van de pilot wordt het basisbeschermingsniveau voor de drie vastgestelde objecten binnen het pilotgebied uitgewerkt. Hierbij wordt telkens een vaste opbouw gevolgd: eerst wordt het geaccepteerde schade-risico vastgesteld, daarna wordt de schade bepaald en ten slotte het beschermingsniveau bepaald.

### 2.4.1 Recreatiewoning

Dit object betreft de recreatiewoningen op een kleinschalig recreatiepark aan de noordoost zijde van het Zuidlaardermeer. De woningen liggen direct aan het water. Onder normale omstandigheden is er hier sprake van vrije afwatering naar de Eemskanaalboezem. Bij hoogwater op de boezem kan de boezemkering gesloten worden en neemt een gemaal de waterafvoer voor zijn rekening.

#### 2.4.1.1 *Geaccepteerd schade-risico*

Bij een herhalingstijd van het optreden van maximale schade van 1/100 jaar, is het geaccepteerde schade-risico voor het recreatiepark €84,- per woning p/j.

#### 2.4.1.2 *Schade*

Het recreatiepark wordt gezien als een object van het type 'woning'. STOWA heeft voor dit type maximale potentiële schades bepaald in een lage, gemiddelde en hoge klasse bepaald (STOWA, 2013). Gezien het hier vakantiewoningen betreft en geen primaire woningen van de eigenaren, wordt in de pilot aangenomen dat deze vakantiewoningen in de categorie laag vallen. Hieruit volgt een schade van €150,00 per m<sup>2</sup> die wordt gehanteerd (STOWA, 2013). Er wordt verder aangenomen dat het gemiddelde vloeroppervlak van een woning 30 m<sup>2</sup> is (luchtfoto), wat daarmee neerkomt op een maximale potentiële schade van €8.400,00 per object.

Uit de Waterschadeschatter volgt daarnaast dat schade aan woningen alleen afhankelijk is van de inundatiediepte. Daarom worden de schadefactoren alleen bepaald voor inundatiedieptes tussen 0 en 15 cm per 1 cm. Aanvullend is de schadefactor ook bepaald bij een inundatie van 30 cm. Een overzicht is weergegeven in Tabel 2.

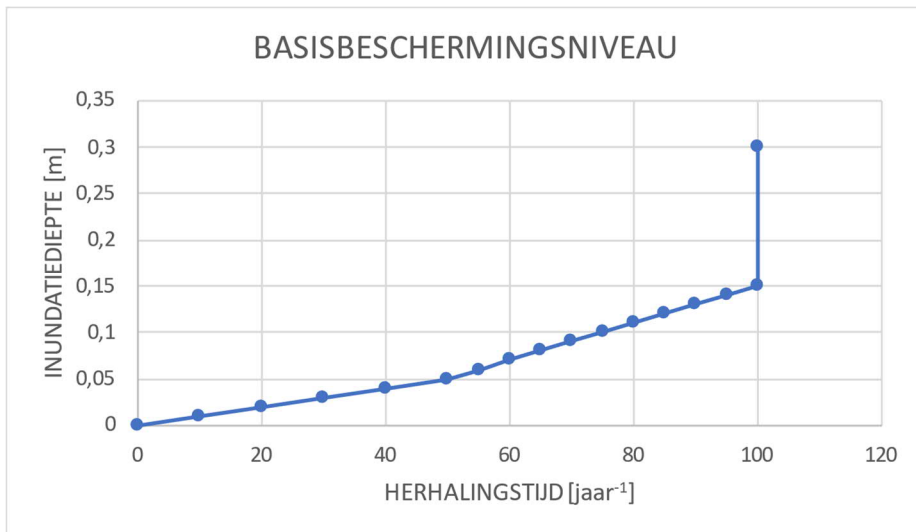
Tabel 2. Schade bij verschillende inundatiedieptes voor het object 'recreatiewoning'.

Inundatie- diepte	Factor	Schade
<i>m</i>	-	€
0	0	0
0.01	0.1	840
0.02	0.2	1680
0.03	0.3	2520
0.04	0.4	3360
0.05	0.5	4200
0.06	0.55	4620
0.07	0.6	5040
0.08	0.65	5460
0.09	0.7	5880
0.1	0.75	6300
0.11	0.8	6720
0.12	0.85	7140
0.13	0.9	7560
0.14	0.95	7980
0.15	1	8400
0.3	1	8400

### 2.4.1.3 Beschermingsniveau

Ten slotte wordt het beschermingsniveau vastgesteld. Hiervoor worden de schades bij verschillende inundatiedieptes gedeeld door het vastgestelde schade-risico voor de recreatiewoning. Dit levert het beschermingsniveau dat is weergegeven in Figuur 5.

Zoals te zien is in Figuur 5, is de resulterende herhalingstijd voor de recreatiewoning eens per 100 jaar. Dit is gelijk aan het vertrekpunt: maximale schade eens per 100 jaar. Hier komt de cirkelredenering in de methodiek naar voren, zoals beschreven aan het einde van paragraaf 2.3.2. Omdat er de bepaling van een geaccepteerd schade-risico vanuit de huidige norm niet besloten is dit bedrag aan te passen, levert de methodiek dezelfde herhalingstijd. Het verschil is echter dat het vertrekpunt stelt dat er schade op mag treden bij een herhalingstijd van 1/100 jaar, terwijl het bovenstaande basisbeschermingsniveau schade accepteert vaker dan 1/100 jaar, mits de schade niet maximaal is (zie blauwe kader op de vorige pagina).



Figuur 5. Het basisbeschermingsniveau voor een recreatiewoning in het recreatiepark.

Kader 5. Kanttekening basisbeschermingsniveau.

**Basisbeschermingsniveau: een ondergrens?**

In

*Figuur 3 is het beschermingsniveau voor een recreatiewoning in het recreatiepark weergegeven. Als gevolg van de gehanteerde methode is het verkregen basisbeschermingsniveau continu: het start in het punt 0,0 en heeft een maximale herhalingstijd van 100 jaar. Dit betekent dat - theoretisch - een zeer kleine inundatie met een vrij hoge frequentie geaccepteerd wordt. Dit is tegenstrijdig aan de huidige normen: daar wordt bij een T=100 bui géén inundatie in de woning geaccepteerd. Er valt dus voor te pleiten om ook een minimaal basisbeschermingsniveau vast te stellen: een minimale frequentie waarbij nog steeds geen schade geaccepteerd wordt. Waaron deze ondergrens gebaseerd wordt is een*

**2.4.2 Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer**

De akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer betreft een perceel van 3,4 ha waar granen worden geteeld. In het perceel zijn een aantal kleine sloten aanwezig, die het water onder vrij verval naar een gemaal afvoeren (onderbemaling). Vanuit dit kleine gemaal wordt het water opgepompt naar het grotere bemalingsgebied Oostermoer. Het gemaal staat in het noorden van het gebied en pompt onder normale omstandigheden het water naar de Eemskanaalboezem. Bij hoogwater op de boezem kan het gemaal worden afgetoerd en indien dit ontoereikend is, kan er een maalstop optreden.

**2.4.2.1 Geaccepteerde schade-risico**

Bij een herhalingstijd van het optreden van maximale schade bij een herhalingstijd van 1/25 jaar is het geaccepteerde schade-risico voor het perceel met tarwe (akkerbouw) €210,- per jaar (= €61,76 €/ha/jaar).

### 2.4.2.2 Schade

Het bekeken stuk akkerbouw in deze pilot betreft een perceel van 3,4 ha waar tarwe op verbouwd wordt. Op basis van eerdere STOWA onderzoeken blijkt dit type gewas gemiddeld €1.557,- per hectare waard te zijn. De maximale potentiële schade van dit bekeken gebied is daarmee dus €5.293,80, afgerond €5.300,00.

Voor de schadefuncties worden de functies uit de Waterschadeschatter van STOWA toegepast. Hieruit volgt dat Tarwe gevoelig is voor zowel een inundatiediepte, -duur en het seizoen waarin de inundatie optreedt (zie Bijlage 3 voor de schadefuncties). Dit maakt de uitlegbaarheid van het berekende beschermingsniveau complex. In lijn met de aanbeveling in paragraaf 0 wordt bekeken of het mogelijk is om de schadefuncties te vereenvoudigen. Dit is redelijkerwijs mogelijk voor de relatie tussen schade en inundatiediepte: bij 1 cm inundatie treedt al volledige schade op. Daarom wordt besloten de schade, en daarmee het beschermingsniveau, alleen afhankelijk te maken van de inundatieduur en de maand waarin de inundatie optreedt. Dit levert de schade-matrix op die is opgenomen in Tabel 3.

Tabel 3. Schade in euro's bij verschillende combinaties van inundatieduur (in dagen) en seizoen.

Seizoen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Duur	Factor	0,7	0,7	0,7	0,9	1	1	1	1	1	1	0,7	0,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,2	741	741	741	953	1059	1059	1059	1059	1059	1059	741	741
3	0,4	1482	1482	1482	1906	2118	2118	2118	2118	2118	2118	1482	1482
20	1	3706	3706	3706	4764	5294	5294	5294	5294	5294	5294	3706	3706
30	1	3706	3706	3706	4764	5294	5294	5294	5294	5294	5294	3706	3706



Kader 6. Kanttekening uniformiteit van het gebied.

### **Reliëf in het maaiveld**

*Bij het vaststellen van de schade aan het landbouwperceel is het perceel als één uniform geheel beschouwd. In de praktijk kunnen zaken als reliëf in het maaiveld een rol spelen in de optredende schade. In de berekening van de schade voor dit object is hier geen rekening mee gehouden, omdat de schadefactor m.b.t. inundatie vereenvoudigd is tot wel of geen inundatie. Wanneer hiervan wordt afgeweken zou het reliëf wel meegenomen kunnen worden in de schade. In dat geval wordt aanbevolen om de schadefactor voor de inundatiediepte aan te passen aan het object en bijvoorbeeld te baseren op een zogenoemde 'S-curve'. Deze curve beschrijft de relatie tussen de bodemhoogte en het perceeloppervlak onder deze bodemhoogte. Andersom kan deze ook gebruikt worden om te bepalen hoeveel oppervlak geïnundeerd is bij een bepaalde waterstand. Hiermee wordt de schadefactor afhankelijk van de bodemhoogte (en indirect de inundatiediepte). Dezelfde methode wordt op dit moment toegepast in de Waterschadeschatter, waarbij de inundatiediepte wordt bepaald aan de hand van een hoogtekaart (AHN) en waterstanden (invoer).*

*In de huidige provinciale normering wateroverlast wordt gebruik gemaakt van het zogenoemde maaiveldcriterium, waarbij een bepaald percentage van het laagste deel van het maaiveld, afhankelijk van het landgebruik, niet aan de norm hoeft te voldoen. Deze lijn kan in de gepresenteerde methode gehanteerd blijven worden. Dit criterium geldt echter voor peilgebieden of afwaterende eenheden. De methode maakt het lastig om dit mee te nemen, vanwege de verschillende schaalgroottes van peilgebieden en objecten. Het maaiveldcriterium kan daarom beter verdisconteerd worden in het geaccepteerde schade-risico: er wordt een bepaalde schade geaccepteerd die in lijn is met het maaiveldcriterium.*

*Dit dilemma kun je voorkomen door als object niet te kiezen voor een perceel, maar vast te stellen per hoogtepixel (kan zijn 5x5 m of 25x25 m). Dit kan vervolgens worden opgeschaald naar gebied, volgens methode die eerder toegelicht is.*

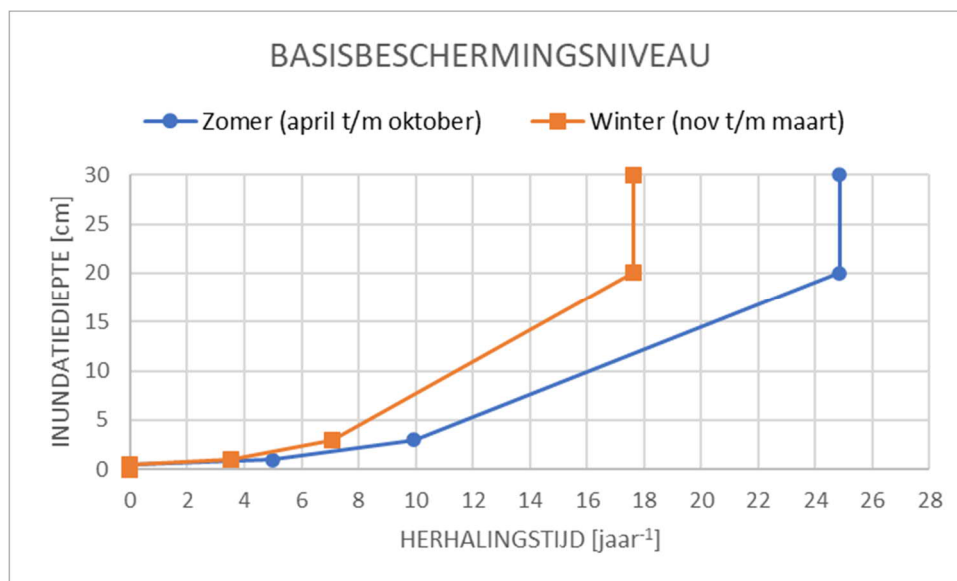
### 2.4.2.3 Beschermingsniveau

Om tot een beschermingsniveau te komen wordt de schade in bovenstaande tabel gedeeld door het geaccepteerde schade-risico. Dit levert het beschermingsniveau dat is opgenomen in Tabel 4. De tabel geeft weer wat de maximaal geaccepteerde herhalingstijd is voor dit akkerbouw perceel waar tarwe wordt verbouwd.

Tabel 4. Geaccepteerde herhalingstijd voor verschillende combinaties van inundatieduur (in dagen) en seizoen (per maand).

Seizoen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Duur	Factor	0,7	0,7	0,7	0,9	1	1	1	1	1	1	0,7	0,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,2	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4
3	0,4	7	7	7	9	10	10	10	10	10	10	7	7
20	1,00	18	18	18	23	25	25	25	25	25	25	18	18
30	1,00	18	18	18	23	25	25	25	25	25	25	18	18

Zoals eerder beschreven, is een tabel lastig te lezen en zou er naar gestreefd moeten worden om het basisbeschermingsniveau zo vereenvoudigd mogelijk te presenteren. Kijken we naar de schadefactor voor de verschillende seizoenen, kunnen we aannemen dat deze nagenoeg gelijk is in de periode november – maart en de periode april – oktober. Wanneer we het verkregen basisbeschermingsniveau middelen over deze twee periodes en uitzetten tegen de inundatiediepte verkrijgen we onderstaande grafiek.



Figuur 6. Het basisbeschermingsniveau voor het perceel akkerbouw in de zomer en winter periode. De geaccepteerde herhalingstijd voor de winterperiode ligt beduidend lager dan in de zomer.

Zoals te zien is in Figuur 6, is het basisbeschermingsniveau voor de zomer- en winterperiode verschillend. Dit kan worden verklaard door het groeiseizoen van granen in de zomer, waardoor de gewassen op het perceel meer waard zijn. Omdat het geaccepteerde schade-risico gelijk is voor beide periodes, varieert daarmee het basisbeschermingsniveau. Het verkregen basisbeschermingsniveau in de zomer is  $T=25$  voor maximale schade, wat in lijn is met de huidige norm. Omdat in de winter geen maximale schade kan worden behaald (gelet op de schadefuncties), komt naar voren dat het

basisbeschermingsniveau iets minder strikt is dan de huidige norm, uitgaande van maximale schade.

### 2.4.3 Nieuwbouwwijk 'De Voorde'

De nieuwbouwwijk 'De Voorde' ligt aan de zuidzijde van het Zuidlaardermeer. De wijk is gescheiden van het meer middels een regionale kering. Het oppervlaktewater uit dit gebied stroomt in normale situaties onder vrij verval weg naar het meer. In hoogwatersituaties slaat een gemaal aan om het lokale water naar het meer te pompen. Daarnaast ligt er in dit gebied een stedelijk watersysteem wat bestaat uit een rioleringsstelsel.

#### 2.4.3.1 Geaccepteerde schade-risico

Het geaccepteerde schade-risico voor een woning is: €162,50 per woning p/j.

#### 2.4.3.2 Schade

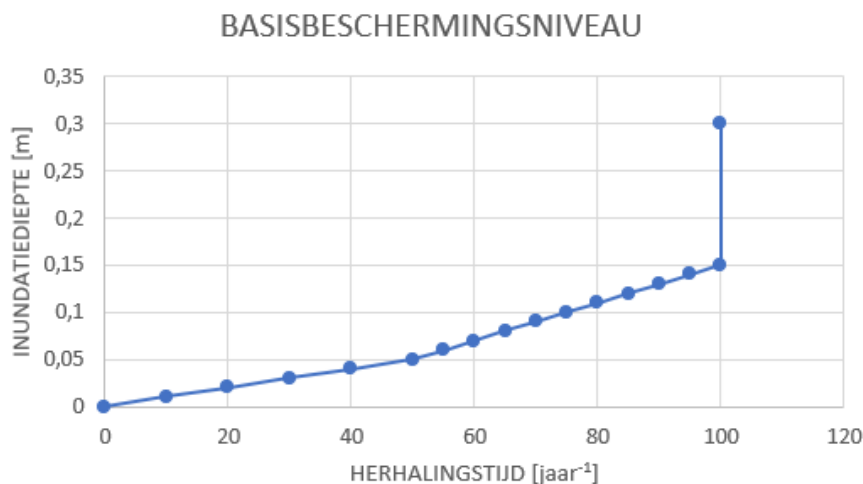
Net als de woningen in het recreatiepark, worden de woningen in de nieuwbouwwijk geclassificeerd als de categorie bebouwing van het type woning. De schadefunctie is daarmee gelijk aan de recreatiewoningen (bijlage 2). Omdat het hier volwaardige nieuwbouwwoningen betreft, wordt de schade aan de woningen in dit gebied op basis van de klasse 'gemiddeld' ingeschaald. Hierbij hoort een schade van €250,00 per m<sup>2</sup>. De woningen in de wijk hebben een gemiddeld oppervlak van 65 m<sup>2</sup>, wat samen neerkomt op een maximale potentiële schade van €16.250,00. De schade bij verschillende inundatiedieptes is weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5. Schade bij verschillende inundatiedieptes voor het object 'woning in nieuwbouwwijk 'De Voorde'.'

Inundatie- diepte	Factor	Schade
m	-	€
0	0	0
0.01	0.1	1625
0.02	0.2	3250
0.03	0.3	4875
0.04	0.4	6500
0.05	0.5	8125
0.06	0.55	8937.5
0.07	0.6	9750
0.08	0.65	10562.5
0.09	0.7	11375
0.1	0.75	12187.5
0.11	0.8	13000
0.12	0.85	13812.5
0.13	0.9	14625
0.14	0.95	15437.5
0.15	1	16250
0.3	1	16250

### 2.4.3.3 Beschermingsniveau

Ten slotte wordt het beschermingsniveau vastgesteld. Hiervoor worden de schades bij verschillende inundatiedieptes gedeeld door het vastgestelde schade-risico voor de recreatiewoning. Dit levert het beschermingsniveau dat is weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7. Het basisbeschermingsniveau voor een nieuwbouwwoning met 65 m<sup>2</sup> vloeroppervlak in nieuwbouwwijk De Voorde.

Uit Figuur 7 blijkt dat het basisbeschermingsniveau voor de nieuwbouwwoning uitkomt op een maximale herhalingsstijd van 1/100 jaar. Dit komt overeen met de huidige norm. Echter is er een fundamenteel verschil met de huidige norm: de huidige norm schrijft voor dat er *vanaf* een herhalingsstijd van 1/100 wateroverlast op mag treden, terwijl het hier gepresenteerde beschermingsniveau uitgaat van maximale schade bij een herhalingsstijd van 1/100 jaar. Bij herhalingsstijden 1/100 mag er in deze methodiek *wel* wateroverlast optreden. Zie het blauwe kader in alinea 2.1.4.3 voor verdere toelichting. Beide herhalingsstijden (1/100) in de methode en de huidige normen komen overeen met elkaar omdat gebruik is gemaakt van dezelfde maximale schade bedragen bij het bepalen van het schaderisico en het beschermingsniveau. Daarnaast is het geaccepteerd schaderisico niet tussentijds naar boven of beneden bijgesteld. Indien dat wel zou zijn gebeurd dan zou de herhalingsstijd:

- Groter zijn geworden bij een omlaag bijgesteld schaderisico;
- Kleiner zijn geworden bij een omhoog bijgesteld schaderisico;

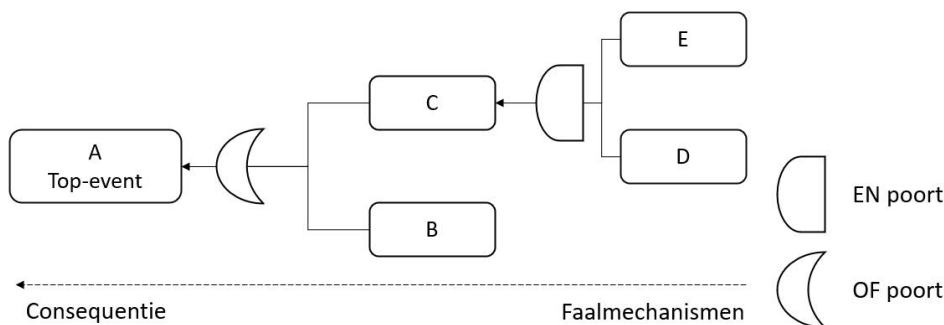
### 3. Vertaling van basisbeschermingsniveau naar het watersysteem

Het basisbeschermingsniveau uit het voorgaande hoofdstuk geeft inzicht in de kans op schade aan een object waarvoor dat beschermingsniveau is uitgewerkt. De volgende stap in een integrale risicoanalyse is een vertaling van de kans op schade aan een object naar de deelsystemen binnen het watersysteem. In deze vertaalslag wordt duidelijk welke eisen (het basisbeschermingsniveau van) het object aan de deelsystemen stelt. Hierin spelen uiteindelijk ook relevante weersomstandigheden een rol.

De vertaalslag maken we in deze pilot aan de hand van een foutenboom. Via de foutenboom worden faalpaden inzichtelijk. Conform de methodiek van de foutenboom spreken we van het falen van het object wanneer er schade door wateroverlast optreedt. Vervolgens is het mogelijk om middels een stochastische benadering herhalingstijden en faalkansen te berekenen. Dit hoofdstuk gaat eerst in op het opstellen van een foutenboom, die voor alle objecten is uitgewerkt. Vervolgens wordt de stochastische analyse beschreven en uitgewerkt voor één object.

#### 3.1 De foutenboommethode

De foutenboommethode is een statistische benadering om de faalkans (i.e. kans op schade door wateroverlast aan een object), het overschrijden van het basisbeschermingsniveau, te definiëren (het zogenoemde '*top-event*'). Via vertakkingen naar onderliggende niveaus leveren verschillende (soorten) faalmechanismen een bijdrage aan de totale faalkans: ieder 'pad' in de faalboom beschrijft een combinatie van events, die leiden tot het falen van een object. Zie Figuur 8 (volgende pagina) voor een conceptuele foutenboom. Events kunnen hierbij (1) op zichzelf tot falen leiden of (2) alleen wanneer twee of meer events gelijktijdig optreden. In een foutenboom wordt dit met een 'OF-poort' (alleen) en 'EN-poort' (gelijktijdig) weergegeven. In het figuur is bijvoorbeeld weergegeven dat event 'D' en 'E' gelijktijdig op moeten treden om te leiden tot (het falen van) 'C'.



Figuur 8. Een conceptuele foutenboom met drie niveaus.

### 3.1.1 Niveaus in de foutenboom

In de pilot is de wens om het basisbeschermingsniveau van het object te vertalen naar de eisen t.a.v. de verschillende deelsystemen in het watersysteem. De eerste vertakking ('niveau 2') in de foutenboom is daarom uitgesplitst naar de vier deelsystemen die in de pilot zijn geïdentificeerd:

- Stedelijk water; heeft betrekking tot de riolering
- Lokaal water; heeft betrekking tot het watersysteem binnen het object
- Het beekstelsel van de Hunze; heeft betrekking tot de kering
- Het boezemstelsel van de Eemskanaalboezem; heeft betrekking tot de waterstand op de boezem en de keringen

Dit geeft inzicht in het aandeel van het respectievelijk deelsysteem aan de totale faalkans van het top-event. Vervolgens wordt per deelsysteem in kaart gebracht welke events kunnen leiden tot het falen van dat deelsysteem ('niveau 3'). Voor die events is vervolgens weer bepaald welke events hier oorzaak van zijn ('niveau 4'). In de pilot is besloten om menselijk falen en calamiteiten niet mee te nemen in de foutenboom. Zie het kader voor een toelichting op het uitbreiden van de foutenboom.

Hoewel de methode zich ervoor leent om de foutenboom naar wens uit te breiden, wordt, afhankelijk van het doel, aanbevolen om rekening te houden met de ordegraad van faalkansen. Wanneer het doel is om een kwalitatief overzicht te krijgen van alle events die leiden tot wateroverlast bij een object kunnen alle faalmethoden in de foutenboom worden opgenomen. Dit leidt dan tot het meest complete overzicht en geeft maximaal inzicht. Wanneer de foutenboom ook kwantitatief toegepast wordt, dient een inschatting gemaakt te worden van de verhoudingen tussen faalkansen. Faalmechanismen die ordegraad kleiner zijn dan andere faalmechanismen zullen zeer beperkt effect hebben op het totale risico op wateroverlast. Uitzonderingen hierop zijn faalmechanismen die enorme schade tot gevolg hebben, zoals het breken van een primaire kering. Deze worden echter buiten beschouwing gelaten in deze pilot.

### 3.1.2 Invloed van weersomstandigheden (sturende mechanismen)

Hoewel wateroverlast vanuit verschillende deelsystemen en oorzaken kan ontstaan, zijn er altijd externe factoren (buiten het systeem) nodig om het systeem te laten falen. We noemen dit sturende mechanismen. Voorbeelden hiervan zijn neerslag, een hoge zeespiegel en sterke wind.

### 3.1.3 Correlatie tussen omstandigheden en deelsystemen

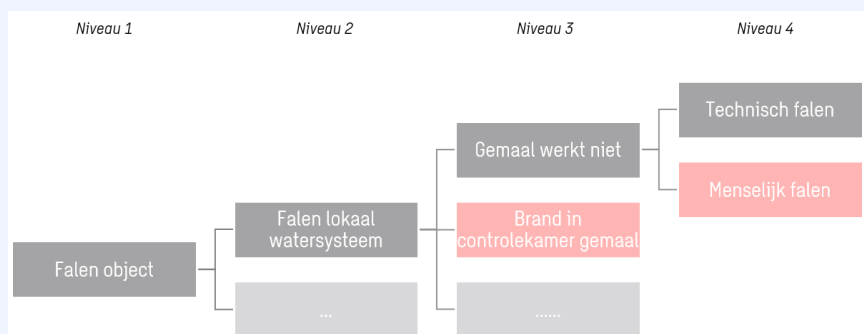
Correlaties tussen omstandigheden en deelsystemen zijn met een volledige foutenboom goed in beeld te brengen. Het kan namelijk zijn dat hetzelfde event (via een ander pad) leidt tot het optreden van een event elders in de boom. Wanneer er vanuit een event lijnen naar events in een hoger niveau of een ander deelsysteem getrokken kunnen worden, is er sprake van correlatie tussen de deelsystemen. Tegelijkertijd is dan inzichtelijk welke events gecorreleerd zijn. Om deze correlaties goed in beeld te brengen is het van belang om geen dubbeling in de foutenboom op te nemen.

Kader 7. Kanttekening niveaus en events in de foutenboom.

#### **Niveaus en events in de foutenboom**

*Bij het opstellen van een foutenboom moeten keuzes gemaakt worden in het detailniveau waarop de boom wordt uitgewerkt: in principe is de foutenboom oneindig ver uit te breiden met verdere niveaus. Tegelijkertijd is het doel van een foutenboom om overzichtelijk, behapbaar en uitlegbaar te zijn. In deze pilot is er daarom voor gekozen om menselijk falen en calamiteiten niet mee te nemen in de pilot. Indien gewenst kunnen deze wel in de foutenboom worden opgenomen door (zie bijgeleverd figuur in dit blok):*

- Een event aan een niveau toe te voegen (bijv. brand in een gemaal), of;
- Door een niveau aan een event toe te voegen (bijv. een gemaal faalt door technisch of menselijk falen. Niveau 4 wordt toegevoegd om technisch en menselijk falen te kunnen onderscheiden).



### 3.1.4 Rekenen met de foutenboom

De keuze om te werken met een foutenboom, is mede gemaakt omdat de foutenboom de mogelijkheid biedt om te rekenen met faalkansen en een integrale aanpak te waarborgen. Uiteindelijk kan voor alle events bepaald worden wat de kans op voorkomen van dat event is. In deze alinea wordt nader ingegaan op de methode achter het rekenen van de foutenboom.

#### 3.1.4.1 Methode

Zoals beschreven, worden de faalkansen in de foutenboom van rechts naar links uitgerekend. Het idee achter de rekenmethode is dat je kansen vanuit allerlei verschillende faalmechanismen op een logische en navolgbare manier met elkaar combineert om tot één totale faalkans te komen. Hiervoor moeten van alle events op het laagste niveau van een pad (het 'uiteinde') in de foutenboom de kans van voorkomen/optreden bekend zijn. Hoe deze kansen verkregen worden verschilt en is onder andere afhankelijk van het deelsysteem,

object en type faalmechanisme. Twee mogelijke manieren om deze faalkansen te verkrijgen zijn:

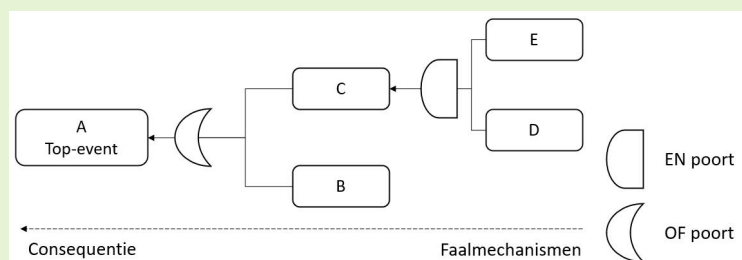
- Vanuit een technische eigenschap (bijv. de kans op het niet functioneren van een pomp in een gemaal), of;
- vanuit een modelberekening (bijv. de waterstand die optreedt als gevolg van een neerslag-event);

In de praktijk zullen de kansen voor het optreden van faalmechanismen veelal af te leiden zijn uit modelberekeningen en systeemanalyses. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de kans van optreden van waterstanden boven een bepaalde drempelwaarde of de frequentie waarmee maalstops in een polder-boezem-systeem optreden. Modelberekeningen kunnen daarbij toegepast worden op de huidige situatie van het systeem, alsook om een toekomstige situatie van het systeem, inclusief systeemontwikkelingen (ruimtelijke aanpassingen, klimaatverandering, etc.), door te rekenen.

Wanneer de kans van optreden van alle laagste events in de foutenboom bekend zijn, kunnen de kansen met elkaar gecombineerd worden. Hoe deze statistisch gecombineerd moeten worden is afhankelijk van de koppeling tussen de events: 'EN' vs. 'OF' koppeling. In het onderstaande kader wordt dit aan de hand van een voorbeeld uitgelegd.

Kader 8. Rekenvoorbeeld relaties 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. In de pilot wordt uitgegaan van onafhankelijke faalmechanismen. Stel dat de faalmechanismen van B, D en E gelijk zijn aan:

- $Pf_B$  is gelijk aan 1:3 per jaar
- $Pf_D$  is gelijk aan 1:10 per jaar
- $Pf_E$  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:

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



### 3.1.4.2 *Bepaling faalkansen a.d.h.v. werking watersysteem*

Om vanuit modelresultaten naar het falen van een mechanisme te komen, moet bepaald worden of een bepaalde fysieke situatie in het watersysteem (bijv. een boezemwaterstand van NAP +1,10 m) tot wateroverlast leidt. Hiervoor kan een zogenoemde 'limit state functie' worden toegepast. Een Limit State Functie (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 R de resistentie van het object en S de optredende 'kracht'. De resistentie (R) van het object is in de praktijk vaak een vooraf bepaalde grenswaarde. Vaak is deze gebaseerd op fysieke eigenschappen van een object, bijvoorbeeld een maaiveldhoogte of de hoogte van een kering.

De optredende kracht (S) is in de praktijk juist variabel, die soms groter en soms kleiner is, zoals bijvoorbeeld een waterstand. Deze parameter is af te leiden middels modelresultaten. De waterstand op de Eemskanaalboezem kan bijvoorbeeld afgeleid worden middels het doorrekenen van verschillende stochastensommen. Het resultaat is een bereik aan waterstanden met representatieve herhalings tijden.

Wanneer de optredende kracht (S) groter is dan de resistentie (R), dan faalt het mechanisme (Z is dan kleiner dan 0). De parameters R en S, en dus de gehele Limit State functie, dienen daarom zo gekozen te worden dat zij het faalmechanisme goed beschrijven. Om vervolgens aan de hand van de LMS tot een kans van falen te komen (hoe vaak is  $Z < 0$ ?), wordt deze geëvalueerd voor een groot aantal variaties van de optredende kracht. Met andere woorden: er wordt voor een groot aantal situaties (N orde grootte 10.000) gekeken of de LMS 'faalt'. Daarbij wordt de optredende kracht statistisch bepaald aan de hand van de modelresultaten. Door nu de verhouding tussen het optreden van  $Z < 0$  (het mechanisme faalt) en N (aantal trekkingen) te bepalen, kan de kans op falen worden uitgerekend. In formulevorm:

$$Pf = \frac{\text{Aantal } Z < 0}{N}$$

In het rekenvoorbeeld op de volgende pagina wordt de faalkans berekend voor het falen van een kering door overtopping.

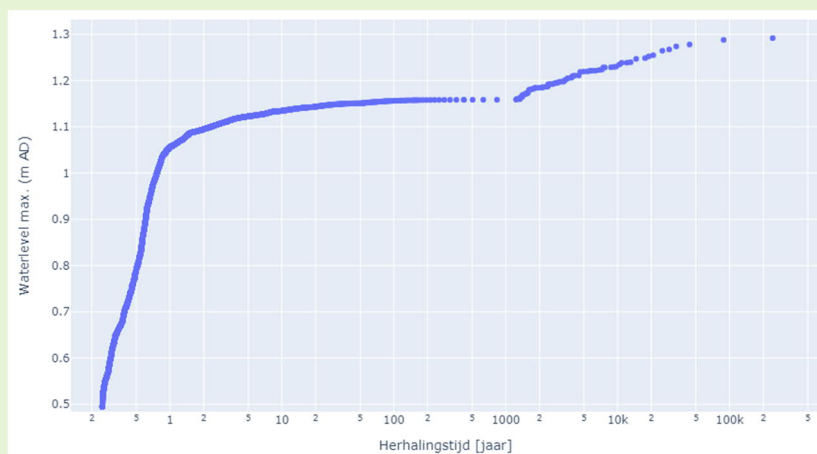
Kader 9. Rekenvoorbeeld limit state functies.

**Rekenvoorbeeld 1**

In dit rekenvoorbeeld bekijken we wat de kans op falen is voor het overtoppen van een kering langs de boezem met een kruinhoogte van NAP +1,15 m. Daarbij maken we gebruik van de LMS:

$$Z = R - S$$

Overtopping vindt plaats wanneer de waterstand op de boezem de kruinhoogte van de kering overschrijdt. In dit geval kunnen dus stellen dat de resistentie van de dijk (R) gelijk is aan zijn kruinhoogte: NAP +1,15 m. De optredende kracht (S) is in dit geval dan de waterstand op de boezem. De waterstand op de boezem voor verschillende herhalings tijden leiden we af uit een modelberekening (in dit geval een Sobek-berekening van de Eemskanaalboezem). De resultaten van een dergelijke modelberekening zijn hieronder weergegeven.

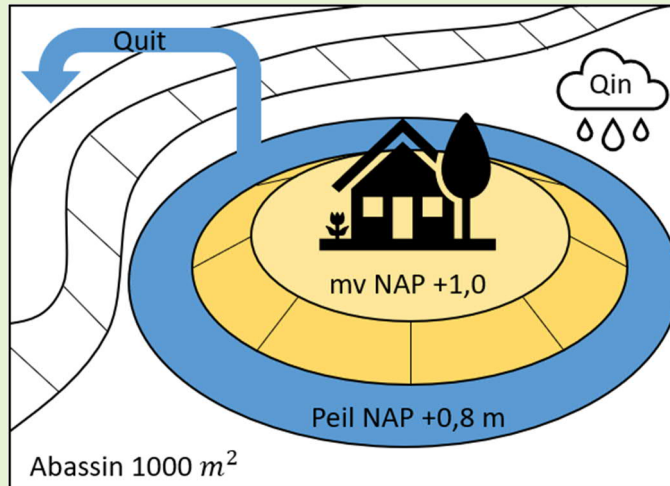


Om nu de kans op falen van de kering via overtopping te bepalen, evalueren we de LMS bijvoorbeeld 10.000 keer. Daarbij bepalen we 10.000 keer een willekeurige waterstand, aan de hand van de statistische verdeling die uit modelberekeningen volgt. Vervolgens bepalen we de verhouding tussen het aantal maal dat  $Z < 0$  (waterstand boezem > kruinhoogte kering) ten opzichte van het totaal aantal evaluaties van de LMS. Dit resulteert in de faalkans voor dit faalmechanisme.

In deze pilot zijn echter niet alle benodigde modelberekeningen voorhanden. De methode met de LMS blijft echter nog steeds toepasbaar. In het rekenvoorbeeld op de volgende pagina wordt de toepassing van de LMS in deze pilot nader uitgewerkt. In de praktijk zullen deze LMS nadrukkelijk worden vervangen door modelberekeningen. Het rekenvoorbeeld dient puur te illustratie van de in deze pilot gehanteerde methode om tot bruikbare resultaten te komen.

Kader 10. Rekenvoorbeeld simplificatie limit state functie in deze pilot.

**Rekenvoorbeeld 2**



Voor een object wordt het faalmechanisme 'inundatie 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 'inundatie 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:

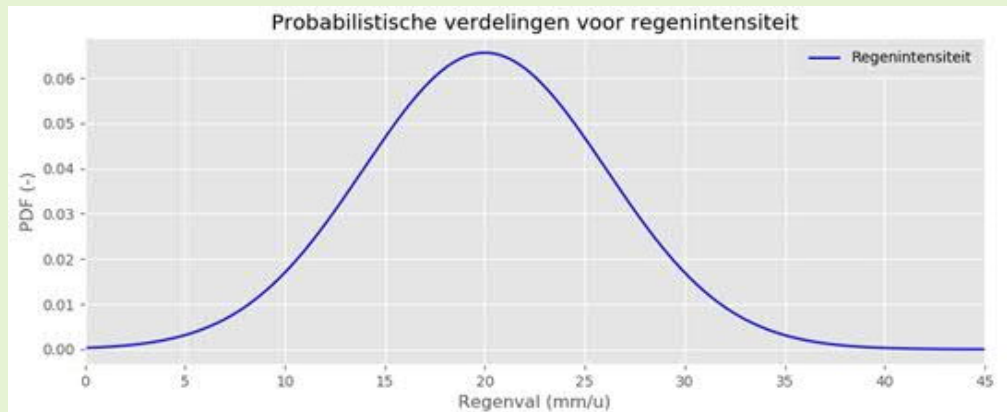
$$R = NAP + 1,0 \text{ m}$$

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

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

*Rekenvoorbeeld loopt door op de volgende pagina*

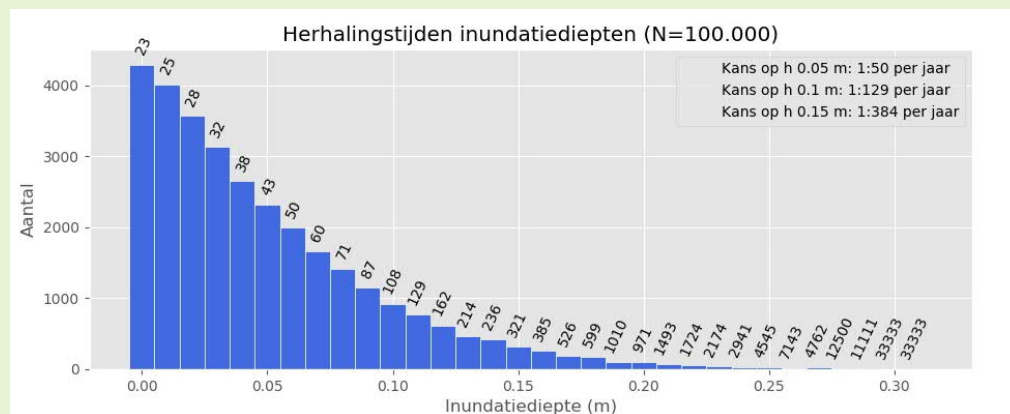
De parameter  $Q_{in}$  wordt bepaald door de stochast regenintensiteit (in mm/u) en  $\Delta T$  door de tijdsduur van een bui. Voor deze twee parameters zijn twee normaal verdelingen aangenomen. De verdeling, welke een hypothetisch voorbeeld is, van regenintensiteit is in het figuur hieronder weergegeven. In totaal worden 100.000 trekkingen ( $N$ ) uit beide van deze verdelingen genomen, waarmee  $Q_{in}$  100.000 keer wordt bepaald. Vervolgens kan het aantal gevallen waarin het faalmechanisme ( $Z < 0$ ) optreedt bepaald worden en zodoende kan de faalkans van dit mechanisme bepaald worden.



Deze faalkans wordt berekent met een eenvoudige formule:

$$Pf = \frac{\text{Aantal } Z < 0}{N}$$

Welke op zijn beurt vertaald kan worden naar een herhalingstijd. In onderstaande figuur zijn de inundatiediepten en bijbehorende herhalingstijden weergegeven van een simulatie bestaande uit  $N=100.000$  strekkingen.



## 3.2 Foutenbomen

Aan de hand van bovenstaande methode, is voor ieder object in de pilot een foutenboom uitgewerkt. Om de uitwerking en presentatie van de boom overzichtelijk te houden, is besloten om maximaal vier niveaus te gebruiken. Voor ieder object is dezelfde werkwijze toegepast:

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 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).

Tijdens de uitvoering van stap 2 en 3 zijn specialisten van Sweco op het gebied van stedelijk en regionaal water en hoogwaterveiligheid (keringen) geraadpleegd om een compleet en realistisch beeld van de faalpaden te krijgen.

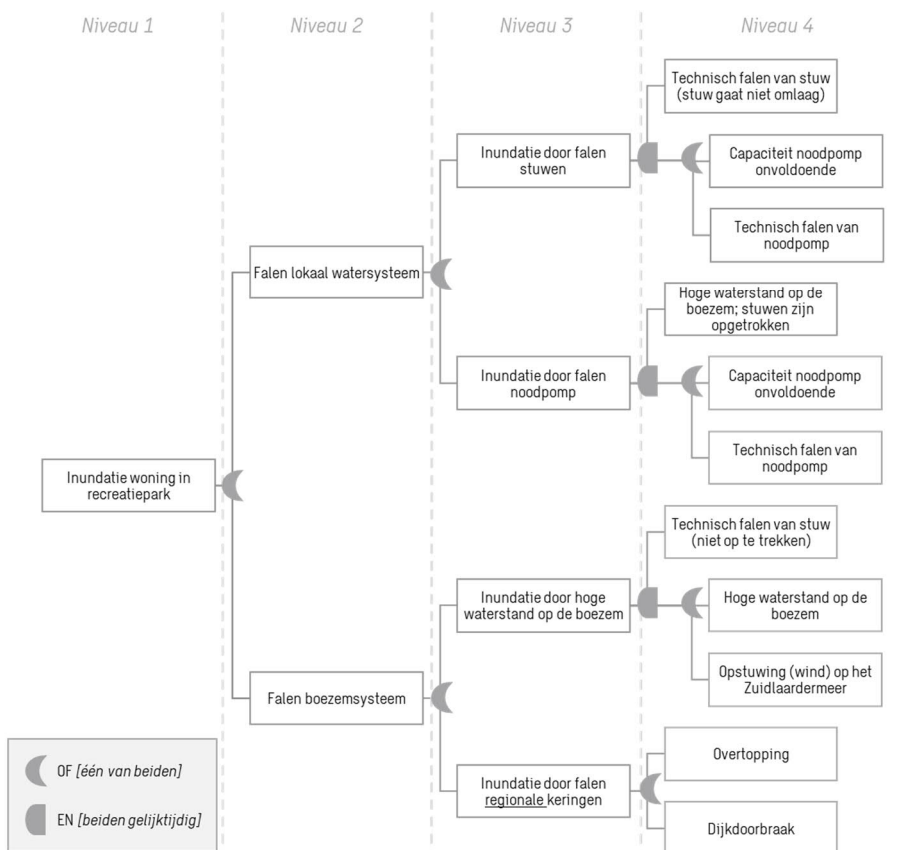
In de volgende alinea's zijn de foutenbomen voor de drie pilot objecten uitgewerkt tot en met stap 3. Stap 4 en 5 zijn ter illustratie voor het recreatiepark uitgevoerd in paragraaf 3.3.

Kader 11. Methodiek achter het opstellen van een faalboom voor objecten.

### **Faalboom voor een object vs. een gebied**

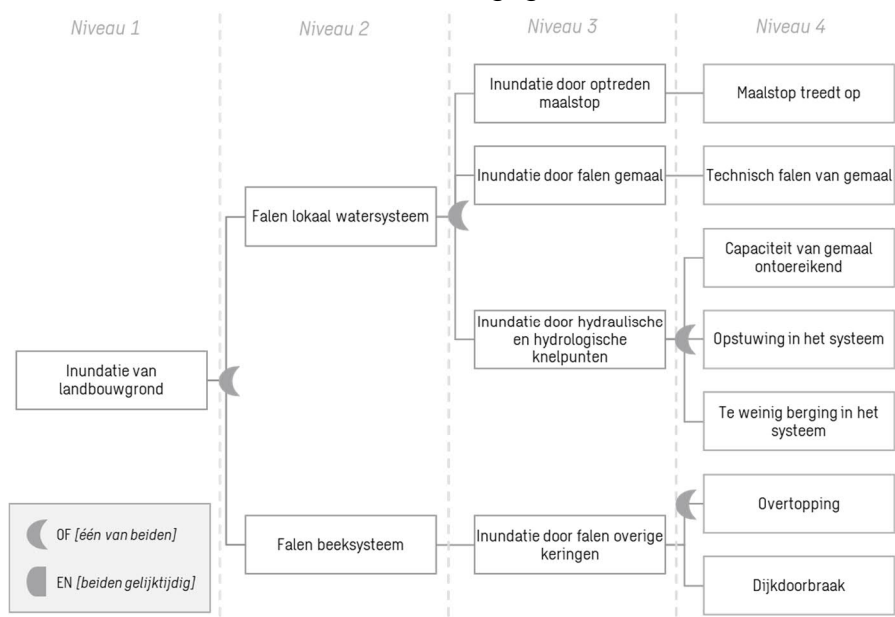
*Het opstellen van een faalboom, begint bij een keuze voor het 'top-event'. In deze pilot is dat een object en geen gebied of set aan objecten. Hierdoor is het mogelijk om rekening te houden met verschillende factoren die bijdragen aan de wateroverlast zoals bijvoorbeeld de hoogte van het maaiveld. Om van een enkel object naar een set aan objecten te gaan (bijv. van een woning naar een wijk), moet de faalboom voor ieder object los doorgerekend worden. De faalboom op zichzelf verandert hierbij niet substantieel. Immers zijn alleen de grenswaarden in de Limit State functies object-specifiek. Vervolgens kunnen de faalkansen van de losse objecten (woningen) bij elkaar worden gebracht.*

### 3.2.1 Recreatiewoningen



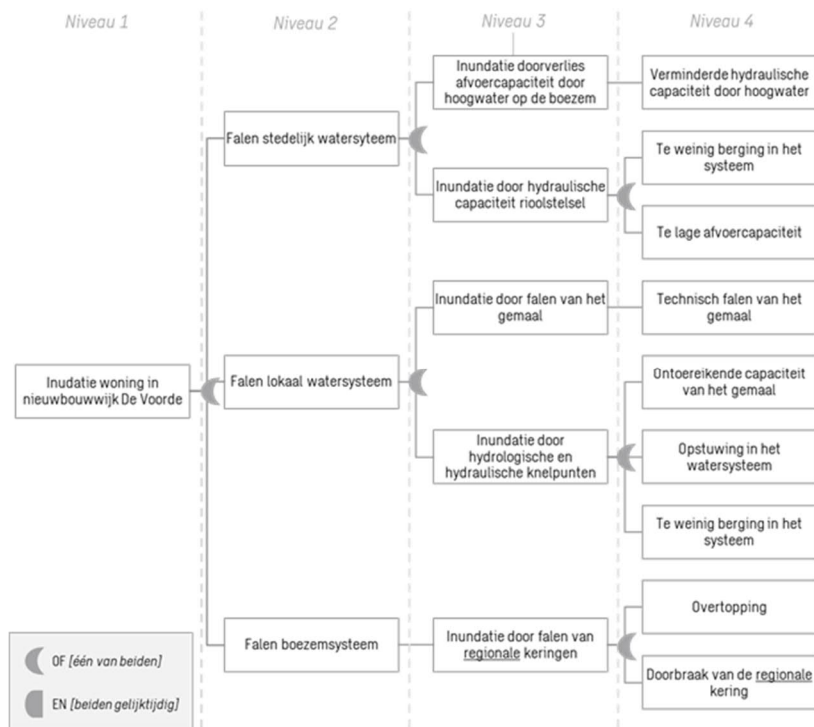
Figuur 9. Foutenboom voor een woning in het recreatiepark.

### 3.2.2 Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer



Figuur 10. Foutenboom voor een perceel landbouwgrond in bemalingsgebied Oostermoer.

### 3.2.3 Nieuwbouwwijk 'De Voorde'



Figuur 11. Foutenboom voor een woning in nieuwbouwwijk De Voorde.

## 3.3 Uitwerking foutenboom voor het recreatiepark

Om de rekenmethode met de foutenboom te duiden, is deze getalsmatig uitgewerkt. Hiervoor zijn aan de events in de foutenboom voor één woning in het recreatiepark, Figuur 9, verschillende faalkansen gekoppeld. In dit hoofdstuk zijn de events in de foutenboom toegelicht. Daarbij is vermeld:

- Wat de sturende factoren per watersysteem zijn;
- Welke aannames zijn gemaakt;
- Wat de gehanteerde methode voor het specifieke event is, en;
- Welke mogelijke optimalisaties mogelijk zijn

De vertaalslag van een faalmechanisme naar een faalkans is, mede door beperkingen in de beschikbare modelresultaten, in deze pilot op twee manieren tot stand gekomen:

#### 1. Door een vooraf bepaalde faalkans

Onder deze categorie worden faalmechanismen beschouwd welke niet beïnvloed worden door fysieke omstandigheden. De faalkans van dergelijke mechanismen zijn veelal bepaald op basis van ervaring en/of empirische gegevens. Onder deze categorie worden faalmechanismen zoals hieronder beschreven geschaard:

- Technisch falen stuw en noodpomp
- Waterstand Zuidlaardermeer groter dan NAP +0,70 m, stuwen gesloten

## 2. Berekend door middel van een 'Limit State Function' (LMS)

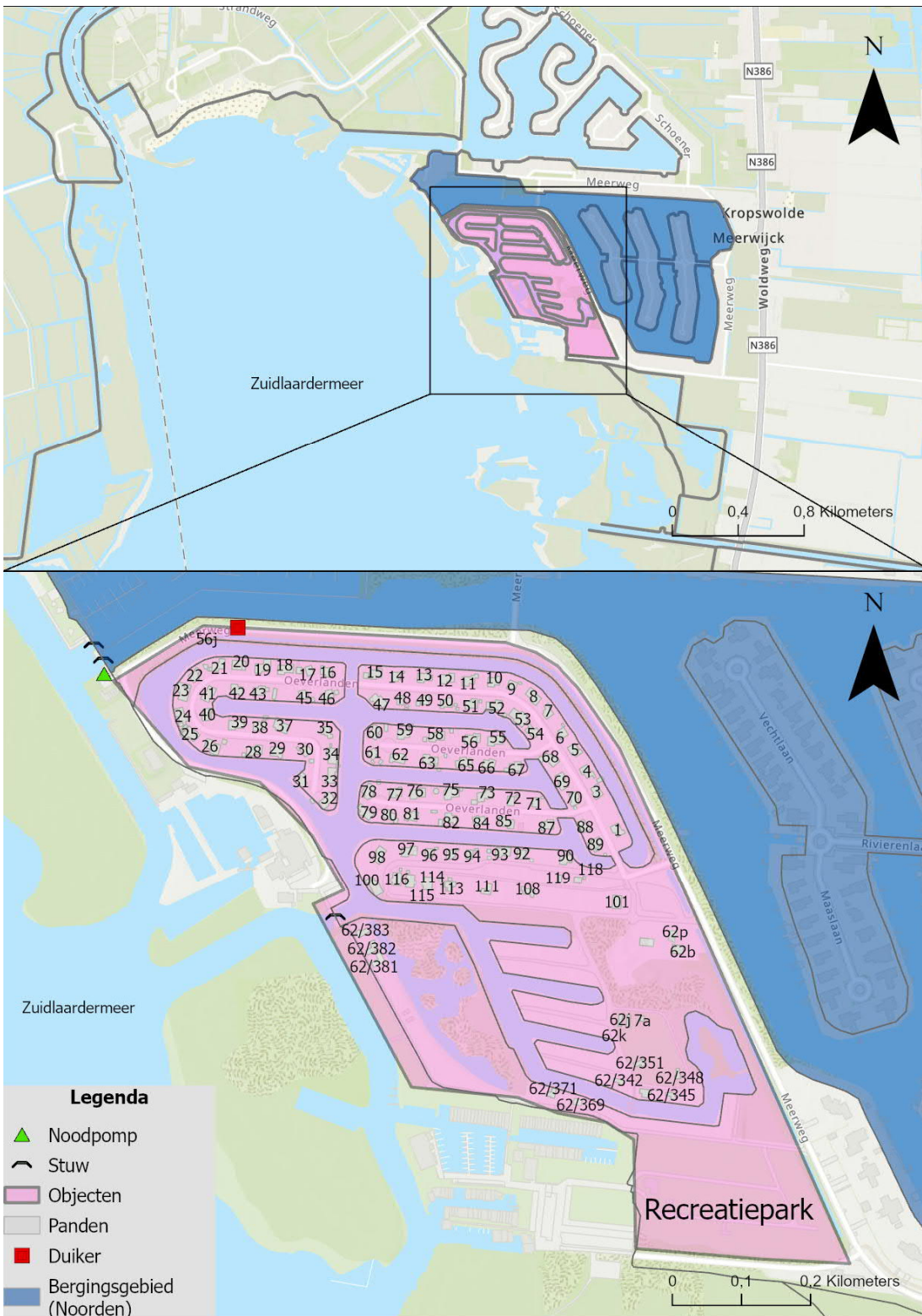
Omdat een LMS sterk afhankelijk is van het event, is deze bij de betreffende events vermeld. In de praktijk zal de inzet van een LMS vervangen worden door de herhalingstijden voor events af te leiden uit modelresultaten.

Verdere uitwerking van de totstandkoming omtrent de LMS is opgenomen in Bijlage 4. De relaties en rekenregels tussen de verschillende faalmechanismen is opgenomen in Bijlage 5.

### 3.3.1 Object specificatie

Om aanvullende duiding te geven welke aspecten er spelen binnen het recreatiepark, is in Figuur 12 een overzichtskaart toegevoegd. In deze kaart zijn verschillende genummerde woningen te zien, elk van deze woning is als één object binnen het park beschouwd. Verder bevinden er zich een drietal stuwen binnen het lokale watersysteem; één aan de linker middenzijde en een tweetal in de linker bovenhoek. Tevens kan een noodpomp geactiveerd worden, ter hoogte van de locatie van deze twee laatste stuwen, indien dit nodig is. De watergangen in het recreatiepark staan, via een duiker, in open verbinding met de watergangen in Meerwijk en de boezem, zie Figuur 12. Bij opgetrokken stuwen, door hoge waterstand op de boezem, kan het lokale watersysteem dus water bergen in de watergangen rondom park Meerwijk en het recreatiepark. Het gebied rondom het recreatiepark beslaat ca. 75 ha. Het gezamenlijke oppervlak van de afwaterende eenheid wat bemalen wordt door de genoemde gemalen beslaat ca 152 ha.

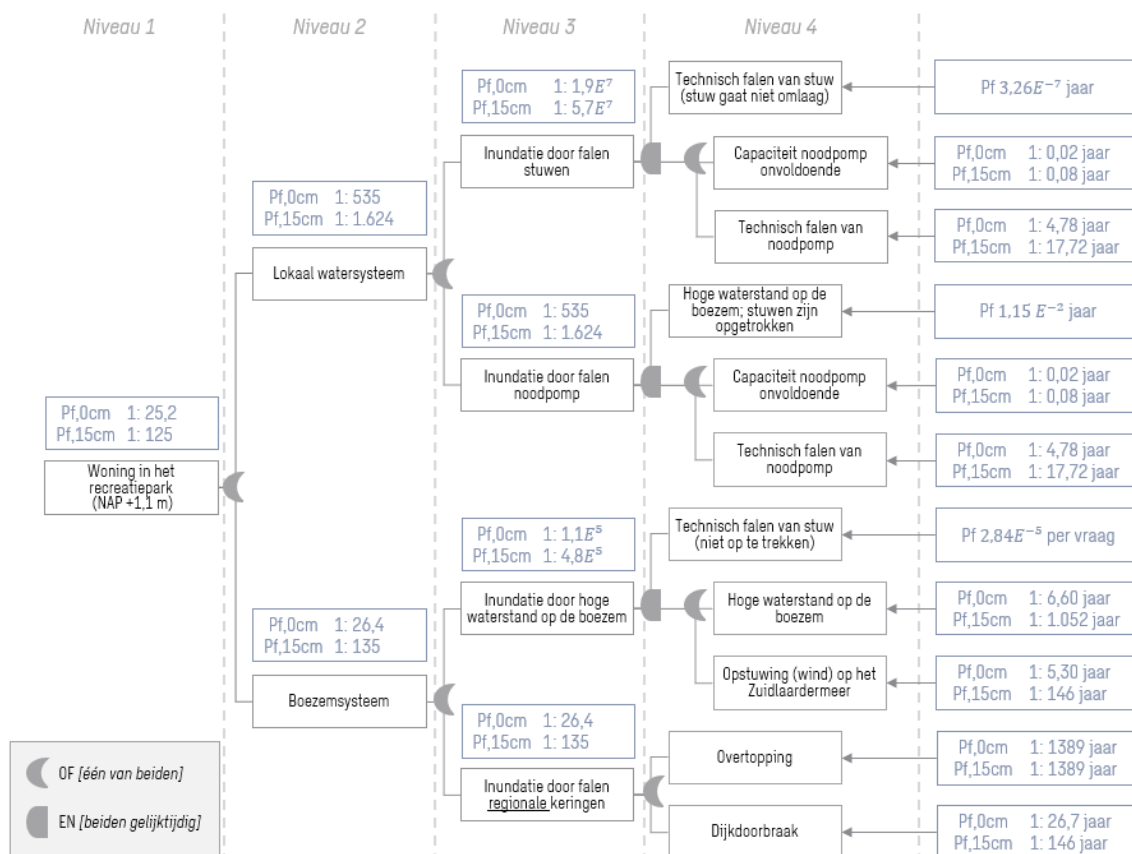




Figuur 12. Overzichtskaart van het Recreatiepark.

### 3.4 Gesimuleerde foutenboom inundatiekansen

Op basis van de foutenboom (paragraaf 3.2.1), de grenswaarden voor optreden van een gebeurtenis (in deze pilot middels LMS, zie paragraaf 3.3 en Bijlage 4) en de relatie tussen onderlinge faalmechanismen (Bijlage 5) kunnen de faalkansen voor de events bepaald worden voor één individuele woning in het recreatiepark. Het betreft de woning met huisnummer 25, waarbij het maaiveld op NAP +1,1 m ligt. In Figuur 13 is weergegeven hoe groot de overschrijdingskansen van 0 cm inundatie (Pf, 0cm) en 15 cm inundatie (Pf, 15cm) is door het betreffende mechanisme. Deze inundatiedieptes zijn gekozen omdat ze leiden tot minimale en maximale schade door wateroverlast in het geval van een recreatiewoning.



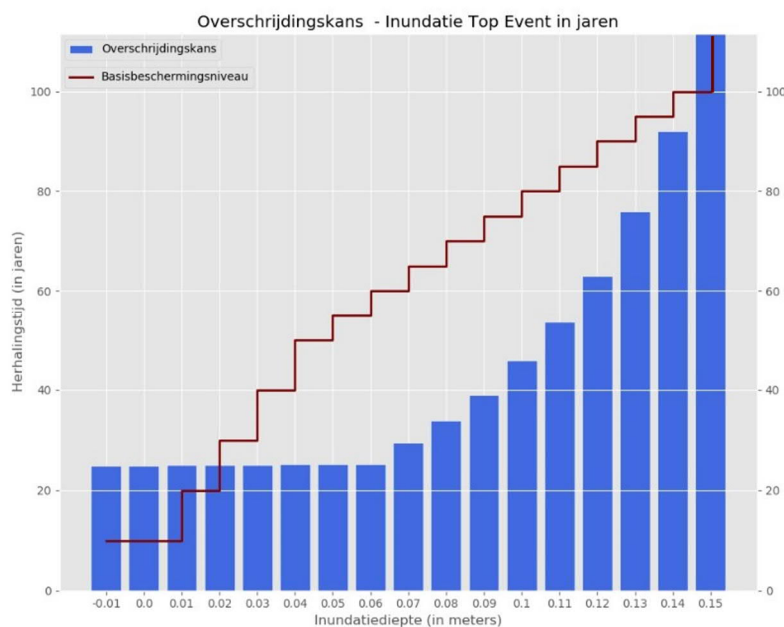
Figuur 13. Gesimuleerde foutenboom inundatiekansen van één woning (huisnummer 25), gelegen op NAP +1,1 m, in het recreatiepark. Inundatiekansen waarbij de eenheid niet is weergegeven geldt 1/jaar.

In de gekwantificeerde foutenboom is te zien dat de betreffende recreatiewoning rekening dient te houden met wateroverlast in de vorm van inundatie eens per 25,2 jaar, waarbij eens per 125 jaar meer dan 15 cm water in de woning staat. De overschrijdingskansen in niveau 2 laten zien dat het grootste aandeel van de wateroverlast haar oorsprong vindt in het boezemsysteem: hier zijn de herhalingstijden significant kleiner dan in het lokale watersysteem. Wanneer ook het boezemsysteem nog een stap dieper bekeken wordt, blijkt dat het volledige falen van het boezemsysteem in deze

analyse toe te kennen valt aan het falen van de regionale keringen.. Kijken we naar het laagste niveau in de faalboom, zien we dat een dijkdoorbraak hier de grootste bijdrage aan levert.

Uit de analyse valt dus te concluderen dat de kans het grootst is dat deze woning wateroverlast zal ondervinden door een dijkdoorbraak van de regionale kering langs de boezem. Dit valt te herleiden naar de limit state functie van het faalmechanisme 'Dijkdoorbraak'. De implementatie van deze limit state is een versimpeling ten opzichte van de werkelijkheid, waarin dit faalmechanisme afhankelijk is van diverse mechanismen die in een stabiliteitsberekening getoetst zouden kunnen worden. In de simplificatie voor deze pilot wordt aangenomen dat de stabiliteit faalt bij een waterstand met  $T=500$ , wat overeenkomt met een waterstand op de boezem van NAP + 1,158 m. Dit wordt verder toegelicht in de Bijlage 4. Door de waterstanden van het EKDB-model te combineren met mogelijk windopzet, blijkt dat deze waarde al snel overschreden wordt.

Figuur 14 geeft de faalkansen weer op niveau 1 voor een spectrum aan waterstanden middels een cumulatieve overschrijdingskans. Hierin is de overschrijdingskans uit de foutenboom in blauw uitgezet tegen het basisbeschermingsniveau voor de woning (rood). Te zien is dat voor de meeste waterstanden de herhalingstijd van de cumulatieve overschrijdingskans kleiner is dan het basisbeschermingsniveau. Bij de lage inundatiedieptes (< 1 cm) en de hoogste inundatiediepte (> 15 cm), is de cumulatieve overschrijdingskans echter groter dan het basisbeschermingsniveau. Daarom wordt geconcludeerd dat deze woning op basis van de analyse (en onderliggende aannames) niet voldoet aan het gestelde basisbeschermingsniveau.



Figuur 14. Cumulatieve overschrijdingskans verdeeld over verschillende inundatiediepten voor het top-event van woning met huisnummer 25. Het maaiveld ligt hierbij op NAP +1,1 m.

De beschreven methode is toepasbaar op elke individuele woning binnen het recreatiepark. Aan elk van deze woningen kan namelijk een eigen maaiveldhoogte toegekend worden. De hoogte van het maaiveld zit gekoppeld aan de verschillende Limit State functies, waarin deze is beschreven als de weerstand 'R'. Door voor elk van deze woningen de hoogte van het maaiveld te

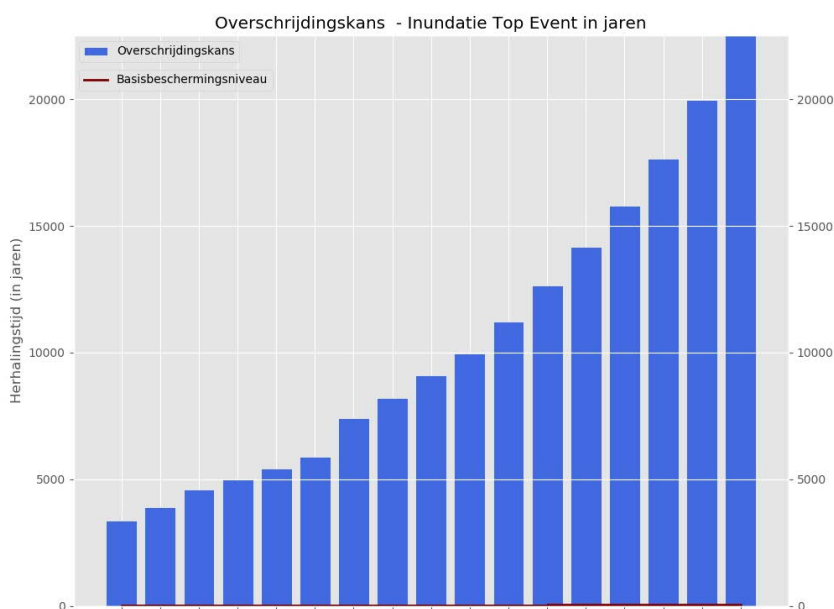
Kader 12. Kanttekening op cumulatieve overschrijdingskansen.

### Cumulatieve overschrijdingskansen

*Een cumulatieve overschrijdingskans is gedefinieerd als de kans op de respectievelijke inundatiediepte gesommeerd met alle voorkomens van grotere inundatiediepte. Ter illustratie: de cumulatieve overschrijdingskans van 1 cm inundatie bevat alle kansen van een inundatie die gelijk of groter is dan 1 cm.*

integreren met de beschreven methode kan dus de foutenboom hiervoor berekend worden, wat leidt tot een cumulatieve herhalingstijd voor het gehele recreatiepark. Ter illustratie wordt ook de cumulatieve overschrijdingskans van het top-event van de woning met huisnummer 62 (Figuur 15) beschreven. Het maaiveld voor de woning met huisnummer 62 ligt op NAP +1,40 m, dit is 30 cm hoger dan de woning met huisnummer 25, Figuur 14.

Wanneer de twee figuren vergeleken worden, kan een significant verschil in herhalingstijden geconstateerd worden. Hiermee is de correlatie tussen herhalingstijd en de hoogte van het maaiveld inzichtelijk en kan gesteld worden dat een hoger maaiveld leidt tot een grotere herhalingstijd van een faalmechanisme. In Hoofdstuk 6 kan een soortgelijke vergelijking getrokken worden met verschillende maatregelen welke invloed hebben op de weerstand, wat zal leiden tot een hogere herhalingstijd.



Figuur 15. Cumulatieve overschrijdingskansen verdeeld over verschillende inundatiediepten voor het top-event van woning met huisnummer 62. Het maaiveld ligt hierbij op NAP +1,4 m. Het basisbeschermingsniveau is i.v.m. de herhalingstijden erg klein. Hierdoor lijkt deze op de x-as te liggen.

## 3.5 Vergelijking basisbeschermingsniveau t.o.v. overschrijdingskansen

De vergelijking van het opgestelde basisbeschermingsniveau van paragraaf 2.4.1.3 ten opzichte van de berekende overschrijdingskansen kan bepaald worden aan de hand van Figuur 14 en Figuur 15, huisnummer 25 en 62 respectievelijk. Hiermee kan geconcludeerd worden dat, in de huidige situatie, voor object met huisnummer 25 niet wordt voldaan aan het gestelde basisbeschermingsniveau. Hiervoor zouden twee acties ondernomen kunnen worden:

- Verificatie van de limit state functies van de maatgevende faalmechanisme. In dit geval betreft dit voornamelijk de resistentie van de regionale kering, door middel van een stabiliteitsberekening zou deze waarde geverifieerd kunnen worden.
- Het toepassen van maatregelen die kans op wateroverlast verminderen.

Voor huisnummer 62 zijn de herhalingstijden van wateroverlast significant groter dan het basisbeschermingsniveau. Dit komt, logischerwijze, door de hogere ligging van het object (NAP +1,4 m). In een toekomstige situatie zou dit kunnen veranderen door, onder andere, bodemdaling en klimaatverandering. Deze aspecten worden verder benaderd in hoofdstuk 5 en 6.

### 3.5.1 Vergelijk met huidige normeringen

Wanneer we deze resultaten vergelijken met de huidige normeringen, zijn er verschillen op te merken:

- Zo is er het verschil dat de huidige normen als het ware een drempel stellen voor wanneer wateroverlast op mag treden in iedere sector. Voorbeelden hiervan zijn een minimale herhalingstijd van 1/25 jaar voor inundatie van grasland (NBW-norm), of een ontwerpnorm van 1/100 jaar voor een regionale kering. Het basisbeschermingsniveau kent deze ondergrens niet. Dit verschil komt deels door de methode, maar ook omdat de huidige sectorale normen veelal zijn gericht op gebieden in plaats van losse objecten.
- Daarnaast zijn de huidige normen gestandaardiseerd voor generieke functies (bijv. grasland, agrarische grond, woningen), terwijl het basisbeschermingsniveau een object als vertrekpunt neemt. In deze pilot zijn de objecten veel minder gegeneraliseerd, waardoor differentiatie tussen de huidige (generieke) norm en het toegepaste (specifieke) object ontstaat;

## 4. Geobserveerde aandachtspunten

Bij het uitwerken van het basisbeschermingsniveau en de foutenboom binnen deze pilot zijn diverse aandachtspunten ontstaan. Deze zijn in dit hoofdstuk gebundeld in vier categorieën: algemene aandachtspunten, afstemming tussen overheden, politiek-bestuurlijke overwegingen en de uitlegbaarheid van de methode en resultaten.

### 4.1 Algemene aandachtspunten

Een algemeen aandachtspunt dat vaak terugkwam in de pilot is de schaa sprong die ergens in het proces gemaakt moet worden. Deze schaa sprong kan bijvoorbeeld zijn van een enkel object (bijv. woning) naar een cluster van objecten (zoals alle woningen binnen een bepaald gebied) naar alle groepen van objecten binnen een gebied (bijv. een wijk/stad/dijkkring/peilgebied/watersysteem). In de pilot komt deze schaa sprong voor bij het basisbeschermingsniveau, maar ook in de foutenboom en bij het afwegen van investeringskosten die object-overstijgend zijn.

Hoe hiermee omgegaan dient te worden, is afhankelijk van waar in het proces de schaa sprong gemaakt wordt. Mogelijke oplossingsrichtingen zijn daarom gepresenteerd in de blauwe kaders in de betreffende hoofdstukken, in paragraaf 2.3.4 wordt er opgeschaald door het beschermingsniveau van een individueel object te verdisconteren naar dat van een gebied. In Kader 11 is een tweede voorbeeld te vinden, waarbij de foutenboom voor meerdere objecten binnen hetzelfde gebied wordt toegepast, karakteristieken van de verscheidene objecten worden wel toegekend aan ieder object.

### 4.2 Afstemming tussen overheden en verantwoordelijkheden

Bij de afstemming tussen overheden en verantwoordelijken vormt de verhouding tussen de wettelijke taken van gemeente, waterschappen, provincie en het Rijk een aandachtspunt. Wateroverlast ontstaat uit verschillende deelsystemen, waarbij de verantwoordelijkheden voor deze deelsystemen sectoraal verdeeld zijn. Wanneer sprake is van een integrale benadering, waarbij een basisbeschermingsniveau voor een object wordt bepaald, verdwijnen de grenzen tussen de deelsystemen. Hierdoor wordt voor de beheerder of eigenaar van een object minder duidelijk welke sector (en daarmee dus ook welke overheid) verantwoordelijk is wanneer er wateroverlast

optreedt. Bij de verschuiving van een sectorale naar integrale benadering van wateroverlast dient dus ook op bestuurlijk vlak rekening gehouden te worden met een potentiële verschuiving van verantwoordelijkheden. Een verschuiving is echter niet per se noodzakelijk, wanneer er één overheid is die het basisbeschermingsniveau bepaalt en vanuit hier sectorale normen afleidt. Daarbij moet duidelijk en uitlegbaar zijn welke partij (of overheid) aanspreekpunt is in het geval van wateroverlast.

In de huidige sectorale aanpak ligt de verantwoordelijkheid om wateroverlast te voorkomen bij verschillende overheden: gemeentes zijn verantwoordelijk voor de riolering en de inrichting van het maaiveld in de openbare ruimte; De waterschappen zijn verantwoordelijk voor het regionale watersysteem, regionale keringen en stelt kaders op voor bouwen en gebiedsontwikkeling. De provincie is verantwoordelijk voor de normering van keringen en het Rijk voor de hoofdwatervaten. In een integrale risicobenadering is het vertrekpunt een basisbeschermingsniveau van een object. Het object dient nader gedefinieerd te worden en kan zowel één woning omvatten, als een hele wijk of gebied. Hieraan ligt een geaccepteerd schade-risico ten grondslag. Het aandachtspunt hierin is om duidelijk te krijgen wie verantwoordelijk is voor het behalen van het basisbeschermingsniveau, wie het geaccepteerd schade-risico vaststelt, hoe de verdeling van kosten voor gezamenlijke maatregelen plaatsvindt en wie regie voert op het proces om tot een vaststelling te komen.

## 4.3 Politiek-bestuurlijke overwegingen bij gebiedsgerichte keuzes

Bij een integrale risicobenadering van wateroverlast moeten politiek-bestuurlijke overwegingen plaatsvinden. De eerste politiek-bestuurlijke afweging in de gepresenteerde methode is het bepalen van objectgroottes en het bijbehorende geaccepteerde schade-risico bedrag. Het geaccepteerde schade-risico is immers geen objectief te bepalen bedrag. Hoewel er een voorstel is gedaan tot het bepalen van het geaccepteerde schade-risico, wordt alsnog aangeraden om dit resultaat bestuurlijk te toetsen. Aangezien dit bedrag ten grondslag ligt aan de beoordeling van het systeem en inzet van publieke middelen om de hieruit volgende normen te hanteren, dient het geaccepteerd schade-risico bestuurlijk onderbouwd en gedragen te zijn.

Bij het bepalen van het schade-risico dient tevens extra aandacht besteedt te worden aan objecten die van grote waarde zijn. Wanneer bij deze objecten een laag schade-risico wordt gehanteerd, zal de methodiek leiden tot een zeer strenge geaccepteerde herhalingstijd. Om deze herhalingstijden vervolgens te kunnen realiseren kunnen er mogelijk grote investeringskosten nodig zijn. De vraag of dit wenselijk is, is een politiek bestuurlijke afweging. Een voorbeeld hiervan is de stikstoffabriek in Groningen (zie Kader 13, volgende pagina). Daarnaast wordt hiermee onderscheid gemaakt tussen, bijvoorbeeld, een sociale huurwoning en villawoning. Met de gehanteerde methode zal voor de goedkope woning een hoger schade-risico gehanteerd worden. Door indirecte schade te betrekken bij de bepaling van het basisbeschermingsniveau zou hierin een balans gevonden kunnen worden. Waarbij de emotionele schade (=indirecte schade) van beide eigenaren een gelijke waarde hebben in het geval van wateroverlast, overeenkomend met het *gelijkheidsbeginsel*.

Kader 13. Politiek-bestuurlijke afwegingen omtrent het beschermingsniveau van een stikstoffabriek.

#### **Een politiek-bestuurlijke ongewenst beschermingsniveau**

*Om buitenlands aardgas in Nederland te kunnen gebruiken, moet dit omgezet worden van hoogcalorisch naar laagcalorisch gas. Dit gebeurt in een zogenoemde 'stikstoffabriek'. Deze stikstoffabriek is gebouwd in een Groningse polder in Zuidbroek in het beheergebied van waterschap Hunze en Aa's. De stikstoffabriek is van grote waarde, waardoor er een lage kans op wateroverlast wordt geaccepteerd. De uiteindelijke locatie voor de stikstoffabriek betreft echter een polder die bij eerdere hoogwaters is ingezet als (nood)berging om andere delen van het watersysteem te ontlasten. Het waterschap heeft daarom de politiek-bestuurlijke afweging gemaakt het basisbeschermingsniveau in deze polder niet te verhogen naar de eisen vanuit de fabriek. Uiteindelijk is de fabriek alsnog gebouwd, maar zijn er maatregelen aan het object getroffen (een kering met coupures) om met een lager basisbeschermingsniveau te voldoen. Door objectgerichte maatregelen toe te passen is wel het gewenste basisbeschermingsniveau behaald, maar niet het veiligheidsniveau van de hele polder te verhogen (door systeemgerichte maatregelen).*

## 4.4 Uitlegbaarheid

Uiteindelijk is één van de doelstellingen van een integrale benadering van wateroverlast om het wateroverlast en de herkomst hiervan (beter) uitlegbaar te maken naar de eigenaar van een object. Hierbij zijn tijdens de pilot een viertal aandachtspunten naar voren gekomen.

- 1) Als eerste is de presentatie van het beschermingsniveau een aandachtspunt. Voor objecten waarbij er één dominante schadefactor een rol speelt bij wateroverlast, kan het beschermingsniveau als een grafiek worden weergegeven zoals reeds is toegepast in de rapportage. Bij een afhankelijkheid van meerdere schadefactoren wordt de visualisatie van het beschermingsniveau complexer. Aangeraden wordt om schadefactoren die weinig gevoelig zijn te versimpelen tot wel/geen schade indien mogelijk.
- 2) Een tweede aandachtspunt is dat het beschermingsniveau object specifiek wordt bepaald: het niveau is van toepassing op één object. Hierdoor ontstaan potentieel verschillen in beschermingsniveau tussen gelijksoortige objecten; bijvoorbeeld een sociale huurwoning (lagere WOZ) versus een villawoning (hogere WOZ). Dit gegeven kan moeilijk uitlegbaar zijn naar burgers. Ook ethisch kunnen hier vraagtekens bij gesteld worden, waardoor het belang van goed politiek-bestuurlijk onderbouwde keuzes onderstreept wordt. Zie Kader 14 voor toelichting.
- 3) Een derde aandachtspunt is de presentatie van resultaten van de faalboom. In deze pilot is ervoor gekozen om de herhalingstijd van minimale en maximale schade op te nemen. Deze twee kengetallen vertellen slechts een deel van het verhaal; het geeft weinig inzicht in de herhalingstijd voor tussenliggende schade. Hiervoor is een weergave van herhalingstijd voor tussenliggende inundaties in de vorm van een



grafiek noodzakelijk. Dit wordt onoverzichtelijk wanneer het weergegeven wordt voor alle individuele faalmechanismen. Aanbevolen wordt daarom om slechts het top-event, niveau 1, te visualiseren wanneer de huidige situatie ten opzichte van het basisbeschermingsniveau wordt gepresenteerd.

- 4) Een vierde aandachtspunt is de uitlegbaarheid van de totstandkoming van het basisbeschermingsniveau. Een integrale benadering van wateroverlast brengt veel verschillende disciplines, die zich in de huidige situatie in verschillende sectoren bevinden, samen aan één tafel. Tijdens de pilot is gebleken dat de gepresenteerde aanpak al veel inspanning van specialisten vraagt. Het is niet aanbevolen om te pogen dit proces geheel begrijpelijk te maken voor niet-specialisten. Dit vraagt veel energie en achtergrondkennis, waarbij het onduidelijk is of de benodigde inspanning daadwerkelijk begrip en inzicht oplevert van de niet-specialisten. Er wordt daarom aanbevolen om enkel de uitkomsten (conclusie) van het basisbeschermingsniveau inzichtelijk te presenteren.

Kader 14. Kanttekeningen op ethisch vlak bij een vanuit risico-benaderde aanpak.

#### **Ethische kanttekeningen bij een vanuit risico-benaderde aanpak**

*De gepresenteerde methode is gebaseerd op een monetaire aanpak. Dit is echter niet per definitie een ethische aanpak. Een voorbeeld hiervan is het basisbeschermingsniveau van twee woonwijken. Stel dat woonwijk A vooral bestaat uit kleine appartementen, voornamelijk sociale huur. Woonwijk B bestaat uit een aantal royale villa's. De schade aan het type woningen in wijk A zal lager zijn dan in wijk B, wanneer alleen gekeken wordt naar de waarde van de inboedel.*

*Bij een gelijk geaccepteerd schade-risico zal dit betekenen dat wijk B minder vaak wateroverlast mag ondervinden. Dit is lastig uitlegbaar: waarom worden duurdere woningen beter beschermd? Beide zijn immers woonruimte.*

*Andersom, wanneer beide wijken een gelijk basisbeschermingsniveau hebben, vereist de hogere inboedelwaarde van wijk B een hoger geaccepteerd schade-risico. Dit is ook lastig uitlegbaar: is het logisch dat de geaccepteerde schade afhankelijk is van de waarde van een woning?*

*Er is in dit dilemma geen goed of fout. Het is echter wel belangrijk om hier vanuit een politiek-bestuurlijke blik rekening mee te houden bij het onderbouwen van het geaccepteerd schade-risico.*

*Daarnaast zijn sommige schades lastig tot niet kwantificeerbaar: denk bijvoorbeeld aan de schade door het verlies van vertrouwen in de woonomgeving. Of de emotionele schade die ontstaat door verlies van dierbare spullen zoals foto's. Dit is inherent aan een kosten-baten aanpak: er worden altijd bepaalde kosten gewogen tegen bepaalde baten.*

## 5. Opgave van het basisbeschermingsniveau en de overschrijdingskansen voor toekomstige scenario's

Naast de huidige inrichting van het systeem, zal het systeem te maken krijgen met externe veranderingen. De gepresenteerde methode maakt het mogelijk om de huidige systeeminrichting te toetsen voor toekomstige situaties. Hiervoor dient gekeken te worden naar de invloed van de externe veranderingen op de sturende factoren en limit state functies in de foutenboom. Dit hoofdstuk gaat verder in op klimaatverandering en bodemdaling. De toepassing van deze toekomstige veranderingen in de methode is in hoofdstuk 6 opgenomen. Om dit binnen de pilot te integreren met de foutenboom, zijn er enkele versimpelingen voor deze twee factoren toegepast.

### 5.1 Opgave voor het huidige klimaat en in 2050

Om te kwantificeren wat de opgave is voor het huidige en toekomstige klimaat zou je middels de foutenboom-methode de verandering in kans op wateroverlast kunnen berekenen. Daarbij dienen de effecten van klimaatverandering in de onderliggende hydrologische en hydraulische modellen ingevoerd te worden. Hiermee verandert de invoer voor een deel van de sturende mechanismen in niveau 4 in de foutenboom, wat uiteindelijk naar verwachting zal leiden tot een kleinere herhalingstijd van het optreden van wateroverlast. Afhankelijk van de gevoeligheid van het systeem en de effecten van klimaatverandering is het mogelijk dat het maatgevende faalmechanisme in de toekomst vanuit een ander deelsysteem komt dan in de huidige situatie.

Op basis van expert judgement is onderstaand een inschatting gemaakt van de invloed van klimaatverandering op de kans op optreden van de elementen in niveau 4 van de foutenboom voor het recreatiepark:

- Capaciteit noodpomp onvoldoende: dit leidt tot een hogere capaciteit die nodig is bij piekbuien;
- Hoge waterstand op de boezem: klimaatverandering leidt tot vaker/langduriger hoogwater op de boezem, dit verhoogd noodzaak tot het vaker optrekken van de reeds aanwezige stuwen;

- Dijkdoorbraak: wanneer systemen niet worden aangepast zullen er naar verwachting meer maalstops optreden, maar niet noodzakelijkerwijs hogere waterstanden op de boezem.

## 5.2 Bodemdaling

Om de gevolgen van bodemdaling en de effecten van verschillende maatregelen op een object te toetsen is een normatieve jaarlijkse bodemdaling binnen het recreatiepark genomen en dient ter illustratie. Deze jaarlijkse daling is vastgesteld op 3,8 mm per jaar op basis van InSAR (satelliet metingen) gedurende een doorlopende periode (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica, 2020). Hierbij wordt opgemerkt dat er in Groningen sprake is van diverse typen bodemdaling: zoals bijvoorbeeld aardgaswinning, overige mijnbouw (zoutwinning), veenoxidatie en inklinking. Aardgaswinning en overige mijnbouw leidt tot daling van de gehele ondergrond en alle objecten die zich daarop bevinden. Veenoxidatie en inklinking zorgt voor daling van het maaiveld, maar niet alle objecten (bijvoorbeeld gefundeerde woningen dalen niet mee).

De in deze pilot gehanteerde bodemdaling is een resultaat van deze verschillende oorzaken. Binnen deze pilot is er aangenomen dat de bodemdaling simpelweg meegenomen kan worden door de daling te vermenigvuldigen met het aantal zichtjaren en het maaiveld te verminderen met deze waarden. Dit dient nader gedefinieerd te worden voor praktische toepassingen aangezien de bodemdaling per locatie sterk kan verschillen. Door verschillende tijdstappen te beschouwen wordt inzichtelijk gemaakt wat het effect van bodemdaling is op de kans van inundatie over tijd. Binnen deze pilot wordt rekening gehouden met drie tijdstappen:

- 10 jaar – 38 mm bodemdaling
- 20 jaar – 76 mm bodemdaling
- 30 jaar – 114 mm bodemdaling

Bij een eventuele verdere uitwerking van de methodiek is het interessant om onzekerheidsbandbreedtes te integreren binnen het model. De bepaalde waarde is immers een normatieve geselecteerde waarde binnen het recreatiepark maar bodemdaling zou zowel kunnen versnellen of vertragen. Door een dergelijke bandbreedte, in de vorm van 5<sup>e</sup> en 95<sup>e</sup> percentielen, mee te wegen kan deze onzekerheid beter inzichtelijk gemaakt worden. Dit versterkt de beleidsmatige keuze met betrekking tot geschikte maatregelen.

## 6. Welke maatregelen kunnen *de kans van optreden en gevolgen van wateroverlast* bij de locatie/het gebied beïnvloeden?

In dit hoofdstuk worden verschillende maatregelen geïdentificeerd welke de kans van optreden en gevolgen van wateroverlast kunnen verminderen. De effecten van een tweetal maatregelen worden verder ontleed. Daarnaast wordt een economisch optimum van elk van deze maatregelen verder gedefinieerd en wordt de kosteneffectiviteit van de maatregel bepaald tot zichtjaar 2050.

### 6.1 Geïdentificeerde maatregelen

Voor het recreatiepark en de daarbinnen liggende objecten worden verschillende maatregelen geïdentificeerd op het gebied van preventie, ruimtelijke inrichting en mitigatie, binnen de pilot is dit gedefinieerd als PRiM (samenvoeging van de eerste letters van de hiervoor genoemde type maatregelen). De maatregelen zijn tot stand gekomen door de verschillende faalmechanismen uit de foutenboom in niveau 4 (Figuur 9) te evalueren en deze vervolgens binnen de PRiM te categoriseren. Een overzicht van de geïdentificeerde maatregelen zijn gesommeerd in Tabel 6.

Tabel 6. Overzicht mogelijke maatregelen.

Nummer	Maatregel	PRiM raamwerk	Beperkt	Locatie t.o.v. systeem	Deelsysteem	Plaats in faalboom	Toelichting
1	Aanwezigheid noodpomp	Mitigatie	De kans van optreden van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Lokaal watersysteem	Technisch falen van noodpomp Capaciteit noodpomp onvoldoende	Een extra noodpomp kan ingezet worden indien de eerste noodpomp faalt
2	Aanleggen drempel rondom woning	Mitigatie	De gevolgen van wateroverlast De kans van optreden van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Lokaal watersysteem	Aanpassing in resistentie van object	Door het aanleggen van een drempel ontstaat minder schade bij lage inundaties rondom de woning
3	Verhogen spui-capaciteit bij normale situatie	Preventie	De kans van optreden van wateroverlast	Elders in het watersysteem / Buiten het watersysteem	Boezemsysteem	Aanpassing sturend mechanisme	Door de spui-capaciteit te verhogen, hoeft er minder snel een maalstop op de boezem afgekondigd te worden
4	Aanleggen bergingsgebieden,	Preventie	De kans van optreden van wateroverlast	Elders in het watersysteem	Boezemsysteem	Aanpassing sturend mechanisme	Door bergingsgebieden rondom de boezem aan te leggen hoeft er minder snel een maalstop op de boezem afgekondigd te worden
5	Aanleggen berging binnen watersysteem	Mitigatie	De kans van optreden van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Lokaal watersysteem	Aanpassing in resistentie van object	Door binnen het lokale watersysteem berging aan te leggen wordt je minder afhankelijk van de situatie buiten je lokale watersysteem (resistentie)
6	Versterking regionale kering	Preventie	De kans van optreden van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Boezemsysteem	Inundatie door falen regionale kering	Door een berm tegen de kering aan te leggen, wordt de kans op het doorbreken van de kering verkleind
7	Herbestemmen van object	Ruimtelijke inrichting	De gevolgen van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Buiten het systeem	Niet van toepassing	Door het object zelf te herbestemmen (bijv. andere gewassen telen) kan de schade bij wateroverlast afnemen
8	Aangepast bouwen (bijv. drijvend/op palen)	Ruimtelijke inrichting / preventie	De kans van optreden van wateroverlast	Binnen het deelsysteem dat niet aan de norm voldoet	Buiten het systeem	Niet van toepassing	Door aangepast te bouwen kan er mogelijk toch gebouwd worden op plaatsen waar het systeem het op dit moment niet mogelijk maakt om op conventionele methodes te bouwen. Dit is met name van toepassing op nieuwbouw.

## 6.2 Selectie en toetsing maatregelen

Om de ontworpen methodiek en het effect van toe te passen maatregelen te verifiëren en te toetsen, worden een tweetal maatregelen geselecteerd, zie paragraaf 6.2.1. Deze maatregelen worden gekwantificeerd in kosten (euro's) en ordegraad. Vervolgens worden deze maatregelen ingevoerd in de foutenboom. Dit biedt de mogelijkheid om de effectiviteit van de maatregelen te beoordelen op basis van hernieuwde herhalingstijden van de foutenboom (paragraaf 6.2.2) maar ook een economisch optimum (paragraaf 6.2.3) van elk individuele maatregel. Tevens kan dit in tijd getoetst worden. In deze pilot wordt er enkel gekeken naar de bodemdaling over tijd voor  $T = 10, 20$  en  $30$  jaar. De effectiviteit van de twee geselecteerde maatregelen, wordt beoordeeld op basis van reductie in schade-risico per geïnvesteerd euro, zie paragraaf 6.2.4.

### 6.2.1 Selectie maatregelen

Binnen de pilot worden een tweetal sterk verschillende maatregelen verder geanalyseerd. Hierbij is een afweging gemaakt om één maatregel te selecteren die invloed heeft en toepasbaar is op één enkele woning en één maatregel die alle objecten binnen het recreatiepark beïnvloedt. Zodoende is ervoor gekozen om de volgende twee maatregelen mee te nemen:

- Aanleggen van een drempel rondom de woning of bij de deurpost
- Verhogen van de normering van de regionale kering t.b.v. de stabiliteit

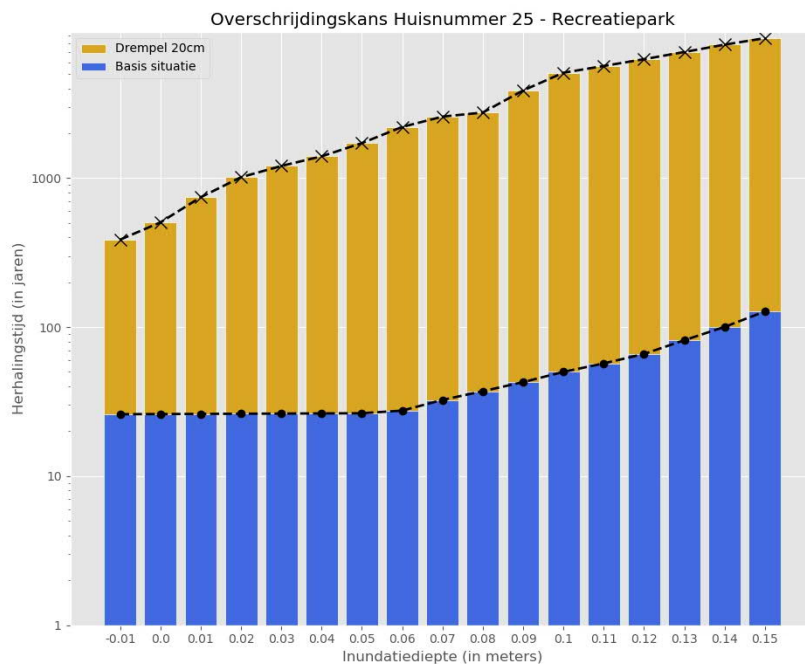
In de opvolgende paragraaf wordt ingegaan op hoe deze twee maatregelen ingevoegd worden in de foutenboom.

### 6.2.2 Toetsing maatregelen

Om de twee maatregelen te toetsen op basis van reductie in herhalingstijd, worden enkele aanpassingen gedaan aan de Limit State functies in de foutenboom.

#### Aanleggen van een drempel rondom de woning of bij de deurpost

De invoeging van een drempel bij één individuele woning is vrij eenvoudig. De installatie van een dergelijke drempel heeft namelijk enkel invloed op de resistentie ( $R$ ) van de woning. In de situatie zonder maatregel is  $R$  gelijk aan het maaiveld rondom de woning. Ter illustratie wordt de woning met huisnummer 25 als voorbeeld gebruikt om het effect van de maatregel te visualiseren. Voor deze woning is een maaiveldhoogte van NAP +1,1 m bepaald, welke dus gelijk is aan  $R$  uit de Limit State functies;  $Z = R - S$ . In het geval de maatregel wordt toegepast wordt de hoogte van de drempel opgeteld bij dit maaiveld. Stel dat een drempel van 20 cm geïnstalleerd wordt, dan komt  $R$  uit op NAP +1,3 m. Door zowel een berekening uit te voeren waarbij  $R$  gelijk is aan NAP +1,1 m en +1,3 m kan het effect van de maatregel inzichtelijk gemaakt worden. In Figuur 16 is het resultaat hiervan weergegeven.



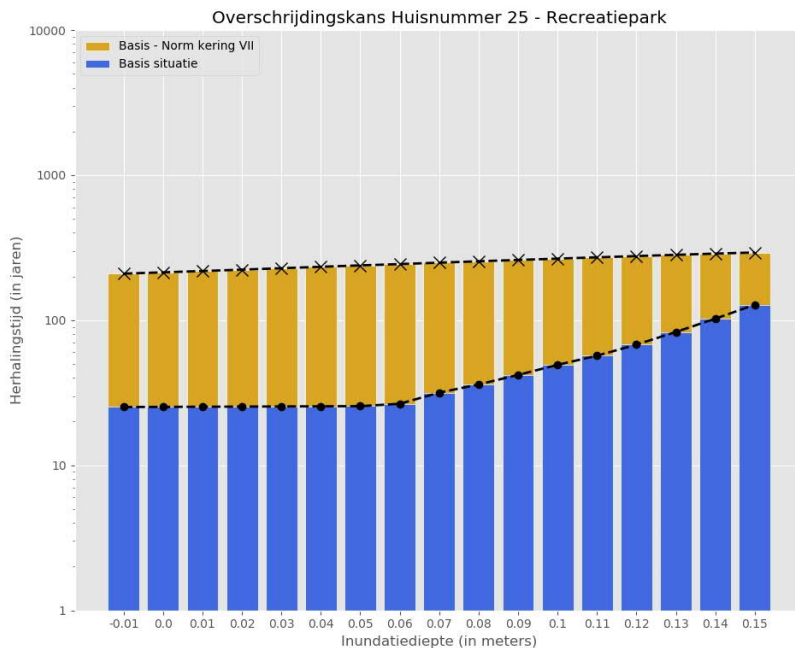
Figuur 16. Herhalingstijden t.o.v. inundatiediepten voor de situatie zonder en met een drempel van 20 cm. Verticale as op logaritmische schaal.

Om tot een economisch optimum te komen en een aanbevolen dimensie van de maatregel, worden de schade-risico bedragen voor de maatregel met stappen van 1 cm tussen 1 cm en 20 cm berekend. Als hypothetische investeringskosten voor het aanleggen van de drempel is de volgende formule toegepast:

$$\text{Investeringskosten} = \text{€}200 + \text{€}100 * \text{Dimensie maatregel in cm}$$

Verhogen van de normering van de regionale kering t.b.v. de stabiliteit

De invoeging van het verhogen van de normering van de regionale kering heeft effect over alle objecten in het recreatiepark. De aanpassing beïnvloedt de resistentie (R) van de Limit State voor doorbraak door hoogwater. Ter illustratie wordt de woning met huisnummer 25, wederom, als voorbeeld gebruikt om het effect van de maatregel te visualiseren, zie Figuur 17. Herhalingstijden t.o.v. inundatiediepten voor een normering van niveau III en VII. Verticale as op logaritmische schaal. In de basis situatie is de regionale kering genormeerd op IPO niveau III en bij de inpassing van de maatregel op IPO niveau VII.



Figuur 17. Herhalingstijden t.o.v. inundatiediepten voor een normering van niveau III en VII. Verticale as op logaritmische schaal.

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 recreatiepark. Bij het bepalen van het economisch optimum in paragraaf 6.2.3 is hier rekening mee gehouden.

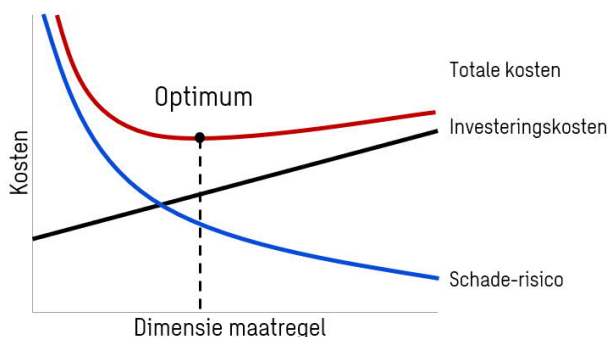
Om tot een economisch optimum te komen en een aanbevolen dimensie, in de vorm van een normering van de maatregel, worden de schade-risico bedragen voor de maatregel beschouwd over de IPO niveau's III (huidig), IV, V, VI en VII. De investeringskosten van een dergelijke regionale dijk zijn in een voorgaande pilot bepaald. (Sweco Nederland B.V., 2022) Deze worden dan ook toegepast binnen deze pilot met enkele aanpassingen. De investeringskosten van de maatregel worden zonder benodigd onderhoud beschouwd. In de huidige situatie is deze immers ook nodig. Verder worden de kosten voor een kering met, bijvoorbeeld, een normering van niveau V verminderd met de kosten voor een kering met normering van niveau III (huidige situatie). Dit leidt vervolgens tot de volgende investeringskosten voor de gehele regionale kering van 1,5 km voor het recreatiepark:

- IPO Niveau III: €0,-
- IPO Niveau IV: €141.000,-
- IPO Niveau V: €312.000,-
- IPO Niveau VI: €480.000,-
- IPO Niveau VII: €726.000,-



### 6.2.3 Economisch optimum maatregelen

Om het economisch optimum van een maatregel te definiëren worden de kosten gebonden aan schade-risico bij de benodigde investeringskosten van de maatregel opgeteld. Gezamenlijk vormen dit de totale kosten van resterende schade risico en investeringskosten, het minimum van dit bedrag geeft het economisch optimum en dus de gewenste dimensie van de maatregel aan. In Figuur 18 is het principe weergegeven.



Figuur 18. Economisch optimum principe.

De kosten gebonden aan schade-risico is eenvoudig te berekenen met de foutenboom. Zo wordt de kans op een bepaalde inundatiediepte vermenigvuldigd met de schadefunctie uit de Waterschadeschatter en de waarde van de inboedel. Zodoende geldt de volgende formule:

$$\text{Schade} - \text{risico} = \sum \text{Kans Inundatiediepte} * \text{Schadefunctie} * \text{Waarde}$$

In deze formule worden de kansen op een bepaalde inundatiediepte vermenigvuldigd met de schade aan de inboedel bij deze respectievelijke diepte en gesommeerd voor alle beschouwde inundatiediepten.

Daarnaast kan ook een tijdsfactor geïntegreerd worden, zodat bepaalde tijdsafhankelijke factoren meegewogen kunnen worden met een voorkeursoplossing. Om de werking hiervan te beschouwen wordt de relatieve jaarlijkse bodemdaling voor een representatief punt in het recreatiepark meegewogen voor drie tijdsstappen: 10, 20 en 30 jaar. De jaarlijkse bodemdaling is geschat op 3,8 mm per jaar. (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica, 2020)

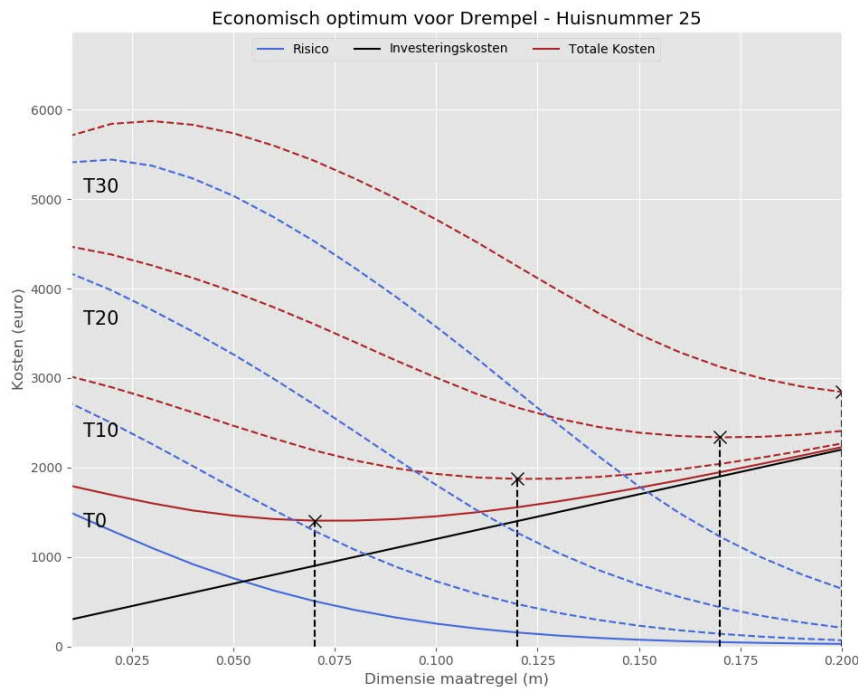
#### Contante Waarde en eindwaarde van het schade-risico bedrag

In de pilot zijn de investeringskosten en de waarde van de objecten bepaald in het heden. Zodoende gelden deze bedragen als Contante Waarde (CW). De effecten van tijd op deze bedragen moeten worden meegerekend. Er van uitgaande dat de toepassing van een maatregel gebeurt in het heden, blijven de bedragen in paragraaf 6.2.2 gedefinieerd als de CW. Het schade bedrag kan daarentegen wel veranderen over tijd, aangezien de vervangingskosten van, bijvoorbeeld, de inboedel zullen stijgen met het inflatiepercentage. Dit is gedefinieerd als de eindwaarde. Als inflatiepercentage wordt het streven van de ECB (Europese Centrale Bank), grofweg overeenkomend met het langdurige gemiddelde inflatiepercentage (LOVCK/LOVC-Hoven en Expertgroep Personenschade, 2022), van 2% overgenomen. De eindwaarde wordt bepaalde aan de hand van de volgende formule:

$$\text{Eindwaarde Schade} - \text{risico voor jaar } N = \text{Schade} - \text{risico} * (1 + 0,02)^{Tn}$$

### Aanleggen van een drempel rondom de woning of bij de deurpost

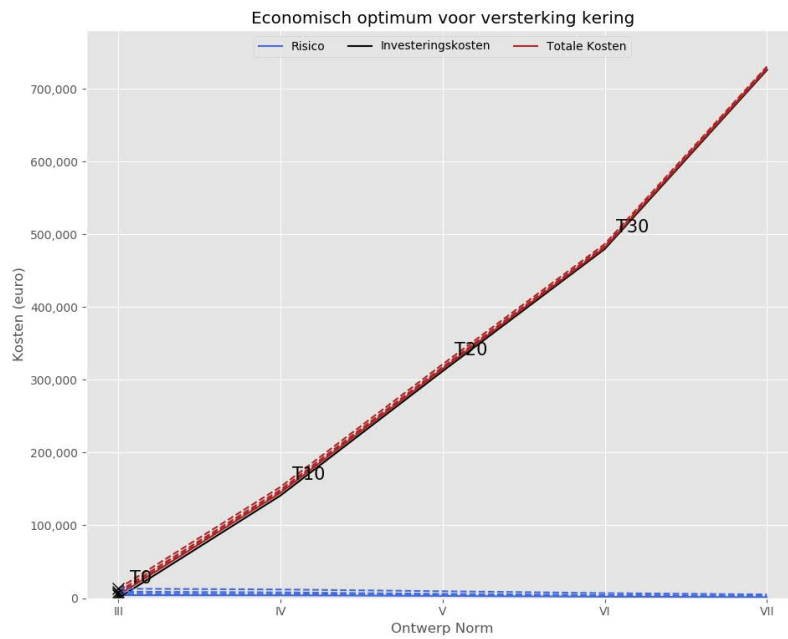
Wederom wordt het object met huisnummer 25 als voorbeeld gebruikt. In Figuur 19 is het schade-risico bedrag, de totale kosten in vier tijdsstappen en de investeringskosten van de drempel gevisualiseerd.



Figuur 19. Economisch optimum voor de maatregel 'Drempel'. Op de horizontale as wordt de dimensie van de maatregel in meters en op de verticale as de kosten in euro's geschematiseerd.

### Verhogen van de normering van de regionale kering t.b.v. de stabiliteit

Bij het bepalen van het schade-risico bedrag en de effectiviteit van de maatregel, wordt het effect van de maatregel over alle objecten binnen het recreatiepark beschouwd en gesommeerd. Het resultaat hiervan is insignificant, aangezien de investeringskosten een factor 100 hoger zijn dan de reductie in schade-risico, zoals is weergegeven in Figuur 20. Dit resultaat is te verwachten aangezien binnen het recreatiepark enkel vijf objecten een maaiveld hebben van NAP +1,1 m of lager.



Figuur 20. Economisch optimum voor de maatregel 'Verhogen normering regionale kering'. Op de horizontale as wordt de dimensie van de maatregel in IPO-klassen en op de verticale as de kosten in euro's geschematiseerd.

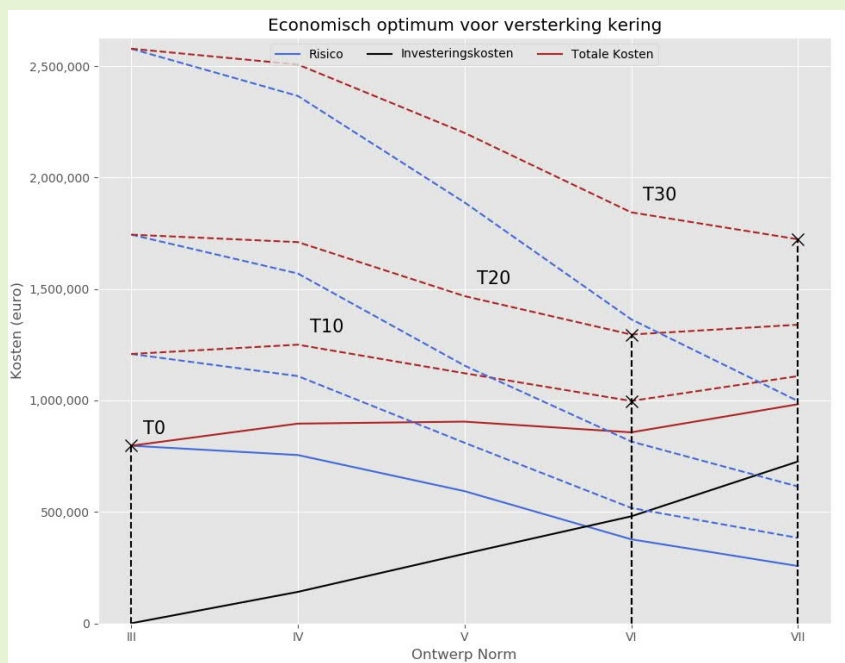
Kader 15. Rekenvoorbeeld effectiviteit maatregelen bij een opschaling van het onderzoeksgebied.

### Rekenvoorbeeld bij opschaling gebied

Om het effect van een dergelijke overkoepelende maatregel toch inzichtelijk te maken, is een hypothetisch scenario aangemaakt. In dit scenario wordt er aangenomen dat het recreatiepark wordt opgeschaald met een factor 200 aan objecten. Binnen dit scenario zullen dan:

- 600 objecten een maaiveld van NAP +1,1 m hebben
- 400 objecten een maaiveld van NAP +0,9 m hebben
- 19.000 objecten een maaiveld groter dan NAP +1,1 m hebben

Dit is zo gekozen omdat de het schade-risico bedrag uit Figuur 20 verdeeld is over drie woningen op NAP +1,1 m, twee woningen op NAP +0,9 m en zou bijvoorbeeld een bestaande woonwijk kunnen voorstellen. Door te schalen wordt het effect van deze duurdere overkoepelende maatregel inzichtelijk, zoals weergegeven in Figuur 21.



Figuur 21. Economisch optimum voor het hypothetisch scenario met de maatregel 'Verhogen normering regionale kering'. Op de horizontale as wordt de dimensie van de maatregel in IPO-klassen en op de verticale as de kosten in euro's geschematiseerd.

## 6.2.4 Effectiviteit maatregelen

Vanuit verschillende inzichten kan de effectiviteit van een maatregel en de gewenste dimensie hiervan bepaald worden. In deze pilot wordt de effectiviteit getoetst op basis van schadereductie door toepassing van de maatregel gedeeld door de investeringskosten van de maatregel. Dit wordt verder toegelicht in deze paragraaf. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de effectiviteit van de maatregel 'versterking kering' niet verder bekeken wordt. De achterliggende reden ligt ten grondslag in paragraaf 6.2.3. Hieruit is gebleken dat de maatregel op grote schaal te duur is t.o.v. de reductie in risico. In Kader 16 is een beschouwing toegevoegd

Om de verschillende maatregelen te kunnen vergelijken en hieraan een beoordeling te geven, wordt gekeken naar het risico bedrag (in euro's) in de situatie zonder maatregel ten opzichte van het risico bedrag met maatregel. Het verschil tussen deze twee bedragen vormt de reductie in risico. Door de reductie te delen door de benodigde investeringskosten wordt de effectiviteit bepaald en is dus dimensieloos. De beschreven methode is zowel toepasbaar op een individueel object, voor maatregel toepasbaar op één object, als meerdere objecten, zoals de versterking van de regionale kering. Door de methode ook voor de verschillende tijdstappen toe te passen wordt een effectiviteit van de maatregel over tijd geschetst. Door te kijken naar de resterende levensduur van het object wordt op deze manier een afgewogen beslissing gemaakt om de meest effectieve orde grootte van de maatregel te bepalen. Gesommeerd worden de volgende parameters en rekenregels gehanteerd:

- Reductie schade =  $Schade, T0 - Schade, Tn$  [€]
  - Waarin  $Tn$  gelijk is aan 10, 20 of 30 jaar
- Effectiviteit maatregel =  $\frac{Reductie\ schade}{Investeringskosten}$  [-]
  - Waarin een hogere score een betere effectiviteit weerspiegelt

Om het verschil in effectiviteit tussen verschillende dimensies te presenteren, is de effectiviteit voor een drempel van 10 cm en 15 cm, circa het economisch optimum voor zichtjaar 0 en 20 respectievelijk, weergegeven in Tabel 7 en Tabel 8 voor object met huisnummer 25.

Tabel 7. Resultaten effectiviteit van een 10 cm hoge drempel voor object met huisnummer 25.

Zicht-jaar	Risico Basis	Risico Maatregel 10 cm	Reductie Maatregel 10 cm	Effectiviteit [-]
0	€ 1.699,12	€ 322,57	€ 1.376,55	1,15
10	€ 2.926,68	€ 890,76	€ 2.035,92	1,70
20	€ 4.316,58	€ 2.097,79	€ 2.218,79	1,85
30	€ 5.343,43	€ 3.911,37	€ 1.432,06	1,19

Tabel 8. Resultaten effectiviteit van een 15 cm hoge drempel voor object met huisnummer 25.

Zicht-jaar	Risico Basis	Risico Maatregel 15 cm	Reductie Maatregel 15 cm	Effectiviteit [-]
0	€ 1.685,32	€ 96,22	€ 1.589,10	0,93
10	€ 2.913,32	€ 302,90	€ 2.610,42	1,54
20	€ 4.299,39	€ 855,46	€ 3.443,93	2,03
30	€ 5.307,92	€ 2.109,99	€ 3.197,93	1,88

Kader 16. Toetsing van de effectiviteit van maatregelen van verschillende schaalniveaus.

#### **Toetsing effectiviteit van individuele en overkoepelende maatregelen**

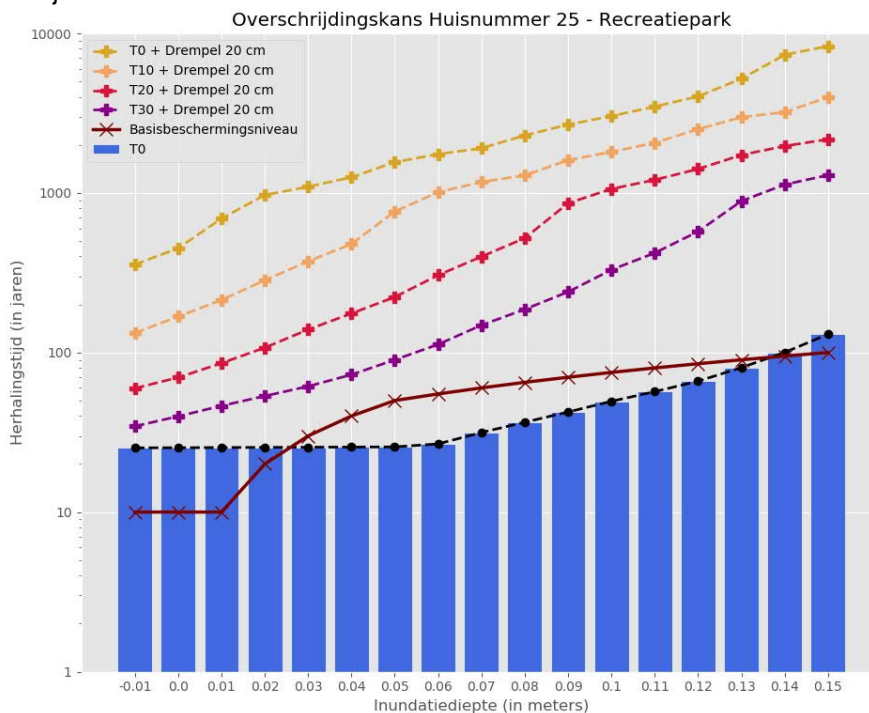
De toetsing van de effectiviteit van de maatregel 'Drempel' is in deze paragraaf gebaseerd op één object. In het geval dat een vergelijking in effectiviteit tussen een overkoepelende maatregel, zoals het versterken van de dijk, en individuele maatregel, zoals de drempel, moet worden getrokken, zouden deze op gelijke schaal beschouwd moeten worden. In deze pilot zou dat dus voor alle objecten in het recreatiepark zijn.

## 6.3 Aanbeveling toe te passen maatregel

Om een aanbeveling te geven omtrent de toe te passen maatregel, moeten de randvoorwaarden voor het object of meerdere objecten gedefinieerd worden. Stel dat het gewenst is dat de overschrijdskans onder het basisbeschermingsniveau gedurende 30 jaar (zichtjaar 2050) moet blijven, waarbij enkel object met huisnummer 25 bekeken wordt. Met paragraaf 6.2.3 kan gesteld worden dat een overkoepelende maatregel, zoals het versterken van de regionale kering, niet toereikend is voor dit object. Zodoende wordt enkel de maatregel met de drempel in beschouwing genomen.

Met Tabel 7 en Tabel 8 kan gesteld worden dat de effectiviteit van een groter gedimensioneerde maatregel toeneemt naarmate het zichtjaar verder in de toekomst ligt, met een maximum van 20 jaar. Hierna blijkt de effectiviteit van de maatregel juist weer af te nemen. Dit is toe te wijden aan het feit dat de bodemdaling tussen T=20 jaar en T=30 jaar is toegenomen. Gelijksortige inundatiediepten in beide tijdschalen zullen door de toegenomen bodemdaling in T=30 jaar vaker tot wateroverlast leiden t.o.v. T=20 jaar. Zodoende neemt ook de effectiviteit van de maatregel na 20 jaar weer iets af.

In combinatie met de resultaten van Figuur 19, waarin het economisch optimum van de maatregel bij T=30 jaar is weergegeven, is de installatie van een 20 cm hoge drempel aanbevolen. Om te verifiëren of de maatregel de overschrijdskans van inundatie reduceert tot onder het basisbeschermingsniveau is de berekening, met de maatregel, uitgevoerd voor T=0, 10, 20 en 30 jaar. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 22. Zoals te zien is in de Figuur 22 wordt er voldaan aan het basisbeschermingsniveau tot zichtjaar 2050.



Figuur 22. Herhalingstijden t.o.v. inundatiediepten voor de situatie van zowel zonder (blauw, T0) als met een drempel van 20 cm (voor T = 0, 10, 20 en 30 jaar) en het basisbeschermingsniveau (donkerrood). Verticale as op logaritmische schaal. De overschrijdskansen voor de basissituatie (blauw, T0) komen overeen met Figuur 16.

## 7. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt een conclusie 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.

### 7.1 Conclusies

#### 7.1.1 De methodiek

In deze pilot is een methodiek gepresenteerd om vanuit een geaccepteerd schade-risico tot een basisbeschermingsniveau te komen. Hiervoor worden op objectniveau (bijv. een woning of een perceel akkerbouw) schadefuncties opgesteld waarbij de relatie wordt beschreven tussen 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 schade-risico. Dit levert een geaccepteerde herhalingstijd voor inundatie. Hierbij wordt afgeweken van de huidige praktijk, omdat het beschermingsniveau geen ondergrens stelt aan een minimale herhalingstijd voor wateroverlast. In de huidige normen is zo'n ondergrens wel opgenomen. Voor nadere toelichting, zie paragraaf 3.5.1.

Vervolgens kan middels de foutenboom-methodiek 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 herhalingstijden. 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 beïnvloed 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.

### 7.1.2 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 watersysteembeheerder 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 schade-risico 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).

## 7.2 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.

### 7.2.1 Basisbeschermingsniveau

In hoofdstuk 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 niet de toepassing in deze pilot. De resultaten zijn daarmee niet direct toepasbaar op een praktijksituatie. Onder de noemer van een pilot, waarbij het gaat om de methode en niet om de nauwkeurigheid van de uitkomsten is vastgesteld dat de informatie uit de Waterschadeschatter voor deze casus representatief genoeg zijn. Wanneer de uitkomsten van de methode betrouwbaar worden geacht, wordt aangeraden om de aannames, die uit de Waterschadeschatter zijn overgenomen, kritisch te beoordelen.



## 7.2.2 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

### 7.2.2.1 *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 nabij gelegen 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.

### 7.2.2.2 *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 3.4, levert dit faalmechanisme een significant aandeel van de totale overschrijdingskans van inundatie. Een stabiliteitsberekening zou uitsluitel 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 6.2.2, aangezien een 'lichtere' of geen maatregel toegepast zou kunnen worden. Dit reduceert de benodigde investeringskosten om het object aan het basisbeschermingsniveau te laten voldoen.

### 7.2.2.3 *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 overschrijdingskans van het Lokaal watersysteem significant lager is dan het Boezemsysteem (zie Figuur 13), zullen wijzigingen van deze vastgestelde faalkans weinig invloed hebben op de totale overschrijdingskans. Tenzij de technische faalkans significant toe -of afneemt en/of de faalkans door andere mechanismen in dezelfde orde grootte vallen als die van het Lokaal watersysteem.

### 7.2.3 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 orde grootte 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. Eenzelfde 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.

## 7.3 Aanbevelingen

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

- 1) Er wordt aanbevolen om de schaa sprong 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 schade-risico hiervan te bepalen. In principe zouden meerdere bouwstenen aan de methode toegevoegd kunnen worden om een groter te kunnen beslaan. Voor de verdere uitwerking van de schaa sprong kan gebruik worden gemaakt van de handvaten uit dit rapport.
- 2) Er wordt aanbevolen om het aantal gemaakte aannames zoveel mogelijk te reduceren. Hiervoor dienen zowel aannames verder uitgewerkt te worden, door bijvoorbeeld het toevoegen van een niveau in de foutenboom. Anderzijds wordt ook aangeraden 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.

## 8. Literatuurlijst

Bestereistijd. (2023). *Bestereistijd.nl*. Opgehaald van Groningen: Weer, klimaat en beste reistijd: <https://www.bestereistijd.nl/nederland/groningen-2939736/#:~:text=De%20gemiddelde%20jaar%20temperatuur%20voor%20Groning en,een%20UV%2Dindex%20van%203>.

LOVCK/LOVC-Hoven en Expertgroep Personenschade. (2022). *Aanbevelingen rekenrente in personenschadezaken*. de Rechtspraak.

Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica. (2020). *Bodemdalingskaart van Nederland*. Opgehaald van Bodemdalingskaart 2.0: <https://bodemdalingskaart.portal.skygeo.com/portal/bodemdalingskaart/u2/viewers/basic/>

Noordhuis, R., & Penning, E. (2021). *Windwerking in meren: effecten en maatregelen*. Utrecht: Kennisimpuls Waterkwaliteit.

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

Royal HaskoningDHV. (2019). *Gebiedsdossier grondwaterwinning De Groeve*. Groningen: Royal HaskoningDHV.

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

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

Sweco Nederland B.V. (2022). *Pilot veiligheidsbenadering regionale keringen*. Amersfoort: STOWA.

Waterbedrijf Groningen. (2023). *Prijs van uw drinkwater*. Opgehaald van Waterbedrijf Groningen: <https://waterbedrijfgroningen.nl/klantenservice/prijs-van-uw-drinkwater/>

Windfinder. (2022, December 23). *Jaarlijkse wind- en weerstatistieken voor Groningen Airport*. Opgehaald van Windfinder: <https://nl.windfinder.com/windstatistics/groningen>

# Bijlage 1. Overzicht gebieden en objecten

Tabel 9. Overzicht van de type gebieden met verschillende objecten binnen het pilotgebied. De gebieden zijn afgeleid middels gebiedskennis samen met de legger van het waterschap. De objecten/functies volgen uit LGN7 en gebiedskennis van het waterschap. De groen gemarkeerde objecten zijn meegenomen in deze pilot.

Objecten			Onderdeel van analyse		Eenheden t.b.v. beschermingsniveau	Faalmechanismen			
Type gebied	Gebied	Functie	Toelichting	Meenemen	Toelichting	Stedelijk water	Regionaal water	Beekstelsysteem	Boezemsysteem
<b>Bergingsgebieden</b>									
	<b>Onner- en oostpolder</b>	Grasland in bergingsgebied	<i>Deze polder wordt gebruikt als bergingsgebied. In het gebied is voornamelijk grasland aanwezig.</i>	Niet	<i>Beperkt economische waarde</i>	nvt	* Inzet bergingsgebied door hoge waterstanden op de boezem * In normale situaties: maalstop door hoge waterstand op de boezem	nvt	* Overstromen vanuit de boezem
		Waterwinning in bergingsgebied	<i>In dit bergingsgebied is een waterwinlocatie. Dit is een vitaal object. Waterwinning Onnen.</i>	2	<i>Vitaal object voor bevolking; hoge gevolgen indien object faalt</i>	nvt	* Overstroming/doorbraak keringen ten tijde van inzet bergingsgebied * Maalstop door hoge waterstand op de boezem	nvt	nvt
	<b>Rolkepolder en Westerbroeksemade polder</b>	Natuur in bergingsgebied	<i>In deze polder is voornamelijk natuur aanwezig. We verwachten dat voor natuur geen wateroverlast op kan treden.</i>	Niet	<i>Zien we niet als een object waar wateroverlast kan optreden.</i>	nvt	nvt	nvt	nvt
<b>Meer / boezemsysteem</b>									
	<b>Zuidlaardermeer</b>	Recreatieparken in het meer onder invloed van de boezem	<i>In het noord-oosten en het zuid-westen liggen twee recreatieparken in het meer dat direct onder invloed van de boezem staat. De bebouwing wordt enkel beschermd door een hogere ligging; er zijn geen kades aanwezig die het meer van het park scheiden. <b>In de pilot bekijken we het recreatiepark in het noord-oosten.</b></i>	1	<i>Gevoelig buitendijks gebied waar veel faalmechanismen samenkomen/van toepassing zijn</i>	-	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem	* Overstroming door hoge afvoer vanuit de Hunze	* Overstroming door hoge waterstanden op de boezem
		Natuur onder invloed van boezem/beekstelsysteem	<i>Aan de oostzijde van het Zuidlaardermeer ligt een groot stuk natuur welke onder invloed van de boezem staat. We verwachten dat voor natuur geen wateroverlast op kan treden.</i>	Niet	<i>Zien we niet als een object waar wateroverlast kan optreden.</i>	nvt	nvt	nvt	nvt
<b>Bemalingsgebied</b>									
	<b>Oostermoer</b>	Bedrijventerrein in bemalingsgebied	<i>Aan de oostzijde van Zuidlaren ligt een laaggelegen bedrijventerrein. Gezien de maaiveldhoogte van het bedrijventerrein bestaat de kant op wateroverlast bij falen van het systeem.</i>	2	<i>Meenemen omdat dit het enige object is waar ook faalmechanismen vanuit stedelijk water op van toepassing zijn</i>	* falen van riolering	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze	* Overstroming van de boezem

	Woningen in bemalingsgebied	<i>In het bemalingsgebied Oostermoer liggen diverse woningen verspreid door de polder met een lage maaiveldhoogte. De woningen zijn beperkt geclusterd.</i>	Niet	<i>De woningen liggen: a) hooggelegen en b) zodanig verspreid dat rioleringsproblemen niet verwacht worden</i>		* falen van riolering wordt niet verwacht, gezien de lage dichtheid van bebouwing	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze	* Overstroming van de boezem
	Infrastructuur (wegen) in bemalingsgebied	<i>In het bemalingsgebied liggen diverse (B-)wegen.</i>	2	<i>Indirecte schadebedrag loopt significant op bij falen van object.</i>	<i>Duur (curve) Diepte (curve)</i>	nvt	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze	* Overstroming van de boezem
	Akkerbouw in bemalingsgebied * oa. bieten/aardappelen/graan -> detailniveau afhankelijk van eenvormigheid van gebied	<i>In het bemalingsgebied liggen diverse akkerbouw percelen</i>	1	<i>Erg diverse groep met types landbouw; korte duur leidt al snel tot hoge schades</i>	<i>Duur (curve) Diepte (curve) Seizoen (curve)</i>	nvt	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze	* Overstroming van de boezem
	Grasland in bemalingsgebied	<i>In het bemalingsgebied liggen diverse graslanden</i>	Niet	<i>Beperkt economische waarde</i>		nvt	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze	* Overstroming van de boezem
	Waterwinning in bemalingsgebied	<i>Waterwinning Annen</i>	Niet	<i>We nemen waterwinning De Groeve wel mee; dit object is semi-identiek</i>		nvt	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze * Hoogwater op de Hunze	* Overstroming van de boezem
	Waterwinning in bemalingsgebied	<i>Waterwinning De Groeve</i>	1	<i>Vitaal object voor bevolking; hoge gevolgen indien object faalt; veel faalmechanismen op van toepassing</i>	<i>Duur (wel/geen schade) Diepte (wel/geen schade)</i>	nvt	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze * Hoogwater op de Hunze	* Overstroming van de boezem
<b>Gasselternijveen</b>	Woningen in bemalingsgebied	<i>In het bemalingsgebied ligt de dorpskern van Gasselternijveen</i>	Niet	<i>Gebied ligt ver bovenstrooms; is weinig gevoelig voor inundatie door problemen op de boezem.</i>		* falen van riolering	* Maalstop door hoge waterstanden op de boezem (?) * Defect gemaal * Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten	* Overstroming van de Hunze * Hoogwater op de Hunze	* Vermoedelijk niet meer onder invloed van de boezem
<b>Buitendijks</b>									
<b>Langs de Hunze</b>	Natuur onder invloed van beekstelsysteem	<i>Langs de Hunze, tussen de keringen, zijn weinig objecten aanwezig. Alleen natuurgebied. We verwachten dat voor natuur geen wateroverlast op kan treden.</i>	Niet	<i>Is natuur; mogen overstroomd: daar is het gebied op ontworpen</i>		nvt	nvt	nvt	nvt
<b>Vrij afwaterend gebied</b>									

<b>Nieuwbouwwijk De Voorde</b>	Woningen in vrij afwaterend gebied	<i>Dit stukje nieuwbouwwijk ligt in een peilgebied welke onder vrij verval direct afwaterd op het Zuidlaardermeer.</i>	1	Woningbouw	<i>Duur (wel/geen schade) Diepte (curve)</i>	* Te lage capaciteit van HWA stelsel	* Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten * Hoge waterstand benedenstrooms van stuw, waardoor afwatering niet mogelijk is	nvt	* Overstroming van de boezem
<b>Rondom Gieten</b>	Akkerbouw in vrij afwaterend gebied	<i>In het vrij afwaterende gebied (met streefpeil in de winter onder maximaal boezempeil) liggen grote percelen met akkerbouw</i>	3	<i>Hoge schadeposten bij inundatie; andere faalmechanismen dan akkerbouw in bemalingsgebied</i>	<i>Duur (curve) Diepte (curve) Seizoen (curve)</i>	nvt	* Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten * Falen van beweegbare stuw op telemetrie	* Overstroming van de Hunze * Hoogwater op de Hunze	* Hoge waterstanden op de boezem
	Grasland in vrij afwaterend gebied	<i>In het vrij afwaterende gebied (met streefpeil in de winter onder maximaal boezempeil) liggen grote percelen met akkerbouw</i>	Niet	<i>Beperkte economische waarde</i>		nvt	* Lokale hydrologische/hydraulische knelpunten * Falen van beweegbare stuw op telemetrie	* Overstroming van de Hunze * Hoogwater op de Hunze	* Hoge waterstanden op de boezem

## Bijlage 2. Geaccepteerd schaderisico

In deze bijlage wordt de uitwerking van de aangenomen geaccepteerd schaderisico bedragen uit paragraaf 2.3.1 voor de drie objecten beschouwd. De volgende uitgangspunten gelden voor het bepalen van het bedrag:

- Geaccepteerd verlies van eigendommen: 1:100 jaar
- Geaccepteerd verlies van inkomen: 1:25 jaar
- Geaccepteerd verlies van vitaal object: 1:1.000 jaar

### **Indirecte schade**

Binnen de pilot is ervoor gekozen om de consequentie, en zo ook het geaccepteerde schaderisico, van indirecte schade door inundatie niet mee te nemen. In vervolgstudies zou deze vorm van schade geïncorporeerd kunnen worden in de toegepaste methode in deze pilot.

### **Het recreatiepark in het noordoosten van het Zuidlaardermeer**

Bij het bepalen van het geaccepteerd schaderisico bedrag voor één woning in het recreatiepark worden twee aspecten beschouwd: inkomstendering en inboedelschade. De waarde van de inboedel is bepaald m.b.v. de Waterschadeschatter (STOWA, 2013) waarbij deze gelijk is gesteld aan de minimale inboedel waarde, €150,- p/m<sup>2</sup>, met een oppervlak van 30 m<sup>2</sup>. Dit komt neer op een inboedelwaarde van €4.500,-.

De huurinkomsten van een woning voor één dag wordt geschat op €65,-. Als aanname wordt verwacht dat, gedurende het hoogseizoen, de woning in totaal twee maanden volledig bezet is. Dit komt neer op een jaarlijks inkomen van €3.900,- p/j. Het geaccepteerd schade-risico bedrag wordt dan berekend met de volgende formule:

$$\text{Schaderisico} = \text{Inboedel} (\text{€}4.500) * \text{kans op verlies} (1/100 \text{ p/j}) + \text{Opbrengst} (\text{€}3.900 \text{ p/j}) * \text{kans op verlies} (1/100 \text{ p/j}) = \text{€}84 \text{ p/j}$$

### **Akkerbouw in het bemalingsgebied Oostermoer**

Eén willekeurige akkerbouwgrond is gekozen in het bemalingsgebied Oostermoer. Het betreft een akkerbouw waar momenteel granen geteeld worden op een oppervlak van ca. 3,4 hectare. De gemiddelde opbrengst van 1 ha granen levert jaarlijks €931,- op. (STOWA, 2013) Voor het geaccepteerd schaderisico bedrag van dit object wordt enkel gekeken naar gedeerde inkomsten. Het geaccepteerd schaderisico bedrag wordt dan berekend met de volgende formule:

$$\text{Schaderisico} = \text{Opbrengst} (\text{€}1550 \text{ p/j}) * \text{hectare} (3,4 \text{ ha}) * \text{kans op verlies} (1/25 \text{ p/j}) = \text{€}210,80 \text{ p/j}$$



***Nieuwbouwwijk 'De Voorde' ten noorden van waterwinning De Groeve***

Bij het bepalen van het geaccepteerd schaderisico bedrag voor één woning in de nieuwbouwwijk wordt enkel gekeken naar de waarde van de inboedel. De waarde van de inboedel, zo'n €250,- p/ m<sup>2</sup>, is bepaald m.b.v. de Waterschadeschatter (STOWA, 2013) waarbij deze gelijk is gesteld aan de waarde van een woning met een oppervlak van 65 m<sup>2</sup>. Dit komt neer op een inboedelwaarde van €16.250,-. Het geaccepteerd schaderisico bedrag wordt dan berekend met de volgende formule:

$$\text{Schaderisico} = \text{Inboedel (€16.250)} * \text{kans op verlies (1/100 p/j)} = \text{€162,50 p/j}$$

## Bijlage 3. Schadefuncties

In deze bijlage wordt het gebruik van de schadefuncties besproken. Als algemene functie (STOWA, 2013, p. 15) voor schade geldt:

$$\begin{aligned} \text{Schade} &= \text{max. directe schade} * \gamma_{\text{diepte}} * \gamma_{\text{duur}} * \gamma_{\text{seizoen}} \\ &+ \text{indirecte schade per dag} * \gamma_{\text{herstel}} \end{aligned}$$

In deze schadefunctie wordt de direct aangebrachte schade vermenigvuldigd met de respectievelijke schadefactor. Deze schadefactor is afhankelijk van bijvoorbeeld inundatie (m) of duur (dagen). In onderstaande figuren zijn de verschillende schadefactoren voor verschillende objecten weergegeven.

Voor bebouwing:

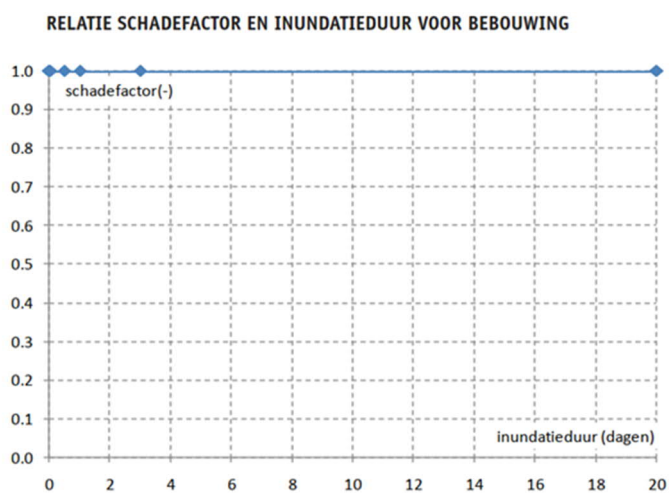


Figure 1 Schadefactor van  $\gamma_{\text{duur}}$  voor bebouwing. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 19).

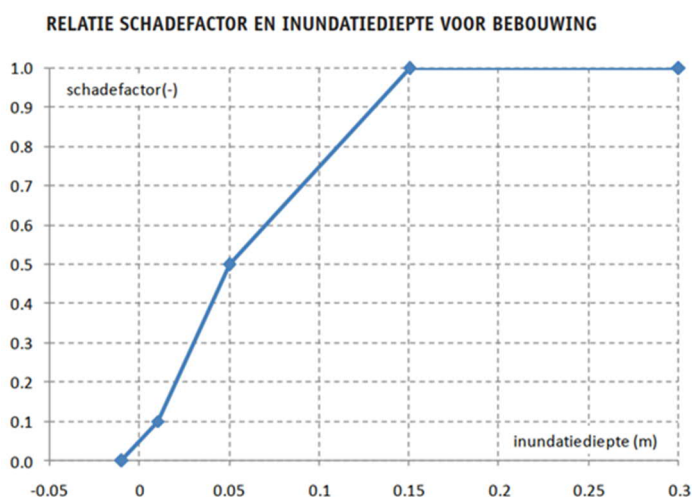


Figure 2 Schadefactor van  $\gamma_{\text{diepte}}$  voor bebouwing. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 19).

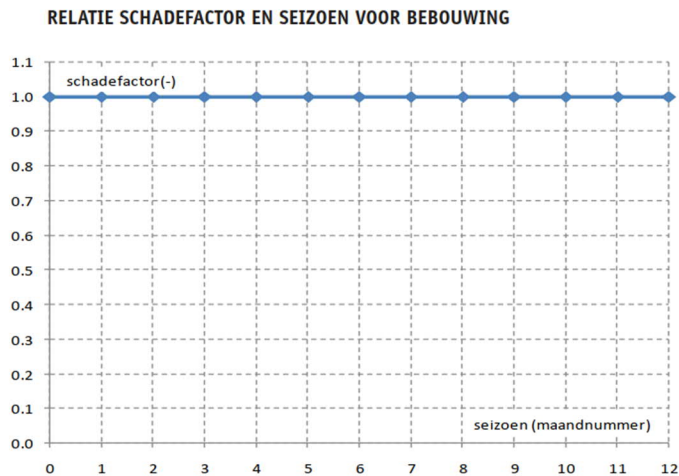


Figure 5 Schadefactor van  $\gamma_{seizoen}$  voor bebouwing. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 20).

Voor gewassen:

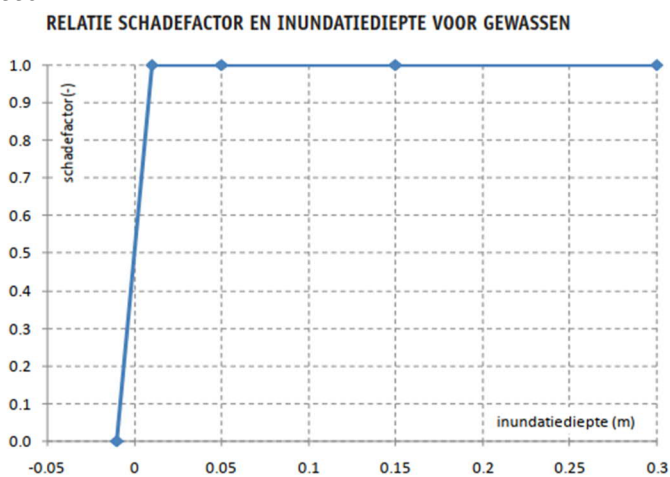


Figure 4 Schadefactor van  $\gamma_{diepte}$  voor gewassen. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 21).

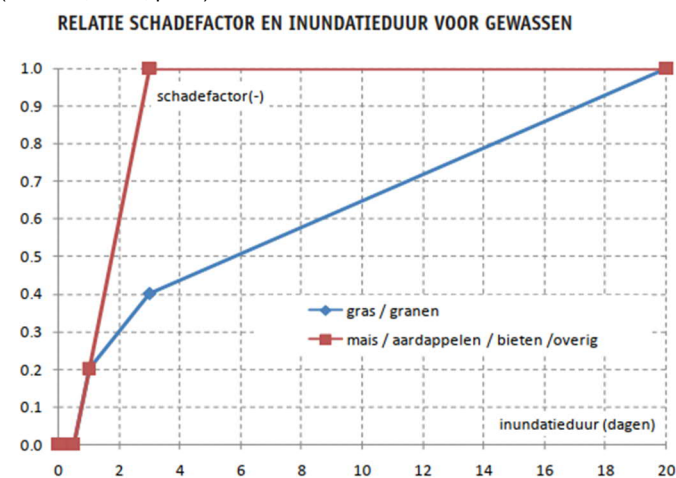


Figure 3 Schadefactor van  $\gamma_{duur}$  voor gewassen. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 22).

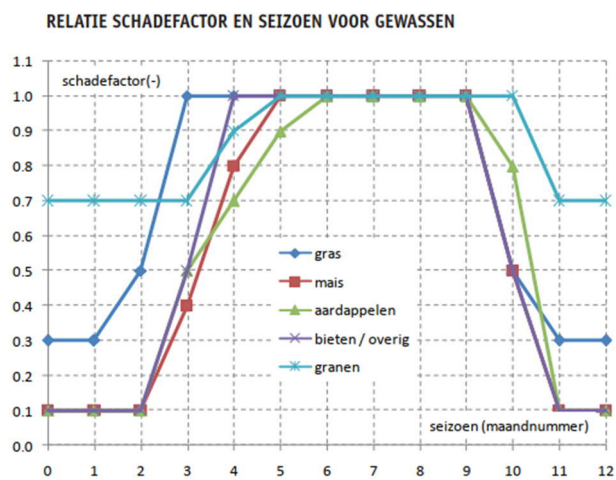


Figure 6 Schadefactor van  $\gamma_{seizoen}$  voor gewassen. Geraadpleegd van (STOWA, 2013, p. 22).

## Bijlage 4. Uitgangspunten foutenboom

In deze bijlage worden de verschillende componenten, toebehorend aan de foutenboommethode voor het recreatiepark, gedefinieerd. De uitgangspunten zijn opgesplitst in vier deelsystemen welke geïdentificeerd zijn voor het recreatiepark:

- Lokaal water
- Boezemsysteem
- Stedelijk water
- Beeksysteem

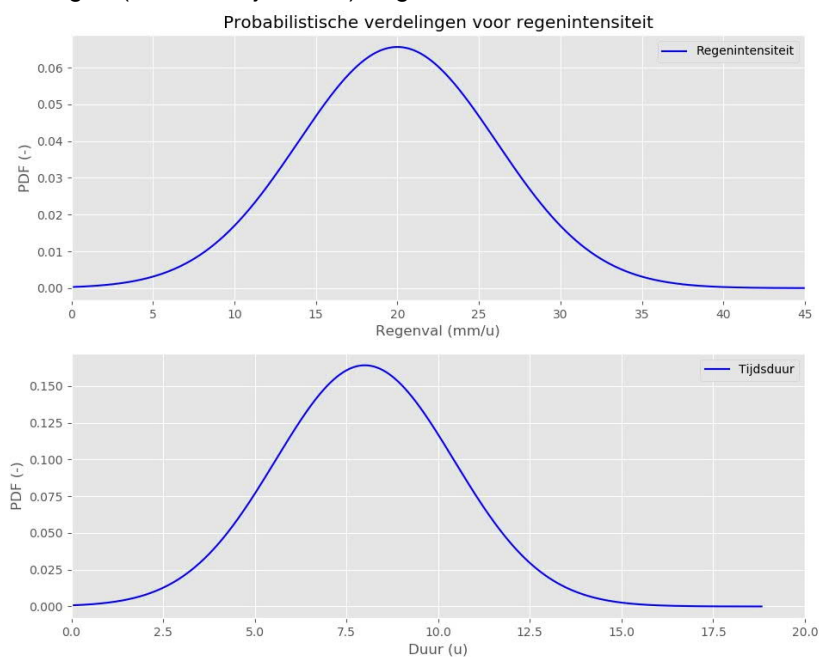
### **Lokaal water**

In deze paragraaf worden de verschillende 'sturende factoren', faalmechanismen en bijbehorende Limit State functies binnen het lokaal water systeem uitgelegd.

#### Sturende factoren

Het lokale watersysteem is alleen actief wanneer er hoge boezemwaterstanden optreden. Dan wordt de stuw gesloten en de noodpomp geplaatst/aangezet.

Het lokale watersysteem kan alleen tot inundaties leiden als na het sluiten van de stuw en het plaatsen van de pomp nog veel neerslag valt in het gebied zelf. Neerslag in het gebied wordt bepaald door twee hypothetisch opgestelde normaal verdelingen; regenintensiteit en tijdsduur, zie Figuur 23. Voor het berekenen van de faalkansen worden van elk van de verdelingen N=100.000 strekkingen genomen. Jaarlijks is het in 139 dagen van het jaar droog en zijn er dus 226 regen (Bestereistijd, 2023) dagen.



Figuur 23. Probabilistische verdeling van regenintensiteit en tijdsduur van de bui.

### Technisch falen stuw

Het technisch falen van de stuw kan optreden in het geval dat de stuwen gesloten zijn gedurende een hoge waterstand op het Zuidlaardermeer en, wanneer het hoogwater wegzakt, deze stuwen weigeren om te openen. Verder zijn de volgende aannames van toepassing op dit faalmechanisme:

Aannames:

- Kans op dat stuwklep niet omhoog wil:  $2,84 \times 10^{-5}$  per vraag (Rijkswaterstaat, 2019)
- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (NAP +1,10 m)
- Kansverdeling boezemwaterstand, uit EKDB-model (2030), hoger dan NAP +0,70 m, zie Figuur 24.

Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat stuwklep niet omlaag wil in combinatie met hoogwater op de boezem
- Betreft een 'Vooraf bepaalde faalkans'

Mogelijke optimalisatie in de methode:

- Met model berekenen hoe snel waterstand oploopt als klep niet omhoog wil

### Capaciteit noodpomp onvoldoende

Het falen door onvoldoende capaciteit van de noodpomp treedt op als de stuwen gesloten zijn en er meer water het gebied inloopt dan de pomp kan wegpompen.

Aannames:

- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (bijv. voor het object met huisnummer 25; NAP +1,10 m)
- Capaciteit noodpomp:  $152 \text{ ha} \cdot 1,2 \text{ l/s} \cdot \text{ha} \cdot 110\% \cdot 3600 = 725 \text{ m}^3/\text{uur}$
- Inzetpeil noodpomp: NAP +0,70 m (waarschijnlijk is op dit moment de bui al deels voorbij, daar is nu geen rekening mee gehouden)
- Grootte afvoergebied: 152 ha (paragraaf 3.3.1)
- Bergingsoppervlakte in gebied: 75,4 ha (paragraaf 3.3.1)
- Neerslag, hoeveelheden, duren via 'probability density function' (PDF), zie Figuur 23.
- Kansverdeling boezemwaterstand, uit EKDB-model, groter dan NAP +0,70 m, zie Figuur 24.
- Als noodpomp het niet aankan, vult het gebied zich geleidelijk tot aan het niveau van de boezem, met de snelheid van het capaciteitstekort

Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat afvoer uit gebied ten gevolge van neerslag groter is dan de capaciteit van de noodpomp en tot inundatie leidt
- Limit State formule:

$$\circ \quad Z = NAP + 1,1 \text{ m} - (NAP + 0,70 \text{ m} + \frac{Q_{in} - Q_{pomp}}{A_{bassin}} \Delta T)$$

Mogelijke optimalisatie in het model:

- Werkelijke capaciteit noodpomp
- Werkelijke inzetwaterstand noodpomp
- Modelberekening om te bepalen hoe snel het gebied volloopt
- Maaiveldcurve voor bergingsoppervlak
- Neerslagverdeling waarheidsgetrouw

#### Technisch falen noodpomp

Het inunderen door technisch falen van de noodpomp treedt op als door instromend water de waterstand in het gebied hoger ligt dan het maaiveld van het object.

Aannames:

- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (NAP +1,10 m)
- Grootte afvoergebied: 152 ha
- Bergingsoppervlakte in gebied: 75,4 ha
- Neerslag, hoeveelheden, duren via 'probability density function' (PDF), zie Figuur 23.
- Kansverdeling boezemwaterstand, uit EKDB-model, groter dan NAP +0,70 m, zie Figuur 24.
- Kans technisch falen noodpomp: 1/250 per vraag

Voorwaarde:

- Stuw is opgetrokken, anders inundaties uit boezemsysteem

Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat falen van de noodpomp in combinatie met neerslag in het gebied tot inundatie leidt
- Limit state formule:

$$\circ \quad Z = NAP + 1,1 \text{ m} - (NAP + 0,70\text{m} + \frac{Q_{in}}{Ab_{assin}} \Delta T)$$

Mogelijke optimalisatie:

- Werkelijke inzetwaterstand noodpomp
- Modelberekening om te bepalen hoe snel het gebied volloopt
- Maaiveldcurve voor bergingsoppervlak
- Neerslagverdeling optimaliseren
- Kans toevoegen: noodpomp niet/te laat beschikbaar

### **Boezemsysteem (Zuidlaardermeer)**

In deze paragraaf worden de verschillende 'sturende factoren', faalmechanismen en bijbehorende Limit State functies binnen het boezemsysteem uitgelegd.

#### Sturende factoren

Twee sturende factoren zijn van toepassing in dit systeem: Hoge waterstand boezem en windopzet. Voor het berekenen van de faalkansen worden van elk van de sturende factoren N=100.000 strekkingen genomen.

### Hoge waterstand boezem (Zuidlaardermeer)

Hoge waterstanden op de boezem treden op bij een combinatie van:

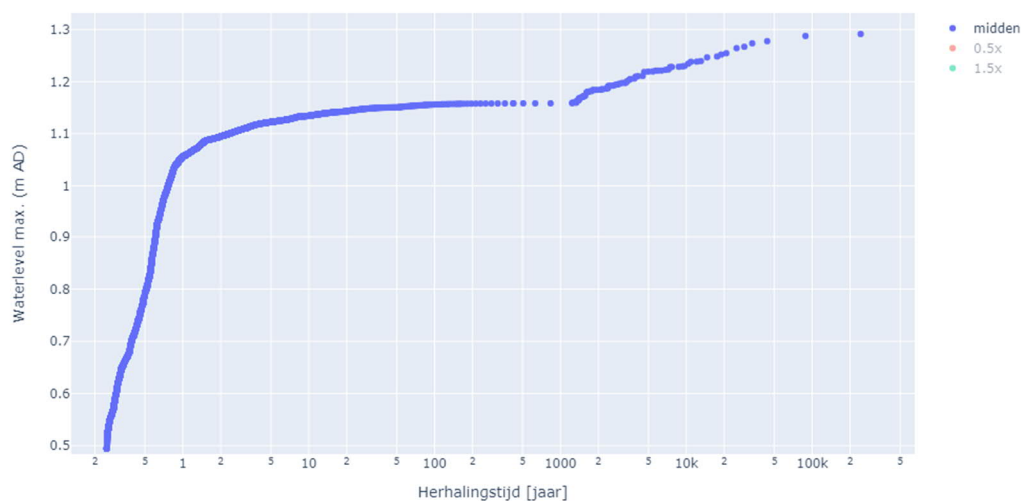
- Geen tot weinig mogelijkheden om te spuien door hoge zeewaterstanden ten gevolge van een storm
- Neerslag op het boezemsysteem

Events die leiden tot een hoge waterstand op de boezem:

- Langdurige buien met grote hoeveelheid neerslag gelijktijdig met verhoogde zeewaterstand ten gevolge van een storm. Deze combinatie kan voorkomen in het stormseizoen (november t/m februari). Deze correlatie is echter niet meegenomen in het rekenmodel.

De waterstanden en de kansverdeling hiervan, zijn gebaseerd uit het EKDB-model (2030), zie Figuur 24.

Herhalingstijden Waterlevel max. (m AD) op locatie MHW\_962



Figuur 24. Herhalingstijden van waterstanden ter plaatse van het Zuidlaardermeer.

### Windopzet

Windopzet leidt tot opstuwing van het water, wat tot een hogere waterstand leidt. De windopzet wordt berekend met de formule uit (Noordhuis & Penning, 2021, p. 3):

$$\Delta h = 0.5 * \kappa * \frac{u^2}{gh} * F * \cos(\Phi)$$

De parameters zijn gelijk aan:

- $\kappa$ , ruwheid tussen wind en water,  $2,2 \times 10^{-6}$  (-)
- $g$ , gravitatie constante,  $9,81 \text{ m/s}^2$
- $h$  (m), waterdiepte Zuidlaardermeer, 1 meter
- $\Phi$  (graden), hoek van de wind. De hoek van de wind is gebaseerd op een gelijkmatige verdeling van  $N$  aantal strekkingen tussen 100 en 270 graden. Deze invalshoek bepaald de strijklengte.



- F (m), strijklengte over het meer. De strijklengte wordt bepaald met de invalshoek, bekeken vanuit het object, met de volgende grenzen:
  - $180 < \Phi < 212$ , F is gelijk aan 2 km
  - $212 < \Phi < 260$ , F is gelijk aan 5,5 km
- u (m/s), windsnelheid. De windsnelheid is gebaseerd op het KNMI meetstation bij het vliegveld Eelde. (Windfinder, 2022) De volgende grenzen en kansen voor wind worden aangenomen:
  - $u_1 = 0.3$  m/s met een kans van 10%
  - $u_2 = 5.1$  m/s met een kans van 60%
  - $u_3 = 16.2$  m/s met een kans van 30%
- Met deze waarden kan een maximale windopzet van 0,162 m voorkomen op het Zuidlaardermeer

### Golfhoogte

Daarnaast speelt de max. optredende golfhoogte een rol bij het optreden van o.a. 'overtopping'. Hierbij wordt een maximale golfhoogte van 0,5 m aangenomen. Dit wordt gezien als een zeer conservatieve aanname.

### Technisch falen stuw

Het technisch falen van de stuw kan optreden in het geval van een verwachte hoge waterstand in het Zuidlaardermeer en de stuwen niet willen sluiten. Verder zijn de volgende aannames van toepassing op dit faalmechanisme:

Aannames:

- Kans op dat stuwklep niet omhoog wil:  $2,84 \times 10^{-5}$  per vraag (Rijkswaterstaat, 2019)
- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (NAP +1,10 m)
- Kansverdeling boezemwaterstand uit EKDB-model (2030)
- Incorporatie windopzet
- Waterstand recreatiegebied stijgt gelijk mee met boezemwaterstand

Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat stuwklep niet omhoog wil in combinatie met hoogwater op de boezem en windopzet in het Zuidlaardermeer
- Betreft een 'Vooraf bepaalde faalkans'

Mogelijke optimalisatie:

- Met model berekenen hoe snel waterstand oploopt als klep niet omhoog wil

### Doorbraak regionale kering door overtopping

Door overtopping kan de regionale kering aan de binnenberm eroderen. Dit leidt tot een mogelijke doorbraak van de kering en, als consequentie, tot inundatie van het recreatiepark. Hierbij zijn de volgende aannames van toepassing:

- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (NAP +1,10 m)
- Kruinhoogte: kruinhoogte vermeld in legger (NAP +1,80 m)
- Kansverdeling boezemwaterstand uit EKDB-model (2030)
- Windopzet: 3 klassen windsnelheid, zoals beschreven onder het kopje 'windopzet'
- Golfoploop: +0,5 m

- Als overtopping plaatsvindt dan breekt de kering en inundeert het gebied zich gelijk tot het niveau van de boezem

#### Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat waterstand boezem ( $H_{\text{boezem}}$ ) + windopzet ( $H_{\text{windopzet}}$ ) + golfoploop ( $H_s$ ) groter is dan de kerende hoogte
- De Limit State kan enkel optreden als de faalkansdefinitie optreedt. Deze wordt geschreven als:  $\text{NAP} + 1,8 \text{ m} < H_{\text{boezem}} + H_{\text{windopzet}} + H_s$
- Limit State formule:  $Z = \text{NAP} + 1,1 \text{ m} - (H_{\text{boezem}} + H_{\text{windopzet}})$

#### Mogelijke optimalisatie:

- Werkelijke hoogtes keringen
- Golfoploop nader detailleren op basis van windsnelheid
- Tijdsfactor toevoegen voor moment tussen overtopping en doorbraak

#### Doorbraak regionale kering door instabiliteit

Hoge waterstanden op de boezem kunnen leiden tot instabiliteit van de kering waardoor een doorbraak kan optreden. Als consequentie inundeert het achterliggende recreatiepark. Hierbij zijn de volgende aannames van toepassing

#### Aannames:

- Maaiveldhoogte object: hoogte woning (NAP +1,10 m)
- Kansverdeling boezemwaterstand, uit EKDB-model (2030), zie zie Figuur 24.
- Als kering doorbreekt, dan vult het gebied zich gelijk tot het niveau van de boezem
- De kering is genormeerd op een herhalingsijd van T100. De toelaatbare doorbraakkans voor deze regionale kering is gesteld aan 0,20 keer de normering. (STOWA, 2015) Zodoende wordt aangenomen dat instabiliteit van de kering optreedt bij een waterstand bij een herhalingsijd van eens in de 500 jaar: NAP +1,158 m (o.b.v. het EKDB-model (2030)).
- Windopzet: 3 klassen windsnelheid, zoals beschreven onder het kopje 'windopzet'.

#### Methode:

- Faalkansdefinitie: kans dat kering doorbreekt vanaf 1/500 jaar waterstand (NAP +1,158 m).
- De Limit State kan enkel optreden als de faalkansdefinitie optreedt. Deze wordt geschreven als:  $\text{NAP} + 1,158 \text{ m} > H_{\text{boezem}} + H_{\text{windopzet}}$
- Limit State formule:  $Z = \text{NAP} + 1,158 \text{ m} - (H_{\text{boezem}} + H_{\text{windopzet}})$
- Vertaling Limit State naar faalkans: Aantal gevallen dat  $Z < 0$  /N /aantal dagen jaar

#### Mogelijke optimalisatie:

- Stabiliteitsberekeningen met model
  - Afschuivingspatronen
  - Piping
  - Stabiliteit buitenwaarts
  - Stabiliteit binnenwaarts



# Bijlage 5. Probabilistische relaties tussen faalmechanismen

In deze bijlage worden de wiskundige probabilistische relaties en rekenregels tussen de verschillende faalmechanismen gedefinieerd. Dit is opgedeeld voor de twee deelsystemen welke een plaats hebben binnen het recreatiepark:

- Lokaal water
- Boezemsysteem

## Relaties tussen de faalkansen

De faalkansen van elk faalmechanisme maar ook de systemen en het top-event kunnen geschreven worden als een formule van Pf. Waarbij Pf de kans op falen in één jaar weergeeft. De formules voor de foutenboom uit Figuur 9 worden van links naar rechts per vertakking beschreven:

### Niveau 1 - Top-event (OF-poort)

$$Pf_{Top-event} = 1 - [1 - Pf_{Lokaal\ water}] * [1 - Pf_{Boezemsysteem}]$$

### Niveau 2 - Lokaal water (OF-poort)

$$Pf_{Lokaal\ water} = 1 - [1 - Pf_{inundatie\ stuwen}] * [1 - Pf_{inundatie\ noodpomp}]$$

### Niveau 2 - Boezemsysteem (OF-poort)

$$Pf_{Boezemsysteem} = 1 - [1 - Pf_{inundatie\ hoge\ waterstand}] * [1 - Pf_{inundatie\ regionale\ keringen}]$$

In de volgende secties worden de formules voor de vertakkingen Lokaal water en Boezemsysteem verder gedefinieerd.

## Vertakking Lokaal water

### Niveau 3 - Inundatie door falen stuwen (EN-poort)

$$Pf_{inundatie\ stuwen} = Pf_{tech.\ stuwen} * Pf_{Noodpomp}$$

### Niveau 3 - Inundatie door falen noodpomp (EN-poort)

$$Pf_{inundatie\ noodpomp} = Pf_{Stuwen\ gesloten} * Pf_{Noodpomp}$$

### Niveau 4 - Technisch falen stuwen (EN-poort)

$$Pf_{tech.\ stuwen} = Pf_{stuwen\ openen\ niet} * Pf_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m: Dagbasis}$$

Waarin de parameters gebaseerd zijn op vooraf bepaalde faalkansen:

- $Pf_{stuwen\ openen\ niet} = 2,84 * 10^{-5}$  [per vraag]
- $Pf_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m: Jaarbasis} = 2,597$  [1/jaar], aantal vragen per jaar
  - Deze kans wordt vertaald naar een dagelijkse gebeurtenis waarop een regenbui EN hoogwater op de boezem voorkomt op dezelfde dag
  - $Pf_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m: Dagbasis} = \frac{Pf_{Waterstand\ Boezem: Jaarbasis}}{\text{Aantal jaarlijkse regendagen}}$
  - $Pf_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m: Dagbasis} = \frac{2,597}{226}$  [1/jaar],
- $Pf_{tech.\ stuwen} = 3,26 * 10^{-7}$  [1/jaar]

#### Niveau 4 - Capaciteit noodpomp onvoldoende en technisch falen (OF-poort)

$$P_{f_{Noodpomp}} = 1 - [1 - P_{f_{capaciteit\ noodpomp}}] * [1 - P_{f_{tech.\ falen\ noodpomp}}]$$

Waarin de faalkansen bepaald worden a.d.h.v. Limit State functies en 'N' simulaties:

- $P_{f_{capaciteit\ noodpomp}} = \frac{N_{1faalt}}{N_{simulaties}} * \text{Aantal jaarlijkse regendagen [1/jaar]}$
- $P_{f_{tech.\ falen\ noodpomp}} = \frac{N_{2faalt}}{N_{simulaties}} * P_{f_{technisch\ falen\ noodpomp}} [1/jaar]$
- $P_{f_{technisch\ falen\ noodpomp}} = 1/250$  [per vraag]
- $P_{f_{Noodpomp}}$  is vermenigvuldigd met het aantal jaarlijkse regendagen (226)

#### Niveau 4 - Hoge waterstand op de boezem; stuwen zijn opgetrokken

$$P_{f_{Stuwen\ gesloten}} = P_{f_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m; Dagbasis}}$$

Waarin de parameters gebaseerd zijn op vooraf bepaalde faalkansen:

- $P_{f_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m; Jaarbasis}} = 2,597$  [1/jaar], aantal vragen per jaar
  - Deze kans wordt vertaald naar een dagelijkse gebeurtenis waarop een regenbui EN hoogwater op de boezem voorkomt op dezelfde dag
  - $P_{f_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m; Dagbasis}} = \frac{P_{f_{Waterstand\ Boezem; Jaarbasis}}}{\text{Aantal jaarlijkse regendagen}}$
  - $P_{f_{Waterstand\ Boezem > NAP+0,7\ m; Dagbasis}} = \frac{2,597}{226} = [1/jaar]$ ,

### **Vertakking Boezemsysteem**

#### Niveau 3 - Inundatie door falen stuwen (EN-poort)

$$P_{f_{inundatie\ hoge\ waterstand}} = P_{f_{tech.\ stuwen}} * P_{f_{waterstand\ boezem}}$$

#### Niveau 4 - Technisch falen stuwen, niet op te trekken

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

#### Niveau 4 - Hoge waterstand en opstuwing op het Zuidlaardermeer (OF-poort)

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

Waarin de faalkansen bepaald worden a.d.h.v. Limit State functies en 'N' simulaties:

- $P_{f_{hoge\ waterstand\ boezem}} = \frac{N_{1faalt}}{N_{simulaties}}$  [1/jaar]
- $P_{f_{hoog\ water\ en\ opstuwing}} = \frac{N_{2faalt}}{N_{simulaties}}$  [1/jaar]

#### Niveau 3 - Inundatie door falen noodpomp (OF-poort)

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

#### Niveau 4 - Doorbraak door overtopping

$$P_{f_{overtopping}} = \frac{N_{faalt}}{N_{simulaties}}$$
 [1/jaar]

#### Niveau 4 - Doorbraak door instabiliteit

$$P_{f_{doorbraak\ door\ instabiliteit}} = \frac{N_{faalt}}{N_{simulaties}}$$
 [1/jaar]

Together with our clients and the collective knowledge of our 18,500 architects, engineers and other specialists, we co-create solutions that address urbanisation, capture the power of digitalisation, and make our societies more sustainable.

Sweco – Transforming society together