

Aanbevelingen voor verbeteringen van slachtofferberekeningen

Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie



Aanbevelingen voor verbeteringen van slachtofferberekeningen

Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie

Auteur(s)

Stephan Rikkert

David Stouten

Bas Kolen

Marit Zethof

Aanbevelingen voor verbeteringen van slachtofferberekeningen

Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Durk Riedstra
Referenties	Referenties
Trefwoorden	overstroming, slachtoffers, evacuatie, SSM

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	30-01-2025
Projectnummer	11210365-009
Document ID	11210365-009-ZWS-0001
Pagina's	68
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Stephan Rikkert David Stouten Bas Kolen Marit Zethof	

Samenvatting

In 2017 is de Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie opgericht, bestaande uit Deltares, HKV, RWS en TU Delft. De intentie van de kennisalliantie is om gezamenlijk kennis te ontwikkelen op het gebied van slachtoffers en evacuatie, en deze kennis vervolgens om te zetten in bruikbare methoden en modellen. In het kader hiervan, zijn in de periode 2017 tot en met 2024 verschillende studies en experimenten uitgevoerd door de partners van de kennisalliantie. Dit rapport geeft een overzicht van de nieuwe inzichten en methoden die uit de alliantie zijn voortgekomen.

Concreet is voorgesteld om de methodiek voor evacuatie- en slachtofferberekeningen uit te breiden door rekening te houden met aankomsttijden. Op die manier wordt onderscheid gemaakt in gebieden waar het water snel komt nadat een dijk is doorgebroken en gebieden waar het nog lang duurt voordat het water komt. Deze extra tijd geeft mensen meer kans om te vluchten uit het gebied. De voorgestelde methode bouwt voort op de evacuatiebomen die per gebied zijn vastgesteld. Op die manier wordt ook recht gedaan aan het type gebied waarin de overstroming plaats vindt (kust-, overgang- en rivierengebied) en het verwachte verloop van een evacuatie.

Tegelijkertijd is het onzeker hoe gunstig het proces van evacueren en vluchten verloopt. Hoe meer mensen er gaan evacueren en vluchten, des te groter het aantal mensen dat onderweg getroffen kan worden, indien het proces van evacueren en vluchten minder gunstig verloopt. Die mensen die onderweg getroffen worden, lopen een nog grotere kans om te komen te overlijden. Andersom is er uiteraard ook de kans dat het proces gunstiger verloopt, waardoor juist meer mensen het gebied uit zijn. Naast het meenemen van aankomsttijden, is een methode voorgesteld om een bandbreedte te bepalen voor de onzekerheid in de locatie waarop mensen worden blootgesteld. Dit biedt ondersteunende informatie bij het bepalen van een evacuatiestrategie.

Aanbevolen wordt om de aankomsttijd mee te nemen bij het bepalen van het aantal slachtoffers. De methodiek is uitgewerkt van een tweetal case studies. De methodiek is zo opgesteld dat deze kan worden geïmplementeerd in de bestaande Schade en Slachtoffer Module (SSM). De focus lag hierbij voornamelijk op de standaardmethode die in SSM wordt gebruikt bij slachtofferberekeningen.

Om een solide onderbouwing te bieden voor evacuatie- en slachtofferschattingen, is verdere kennisontwikkeling nodig. Aanbevolen wordt om de bestaande Flood Fatality Database verder uit te breiden. Dit vergt een continue inspanning. Een toegewijd team aanwijzen hiervoor kan helpen bij het verzamelen van data van eerdere overstromingen en bij nieuwe overstromingen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Overzicht eerdere onderzoeken	7
1.3	Doelstelling	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Achtergrond	10
2.1	Toepassingsgebied	10
2.2	Huidige methodiek voor mortaliteit- en slachtofferberekeningen	10
2.3	Belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit eerder werk van de kennisalliantie	14
2.3.1	Verzamelen van empirische data over slachtoffers en evacuatie	15
2.3.2	Informatie over sterkte van gebouwen	15
2.3.3	Informatie over de mortaliteit	15
2.3.4	Evacuatie en modellen	16
2.3.5	Gedrag en communicatie	17
2.4	Effect van keuzes en aannames in huidige methode op resultaten	17
2.4.1	Inwoners in een gebied	17
2.4.2	Uitvoering evacuatie	17
2.4.3	Kenmerken van een overstroming	18
2.4.3.1	De invloed van een ontgrondingskuil	19
2.4.4	Mortaliteitsfuncties	21
2.4.5	Locatie van blootstelling	21
2.4.6	Beschikbare tijd	21
2.5	Overstromingen juli 2021 (Duitsland)	22
3	Aangepaste methodiek voor evacuatie- en slachtofferberekeningen	26
3.1	Inleiding	26
3.2	Meenemen van aankomsttijd	26
3.2.1	Methodiek	28
3.2.2	Aannames en overwegingen	29
3.3	Effect van onzekerheid in locatie van blootstelling	30
3.4	Combinatie	32
4	Case studies	33
4.1	Overzicht	33
4.2	Uitwerking overgangsgebied	33
4.3	Uitwerking bovenrivierengebied	37
5	Discussie	40

6	Conclusies en aanbevelingen	43
6.1	Conclusies	43
6.2	Aanbevelingen om bevindingen toe te passen	43
	Literatuur	45
A	Gebouwsterkte en overstromingslachtoffers in Nederland	49
B	Vluchtfracties	55
B.1	Traject 16-2	55
B.2	Traject 36-2	62

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In 2016 werd het belang onderstreept van het blijven ontwikkelen van kennis op het gebied van waterveiligheid en crisismanagement, met specifieke aandacht voor mogelijkheden tot evacuatie en het inschatten van het aantal slachtoffers bij overstromingen. Om deze kennisontwikkeling te bevorderen en beschikbare middelen optimaal te benutten, werd destijds een plan voorgesteld voor het oprichten van een kennisalliantie (De Bruijn, 2016). Deze alliantie had als doel om gegevens en resultaten te delen en gezamenlijk een gedragen kennisagenda uit te voeren.

De kennisalliantie, bestaande uit Deltares, HKV, RWS en TU Delft is opgericht met de intentie om gezamenlijk kennis te ontwikkelen op het gebied van slachtoffers en evacuatie, en deze kennis vervolgens om te zetten in bruikbare methoden en modellen. Deze modellen zullen vervolgens hun weg vinden naar beleidsvelden zoals normering, crisismanagement en ruimtelijke adaptatie.

Centraal in de samenwerking staan de volgende twee onderzoeksvragen:

- 1 Hoe kan evacuatie effectief worden uitgevoerd en wat bepaalt de effectiviteit?
- 2 Hoe kan de mortaliteit en het aantal slachtoffers het beste worden bepaald, rekening houdend met nieuwe kennis over evacuatie, gedrag, gebouwsterkte en andere factoren?

De kennisagenda bestaat uit 3 fasen. De eerste fase beslaat het ontwerpen, publiceren en vullen van een database, waarin overstromingen per gebeurtenis zijn beschreven, in combinatie met gedetailleerde gegevens van overstromingsslachtoffers en evacuatiestrategieën. In fase twee is onderzoek gedaan naar de volgende thema's:

- Gebouwen en mortaliteit
- Evacuatie en modellen
- Communicatie en gedrag
- Mortaliteit

Dit rapport richt zich op de derde fase van het project, waarin de nadruk ligt op het samenbrengen en integreren van de opgedane kennis in een vernieuwde set methodes en tools. Daarbij worden concrete aanbevelingen gedaan voor de toepassing van deze nieuwe inzichten binnen de drie beleidsdomeinen: risicoanalyses voor waterveiligheid, ruimtelijke ordening en crisisbeheersing. Zo wordt ervoor gezorgd dat de ontwikkelde kennis effectief kan worden ingezet in de praktijk.

1.2 Overzicht eerdere onderzoeken

Fase 1 en 2 van de kennisagenda, zoals besproken in paragraaf 1.1 en in De Bruijn (2016), hebben diverse resultaten opgeleverd. In Tabel 1-1 wordt per jaar een beknopte beschrijving gegeven van de belangrijkste uitkomsten van de kennisalliantie, met daarbij een verwijzing naar de bijbehorende opgeleverde bronnen en rapporten.

Tabel 1-1. Overzicht en tijdlijn resultaten van de Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie en gerelateerde onderzoeken door Kennisalliantiepartners.

Jaar	Resultaatbeschrijving
2016	In 2016 is een onderzoeksvoorstel geschreven om een kennisalliantie op te starten op het gebied van evacuatie en overstromingslachtoffers (De Bruijn, 2016).
2017-2018	In 2017 en 2018 is gewerkt aan een ontwerp en ontwikkeling van een database van overstromingslachtoffers (http://floodfatalities.tudelft.nl/floodfatality). Deze is gevuld met verschillende overstromingsgebeurtenissen en bijbehorende data.
2019	In 2019 is gewerkt aan de volgende onderdelen (De Bruijn, 2019): <ul style="list-style-type: none"> Analyseren van de sterkte van gebouwen bij een overstroming en de relatie tussen gebouwsterkte en mortaliteit (Westerik, 2019a); Het analyseren van communicatie en het gedrag van mensen en het effect daarvan op evacuatie, gebruik gemaakt van het "Handbook Warning", zoals opgesteld door de USACE (Kolen, 2019). Ook is onderzoek gedaan naar het toepassen van dit handboek met behulp van LifeSim voor de gemeente Dordrecht (Dannenbergh, 2020) Analyse van data in de overstromingslachtoffer database (Westerik, 2019b).
2020	In 2020 is onderzoek gedaan storylines en evacuatiebomen inclusief het effect van onzekerheden. Deze zijn uitgewerkt voor Dordrecht en de Gelderse Vallei (De Bruijn en Kolen, 2020). Door de TU Delft is in een TKI project onderzoek gedaan naar de sterkte van gebouwen (Korswagen et al., 2021). Daarnaast is onderzoek gedaan naar het effect van de modelresolutie en verschillende onzekere parameters, zoals leeftijd, op de overstromingsmortaliteit (Brussee, 2020; Brussee et al., 2021).
2021	In 2021 is onderzoek gedaan naar het meenemen van aankomsttijden in de analyse van slachtofferisico's (De Bruijn en Maas, 2022). Ook is gekeken naar de mogelijkheid om de evacuatiefracties te verbeteren door de onzekerheid in de beschikbare tijd te verkleinen. Hiervoor is op basis van nieuwe kennis van waterkeringen (uit WBI) en expert judgement een methode opgesteld en toegepast (Knops, Rongen en Kolen, 2022).
2022	In 2022 is het zomerhoogwater 2021 geanalyseerd en zijn lessen getrokken voor slachtofferanalyses (Van Kester en Maas, 2023). Daarnaast is er specifiek onderzoek (inclusief interviews) gedaan naar het evacuatiegedrag en de rol van berichtgeving voor kwetsbare groepen (Rudolph, Van den Berg & Kolen, 2022)
2023	In 2022 is het zomerhoogwater 2021 geanalyseerd en zijn lessen getrokken voor slachtofferanalyses (Van Kester en Maas, 2023). Daarnaast is er specifiek onderzoek (inclusief interviews) gedaan naar het evacuatiegedrag en de rol van berichtgeving voor kwetsbare groepen (Rudolph, Van den Berg & Kolen, 2022)

1.3 Doelstelling

Deze rapportage beslaat de laatste fase van de kennisalliantie. Het doel in deze fase is om de opgedane kennis om te zetten in concrete adviezen voor aanpassing van de Schade en Slachtoffer Module (SSM) (Slager en Wagenaar, 2017), onderbouwd met (vereenvoudigde) rekenvoorbeelden. Daarnaast zal een onderzoeksagenda worden opgesteld, waarin wordt aangegeven welke vragen er in de komende jaren nog relevant zijn of gaan worden die de inschatting van slachtoffers en evacuatie verder kunnen verbeteren en bijkomende onzekerheden verkleinen.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de huidige methode voor het schatten van de mortaliteit, hoe evacuatie daarin een rol speelt en hoe daar vervolgens de slachtofferaantallen mee geschat worden. Daaraan is ook een beschouwing toegevoegd over hoe onzekerheden in keuzes en aannames doorwerken op de evacuatie- en slachtofferschattingen. Daarbij is ook rekening gehouden met conclusies en aanbevelingen uit eerdere resultaten van de Kennisalliantie. In hoofdstuk 3 is een aangepaste methodiek voorgesteld, waarin rekening wordt gehouden met aankomsttijden van overstromingen (ruimtelijke differentiatie) en de onzekerheid in locatie van blootstelling.

De methodiek is in hoofdstuk 4 uitgewerkt aan de hand van twee case studies. In hoofdstuk 5 worden aannames en bevindingen bediscussieerd en hoofdstuk 6 bevat de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

2 Achtergrond

2.1 Toepassingsgebied

In de huidige praktijk worden slachtofferberekeningen gemaakt voor verschillende toepassingen. Hierbij spelen zowel schattingen gegeven een scenario een rol als de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers of slachtofferisico's. Belangrijke toepassingen zijn:

- Normeringstudies van waterkeringen. Hierbij wordt de 'verwachtingswaarde' van het aantal slachtoffers berekend. Deze wordt gebruikt voor de MKBA analyse, voor de LIR analyse wordt dit vertaald naar een basisveiligheid (lokale kans op overlijden door overstroming rekening houdend met evacuatie).
- Crisisbeheersing en scenarioanalyse. Hierbij worden slachtofferschattingen gegeven een dreigingsscenario. Het gaat hierbij om een conditionele situatie, gegeven een verwachting van beschikbare tijd tot een hoogwater, een evacuatiestrategie en mogelijk een dijkdoorbraak en overstroming waarbij er mogelijk ook meer informatie is over kritieke plekken in waterkeringen, inwoners en verschillende vormen van evacuatie etc.
- Ruimtelijke inrichting en Meerlaagsveiligheid. In het kader van Water en Bodem sturend wordt aangegeven dat er voldoende vluchtplaatsen moeten zijn als evacuatie niet mogelijk is.

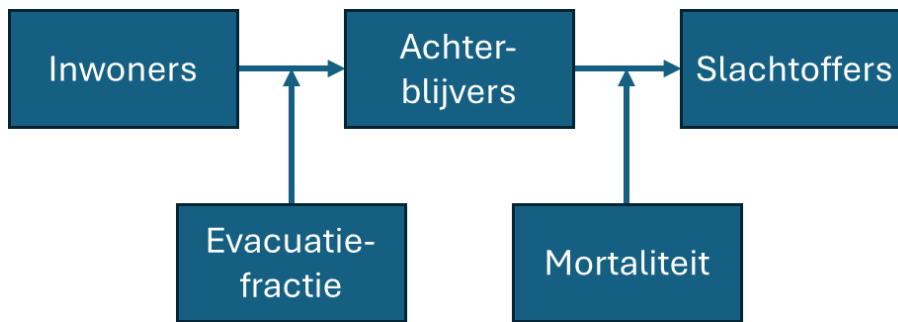
In dit rapport richten we ons op de standaardmethode voor het berekenen van slachtoffers waarbij rekening gehouden wordt met preventieve evacuatie. Hierbij wordt op basis van een dreiging voor de doorbraak gestart met een evacuatie waarbij het doel is dat iedereen tijdig het gebied heeft verlaten. De evacuatiefractie is de verwachtingswaarde van het aantal mensen dat op het moment van de dijkdoorbraak het bedreigd gebied heeft verlaten. Dit rapport richt zich op 1) het beter beschrijven van evacuatieproces inclusief de evacuatie na de doorbraak 2) het verbeteren van de slachtofferschattingen.

Er zijn ook andere vormen van evacuatie zoals verticale evacuatie, hierbij schuilen mensen in het overstroomd gebied omdat het verlaten niet mogelijk of wenselijk is. Na een overstroming zal men alsnog het gebied verlaten wat we redden of vluchten noemen. Binnen SSM kan hier al mee gerekend worden in de maatwerkoplossing. Voor een bredere beschouwing wordt verwezen naar het 'verhaal van de evacuatiefractie' zoals dat voor ministerie van IenW is opgesteld voor de herijking van de normering (Kolen 2023).

2.2 Huidige methodiek voor mortaliteit- en slachtofferberekeningen

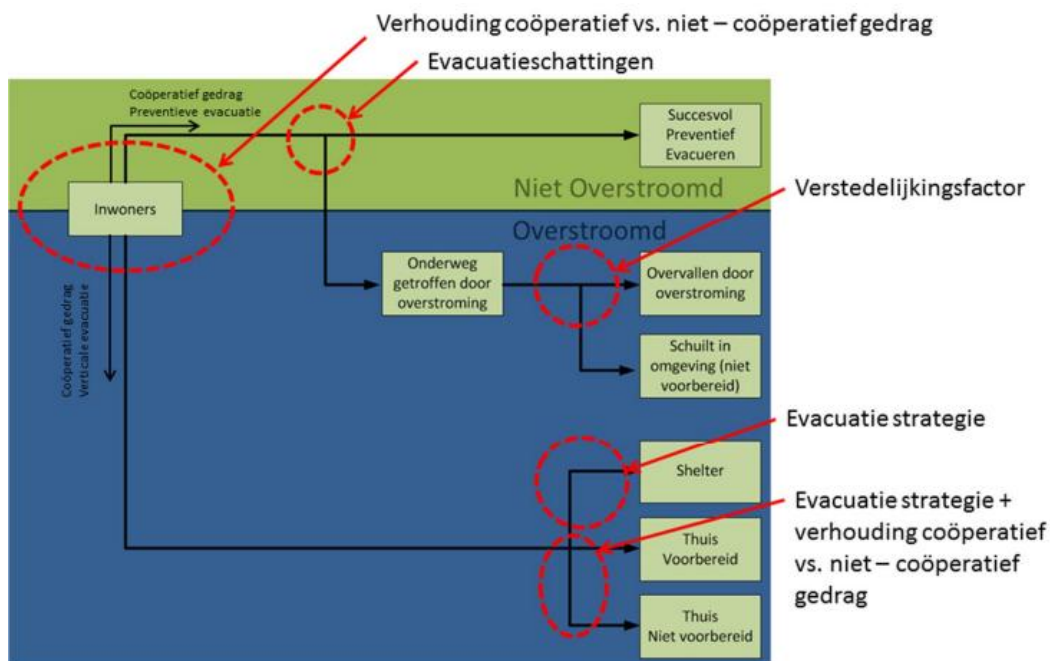
Voor de berekening van het aantal slachtoffers kan gebruik worden gemaakt van twee methodes:

- 1 De **standaardmethode** in SSM (zie Figuur 2-1 en Slager en Wagenaar (2017)). In deze methode wordt uitgegaan van preventieve evacuatie. Het aantal slachtoffers wordt berekend door de achterblijvers (mensen die achterblijven omdat ze niet willen of kunnen evacueren) in het overstroombare gebied (inwoners minus evacuatiefractie) te combineren met de mortaliteitsfracties. Deze mortaliteitsfractie worden ruimtelijk afgeleid op basis van de waterdiepte, stijg- en stroomsnelheid in combinatie met mortaliteitsfuncties.



Figuur 2-1. Schematische weergave standaard methode.

- 2 De **maatwerkmethode** in SSM. In deze methode wordt rekening gehouden met de locatie en omstandigheden waar mensen kunnen worden blootgesteld. Hierdoor is het ook mogelijk rekening te houden met verticale evacuatie en combinaties van preventie en verticaal evacueren. Onderscheid wordt gemaakt tussen mensen succesvol evacueren, mensen die onderweg worden blootgesteld, mensen in een grote shelter en mensen die thuis al dan niet voorbereid zijn. Per locatie is een mortaliteitsfunctie afgeleid. Met uitzondering van de functie voor een publieke shelter zijn deze functies gebaseerd op de standaardfunctie in combinatie met een factor (Pleijter en Kolen, 2016). De verdeling van de inwoners over deze groepen wordt geschat op basis van de evacuatieplannen. Figuur 2-2 geeft een schematische weergave van de maatwerkmethode in SSM.



Figuur 2-2. Schematische weergave maatwerkmethode in SSM (uit Pleijter en Kolen, 2016 en Slager en Wagenaar, 2017).

In de standaardmethode worden enkel slachtoffers en getroffen en bepaald met SSM. De maatwerkmethode berekent dus meer categorieën. Voor het maken van sommen met de aangepaste methode, zijn behalve het normtraject ook aankomsttijden vereist. Een impressie van de SSM resultaten is weergegeven in Figuur 2-3 (samenvatting) en Figuur 2-4 (uitgebreide slachtofferrapportage).

SAMENVATTING RESULTATEN SCHADE, SLACHTOFFERS EN GETROFFENEN

Totaal schade	5.984.449.536	euro
Totaal slachtoffers*	759	personen
Totaal getroffen	103.777	personen

*ZONDER evacuatie

INDICATIE VAN HET VERWACHT AANTAL SLACHTOFFERS BIJ VERSCHILLENDE WAARSCHUWINGSTIJDEN INDIEN PREVENTIEF NAAR NIET-BEDREIGD

Waarschuwingstijd	Preventief	Verticaal
1 dag	313	296
2 dagen	103	296
3 dagen	82	296

Figuur 2-3. Samenvatting SSM rapportage.

SLACHTOFFER RAPPORT

OVERZICHT GETROFFENEN IN ZONES MET VERSCHILLENDE AANKOMSTTIJD VAN HET WATER (NA DOORBRAAK)

Categorie naam	Getroffenen	Eenheid
GETROFFENEN	103.777	personen
GETROFFENEN: eengezinswoningen	61.347	personen
GETROFFENEN: hoogbouw	14.253	personen
GETROFFENEN: laagbouw	13.589	personen
GETROFFENEN: middenbouw	13.474	personen

RUIMTELIJKE VERDELING VAN HET AANTAL SLACHTOFFERS OVER 6 LOCATIE TYPEN PER EVACUATIESTRATEGIE EN BIJ VERSCHILLENDE WAARSCHUWINGSTIJDEN (INDICATIEF)

Waarschuwingstijd en locatie	Preventief	Verticaal
1 dag:Thuis voorbereid	27	138
1 dag:Thuis niet-voorbereid	27	135
1 dag:Shelter	0	23
1 dag:Succesvolle preventieve evacuatie	0	0
1 dag:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	56	0
1 dag:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	203	0
1 dag:Totaal	313	296
2 dagen:Thuis voorbereid	27	138
2 dagen:Thuis niet-voorbereid	27	135
2 dagen:Shelter	0	23
2 dagen:Succesvolle preventieve evacuatie	0	0
2 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	10	0
2 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	39	0
2 dagen:Totaal	103	296
3 dagen:Thuis voorbereid	27	138
3 dagen:Thuis niet-voorbereid	27	135
3 dagen:Shelter	0	23
3 dagen:Succesvolle preventieve evacuatie	0	0
3 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	6	0
3 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	22	0
3 dagen:Totaal	82	296

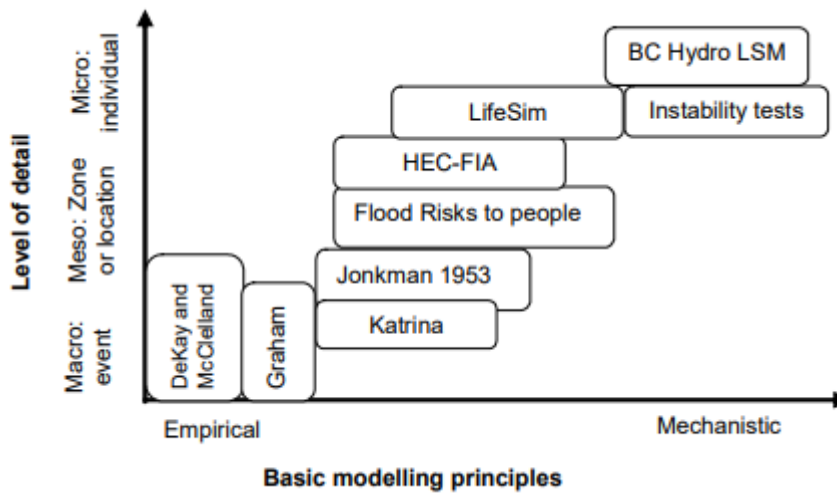
RUIMTELIJKE VERDELING VAN HET AANTAL SLACHTOFFERS OVER 6 LOCATIE TYPEN PER EVACUATIESTRATEGIE EN BIJ VERSCHILLENDE WAARSCHUWINGSTIJDEN (PROCENTUEEL)

Waarschuwingstijd en locatie	Preventief	Verticaal
1 dag:Thuis voorbereid	0,07	0,36
1 dag:Thuis niet-voorbereid	0,02	0,09
1 dag:Shelter	0,01	0,45
1 dag:Succesvolle preventieve evacuatie	0,00	0,00
1 dag:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	0,18	0,00
1 dag:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	0,65	0,00
2 dagen:Thuis voorbereid	0,07	0,36
2 dagen:Thuis niet-voorbereid	0,02	0,09
2 dagen:Shelter	0,01	0,45
2 dagen:Succesvolle preventieve evacuatie	0,00	0,00
2 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	0,03	0,00
2 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	0,30	0,00
3 dagen:Thuis voorbereid	0,07	0,36
3 dagen:Thuis niet-voorbereid	0,02	0,09
3 dagen:Shelter	0,01	0,45
3 dagen:Succesvolle preventieve evacuatie	0,00	0,00
3 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - kan schuilen	0,07	0,10
3 dagen:Mislukte preventieve evacuatie - overvallen door overstroming	0,68	0,00

Figuur 2-4. Voorbeeld van Slachtoffer Rapport als onderdeel van een SSM uitvoerrapport (uit Slager, 2017).

Zowel de standaardmethode als de maatwerkmethode in SSM zijn deterministische berekeningen op een macroscopische schaal. Er bestaan ook methoden met een meer probabilistische benadering, zoals EvacuAid (Kolen et al, 2008), echter worden die in Nederland nog niet toegepast.

Internationaal bestaan er ook andere methodes, waaronder agent-based modellen (op microschaal), zoals het Life Safety-model (Johnstone, 2012) en LifeSim (Aboelata & Bowles, 2008) (Figuur 2-5). In Nederland wordt echter gebruik gemaakt van modellen op macroschaal. Binnen de kennisalliantie is wel onderzoek gedaan naar gebruik van LifeSim voor Dordrecht. Dat bleek echter erg complex qua rekentijden en beschikbare invoerinformatie. De geconstateerde meerwaarde is beperkt, vooral ook vanwege de grote mate van congestie die er is, wat de voortgang veel meer bepaalt dan bijvoorbeeld de snelheid van waarschuwen (Dannenbergh, 2020).



Figuur 2-5. Overzicht enkele internationale slachtoffermodellen en hoe die zich verhouden tot de resolutie van de modellen (Jonkman et al., 2014 en gebaseerd op Johnstone et al., 2005).

In de standaardmethode en maatwerkmethode in SSM wordt gebruik gemaakt van mortaliteitsfuncties. Deze mortaliteitsfuncties zijn afgeleid door Maaskant et al. (2009b), gebaseerd op Jonkman (2007) en zijn voornamelijk gebaseerd op gegevens van de overstroming in 1953 langs de Noordzeekust. De mortaliteit is gedefinieerd als de fractie dodelijke slachtoffers onder de aanwezige mensen in het overstroomde gebied. De mortaliteit neemt toe bij:

- Het optreden van grote waterdieptes (> 2m);
- Het optreden van een hoge stijgsnelheid (kritieke stijgsnelheid vanaf: 0,5m/uur tot een diepte van 1,5 m);
- Grote stroomsnelheden nabij een dijkdoorbraak (kritieke stroomsnelheid vanaf: 2m/s).

In Figuur 2-6 zijn de vier mortaliteitsfuncties te zien die in Nederland worden gebruikt (Slager en Wagenaar, 2017, gebaseerd op Jonkman, 2007 en Maaskant et al., 2009b). Voor overstromingen door een dijkdoorbraak zijn deze als volgt gedefinieerd:

- 1 Het gebied nabij de bres (100-200m) met hoge stroomsnelheden en hoge diepte-snelheid combinaties:

$$F_{D,B} = 1 \quad \text{als } hv \geq 7m^2/s \text{ en } v \geq 2m/s$$

- 2 Het gebied met een hoge stijgsnelheid (>4m/u):

$$F_{D,S}(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 1,46 \text{ en } \sigma_N = 0,28$$

$$\text{als } (h \geq 2,1 \text{ en } w \geq 4) \text{ en } (hv < 7m^2/s \text{ of } v < 2)$$

- 3 Het gebied tussen een grote en lage stijgsnelheid in (transitiezone):

$$F_D(h) = F_{D,0} + (w - 0,5) \frac{F_{D,S} - F_{D,0}}{3,5}$$

$$\text{als } (h \geq 2,1 \text{ en } 0,5 \leq w < 4) \text{ en } (hv < 7m^2/s \text{ of } v < 2)$$

- 4 Het gebied met een lage stijgsnelheid (<0,5m/u):

$$F_{D,o}(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 7,60 \text{ en } \sigma_N = 2,75$$

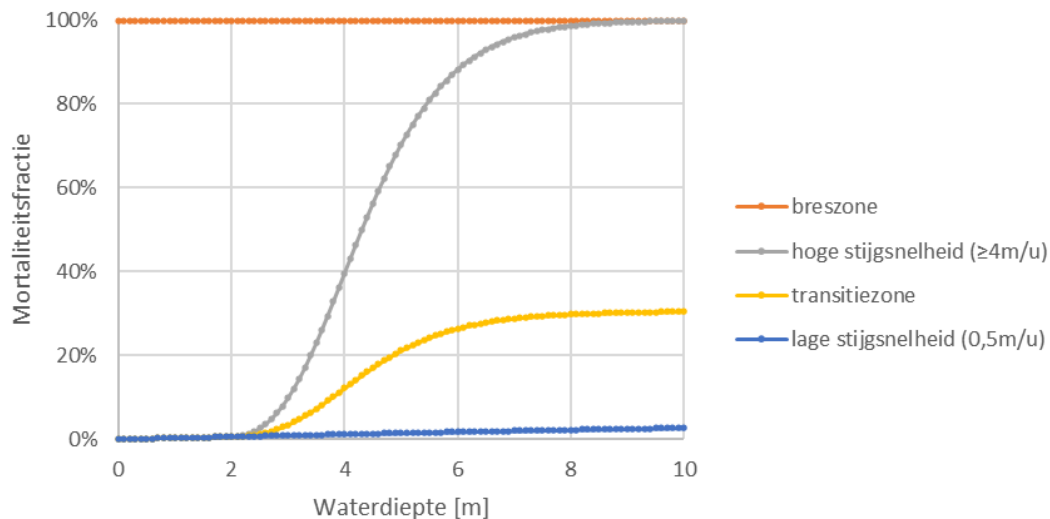
als ($w < 0,5$) of ($w \geq 0,5$ en $h < 2,1$) en ($hv < 7m^2/s$ of $v < 2$)

Met:

h = de waterdiepte [m]

v = de stroomsnelheid [m/s]

w = de stijgsnelheid over de eerste 1,5 m waterdiepte [m/uur]



Figuur 2-6. Mortaliteitsfuncties in SSM als functie van waterdiepte h , stroomsnelheid v en stijgsnelheid.

2.3 Belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit eerder werk van de kennisalliantie

De kennisalliantie is gestart om de kennis rondom slachtoffers en evacuatie te verbeteren. Dat was (en blijft) nodig, omdat de mortaliteitsfuncties zijn gebaseerd op beperkte historische data, voornamelijk de overstroming van 1953. Sinds die tijd is de maatschappij veranderd, en de vraag is en blijft hoe deze veranderingen doorwerken. We zien dat het aantal slachtoffers bij een overstroming uit zee of de rivieren over de tijd daalt, met name door betere waarschuwingen (Jonkman et al., 2024). We zien ook dat overstromingen die meer op een flash flood lijken vaker voorkomen, en significant bijdragen aan het aantal slachtoffers. De huidige slachtofferfuncties die in Nederland worden gebruikt zijn een functie van de waterdiepte, stijg- en stroomsnelheid en het aantal mensen dat uiteindelijk wordt blootgesteld. Eerder onderzoek heeft laten zien dat de combinatie van locatie (shelter, onderweg of thuis) en omstandigheden (wel of niet voorbereid) waarin mensen worden blootgesteld ook veel uitmaken (Kolen, 2013; Pleijter en Kolen, 2016). In combinatie met soms beperkte mogelijkheden voor preventief evacueren was en is ook het doel van de kennisalliantie om meer kennis over het evacuatieproces (zoals gedrag, waarschuwing en het effect van maatregelen) te ontwikkelen, zodat we ook met deze factoren rekening kunnen houden bij slachtofferschattingen en kunnen bijdragen aan betere evacuatieplannen.

2.3.1 Verzamelen van empirische data over slachtoffers en evacuatie

Om hiervoor empirische data te verzamelen van overstroming en evacuatiegebeurtenissen in de hele wereld is een 'flood fatality database' ontwikkeld en gehost:

<http://floodfatalities.tudelft.nl/floodfatality/>. Deze database is uitgedragen op internationale congressen en bij kennispartners in USACE, Canada, Australië, Engeland en Japan. Echter, is het lastig om deze database te blijven vullen en internationaal geadopteerd te krijgen als de standaard. Er bestaan daarnaast ook andere databases, zoals de European Flood Fatalities database (EUFF) (Petrucci et al., 2019) en de Emergency Database (EM-DAT) (Hamidifar en Nones, 2021; 2023). Deze databases bevatten veel globale gegevens die nuttig zijn voor trendanalyses, maar deze databases bevatten niet het benodigde detailniveau om de relatie tussen overstromingsslachtoffers en mortaliteit in combinatie met overstromingskarakteristieken te onderzoeken.

2.3.2 Informatie over sterkte van gebouwen

Bij de overstromingen in 1953 zijn er veel gebouwen ingestort. Verwacht wordt dat moderne gebouwen minder snel zullen instorten. Veldexperimenten met de TU Delft (Korswagen et al., 2021) hebben aangetoond dat enkelsteensmuren een hydrostatisch drukverschil van 90 cm water aankunnen. Bij inklemming van de muren aan de zijkant, kan de muur drukverschillen tot 140 cm aan zonder te falen. Ook enkele aanvullende testen met punt (en piek) belasting door een massa die tegen de muur botst hebben niet geleid tot falen. Deze bevindingen zijn in lijn met eerdere laboratoriumproeven van Jansen et al. (2020). Westerik (2019a) toont bovendien aan dat grote hydrostatische drukverschillen tussen binnen en buiten een gebouw door lekkage, onder meer vanuit kieren en de riolering, zeer onwaarschijnlijk is, zeker bij geringe stijgsnelheden.

In het Ahr-dal in Duitsland zijn wel gebouwen beschadigd geraakt door het snel stromende water en drijfvuil in het water (Korswagen et al., 2022). Het is echter niet mogelijk gebleken om de relatie te leggen met slachtoffersrisico's (Van Kester en Maas, 2023). Ook bleek het aantal werkelijk ingestorte gebouwen zeer beperkt, en alleen op te treden bij omstandigheden die buiten de breszone in Nederland nauwelijks voorkomen vanwege de helling van het gebied (Van Kester en Maas, 2023).

Geconcludeerd is dat de het instorten van gebouwen in Nederland, in ieder geval buiten de breszone, geen factor van belang is voor de slachtoffersschattingen bij een gebeurtenis, mits gebouwen normaal zijn onderhouden. Een meer gedetailleerde analyse met betrekking tot gebouwsterkte is te vinden in bijlage A. De vraag of de mortaliteitsfuncties hiervoor gecorrigeerd kunnen worden en op welke manier is nog niet te beantwoorden.

2.3.3 Informatie over de mortaliteit

Het verbeteren van de mortaliteitsfuncties zelf is lastig, hiervoor is er simpelweg een gebrek aan data van voldoende detailniveau. Van beschikbare overstromingsgebeurtenissen is vaak wel bekend hoeveel slachtoffers er vallen, een indicatie van de locatie en soms ook hoe de slachtoffers om het leven zijn gekomen en wat zij op dat moment aan het doen waren. Gedetailleerde informatie over overstromingskarakteristieken en persoonskenmerken zijn zelden beschikbaar, waardoor het ingewikkeld is om mortaliteitsfuncties beter en specifiek te maken.

De slachtofferfuncties in SSM zijn afgeleid bij overstromingen vanuit de zee en rivieren. De vraag is of deze functies bij flash floods ook toepasbaar zijn. Deze vraag is meer dringend geworden sinds 2021 na de overstromingen in Limburg, Duitsland en België en meer recente overstromingen die meer lokaal van aard zijn en het gevolg van extreme hoeveelheden neerslag.

Internationaal onderzoek laat ook zien dat veel slachtoffers vallen, terwijl men aan het evacueren is, bijvoorbeeld in auto's. Daarom is het wenselijk om in de slachtofferfuncties meer onderscheid te maken in de omstandigheden waar men wordt blootgesteld. De modelvergelijking met agent-based modellen (Sakamoto et al., 2024) heeft laten zien dat deze agent-based modellen een orde hogere aantal slachtofferschattingen opleveren dan de macro modellen als SSM en de "Reclamation Consequences Estimating Methodology" (RCEM). Een verklaring kan zijn dat in agent-based modellen evacuees blijven zoeken naar een uitgang en uiteindelijk altijd vastlopen tijdens de evacuatie en niet hun evacuatiebestemming bijstellen (schuilen). Eerder is hiervoor naast de standaardmethode al de maatwerkmethode aan SSM toegevoegd.

2.3.4 Evacuatie en modellen

De eerdere onderzoeken uit de Kennisalliantie (paragraaf 1.2) laten duidelijk zien dat de evacuatiestrategie grote invloed heeft op het aantal slachtoffers. Een verkeerde evacuatiebeslissing kan leiden tot een sterke toename van het aantal slachtoffers, en een goede beslissing dus tot een afname. Deze beslissing vergt evenwicht tussen: 1) het zoveel mogelijk mensen uit het gebied krijgen, zowel voorafgaand aan de dijkdoorbraak (de evacuatiefractie) als mensen die hierna nog kunnen evacueren (vluchtfractie) en 2) het zo klein mogelijk houden van de groep die mogelijk tijdens de evacuatie wordt getroffen.

Het evacuatieproces kan worden onderverdeeld in een aantal stappen: Waarschuwen, Vertrekken en Reizen. Het waarschuwen is afhankelijk van de periode tussen het beschikken over hoogwaterinformatie uit hoogwatermodellen en de vertaling naar besluiten over evacueren. De snelheid van vertrek is afhankelijk van de tijd tussen het ontvangen van een bericht door een burger, en de tijd totdat deze start met evacueren (vertrekken). De snelheid van het reizen is afhankelijk van de drukte op de wegen, en dus van het aantal andere evacuees en de wegcapaciteit. Onderzoek in Dordrecht (Dannenbergh 2021) heeft laten zien dat voor drukke gebieden waar files ontstaan dit de bepalende factor is voor de duur van de benodigde evacuatietijd. Het optimaliseren van de vertrekcurve heeft vrijwel geen invloed omdat heel snel de wegen zijn overbelast. In de praktijk geldt dat voor vrijwel heel Nederland, uitgezonderd kleinere dunbevolkte gebieden. Ook is het lastig gebleken om de betere planvorming van de veiligheidsregio's te relateren aan een betere evacuatie (zie ook Kolen, 2024).

De onzekerheid bij evacuatieschattingen is groot, hiervoor kunnen heel veel factoren worden onderscheiden. Het effect is dat er onzekerheid is in het aantal slachtoffers, deze kunnen zowel hoger als lager zijn. Het gevolg van deze onzekerheid kan zijn dat er meer of minder mensen tijdig naar een veilig gebied kunnen vluchten dan verwacht. De mortaliteit voor mensen die onderweg zijn is factoren hoger dan voor andere groepen (zoals mensen die naar een shelter zijn gevluht) (Pleijter en Kolen, 2016). Daaruit volgt dat slachtofferschattingen dan ook niet normaal verdeeld zijn, zoals wel het geval is voor de locatie van blootstelling, omdat de mortaliteit van de ongewenst blootgestelde groep mensen zal domineren.

Het vergroten van de beschikbare tijd voor (preventief) evacueren is daarom erg effectief (Kolen, 2013). Dit kan door het verbeteren van de planvorming (en bijvoorbeeld aanpassen opschalingscriteria in calamiteitenbestrijdingsplannen en voorbereiden besluitvorming). Het is ook mogelijk dat de beschikbare tijd tussen een waarschuwing en falen nu beter kan worden ingeschat. De huidige inschatting van de beschikbare tijd, zoals gebruikt bij de evacuatiefractie zijn gebaseerd op resultaten van eerdere beoordelingsronden van de primaire waterkeringen (Barendregt et al., 2005). Daarom is onderzoek gedaan binnen de kennisalliantie om op basis van de WBI- en BOI-kennis de beschikbare tijd, per faalmechanisme, beter in te schatten.

Een neveneffect is dat hierdoor ook weer meer kennis over de waterkering ontstaat, en dat beheerders hebben aangegeven dat dit een waardevolle manier is om naar de waterkering te kijken en te reflecteren op de faalkans. Het beter inschatten van de beschikbare tijd is zeker een onderwerp om nader te verkennen.

2.3.5 Gedrag en communicatie

Binnen de kennisalliantie is onderzoek gedaan naar het gedrag van mensen tijdens een overstroming en evacuatie (Rudolph, Van den Berg & Kolen, 2022; Dannenberg, 2020). Hieruit bleek dat de ervaringen van slachtoffers minder afhangen van het gebied, maar vooral van door factoren zoals fysieke gezondheid en sociaal netwerk.

Ook is gekeken naar het effect van communicatie (Rudolph, Van den Berg & Kolen, 2022). Er zijn interviews gehouden met kwetsbare groepen mensen. Hierbij is geconcludeerd dat de communicatie soms nog te kort schiet, deze groepen hebben behoefte aan extra informatie gericht op hun specifieke situatie.

Daarnaast laat onderzoek na de evaluatie van het hoogwater van 2021 (Endendijk et al., 2023) zien dat noodmaatregelen die mensen nemen effectief waren om het aantal slachtoffers en de totale schade te verminderen.

2.4 Effect van keuzes en aannames in huidige methode op resultaten

Door gebrek aan empirische gegevens wordt gebruik gemaakt van schematisaties om slachtofferschattingen af te leiden. In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de keuzes in de standaardmethode binnen SSM en hoe deze de resultaten beïnvloeden.

2.4.1 Inwoners in een gebied

Het aantal mensen dat bedreigd wordt door een overstroming, is gelijk gesteld aan het aantal inwoners in een gebied. Er wordt dus geen rekening gehouden met mensen die voor werk in een gebied zijn of al zijn vertrokken. In de praktijk zijn er hoogwaterwaarschuwingen of berichten in de media, waardoor het verdedigbaar is om aan te nemen dat het aantal mensen in een gebied niet groter zal zijn dan het aantal inwoners.

Aangenomen wordt dat als mensen niet tijdig het gebied kunnen verlaten (door evacueren) dat men dan thuis is. Er wordt dus niet expliciet rekening gehouden met de locatie van blootstelling als gevolg van gedrag van mensen (daarnaast worden de mensen binnen een gebied gelijk verdeeld over de woningen, dat komt niet overeen met de echte woonlocatie). Impliciet zit dit wel verwerkt in de slachtofferfuncties door de wijze van kalibratie.

In de maatwerkmethode worden mensen verdeeld over de verschillende locaties waar men zich kan bevinden.

2.4.2 Uitvoering evacuatie

Bij de berekening van het aantal slachtoffers wordt het aantal getroffen personen gereduceerd met de groep mensen die succesvol kan evacueren (de evacuatiefractie). Gezien de onzekerheden en gebrek aan kennis is er bij de uitwerking van deze fracties voor gekozen om één fractie af te leiden voor relatief grote gebieden die tegelijkertijd bedreigd zijn (vaak meerdere dijkringen). Deze fractie is afgeleid door rekening te houden met de onzekerheid in beschikbare en benodigde tijd en een percentage achterblijvers. Hierbij geldt:

- De evacuatiefractie is afgeleid op basis van de vigerende evacuatieplannen. Dit betreft preventieve evacuatie.

- De evacuatiefractie is berekend als het aantal mensen dat het gebied kan verlaten tot het moment van de dijkdoorbraak, er is hierbij dus geen rekening gehouden met aankomsttijden. Hierbij is wel rekening gehouden met de onzekerheid in de beschikbare tijd en onzekerheid in de uitvoering van de evacuatie.
- Het percentage achterblijvers is geschat op basis van gebeurtenissen uit het verleden, ook is rekening gehouden met de aard van de dreiging. Langs de kust zijn er meer achterblijvers dan langs de rivieren. Hier speelt ook een kortere waarschuwingstijd een rol en dat evacuatie tijdens stormomstandigheden moeilijker tot onmogelijk is.

2.4.3 Kenmerken van een overstroming

Een overstromingsscenario ligt aan de basis van de slachtofferberekening. Het overstromingsscenario levert de maximale waterdiepte, de maximale stijg- en stroomsnelheid. Deze waarden volgen uit een overstromingsberekening waarin met name de keuzes rondom de bresmodellering (moment van dijkfalen ten opzichte van waterstand en bresgroei) van invloed zijn op de uitkomst. Deze keuzes hebben grote invloed op het overstromingspatroon.

De wijze waarop een waterkering faalt is vooraf onbekend. Bresgroei kan lokaal ontstaan of er kan afschuiving over een groter traject plaats vinden. In de 'Ergst Denkbare Overstromingen' (Kolen en Wouters, 2007) is aangenomen dat een bres 150 m breed is en binnen 1 uur van de kruinhoogte tot aan het maaiveld groeit. In deze gevoeligheidsberekening is onderzocht wat het effect is van:

- Een bredere bres; hier wordt nu 300 m in plaats van 150 m aangenomen;
- Bresgroei; De automatische bresgroei laat de bres vanaf een initiële breedte van 10 m groeien afhankelijk van de stroomsnelheid en de dijkopbouw. Er is uitgegaan van een zanddijk¹.

Gekeken is naar de omvang van de overstroming in termen van het overstroomd oppervlak, getroffen en aantallen dodelijke slachtoffers. Hierbij is het overstroomd oppervlak en het aantal getroffen sterk aan elkaar gecorreleerd, de slachtoffers zijn bepaald op basis van de gevolgen van de waterdiepte. De gevolgen zijn bepaald op:

- Korte termijn (KT), op 8 uur na de start van de overstroming;
- Middellange termijn (MT), op 48 uur na de start van de overstroming;
- Lange termijn (LT), na 1 week na de start van de overstroming.

Tabel 2-1. Het effect van een bredere bresbreedte (300 m) op de omvang van de overstroming (overstroomd oppervlak), het aantal getroffen en het aantal slachtoffers ten opzichte van de referentie (bresbreedte van 150 m) voor verschillende dijkkringtypes (Kolen en Wouters, 2007).

Percentages t.o.v. referentie	300 m brede bres								
	Omvang % t.o.v. referentie			Getroffenen % t.o.v. referentie			Slachtoffers % t.o.v. referentie		
Dijkkringtype	KT	MT	LT	KT	MT	LT	KT	MT	LT
Dijkkring aan een meer	51,6	4,1	0,0	111,6	4,2	0,0	171,9	83,2	0,0
Kleine dijkkring aan de kust	15,4	5,6	5,6	7,7	5,9	5,9	43,4	39,5	39,5
Grote dijkkring aan de kust	24,6	11,9	7,3	14,7	10,6	8,7	29,5	30,0	28,0
Dijkkring in het rivierengebied	28,5	31,7	1,1	43,5	3,9	2,2	62,0	32,8	26,6

¹ Hierbij wordt opgemerkt dat voor het rivierengebied de automatische bresgroei is benaderd met een 'wortelvorm', omdat in het waterbewegingsmodel FLS geen automatische groei mogelijk is.

In Tabel 2-1 zijn de resultaten weergegeven van de 300 m brede bres ten opzichte van de referentie (bresbreedte van 150 m). Voor alle dijkkringtypes geldt dat op korte termijn de omvang van de overstroming toeneemt met circa 30%, bij de dijkkring aan het meer zelfs met circa 50%. Op de lange termijn blijkt dat het effect meevalt en minder is dan 10% toename van het overstromd oppervlak, maar nog wel leidt tot een toename van circa 30% van het aantal slachtoffers.

2.4.3.1 De invloed van een ontgrondingskuil

Daarnaast is door Kolen en Wouters (2007) ook de invloed van de diepte van een ontgrondingskuil onderzocht. Bij een overstroming ontstaat bij de bres vaak een ontgrondingskuil. Deze kuil ontstaat door de hoge stroomsnelheden, waardoor de ondergrond wordt weggespoeld. Hierdoor ontstaat een grotere opening tussen het buiten- en binnenwater waardoor mogelijk grotere debieten naar binnen stromen. Om het effect te bepalen van een ontgrondingskuil is ter plaatse van de bres een geul gemodelleerd die 10 m diep is ten opzichte van het bestaande maaiveld en in 300 m geleidelijk aan omhoog komt tot de geul weer aansluit op het maaiveld. In de referentiesituatie is geen ontgrondingskuil gemodelleerd, maar wordt aangenomen dat de bresdiepte gelijk is aan maaiveld. De afmeting van deze ontgrondingskuil is een inschatting die is gebaseerd op ervaringen in Nederland met dijkdoorbraken.

Tabel 2-2. De invloed van een diepere ontgrondingskuil op de omvang van de overstroming (overstromd oppervlak), het aantal getroffen en het aantal slachtoffers ten opzichte van de referentie (geen ontgrondingskuil, bresopening is vanaf kruin tot maaiveld) voor verschillende dijkkringtypes (Kolen en Wouters, 2007).

Percentages t.o.v. referentie	Ontgrondingskuil								
	Omvang % t.o.v. referentie			Getroffenen % t.o.v. referentie			Slachtoffers % t.o.v. referentie		
Dijkkringtype	KT	MT	LT	KT	MT	LT	KT	MT	LT
Dijkkring aan een meer	73,5	4,2	0,1	134,9	4,3	0,0	272,9	112,7	8,7
Kleine dijkkring aan de kust	20,4	6,1	6,1	10,3	7,4	7,4	116,2	80,1	80,1
Grote dijkkring aan de kust	49,7	25,0	17,2	37,4	24,4	19,7	124,4	118,4	111,2
Dijkkring in het rivierengebied	44,6	15,8	1,4	72,4	10,4	3,2	338,8	111,2	75,1

Door de ontgrondingskuil en de geul ontstaan er grotere bresdebieten dan in de referentiesituatie. Dit heeft veel effect op de snelheid van overstromen. Dit zien we terug in de korte-termijneffecten, waarbij het overstromd oppervlak zelfs met 73% toeneemt voor de dijkkring aan een meer. De schade en slachtoffers verdubbelen (Tabel 2-2).

Op de lange termijn maakt het voor de dijkkringgebieden die vrijwel geheel overstromen niet zoveel uit. De grote dijkkring aan de kust heeft een toename van het overstromd oppervlak van 17%. Het aantal slachtoffers nemen, behalve bij een dijkkring aan een meer, toe met een factor 2, vanwege de hogere waterdieptes en de snelheid van overstromen.

Notie t.a.v. detailniveau

Ook de mate van detailniveau van de berekening is van belang. Het is mogelijk zeer gedetailleerd overstromingsverlopen te berekenen, de slachtofferfuncties zijn echter gebaseerd op grove data en de locatie van blootstelling is ook van belang. Brussee et al. (2021) laten zien dat een hogere modelresolutie leidt tot lokaal hoge mortaliteitsfracties nabij objecten, zoals dijken, weglichamen en duikers. Daarom zal telkens goed nagedacht moeten worden over gewenste detailniveaus. Gedetailleerder rekenen kan dus leiden tot andere resultaten.

2.4.4 Mortaliteitsfuncties

In paragraaf 2.2 staan de mortaliteitsfuncties beschreven. Deze functies zijn vooral gebaseerd op de data van de watersnoodramp in 1953 in Zuidwest-Nederland en een aantal andere events in Japan en de VS. In 1953 was er geen of nauwelijks preventieve evacuatie mogelijk en aankomsttijd was relatief kort. Als we terugblikken op de overstromingen van 1953 dan zien we dat:

- Er in 1953 nog relatief veel zwakke gebouwen (enkelsteens muren) waren, waardoor naar verwachting meer gebouwen instortten dan nu. Dit kan leiden tot een overschatting van het aantal slachtoffers in zowel de breszone als in de zones met snel stijgend water.
- De waarschuwings- en communicatiesystemen verbeterd zijn sinds 1953. Daarnaast zal ook voor een dijkdoorbraak informatie worden gedeeld door andere media en experts als er geen officiële waarschuwing is (inclusief geruchten). De literatuur laat wel zien dat een (positieve) correlatie is tussen waarschuwingssystemen en slachtoffers (Jonkman et al., 2024).
- De communicatiemiddelen nu duidelijk anders zijn dan in 1953. Hiernaast kunnen we met relatieve zekerheid zeggen dat het gedrag van mensen ook is veranderd sinds 1953, onder andere door de nieuwe communicatiemiddelen. Dit kan ook leiden tot een andere mortaliteit tijdens het redden in de dagen na de overstroming.

Tot slot wordt nog opgemerkt dat de mortaliteitsfuncties zijn gebaseerd op gebiedstotalen waaruit een gemiddelde functie is afgeleid. Hierbij komt het totaal aantal verwachte slachtoffers voor een hele overstromingsgebeurtenis overeen met de empirische data. In deze functies wordt ruimtelijk onderscheid gemaakt in maximale waterdiepte, stijg- en stroomsnelheid. Tussen getroffen en niet getroffen wordt geen onderscheid gemaakt in welke mortaliteitsfuncties van toepassing zijn. Er wordt dus geen rekening gehouden met meer kwetsbare groepen, zoals kleine kinderen en ouderen, zoals gedaan is door Creach et al. (2022).

2.4.5 Locatie van blootstelling

In 1953 zijn de mensen niet gewaarschuwd, dus een groot deel van de mensen was thuis. Er is geen grote preventieve evacuatie uitgevoerd en dus zijn er ook geen mensen 'onderweg' gestrand. Dit kan leiden tot een onderschatting van het aantal slachtoffers. Iets soortgelijks bleek ook bij de damdoorbraak van de Malpassat dam in Frankrijk in 1959, waarbij er nog meer slachtoffers hadden kunnen vallen als de doorbraak overdag was. Nu was de doorbraak 's nachts en werden mensen slecht gewaarschuwd, waardoor ze niet onderweg waren waar ze kwetsbaarder zijn dan thuis. Als de doorbraak overdag had plaatsgevonden, dan zouden meer mensen gaan evacueren en dat zou naar verwachting leiden tot meer slachtoffers.²

2.4.6 Beschikbare tijd

De beschikbare tijd voor het evacueren tot aan het falen van de waterkering is een onzekere factor, waardoor de evacuatieschattingen ook onzeker zijn. De beschikbare tijd is de hoeveelheid tijd vanaf het moment van waarschuwen tot aan het moment van het optreden van de bres. Op basis van de kennis uit de 1e Landelijke Beoordelingsronde aangevuld met een expertoordeel is een inschatting te maken van de beschikbare tijd voor het evacueren, gegeven een hoogwatergolf (Knops, Rongen en Kolen, 2021). Door rekening te houden met het meest waarschijnlijke faalmechanisme dat zal leiden tot een overstroming neem je de onzekerheid in het moment van falen mee. Dit zal leiden tot meer of minder slachtoffers ten opzichte van het uitgangspunt waarbij de kering faalt op de piek van de hoogwatergolf.

² Dit is onderzocht door BC-Hydro voor LifeSim en gepresenteerd op het internationaal netwerk slachtoffermodellering.

2.5 Overstromingen juli 2021 (Duitsland)

De extreme neerslag in juli 2021 zorgde voor overstromingen in Duitsland, België en Nederland, met veel slachtoffers en gebouwschade tot gevolg. In Nederland zijn geen dodelijke slachtoffers gevallen, maar in België en Duitsland wel. In België zijn 39 dodelijke slachtoffers gevallen en in Duitsland 189 (Van Kester en Maas, 2023). Van Kester en Maas (2023) ondervonden dat er voor België weinig gegevens openbaar zijn gemaakt betreft waar en onder welke omstandigheden slachtoffers zijn gevallen. Over de slachtoffers in Duitsland zijn meer gegevens bekend, en zijn hier verschillende onderzoeken over gepubliceerd (Thieken et al., 2021; 2023a). Hiervan vielen 49 slachtoffers in deelstaat Nordrhein-Westfalen (Thiecken et al, 2021; 2023a) en 136 in Rheinland-Pfalz (Thiecken et al., 2023a). Het dodental was uitzonderlijk hoog. In de 4 decennia voorafgaand aan deze overstroming (1980-2020), vielen er bij verschillende overstromingen in het binnenland van Duitsland in totaal 159 dodelijke slachtoffers (Papagiannaki et al., 2022).

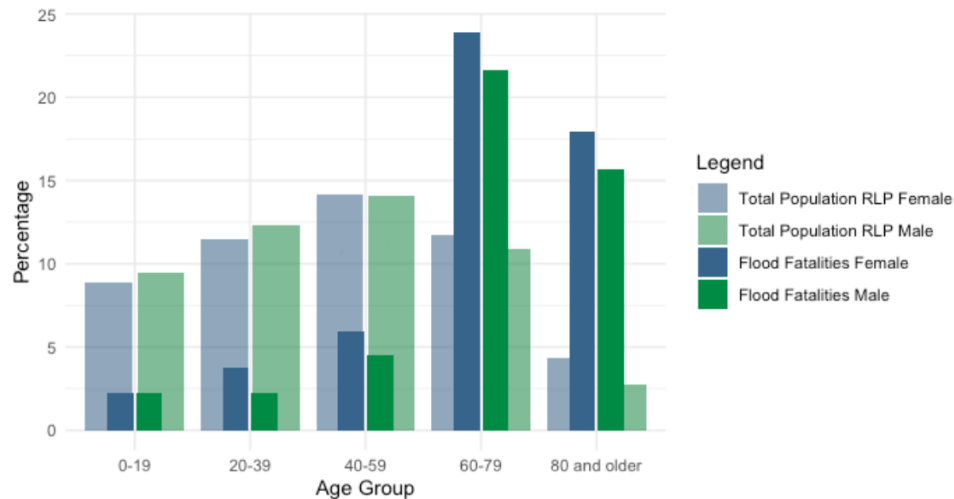
Slachtoffers: kenmerken

Thieken et al. (2022) onderzochten verbanden tussen verschillende socio-demografische factoren en slachtoffers in Nordrhein-Westfalen (NRW). Zo bleek van het aantal slachtoffers 65% ouder dan 60 jaar te zijn (zie Tabel 2-3). Daarnaast vielen er 31 mannelijke slachtoffers (63,3%) tegen 18 vrouwelijke slachtoffers (36,7%). Ook in Rheinland-Pfalz waren mensen ouder dan 60 jaar oververtegenwoordigd in de overstromingsslachtoffers (78%). Geslacht leek hier een minder uitgesproken rol te spelen, en de slachtofferverhouding man-vrouw komt overeen met de bevolkingscijfers voor dat gebied (zie Figuur 2-7) (Rhein en Kreibich, 2024). In Rheinland-Pfalz is bovendien een verzorgingstehuis getroffen voor mensen met mentale beperkingen. Hier zijn veel slachtoffers gevallen, 16% van het totaal aantal slachtoffers. Rhein en Kreibich (2024) geven als mogelijke oorzaak voor dit hoge sterftecijfer onder ouderen dat zij door hun fysieke en cognitieve beperkingen meer moeite hebben om op hogere (droge en veilige) verdiepingen te komen.

Omdat ouderen en mensen met cognitieve beperkingen of mobiliteitsbeperkingen extra kwetsbaar zijn, is het noodzakelijk om bij het evacueren extra aandacht te geven aan ziekenhuizen, bejaardentehuizen en verzorgingstehuizen (Rhein en Kreibich, 2024).

Tabel 2-3. Leeftijd van slachtoffers bij de overstroming in juli 2021 in Nordrhein-Westfalen (NRW), afgezet tegen de totale bevolkingscijfers (overgenomen uit Thiecken et al., 2021).

Leeftijdsklasse	Dodelijke slachtoffers	Aandeel	Bevolking NRW	Aandeel
[jaren]	[aantal]	[%]	[aantal]	[%]
0-14 (kinderen)	0	0,0	2.510.010	14,0
15-20	3	6,1	1.062.157	5,9
21-30	2	4,1	2.196.917	12,3
31-40	1	2,0	2.246.813	12,5
41-50	4	8,2	2.176.060	12,1
51-60	7	14,3	2.917.472	16,3
61-70	10	20,4	2.198.654	12,3
71-80	15	30,6	1.522.843	8,5
> 80	7	14,3	1.094.644	6,1
Totaal	49	100	17.925.570	100



Figuur 2-7. Leeftijd en geslacht van slachtoffers bij de overstroming in juli 2021 in Rheinland-Pfalz, afgezet tegen de totale bevolkingscijfers (Figuur 6 uit Rhein en Kreibich, 2024).

Slachtoffers: locatie en activiteit

Thiecken et al. (2021; 2023a) hebben een uitvoerige analyse gedaan van waar slachtoffers zich bevonden op het moment van overlijden (zie Tabel 2-4). Rhein en Kreibich (2024) hebben dit voor Rheinland Pfalz gedaan (zie Figuur 2-8).

Wat opvalt is het hoge aantal slachtoffers in gebouwen. Een deel van deze mensen werd overvallen door het water. Een nog groter deel kwam om in de kelder, bij het inspecteren van apparatuur (zoals pompen) of bij het inspecteren, minimaliseren en reduceren van schade. Hier kan het gebrek aan adequate waarschuwing hebben gezorgd dat mensen verrast waren of de gevolgen onderschatten. Thiecken et al (2023) geven namelijk aan dat de focus in overstromingsrisicocommunicatie veelal lag op het nemen van maatregelen op woningniveau. Uit de analyses van Thiecken et al. (2023) en Rhein en Kreibich (2024) wordt niet duidelijk of en hoeveel mensen zijn omgekomen door instorting van gebouwen. Er zijn veel gebouwen ingestort, bleek ook uit een veldbezoek van Korswagen et al. (2022). Maar Van Kester en Maas (2023) concludeerden ook al dat de beschikbare gegevens te beperkt zijn om een link tussen mortaliteit en gebouwinstorting af te leiden.

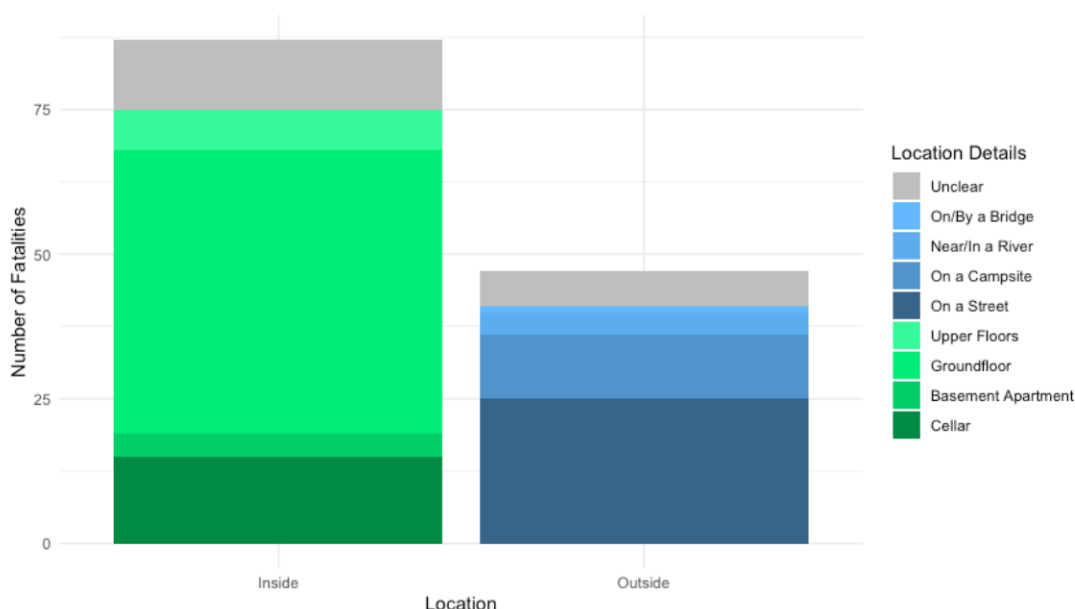
Daarnaast zijn veel mensen buiten getroffen, voornamelijk op wegen, wat een indicatie is van dat mensen aan het vluchten zijn. In Nordrhein-Westfalen was ongeveer de helft van deze slachtoffers buiten te voet, en de andere helft bevond zich in, op of nabij een voertuig. Dit kan een teken zijn van dat mensen het gevaar van het water hebben onderschat of juist werden overvallen door het water (Thiecken et al, 2023; Rhein en Kreibich, 2024).

Voorspellingen en waarschuwingen

Het grote aantal dodelijke slachtoffers roept ook vragen op rondom het voorspellings- en waarschuwingssystemen en de crisisbeheersing. De overstromingskaarten die sinds 2013 landelijk beschikbaar zijn voor Duitsland en iedere 6 jaar worden geactualiseerd, zijn een belangrijke bron voor communicatie omtrent overstromingsrisico's. Rhein en Kreibich (2024) geven aan dat de beschikbare extreme overstromingskaart het overstroombare gebied significant onderschatte. In Rheinland-Pfalz viel dan ook 75% van de slachtoffers buiten het volgens deze kaart overstroombare gebied. In Nordrhein-Westfalen viel ongeveer 50% van de sterfgevallen buiten het gebied dat op de overstromingsgevaarkaart stond (Thiecken et al, 2023a).

Tabel 2-4. Locatie waar slachtoffers vielen in Nordrhein-Westfalen (overgenomen uit tabel 4.2 in Thiecken et al., 2021).

Locatie van het ongeval	Aantal personen	Aandeel [%]	Aantal personen	Aandeel
Binnen: kelder	13	26,5	Binnen: 25	51%
Binnen: souterrainwoning	2	4,1		
Binnen: begane grond	7	14,3		
Binnen: bovenverdieping	2	4,1		
Niet residentiële gebouwen	1	2,0		
Buiten: op/in/bij een voertuig	11	22,4	Buiten: 24	49%
Buiten: in open ruimtes (te voet)	6	14,3		
Buiten: op straat (te voet)	4	8,2		
Buiten: bij/op een brug (te voet)	3	4,1		
Totaal	49			



Figuur 2-8. Locatie waar slachtoffers vielen in Rheinland-Pfalz (Rhein en Kreibich, 2024).

Apel et al. (2022) benadrukken dat de standaard hydrologische voorspellingen, waarbij rivierafvoeren en waterstanden bij de meetlocaties worden gegeven, niet voldoende zijn voor het afgeven van zinvolle waarschuwingsberichten. Ze laten zien hoe een betere inschatting kan worden gemaakt van het overstroombare gebied aan de hand van een hydrodynamisch model, dat gebruik maakt van hydrologische voorspellingen. Het model dat zij gebruiken levert locatie-specifieke overstromingskarakteristieken, zoals verwachte waterdiepte en stroomsnelheid. Deze karakteristieken kunnen een indicatie geven voor gebieden waar een groot risico is op bijvoorbeeld gebouwinstorting, verdrinking en bewegende of drijvende voertuigen. Met dit soort informatie kan crisisbeheersing veel gerichtere waarschuwingen afgeven.

Door Thiecken et al (2023b) zijn enquêtes afgenomen. 35% van de respondenten uit Nordrhein-Westfalen en 29% uit Rheinland-Pfalz gaven aan nooit een waarschuwing te hebben ontvangen. Van de mensen die wel waren gewaarschuwd, gaf 85% aan geen extreme overstroming te verwachten en gaf 46% aan niet voldoende te weten over hoe zij zichzelf moeten beschermen en in veiligheid kunnen brengen. Een mogelijke oorzaak hiervan is dat in Duitsland bij overstromingen de focus ligt op overstromingen als gevolg van dijkdoorbraken, en minder op flash-floods zoals in juli 2021 zich voordeed (Thiecken et al, 2023b).

3 Aangepaste methodiek voor evacuatie- en slachtofferberekeningen

3.1 Inleiding

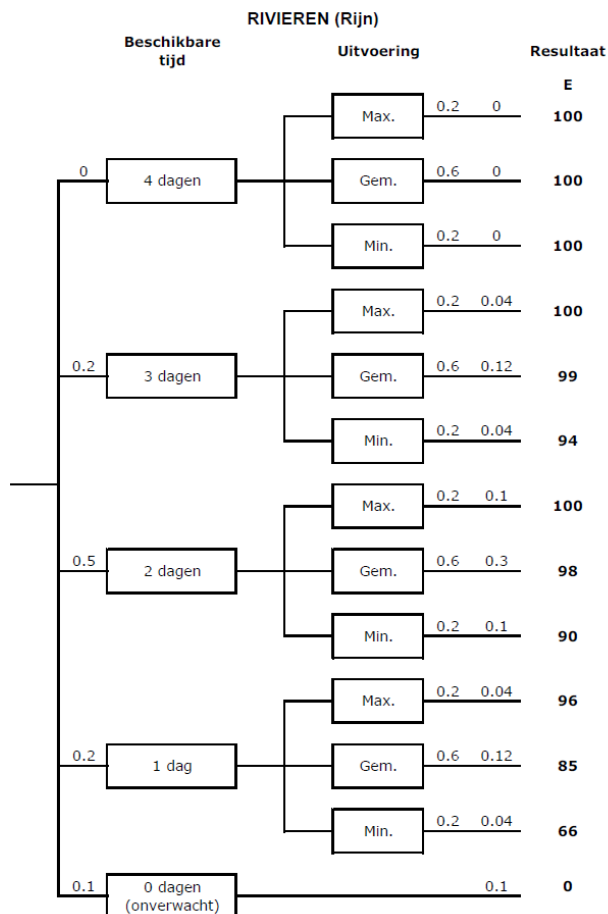
In dit hoofdstuk wordt een aangepaste methodiek voor evacuatie- en slachtofferberekeningen voorgesteld, waarbij meer recht wordt gedaan aan de aankomsttijd van een overstroming en de extra tijd die mensen hebben voordat het water hen bereikt (paragraaf 3.2). Het is onzeker waar mensen zich bevinden tijdens een overstroming. Indien een evacuatie gunstig uitpakt, zijn er mogelijk meer mensen al uit het gebied. Andersom kan een evacuatie ongunstig verlopen, waardoor er juist meer mensen onderweg worden getroffen. In elk geval is de locatie van waar mensen zich bevinden ten tijde van een overstroming onzeker. In paragraaf 3.3 is voorgesteld hoe kan worden omgegaan met onzekerheid in waar mensen worden blootgesteld aan een overstroming. In paragraaf 0 wordt de combinatie toegelicht, dus hoe zowel aankomsttijden als de onzekerheid in locatie van blootstelling kunnen worden meegenomen in de berekening.

3.2 Meenemen van aankomsttijd

Op dit moment wordt geen rekening gehouden met aankomsttijden van overstromingen in slachtofferrisicoanalyses. In het eerdere werk van deze kennisalliantie kwam duidelijk naar voren dat het effect van aankomsttijd op de mortaliteit en het aantal slachtoffers groot kan zijn (De Bruijn en Maas, 2022). Omdat in de huidige berekening van de slachtofferaantallen de evacuatie stopt op het moment van de bres, kan dat in gebieden waar het lang duurt voordat de overstroming aankomt leiden tot een overschatting van het aantal slachtoffers. Door bovenop de evacuatiefractie de aankomsttijd mee te nemen kunnen ook de mensen die zich na het bresmoment nog veilig hebben gesteld worden meegenomen in de analyse.

Aangezien de vluchtfractie onzeker is, hanteerden De Bruijn en Maas (2022) een hoge en lage waarde voor de vluchtfractie. Deze studie toonde vooral aan wat de invloed van het meenemen van aankomsttijden op het aantal slachtoffers kan zijn, uitgewerkt aan de hand van twee case studies. Zij concludeerden dat het belangrijk is om aankomsttijden mee te nemen in de analyses van slachtofferrisico's, omdat het verwaarlozen ervan kan leiden tot een overschatting van de risico's. Wel gaven zij als aanbeveling de vluchtfracties beter te onderbouwen.

Maaskant et al. (2009) schatten op basis van literatuur, expert judgement en verkeersmodellen per gebied in Nederland en voor verschillende scenario's een evacuatiefractie. In deze verschillende scenario's is rekening gehouden met verschillende maten van effectiviteit en verschillende waarschuwingstijden voorafgaand aan een bres. De scenario's kunnen worden gecombineerd in een evacuatieboom (zie een voorbeeld voor de Rijn in Figuur 3-1). Deze evacuatieboom kan gezien worden als een gebeurtenissenboom. Door aan ieder van de verschillende scenario's een kans toe te kennen, kan een verwachtingswaarde van de evacuatiefractie worden afgeleid voor ieder deelgebied.



Figuur 3-1. Evacuatieboom van de Rijn (Maaskant et al., 2009a).

Om tot de verwachtingswaarde voor de evacuatiefractie te komen is voor ieder deelgebied een dergelijke evacuatieboom opgesteld. Hierbij is rekening gehouden met:

- Beschikbare tijd. Dit is het moment waarop de evacuatie in gang wordt gezet. Er wordt verondersteld dat er informatie beschikbaar is over de overstromingsdreiging en dat er een besluit wordt gemaakt te evacueren. Deze gebeurtenissenboom is uitgewerkt voor 1-4 beschikbare dagen en een onverwachte doorbraak (0 beschikbare dagen).
- Uitvoering van de evacuatie. Hierin wordt de effectiviteit van de evacuatie geschat, rekening houdend met best cases en worst cases. Dit is opgenomen als maximum, gemiddeld en minimaal.

De gebeurtenissenboom wordt ingevuld door de conditionele kansen voor de beschikbare tijd en de uitvoering te schatten, beide op basis van expert judgement. De verschillende mate van effectiviteit van uitvoering en de daarbij horende evacuatiefracties worden geschat op basis van berekeningen uit verkeersmodellen.

De effectiviteit van de evacuatie is in deze evacuatiebomen onderbouwd door literatuur, expert judgement en verkeersmodellen, maar specifiek tot het moment van de bres. Deze evacuatiebomen zijn in principe niet afgeleid voor de situatie na de start van de bresgroei. Echter, aangezien het gebied en de aanwezige infrastructuur niet veranderen na het bresmoment is er gekozen om de evacuatieboom te gebruiken voor het bepalen van de vluchtfractie. De redenering hierachter is dat deze waarden op dit moment de best onderbouwde informatie is die er beschikbaar is.

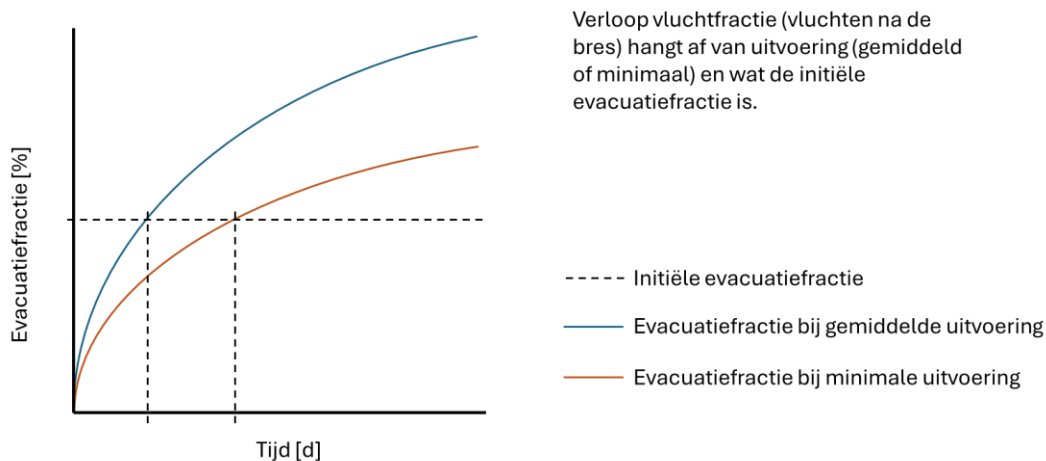
Waar De Bruijn en Maas (2021) in hun analyses uitgingen van 2 vaste vluchtfractiefuncties (optimistisch en pessimistisch), wordt door verder te bouwen op de evacuatiebomen, meer rekening gehouden met de initiële evacuatiefractie (bij het ontstaan van de bres), het verdere verloop van de evacuatie in combinatie met gebiedsspecifieke informatie. Hier wordt in hoofdstuk 5 (Discussie) nog aandacht aan besteed. In dit hoofdstuk wordt alleen de methodiek verder toegelicht.

3.2.1 Methodiek

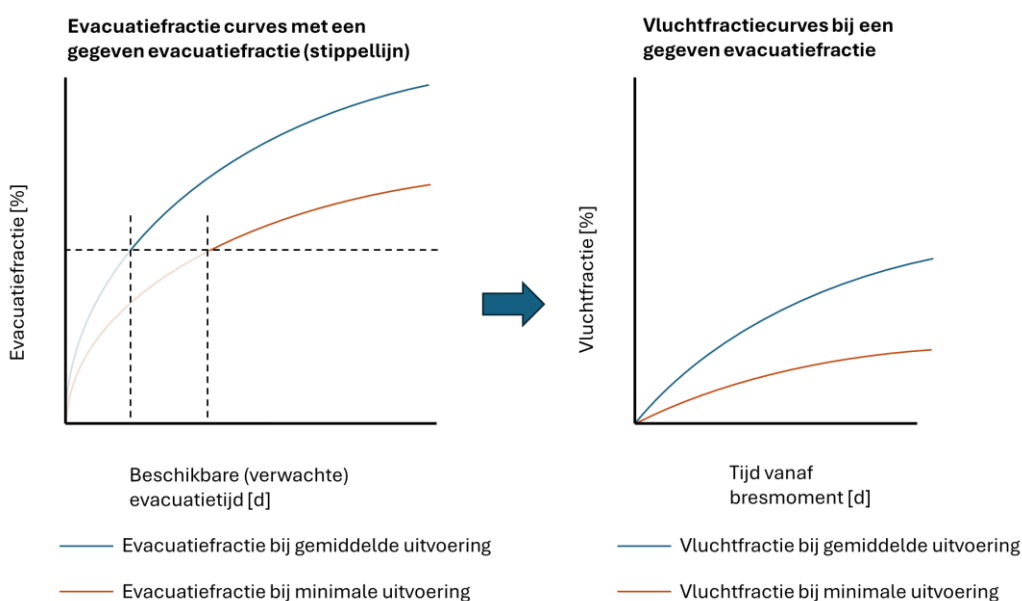
De aankomsttijd wordt beschouwd als 'extra beschikbare evacuatie tijd'. De evacuatieboom wordt doorgetrokken en vervolgens per gespecificeerd gebied de totale evacuatiefractie bepaalt (preventieve evacuatie en vluchten). De vluchtfractie wordt als volgt bepaald:

- 1 Er wordt door de gebruiker (bijvoorbeeld een veiligheidsregio) een preventieve evacuatiefractie gekozen. Dit is het percentage van de mensen dat het gebied voorafgaand aan de bres kan verlaten. Dit is dus niet meer gelijk aan de vaste verwachtingswaarde, zoals die nu in SSM zit en die afhankelijk is van het dijktraject waarin de bres plaats vindt.
- 2 Er wordt bepaald waar deze evacuatiefractie zich bevindt op de evacuatieboom. Dit wordt gedaan voor zowel de minimale als gemiddelde uitvoering. De verwachting is dat na de bres de evacuatiefractie zeker niet meer zo gunstig verloopt als bij de maximale uitvoering, dus die wordt niet meegenomen in de vluchtfractie. Het afleiden waar de evacuatiefractie zich bevindt in de boom gebeurt door middel van lineaire interpolatie tussen de bekende punten in de evacuatie als functie van tijd (dus $t = 0, 1, 2, 3, 4$ dagen). Deze tijd wordt bepaald als het 'tijdstip' van het bresmoment (zie Figuur 3-2 voor een schematische weergave). Er wordt apart gerekend voor de uitvoeringen minimaal en gemiddeld.
- 3 Er wordt in tijdstappen van 6 uur telkens bepaald wat de nieuwe evacuatiefractie wordt op dat tijdstip. Dit gaat net zoals in stap 2 met lineaire interpolatie tussen de bekende punten op de grafiek. Deze toegevoegde tijdstappen van 6 uur worden beschouwd als de bijkomende vluchtfractie wegens de aankomsttijd. Er is gekozen voor tijdstappen van 6 uur, omdat kleinere tijdsintervallen te schijnnaauwkeurigheid creëren. Anderzijds, als te grote tijdsintervallen worden gebruikt, wordt de ruimtelijke differentiatie in de aankomsttijd weer teniet gedaan. In Figuur 3-3 is grafisch uitgewerkt hoe op basis hiervan de vluchtfractie kan worden afgeleid.
- 4 Op basis van de ruimtelijk gedifferentieerde waarden van de aankomsttijden van het overstroomde gebied wordt per gridcel de totale evacuatiefractie bepaald. Deze gaat dus per tijdstap van 6 uur.
- 5 Stappen 1 tot en met 4 worden toegepast op zowel de minimale en de gemiddelde uitvoering van evacuatie. Hieruit ontstaan twee rasters, per gridcel wordt dan het gemiddelde van de twee rasters bepaald. Het resultaat hiervan is de verwachte vluchtfractie op basis van aankomsttijd.

Het uiteindelijke resultaat in SSM is een ruimtelijk gedifferentieerd raster met waarden voor de totale evacuatiefractie zijn (preventieve evacuatie + vluchtfractie), op basis van de aankomsttijd in stappen van 6 uur. Dit raster zou dan vermenigvuldigd worden met het inwonersraster om tot een ruimtelijk beeld van de getroffen mensen te komen. In de huidige versie van SSM zit per dijktraject een enkele waarde, namelijk de verwachtingswaarde uit de evacuatieboom, die in zijn geheel wordt vermenigvuldigd wordt met het inwonersraster.



Figuur 3-2. Fictief voorbeeld van evacuatiefractie als functie van de beschikbare tijd voor een gemiddelde en minimale uitvoering. Om een bepaalde evacuatiefractie te halen is bij een minimale uitvoering meer tijd nodig dan bij de gemiddelde uitvoering.



Figuur 3-3. Fictief voorbeeld waarbij op basis van een gegeven evacuatiefractie op het moment van de bres, het verdere verloop van vluchten is afgeleid.

3.2.2 Aannames en overwegingen

Een veelbesproken kwestie binnen de Kennisalliantie is hoe te komen tot een goed onderbouwde keuze met betrekking tot de effectiviteit van het evacueren na de bres. De volgende overwegingen hebben hierbij meegespeeld:

- **Toegankelijkheid van het wegennetwerk:** Na de overstroming kunnen wegen onbegaanbaar zijn door puin, omgevallen bomen of overstromingen. Hierdoor kan de wegcapaciteit afnemen en worden mogelijk ontsluitingswegen ontoegankelijk. Hierdoor neemt de efficiëntie van de evacuatie dus af. Hier wordt in kustscenario's al rekening mee gehouden. Daar wordt aangenomen dat een dag voor en na de bres, evacuatie niet mogelijk is door stormcondities. Dit geldt in zekere mate ook voor de overgangsgebieden voor scenario's waarbij storm een rol speelt.

- **Gebied:** De toegankelijkheid van het gebied zal verder worden beïnvloed door de locatie waar de overstroming plaats vindt. In het kustgebied spelen stormcondities een grote rol bij mogelijke overstromingen, wat evacuatie verder kan verhinderen. Tegelijkertijd kunnen mensen in het rivierengebied, indien hoge gronden aanwezig zijn, zich mogelijk sneller in veiligheid brengen. Het is bij gebieden die vanaf meerdere kanten bedreigd worden bijvoorbeeld niet altijd het geval dat mensen tijdens de preventieve evacuatie zich van de bres af bewegen. Dit omdat het dan vaak nog onbekend is waar deze op gaat treden. In gebieden met hoge gronden lijkt het daarentegen wel waarschijnlijk dat mensen van de mogelijke breszone af evacueren.
- **Coördinatie en communicatie:** Voorafgaand aan de overstroming kunnen communicatiekanalen (zoals internet en radio) nog goed functioneren, maar na een dijkdoorbraak, al dan niet in combinatie met een storm, kunnen deze verstoord of zelfs buiten werking zijn. Dit maakt het moeilijker of onmogelijk om evacuatie-instructies te coördineren. Hierdoor kan de efficiëntie van de evacuatie afnemen. Daarnaast zal er naar alle waarschijnlijkheid ook een bepaalde mate van chaos ontstaan als een overstroming heeft plaats gevonden. Bakhshian en Martinez-Pastor (2023) geven een overzicht van menselijk gedrag tijdens het evacuatieproces. Mensen die nog aan het evacueren zijn, zullen mogelijk hun plan bijstellen. Dat kan leiden tot extra kruisend verkeer, nog beschikbare uitgangen die komen te vervallen, en hulpverleners die mogelijk kiezen voor de eigen veiligheid. Dit kan een nadelig effect op de voortgang van de evacuatie, maar maakt het bovenal lastig voorspelbaar.
- **Bekende breslocatie:** Na het moment van de bres is de locatie van de bres, en daarmee het bedreigde gebied, bekend. Hierdoor kan, mits er nog communicatie mogelijk is, efficiënter geëvacueerd worden. Tegelijkertijd is het gevaar voor nieuwe bressen dan niet per definitie geweken.
- **Minder mensen in het overstroomde gebied:** Wegens preventieve evacuatie zal een deel van de mensen het gebied al verlaten hebben. Dit zorgt ervoor dat, ongeacht de staat van het wegennetwerk, de efficiëntie van de evacuatie verhoogd wordt.
- **Mensen anders verdeeld over het gebied:** Tijdens een preventieve evacuatie bewegen mensen zich door het potentieel overstroomde gebied. Als op een gegeven moment het niet meer mogelijk is om te verplaatsen in het gebied, is het niet zo dat deze mensen opeens teruggaan naar hun vertrekpunt. Dit betekent dat de verdeling van mensen in het gebied waarschijnlijk anders zal zijn, met mogelijk meer mensen die zich verder van de bres bevinden dan in normale situaties. Ook dit beïnvloedt de efficiëntie van de evacuatie.

Dit leidt tot de twee belangrijke aannames voor het meenemen van de aankomsttijd in de slachtofferberekeningen. Dat zijn:

- 1 De efficiëntie van de uitvoering van evacueren neemt altijd af na het moment van de bres, ongeacht het gebied. Er wordt wel per gebied gerekend met een gebied specifieke reductiefactor op deze efficiëntie, omdat de overstroming en mogelijk weercondities, kunnen zorgen dat ontsluitingswegen ontoegankelijk zijn geworden.
- 2 Vluchten na het bresmoment is niet mogelijk bij storm gedreven overstromingen.

3.3 Effect van onzekerheid in locatie van blootstelling

In de huidige methodiek wordt aangenomen dat mensen vanaf het moment van de dijkdoorbraak stoppen met evacueren en daardoor thuis worden getroffen. Als aankomsttijd wordt meegenomen vervalt als het ware deze aanname. Dit introduceert wel een bepaalde mate van onzekerheid in de locatie van blootstelling (waar mensen getroffen worden). De onzekerheid in de locatie van de blootstelling wordt meegenomen door een bandbreedte voor de evacuatiefractie op te nemen. We komen tot drie scenario's:

- Evacuatie verloopt zoals verwacht (gemiddeld scenario).
- Evacuatie verloopt effectiever dan verwacht (bovengrens). In dit scenario kunnen meer mensen het gebied veilig verlaten dan in het gemiddelde scenario. Omdat deze mensen in veiligheid zijn, hebben zij een mortaliteit van 0.
- Evacuatie verloopt minder goed dan verwacht (ondergrens). In dit scenario zijn er meer mensen dan verwacht nog onderweg in het gebied. Zij worden blootgesteld op een ongunstige locatie. Voor het extra aantal mensen ten opzichte van het gemiddelde scenario dat zich op een ongunstige locatie bevindt, geldt een 5x hogere mortaliteit dan de berekende mortaliteit per locatie (Kolen, Maaskant en Pleijter, 2014; PBL, 2014).

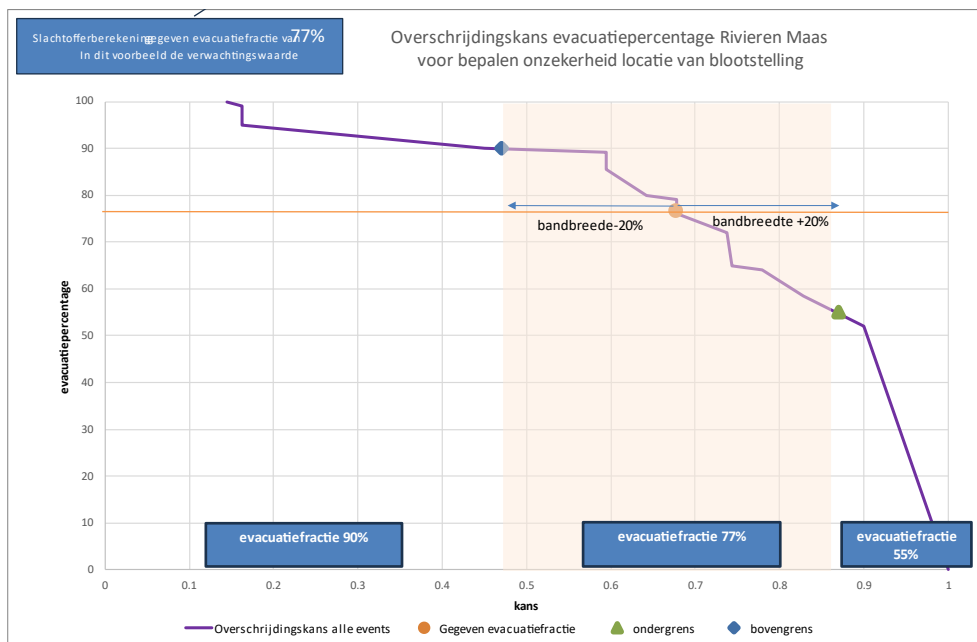
De evacuatiefractie in het gemiddelde scenario is een door de gebruiker zelf te kiezen waarde. Als voorbeeld kan uitgegaan worden van de verwachtingswaarde (gemiddeld scenario) van de evacuatiefractie of de ondergrenswaarde o.b.v. de evacuatieschatting. Voor het Rivierengebied is dit respectievelijk 77% en 59%.

De evacuatiefractie in het bovengrens- en ondergrensscenario is het evacuatiepercentage dat hoort bij respectievelijk een 20% hogere of lagere kans (-) dan de kans behorende bij de gekozen evacuatiefractie in het gemiddeld scenario. Deze evacuatiepercentages worden bepaald op basis van de kansverdeling van alle individuele gebeurtenissen uit de evacuatiebomen (overschrijdingskans van +/- 20%).

Voorbeeld:

Stel dat aangenomen wordt dat de gegeven evacuatiefractie 77% is voor het Rivierengebied, dan is bij een bandbreedte van +/- 20% kans, de evacuatiefractie in het bovengrensscenario 90% en in het ondergrensscenario 55% (zie onderstaande grafiek in Figuur 3-4).

In het bovengrens scenario zijn 13% meer mensen op een veilige plek dan in het gemiddelde scenario. Voor deze mensen geldt een mortaliteit van 0%. In het ondergrensscenario zullen 27% meer mensen blootgesteld worden op onveilige plek (met mortaliteit 5x hoger dan in het gemiddelde scenario).



Figuur 3-4. Voorbeeld kansverdeling Rivierengebied Maas.

De kansverdeling in Figuur 3-4 is afgeleid op basis van beschikbare evacuatiebomen voor het Rivierengebied (Maas). Voor de andere gebieden (Kust, Overgang, Rivieren) zijn andere evacuatiebomen beschikbaar en kunnen vergelijkbare kansverdelingen hebben. Deze kunnen echter wel een andere vorm hebben. Hoeveel mensen er meer (bovengrens) of minder (ondergrens) evacueren dan in het gemiddelde scenario, hangt dus af van deze kansverdeling, en wat de verwachte evacuatiefractie is voor een scenario. In het voorbeeld in Figuur 3-4 is dat 77%. Maar als dat een hoger of lager percentage is, schuiven de bovengrens en ondergrens ook mee.

3.4 Combinatie

Het gecombineerde effect van aankomsttijd en onzekerheid in de locatie van de blootstelling wordt berekend op door de beschreven methodiek in paragraaf 3.2 te integreren in de methodiek in paragraaf 3.3. Dat betekent dat per locatie het aantal slachtoffers wordt berekend voor drie scenario's: gemiddeld scenario, bovengrensscenario en ondergrensscenario.

Allereerst wordt voor het gemiddelde scenario het aantal slachtoffers bepaald door de vluchtfractie bij de evacuatiefractie op te tellen. Deze waarde voor de "evacuatiefractie+vluchtfractie" is per locatie (gridcel) verschillend, vanwege de ruimtelijk gedifferentieerde aankomsttijd.

Vervolgens wordt volgens de beschreven methodiek in paragraaf 3.3 de "evacuatiepercentage+vluchtfractie" voor het bovengrens- en ondergrensscenario bepaald behorende bij respectievelijk een 20% hogere of lagere kans (-) dan de kans bijbehorende bij de gekozen "evacuatiefractie+vluchtfractie" in het gemiddeld scenario. Hiervoor wordt de afgeleide kansverdeling van alle individuele gebeurtenissen uit de evacuatiebomen gehanteerd (overschrijdingskans van +/- 20%).

4 Case studies

4.1 Overzicht

De beschreven methodiek in hoofdstuk 3 is uitgewerkt aan de hand van twee case studies:

- Doorbraak in dijktraject 16-2 bij Nieuw-Lekkerland (overgangsgebied), uitgewerkt in paragraaf 4.2;
- Doorbraak in dijktraject 36-2 bij Cuijk (bovenrivierengebied), uitgewerkt in paragraaf 4.3.

De ligging van de twee gekozen breslocaties is weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1. Ligging van de twee breslocatie voor deze case studie.

Kanttekening

Langs de kust zijn overstromingen (in het primaire watersysteem) vaak stormgedreven. Stormcondities hebben effect op evacuatiemogelijkheden en daarom op slachtoffers. Tijdens een storm is het door de hoge windsnelheden niet mogelijk om veilig te evacueren. Als de piek van de storm voorbij is, zijn de evacuateroutes mogelijk gestremd door omgewaaide bomen. Het uitgangspunt is daarom dat het evacuatieproces stopt op het moment dat de bres ontstaat. Dat betekent dat geen rekening wordt gehouden met aankomsttijden in het kustgebied.

Een hoogwater in het overgangsgebied wordt veroorzaakt door een combinatie van storm en verhoogde afvoeren. In de case studie is daarom het uitgangspunt gehanteerd dat vluchten pas vanaf 24 uur na het ontstaan van de bres mogelijk is, als de storm is gaan liggen. Het is zeer de vraag of dit verondersteld mag worden, omdat de verwachting is nog steeds bomen zijn omgewaaid en daardoor wegen zijn gestremd. Doordat de windsnelheden in het overgangsgebied wat lager zijn dan direct langs de kust, zijn er mogelijk minder bomen omgewaaid en dus nog meer routes beschikbaar voor het vluchten.

Overstromingen in het bovenrivierengebied zijn juist afvoer gedreven en extreem hoge windcondities zullen hier niet snel optreden. Daarom wordt verondersteld dat na het optreden van de bres het nog mogelijk is om te vluchten.

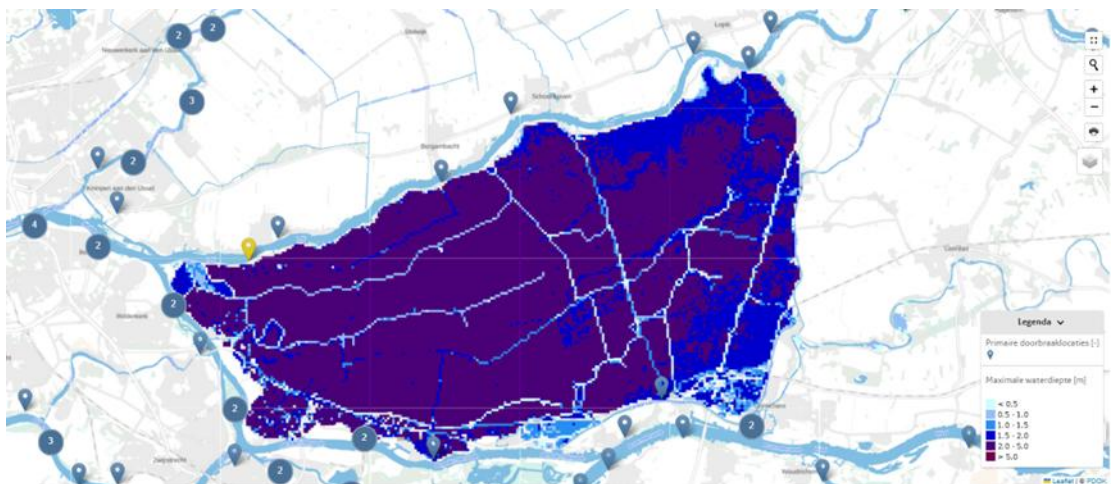
4.2 Uitwerking overgangsgebied

Voor het overgangsgebied is gebruik gemaakt van een bestaande overstromingssimulatie (scenario ID is 13545) uit de Landelijke Databank Overstromingsinformatie (LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland en een rivierwaterstand met een herhalingstijd van 2.000 jaar. Dit is een scenario waar storm niet per se een grote rol speelt.

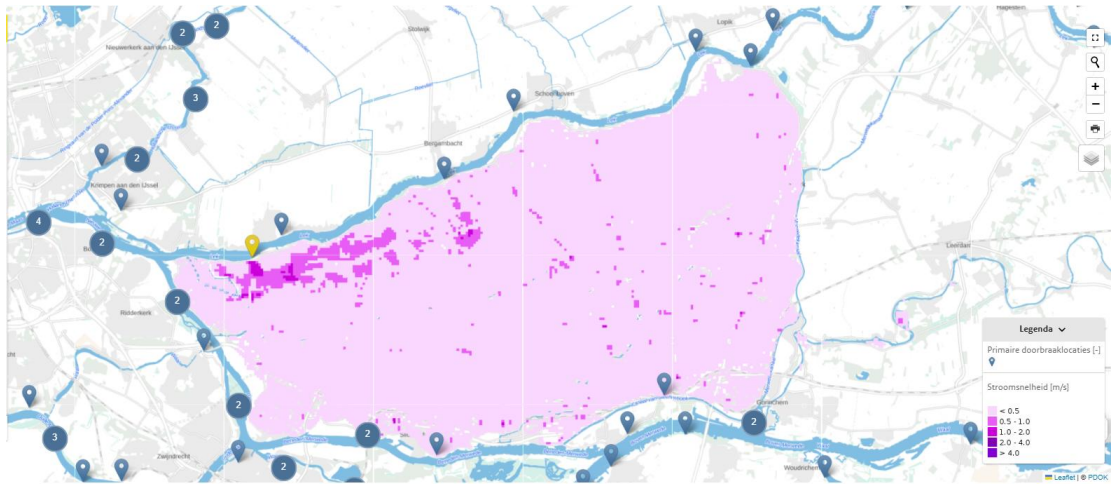
De verwachte evacuatiefractie is laag in dit gebied. Bij een gemiddelde evacuatieboom is dit 12% voor dit gebied. Om de gevoeligheid van de evacuatiefractie bij het begin van de bres op de resultaten te laten zien, zijn ook sommen gemaakt met initiële evacuatiefracties van 20, 40, 60 en 80%. Het effect op het verwachte aantal slachtoffers is later in deze paragraaf opgenomen in Tabel 4-1. In bijlage B.1 grafieken afgeleid voor de vluchtfractie in de tijd, bij de verschillende initiële evacuatiefracties. Deze vluchtfractiegrafieken zijn ook vergeleken met de vluchtfractiefuncties die door De Bruijn en Maas (2022) zijn voorgesteld. In Figuur 4-6 wordt de vluchtfractie getoond voor het doorgerekende scenario met de verwachte evacuatiefractie van 12%.

In Figuur 4-2 tot en met Figuur 4-5 wordt een beeld getoond van de waterdiepte, stroomsnelheid, stijgsnelheid en aankomsttijd. Het overstromd gebied wordt omringd door de Beneden Merwede, Noord en de Lek. De verstedelijkte gebieden liggen dan ook langs deze rivieren. De waterdiepte is in een groot deel van het gebied 2 à 3 m. De stijgsnelheid is in de buurt van de bres (noordelijke compartiment tot aan regionale waterloop) tussen 1 à 4 m/u over de eerste 1,5 m waterdiepte (Figuur 4-4). De bovenste helft van het gebied overstromt binnen 24 uur en het duurt 3 à 4 dagen tot het zuidelijke gebied grenzend aan de Beneden Merwede overstromd (Figuur 4-5).

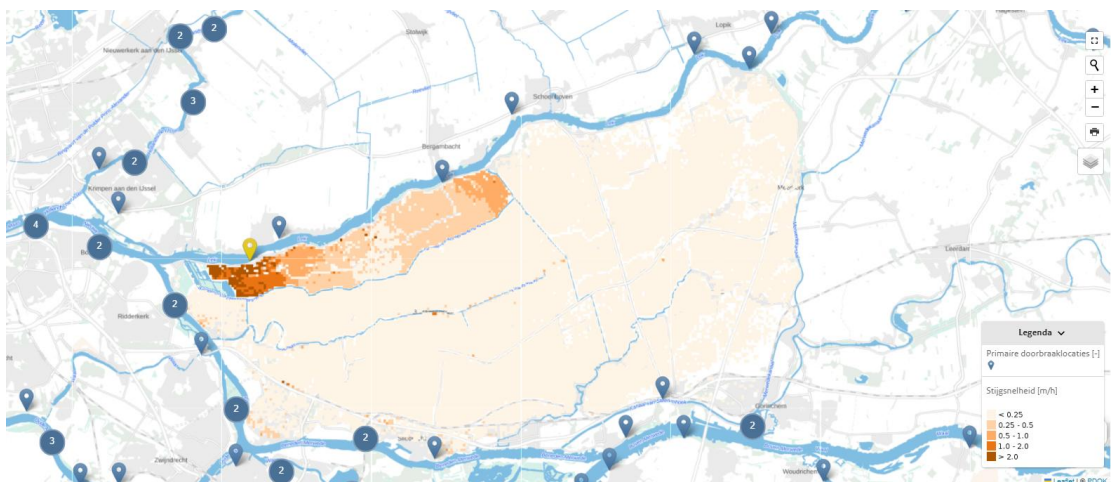
Na het optreden van de bres wordt verondersteld dat een deel van de uitgangen gestremd zal zijn doordat deze overstromd zijn. Deze kunnen dus niet gebruikt worden om te vluchten. In de case studie gaan we ervan uit dat 50% van de uitgangen beschikbaar zijn.



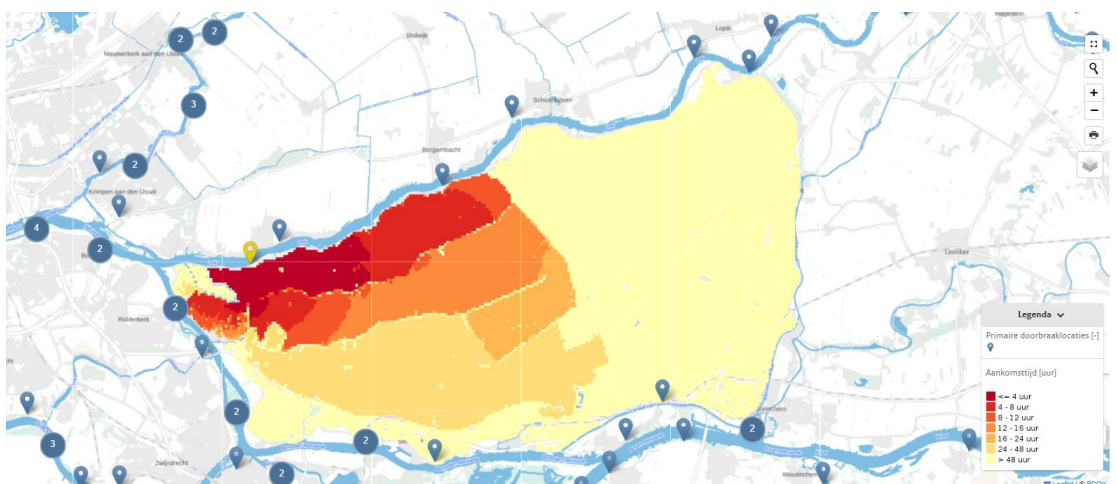
Figuur 4-2. Maximale waterdiepte bij overstromingsscenario (ID 13545 in LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland bij een T2.000 buitenwaterstand.



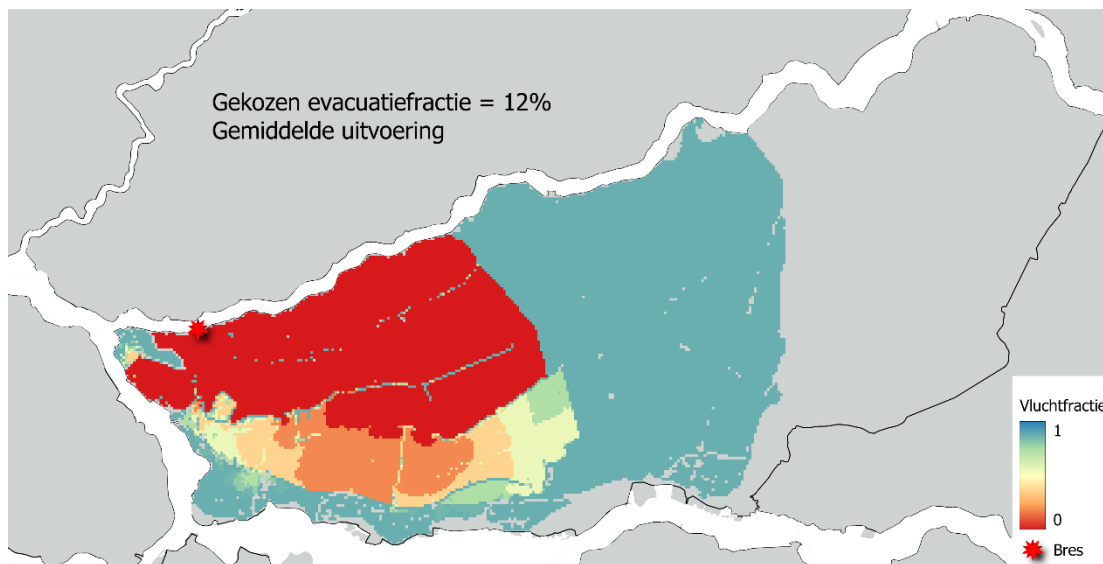
Figuur 4-3. Maximale stroomsnelheid bij overstromingsscenario (ID 13545 in LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland bij een T2.000 buitenwaterstand.



Figuur 4-4. Maximale stijgsnelheid bij overstromingsscenario (ID 13545 in LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland bij een T2.000 buitenwaterstand.



Figuur 4-5. Aankomsttijd bij overstromingsscenario (ID 13545 in LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland bij een T2.000 buitenwaterstand.



Figuur 4-6. Berekende vluchtfractie bij overstromingsscenario (ID 13545 in LDO) met een dijkdoorbraak bij Nieuw Lekkerland bij een T2.000 buitenwaterstand, waarbij de evacuatiefractie 12% is.

Resultaten

Doordat de verwachte evacuatiefractie hier laag is (gemiddeld 12%), zijn er na het optreden van de bres nog veel mensen in het gebied aanwezig. Daarbij is aangenomen dat vluchten pas mogelijk is 24 uur na de bres, waarbij 50% van de uitgangen niet beschikbaar is voor vluchten (zie resultaten in Tabel 4-1). Het is dan ook logisch dat het meenemen van de aankomsttijd wel leidt tot minder slachtoffers ten opzichte van de standaardmethode, maar niet zo'n groot effect heeft als bij gebieden met een hoge evacuatiefractie en lange aankomsttijd. Om het effect van de aankomsttijden mee te nemen, is de gemiddelde en minimale uitvoering hier gemiddeld. Hoe meer mensen voorafgaand aan de bres al zijn geëvacueerd, des te kleiner is hier het effect van het meenemen van de aankomsttijden, omdat er simpelweg minder mensen over zijn die nog kunnen vluchten. Het meenemen van de onzekerheid in de locatie van de blootstelling geeft hier een breed bereik. Hoe hoger de evacuatiefractie, des te groter wordt het aantal mensen dat mogelijk nog onderweg is en daar getroffen wordt.

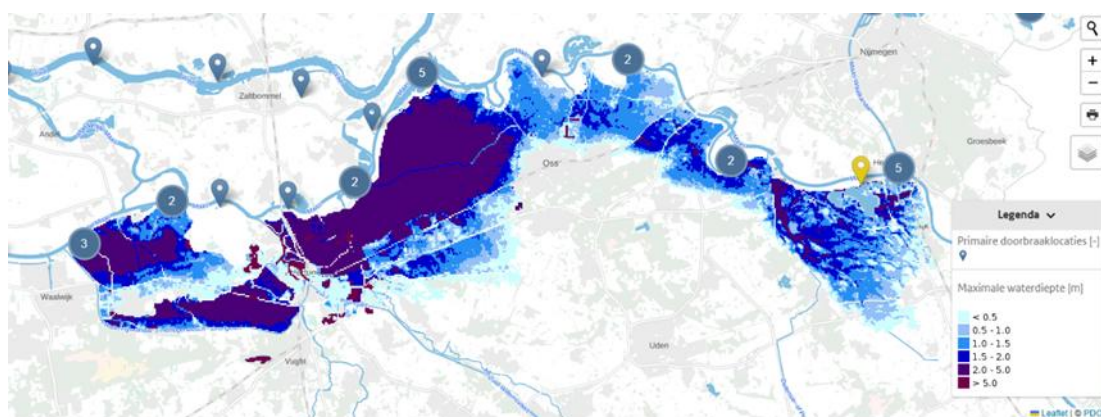
Tabel 4-1. Overzicht berekende slachtofferaantallen voor een overstroming in het overgangsgebied met de huidige methode, meenemen van de aankomsttijd (vluchtfractie), meenemen van onzekerheid in de locatie blootstelling en de combinatie, gegeven verschillende evacuatiefracties.

Methode	Evacuatiefractie normering 12%	Evacuatiefractie 20%	Evacuatiefractie 40%	Evacuatiefractie 60%	Evacuatiefractie 80%
Huidige methode (standaardmethode) met evacuatiefractie	825	748	561	374	187
Nieuwe methode: evacuatiefractie + vluchtfractie	607	538	409	278	152
Bandbreedte nieuwe methode: evacuatiefractie + vluchtfractie & onzekerheid locatie blootstelling (-20% en +20%)	472-912	402-925	269-896	121-971	93-1063

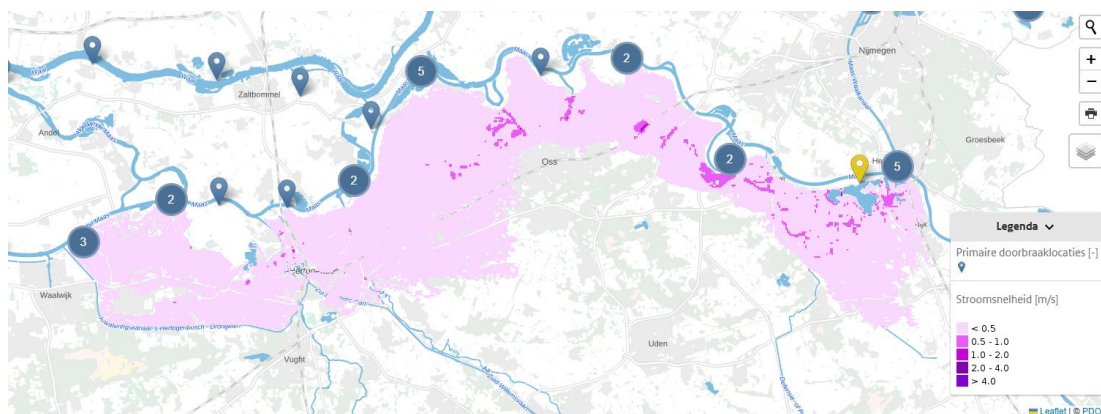
4.3 Uitwerking bovenriviereengebied

Voor het riviereengebied is gebruik gemaakt van een bestaande overstromingssimulatie (scenario ID is 4939) uit de LDO met een dijkdoorbraak bij de Kraaijensbergse Plas en een rivierwaterstand met een herhalingsjijd van 1.250 jaar.

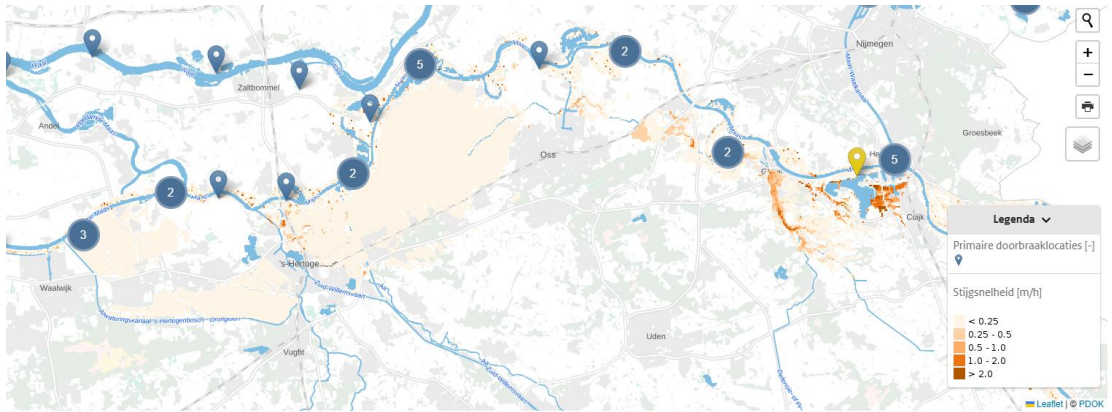
In Figuur 4-7 tot en met Figuur 4-10 wordt een beeld getoond van de waterdiepte, stroomsnelheid, stijgsnelheid en aankomsttijd. Het overstromd gebied ligt aan de noordzijde langs de Maas en aan de zuidzijde de hoge gronden. Een groot deel van de inwoners in het gebied wonen in de stad Den Bosch en het duurt meer dan 2,5 tot 3 dagen voordat deze stad overstromd vanuit de breslocatie Kraaijensbergse Plas. De maximale waterdiepten van 2,5 à 3,5 m treden op in het westelijke/benedenstroomse deel van het gebied. Bij een gemiddelde evacuatieboom is dit 77% voor dit gebied. Om de gevoeligheid van de evacuatiefractie bij het begin van de bres op de resultaten te laten zien, zijn ook sommen gemaakt met initiële evacuatiefracties van 20, 40, 60 en 80%. Het effect op het verwachte aantal slachtoffers is opgenomen in Tabel 4-2. In bijlage B.2 zijn grafieken afgeleid voor de vluchtfractie in de tijd, bij de verschillende initiële evacuatiefracties. Deze vluchtfractiefuncties zijn ook vergeleken met de vluchtfractiefuncties die door De Bruijn en Maas (2022) zijn voorgesteld.



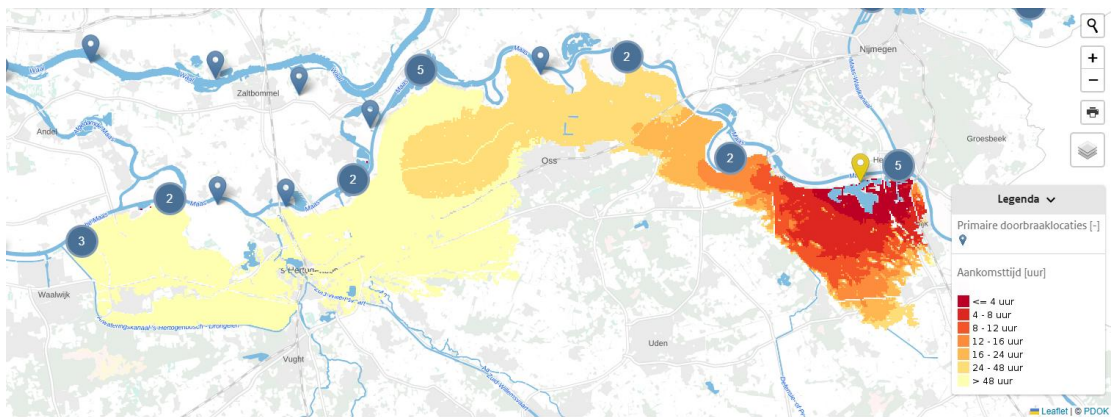
Figuur 4-7. Maximale waterdiepte bij overstromingsscenario (scenario ID 4939 in het LDO) met een dijkdoorbraak bij de Kraaijensbergse Plas bij een T1.250 buitenwaterstand.



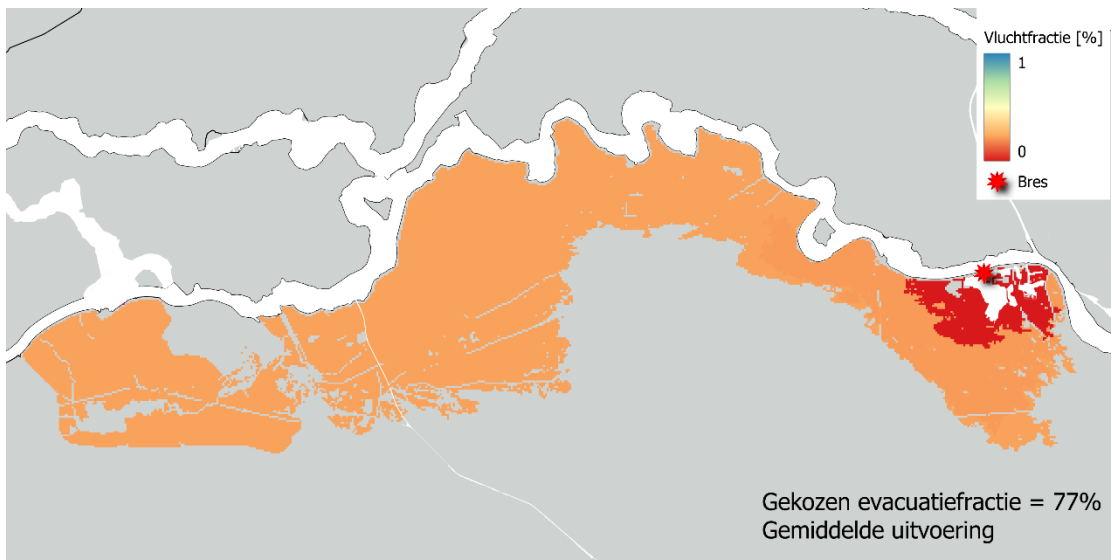
Figuur 4-8. Maximale stroomsnelheid bij overstromingsscenario (scenario ID 4939 in het LDO) met een dijkdoorbraak bij de Kraaijensbergse Plas bij een T1.250 buitenwaterstand.



Figuur 4-9. Maximale stijgsnelheid bij overstromingsscenario (scenario ID 4939 in het LDO) met een dijkdoorbraak bij de Kraaijbergse Plas bij een T1.250 buitenwaterstand.



Figuur 4-10. Aankomsttijd bij overstromingsscenario (scenario ID 4939 in het LDO) met een dijkdoorbraak bij de Kraaijbergse Plas bij een T1.250 buitenwaterstand.



Figuur 4-11. Berekende vluchtfractie bij overstromingsscenario (scenario ID 4939 in het LDO) met een dijkdoorbraak bij de Kraaijbergse Plas bij een T1.250 buitenwaterstand, waarbij de evacuatiefractie 77% is.

Resultaten

Vanwege de ligging aan de hoge gronden is de evacuatiefractie hoog in dit gebied. Veel van de mensen die na het moment van optreden van de bres nog in het gebied zijn, hebben voldoende tijd om een veilige plek te vinden. Als we het effect van aankomsttijden via de vluchtfractie meenemen, dan worden niet veel meer slachtoffers berekend (Tabel 4-2). Het effect van de onzekerheid in de locatie van de blootstelling leidt tot meer slachtoffers ten opzichte van de standaardmethode, doordat nu ook wordt meegenomen dat een deel van de blootgestelde mensen op een onveilige plek kan zijn, waarop een factor 5 hogere mortaliteitswaarde wordt toegepast dan in de standaardmethode.

Het gecombineerde effect van de vluchtfractie en de onzekerheid in de locatie van de blootstelling leidt nog steeds tot een aanzienlijke afname van het aantal slachtoffers ten opzichte van de standaardmethode, doordat nog maar een klein deel van de mensen in het gebied is en onderweg wordt getroffen. Dit is met name te zien bij een laag aangenomen evacuatiefractie.

Ten opzichte van de case in het overgangsgebied, wordt hier de spreiding kleiner, naarmate de evacuatiefractie toeneemt. Dit komt door de vorm van de kansverdeling van de evacuatiefractie. Voor dit gebied is de kans groot dat er veel mensen kunnen evacueren. Hierdoor geeft de 20% bandbreedte voor de boven- en ondergrens maar een klein verschil in hoeveel mensen er meer of minder onderweg zijn.

Tabel 4-2. Overzicht berekende slachtofferaantallen voor een overstroming in het rivierengebied met de huidige methode, meenemen van de aankomsttijd (vluchtfractie), meenemen van onzekerheid in de locatie blootstelling en de combinatie, gegeven verschillende evacuatiefracties.

Methode	Evacuatiefractie 77%	Evacuatiefractie 20%	Evacuatiefractie 40%	Evacuatiefractie 60%	Evacuatiefractie 80%
Huidige methode (standaardmethode) met evacuatiefractie	210	716	537	358	179
Nieuwe methode: evacuatiefractie + vluchtfractie	15	81	56	35	12
Bandbreedte nieuwe methode: evacuatiefractie + vluchtfractie & onzekerheid locatie blootstelling (-20% en +20%)	9-187	41-301	29-262	18-212	6-179

5 Discussie

Slachtoffers worden in de huidige standaardmethode berekend op basis van het aantal achterblijvers na een overstroming. Dit aantal achterblijvers is nu gebaseerd op de evacuatiefracties en het aantal inwoners. In de huidige modellen worden de volgende keuzes gemaakt:

- 1 **Het aantal mensen dat wordt blootgesteld** is het aantal inwoners minus de mensen die het gebied kunnen verlaten. Hiervoor wordt vaak een evacuatiefractie gebruikt, die beschrijft hoeveel mensen tot het moment van optreden van de bres kunnen evacueren. Deze fracties zijn afgeleid voor grote gebieden om schijnnaauwkeurigheid te voorkomen. De aankomsttijden worden nu nog niet benut, maar die kunnen significant zijn voor het aantal mensen dat wordt blootgesteld.
- 2 **De effectiviteit van een evacuatie** is afhankelijk van de interactie tussen interventies van de overheid, gedrag van mensen en de status van de infrastructuur en is daarmee dus onzeker.
- 3 **Kenmerken van de overstroming** en in bijzonder bresvorming: we gaan uit van een “gemiddeld” bresscenario die optreedt bij de maximale waterstand op het buitenwater en op een zekere locatie. Maar de bres kan ook al vóór de piek van het hoogwater of erna optreden en dat beïnvloedt het overstromingspatroon, waterdiepte, stijgsnelheid, stroomsnelheid en aankomsttijd.
- 4 **De mortaliteitsfuncties** zijn gebaseerd op met name empirische data uit 1953. Deze bevatten impliciete effecten van gebouwsterkte en zelfredzaamheid van mensen. Deze functies houden rekening met waterdiepte, stijg- en stroomsnelheid maar geen rekening met de evacuatieomstandigheden waarin mensen zich bevinden. Bekend is dat de mortaliteit van mensen onderweg tijdens een evacuatie veel groter is dan van de mensen die schuilen, zoals dat nu ook al in de maatwerkmethode in SSM is geïmplementeerd.
- 5 **Locatie van blootstelling**. Van mensen die niet zijn geëvacueerd, wordt aangenomen dat de mensen thuis of nabij huis zijn. Achterblijvers worden namelijk over het inwonersgrid verdeeld en belanden zo weer op de locatie van waaruit zij vertrokken. In werkelijkheid zijn veel mensen waarschijnlijk ergens anders.
- 6 **De beschikbare tijd** hangt naast alarmering (op basis van afgesproken waterpeilen) sterk af van de inschatting van de dijksterkte en het moment van falen. Men zal immers besluiten over evacueren op basis van een verwacht moment van een dijkdoorbraak. Deze beschikbare tijd is onzeker en kan wel eens langer zijn dan nu gedacht. De kennis rondom falen van waterkeringen en over het verbeteren van de waterstandsvoorspellingen is bovendien sterk in ontwikkeling.

De onzekerheid van de ongewenste blootstelling is afhankelijk van de aankomsttijd. Als deze aankomsttijd heel lang is, dan is vrijwel iedereen uit het gebied, en is dus ook de onzekerheid klein. Als er nog veel mensen ‘onderweg’ zijn, dan is de inschatting van de groep die wordt blootgesteld onzeker. Zo kan de evacuatie effectiever zijn dan verwacht. Dat is gunstig, want deze mensen zijn dan geen potentieel slachtoffer. De evacuatie kan ook minder effectief zijn dan verwacht, deze groep mensen is dan juist extra kwetsbaar. Onder deze groep zullen naar verwachting veel meer slachtoffers vallen, omdat deze groep zich bevindt onder de meest kwetsbare omstandigheden (onderweg).

De vraag is of deze twee aspecten leiden tot betere inschattingen van slachtoffers. Deze inschatting is mede afhankelijk van de gekozen evacuatiestrategie. Grofweg zijn er 3 strategieën:

- 1 **Iedereen moet weg.** Stel evacuatieplan is gebaseerd op 100% van de mensen evacueren (inclusief aankomsttijden). Iedereen die niet het gebied kan verlaten (en niet zelf de keuze maakt om te schuilen) wordt tijdens de evacuatie getroffen. De mensen worden ergens in het gebied blootgesteld, en bevinden zich dan mogelijk op een zeer ongunstige plek met een hogere mortaliteit dan nu verondersteld.

Het aantal mensen dat wordt blootgesteld is dan het aantal inwoners, minus de evacuatiefractie, minus de vluchtfractie³. De mortaliteit is hoog, omdat hier wordt verondersteld dat de mensen onderweg getroffen worden. Deze mortaliteit is (5x) hoger dan de standaard mortaliteitsfunctie.

- 2 **Evacueren tot aan het moment van de doorbraak.** In oefeningen blijkt vaak dat wel rekening wordt gehouden met de beschikbare tijd. De evacuatie wordt stilgelegd op het moment dat de bres optreedt. Dat gebeurt mede voor de veiligheid van hulpverleners. Ook wil men onbeheersbare situaties voorkomen. Hierbij kan natuurlijk de vraag worden gesteld of er een ruimtelijk onderscheid gemaakt kan worden om extra aankomsttijd te benutten.

Het aantal mensen dat wordt blootgesteld is dan het aantal inwoners, minus de evacuatiefractie. De mortaliteit is gemiddeld, er zijn vrijwel geen mensen onderweg getroffen omdat de evacuatie is stilgelegd. De aankomsttijd wordt niet benut, de kans op blootstelling op een onhandige locatie is dan ook klein.

- 3 **Evacueren tot aan lokale blootstelling met de aankomsttijd.** Hierdoor wordt de extra beschikbare tijd benut, waardoor extra mensen het bedreigd gebied verlaten. Doordat het plan ervan uitgaat dat het evacuatieproces doorgaat tot aan het moment van blootstelling, gaan onzekerheden in de locatie van blootstelling ook een rol spelen. Deze onzekerheden spelen minder daar waar de aankomsttijd relatief lang is, maar kunnen significant zijn daar waar de aankomsttijd relatief beperkt is.

Het aantal mensen dat wordt blootgesteld is dan het aantal inwoners, minus de evacuatiefractie en de vluchtfractie. Er kan onderscheid worden gemaakt in groepen die volgens plan achterblijven (met de gemiddelde mortaliteit), een groep die alsnog het gebied kan verlaten en een groep die onderweg is getroffen met een hoge mortaliteit.

De voorgestelde methode biedt ruimte om aankomsttijden mee te nemen in de slachtofferberekening, waardoor meer mensen, zeker op plekken waar veel tijd is voordat het water er komt, alsnog kunnen vluchten als zij niet al waren geëvacueerd. De voorgestelde methodiek maakt beter gebruik van beschikbare gegevens dan de generieke methode van De Bruijn en Maas (2022) door gebiedsspecifieke evacuatiebomen te gebruiken. Tegelijkertijd is er niet voldoende data voor een validatie van de methode, waardoor het niet mogelijk is om harde conclusies te trekken.

Vergeleken met de situatie in 1953 zijn de communicatiemiddelen sterk verbeterd. Hierbij kan gedacht worden aan de hedendaagse (tele)communicatiemiddelen, zoals radio, televisie, internet en (mobiele) telefonie, maar ook de beschikbare informatie die door overheden naar burgers wordt gecommuniceerd. Mensen kunnen zich ook zelf thuis voorbereiden, zelf (nood)maatregelen nemen of op eigen initiatief beslissen tot evacuatie. Op dit moment is er niet voldoende onderzoek en gegevens beschikbaar om te onderzoeken wat hiervan het effect is op evacuatie- en slachtofferberekeningen.

³ Vluchtfractie bepalen op basis van aankomsttijd in klassen van x uur, bijvoorbeeld elke 6 uur.

Ten opzichte van de situatie in 1953 kan worden aangenomen dat de gebouwsterkte in Nederland is toegenomen. Verschillende studies laten zien dat muren van enkelsteens gemetselde gebouwen, die worden verondersteld een van de zwakste type muren te zijn waar het gaat om overstromingsbestendigheid, een waterstandsverschil tussen binnen en buiten van orde grootte 1 à 1,5 m aan kan. Tijdens de overstromingen in Limburg in 2021 zijn vergelijkbare waterdieptes gerapporteerd (Slager, 2023). Hierbij zijn geen instortingen van gebouwen gemeld, al is er hier geen onderzoek gedaan naar de maximale waterstandsverschillen tussen buiten en binnen. Ondanks dat gebouwsterkte lijkt toegenomen, is het ingewikkeld gebleken om het positieve effect van toegenomen gebouwsterkte mee te nemen. Het instorten van gebouwen is impliciet al meegenomen in de bestaande mortaliteitsfuncties, wat het lastig maakt om hier bijvoorbeeld expliciet een correctiefactor voor mee te nemen. Het gevolg van het niet meenemen van toegenomen gebouwsterkte kan zijn dat de gehanteerde mortaliteitsfuncties nog steeds te conservatief zijn.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Met dit rapport wordt de Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie afgerond. Het rapport biedt een overzicht van de eerdere inzichten van de Kennisalliantie, identificeert resterende kennisleemten en introduceert een nieuwe methodiek voor slachtofferberekeningen, onderbouwd met case studies. De case studies zijn op een zodanige manier uitgewerkt, dat de aanpak ook kan worden geïmplementeerd in de Schade en Slachtoffermodule (SSM).

De belangrijkste bevindingen zijn:

- **Aankomsttijd biedt aanvullende vluchtmogelijkheden:** Het meenemen van de aankomsttijd laat zien dat evacuatie na een dijkdoorbraak niet hoeft te stoppen, zeker voor locaties waar er veel tijd is voordat het water er komt. Het meenemen van de aankomsttijd leidt tot minder getroffen en slachtoffers. Hoe groot dit effect is, hangt af van de evacuatiefractie bij aanvang van de overstroming, en ook van het gebied. Bij stormgedreven overstromingen, zal de storm ook evacuatie verhinderen. En in dijkringen kan een overstroming het aantal ontsluitingswegen reduceren.
- **Onzekerheden door aankomsttijden:** Hoewel het meenemen van aankomsttijden meer recht doet aan het ruimtelijke karakter van een overstroming, introduceert dit ook nieuwe onzekerheden. Door de kans op ongewenste blootstelling expliciet mee te nemen, kan een inschatting worden gemaakt van deze onzekerheid.
- **Evacuatiestrategieën en hun invloed:** De mate waarin aankomsttijden en onzekerheden in blootstelling worden meegenomen, beïnvloedt de slachtofferschatting aanzienlijk. Evacuatieplannen kunnen actief bijdragen aan het verminderen van slachtoffers door gericht te sturen op beschikbare tijd en locatie van blootstelling, maar daarbij moet wel een veilige marge worden ingebouwd om de kans op ongewenste blootstelling te minimaliseren.

6.2 Aanbevelingen om bevindingen toe te passen

Om de bevindingen uit dit onderzoek praktisch toepasbaar te maken, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

Meenemen van aankomsttijden in berekeningen

- Integreer de mogelijkheid om aankomsttijden mee te nemen naast de standaardberekening met enkel de evacuatiefractie.
- Geef een bandbreedte van het effect van ongewenste blootstelling bij het gebruik van aankomsttijden om inzicht te bieden in de bijbehorende risico's. Hierbij is goede documentatie belangrijk om de betekenis van de bandbreedtes te duiden.

Gebiedsspecifieke benadering

Maak onderscheid tussen typen gebieden om evacuatie-effectiviteit beter in te schatten:

- **Stormgedomineerde gebieden:** aankomsttijden zijn hier minder relevant, omdat stormen de evacuatiemogelijkheden aanzienlijk beperken. Dat geldt voornamelijk voor de kust, voor het overgangsgebied is aangenomen dat evacuatie wel mogelijk is wanneer de storm is gaan liggen.
- **Onderscheid na een bres:** evacuatie is vaak minder effectief, afhankelijk van de toegankelijkheid van uitgangen:
 - Toegankelijke gebieden: hier blijven uitgangen beschikbaar (bijvoorbeeld gebieden grenzend aan hoger gelegen gronden).

- Beperkte gebieden: in deze gebieden vervallen uitgangen na een bres, waardoor routes langer en minder effectief worden. Een reductie van de effectiviteit van 50% is in deze studie als uitgangspunt genomen.

Wel wordt aanbevolen om deze aannames aan de hand van verkeersmodellen verder te onderbouwen of aan te scherpen.

- **Communicatie**: het ruimtelijke onderscheid kan worden verwerkt in evacuatieplannen en tijdig worden gecommuniceerd door de overheid of veiligheidsregio's, vooral na het bresmoment wanneer bedreigde gebieden duidelijk zijn.

Toepassing van inzichten in scenario's

De verkregen inzichten zijn praktisch toepasbaar voor:

- De veiligheidsregio's:
 - Verbeteren van evacuatieplannen;
 - Flexibiliteit bieden tijdens een crisis, waarbij evacuatiefracties variabel kunnen worden ingevoerd en aankomsttijden en hun effecten worden afgeleid uit scenario's en evacuatieschattingen.
- Beleidsmakers:
 - Ondersteuning bij inschattingen van de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers en het lokaal individueel risico, passend binnen het kader van basisveiligheid.

Ontwikkeling van kennis en data

Om een solide onderbouwing te bieden voor evacuatie- en slachtofferschattingen, is verdere kennisontwikkeling nodig:

- Flood Fatality Database uitbreiden:
 - De bestaande "Flood Fatality Database" actief vullen met gegevens over overstromingsgebeurtenissen. Het is gebleken dat hier een continue inspanning voor nodig is.
 - Overheden, zowel nationaal als internationaal (bijvoorbeeld binnen de EU, ICOLD, of Wereldbank), kunnen afspraken maken om data te delen en gezamenlijk deze database uit te breiden.
- Toegewijd team aanwijzen:
 - Stel een gespecialiseerd team samen dat data verzamelt en onderhoudt, gericht op de meest relevante overstromingsgebeurtenissen wereldwijd. Dit kan aan de hand van bureaustudies, door informatie uit te wisselen met plaatselijke contacten (waar overstromingen zijn) of door zelf het veld in te gaan.

Deze aanbevelingen dragen bij aan een verbeterde inschattingen voor slachtofferinschattingen en ondersteunen keuzes met betrekking tot evacuatiestrategieën. Bovendien benadrukken de aanbevelingen de noodzaak voor continu onderzoek en dataverzameling.

Literatuur

- Aboelata, Maged & Bowles, David. (2008). LIFESim: A Tool for Estimating and Reducing Life-Loss Resulting from Dam and Levee Failures. Institute for water resources, US Army Corps of Engineers.
- Apel, H., Vorogushyn, S., & Merz, B. (2022). Brief communication: Impact forecasting could substantially improve the emergency management of deadly floods: case study July 2021 floods in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 3005-3014.
- Asselman, N. (2005). *Consequences of floods. Damage to buildings and casualties*. WL-Delft Hydraulics. Technisch rapport, projectnummer: Q3668.00. Barendregt A, van Noortwijk J.M., van der Doef M. Holterman S.R.. 2005. *Determining the time available for evacuation of a dike-ring area by expert judgment*. Paper at ISSH - Stochastic Hydraulics, 23 and 24 May 2005, at Nijmegen.
- Bakhshian, E., & Martinez-Pastor, B. (2023). Evaluating human behaviour during a disaster evacuation process: a literature review. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*.
- Brussee, A. R. (2020). *Improving flood fatality risk assessment for river flooding in The Netherlands: Implications of alternative functions and model resolution variations on mortality and fatalities in the Bommelerwaard*. [MSc thesis]. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Brussee, A. R., Bricker, J. D., De Bruijn, K. M., Verhoeven, G. F., Winsemius, H. C., & Jonkman, S. N. (2021). Impact of hydraulic model resolution and loss of life model modification on flood fatality risk estimation: Case study of the Bommelerwaard, The Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12713.
- Creach, A., Bastidas-Arteaga, E., Pardo, S., & Mercier, D. (2022). Method to identify the likelihood of death in residential buildings during coastal flooding. *Buildings*, 12(2), 125.
- Dannenbergh, P.C. (2020). *Evacuation in Flood Threat Scenarios: Improving methods to estimate the required time for evacuation*. MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- De Bruijn, K. (2016). *Voorstel voor Kennisalliantie "Evacuatie en overstromingslachtoffers*. Kennisalliantie van TUD, Deltares, HKV, RWS en PBL. Deltares, projectkenmerk: 1230042-004-ZWS-0005.
- De Bruijn, K. (2019). *Kennisalliantie Slachtoffers en Evacuatie. Rapportage 2019*. Deltares, projectkenmerk: 11203682-012-ZWS-0007.
- De Bruijn, K., Kolen, B. (2020). *Rapportage kennisalliantie slachtofferrisico's en evacuatie 2020. Storylines en evacuatiebomen voor Dordrecht en de Gelderse Vallei*. Deltares, projectkenmerk: 11205235-007-ZWS-0001.
- De Bruijn, K., Maas, B. (2022). *Het meenemen van aankomsttijden in de analyse van slachtofferrisico's*. Deltares, projectkenmerk: 11206793-008-ZWS-0005.
- Endendijk, T., Botzen, W. J. W., de Moel, H., Aerts, J. C. J. H., Duijndam, S. J., Slager, K., Kolen, B., & Kok, M. (2023). *Experience From the 2021 Floods in the Netherlands: Household Survey Results on Impacts and Responses*. *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk*, 2, Article 9. <https://doi.org/10.59490/jcfr.2023.0009>.
- ENW (2021). *Hoogwater 2021. Feiten en Duiding*. ENW rapport.

- Hamidifar, H., & Nones, M. (2021). Global to regional overview of floods fatality: the 1951–2020 period. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2021, 1-22.
- Hamidifar, H., & Nones, M. (2023). Spatiotemporal variations of riverine flood fatalities: 70 years global to regional perspective. *River*, 2(2), 222-238.
- Jansen, L. (2019). *Structural damage to Dutch terraced houses due to flood actions*. TU Delft, MSc thesis.
- Jansen, L., Korswagen, P. A., Bricker, J. D., Pasterkamp, S., De Bruijn, K. M., & Jonkman, S. N. (2020). *Experimental determination of pressure coefficients for flood loading of walls of Dutch terraced houses*. *Engineering Structures*, 216, 110647.
- Johnstone et al (2005). Architecture, modelling framework and validation of BC hydro's virtual reality life safety model. Johnstone, W. M., Sakamoto, D., Assaf, H., & Bourban, S. in:
- Johnstone, W. M. (2012). Life safety modelling framework and performance measures to assess community protection systems: application to tsunami emergency preparedness and dam safety management (T). University of British Columbia. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073328>
<https://dx.doi.org/10.14288/1.0073328>
- Jonkman, S.N., Maaskant, B., Kolen, B., Zethof, M., Lehman, W.P., Needham, J.T. (2014). *A comparative study on methods for loss of life estimation – applications to case studies in the United States*. Paper 6th International Conference on Flood Management September 2014.
- Jonkman et al. (2024). *Floods have become less deadly: an analysis of global flood fatalities 1975–2022*. S.N. Jonkman, A. Curran & L.M. Bouwer. *Nat Hazards*, 120, 6327–6342. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06444-0>.
- Knops, D., Rongen, G. en Kolen, B. 2022. *Schattingen voor de beschikbare tijd tot een dijkdoorbraak* Kennisalliantie slachtoffers en evacueren 2021. HKV, PR3591.50.
- Kolen, B. & Wouters, C.A.H. (2006) *Als het tóch misgaat: Overstromingsscenario's voor rampenplannen*. HKV. PR1216.10
- Kolen, B., Maaskant, B., Helsloot, I., & Thonus, B. (2008). *EvacuAid: probabilistic evacuation model to determine expected loss of life for different strategies for mass evacuation* (pp. 1-12). The Authors, 2008.
- Kolen, B. (2013). *Certainty of uncertainty in evacuation for threat driven responses; Principles of adaptive evacuation management for flood risk planning in the Netherlands*. PhD Thesis University of Nijmegen.
- Kolen B., Maaskant, B. & Pleijter, G. (2014). *Gedifferentieerde Slachtofferfuncties. Differentie van slachtofferfuncties naar toestand en locatie ten behoeve van ruimtelijke analyses op gebied van waterveiligheid*. HKV Rapport. PR2704.20. Opdrachtgever: Planbureau voor de Leefomgeving. 2014
- Kolen, B. (2019). *Effect van betere voorbereiding op evacuatie bij overstromingen*. Kennisalliantie slachtoffers en evacuatie. HKV, PR3591.30. Ook als bijlage C opgenomen in De Bruijn (2019).
- Kolen, B. (2023) Het verhaal van de evacuatiefractie. *Over de rol van evacuatie bij de normering van primaire waterkering*. HKV, PR4819.10.

- Kolen, B. (2024). *Overstromingsrisico analyse Nederland ziekenhuizen*. Kennisalliantie slachtoffers en evacuatie. HKV, PR3591.70.
- Korswagen, P. A., Bricker, J., & Diaz-Loaiza, M. A. (2021). *Dutch buildings flood fragility: masonry wall experiments at flood proof holland*.
- Korswagen, P. A., Harish, S., Oetjen, J., & Wüthrich, D. (2022). *Post-flood field survey of the Ahr Valley (Germany): building damages and hydraulic aspects*.
- Maaskant, B., Kolen, B., Jongejan, R., Jonkman, S.N., Kok, M. (2009a). *Evacuatieschattingen Nederland*. HKV, PR1718.20.
- Maaskant, B., Jonkman, S.N., Kok, M. (2009b), Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties. HKV Lijn in Water Rapport PR1669.10
- PBL (2014). *Kleine kansen – grote gevolgen. Slachtoffers en maatschappelijke ontwrichting als focus voor het waterveiligheidsbeleid*. Planbureau voor de Leefomgeving. ISBN: 9789491506697. PBL publicatienummer: 1031.
- Petrucci, O., Aceto, L., Bianchi, C., Bigot, V., Brázdil, R., Pereira, S., Kahraman, A., Kılıç, Ö., Kotroni, V., Llasat, M.C. and Llasat-Botija, M., Papagiannaki, K., Pasqua, A.A., Rehor, J., Geli, J.R., Salvati, P., Vinet, F. & Zêzere, J. L. (2019). Flood fatalities in Europe, 1980–2018: Variability, features, and lessons to learn. *Water*, 11(8), 1682.
- Pleijter, G en B. Kolen, (2016). *Effecten van evacueren in SSM2015, ruimtelijk gedifferentieerde slachtofferfuncties voor de bepaling van preventieve en verticale evacuatie bij dreigende overstromingen*, HKV, PR3227.10.
- Rudolph, M., Berg, K. van den & Kolen, B. (2022). Evacuatiegedrag van getroffen en tijdens de overstromingen in Limburg in juli 2021. HKV, PR3591.60.
- Rhein, B., & Kreibich, H. (2024). Causes of the exceptionally high number of fatalities in the Ahr valley, Germany, during the 2021 flood. *EGUsphere*, 2024, 1-12.
- Roos, W. (2003). *Damage to buildings*. Delft Cluster. Technisch rapport DC1-233-9.
- Sakamoto D., Davison M., Feliciano Cestero, J., Fields W., Kolen B., Leenders J., Riser P., & Shewan A. (2024). *Life Loss Consequence Assessment Model Benchmarking Study*. CDA 2024 Annual Conference Congrès annuel 2024 de l'ACB. Paper.
- Slager, K. (1992). *De Ramp. Een reconstructie*. ISBN: 9072138244.
- Slager, K. (2017). Technische documentatie SSM2017: functionele en technische ontwerpkeuzen. Deltares, projectkenmerk: 1230095-004.
- Slager, K., Wagenaar, D. (2017). Standaardmethode 2017 Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen. Deltares, projectkenmerk: 11200580-004.
- Slager, K. (2023). *Gevolgen overstromingen Limburg. Inventarisatie en duiding*. Deltares. Technisch rapport, projectkenmerk: 11207700-007-ZWS-0011.
- Thiecken, A., Bubeck, P., Zenker, M.-L., Wutzier, B. (2021). Strukturierte Auswertung der Dokumentationen zu allen Hochwassertodesopfern in Nordrhein-Westfalen im Juli 2021 und Herausarbeitung von Verbesserungspotenzialen in der Risikokommunikation und in den Warnprozessen anhand der

Todesomstande und -ursachen sowie Ereignischarakteristika. *Gutachten für den Parlamentarischen Untersuchungsausschuss V (Hochwasserkatastrophe) des Landtags Nordrhein-Westfalen*

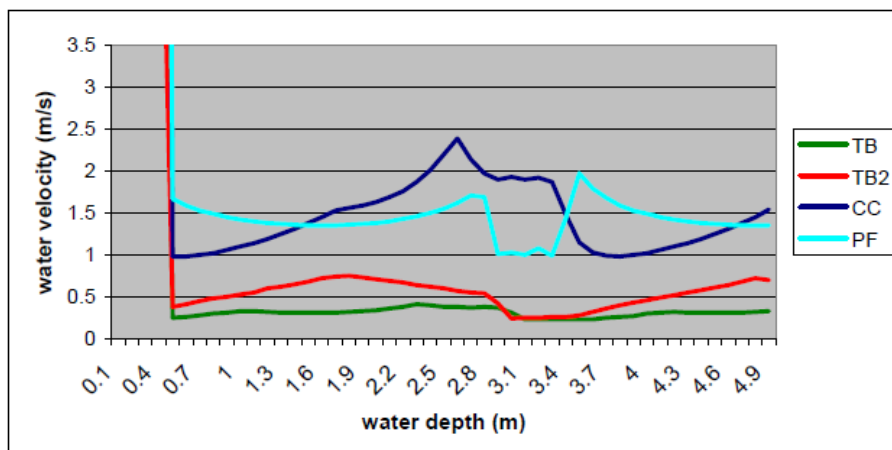
- Thieken, A.H., Bubeck, P., & Zenker, M. L. (2023a). Flood-related fatalities in July 2021 in North Rhine-Westphalia, Germany: What can be learnt for future flood risk management? *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk*, 2.
- Thieken, A. H., Bubeck, P., Heidenreich, A., Von Keyserlingk, J., Dillenardt, L., & Otto, A. (2023b). Performance of the flood warning system in Germany in July 2021—insights from affected residents. *Natural hazards and earth system sciences*, 23(2), 973-990.
- Papagiannaki, K., Petrucci, O., Diakakis, M., Kotroni, V., Aceto, L., Bianchi, C., ... & Zêzere, J. L. (2022). Developing a large-scale dataset of flood fatalities for territories in the Euro-Mediterranean region, FFEM-DB. *Scientific data*, 9(1), 166.
- Van Kester, B., Maas, B. (2023). *Lessen uit zomerhoogwater 2021 voor slachtofferanalyses. Beschouwing van slachtofferfuncties en de achtergronden ten opzichte van eventinformatie*. Deltares, projectkenmerk: 11208034-008-ZWS-0003.
- Vrijling et al. (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics*, May 23, 24 2005, Nijmegen, the Netherlands. 2005
- Westerik, L. (2019a). *Verkenning van hydrostatische druk door waterstandsverschillen binnen- en buiten een woning*. Opgenomen als bijlage D in De Bruijn (2019).
- Westerik, L. (2019b). *Report on the Flood Fatality Database*. Opgenomen als bijlage A in De Bruijn (2019).

A Gebouwsterkte en overstromingslachtoffers in Nederland

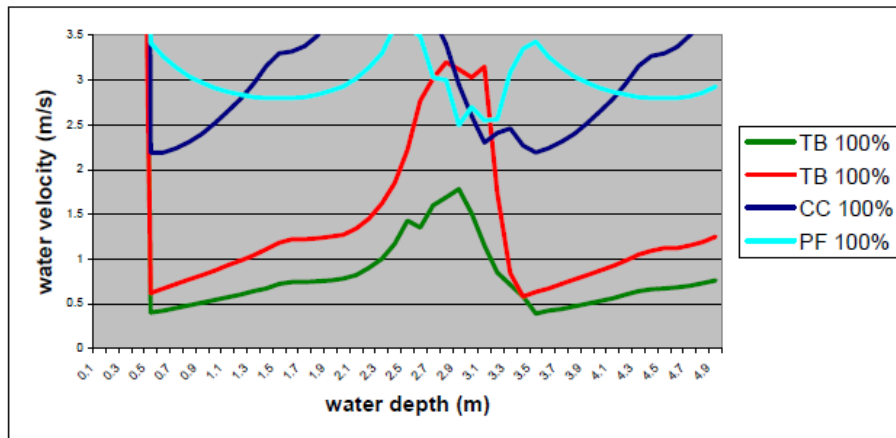
Gebouwen kunnen door overstromingen beschadigd raken of zelfs instorten, waardoor de kans op slachtoffers in die gebouwen toeneemt. De rol van de instorting van gebouwen op overstromingslachtoffers zit al impliciet in de huidige slachtofferfuncties. Zo zijn er bij de overstromingen in Nederland in 1953 immers veel gebouwen ingestort, en is instorting een van de bepalende factoren geweest voor de mortaliteit (Slager, 1992).

Verschillende factoren bepalen of en in welke mate een gebouw beschadigd zal raken, afhankelijk van zowel de sterkte als de belasting. De sterkte van het gebouw hangt af van gebouwkenmerken, zoals het type gebouw, gebruikte materialen en het bouwjaar. De belasting hangt voornamelijk af van overstromingskenmerken, zoals de waterdiepte, stroomsnelheid en stijgsnelheid (Asselman, 2005).

Roos (2003) ontwikkelde een theoretisch model voor het kwantificeren van schade aan en instorting van muren van gebouwen, uitgedrukt in een schadefunctie. Hierbij werd rekening gehouden met verschillende gebouweigenschappen, denk aan typische gebouwtypen in Nederland met kenmerken als verdiepingshoogte en raamhoogte die variëren op basis van de bouwperiode. Roos hield daarbij rekening met faalmechanismen zoals het ondermijnen van funderingen en het falen van muren. Ook is er gerekend met het effect van drijfvuil dat tegen de muur aan kunnen stromen. Uiteindelijk leverde de analyse verschillende schadecurves op voor het moment waarop “falen begint” en schade ontstaat (Figuur bijlage A-1) tot het moment van 100% falen (Figuur bijlage A-2), waaruit duidelijk wordt dat vooral gemetselde muren (enkelsteens meer dan spouwmuren) kwetsbaar zijn voor overstromingen (combinaties van waterdieptes en stroomsnelheden), veel meer dan beton (prefab en gegoten). De schadecurve voor het begin van falen in Figuur bijlage A-1 wordt gedomineerd door belasting van drijfvuil dat tegen de muur drijft.



Figuur bijlage A-1. Schadecurve bij “beginnend falen van muren” (figuur 25 uit Roos, 2003). Hierin beschrijft de groene lijn (TB) gemetselde enkelsteens muren, de rode lijn (TB2) gemetselde spouwmuren, de donkerblauwe lijn (CC) gegoten beton en de lichtblauwe lijn (PF) prefab beton.

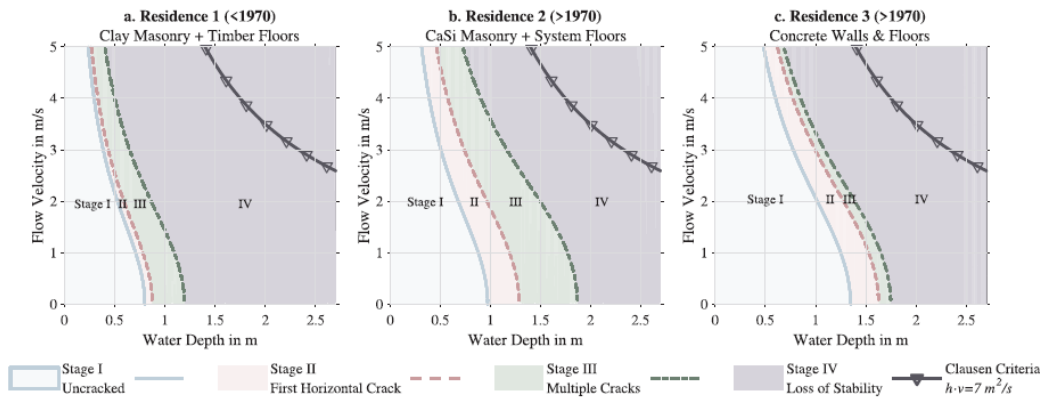


Figuur bijlage A-2. Schadecurve bij "100% falen van muren" (figuur 26 uit Roos, 2003). Hierin beschrijft de groene lijn (TB) gemetselde enkelsteens muren, de rode lijn (TB2) gemetselde spouwmuur, de donkerblauwe lijn (CC) gegoten beton en de lichtblauwe lijn (PF) prefab beton.

Het aantal ingestorte gebouwen tijdens de overstromingen in 1953 bestond voornamelijk uit (kleine) arbeiderswoningen. Waar in 1947 ongeveer 10% van alle woningen in Nederland uit dit type arbeiderswoningen bestond, was dit in Zeeland 28,3%. En dat percentage ligt nog hoger op de eilanden die het zwaarst getroffen zijn: Schouwen-Duiveland, Tholen, Noord-Beveland en Flakkee. Waar het op Schouwen Duiveland ging om 34,7%, lag het aandeel in sommige dorpen zelfs op 60% of meer. Deze woningen bestonden doorgaans uit enkelsteens of halfsteens gemetselde bakstenen muren, waarbij kalk is gebruikt in plaats van cement. Daarnaast hadden ze vaak geen fundering (Slager, 1992).

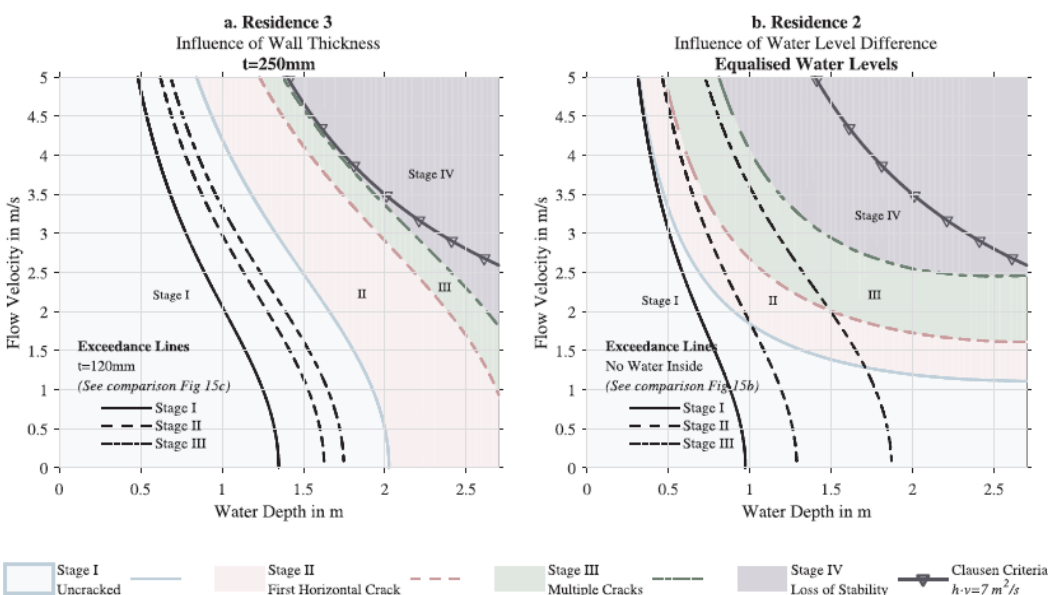
Asselman (2005) heeft de schadecurves die afgeleid zijn door Roos (2003) (en zijn weergegeven in Figuur bijlage A-1 en Figuur bijlage A-2) toegepast op simulaties van de overstromingen in 1953. Door gesimuleerde overstromingskarakteristieken te combineren met de schadecurves is per dorp het aantal ingestorte huizen geschat. De verschillen tussen het geobserveerde aantal ingestorte gebouwen en het gemodelleerde aantal gebouwen liep echter om verschillende redenen sterk uiteen. Zo was de maximale stroomsnelheid en het percentage ingestorte gebouwen genomen over hele dorpen genomen, in plaats van beter rekening te houden met ruimtelijke variatie. Dit was overigens door het gebrek aan goede data ook niet mogelijk. Wel werd een sterke relatie gevonden tussen slachtoffers en waterdiepte, en tussen ingestorte gebouwen en slachtoffers, wat suggereert dat zo een relatie ook bestaat tussen waterdiepte en ingestorte gebouwen. Deze relatie werd overigens enkel gevonden voor gebouwen nabij de bres. Verder van de bres werd de relatie met waterdiepte niet gevonden, wat een indicatie kan zijn dat ook stroomsnelheid en stijgsnelheid een rol spelen (Asselman, 2005).

Desalniettemin concludeerde Slager (1992) dat een betere bouwkwiteit tot minder slachtoffers had geleid. Ook in het buitenland wordt een duidelijke link waargenomen tussen bouwkwiteit, de kans op instorting en overstromingsmortaliteit (Asselman, 2005). Om schadecurves af te leiden voor moderne gebouwen, voerde Jansen (2019; 2020) verschillende schaalproeven door in een stroomgoot een box te plaatsen en bij verschillende stroomsnelheden en waterdieptes en onder verschillende stroomrichtingen ten opzichte van het gebouw de hydrostatische druk te bepalen. Hierbij zijn schadecurves afgeleid voor de meest kritische situatie (meest ongunstige stroomrichting ten opzichte van gebouw en geen water in het gebouw) voor 3 type gebouwen (zie Figuur bijlage A-3).



Figuur bijlage A-3. Schadecurves afgeleid door Jansen (2020, figuur 15) voor 3 type woningen.

In een gevoeligheidsanalyse liet Jansen zien dat de curves er minder extreem uitzien voor betonnen gebouwen als rekening wordt gehouden met veel dikkere draagmuren tussen woningen in draagmuren (Figuur bijlage A-4, links). Bovendien is de aanname dat er geen water het gebouw instroomt conservatief, omdat dit maximale hydrostatische druk oplevert. Als de stijgsnelheid gestaag is, kan het water mogelijk de woning instromen. Figuur bijlage A-4 (rechts) laat eens schadecurve zien waarbij rekening is gehouden met waterstanden binnen die door instroom vrijwel gelijk zijn als de waterstand tegen de buitenkant van de muur.



Figuur bijlage A-4. Schadecurves afgeleid door Jansen (2020, figuur 16) waarin bij figuur a rekening is gehouden met dikkere betonnen muren, en in figuur b met water dat de woning instroomt en zorgt voor een gelijke waterstand binnen als buiten.

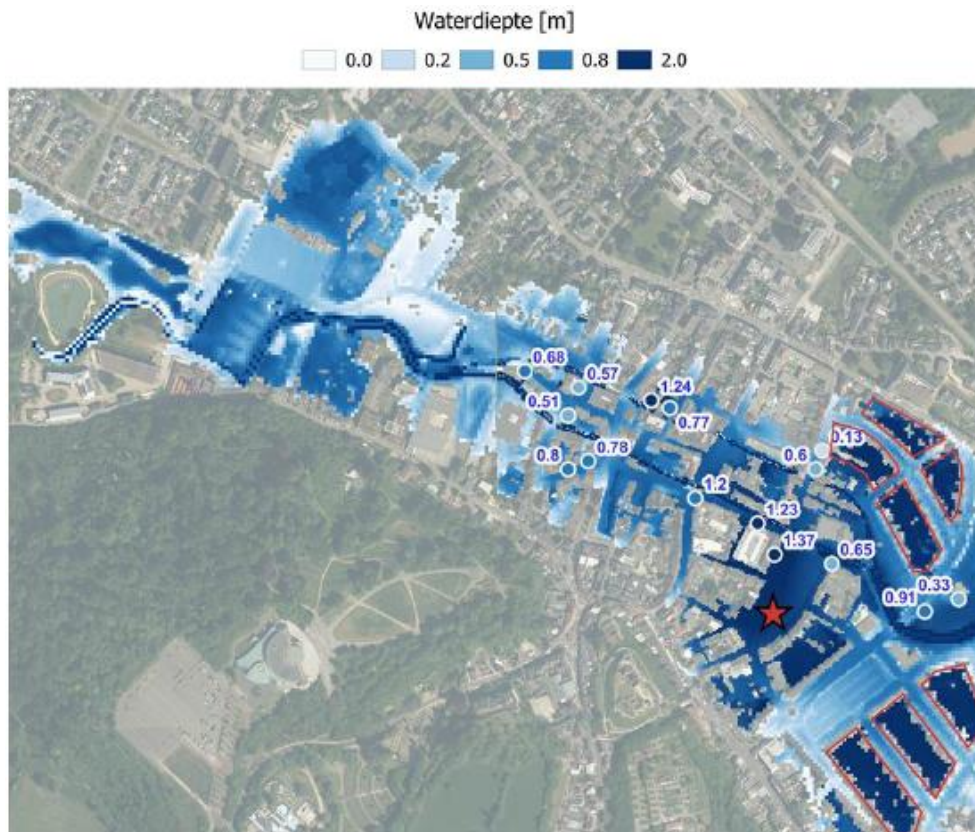
Korswagen et al. (2021) voerde full-scale experimenten uit op een gemetselde muur in de testfaciliteit Flood Proof Holland in Delft (zie Figuur bijlage A-5). Zij concludeerden dat een traditionele gemetselde muur van minstens 0,1 m dikte, en van boven ingeklemd een waterdiepte van 0,9 m kan weerstaan, zelfs wanneer er geen water achter de muur staat (droog gebouw). Wanneer de muur ook van beide zijanten is ingeklemd (waarbij de muur een even hoog als breed is) kon de muur tot 1,4 m water weerstaan.



Figuur bijlage A-5. Experimentele setup van weerstand van gemetselde muur tegen water in Flood Proof Holland, Delft (Korswagen, 2021, figure 1).

Westrik (2019) deed onderzoek naar hydrostatische druk door waterstandsverschillen binnen en buiten woningen tijdens een overstroming. Hierbij werd rekening gehouden met verschillende stijgsnelheden van de buitenwaterstand en verschillende instroomsnelheden (via riolering, deur- en raamkozijnen, brievenbussen, etc.). Volledig waterdichte woningen komen nauwelijks voor. Westrik concludeerde dat voor relatief beperkte stijgsnelheden van 0,5 m/u hydrostatische drukverschillen beperkt blijven (orde grootte van decimeters). Bij een stijgsnelheid van 2 m/u en beperkte instroom (enkel via de riolering) komen maximale drukverschillen in de buurt van 1,4 m. Schade aan muren door hydrostatische drukverschillen alleen is daarom zeer onwaarschijnlijk. Andere factoren, zoals drijvend puin, kunnen echter extra belasting veroorzaken. Een combinatie van verschillende faalmechanismen moet verder worden onderzocht.

De overstromingen in 2021 zorgden in Limburg niet voor slachtoffers, maar wel voor veel schade aan gebouwen (zie ENW, 2021). In Valkenburg, een van de zwaarst getroffen gemeenten, gelegen langs de Geul, zijn lokale overstromingsdieptes tot ongeveer 1,5 m geobserveerd (zie Figuur bijlage A-6) en lokaal waren ook stroomsnelheden hoog (op basis van modelsimulaties) (Slager, 2023). Hoge stijgsnelheden kwamen hier enkel lokaal voor bij dieper gelegen achtertuinen (zie rood omlijnd in Figuur bijlage A-6). Maar uit een enquête blijken in zowel het stroomgebied van de Geul als de Maas ook waterdieptes groter dan 2,0m tegen de buitenmuur van een woning te zijn geobserveerd (Endendijk et. al, 2023). En door heuvelachtige landschap lokaal hoge stroomsnelheden en stijgsnelheden, die niet representatief zijn voor het grootste deel van Nederland, met uitzondering van breszones. Verder zijn hier echter geen gevallen van instorting bekend. Het heuvelachtige landschap zorgde voor lokaal hoge stroomsnelheden en stijgsnelheden, die niet representatief zijn voor het grootste deel van Nederland, met uitzondering van breszones.



Figuur bijlage A-6. Kaart van de gesimuleerde maximale waterdiepte in Valkenburg tijdens de overstroming in juli 2021. De bolletjes geven observaties aan die gedaan zijn door Waterschap Limburg. Rood omlijnd zijn de wijken waar huizen laaggelegen achtertuinen hebben, vaak enkele meters lager dan straatniveau. Rode ster: Walramplein. (Bron: Slager, 2023).

In Duitsland en België zijn er bij de overstromingen in 2021 wel veel slachtoffers gevallen en zijn er ook veel gebouwen ingestort. Echter is er vaak geen directe link te leggen tussen instortingsdata en de mortaliteit per gemeente (veel specifieker worden de gegevens niet). Voor Duitsland is er vrijwel geen openbare informatie over de doodsoorzaken van individuen. De doodsoorzaak en locatie waarop individuen zich op het moment van overlijden bevonden, zijn niet bekend, waardoor er wel veel slachtoffers kunnen zijn gevallen in een gemeente, maar er niet te achterhalen is of dat door het instorten van gebouwen komt (Van Kester en Maas, 2023).

Van Kester en Maas (2023) keken ook naar de constructieve kenmerken en de locatie van ingestorte gebouwen in Duitsland. Het grootste deel van de bekeken ingestorte woningen (16 van 22) staat binnen 50 m van de rivier de Ahr. Daarbij valt op dat de meeste ingestorte woningen zich op de oorspronkelijk overstromingsvlakte en nabij vernauwingen bevonden. Wat daarnaast opvalt is dat vaak individuele woningen zijn ingestort, terwijl woningen eromheen nog overeind staan. Dat suggereert dat de ingestorte gebouwen minder sterk waren dan de gebouwen eromheen, mogelijk door bouwtype of bouwperiode, maar deze conclusie is niet te trekken. Door de ligging van de ingestorte woningen komt ook drijfvuil vaker voor, wat een extra belasting vormt op de muren van deze gebouwen. Ook Korswagen et al. (2022) vonden tijdens hun veldstudie dat weinig gevallen van instorting veroorzaakt worden door enkel hydrostatische druk van waterstanden tegen de woning. Zo zorgden hoge stroomsnelheden lokaal voor erosiekuilen die de woning konden ondermijnen, en dreef er in het water veel drijfvuil dat een extra belasting op de muren van woningen vormde.

De bouwtypes van de ingestorte woningen komt mogelijk in Nederland minder voor door een andere bouwstandaard. Daarnaast zullen dergelijke overstromingskarakteristieken, dus langdurig grote waterdieptes en hoge stroomsnelheden, behalve nabij een bres, in Nederland minder voorkomen. Hierdoor zijn omstandigheden die leiden tot instorting van moderne bouw in Nederland minder waarschijnlijk.

Samenvattend: de bouwkwaliteit en sterkte van gebouwen spelen een belangrijke rol in de kans op instorting tijdens overstromingen en daarmee in het aantal slachtoffers. Momenteel wordt gebouwsterkte echter niet expliciet meegenomen in de berekeningen, wat mogelijk leidt tot een overschatting van de sterfte door instorting. Het aanpassen van de huidige mortaliteitsfuncties door rekening te houden met de bouwkwaliteit kan dit verbeteren. Er is echter op dit moment onvoldoende data beschikbaar om dit volledig uit te werken, en meer onderzoek is nodig.

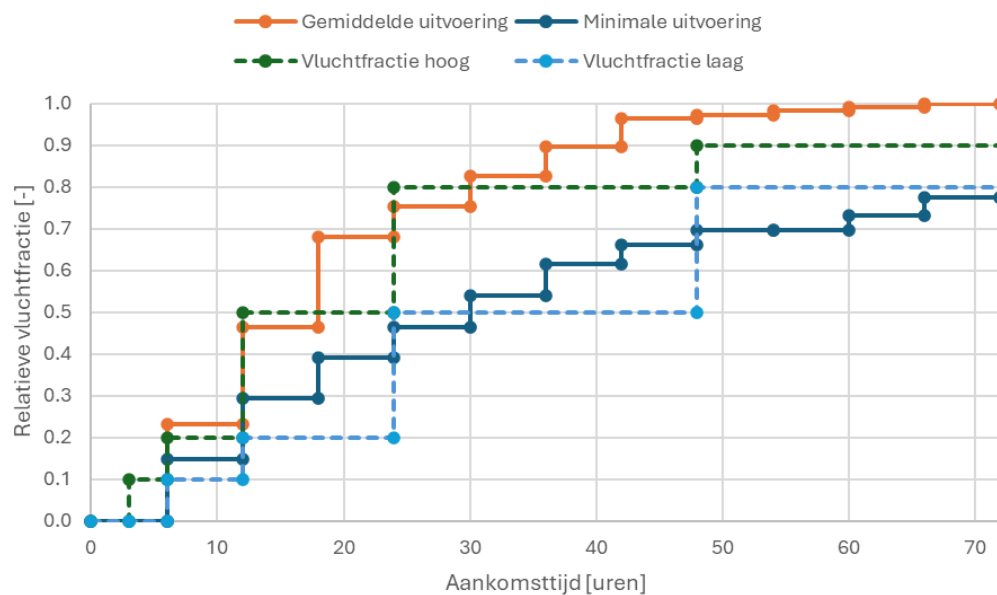
Een mogelijk spoor kan zijn om de bouwkwaliteit per gebied in kaart te brengen en correctiefactoren toe te passen. Ook factoren zoals de locatie van bebouwing en overstromingskenmerken (zoals waterdiepte en stroomsnelheid) zijn hierbij van belang. Maar vervolgens blijft het een uitdaging om de huidige mortaliteitsfuncties hierop aan te passen, omdat instorting van gebouwen hierin een impliciete factor is.

B Vluchtfracties

In deze bijlage zijn de vluchtfracties afgeleid voor twee dijktrajecten (16-2 en 36-2) bij verschillende evacuatiefracties. De afgeleide vluchtfracties geven weer hoeveel mensen die nog niet zijn geëvacueerd alsnog het gebied uit kunnen. Bij een lage evacuatiefractie zijn er meer mensen nog in het gebied, waardoor er relatief veel mensen nog kunnen vluchten. De afgeleide functies voor vluchten vlakken af naarmate de evacuatiefractie toeneemt en er minder mensen over zijn die nog moeten vluchten. Naast de afgeleide vluchtfracties volgens de methodiek in dit rapport, zijn ook de generieke vluchtfracties die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022) steeds weergegeven ter vergelijking. Hoe de functie van de vluchtfractie verloopt, verschilt bovendien ook per traject, omdat er gebruik wordt gemaakt van andere evacuatiebomen.

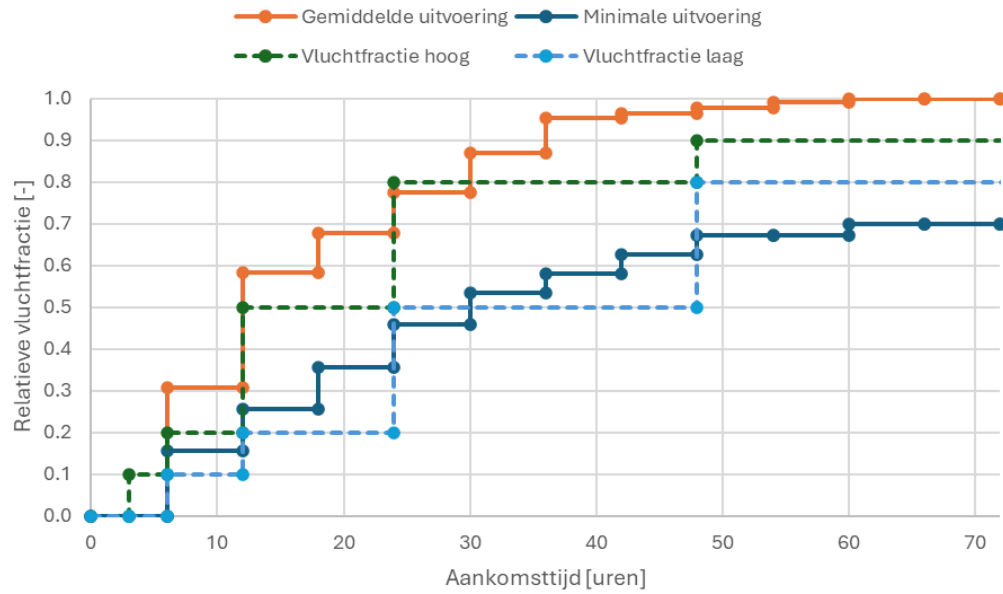
B.1 Traject 16-2

Relatieve vluchtfracties bij 20% preventieve evacuatie.
Traject 16-2



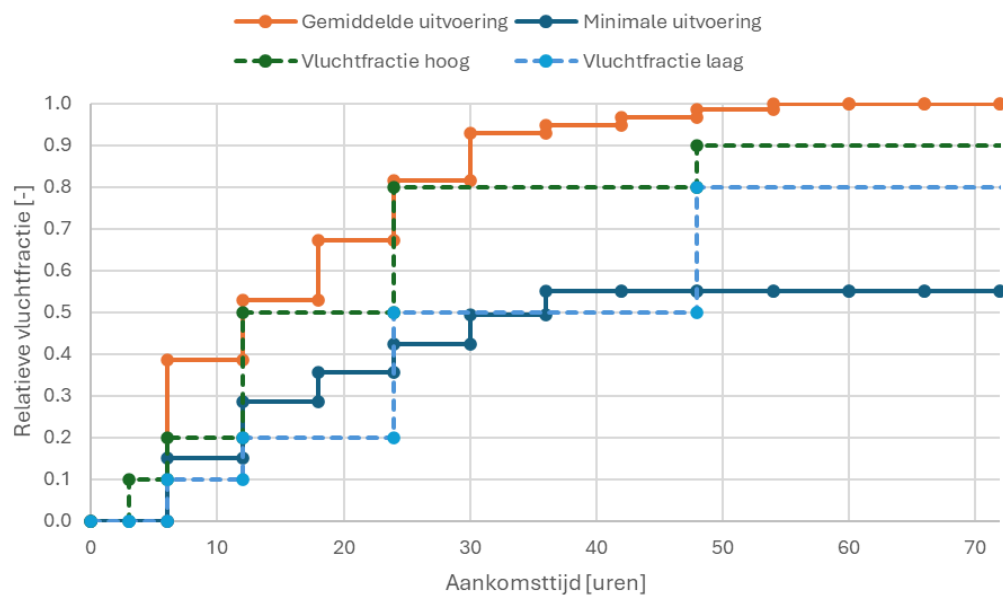
Figuur bijlage B-1. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 20% voor dijktraject 16-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).

Relatieve vluchtfracties bij 40% preventieve evacuatie. Traject 16-2



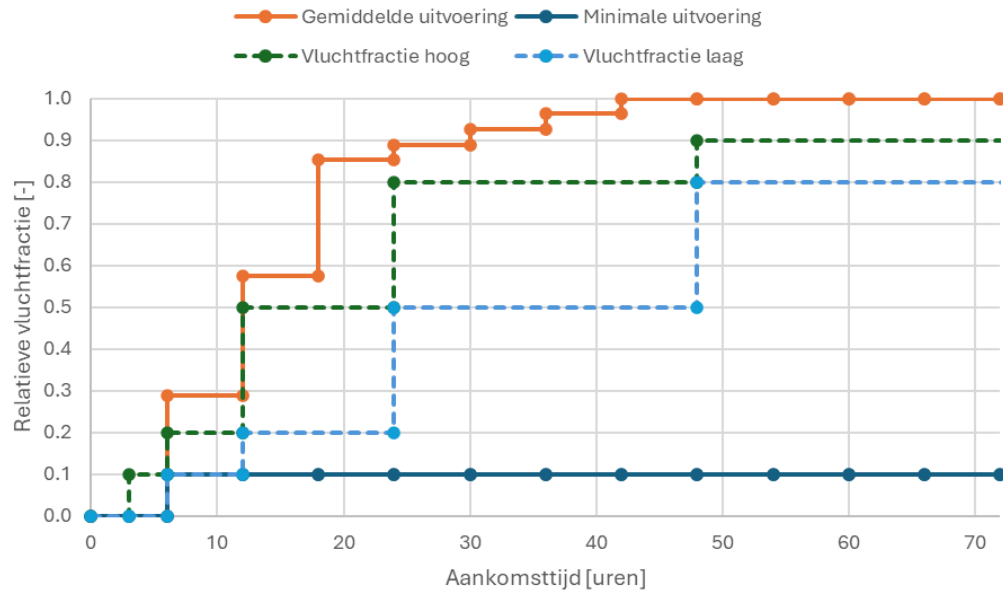
Figuur bijlage B-2. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 40% voor dijktraject 16-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).

Relatieve vluchtfracties bij 60% preventieve evacuatie. Traject 16-2

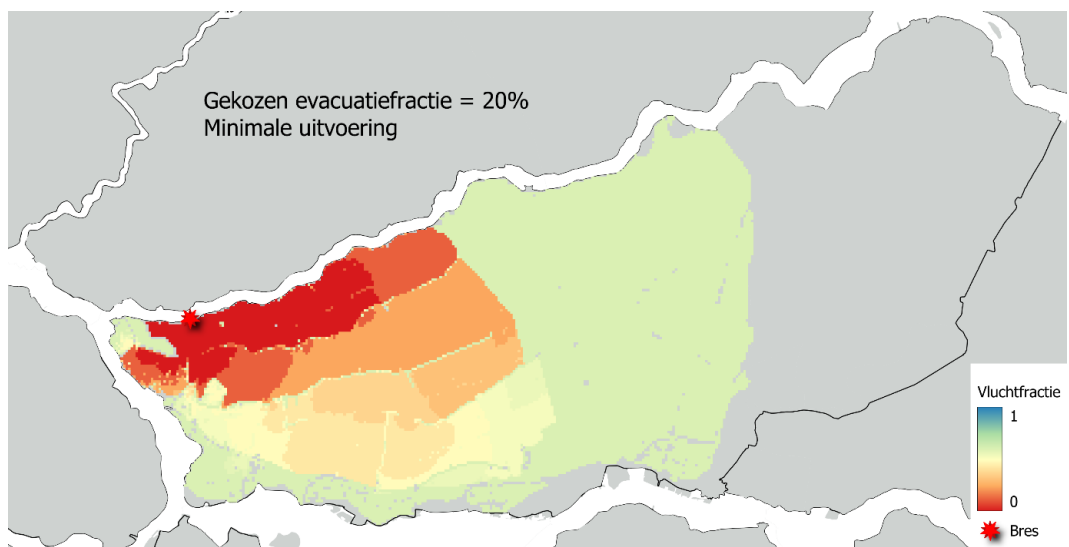


Figuur bijlage B-3. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 60% voor dijktraject 16-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).

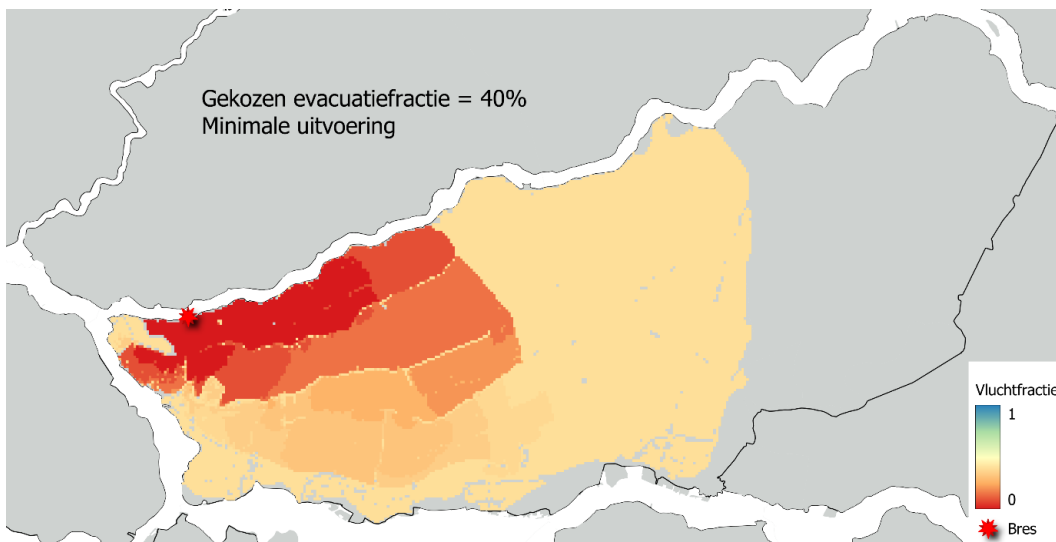
Relatieve vluchtfracties bij 80% preventieve evacuatie. Traject 16-2



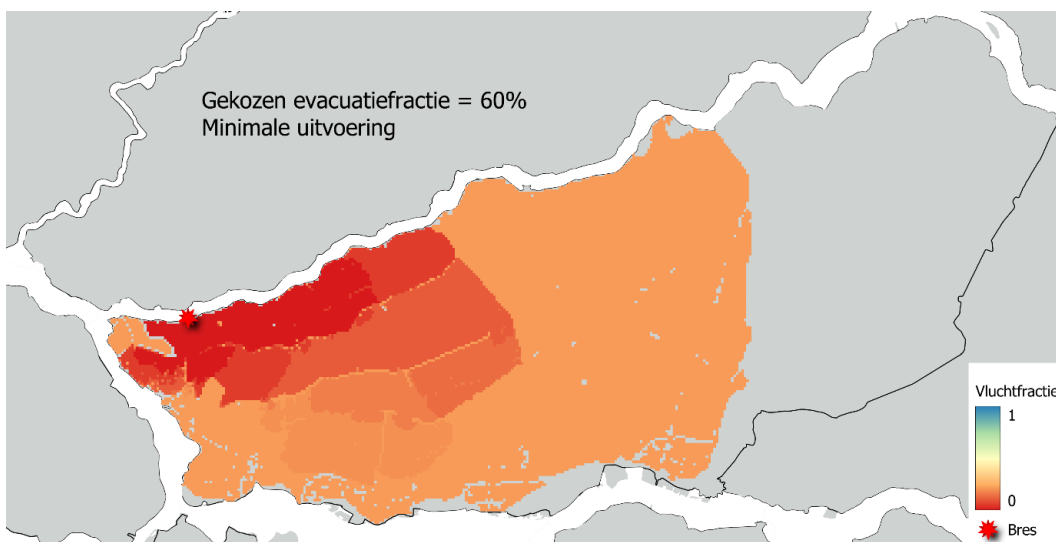
Figuur bijlage B-4. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 20% voor dijktraject 16-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).



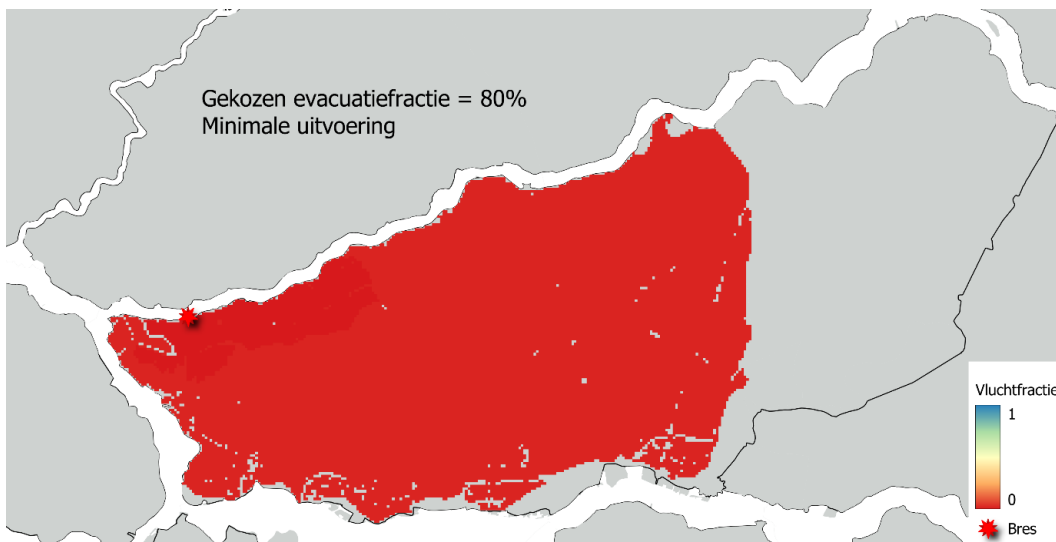
Figuur bijlage B-5. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 20% en een minimale uitvoering voor dijktraject 16-2.



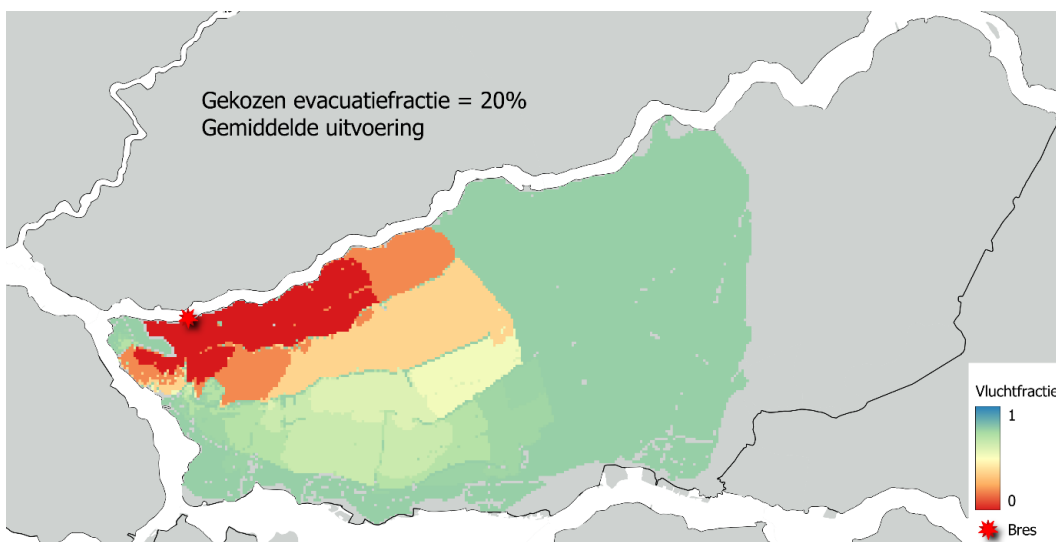
Figuur bijlage B-6. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 40% en een minimale uitvoering voor dijktraject 16-2.



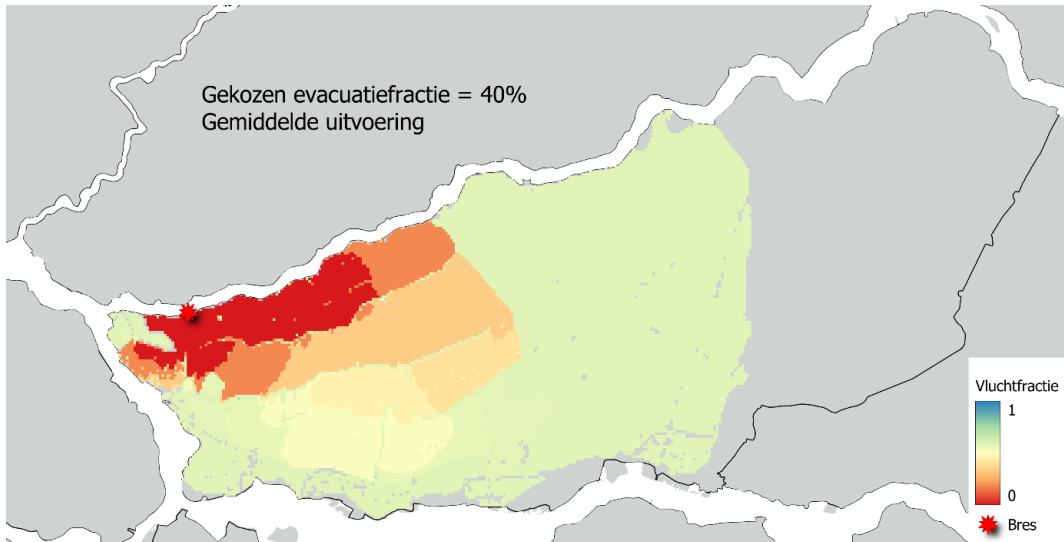
Figuur bijlage B-7. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 60% en een minimale uitvoering voor dijktraject 16-2.



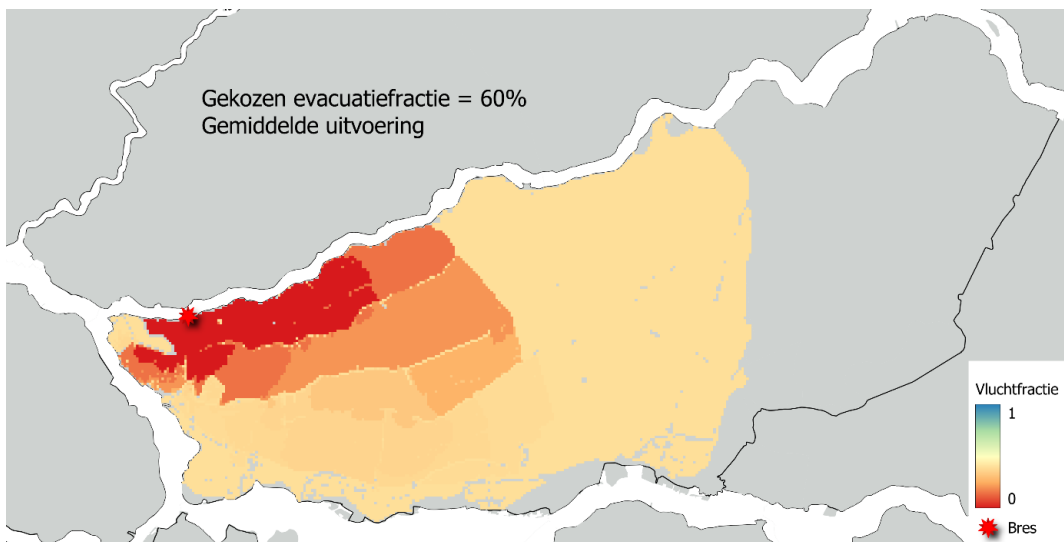
Figuur bijlage B-8. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 80% en een minimale uitvoering voor dijktraject 16-2.



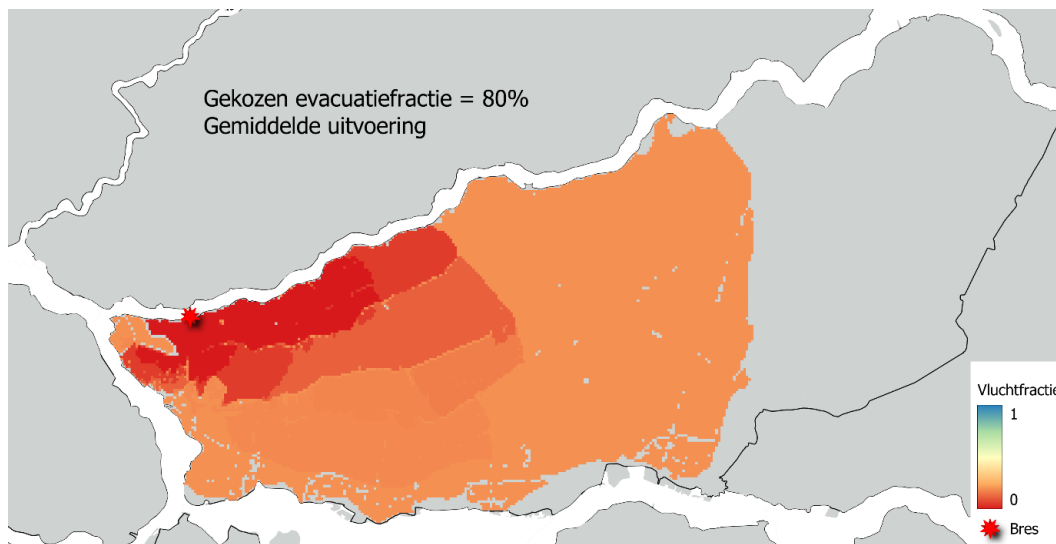
Figuur bijlage B-9. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 20% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 16-2.



Figuur bijlage B-10. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 40% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 16-2.

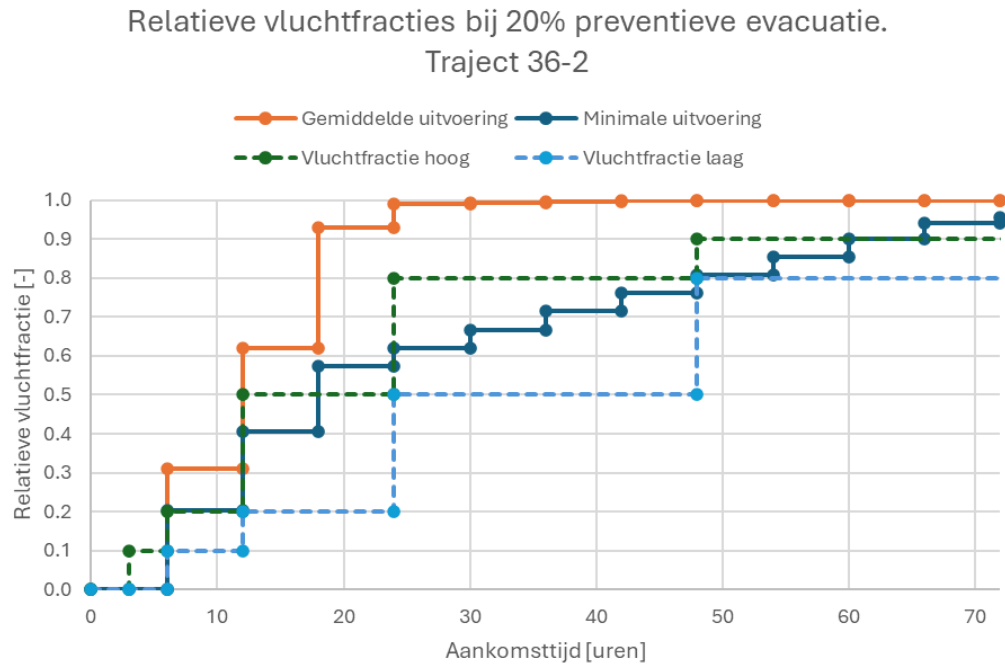


Figuur bijlage B-11. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 60% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 16-2.

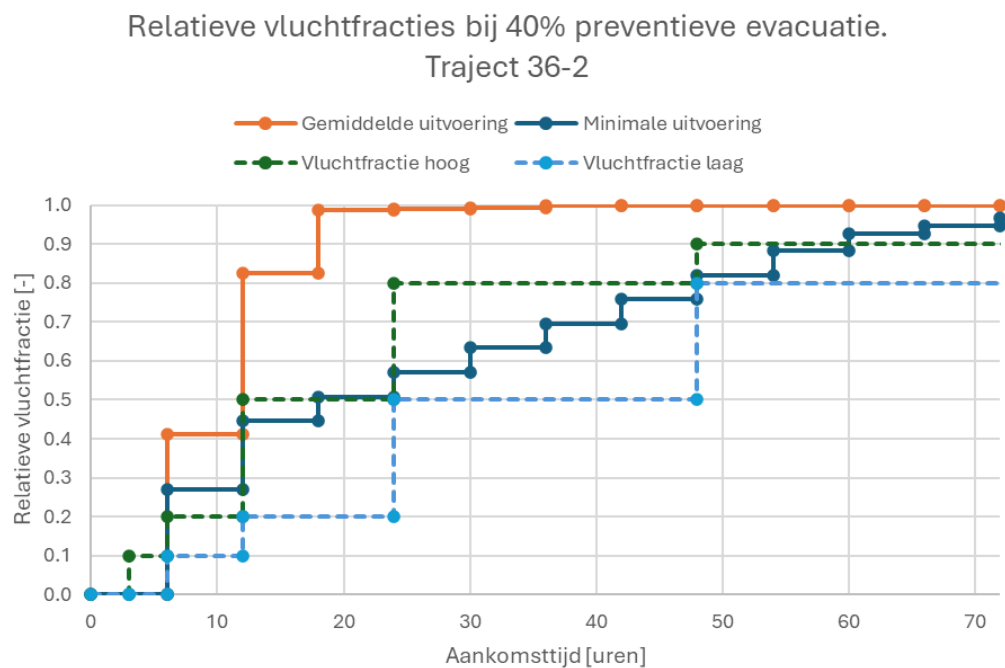


Figuur bijlage B-12. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 80% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 16-2.

B.2 Traject 36-2

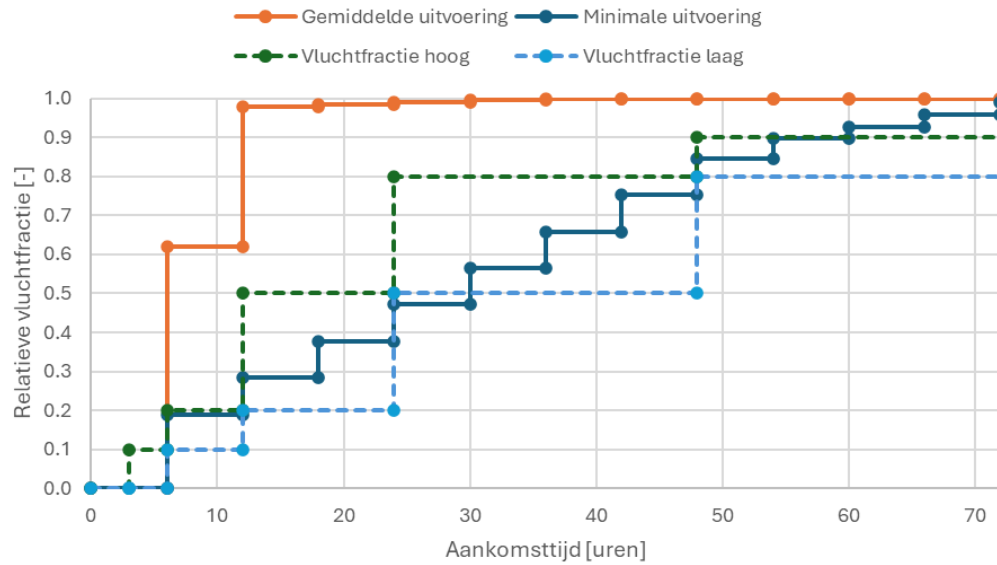


Figuur bijlage B-13. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 20% voor dijktraject 36-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).



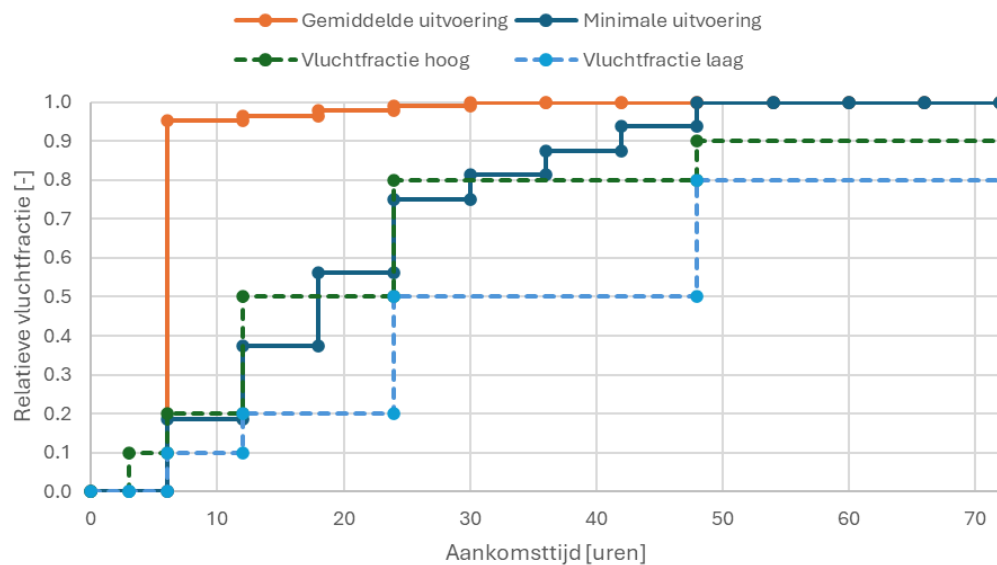
Figuur bijlage B-14. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 40% voor dijktraject 36-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).

Relatieve vluchtfracties bij 60% preventieve evacuatie. Traject 36-2

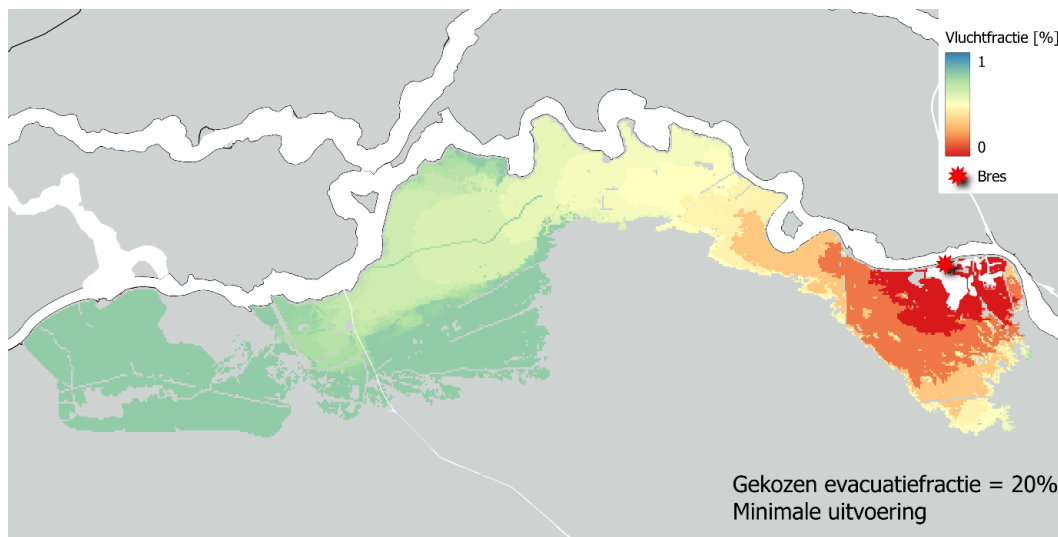


Figuur bijlage B-15. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 60% voor dijktraject 36-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).

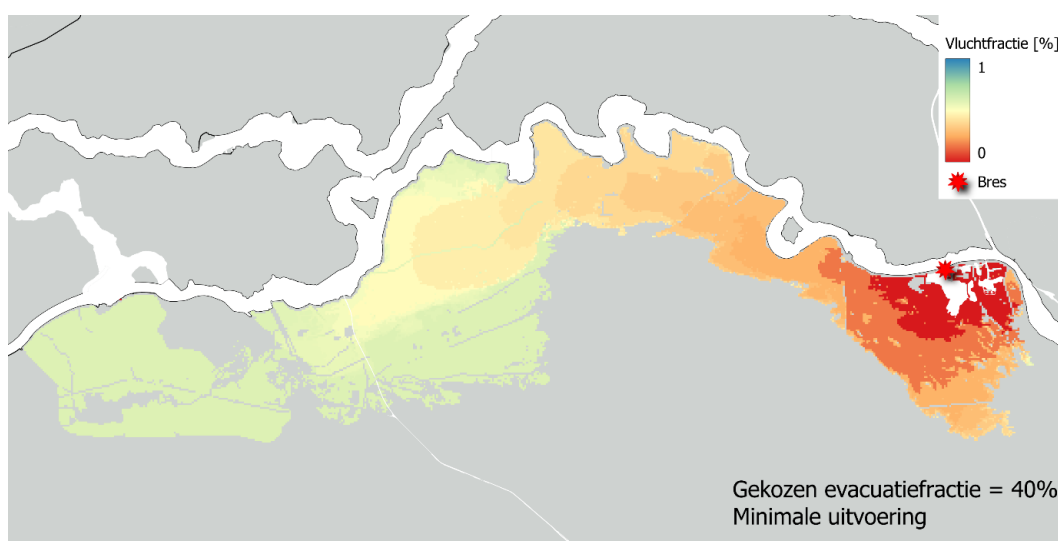
Relatieve vluchtfracties bij 80% preventieve evacuatie. Traject 36-2



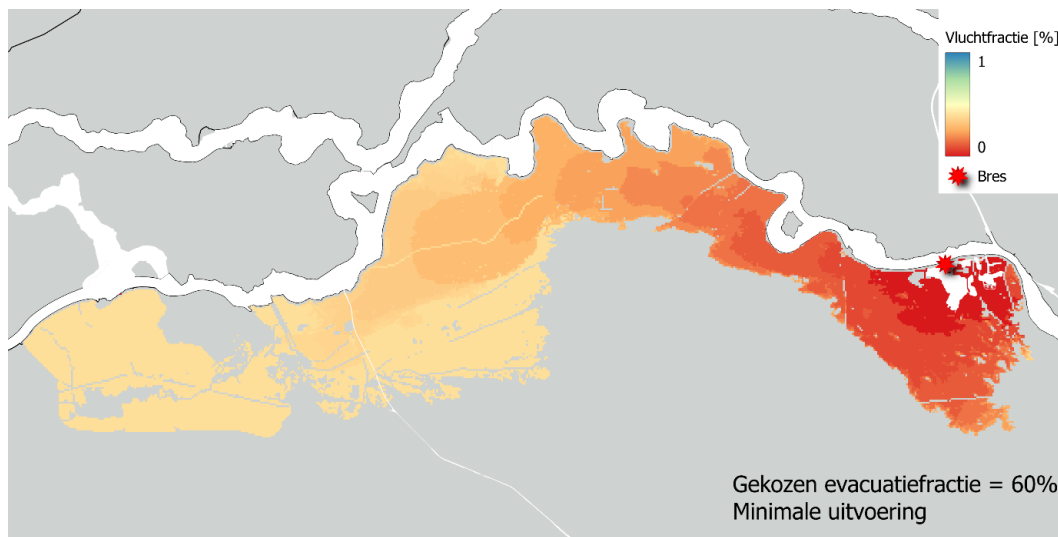
Figuur bijlage B-16. Afgeleide evacuatiefracties bij een gemiddelde (oranje) en minimale uitvoering (blauw), bij een initiële evacuatiefractie van 80% voor dijktraject 36-2. De stippellijnen geven de hoge (groen) en lage (lichtblauw) generieke vluchtfracties weer die zijn afgeleid door De Bruijn en Maas (2022).



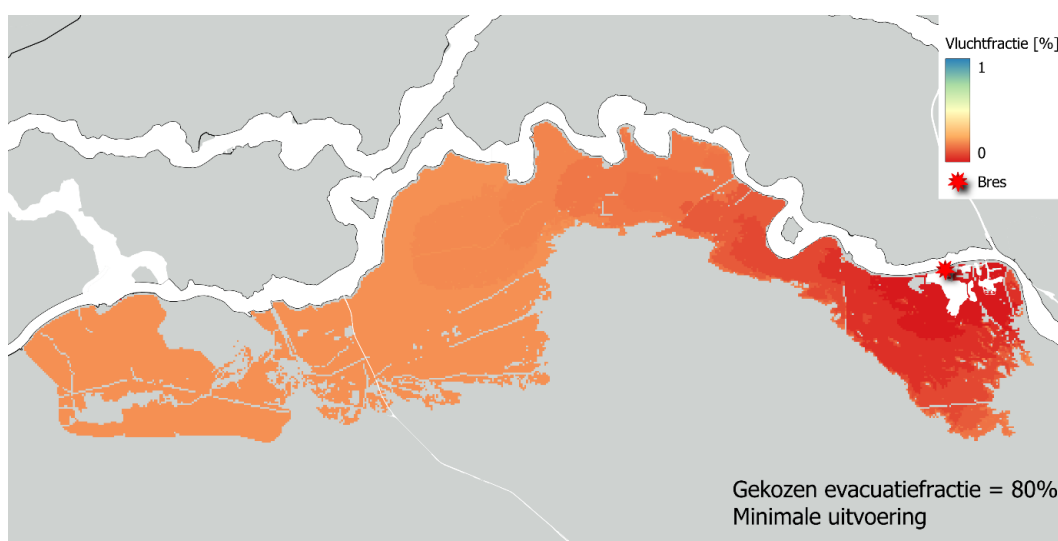
Figuur bijlage B-17. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 20% en een minimale uitvoering voor dijktraject 36-2.



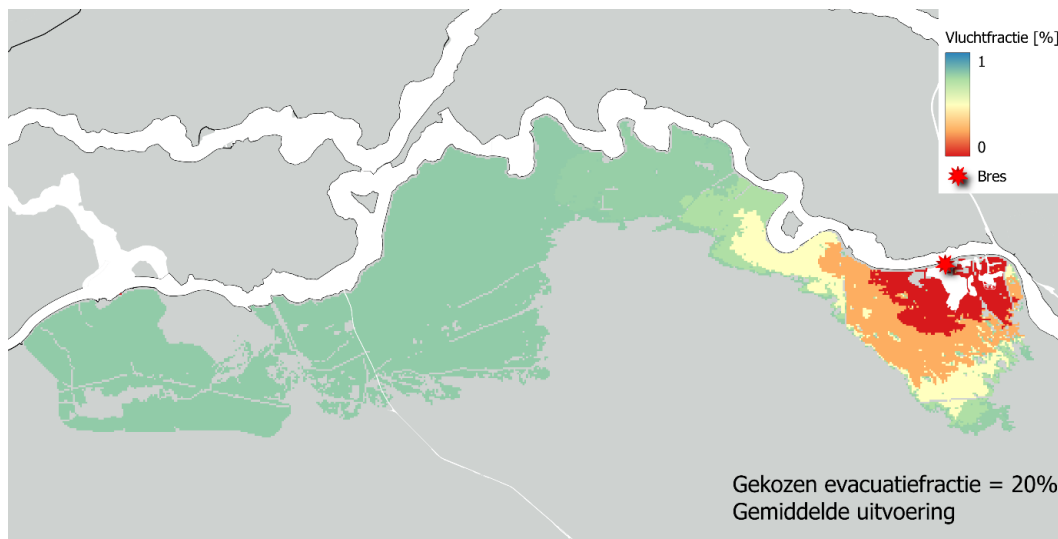
Figuur bijlage B-18. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 40% en een minimale uitvoering voor dijktraject 36-2.



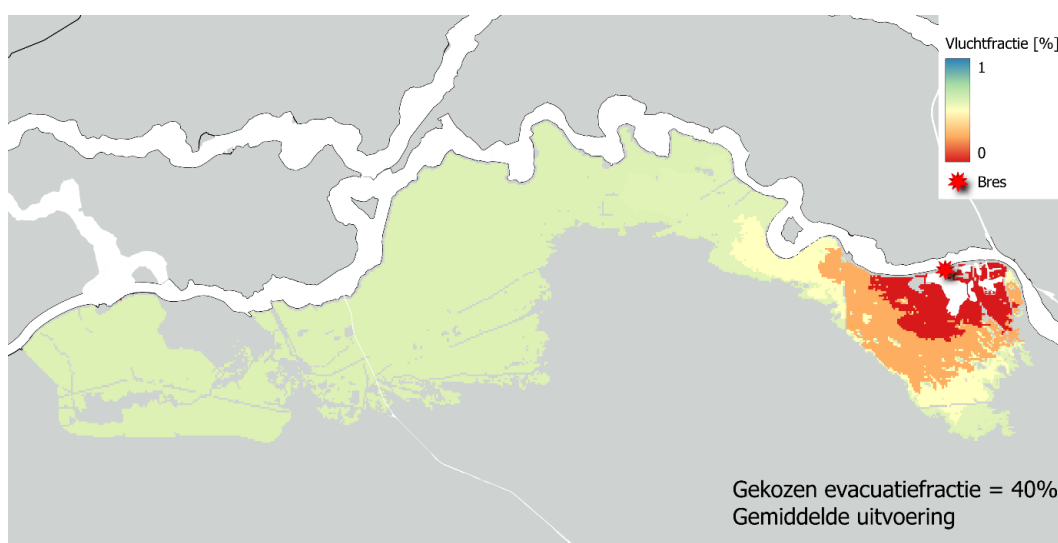
Figuur bijlage B-19. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 60% en een minimale uitvoering voor dijktraject 36-2.



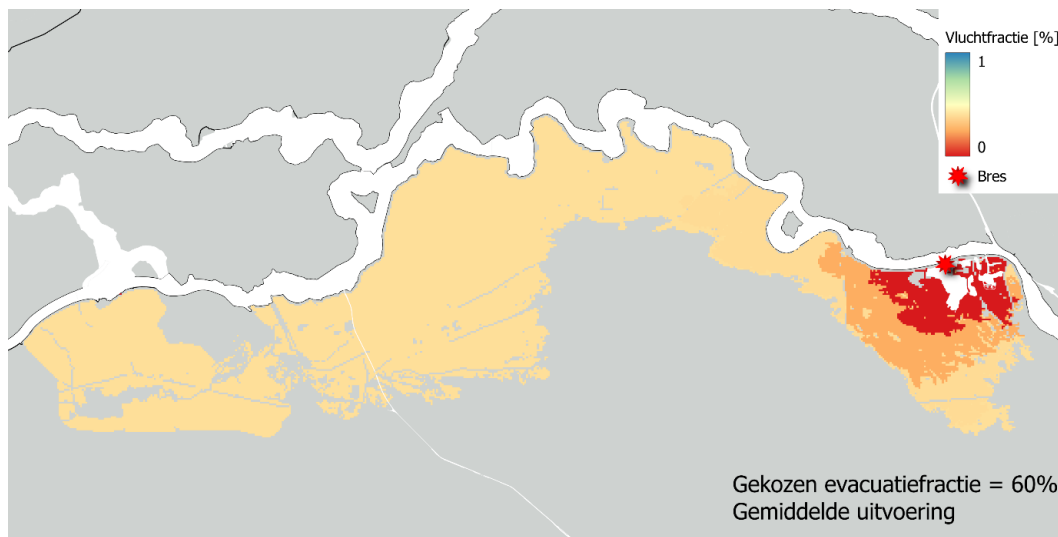
Figuur bijlage B-20. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 80% en een minimale uitvoering voor dijktraject 36-2.



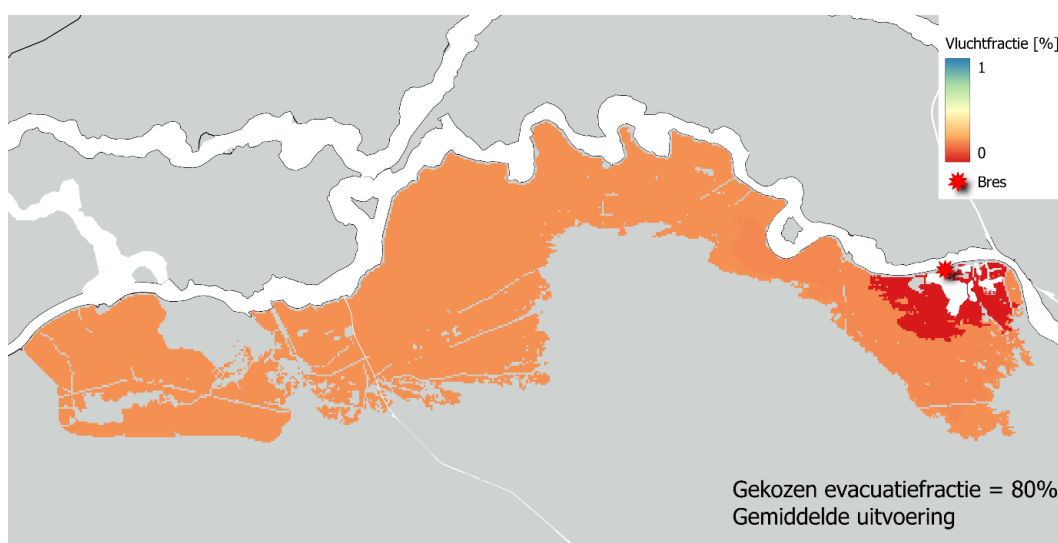
Figuur bijlage B-21. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 20% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 36-2.



Figuur bijlage B-22. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 40% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 36-2.



Figuur bijlage B-23. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 60% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 36-2.



Figuur bijlage B-24. Afgeleide evacuatiefracties bij een initiële evacuatiefractie van 80% en een gemiddelde uitvoering voor dijktraject 36-2.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl