

**Analyse van slachtoffer risico's
Waterveiligheid 21e eeuw**



**Analyse van Slachtofferisico's
Waterveiligheid 21^e eeuw**

1204144-005

© Deltares, 2011

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Kader en aanleiding	1
1.2	Doelstelling en reikwijdte	2
1.3	Uitvoering van het onderzoek	3
1.4	Opbouw van het rapport	3
2	Aanpak en uitgangspunten	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Uitgangspunten bij de analyse	6
2.3	Bouwstenen voor de berekening van LIR en GR	10
2.3.1	Overstromingsscenario's	10
2.3.2	Schatting van het aantal slachtoffers	10
2.3.3	Evacuatie	12
2.3.4	Scenariokansen	13
2.3.5	Systeemwerking	16
2.4	Berekening LIR	16
2.4.1	LIR op basis van overstromingsscenario's	17
2.4.2	Bakjesdijkringen	18
2.4.3	Alternatieve risicomaten individueel risico	18
2.5	Berekening groepsrisico	19
2.5.1	Alternatieve risicomaten groepsrisico	19
2.5.2	Dijkringoverstijgende overstromingsscenario's	21
2.5.3	Spreiding van het aantal slachtoffers	23
2.5.4	Bijdragen aan de FN curve	25
3	Resultaten lokaal individueel risico	27
3.1	Resultaten LIR berekeningen	27
3.1.1	LIR geografische weergave	27
3.1.2	Maximum LIR per dijkkringdeel	29
3.1.3	Bakjesdijkringen	30
3.2	Gevoeligheidsanalyse	31
3.2.1	Evacuatiefracties benedenrivierengebied	32
3.2.2	Evacuatiefracties Maaskades	33
3.3	Beschouwing resultaten	33
3.4	Conclusies LIR	35
4	Resultaten groepsrisico	37
4.1	Aantal slachtoffers per dijkkringdeel	37
4.2	Resultaten groepsrisico	38
4.2.1	FN curve voor Nederland	38
4.2.2	FN curven per dijkkring en dijkkringdeel	41
4.2.3	Vertaling van richtwaarden voor de FN curve naar dijkkringdelen	42
4.3	Gevoeligheidsanalyse	44
4.3.1	Mortaliteit	45
4.3.2	Evacuatiefracties	45
4.3.3	Verwachtingswaarde aantal slachtoffers	46
4.3.4	Indeling in deelsystemen	47

4.3.5	Correlatie tussen dijkringen binnen een deelsysteem	49
4.3.6	Positieve systeemwerking	49
4.3.7	Verdeling aantal slachtoffers	50
4.4	Conclusies groepsrisico	50
5	Conclusies, aanbevelingen en reflectie	53
5.1	Lokaal Individueel Risico (LIR)	53
5.2	Groepsrisico	54
5.3	Reflectie op aanpak en resultaten	54
	Referenties	57
	Bijlage(n)	
A	Verwachtingswaarden slachtofferaantallen per dijkkringdeel	A-1
B	Overzicht LIR waarden	B-1
C	Berekening verwachtingswaarden	C-1
D	Afleiding correlatiecoëfficiënten	D-1
E	Scenariokansen van dijkringoverstijgende scenario's	E-1
F	Positieve systeemwerking in de groepsrisicoberekening	F-1
G	Plaatsgebonden Risico	G-1
H	Kansverdeling aantal slachtoffers	H-1

1 Inleiding

1.1 Kader en aanleiding

Deltaprogramma en Nationaal Waterplan

De huidige wettelijke normen voor bescherming tegen (grootschalige) overstromingen vanuit zee, rivieren en meren vinden hun basis grotendeels in de jaren zestig van de vorige eeuw. Sinds die tijd is zowel het aantal mensen, als de economische waarde in de overstroombare gebieden sterk toegenomen. De potentiële gevolgen van een overstroming zijn daardoor ook toegenomen. Voorts is de kennis om overstromingsrisico's (kansen en gevolgen) te berekenen, toegenomen en zijn (economische) methoden voor het onderbouwen van het beschermingsniveau verbeterd.

Voor de actualisering van de waterveiligheidsnormen is een aantal jaren terug het beleidstraject 'Waterveiligheid 21e Eeuw' (WV21) in gang gezet. Inmiddels maakt de actualisering deel uit van het generieke deelprogramma 'Veiligheid' van het Deltaprogramma. Binnen het deelprogramma Veiligheid staat de vraag centraal hoe we Nederland in de toekomst kunnen beschermen tegen overstromingen op een maatschappelijk aanvaardbaar risiconiveau.

Het deelprogramma Veiligheid onderzoekt in hoeverre het huidige beschermingsniveau tegen overstromingen nog voldoende aansluit bij de economische waarden en mogelijke slachtoffers achter de waterkeringen. Het deelprogramma bekijkt verder deltadijken, beleid voor buitendijks gebied en – met behulp van regionale gebiedspilots – het concept van de zogenaamde meerlaagsveiligheid (preventie, duurzame ruimtelijke inrichting en rampenbeheersing).

Het Nationaal Water Plan (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009) schetst het kader voor de beleidsontwikkeling rond waterveiligheid. In de nota is aangegeven dat een maatschappelijke kosten-batenanalyse en analyses van het slachtofferrisico zullen worden uitgevoerd ten behoeve van de onderbouwing van waterveiligheidsnormen.

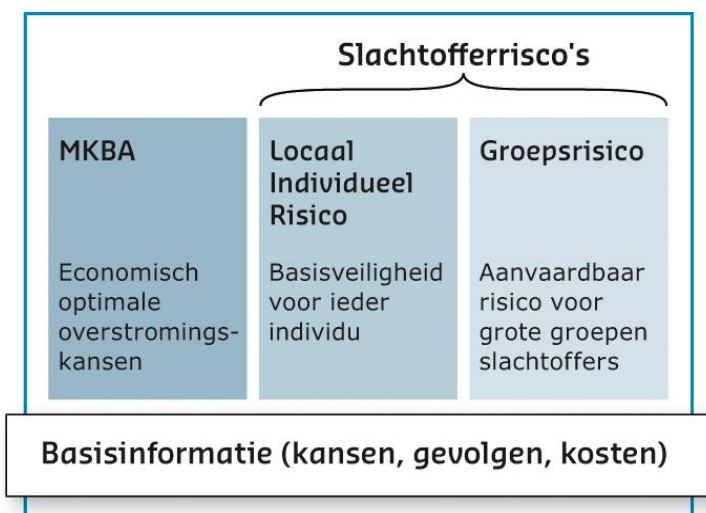
1.2 Opzet van het WV21-onderzoek

De maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) en de analyse van slachtofferrisico's zijn uitgevoerd door Deltares in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. De MKBA richt zich op de kosten en baten van bescherming tegen overstroming. Voor de harde primaire keringen van de categorie a uit de Waterwet (2009) worden economisch optimale beschermingsniveaus berekend. De economische doelmatigheid van investeringen in waterkeringen staat daarbij centraal. In de MKBA worden de investeringen (kosten) ter versterking van de waterkeringen afgezet tegen de baten (voorkomen van schade als gevolg van overstromingen). De analyse van slachtofferrisico's geeft inzicht in de overlijdenskansen voor individuen en groepen als gevolg van overstromingen.

De MKBA en slachtofferanalyses leveren informatie en inzichten op, die ondersteunend zijn bij de maatschappelijke afwegingen over actualisering van de waterveiligheidsnormen. Aan de basis van beide analyses staan studies naar de kansen op en gevolgen van overstromingen en naar de kosten van waterkeringen (de zogenaamde basisinformatie):

- In het 'Kansenspoor' zijn de overstromingskansen van de dijkringdelen bepaald alsook een aantal hydraulische kenmerken zoals de decimeringshoogten van waterstanden en kruinhoogten.
- In het 'Gevolgenspoor' zijn de gevolgen van overstromingen bepaald. Het gaat om slachtoffers en schade als functie van de omvang van overstromingen.
- Het 'Kostenpoor' was gericht op het vaststellen van de kosten die zijn gemoeid met het aanpassen (versterken) van waterkeringen. Deze kosten zijn in de vorm van kostenfuncties voor dijkkringtrajecten benut in de MKBA.

De verschillende onderdelen van het onderzoek zijn weergegeven in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Overzicht van onderdelen van het WV21-onderzoek

1.2 Doelstelling en reikwijdte

Het Nationaal Waterplan geeft aan dat rekening zal worden gehouden met slachtofferrisico's in het normenstelsel. Bij het slachtofferrisico wordt gekeken naar het aantal *dodelijke* slachtoffers als direct gevolg van een bepaalde gebeurtenis. Deze indicator vormt (bij benadering) ook een maat voor ander menselijk leed, zoals gewonden en emotionele schade. De analyse van slachtofferrisico richt zich op zowel het individuele als het maatschappelijke perspectief. Beide perspectieven zijn relevant voor de discussie over de actualisering van normen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009; De Bruijn, 2009). Voor beide perspectieven wordt in dit rapport het risico kwantitatief in beeld gebracht, voortbouwend op de schattingen van aantallen slachtoffers zoals bepaald binnen het 'Gevolgenspoor' van WV21.

Individueel slachtofferrisico

Een gebruikelijke indicator voor het risico vanuit het individuele of persoonlijke perspectief is het Plaatsgebonden Risico (PR). Deze indicator geeft aan hoe groot de kans is dat een persoon, die een jaar lang permanent aanwezig zou zijn op een bepaalde locatie, overlijdt als gevolg van een overstroming. In de gangbare definitie wordt daarbij geen rekening gehouden met risicoreductie door zelfredzaamheid of evacuatie. Echter, vanwege de aanwezige mogelijkheden voor preventieve evacuatie in veel overstroombare gebieden geeft het PR

voor overstromingen geen goed beeld van het werkelijke risico. Daarom wordt in dit rapport een op overstromingen toegespitste indicator gehanteerd: het Lokaal Individueel Risico (LIR). Het LIR is het PR gecorrigeerd voor het effect van preventieve evacuatie. Het LIR is een betere indicator voor het werkelijke slachtofferrisico bij overstromingen dan het PR (De Bruijn, 2009).

Groepsrisico: kans op grote aantallen slachtoffers

Vanuit het maatschappelijk perspectief is het van belang om te kijken naar de kans op een groot aantal slachtoffers in één keer. Een overstroming met een groot aantal slachtoffers kan leiden tot maatschappelijke ontwrichting en heeft een grotere impact dan vele kleine incidenten. Dit aspect komt tot uitdrukking in het groepsrisico. Het groepsrisico wordt ook als risicomaat gebruikt in het Nederlandse externe veiligheidsbeleid. Een gebruikelijke weergave van het groepsrisico is de FN curve, een grafiek die de kans (1-F) op N of meer slachtoffers weergeeft. Bij een grootschalige overstroming kunnen meerdere dijkringen tegelijk overstromen. Vanwege deze dijkkringoverstijgende scenario's is het van belang de FN curve voor Nederland als geheel te beschouwen. Naast het groepsrisico op nationaal niveau presenteert dit rapport ook groepsrisico's voor verschillende deelsystemen binnen Nederland. Tevens laat het rapport zien welke dijkkringdelen de grootste bijdrage 'leveren' aan het groepsrisico.

1.3 Uitvoering van het onderzoek

Het onderzoek naar slachtofferrisico's is uitgevoerd door Deltares (Karin de Bruijn, Joost Beckers, Plony Cappendijk, Rolf van Buren en Andre Hendriks) in samenwerking met een aantal ingenieursbureaus (HKV, Royal Haskoning, Nelen & Schuurmans en Jongejan Risk Management Consulting).

Bij de definitie van de belangrijkste kennisleemtees, de benodigde kennis en de aanpak voor WV21 is een expertgroep betrokken geweest met mensen met kennis en ervaring in slachtofferrisico's door overstromingen in Nederland. Ook is door DG Water een klankbordgroep ingesteld waarmee de werkwijze en resultaten regelmatig zijn besproken.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van de overstromingssimulaties die de provincies voor het VNK2 project hebben gemaakt. Het gebruik van die simulaties en eventuele vragen en opmerkingen bij die simulaties is teruggekoppeld met de provincies. Alle provincies kunnen via internet hun overstromingssimulaties en bijbehorende schades en slachtofferaantallen zien (in LIZARD-flooding). Tevens hebben de provincies inzage gekregen in de rapportage over de simulaties, middels het WV21 gevolgenrapport (Van der Doef en De Bruijn, 2011).

1.4 Opbouw van het rapport

De aanpak en uitgangspunten van het onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 2. Ingegaan wordt op de gevolgde werkwijze voor het bepalen van het Lokaal Individueel Risico (LIR) en het Groepsrisico (GR). Belangrijke bouwstenen voor de berekening van beide indicatoren worden nader toegelicht.

De resultaten voor het LIR worden besproken in hoofdstuk 3. De resultaten worden op kaart getoond; tevens wordt in beeld gebracht wat de maximum LIR-waarden zijn per dijkkringdeel. In gevoeligheidsanalyses is het effect onderzocht van bepaalde aannamen, zoals aannamen bij de precieze definitie van de LIR- indicator en aannamen ten aanzien van evacuatiefracties in het overgangsgebied tussen boven- en benedenrivierengebied.

Hoofdstuk 4 gaat in op de analyseresultaten voor het groepsrisico. Gepresenteerd worden FN-curven voor Nederland en voor verschillende deelsystemen. Ook is een vrij uitgebreide bespreking opgenomen van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses.

Tenslotte sluit hoofdstuk 1 af met conclusies en aanbevelingen alsook een reflectie op de analyseresultaten.

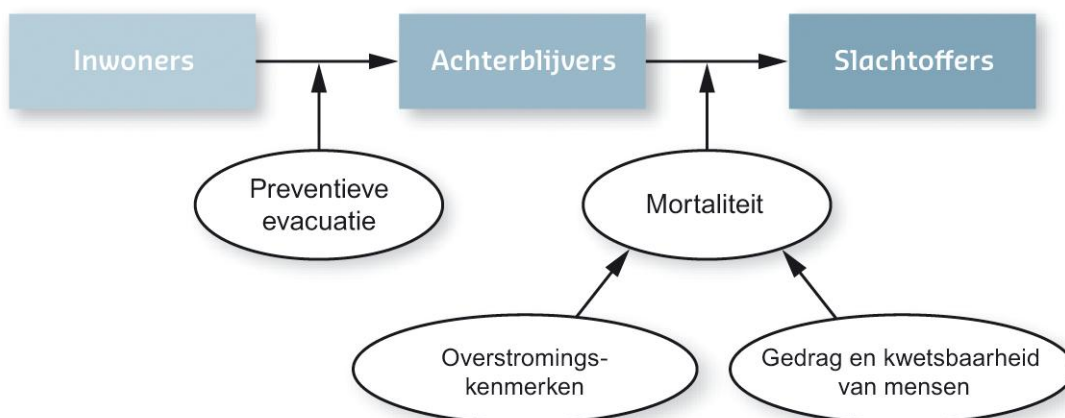
2 Aanpak en uitgangspunten

Dit hoofdstuk beschrijft de berekening van het Lokaal Individueel Risico (LIR) en het groepsrisico (GR). Eerst worden de belangrijkste uitgangspunten en invoerparameters voor het LIR en het GR beschreven. Aansluitend wordt de berekeningswijze van het LIR en het GR toegelicht.

2.1 Inleiding

Het Lokaal Individueel Risico (LIR), de jaarlijkse kans om te overlijden op een bepaalde plaats door een overstroming, hangt af van (De Bruijn, 2009):

1. de overstromingskans van de dijkkring(deel);
2. de kans om aanwezig te zijn (deze is afhankelijk van de evacuatiemogelijkheden); en
3. de kans om als achterblijver om te komen (de mortaliteit). De mortaliteit wordt bepaald door overstromingskenmerken en het gedrag en kwetsbaarheid van mensen (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Stappen in berekening van slachtoffers door overstromingen.

Het groepsrisico hangt af van:

1. de overstromingskansen van de dijkringen (en dijkkringdelen),
2. het verwachte aantal slachtoffers per dijkkringdeel en
3. de afhankelijkheden tussen het doorbreken van de verschillende dijkkringdelen en dijkringen.

Bij het LIR en het GR wordt gerekend met een gemiddeld aantal slachtoffers over meerdere overstromingsscenario's per dijkkringdeel. De mortaliteit en het slachtofferaantal verschillen per overstromingsscenario. De resultaten horend bij de verschillende overstromingsscenario's worden gecombineerd tot een gewogen gemiddelde per dijkkringdeel op basis van de conditionele kansen van de scenario's. De gevolgde werkwijze wordt in dit hoofdstuk toegelicht.

Voor zowel het LIR als het GR zijn grotendeels dezelfde invoergegevens nodig. Deze invoer wordt in dit hoofdstuk beschreven, namelijk:

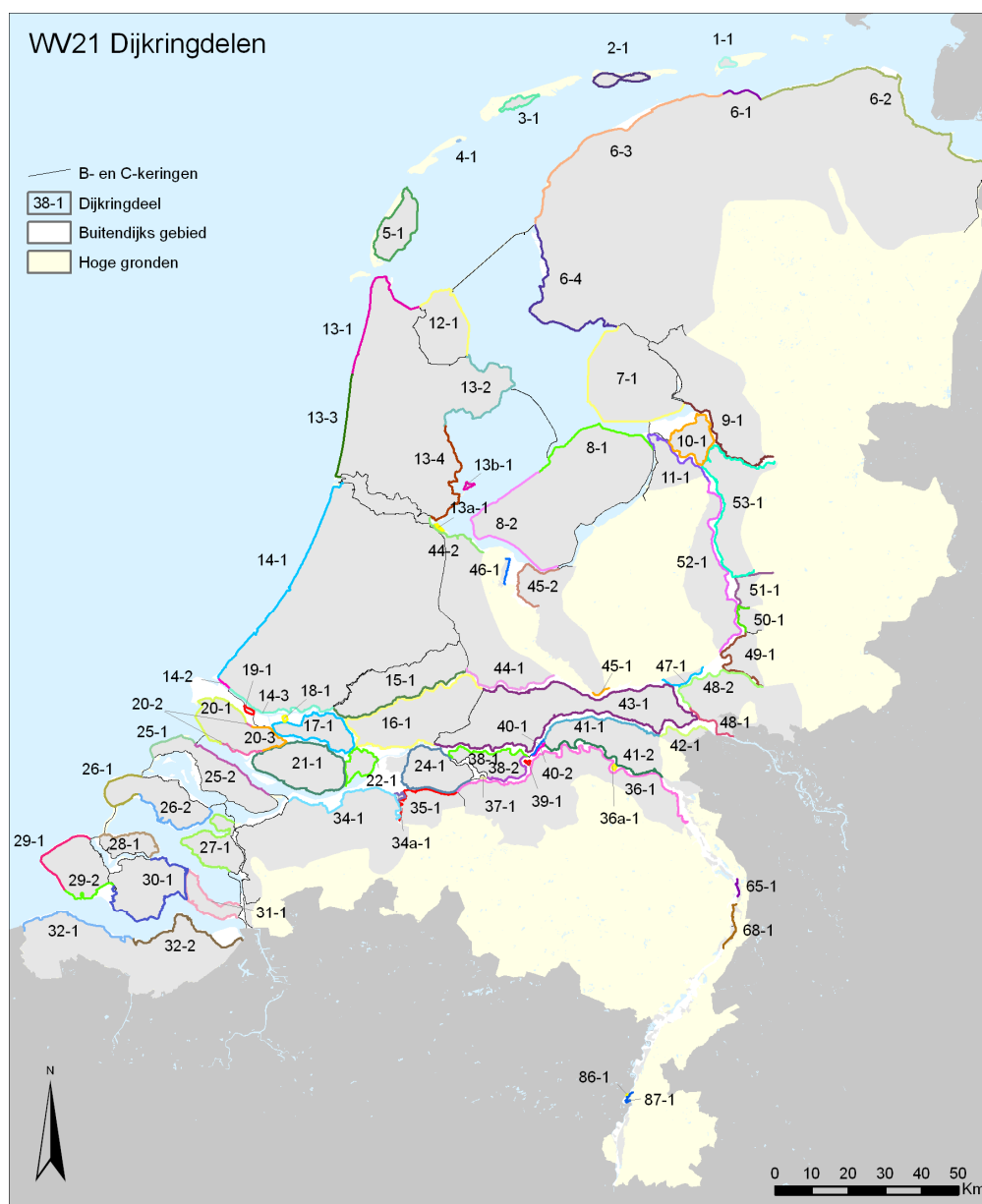
- een analyse van het overstromingsverloop (sectie 2.3.1);
- een vertaling van overstromingsscenario's naar bijbehorende mortaliteit (sectie 2.3.2);
- een analyse van de evacuatiemogelijkheden (sectie 2.3.3);
- een analyse van de bijdrage van de verschillende overstromingsscenario's aan het verwachte slachtofferaantal per dijkkringdeel (sectie 2.3.4)
- systeemwerking en hoe deze meegenomen is in het LIR en GR (sectie 2.3.5)

2.2 Uitgangspunten bij de analyse

Analyse per dijkkringdeel

De ruimtelijke eenheid waarvoor de analyses van slachtofferrisico's zijn uitgevoerd. De dijkringen uit de Waterwet (2009) vormen hiervoor de basis. Voor een aantal dijkringen zijn met het oog op verschillen in de gevolgen van een dijkdoorbraak of verschillende onafhankelijke bedreigingen meerdere dijkkringdelen onderscheiden (zie Van der Doef en de Bruijn, 2011). In totaal gaat het om 15 dijkringen, waarbij onderverdeling in dijkkringdelen aan de orde is. Voor 11 dijkringen is een onderverdeling in twee dijkkringdelen gehanteerd; voor vier dijkringen gaat het om een onderverdeling in 3 of 4 dijkkringdelen. Voor de overige dijkringen geldt dat ze uit één dijkkringdeel bestaan. De dijkkringdelen zijn weergegeven in Figuur 2.2.

In de rapportage is de onderverdeling in dijkkringdelen herkenbaar gemaakt door aan het nummer van de dijkkring, een tweede nummer (1 t/m 4, voor 1 t/m 4 dijkkringdelen) toe te voegen. Bij de naamgeving is voor de dijkringen die bestaan uit meerdere dijkkringdelen de naam toegevoegd van het watersysteem van waaruit de overheersende dreiging voor het dijkkringdeel komt, ofwel een aanduiding van de geografische ligging.



Figuur 2.2 Overzicht van dijkkringdelen.

Definitie van referentiesituatie

Voor de analyse van het slachtofferrisico is een referentiesituatie nodig. Deze beschrijft in beginsel de verwachte situatie bij voortzetting van het huidige beleid. In de context van het onderzoek naar actualisering van de normen voor waterveiligheid is ervoor gekozen op twee verschillende manieren invulling te geven aan 'voortzetting van het huidige beleid'. Het onderscheid tussen beide referentiesituaties heeft met name betrekking op de wijze waarop wordt omgegaan met nieuwe inzichten (bijv. het belang van piping, de invloed van lengte-effecten).

Voortzetting van het huidige beleid kan worden uitgelegd als het toewerken naar beschermingsniveaus per dijkkring zoals die in de huidige normen zijn vastgelegd. Daarbij worden de wettelijke normen, hoewel deze betrekking hebben op de overschrijdingskans van extreme hoogwaterstanden, getalsmatig gelijk gesteld aan overstromingskans van het

betreffende dijkkringdeel. De Commissies Becht (1977), Boertien (1992) en meer recent de Commissie Veerman (2008) hebben hetzelfde uitgangspunt gehanteerd; dit uitgangspunt sluit ook aan bij de (in de maatschappij) veronderstelde/gepercipieerde beschermingsniveaus.

Onderzoek in het kader van VNK maakt duidelijk dat de overschrijdingskansen van maatgevende waterstanden niet gelijk zijn aan de overstromingskansen van dijkringen. Nieuwe inzichten in lengte-effecten en de aanzienlijke bijdrage van het faalmechanisme piping aan de overstromingskans laten zien dat de overstromingskans veelal een factor groter is dan de overschrijdingskans. Deze inzichten zijn door een groep experts eind 2009 betrokken bij de opstelling van een zogeheten 'omrekentabel'. De 'omrekentabel' (zie Tabel 2.1) laat zien dat de factor tussen overschrijdingskans en overstromingskans een functie is van het type watersysteem en de grootte van de dijkkring. Deze nieuwe inzichten impliceren dat de overstromingskansen – ook na uitvoering van lopende verbeterprogramma's – groter zullen zijn dan de overschrijdingskansen van de waterstanden.

Tabel 2.1: 'Omrekentabel' met verhouding overstromingskans –overschrijdingskans voor verschillende typen dijkringen na uitvoering van de lopende verbetermaatregelen. Uit: [Kok en Vrouwenvelder: 'Eerste vertaalslag van huidig beschermingsniveau naar overstromingskans', memo van 21 december 2009].

Type watersysteem	grote dijkkring		kleine dijkkring	
	gemiddelde	bandbreedte	gemiddelde	bandbreedte
Zee	2	0,6 – 5	1	0,3 – 2,2
Benedenrivieren	4	1 – 9,1	2	1 – 5,2
Meren	3	0,6 – 9,5	2	0,5 – 5,7
Bovenrivieren	5	1,2 – 9,7	3	1,1 – 5,4

Voor het onderzoek worden dus twee referentiesituaties onderscheiden:

- De eerste referentiesituatie sluit aan bij het uitgangspunt van de Commissies Becht (1977), Boertien (1992) en Veerman (2008). In deze referentiesituatie zijn de overstromingskansen van de onderscheiden dijkkringdelen getalsmatig gelijk gesteld aan de huidige wettelijke normfrequenties in termen van overschrijdingskansen. Deze interpretatie sluit aan bij de perceptie/belevingswereld van burgers en bestuurders.
- De tweede referentiesituatie vormt een inschatting van de verwachte overstromingskansen per dijkkringdeel na uitvoering van de lopende verbeterprogramma's (in 2015/2020), daarbij rekening houdend met nieuwe inzichten uit VNK ten aanzien van de verschillen tussen overstromingskansen en overschrijdingskansen. Deze inschatting is gebaseerd op de inzichten uit de omrekentabel van experts.

Voor de analyse van slachtofferrisico's geeft de tweede referentiesituatie een andere set overstromingskansen (zie Tabel 2.2). Het lokaal individueel risico zal door de grotere overstromingskansen in een deel van de dijkringen toenemen, vooral in het bovenrivierengebied. Ook het landelijke groepsrisico is bij de tweede referentiesituatie groter dan het groepsrisico bij de eerste referentiesituatie. De bijdrage van het rivierengebied aan het groepsrisico wordt ten opzichte van de eerste referentiesituatie vergroot. Bij de analyse van slachtofferrisico's is een reeks gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd in de context van de eerste referentiesituatie.

Tabel 2.2 Overstromingskansen per jaar per dijkkringdeel voor de eerste en de tweede referentiesituatie.

Nr	Naam	Ref1	Ref2	Nr	Naam	Ref1	Ref2
1-1	Schiermonnikoog	1/2000	1/2000	28-1	Noord-Beveland	1/4000	1/4000
2-1	Ameland	1/2000	1/2000	29-1	Walcheren-West	1/4000	1/4000
3-1	Terschelling	1/2000	1/2000	29-2	Walcheren-Oost	1/4000	1/4000
4-1	Vlieland	1/2000	1/2000	30-1	Zuid-Beveland-West	1/4000	1/4000
5-1	Texel	1/4000	1/4000	31-1	Zuid-Beveland-Oost	1/4000	1/4000
6-1	Friesland-Groningen-Lauwersmeer	1/4000	1/4000	32-1	Zeeuwsch Vlaanderen-West	1/4000	1/4000
6-2	Friesland-Groningen-Groningen	1/4000	1/4000	32-2	Zeeuwsch Vlaanderen-Oost	1/4000	1/4000
6-3	Friesland-Groningen-NoordFriesland	1/4000	1/4000	34-1	West-Brabant	1/2000	1/500
6-4	Friesland-Groningen-IJsselmeer	1/4000	1/4000	34a-1	Geertruidenberg	1/2000	1/500
7-1	Noordoostpolder	1/4000	1/2000	35-1	Donge	1/2000	1/1000
8-1	Flevoland-Noordoost	1/4000	1/4000	36-1	Land v Heusden/de Maaskant	1/1250	1/250
8-2	Flevoland-ZuidWest	1/4000	1/2000	36a-1	Keent	1/1250	1/500
9-1	Vollenhove	1/1250	1/250	37-1	Nederhemert	1/1250	1/500
10-1	Mastenbroek	1/2000	1/1000	38-1	Bommelerwaard-Waal	1/1250	1/1250
11-1	IJsseldelta	1/2000	1/1000	38-2	Bommelerwaard-Maas	1/1250	1/500
12-1	Wieringen	1/4000	1/2000	39-1	Alem	1/1250	1/500
13-1	Noord-Holland-Noord	1/10000	1/10000	40-1	Heerenwaarden-Waal	1/2000	1/250
13-2	Noord-Holland-Westfriesland	1/10000	1/10000	40-2	Heerenwaarden-Maas	1/500	1/250
13-4	Noord-Holland-Waterland	1/10000	1/10000	41-1	Land van Maas en Waal-Waal	1/1250	1/500
13b-1	Marken	1/1250	1/500	41-2	Land van Maas en Waal-Maas	1/1250	1/500
14-1	Zuid-Holland-Kust	1/10000	1/10000	42-1	Ooij en Millingen	1/1250	1/500
14-2	Zuid-Holland-NweWaterweg-West	1/10000	1/10000	43-1	Betuwe, Tieler- en C'waarden	1/1250	1/250
14-3	Zuid-Holland-NweWaterweg-Oost	1/10000	1/10000	44-1	Kromme Rijn-Rijn	1/1250	1/500
15-1	Lopiker- en Krimpenerwaard	1/2000	1/1000	44-2	Kromme Rijn-Meren	1/1250	1/500
16-1	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	1/2000	1/1000	45-1	Gelderse Vallei-Rijn	1/1250	1/1250
17-1	IJsselmonde	1/4000	1/2000	45-2	Gelderse Vallei-Meren	1/1250	1/500
18-1	Pernis	1/10000	1/5000	46-1	Eempolder	1/1250	1/500
19-1	Rozenburg	1/10000	1/5000	47-1	Arnhemse- en Velpsebroek	1/1250	1/500
20-1	Voorne-Putten-West	1/4000	1/4000	48-1	Rijn en IJssel-Boven	1/1250	1/500
20-2	Voorne-Putten-Midden	1/4000	1/4000	48-2	Rijn en IJssel-Beneden	1/1250	1/500
20-3	Voorne-Putten-Oost	1/4000	1/4000	49-1	IJsselland	1/1250	1/500
21-1	Hoekse Waard	1/2000	1/1000	50-1	Zutphen	1/1250	1/500
22-1	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1000	51-1	Gorssel	1/1250	1/500
24-1	Land van Altena	1/2000	1/1000	52-1	Oost Veluwe	1/1250	1/250
25-1	Goeree-Overflakkee-Noordzee	1/4000	1/4000	53-1	Salland	1/1250	1/500
25-2	Goeree-Overflakkee-Haringvliet	1/4000	1/2000	65-1	Arcen	1/250	1/125
26-1	Schouwen Duiveland-West	1/4000	1/4000	68-1	Venlo-Velden Noord	1/250	1/125
26-2	Schouwen Duiveland-Oost	1/4000	1/2000	86-1	Maasband	1/250	1/125
27-1	Tholen en St. Philipsland	1/4000	1/4000	87-1	Meers	1/250	1/125

In beide referentiesituaties wordt er vanuit gegaan dat lopende verbeterwerken zijn afgerond en dat nieuwe inzichten in faalmechanismen als piping hierin zijn verwerkt. In navolging van de gangbare ontwerpfilosofie is overloop/overslag het dominante faalmechanisme. Er zijn geen bekende zwakke plekken in dijktrajecten. Iedere kilometer dijk wordt daardoor geacht een gelijke kans op doorbreken te hebben. Verschillen tussen de eerste en de tweede referentiesituatie komen voort uit lengte-effecten.

Een verdere aanname is dat ook de regionale keringen, B- en C-keringen geacht worden 'op orde' te zijn. Met toekomstige ontwikkelingen in economie en demografie wordt rekening gehouden door gebruik te maken van scenario's van het PBL. Het referentiejaar voor de analyses is 2040.

2.3 Bouwstenen voor de berekening van LIR en GR

2.3.1 Overstromingsscenario's

Het LIR en het groepsrisico worden berekend op basis van een groot aantal overstromingsscenario's met bijbehorende kansen. De overstromingsscenario's zijn zo gekozen dat ze een zo compleet mogelijk beeld van het slachtofferrisico geven. Meer informatie over de scenario's is te vinden in het WV21 gevolgenrapport (Van der Doef en De Bruijn, 2011). Van de 41 Maaskaden langs de Limburgse Maas worden vier dijkringen in de risicoberekeningen meegenomen. Dit zijn Arcen (dijkkring 65), Venlo (dijkkring 68), Maasband (dijkkring 86) en Meers (dijkkring 87). Dit zijn ook de dijkringen die binnen VNK2 worden geanalyseerd. Deze dijkringen worden verondersteld representatief te zijn voor de overige Limburgse Maaskaden.

Het slachtofferrisico is gebaseerd op overstromingsscenario's zoals berekend met SOBEK-1D2D of Delft-FLS. In deze studie zijn daarvoor reeds beschikbare simulaties gebruikt, die door provincies en VNK2 zijn aangeleverd. Ieder dijkkringdeel is opgedeeld in een of meerdere dijktrajecten, zodanig dat binnen één dijktraject de gevolgen van een dijkdoorbraak op verschillende locaties min of meer gelijk zijn. Voor ieder dijktraject is vervolgens een overstromingssimulatie uitgevoerd met een bres op een bekende zwakke plek of een representatieve locatie langs het dijktraject. De buitenwaterstand volgt een karakteristiek verloop in de tijd, met als maximum het toetspeil. Het toetspeil is de waterstand waarvan de overschrijdingsfrequentie gelijk is aan de normfrequentie van de dijkkring¹. Daarnaast zijn voor een aantal dijkringen simulaties uitgevoerd waarbij de maximale buitenwaterstand gelijk is aan het toetspeil plus eenmaal de decimeringhoogte. Dit zijn de zogenaamde bovenmaatgevende scenario's.

De breedte van de bres wordt in SOBEK-1D2D berekend met de bresgroeifunctie van Verheij en Van der Knaap (Verheij, 2002). Een initiële bres ontstaat binnen 10 minuten en groeit vervolgens in de breedte, afhankelijk van de samenstelling van de betreffende dijk en de berekende stroomsnelheden. Het tweedimensionale gedeelte van het SOBEK-overstromingsmodel bevat terreinhoogte-informatie op een rooster van 100 bij 100 m. Voor meer details over de overstromingssimulaties wordt verwezen naar het rapport over de bepaling van gevolgen van overstromingen (Van der Doef en de Bruijn, 2011).

2.3.2 Schatting van het aantal slachtoffers

Ieder overstromingsscenario wordt door middel van een mortaliteitsfunctie vertaald in een mortaliteit per locatie en een totaal aantal slachtoffers. Het bepalen van het aantal slachtoffers is gedaan met het Hoogwater Informatiesysteem – Schade en Slachtoffermodule (HIS-SSM), waarin de mortaliteitsfuncties zijn opgenomen (HIS-SSM, versie 2.5). Het HIS-

1. Uitgaande van de overschrijdingsfrequenties van waterstanden zoals gebruikt in HR2006.

SSM gebruikt hierbij informatie over de bevolkingsaantallen per zescijferig postcodegebied in het jaar 2000. De resulterende slachtofferaantallen voor het jaar 2000 zijn vertaald naar 2040 door gebruik te maken van toekomstige inwoneraantallen en landgebruikkaarten volgens het trendscenario van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Het trendscenario is gebaseerd op de ruimtevraag van verschillende sectoren volgens het Transatlantic Market (TM) scenario, een van de Welvaart en Leefomgeving (WLO) scenario's van de gezamenlijke planbureaus (Kuiper en Bouwman, 2009).

De mortaliteit is gedefinieerd als de fractie aanwezigen bij het begin van de overstroming, die om het leven komt als direct gevolg van de overstroming. Onder 'direct gevolg' wordt verstaan bijvoorbeeld verdrinking, onderkoeling of overlijden als gevolg van instorten van gebouwen. Slachtoffers als gevolg van indirecte effecten, zoals hongersnood of ziektes tijdens de nasleep van een overstroming, worden niet tot de directe slachtoffers gerekend. Als we flash floods buiten beschouwing laten bedraagt de mortaliteit bij grootschalige historische overstromingen vanuit zee of rivieren gemiddeld 1% (Jonkman, 2007).

Om meer inzicht te krijgen in de ruimtelijke verdeling van het slachtofferrisico wordt in HIS-SSM een mortaliteitsfunctie gebruikt die afhangt van de lokale overstromingskenmerken. Deze mortaliteitsfunctie bevat impliciet kennis over het gedrag van mensen en de sterkte van gebouwen en is gebaseerd op een analyse van de mortaliteit per dorp of buurt tijdens de watersnoodramp van 1953 (Jonkman, 2007). De mortaliteit in HIS-SSM is een functie van drie kenmerken van de overstroming:

- de stijgsnelheid van het water over de eerste 1.5 meter waterdiepte
- de maximale waterdiepte
- de stroomsnelheid (in geval van zeer snel stromend water)

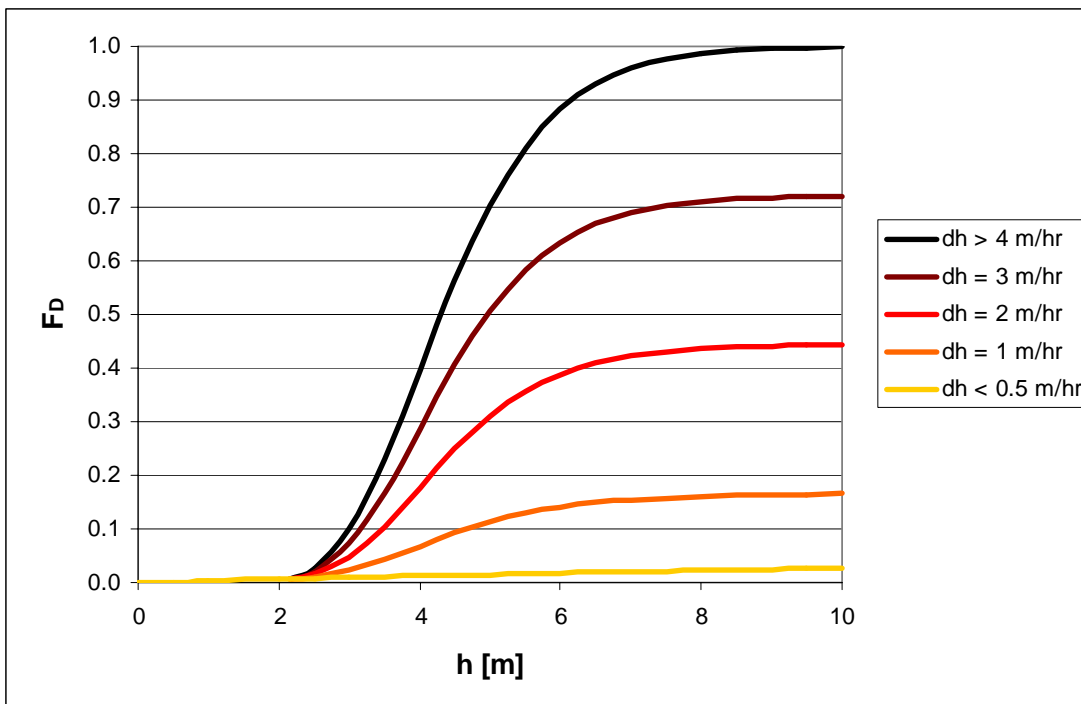
Situaties met snel stromend water kunnen in Nederland nauwelijks voorkomen (Maaskant, 2009a). Daarom is het derde criterium in de berekeningen niet gebruikt.

De in deze studie gebruikte mortaliteitsfunctie² F_D is gedefinieerd als een lognormaalverdeling van de maximale waterdiepte h . Bij zeer hoge of zeer lage stijgsnelheid dh gelden de volgende mortaliteitsfuncties:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_D = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - 7.60}{2.75} \right), \quad h < 2.1 \text{ m of } dh < 0.5 \text{ m/hr} \\ F_D = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - 1.46}{0.28} \right), \quad h > 2.1 \text{ m en } dh > 4.0 \text{ m/hr} \end{array} \right.$$

Waarin Φ_N de standaard cumulatieve normaalverdeling is. Voor het geval dat $h > 2.1$ m en een stijgsnelheid tussen 0.5 en 4.0 m/hr wordt er lineair geïnterpoleerd tussen de mortaliteit voor hoge en lage stijgsnelheid (Maaskant, 2009a). Figuur 2.3 geeft een aantal mortaliteitsfuncties bij verschillende stijgsnelheden.

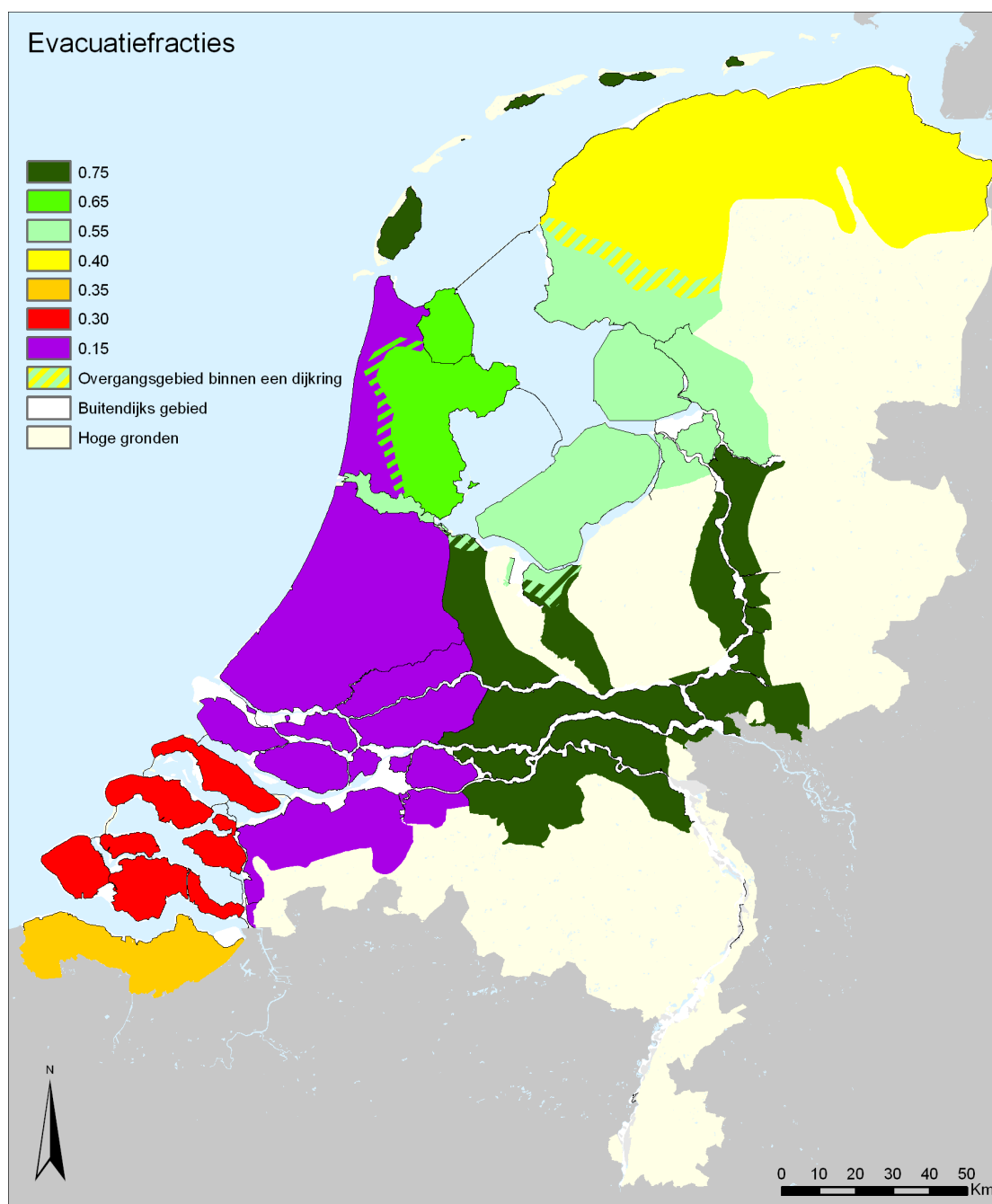
2. Ook wel dosis-respons relatie.



Figuur 2.3 Mortaliteitsfuncties voor verschillende stijgsnelheden.

2.3.3 Evacuatie

Het aantal aanwezigen bij het begin van de overstroming kan verkleind worden door middel van preventieve evacuatie. De evacuatiemogelijkheden variëren per gebied en hangen af van de waarschuwingstijd en de benodigde tijd om een veilige locatie te bereiken (Maaskant, 2009b). De gemiddelde evacuatiefracties per gebied zijn bepaald aan de hand van een gebeurtenissenboom, waarin kansen zijn toegekend aan 4 verschillende waarschuwingstijden (1, 2, 3 of 4 dagen) en aan 3 meer of minder succesvolle uitvoering van de evacuaties (worst case, gemiddeld en best case). Daarnaast is rekening gehouden met de mogelijkheid dat helemaal geen evacuatie plaatsvindt, met een bijbehorende kans. De in deze studie gebruikte evacuatiefracties zijn een gewogen gemiddelde over de $4 \times 3 + 1 = 13$ evacuatiescenario's. De evacuatiefracties zijn vastgesteld voor 9 deelgebieden (zie Figuur 2.4). De gearceerde gebieden geven aan dat overstromingsscenario's van meerdere kanten kunnen komen, waarvoor verschillende evacuatiefracties gelden. Voor de dijkringens langs de Limburgse Maas zijn bij gebrek aan gegevens dezelfde evacuatiefracties gehanteerd als voor het bovenrivierengebied (zie ook paragraaf 3.2.2).



Figuur 2.4: Gemiddelde evacuatiefracties voor Nederland, gebaseerd op (Maaskant, 2009b). De gearceerde gebieden geven aan dat hier overstromingsscenario's van meerdere kanten kunnen komen waarvoor verschillende evacuatiefracties gelden.

2.3.4 Scenariokansen

De kans op vóórkomen van elk van de overstromingsscenario's wordt afgeleid van de overstromingskans van het dijkkringdeel. De overstromingskansen elk dijkkringdeel zijn vastgelegd in de eerste en tweede referentiesituaties (zie paragraaf 2.2). Als we aannemen dat bij maatgevende condities slechts één bres optreedt, dan moet de overstromingskans van een dijkkringdeel (bij maatgevende condities) gelijk zijn aan de som van alle scenariokansen.

Hiervoor wordt een conditionele kans per scenario gedefinieerd: de kans op dit scenario gegeven een overstroming van het dijkkringdeel bij maatgevende condities. De som van de conditionele kansen moet gelijk zijn aan één.

De conditionele kans per scenario wordt bepaald onder de aanname van gelijkwaardigheid van alle dijkvakken. Met andere woorden: iedere kilometer dijk draagt evenveel bij aan de overstromingskans van het dijkkringdeel. De conditionele kans van elk van de scenario's bij maatgevende omstandigheden wordt dan berekend als de lengte van het betreffende dijktraject gedeeld door de totale lengte van de dijk van het dijkkringdeel (De Bruijn, 2009). In Tabel 2.3 zijn de conditionele kansen van de 14 overstromingsscenario's met bijbehorende breslocaties voor dijkkring 10 (totale lengte 48 km) weergegeven.

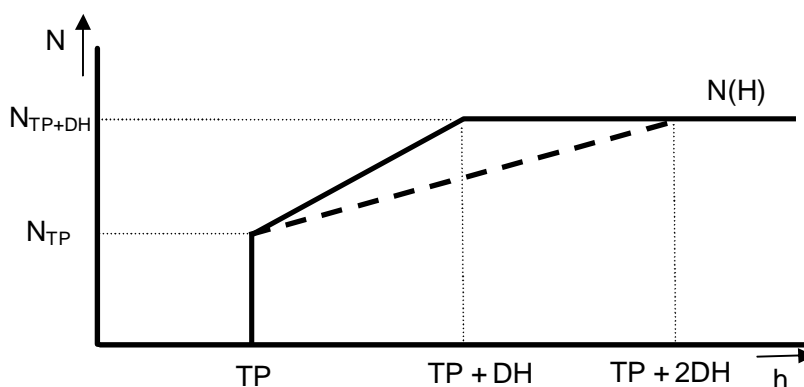
Tabel 2.3: Breslocaties van de overstromingsscenario's in dijkkring 10.

Scenario nummer	Breslocatie	Lengte dijktraject	Conditionele kans
1	IJsselmuiden	1.4 km	0.03
2	Genemuiden	1.9 km	0.04
3	IJssel 981	2.9 km	0.06
4	IJssel 985	4.8 km	0.10
5	IJssel 993	4.3 km	0.09
6	IJssel 995	1.9 km	0.04
7	IJsselmuiden spoorlijn	1.0 km	0.02
8	GDGS	4.8 km	0.10
9	GOGS	3.8 km	0.08
10	VEGS	1.0 km	0.02
11	Voorsterhaven	2.4 km	0.05
12	West Genemuiden	2.9 km	0.06
13	ZW Vecht 12	5.7 km	0.12
14	ZW Vecht 265	9.1 km	0.19

De simulaties met een enkelvoudige bres bij maatgevende waterstand geven een beeld van de gevolgen van een overstroming bij nipte overschrijding van de maatgevende condities. Bij hogere buitenwaterstanden zullen naar verwachting meer slachtoffers vallen, als gevolg van meervoudige doorbraken en een grotere waterdiepte. Dit wordt het bovenmaatgevende scenario genoemd. Het aantal slachtoffers in het bovenmaatgevende scenario wordt geschat als het maximum (maximum mortaliteit of maximum aantal slachtoffers) van de beschikbare enkelvoudige doorbraakscenario's. Dit bovenmaatgevende scenario wordt meegewogen in het slachtofferrisico.

De verwachte mortaliteit per locatie (voor het LIR) of het verwachte aantal slachtoffers per dijkkringdeel (voor het groepsrisico) is een gewogen som van de waarden bij maatgevende omstandigheden en bij het bovenmaatgevende scenario. Hiervoor wordt een verloop van het aantal slachtoffers (N) bij toenemende waterstand aangenomen zoals weergegeven in Figuur 2.5. Bij waterstanden onder het toetspeil (TP) vallen er geen slachtoffers omdat er geen

doorbraak plaatsvindt. Bij nipte overschrijding van het toetspeil is het verwachte aantal slachtoffers gelijk aan de gewogen som over de overstromingsscenario's bij toetspeil. De gewichten van de scenario's worden gegeven door de conditionele kansen van de scenario's bij toetspeil. Bij toetspeil plus een decimeringhoogte (TP+DH) is het aantal slachtoffers dat van het bovenmaatgevende scenario.



Figuur 2.5 Aantal slachtoffers N als functie van de maximale waterstand h .

De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers gegeven een overstroming kan berekend worden als de integraal over de slachtofferaantallen bij alle waterstanden vanaf het toetspeil:

$$E(N | F) = \int_{TP}^{\infty} N(h) p(h | F) dh$$

Als we een exponentiële verdelingsfunctie van de waterstand aannemen kan deze integraal analytisch worden berekend (zie Bijlage C). Dit leidt tot:

$$E(N | F) = 0.6N_{TP} + 0.4N_{TP+DH}$$

Waarbij N_{TP} de gewogen som is over de scenario's bij toetspeil:

$$N_{TP} = \sum_i P_{\text{cond},i} N_i$$

De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers is dus een gewogen som van het aantal slachtoffers bij toetspeil en dat van het bovenmaatgevende scenario. Het gewicht van het bovenmaatgevende scenario is afhankelijk van de waterstand waarbij dit scenario optreedt. Een gewicht van 0.4 correspondeert met een kans op het bovenmaatgevende scenario die tienmaal zo klein is als de kans op maatgevende omstandigheden. In het geval dat het bovenmaatgevende scenario pas optreedt bij toetspeil plus tweemaal de decimeringhoogte (bij een honderd maal zo kleine kans) vinden we:

$$E(N | F) = 0.8N_{TP} + 0.2N_{TP+2DH}$$

In deze studie is aangenomen dat een bovenmaatgevend scenario in het benedenrivierengebied, de IJssel-Vecht delta en de twee dijkringen met A-keringen tussen de

Ooster- en Westerschelde (dijkring 30 en 31) zeer onwaarschijnlijk is. De kans op doorbreken van alle dijkvakken van een dijkkringdeel in deze gebieden wordt door experts zeer klein geschat. Het gewicht van het bovenmaatgevende scenario is hier gelijk gesteld aan 0.2. Voor de overige gebieden is het gewicht van het bovenmaatgevende scenario gelijk gesteld aan 0.4.

2.3.5 Systeemwerking

Onder systeemwerking wordt verstaan de invloed van een dijkdoorbraak op de kans op overstroming in naburige dijkringen. We onderscheiden positieve en negatieve systeemwerking:

- Onder positieve systeemwerking wordt verstaan een verlaging van de kans op een dijkdoorbraak als gevolg van het falen van een naburige kering (ontlasting). Na een dijkdoorbraak daalt de waterstand in de rivier en daarmee de kans op doorbraak van naburige dijken langs dezelfde riviervak.
- Onder negatieve systeemwerking wordt verstaan een toename van de kans op een dijkdoorbraak als gevolg van het falen van een naburige kering (cascade-effect). Een voorbeeld van negatieve systeemwerking is de verhoging van de waterstand in de Maas door overstroming van dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) vanuit de Waal. De kans op dijkdoorbraken langs de Maas neemt hierdoor toe.

Systeemwerking is in de berekening van het groepsrisico meegenomen, maar niet in de berekening van het LIR. Het groepsrisico voor grote aantallen slachtoffers is gebaseerd op grootschalige scenario's waarbij meerdere dijkringen gelijktijdig overstromen. Daarbij speelt systeemwerking een belangrijke rol. De manier waarop systeemwerking in de groepsrisicoberekening is meegenomen wordt in meer detail toegelicht in paragraaf 2.5. Voor het LIR wordt naar individuele dijkringen afzonderlijk gekeken; systeemwerking is in dat geval naar verwachting van ondergeschikt belang.

2.4 Berekening LIR

Het LIR is gedefinieerd als de kans per jaar voor een fictief persoon aanwezig op een bepaalde locatie om te overlijden als gevolg van een overstroming, daarbij rekening houdend met de mogelijkheid van preventieve evacuatie (De Bruijn, 2009). Het LIR is dus niet afhankelijk van de bevolkingsdichtheid.

Gemiddeld bedraagt de mortaliteit ongeveer 1% voor wereldwijde overstromingen vanuit zee of rivieren, uitgezonderd flash floods (Jonkman, 2007). Het bijbehorende 'gemiddelde' LIR per dijkkringdeel is eenvoudig te bepalen als:

$$LIR = P_F (1 - f_{\text{evacuatie}}) 0.01$$

Waarin:

- $f_{\text{evacuatie}}$ is de gemiddelde evacuatiefractie voor het betreffende gebied
- P_F is de overstromingskans van het betreffende dijkkringdeel (gelijk aan de huidige wettelijke normfrequentie voor keringen van de dijkkring).

Voor de bepaling van het LIR is geen gebruik gemaakt van deze gemiddelde (vuistregel) waarde van 1%, maar is per overstromingsszenario en locatie de mortaliteit berekend (zie paragraaf 2.4.1).

2.4.1 LIR op basis van overstromingsscenario's

Om een beter beeld te krijgen van de geografische spreiding van het LIR wordt de mortaliteit berekend aan de hand van de kenmerken van de overstromingsscenario's. Deze kenmerken (waterdiepte en stijgsnelheid) zijn beschikbaar op een rooster van 100 bij 100 m. Echter, om numerieke modelfouten te onderdrukken en om beter aan te sluiten bij het schaalniveau van de data die gebruikt zijn om de mortaliteitsfunctie af te leiden wordt de mortaliteit per buurt berekend. Hiervoor wordt het buurtenbestand van het CBS gebruikt³. De oppervlakte van de CBS buurten varieert sterk. In landelijke gebieden is de gemiddelde oppervlakte 1000 ha. In stedelijke gebieden zijn de buurten kleiner, gemiddeld ongeveer 150 hectare (1.5 km²).

De procedure is dan als volgt:

- Van elk overstromingsscenario wordt de maximale waterdiepte en de stijgsnelheid op een rooster van 100 bij 100 m bepaald.
- Hieruit worden de waterlopen, zeer natte natuur zoals moeras en riet en buitendijkse gebieden verwijderd. Hiervoor wordt de LGN5 kaart (Landelijk Grondgebruik Nederland, versie 5) van Alterra gebruikt.
- Vervolgens worden de mediaan van de maximale waterdiepte en van de stijgsnelheid per buurt berekend. De mediaan geeft een indruk van de meest voorkomende waarde per buurt. Uitschieters hebben wel invloed op het gemiddelde, maar niet op de mediaan.
- Tenslotte wordt voor elk scenario per buurt de mortaliteit bepaald op basis van deze mediaanwaarden (zie paragraaf 2.3.2).

Het LIR per buurt B wordt vervolgens berekend met:

$$\text{LIR}(B) = P_F (1 - f_{\text{evacuatie}}) \left(0.4 m_{\text{worstcase}}(B) + 0.6 \sum_i P_{\text{cond},i} m_i(B) \right)$$

Waarin:

- $P_{\text{cond},i}$ is de conditionele kans op scenario i
- $m_i(B)$ is de mortaliteit in buurt B bij scenario i

De som over de scenario's i omvat alle doorbraakscenario's bij toetspeil van het betreffende dijkkringdeel. Voor de mortaliteit in het bovenmaatgevende scenario wordt de maximale mortaliteit uit alle scenario's van het betreffende dijkkringdeel gebruikt, inclusief de scenario's bij toetspeil plus een decimeringhoogte. De factoren 0.4 en 0.6 volgen uit een aangenomen verloop van het aantal slachtoffers als functie van de waterstand (zie paragraaf 2.3). Voor een aantal dijkkringdelen zijn deze factoren 0.2 en 0.8.

3. www.cbs.nl/infoservice

2.4.2 Bakjesdijkeringen

Een aantal kleine dijkeringen gedraagt zich bij overstroming naar verwachting als een bakje dat in één keer volloopt. Deze zeer kleine dijkeringen, zoals Rozenburg en Pernis, worden bakjesdijkeringen genoemd⁴. Voor de berekening van schade, slachtoffers en getroffenen kan hierin volstaan worden met een vereenvoudigde aanpak, zonder gebruik te maken van overstromingsmodellen. De stijgsnelheden en waterstanden binnen de bakjesdijkeringen zijn door de geringe oppervlakte van de dijkering redelijk homogeen en kunnen met eenvoudige vuistregels bepaald worden:

- De maximale waterstand in de dijkering is gelijk aan de maximale buitenwaterstand bij de doorbraaklocatie. In het geval van het project WV21 is dit het toetspeil (TP) of het toetspeil plus éénmaal de decimeringshoogte (TP + DH). De kans op een bovenmaatgevende scenario wordt voor de bakjesdijkeringen op één tiende van het maatgevende scenario geschat.
- De waterstand kan niet hoger worden dan de laagste dijkkrui van de omringende kering, omdat het water bij hogere waterstanden 'over de rand' stroomt.
- De maximale stijgsnelheid kan benaderd worden door de bres te beschouwen als een overlaat en het debiet door de bres te berekenen met de daarvoor bekende formules. De gemiddelde stijgsnelheid is het debiet gedeeld door het oppervlak van de dijkering.
- De berekening is uitgevoerd voor verschillende bresbreedtes (10, 20, 50, 100 m). De bresbreedte blijkt sterk bepalend voor de berekende stijgsnelheid.
- De mortaliteit wordt vervolgens berekend aan de hand van de mortaliteitsfuncties (zie paragraaf 2.3.2).

Voor een viertal bakjesdijkeringen zijn de maximale waterdiepte, stijgsnelheden en mortaliteit berekend op basis van deze vuistregels vergeleken met SOBEK overstromingssimulaties (zie paragraaf 3.1.3). De beste overeenkomsten worden gevonden bij een aangenomen bresbreedte van 10 tot 20 m. Dit wordt bevestigd door de bresbreedtes voor de vier gesimuleerde dijkeringen zoals berekend door het bresgroeimodel in SOBEK. Doordat de waterstand in het bakje zeer snel stijgt, neemt ook het verval en daarmee de stroomsnelheid door het gat snel af. Zodra de stroomsnelheid kleiner wordt dan de kritische stroomsnelheid waarboven dijkerosie plaatsvindt, stopt volgens de bresgroeimodellen de groei van de bres. De bressen in met SOBEK gesimuleerde overstromingen van bakjesdijkeringen worden daardoor niet breder dan 10 a 20 meter. De relatief kleine bresbreedtes hebben een reducerende invloed op de stijgsnelheid.

Op basis van de overeenkomsten voor de uitgebreid geanalyseerde bakjesdijkeringen (zie paragraaf 3.1.3), is besloten om voor alle bakjesdijkeringen de mortaliteit aan de hand van de hierboven beschreven vuistregels te bepalen. Bij toetspeil wordt een bresbreedte van 10 m aangehouden en voor het bovenmaatgevende scenario (toetspeil plus een decimeringshoogte) een bresbreedte van 20 m.

2.4.3 Alternatieve risicomaten individueel risico

In deze studie is het maximale LIR per dijkeringdeel bepaald, waarbij het LIR per buurt is berekend. In de aanloop naar dit rapport zijn ook alternatieve risicomaten beschouwd, zoals

4. In voorgaande studies zijn ook grotere dijkeringen (Mastenbroek, Bommelerwaard) wel als 'bakje' beschouwd. In deze studie vallen alleen de zeer kleine dijkeringen in de categorie bakjes.

de gemiddelde LIR waarde per dijkkring en het Plaatsgebonden Risico (PR). Een overzicht is weergegeven in Tabel 2.4. Uiteindelijk is in overleg met de klankbordgroep Slachtofferrisico's gekozen voor de maximum LIR waarde per dijkkringdeel als meest geschikt voor het beoordelen van de veiligheidssituatie van de individuele burger. Naast dit maximum per dijkkringdeel wordt het LIR ook op een kaart weergegeven om inzicht te geven in de geografische variatie. Kaarten met het PR zijn als aanvulling toegevoegd in Bijlage G.

Tabel 2.4: Alternatieve definities voor het LIR en argumentatie waarom deze uiteindelijk niet gebruikt zijn.

Alternatief	Argumentatie
Plaatsgebonden risico (PR): het LIR zonder rekening te houden met evacuatie.	Geen evacuatie is geen realistisch uitgangspunt (met name in het rivierengebied); overeenstemming vanuit veiligheidsregio's over gehanteerde evacuatiefracties.
Gemiddelde LIR-waarde per dijkkring(deel)	Binnen een dijkkring bestaan – als gevolg van locatiespecifieke omstandigheden – geregeld grote onderlinge verschillen in LIR-waarden. Bij het uitmiddelen gaat deze risico-informatie verloren en kan net zo goed overal de '1% mortaliteit'-vuistregel worden gehanteerd; omdat hierdoor de gevolgen van een doorbraak overal hetzelfde worden, wordt de risicobenadering min of meer ondergraven.
LIR in bewoond gebied	Het wordt moeilijk uitlegbaar gevonden om mensen in het 'buitengebied' minder bescherming te bieden. Bij de uiteindelijke normering kan aan mensen in dunbevolkte gebieden – indien gewenst – alsnog bescherming worden geboden via veiligheidslaag 2 en 3. Bovendien is de definitie van bewoond gebied niet eenduidig.
LIR-waarde per hectare	Deze resolutie leidde tot onrealistische uitschieters. De 'LIR per buurt' bleek een betere benadering.
LIR, 95% percentielwaarde	Dit alternatief is onderzocht als mogelijke oplossing om onrealistisch uitschieters weg te filteren. De 'buurten'-aanpak bleek een betere benadering.

2.5 Berekening groepsrisico

Het groepsrisico wordt veelal weergegeven met een FN curve, waarin de overschrijdingskans (1-F) is uitgezet tegen het aantal slachtoffers N op een dubbellogaritmische schaal. De FN curve bundelt in één grafiek informatie over de kans op een gebeurtenis met meer dan 10, 100, 1000 of 10.000 slachtoffers ten gevolge van een enkele overstroming. Het verwachte aantal slachtoffers per jaar (ook wel de Potential Loss of Life, PLL) is gelijk aan de oppervlakte onder de FN curve.

2.5.1 Alternatieve risicomaten groepsrisico

In deze studie is de FN curve voor Nederland als risicomaat gehanteerd. In de aanloop naar dit rapport zijn ook alternatieve risicomaten voor het groepsrisico beschouwd, zoals FN curven per dijkkring of de PLL. Een overzicht is weergegeven in Tabel 2.5. In overleg met de klankbordgroep Slachtofferrisico's is gekozen voor de landelijke FN curve als meest geschikte maat voor het beoordelen van het groepsrisico.

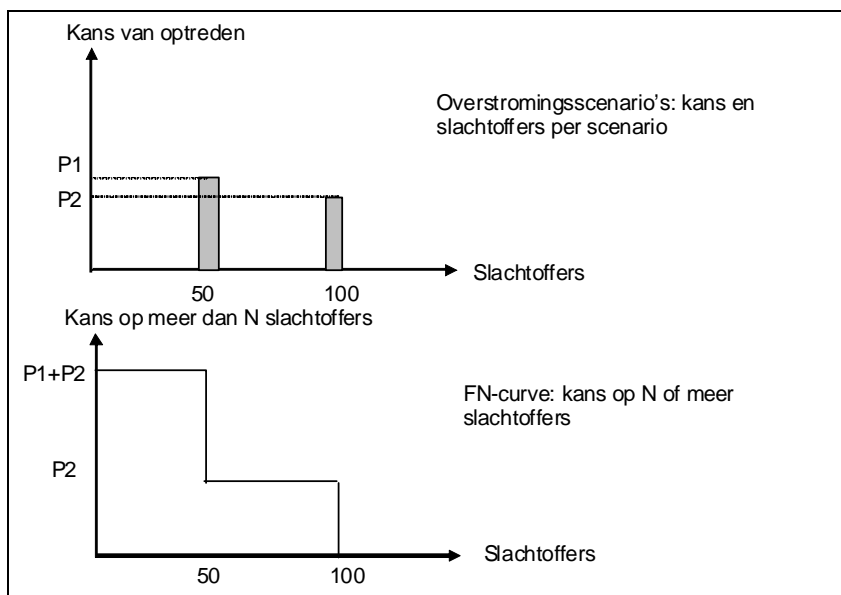
Tabel 2.5: Alternatieve risicomaten voor het groepsrisico en argumentatie waarom deze niet gebruikt zijn.

Alternatief	Argumentatie
FN curve per dijkkringdeel	Het groepsrisico is een maatschappelijk risico en moet voor een land als geheel beschouwd worden. In de FN curve per dijkkring mist informatie over dijkkringoverstijgende overstromingsscenario's.
Potential loss of life (PLL)	Het verwachte aantal slachtoffers per jaar (de PLL) biedt geen mogelijkheid voor risico-aversie.
C-waarde	De C-waarde is een maat voor de hoogte van de FN curve, uitgaande van een bepaalde risico-aversie. De C-waarde geeft echter geen detail-informatie over kansen en aantallen slachtoffers. De FN curve wel.

Basisprincipes FN curve

De FN curve wordt berekend op basis van een verzameling overstromingsscenario's die zo goed mogelijk alle realisaties afdekt. Voor ieder scenario wordt de kans van optreden en het aantal slachtoffers bepaald. De FN curve geeft de kans op een ramp met N of meer slachtoffers. Deze kans is te berekenen door de kansen op te tellen van alle overstromingsscenario's die leiden tot N slachtoffers of meer.

Als er bijvoorbeeld twee scenario's (1 en 2) zijn met respectievelijk 50 en 100 slachtoffers, dan is de FN curve tot 50 slachtoffers gelijk aan de som van de kansen van scenario's 1 en 2: P_1 plus P_2 (zie figuur 2.5). Tussen 50 en 100 slachtoffers is de FN curve gelijk aan P_2 . Boven de 100 slachtoffers is de FN curve gelijk aan nul. Er zijn immers geen scenario's met meer dan 100 slachtoffers.



Figuur 2.5 Opbouw FN curve voor twee scenario's.

Door kansbeperkende maatregelen zoals verbetering van waterkeringen verschuift de FN curve naar beneden: de kans van optreden van bepaalde scenario's wordt verkleind en daarmee wordt de kans op het bijbehorende aantal slachtoffers kleiner. Door gevolgbeperkende maatregelen verschuift de FN curve naar links: bij dezelfde scenario's en dezelfde kansen vallen minder slachtoffers.

2.5.2 Dijkringoverstijgende overstromingsscenario's

De FN curve voor een bepaald gebied is berekend op basis van een verzameling dijkringoverstijgende overstromingsscenario's met bijbehorende scenariokansen en aantallen slachtoffers. Voor een beoordeling van het groepsrisico in Nederland is het van belang om ook dijkringoverstijgende scenario's te beschouwen, omdat de scenario's waarbij meerdere dijkringen worden getroffen kunnen leiden tot veel slachtoffers. Voor groepsrisico's zijn juist die scenario's doorslaggevend (zie hoofdstuk 4).

De scenariokansen van de dijkringoverstijgende scenario's worden berekend op basis van de overstromingskansen van de dijkringdelen en hun onderlinge afhankelijkheden. De overstromingskans per dijkringdeel volgt uit het uitgangspunt van de referentiesituatie (zie paragraaf 2.2). Ten aanzien van de afhankelijkheid tussen de dijkringdelen worden twee vormen van afhankelijkheid onderscheiden, namelijk correlaties en systeemwerking.

Correlaties

De FN curve voor groepsrisico's wordt in sterke mate bepaald door correlaties tussen dijkringdelen. De scenariokansen die aan de basis liggen van de FN curve worden afgeleid uit de faalkansen van de betrokken dijkringen en de bijbehorende correlatiecoëfficiënten. De correlatiecoëfficiënt ρ_{ij} geeft de mate van correlatie aan tussen de belastingen en de sterktefuncties van twee dijkringen i en j . De correlatiecoëfficiënt kan een waarde aannemen tussen 0 (ongecorreleerd) tot 1 (volledig gecorreleerd). Door correlatie wordt de kans op gezamenlijk falen van twee dijkringen groter. Correlatie van de belasting ontstaat bijvoorbeeld als twee dijkringen bedreigd worden door dezelfde bron. Tijdens hoogwater bij de ene dijkkring is de kans groot dat een naburige dijkkring ook belast wordt. Correlatie tussen de sterktefuncties zijn vooral het gevolg van onzekerheden in het sterktemodel. Als een dijk een zwakte vertoont is de kans aanwezig dat een naburige dijk hetzelfde probleem heeft.

Voor de groepsrisicoberekening is eerst een aantal deelgebieden onderscheiden waartussen correlatie verwaarloosbaar wordt geacht. Deze indeling is gebaseerd op het type bedreiging: er is onderscheid gemaakt tussen gebieden die vooral bedreigd worden door hoge rivierafvoeren (bovenrivieren), door westelijke stormen (kust zuid), door noordwestelijke stormen (kust noord, en oostelijk ijsselmeer), door hoge meerpeilen (meren-west) en door een combinatie van stormopzet en rivierafvoeren (benedenrivieren). De gebruikte indeling is weergegeven in Figuur 2.6. Deze indeling is (grotendeels) overgenomen van de analyse van de Ergst Denkbare Overstromingen (EDO's) en de indeling voor de analyse van slachtofferrisico's in Jonkman (2008).

De correlatiecoëfficiënten tussen de dijkringen binnen een deelsysteem zijn afgeleid van de correlatie tussen de belasting- en sterktefuncties van een aantal voorbeelddijkringen, zoals berekend met behulp van PC-Ring binnen VNK1 en VNK2. Meer informatie hierover is te vinden in Bijlage D. De gebruikte correlatiecoëfficiënten per deelsysteem zijn weergegeven in Tabel 2.6. Dit zijn gemiddelde en afgeronde waarden van de voorbeelddijkringen uit PC-Ring.

De kans op een dijkringoverstijgend scenario, rekening houdend met correlatie, wordt berekend met behulp van een methode die ook gebruikt wordt in PC-Ring (Hohenbichler, 1983). Meer informatie hierover is te vinden in Bijlage E.

Tabel 2.6 Gebruikte correlatiecoëfficiënten per deelsysteem.

Deelsysteem	Correlatie tussen dijkringen binnen het deelsysteem
Benedenrivieren	0.9
Bovenrivieren	0.9 voor dijkringen langs dezelfde rivier (Maas, Rijntakken). 0.5 voor dijkringen langs verschillende rivieren (Maas, Rijntakken).
IJsselmeer	0.75
Kust-noord	0.9 (kustdijkringen onderling), 0.9 (IJsselmeerdijkringen onderling), 0.5 voor correlatie tussen kust- en IJsselmeer
Kust-zuid	0.9



Figuur 2.6: Indeling van Nederland in deelsystemen voor de berekening van het groepsrisico.

Systeemwerking

Systeemwerking is het effect van een overstroming van een dijkkring op de overstromingskans van een andere dijkkring (zie paragraaf 2.3.5). We onderscheiden positieve en negatieve systeemwerking. In de groepsrisicoberekeningen wordt negatieve systeemwerking meegenomen door een groter aantal slachtoffers toe te kennen aan een bepaald doorbraakscenario waarin sprake is van cascadowerking. Dit wordt alleen gedaan bij overloop van primaire keringen, zoals bij een overstroming van dijkkring 41 (Land van Maas en Waal) vanuit de Waal, waarbij het water doorloopt in de Maas. C-keringen worden geacht op orde te zijn (zie paragraaf 2.2) en blokkeren systeemwerking tussen de betreffende dijkringen. Het additionele aantal slachtoffers dat valt als gevolg van cascadowerking is meestal beperkt (enkele tientallen). Het wordt voor de betreffende scenario's berekend met behulp van HIS-SSM.

Positieve systeemwerking wordt in de berekening van het groepsrisico meegenomen door een verlaging van het verwachte aantal slachtoffers bij de scenario's waar dit effect optreedt. Deze manier van corrigeren is rekenkundig eenvoudiger dan het aanpassen van de scenariokansen. Het resultaat van beide methoden is identiek (zie bijlage F). Positieve systeemwerking, of ontlasting, speelt vooral in het deelsysteem bovenrivieren. Voor dit deelsysteem is op basis van expert opinion per dijkkringdeel bepaald welke andere dijkkringdelen worden ontlast. De algemene regel is dat het overstromen van een grote dijkkring de dijkringen benedenstrooms langs dezelfde riviertak ontlast (zie Tabel 2.7). Deze regel is onder andere gebaseerd op resultaten van Van Mierlo (2007, 2008).

Tabel 2.7: Ontlasting door overstroming van dijkringen in het deelsysteem bovenrivieren.

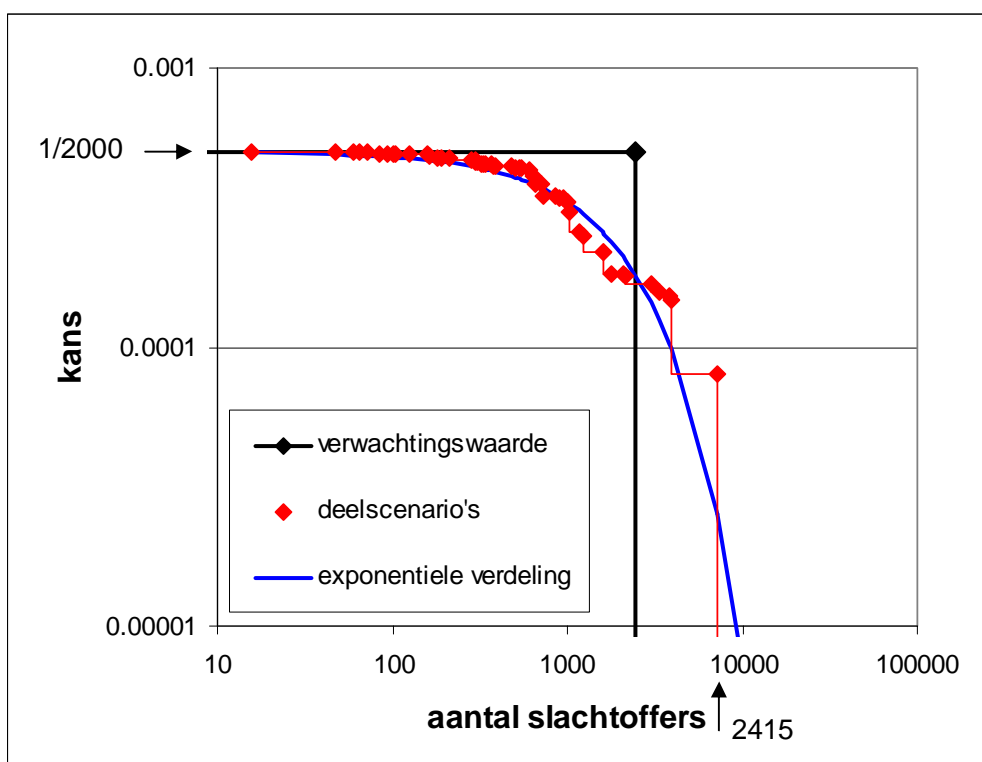
Riviertak	Dijkkring	Ontlast
Bovenrijn	48_1	Ontlast alle dijkringen langs de Rijn
	42_1	Ontlast 48, IJssel, Nederrijn/Lek volledig en de Betuwe voor 50%
Waal	41_1	Ontlast dijkringen benedenstrooms langs de Waal: 38_1, 40_1,
	40_1	Ontlast niets
	38_1	Ontlast niets
	43	Ontlast de dijkringen langs de Waal en Nederrijn lek voor 50%, dus 38_1, 41_1 en 40_1, 44_1, 45_1 en 47_1.
Nederrijn	47	Kleine dijkkring, geen ontlasting
	44	Ontlast 43 half (de Betuwe kan nog wel overstromen vanuit Waal)
	45	Ontlast 43 half en 44_1 helemaal.
IJssel	48_2	Ontlast alle dijkringen langs de IJssel en dijkkring 47
	49	Ontlast de dijkringen benedenstrooms langs de IJssel en aan de overzijde voor 50% (dijkkring 50, 51, 52 en 53).
	50	Ontlast benedenstrooms en overzijde voor 50% (51, 52 en 53).
	51	Ontlast benedenstrooms en overzijde voor 50% (52 en 53).
	52	Ontlast benedenstrooms en overzijde: dijkkring 50, 51 en 53
	53	Ontlast niets
Maas	65, 68, 86, 87, 88, 37, 39, 40_2	Deze kleine dijkringen ontlasten geen andere dijkringen.
	36	Benedenstrooms (37, 38_2, 39, 40_2) volledig en 41_2 voor 50%
	41_2	Ontlast 37, 38_2, 39 en 40_2 volledig en 36 voor 50%

2.5.3 Spreiding van het aantal slachtoffers

De berekende waarde van het aantal slachtoffers per overstromingsscenario is een beste schatting of verwachtingswaarde. In werkelijkheid kunnen er meer of minder slachtoffers vallen, afhankelijk van de omstandigheden. We kunnen de spreiding van het aantal slachtoffers per scenario reconstrueren uit de verwachtingswaarde door een kansverdeling aan te nemen. Jonkman (2008) heeft op basis van FN curven per dijkkring uit VNK1 gesuggereerd dat een exponentiële verdelingsfunctie een redelijke benadering geeft van deze spreiding. De validiteit van deze benadering is in deze studie nader onderzocht (zie Bijlage H).

Ter illustratie wordt in Figuur 2.7 een aantal varianten van de FN curve van dijkkring 16 vergeleken:

- De FN curve op basis van een enkel scenario: de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers (in dit geval 2415) en de overstromingskans van de dijkkring (1/2000).
- De FN curve op basis van alle combinaties van 13 doorbraakscenario's en 4 evacuatiescenario's. In totaal zijn er voor deze dijkkring 13 x 4 = 52 deelscenario's.
- Een exponentiële verdeling met dezelfde verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers gegeven een overstroming (in dit geval 2415).



Figuur 2.7 FN-curven voor dijkkring 16 op basis van een enkel scenario (verwachtingswaarde) en op basis van uitgesplitste deelscenario's (combinaties van doorbraakscenario's en evacuatiescenario's). In blauw de exponentiële verdeling met dezelfde verwachtingswaarde.

De exponentiële verdeling blijkt inderdaad een goede benadering van de FN curve voor de 52 deelscenario's (zie ook Bijlage H). In de groepsrisicoberekening wordt per dijkkringoverstijgend scenario de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers N_{scenario} berekend. Daarna wordt een exponentiële verdeling opgesteld volgens:

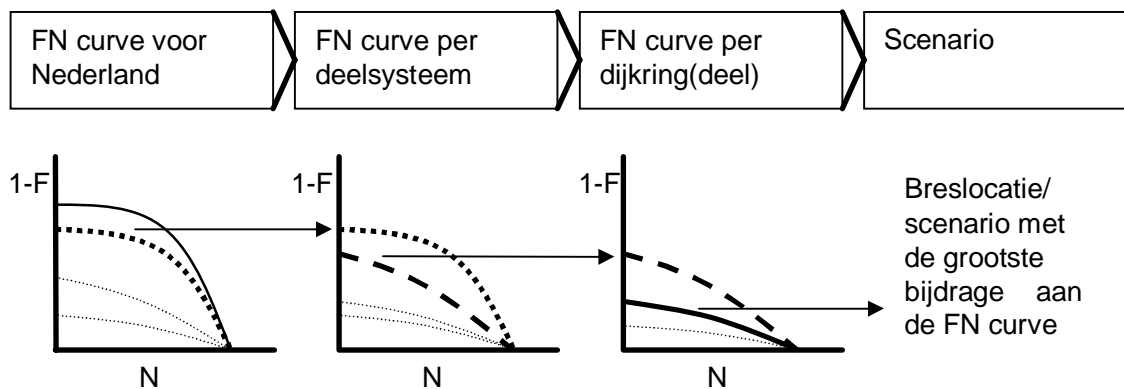
$$P_{ov}(N) = P_{\text{scenario}} \exp\left(-\frac{N}{N_{\text{scenario}}}\right)$$

Deze verdeling wordt vervolgens gebruikt als input voor de FN curve. Het toepassen van de exponentiële verdelingen heeft geen invloed op de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers per jaar. De kans op een groot aantal slachtoffers (de 'staart' van de FN curve) neemt wel toe ten opzichte van de oorspronkelijke beste schatting (2415 in Figuur 2.7). De staart kan gezien worden als een weergave van de variatie van de mortaliteit (zie Bijlage H).

2.5.4 Bijdragen aan de FN curve

De kans op meer dan N slachtoffers wordt bepaald voor verschillende waarden van N . Deze kansen worden weergegeven in de FN curve (zie Figuur 2.7 voor dijkkring 16). Uit de FN curve worden de kans op meer dan 10, 100 en 1000 bepaald.

Om aan te kunnen geven welke deelsystemen of dijkringen verantwoordelijk zijn voor de waarden in de FN curve, worden hun bijdragen berekend. Vervolgens wordt ingezoomd op de deelsystemen en dijkringen die de grootste bijdragen aan het groepsrisico leveren. Op het kleinste detailniveau kan binnen een dijkkringdeel gekeken worden naar de scenario's die het meeste bijdragen aan de FN curve van dat dijkkringdeel. Figuur 2.8 is een schematisch overzicht van de verschillende schaalniveaus waarvoor FN curven berekend worden. Op basis van de bijdragen aan de FN curve per dijkkringdeel kan bepaald worden welke scenario's het grootste aandeel hebben in het groepsrisico.



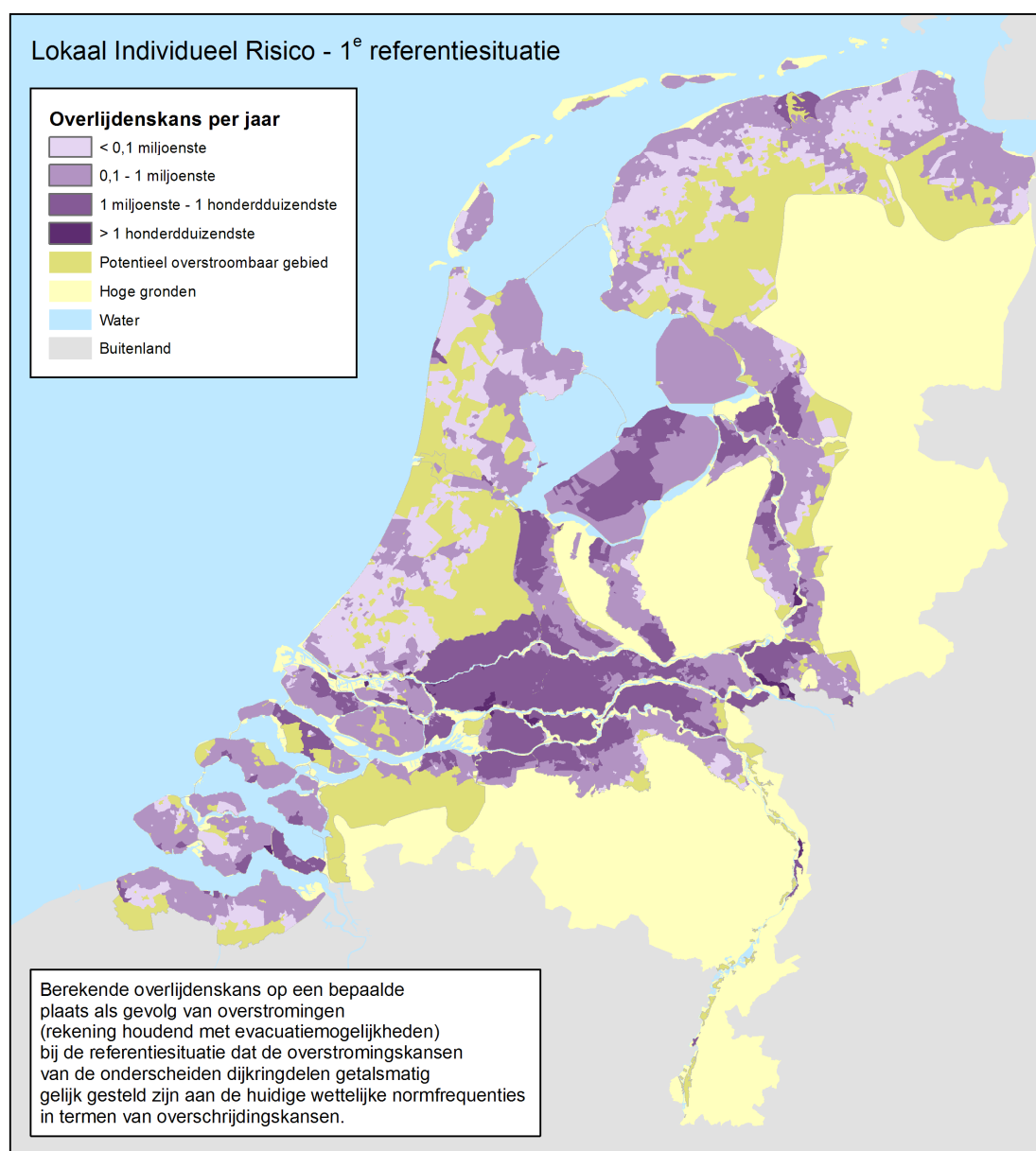
Figuur 2.8 Schematische weergave van het identificeren van probleemgebieden door inzoomen op de grootste bijdragen aan de FN curve op verschillende schaalniveaus.

3 Resultaten lokaal individueel risico

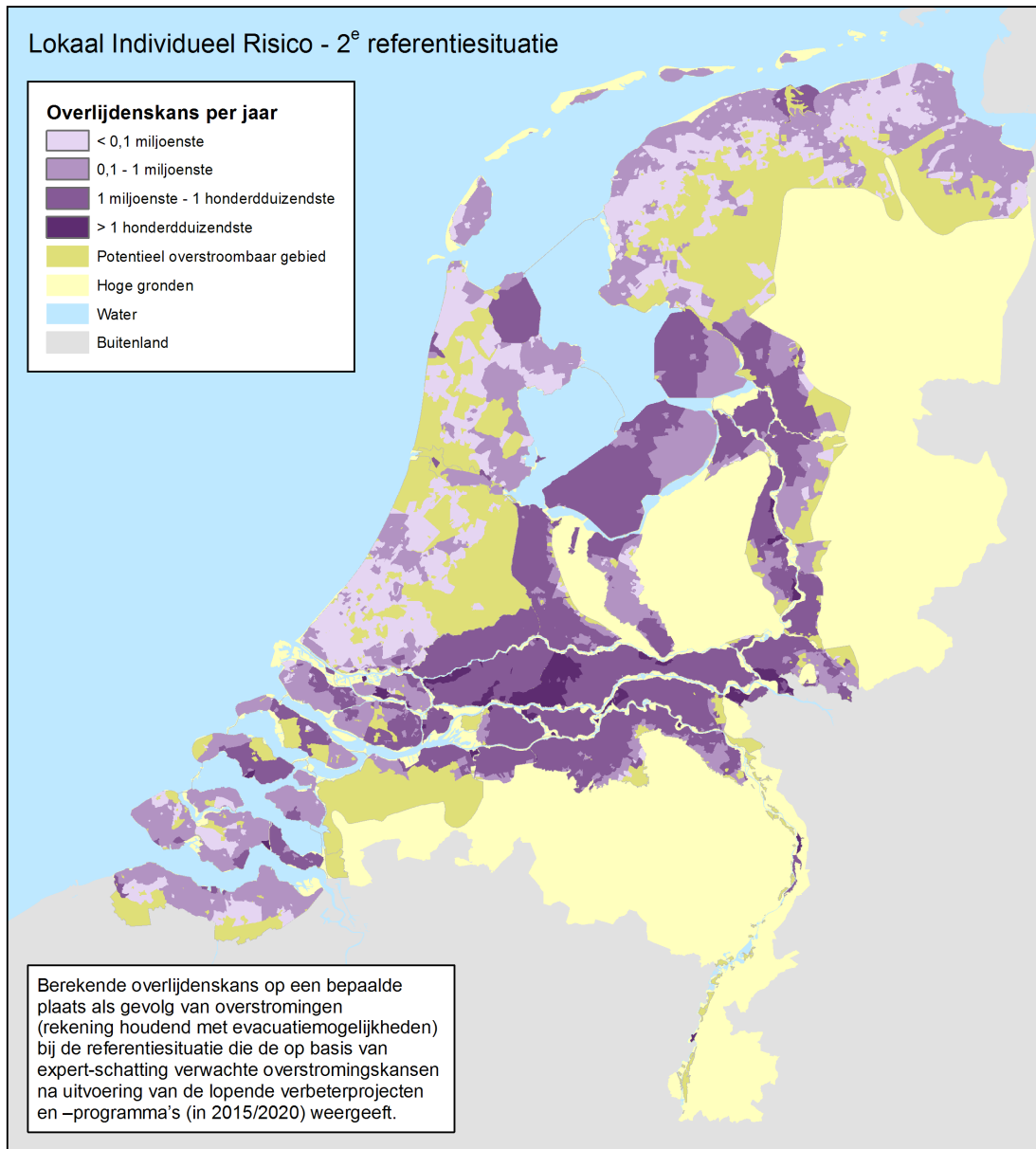
3.1 Resultaten LIR berekeningen

3.1.1 LIR geografische weergave

Het LIR voor Nederland, uitgaande van de eerste referentiesituatie, is weergegeven in Figuur 3.1. Het LIR, uitgaande van de tweede referentiesituatie, is weergegeven in Figuur 3.2. Relatief hoge LIR waarden worden overwegend gevonden in het rivierengebied.



Figuur 3.1 LIR kaart voor Nederland in 2040, uitgaande van de eerste referentiesituatie.



Figuur 3.2 LIR kaart voor Nederland in 2040, uitgaande van de tweede referentiesituatie.

Een aantal gebieden in de LIR kaart is aangegeven als potentieel overstroombaar gebied. Deze gebieden lopen niet onder in de beschouwde scenario's, onder andere vanwege het uitgangspunt dat de regionale keringen op orde zijn (zie paragraaf 2.2). Onder andere aannames kunnen deze gebieden wel overstromen. Bijvoorbeeld, er is aangenomen dat de regionale keringen langs het Amsterdam-Rijnkanaal 'op orde' zijn. Daardoor kan het gebied ten westen van het Amsterdam-Rijnkanaal niet overstromen bij een doorbraak in de Kromme Rijn (dijkkring 44) of de Lopiker- en Krimpenerwaard (dijkkring 15). Dit gebied is in Figuur 3.1 en Figuur 3.2 als 'potentieel overstroombaar' aangeduid.

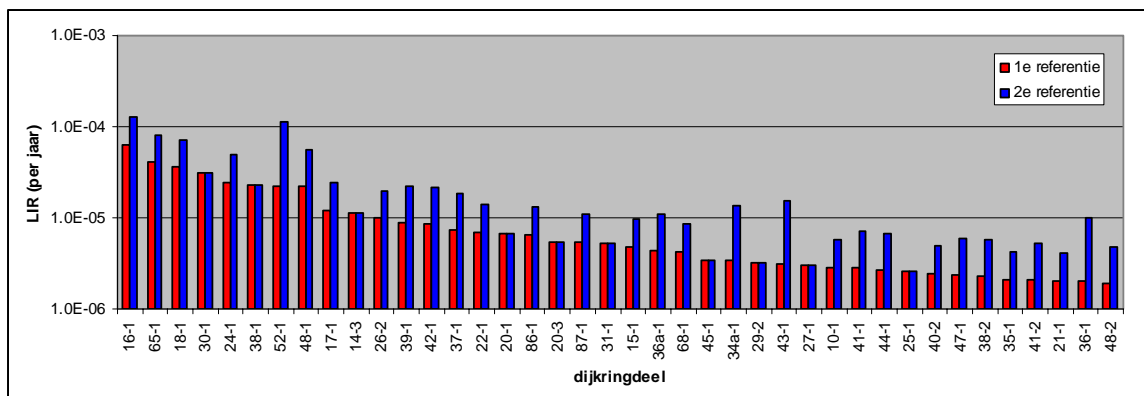
3.1.2 Maximum LIR per dijkkringdeel

Een overzicht van de hoogste LIR waarden per dijkkringdeel is opgenomen in Bijlage B. Tabel 3.1 geeft de top twintig van de dijkkringen met de grootste LIR waarden in de eerste referentiesituatie. In de eerste referentiesituatie heeft een tiental dijkkringdelen een maximum LIR waarde groter dan 1/100.000 of $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar, waaronder twee 'bakjesdijkkringen' (zie paragraaf 3.1.3). In de tweede referentiesituatie zijn dat er 22, waaronder negen bakjesdijkkringen. De hoge mortaliteit in de bakjesdijkkringen wordt veroorzaakt door hoge stijgsnelheden en maximum waterstanden, omdat het water zich niet over een groter gebied kan verspreiden. In de tweede referentiesituatie liggen veel LIR waarden hoger door de aangepaste overstromingskansen van een aantal dijkkringen (zie Tabel 2.2). De hoogste LIR waarden zijn $6.3 \cdot 10^{-5}$ per jaar in de eerste referentiesituatie en $1.3 \cdot 10^{-4}$ per jaar in de tweede referentiesituatie. Bij een maximaal toelaatbare LIR-grenswaarde, gelijk aan deze waarden, zouden dus alle dijkkringen voldoen.

Tabel 3.1 Maximum LIR per dijkkringdeel. De twintig dijkkringdelen met de hoogste maximum LIR waarden. De bakjesdijkkringen (zie volgende paragraaf) zijn geel gemarkeerd.

Dijkkringdeel	Naam	Max LIR (per jaar) 1 ^e referentie	Max LIR (per jaar) 2 ^e referentie
16-1	Alblasserwaard/Vijfheerenlanden	6.3E-05	1.3E-04
65-1	Arcen	4.1E-05	8.2E-05
18-1	Pernis	3.6E-05	7.2E-05
30-1	Zuid-Beveland_West	3.2E-05	3.2E-05
24-1	Land van Altena	2.4E-05	4.9E-05
38-1	Bommelerwaard_Waal	2.3E-05	2.3E-05
52-1	Oost Veluwe	2.2E-05	1.1E-04
48-1	Rijn en IJssel_Boven	2.2E-05	5.6E-05
17-1	IJsselmonde	1.2E-05	2.4E-05
14-3	Zuid-Holland_NweWaterweg_Oost	1.1E-05	1.1E-05
26-2	Schouwen Duiveland_Oost	9.9E-06	2.0E-05
39-1	Alem	8.9E-06	2.2E-05
42-1	Ooij en Millingen	8.6E-06	2.1E-05
37-1	Nederhemert	7.3E-06	1.8E-05
22-1	Eiland van Dordrecht	7.0E-06	1.4E-05
20-1	Voorne-Putten_West	6.7E-06	6.7E-06
86-1	Maasband	6.5E-06	1.3E-05
20-3	Voorne-Putten_Oost	5.5E-06	5.5E-06
87-1	Meers	5.4E-06	1.1E-05
31-1	Zuid-Beveland_Oost	5.2E-06	5.2E-06

Figuur 3.3 geeft een overzicht van de 40 dijkkringen met een de hoogste maximale buurtwaarde van het LIR. In de eerste referentie zijn er 10 dijkkringdelen met LIR waarden groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In 20 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR groter dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 39 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of groter voor. In de tweede referentie zijn er 22 dijkkringdelen met LIR waarden groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In 35 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR groter dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 52 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of groter voor.



Figuur 3.3 Hoogste 40 maximum LIR waarden per dijkkring in de 1^e en 2^e referentiesituatie.

3.1.3 Bakjesdijkringen

De berekende overstromingskenmerken en mortaliteit in de bakjesdijkringen zijn weergegeven in Tabel 3.2. Voor vier dijkringen zijn zowel de vuistregels toegepast als SOBEK simulaties gedaan en kunnen de maximale waterdieptes en stijgsnelheden van beide benaderingen worden vergeleken. De resultaten van de vuistregels komen redelijk goed overeen met die van SOBEK.

Het LIR voor de bakjesdijkringen in Bijlage B is berekend op basis van de vuistregels voor waterdiepte en stijgsnelheid. De 13 dijkringen van deze categorie zijn daardoor onderling beter vergelijkbaar. Het resultaat is weergegeven in Tabel 3.3. Arcen en Pernis hebben de hoogste LIR waarden. De vier Limburgse Maaskaden in deze berekening worden representatief verondersteld voor de overige Maaskaden. Het feit dat voor Arcen een hoge LIR waarde wordt berekend geeft aan dat ook andere Maaskaden een hoge LIR waarden kunnen hebben.

Tabel 3.2 Overstromingskenmerken en mortaliteit, volgens de vuistregels en de SOBEK overstromingsscenario's.

Dijkkring deel	Naam	Vuistregels			SOBEK simulatie		
		Stijgsnelheid [m/hr]	Maximale diepte [m]	Mortaliteit	Stijgsnelheid [m/hr]	Maximale diepte [m]	Mortaliteit
18	Pernis	2.1	5.5	42%	3.5	4.9	58%
19	Rozenburg	4.6	2.2	2%	4.5	2.7	9%
34a	Geertruidenberg	0.4	2.5	1%	0.6	3.0	2%
36a	Keent	0.4	2.8	2%			
37	Nederhemert	0.6	3.1	4%			
39	Alem	0.6	3.1	4%			
40-1	Heerewaarden, Waal	0.5	2.2	1%			
40-2	Heerewaarden, Maas	0.1	1.2	0.5%			
46	Eemnes	0.02	1.1	0.4%			
65	Arcen	0.6	4.6	4%	0.4	4.5	2%
68	Venlo	0.02	1.0	0.4%			
86	Maasband	0.2	1.6	0.6%			
87	Meers	0.2	1.4	1%			

Tabel 3.3 Op basis van vuistregels berekende LIR voor de bakjesdijkeringen.

Dijkringdeel	Naam	Mortaliteit	Herhalingstijd (jaar)	Evacuatiefractie	LIR (per jaar), 1 ^e referentie
18	Pernis	42%	10000	0.15	$3.6 \cdot 10^{-5}$
19	Rozenburg	2%	10000	0.15	$1.9 \cdot 10^{-6}$
34a	Geertruidenberg	1%	2000	0.15	$3.4 \cdot 10^{-6}$
36a	Keent	2%	1250	0.75	$4.4 \cdot 10^{-6}$
37	Nederhemert	4%	1250	0.75	$7.3 \cdot 10^{-6}$
39	Alem	4%	1250	0.75	$8.9 \cdot 10^{-6}$
40-1	Heerwaarden, Waal	1%	2000	0.75	$1.5 \cdot 10^{-6}$
40-2	Heerwaarden, Maas	0.5%	500	0.75	$2.4 \cdot 10^{-6}$
46	Eemnes	0.4%	1250	0.75	$8.6 \cdot 10^{-7}$
65	Arcen	4%	250	0.75	$4.1 \cdot 10^{-5}$
68	Venlo	0.4%	250	0.75	$4.2 \cdot 10^{-6}$
86	Maasband	0.6%	250	0.75	$6.5 \cdot 10^{-6}$
87	Meers	1%	250	0.75	$5.4 \cdot 10^{-6}$

3.2 Gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de LIR berekeningen zijn afhankelijk van een aantal aannames en parameterinstellingen. De belangrijkste factoren die de schatting van het aantal slachtoffers bepalen zijn:

- het overstromingsverloop (het overstroomde gebied),
- de evacuatiefractie en
- de mortaliteit bij een overstroming.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze factoren en een eerste schatting van de mate van onzekerheid. Deze schatting is gebaseerd op de onzekerheidsanalyse die in het kader van de MKBA is uitgevoerd. De onzekerheid is uitgedrukt in termen van een 90% betrouwbaarheidsinterval. Dit betekent dat de werkelijke waarde met 90% kans binnen de genoemde bandbreedte zal liggen.

Tabel 3.4: Geschatte onzekerheden in de LIR berekening.

Factor	Schatting onzekerheid (90% betrouwbaarheid) t.o.v. gemiddelde
Evacuatiefractie	1.5 voor meeste gebieden 3 voor benedenrivierengebied 5 voor Maaskaden
Mortaliteitsfunctie	2
Overstroomd gebied	1.5

Onder de aanname van onafhankelijkheid leidt combinatie van deze onzekere factoren tot een geschatte totale onzekerheid in de berekende LIR waarden van een factor 2.3 tot 2.5 voor de meeste gebieden. Voor het benedenrivierengebied geldt een totale onzekerheid van een factor 4 en voor de Maaskaden een factor 6.

De evacuatiefractie is voor de meeste gebieden de belangrijkste onzekerheid en wordt hieronder nader uitgewerkt.

3.2.1 Evacuatiefracties benedenrivierengebied

De effectiviteit van preventieve evacuatie is een belangrijke bron van onzekerheid. De evacuatiefracties in de referentieberekeningen zijn gebaseerd op Maaskant (2009b). Daarin wordt een gebeurtenissenboom geschetst die leidt tot verschillende mogelijke evacuatiescenario's. Elk scenario heeft een geschatte kans van optreden en een effectiviteit van de evacuatie. In het slechtste geval kan er geen evacuatie plaatsvinden. De gebruikte evacuatiefracties voor de twee referentiesituaties zijn de verwachtingswaarden uit de gebeurtenissenboom. De evacuatiefracties voor twee deelsystemen worden in deze paragraaf nader onderzocht.

De invloed hiervan op het LIR verschilt per regio. De invloed van de onzekerheid ten aanzien van de evacuatiefractie is klein voor gebieden met een lage evacuatiefractie. In de kustgebieden is de evacuatiefractie in de referentiesituaties bijvoorbeeld 0.15 (15%). Een kleine aanpassing van deze waarde heeft weinig invloed op de berekende LIR waarden. Bijstelling van de evacuatiefractie naar 30% vertaalt zich in een reductie van het LIR met een factor 1.2. Voor het bovenrivierengebied is de verwachte evacuatiefractie op 75% gesteld. Bijstelling van deze evacuatiefractie naar 95% vertaalt zich in een reductie van het LIR met een factor 5.

Voor de grotere dijkkringen in het bovenrivierengebied lijkt een evacuatiefractie van 75% een realistische waarde, vanwege de complexiteit van een grootschalige evacuatie. Echter, voor een aantal kleinere dijkkringen kan wellicht een hoger percentage geëvacueerden worden bereikt. Dit heeft een groot effect op het berekende LIR. Aan de andere kant moet altijd rekening worden gehouden met een percentage inwoners dat geen gehoor geeft aan de oproep tot evacuatie. In Maaskant (2009b) wordt deze fractie in het rivierengebied op 10% gesteld. Het verdient aanbeveling om nader te onderzoeken in hoeverre bij kleine dijkkringen (badkuipen) een grotere evacuatiefractie dan nu gehanteerd haalbaar is en welke extra inspanning daarvoor nodig is.

In de referentieberekeningen is er een abrupte overgang tussen de evacuatiefracties voor het deelsysteem benedenrivieren (15%) en bovenrivieren (75%). In werkelijkheid neemt de invloed van stormvloed op zee geleidelijk af. In een alternatieve LIR berekening is daarom een geleidelijke overgang gebruikt voor de evacuatiefractie in het overgangsgebied. Voor elk overstromingsscenario van de dijkkringen 14-3, 15, 16, 17, 21, 22, 24, 34 en 35 is een aparte evacuatiefractie berekend aan de hand van de RD-X coördinaat van de breslocatie en een S-curve, beginnend op 15% ter hoogte van Rotterdam en eindigend op 75% ter hoogte van Gorinchem. NB Deze benadering wijkt af van de aanbevelingen van Maaskant (2009b).

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.5. De maximum LIR waarden van een aantal dijkkringen zijn duidelijk lager dan in de referentieberekening. Het verschil bedraagt maximaal een factor 3 voor de relatief bovenstrooms gelegen dijkkring (15, 16, 24 en 35). De aanpassingen aan de evacuatiefracties zijn hier het grootst. Meer benedenstrooms gelegen dijkkringen laten slechts kleine verschillen zien (17, 21, 14-3 en 34).

Tabel 3.5 Effect van alternatieve evacuatiefracties op de maximum LIR waarden (1^e referentie).

Dijkkringdeel	LIR 1 ^e referentie	Variant	Reductie
15	$4.9 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	2.7
16	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	3.2
17	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	1.2
21	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	1.0
22	$7.0 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	1.6
24	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-6}$	3.1
34	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$9.3 \cdot 10^{-7}$	1.4
35	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$6.9 \cdot 10^{-7}$	3.0
14-3	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	1.2

3.2.2 Evacuatiefracties Maaskades

In de analyse van gevolgen van overstromingen zijn de Maaskades op dezelfde manier benaderd als de bakjesdijkringen in het bovenriviereengebied. Er zijn overstromingsdieptes en stijgsnelheden bepaald in geval van een doorbraak en voor de bepaling van slachtoffers is uitgegaan van een evacuatiefractie van 75%. Deze uitgangspunten staan ter discussie. Wanneer de kaden overstroombaar zijn (en dus niet breken), zouden overstromingsdieptes en stijgsnelheden op een andere manier moeten worden benaderd. Bij kleine dijkringen zou een hogere evacuatiefractie realistisch kunnen zijn, hoewel misschien weer niet voor die kaden die bij hogere waterstanden een eiland vormen. Verdere verfijning van uitgangspunten valt evenwel buiten de reikwijdte van deze landelijke analyse. De in WV21 gehanteerde benadering zal naar verwachting voor de meeste Maaskaden een conservatieve aanpak blijken. Dat wil zeggen dat het aantal slachtoffers eerder zal zijn overschat dan onderschat.

3.3 Beschouwing resultaten

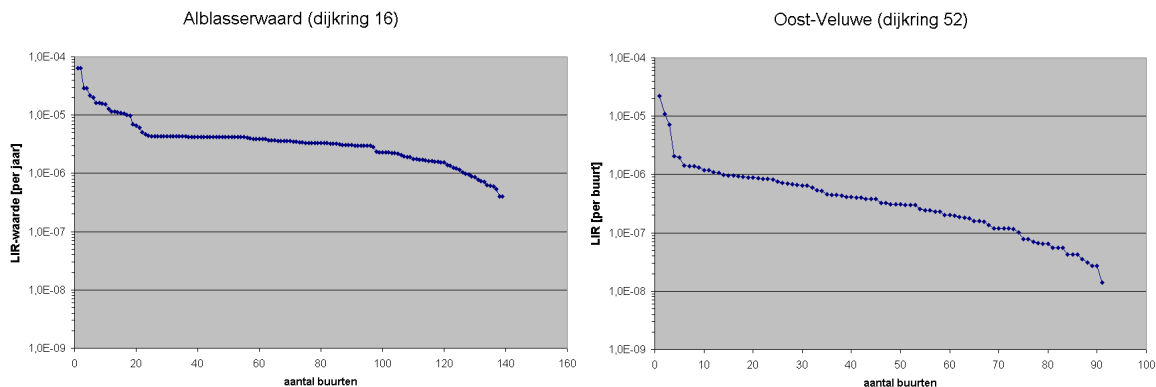
Het maximale LIR per dijkkring wordt per definitie bepaald door de buurt met de hoogste waarde. Als dit een kleine buurt betreft kan deze maximale waarde onderhevig zijn aan lokale invloeden, zoals de aanwezigheid van een bres in één van de overstromingsscenario's. Om dit te onderzoeken is de buurt met de grootste LIR waarde vergeleken met de buurten met de op-één-na en op-twee-na grootste LIR waarden.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3.6. Het verschil tussen de buurt met de hoogste LIR waarde en de buurt met de op-één-na hoogste LIR waarde bedraagt een factor 1 tot 3. Voor de buurt met de op-twee-na hoogste waarde loopt het verschil op tot een factor 1 tot 10. Echter, er zijn ook dijkringen waarbij de verschillen klein blijven en er blijkbaar meerdere buurten zijn met vergelijkbare hoge LIR waarden. Voor de dijkringen waar de grootste verschillen gevonden worden betreft het in de onderzochte gevallen buurten met een gemiddelde omvang.

In Figuur 3.4 is de verdeling van de LIR waarden over de buurten van dijkkring 16 (Alblasserwaard) en dijkkring 52 (Oost-Veluwe) weergegeven. Hieruit blijkt dat een klein aantal buurten een relatief hoge LIR waarde heeft. De meeste buurten hebben een LIR waarde die een grootte orde lager ligt dan de hoogste LIR waarde in de dijkkring.

Tabel 3.6 Dijkringen met hoogste LIR waarden (1^e ref) en de op-een-na en op-twee-na hoogste waarden.

Dijkring-deel	Naam	Hoogste LIR waarde (1/jaar)	Tweede hoogste LIR waarde (1/jaar)	Derde hoogste LIR waarde (1/jaar)
16	Alblasserwaard en Vijfheerenland	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$
30	Zuid-Beveland	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$
24	Land van Altena	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$
38-1	Bommelerwaard, Waal	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$7.6 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$
52	Oost-Veluwe	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$7.1 \cdot 10^{-6}$
48-1	Rijn en IJssel	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$
17	IJsselmonde	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-6}$
14-3	Zuid-Holland, achter Maeslantkering	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$
26-2	Schouwen-Duiveland	$9.9 \cdot 10^{-6}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$9.0 \cdot 10^{-7}$
42	Ooij en Millingen	$8.6 \cdot 10^{-6}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$



Figuur 3.4 Verdeling van de LIR waarden over de buurten van dijkkring 16 en 52.

Omdat per dijkkring slechts een beperkt aantal buurten een hoge LIR waarde heeft is het ook interessant om te onderzoeken hoeveel inwoners deze buurten hebben. Uitgaande van de eerste referentiesituatie wonen er ongeveer 60.000 mensen in een buurt met een LIR groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Meer dan de helft (38.000) daarvan woont in dijkkring 16 (Alblasserwaard). Andere dijkringen waar relatief veel mensen wonen in buurten met hoge LIR-waarde zijn Zuid-Holland Oost (7.500), Rijn en IJssel (6.900), Pernis (4.700) en Arcen (3.650).

In de tweede referentiesituatie wonen er ongeveer 120.000 mensen in een buurt met een LIR groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. Het merendeel hiervan woont in de Alblasserwaard (45.000) en in de Betuwe (36.000).

Tabel 3.7: Aantal inwoners van buurten met een LIR waarde hoger dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar (1° en 2° referentiesituatie).

Nr	Dijkring(deel)	Max LIR (ref1)	Inwoners in buurt met LIR > 10^{-5}	Max LIR (ref2)	Inwoners in buurt met LIR > 10^{-5}
16	Alblasserwaard	$6.3 \cdot 10^{-5}$	38.230	$1.3 \cdot 10^{-4}$	44.750
65	Arcen	$4.1 \cdot 10^{-5}$	3.650	$8.2 \cdot 10^{-5}$	3.650
18	Pernis	$3.6 \cdot 10^{-5}$	4.700	$7.2 \cdot 10^{-5}$	4.700
30	Zuid-Beveland	$3.2 \cdot 10^{-5}$	500	$3.2 \cdot 10^{-5}$	500
24	Land van Altena	$2.4 \cdot 10^{-5}$	1.520	$4.9 \cdot 10^{-5}$	1.810
38_1	Bommelerwaard	$2.3 \cdot 10^{-5}$	10	$2.3 \cdot 10^{-5}$	10
52	Oost-Veluwe	$2.2 \cdot 10^{-5}$	300	$1.1 \cdot 10^{-4}$	1.170
48_1	Rijn en IJssel - boven	$2.2 \cdot 10^{-5}$	6.910	$5.6 \cdot 10^{-5}$	10.210
17	IJsselmonde	$1.2 \cdot 10^{-5}$	40	$2.4 \cdot 10^{-5}$	6.430
43_1	Betuwe	$3.1 \cdot 10^{-6}$	0	$1.5 \cdot 10^{-5}$	36.830
14_3	Zuid-Holland - Nw Waterweg	$1.1 \cdot 10^{-5}$	0	$1.1 \cdot 10^{-5}$	7.530
	Overig				6.080
	Totaal		60.480		123.670

3.4 Conclusies LIR

De berekeningen geven aan dat in de eerste referentiesituatie in een tiental dijkkringdelen LIR waarden voorkomen die hoger zijn dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In 20 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR hoger dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 39 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of hoger voor. Van de 5 dijkkringdelen met de hoogste LIR waarden zijn er 2 van het type 'bakje' (18 en 65). De overige dijkkringen met hoge LIR waarden liggen verspreid over het rivierengebied en Zeeland. In een aantal gevallen gaat het om een enkele buurt met een verhoogd risico vanwege lokale omstandigheden.

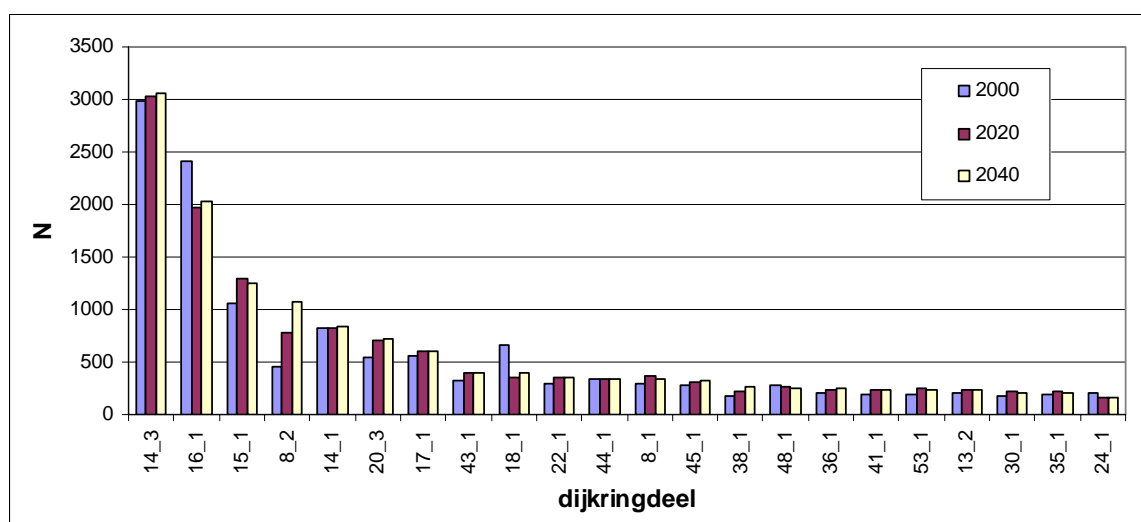
In de tweede referentiesituatie liggen de LIR waarden vaak een factor 2 hoger, door de grotere overstromingskans van een aantal dijkkringen. In de tweede referentiesituatie zijn er 22 dijkkringdelen met LIR waarden groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar, waarvan 9 van het type 'bakje'. In 35 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR groter dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 52 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of hoger voor.

De betrouwbaarheid van de resultaten van de LIR berekening is onderzocht door middel van een gevoeligheidsanalyse, waarin een aantal aannames en parameters in de berekening is gevarieerd. Een schatting van de totale bandbreedte van de berekende LIR waarden bedraagt een factor 2.3 tot 2.5 voor de meeste gebieden. Voor het benedenrivierengebied en de Maaskaden geldt een grotere onzekerheid van een factor 4 tot 6 vanwege de onzekerheid in de evacuatiefractie in die gebieden.

4 Resultaten groepsrisico

4.1 Aantal slachtoffers per dijkkringdeel

Voor de berekening van het groepsrisico is het verwachte aantal slachtoffers per dijkkringdeel, gegeven een overstroming, nodig. Deze zijn berekend voor het jaar 2000 en voor 2020 en 2040 op basis van de WLO scenario's van het PBL (zie paragraaf 2.3). De dijkkringdelen met de grootste aantallen slachtoffers zijn weergegeven in Figuur 4.1. De volledige lijst is te vinden in Bijlage A. Het grootste aantal slachtoffers bij een overstroming wordt gevonden in dijkkringdeel 14_3 (Zuid-Holland Nieuwe Waterweg Oost van de Maeslantkering). Ook dijkkring 16 (Alblasserwaard en Vijfheerenlanden) en dijkkring 15 (Lopiker- en Krimpenerwaard) hebben een verwachtingswaarde van meer dan 1000 slachtoffers.



Figuur 4.1 Verwachte slachtofferaantallen (N) in geval van een overstroming in 2000, 2020 en 2040 in de dijkkringdelen met een aantal slachtoffers van meer dan 150, inclusief evacuatie.

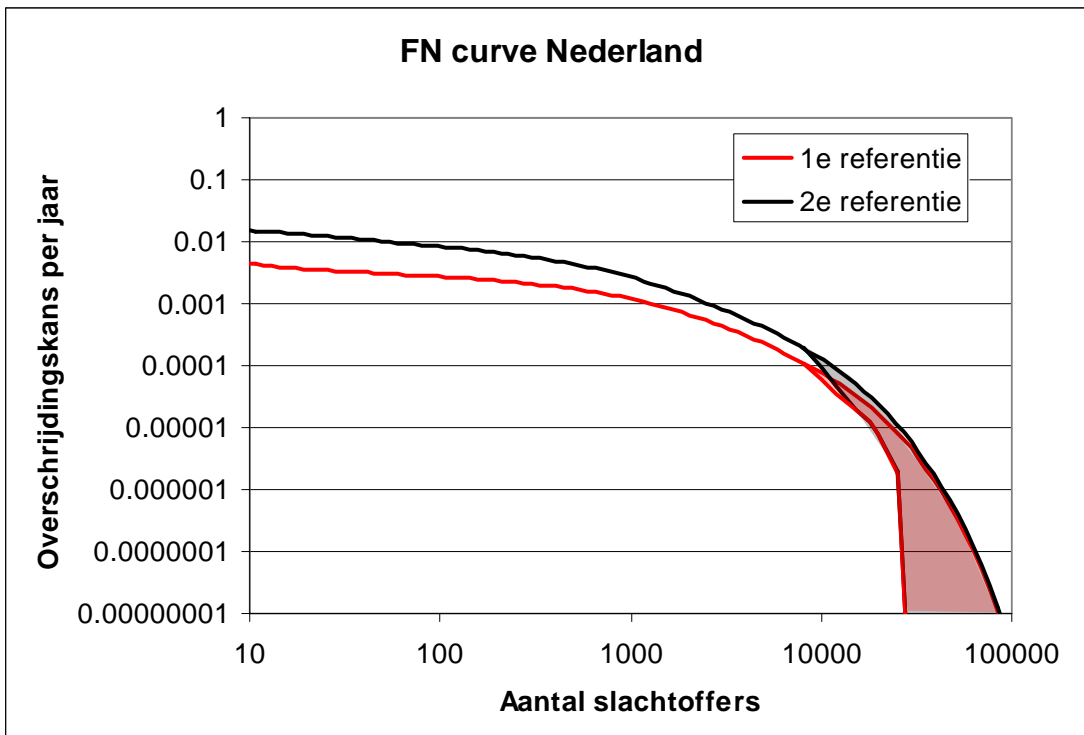
Uit Figuur 4.1 blijkt dat het aantal slachtoffers, gegeven een overstroming, in veel dijkkringen en dijkkringdelen de komende decennia toeneemt. Een zeer sterke toename is te zien in dijkkring 8 (Flevoland), voornamelijk als gevolg van de verwachte groei van Almere. In andere dijkkringen is de toename van het aantal slachtoffers niet zozeer een gevolg van bevolkingsgroei als wel van nieuwbouw op overstromingsgevoelige locaties.

Het aantal slachtoffers neemt niet overal toe. In dijkkring 18 (Pernis) daalt het aantal slachtoffers tussen 2000 en 2020 met 45%. Dit wordt veroorzaakt door een verwachte daling van het aantal inwoners per woning in het TM scenario.

4.2 Resultaten groepsrisico

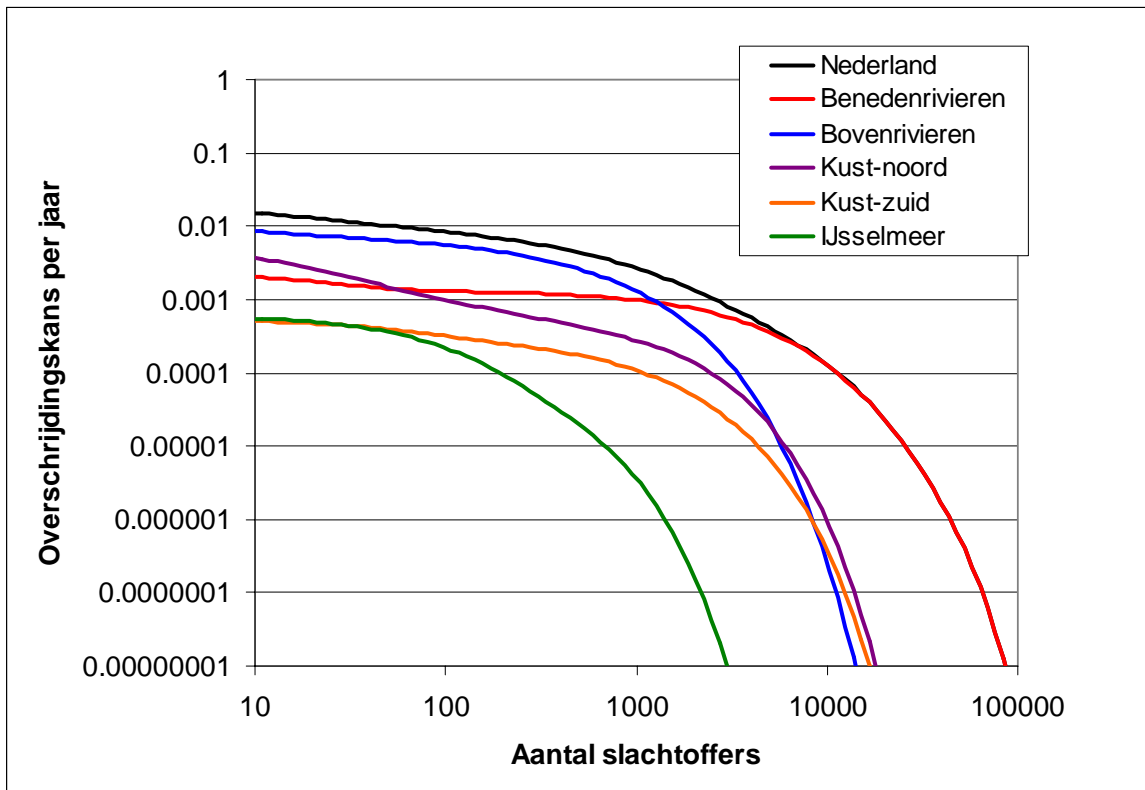
4.2.1 FN curve voor Nederland

De berekende FN curve voor Nederland als geheel is weergegeven in Figuur 4.2. De onzekerheidsband vanaf 10.000 slachtoffers is een gevolg van het al dan niet rekenen met een variabele mortaliteit c.q. exponentiële verdeling (zie Bijlage H). In het vervolg van dit hoofdstuk zal gerekend worden met de exponentiële verdeling, dat wil zeggen de bovengrens van deze onzekerheidsband. Uit Figuur 4.2 blijkt dat de FN curve voor de tweede referentiesituatie hoger ligt dan in de eerste referentiesituatie. In de tweede referentiesituatie zijn de overstromingskansen van een aantal dijkringen hoger dan in de eerste referentiesituatie.

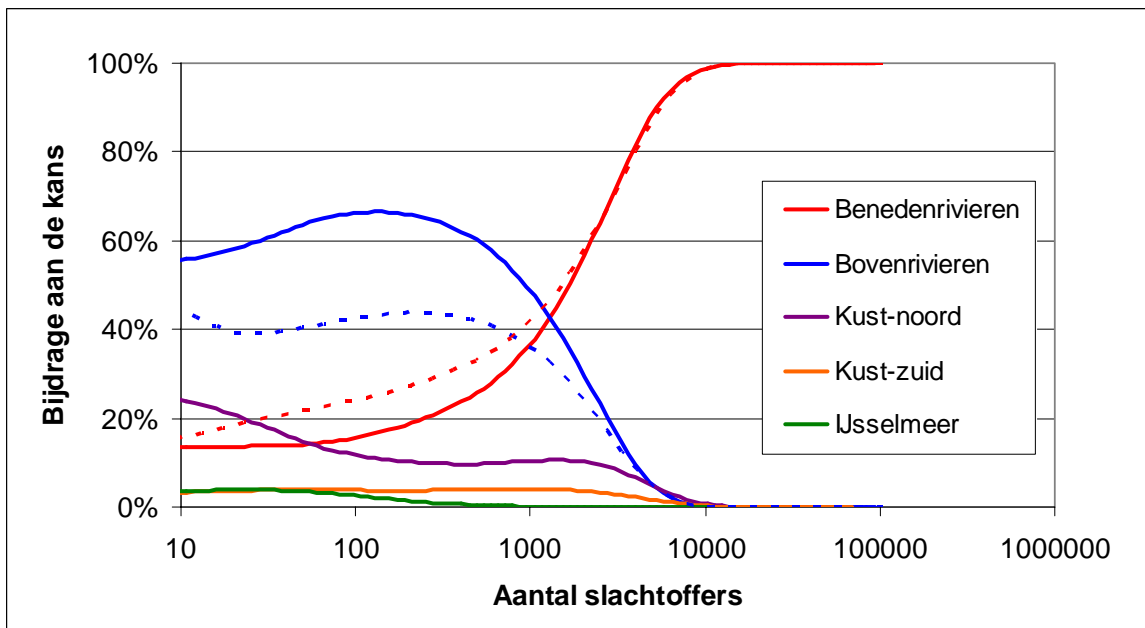


Figuur 4.2 FN curve voor Nederland, 1^o en 2^o referentiesituatie. Inclusief effect van preventieve evacuatie. Het peiljaar is 2040.

Figuur 4.3 geeft de absolute bijdragen van de verschillende deelsystemen aan de FN curve voor Nederland (2^o referentiesituatie) weer. Door de aanname van onafhankelijkheid tussen de deelsystemen is de curve voor Nederland gelijk aan de som van de FN curven per deelsysteem. Figuur 4.4 geeft de relatieve bijdragen van de deelsystemen. Tot 1000 slachtoffers is de bijdrage van het deelsysteem bovenrivieren het grootst. De kans op een overstroming met meer dan 1000 slachtoffers is het grootst in het deelsysteem benedenrivieren. Vanaf 10.000 slachtoffers wordt de kans volledig bepaald door dit deelsysteem.



Figuur 4.3 FN Curve voor Nederland en voor de deelsysteem, uitgaande van de tweede referentiesituatie. Inclusief evacuatie. Peiljaar is 2040.



Figuur 4.4 Relatieve bijdragen van de deelsystemen aan de FN curve rekening houdend met evacuatie. Stippellijnen zijn voor de eerste referentiesituatie, doorgetrokken lijnen voor de tweede referentie.

De kans op meer dan 10, 100, 1000 of 10.000 slachtoffers en de bijdragen van de deelsystemen aan deze kansen zijn voor beide referentiesituaties weergegeven in Tabel 4.1 en in Tabel 4.2. De PLL is de Potential Loss of Life, het verwachte aantal slachtoffers per

jaar. Door de onafhankelijkheid tussen de deelsystemen zijn de kansen en de PLL voor Nederland gelijk aan de som van de waarden per deelsysteem.

Tabel 4.1: Indicatoren voor het groepsrisico bij de **eerste referentiesituatie** voor het jaar 2040. Kansen per jaar.

Deelsysteem	P(N>10)	P(N>100)	P(N>1000)	P(N>10.000)	PLL
Totaal	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	4.9
Benedenrivieren	$0.7 \cdot 10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	2.9
Bovenrivieren	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	1.2
Kust Noord	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-7}$	0.5
Kust Zuid	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	0.31
IJsselmeer	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0	0.05

Tabel 4.2: Indicatoren voor het groepsrisico bij de **tweede referentiesituatie** voor het jaar 2040. Kansen per jaar.

Deelsysteem	P(N>10)	P(N>100)	P(N>1000)	P(N>10.000)	PLL
Totaal	$15.3 \cdot 10^{-3}$	$8.4 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	10.7
Benedenrivieren	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	5.2
Bovenrivieren	$8.5 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$	4.1
Kust Noord	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-7}$	1.0
Kust Zuid	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	0.33
IJsselmeer	$0.6 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	0	0.07

De kans op 10.000 slachtoffers of meer ligt in Nederland rond de 1×10^{-4} per jaar. Daarbij moeten we ons een gelijktijdige overstroming van een groot aantal dijkringen in het benedenriviereengebied voorstellen, bijvoorbeeld dijkringdeel 14-3, dijkring 15, 16, 17 en 20. Vanwege de hoge correlatie tussen de dijkringen binnen het deelsysteem is de kans op gezamenlijk falen aanzienlijk. Het verwachte aantal slachtoffers bij gelijktijdige overstroming van deze vijf dijkringen is bijna 8000 (zie bijlage A, peiljaar 2040). In geval van ongunstige breslocaties en een mislukte evacuatie vallen er meer dan 10.000 slachtoffers.

De FN curve in Figuur 4.3 loopt door tot nog grotere aantallen slachtoffers. De kans op een overstroming in het benedenriviereengebied met meer dan 100.000 slachtoffers is ongeveer 1×10^{-8} per jaar. Bij deze enorme aantallen slachtoffers moeten we ons zeer extreme gebeurtenissen voorstellen, waarbij vele dijkringen overstromen, evacuatie onmogelijk blijkt en er door bijzonder ongunstige omstandigheden veel meer slachtoffers vallen dan de gemiddelde schattingen volgens de mortaliteitsfunctie van HIS-SSM. De kans op een dergelijke ongelukkige samenloop van omstandigheden is zeer klein, maar niet nul. Het realiteitsgehalte van dergelijke scenario's is lastig te bepalen. In ieder geval gaat het om onvoorstelbaar kleine kansen.

De relatieve bijdragen aan de FN curve voor Nederland zijn weergegeven in Figuur 4.4. Deze grafiek laat zien dat het bovenriviereengebied dominant is voor gebeurtenissen met minder dan ongeveer 1000 slachtoffers. Voor gebeurtenissen met meer dan 1000 slachtoffers is dit het benedenriviereengebied. De bijdrage van het deelsysteem bovenrivieren is groter in de tweede referentiesituatie, omdat de overstromingskansen in veel dijkringen langs de grote rivieren hoger liggen.

4.2.2 FN curven per dijkkring en dijkkringdeel

Uit het voorgaande blijkt dat het deelsysteem benedenrivieren het meeste bijdraagt aan het groepsrisico in Nederland. Volgens het schema in Figuur 2.8 wordt vervolgens binnen dit deelsysteem onderzocht welke dijkringen of dijkkringdelen het meeste bijdragen aan het groepsrisico. De zogenaamde C-waarde geeft hiervoor een indicatie. De C-waarde geeft de hoogte aan van een kwadratische raaklijn aan de FN curve.

Met de aanname van een exponentiële verdeling kan de C-waarde per dijkkring eenvoudig berekend worden volgens⁵:

$$C = \frac{4\langle N \rangle^2}{T_{\text{norm}} \exp(2)}$$

Tabel 4.3 geeft een overzicht van de tien dijkkringdelen met de hoogste C-waarden per dijkkringdeel in Nederland. De C-waarde van dijkkring 16 is het grootst, op afstand gevolgd door dijkkring 14_3 en 15. De overige dijkringen hebben een aanzienlijk lagere C-waarde. Figuur 4.5 geeft een beeld van de bijdragen van elk van de 16 dijkkringdelen in het benedenrivierengebied aan de FN curve van dit deelsysteem (peiljaar 2040).

Deze bijdragen zijn berekend door 16 berekeningen waarin telkens de bijdrage van één van de dijkkringdelen is uitgeschakeld. Het resultaat laat zien dat dijkkring 34 en 34a de grootste bijdrage leveren tot 50 slachtoffers. Deze dijkringen hebben (in de tweede referentiesituatie) de grootste overstromingskans. Dijkkring 15 (Lopiker- en Krimpenerwaard) en 16 (Alblasserwaard en Vijfheerenlanden) leveren de grootste bijdrage leveren van 50 tot ongeveer 10,000 slachtoffers. Vanaf ca. 20,000 slachtoffers geeft dijkkringdeel 14_3 (Zuid-Holland, Nieuwe Waterweg Oost) de grootste bijdrage vanwege het grote aantal slachtoffers dat hier kan vallen.

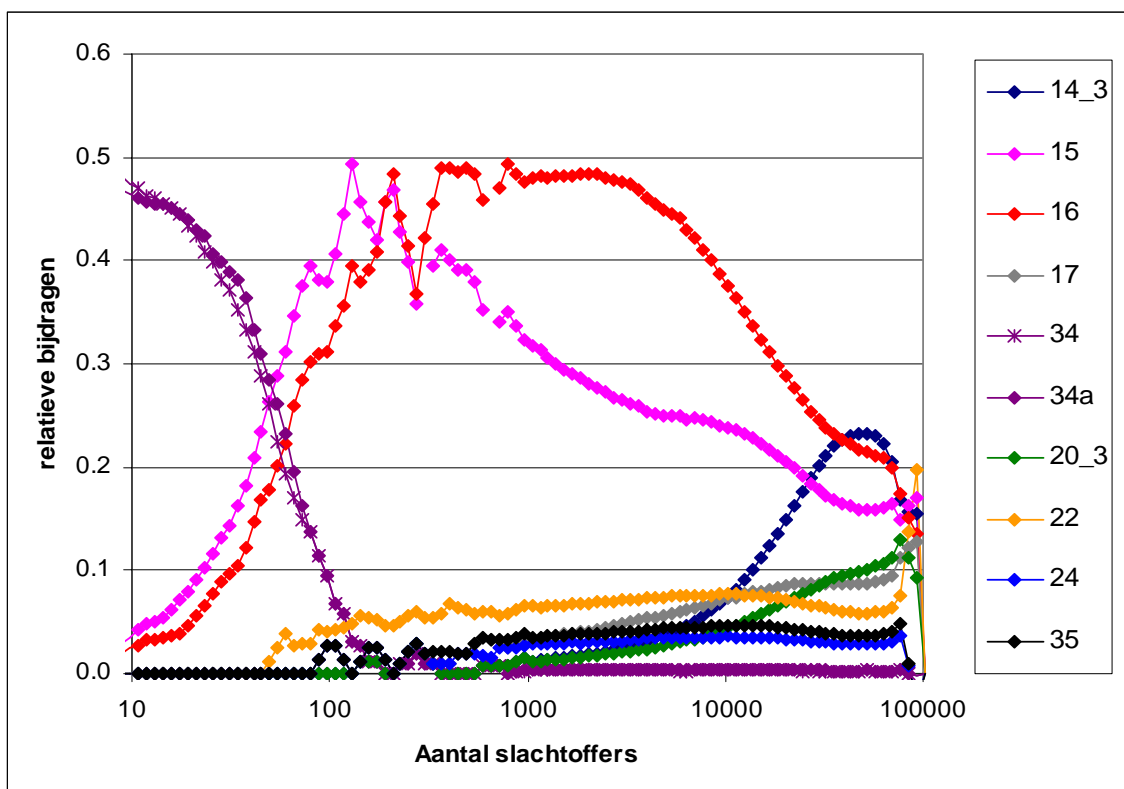
Tabel 4.3: Kenmerken van de 20 dijkkringdelen met het hoogste groepsrisico.

Nr	Dijkkring(deel)	Slachtoffers	T (ref1)	T (ref2)	C (ref1)	C (ref2)
16	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	2026	2000	1000	1111	2223
14_3	Zuid-Holland NweWaterweg_Oost	3059	10000	10000	507	507
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	1253	2000	1000	425	850
8_2	Flevoland_ZuidWest	1069	4000	2000	155	309
43_1	Betuwe & TCW	404	1250	250	71	353
20_3	Voorne-Putten_Oost	715	4000	4000	69	69
44_1	Kromme Rijn vanuit Rijn	344	1250	500	51	128
17	IJsselmonde	599	4000	2000	49	97
45_1	Gelderse Vallei_Rijn	325	1250	1250	46	46
14_1	Zuid-Holland_Kust	837	10000	10000	38	38
22	Eiland van Dordrecht	357	2000	1000	34	69
38_1	Bommelerwaard v.u. Waal	263	1250	1250	30	30

5. De C-waarde is het maximum van de functie $P(N)N^2$. Voor $P(N)$ wordt een exponentiële verdeling aangenomen. Afgeleide op nul stellen leidt vervolgens tot bovenstaande uitdrukking voor C.

48_1	Rijn en IJssel_Boven	256	1250	500	28	71
36	Land van Heusden / de Maaskant	244	1250	250	26	129
41_1	Land van Maas en Waal vanuit Waal	242	1250	500	25	63
53	Salland	236	1250	500	24	60
8_1	Flevoland_Noordoost	334	4000	4000	15	15
35	Donge	209	2000	1000	12	24
18	Pernis	394	10000	5000	8	17
48_2	Rijn en IJssel_Beneden	133	1250	500	8	19

De conclusie is dat voor het reduceren van het groepsrisico het beste eerst gekeken kan worden naar maatregelen in dijkkring 15 en 16 en 14_3. De eerste twee zijn dijkringen waarin veel slachtoffers kunnen vallen en die een relatief grote overstromingskans hebben. In dijkkringdeel 14_3 is de overstromingskans kleiner, maar het verwachte aantal slachtoffers in geval van een overstroming is groot.



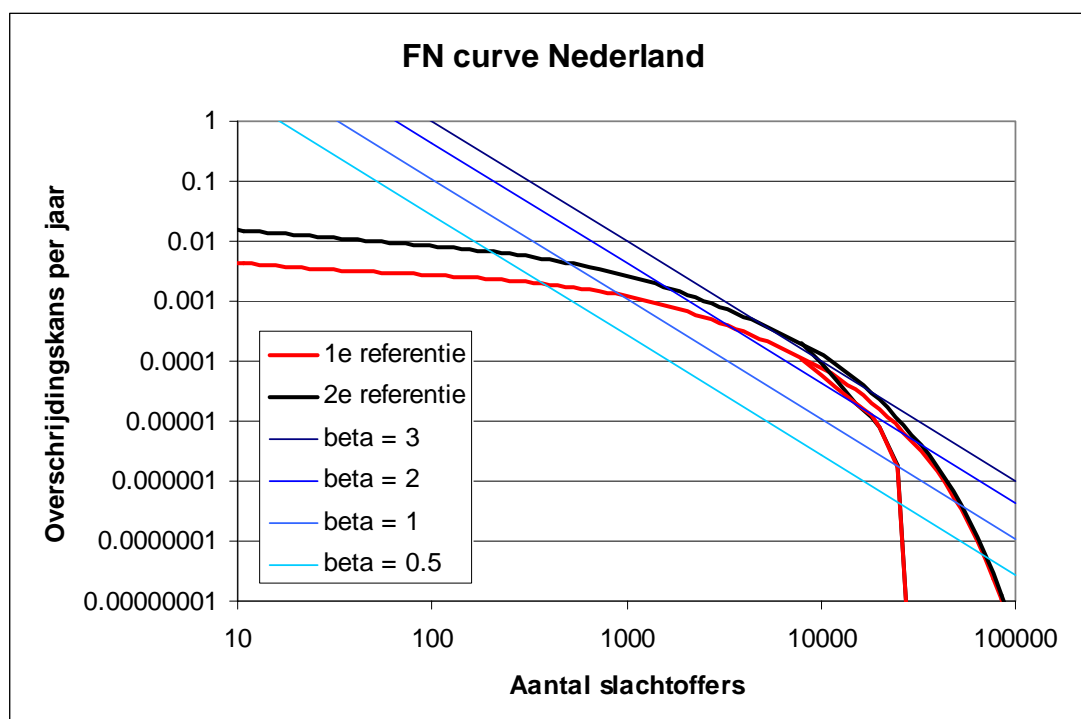
Figuur 4.5 Bijdragen van dijkkringdelen aan de FN curve voor het benedenrivierengebied (peiljaar 2040). Berekend op basis van de tweede referentiesituatie.

4.2.3 Vertaling van richtwaarden voor de FN curve naar dijkkringdelen

Het vertalen van een bepaalde richtwaarde voor het groepsrisico naar een toelaatbare overstromingskans per dijkkring(deel) is onder andere wenselijk voor vergelijking met de MKBA resultaten. De hoogte van de richtwaarde voor het groepsrisico is een politieke keuze. Afwegingen die hierbij een rol kunnen spelen zijn de vergelijking met normen op andere beleidsterreinen, de maatschappelijke perceptie van het risico op overstromingen en

financiële of economische afwegingen. Riedstra (2009) geeft een overzicht van een aantal mogelijkheden voor het bepalen van een oriëntatieniveau. Een van deze mogelijkheden is gebaseerd op ideeën uit de jaren '80, voorgesteld door de TAW (Vrijling *et al*, 1998). Deze wordt hieronder gebruikt als leidraad voor het bepalen van toelaatbare overstromingskansen.

Het TAW oriëntatiekader maakt onderscheid tussen risico's die vrijwillig worden aangegaan en onvrijwillige risico's en houdt rekening met eventuele baten ervan. Voor vrijwillige risico's die worden aangegaan kan een hoger risico worden geaccepteerd. In de TAW methode komt dit tot uitdrukking in een factor β . Een onvrijwillig risico zonder enige baten voor omwonenden zoals externe veiligheidsrisico's, heeft een factor $\beta = 0.01$. Een onvrijwillig risico met enkele voordelen voor omwonenden heeft een factor $\beta = 0.1$. Voor deelname aan het verkeer en activiteiten van nationaal economisch belang wordt een hoger aantal slachtoffers geaccepteerd. De factor β ligt dan rond de 1.0. Voor overstromingen is door de TAW een factor β voorgesteld tussen 0,1 en 1. In Figuur 4.6 zijn de oriëntatielijnen voor $\beta=0.5$, 1, 2 en 3 weergegeven. De beta voor de huidige FN curve op basis van de 1^e referentie is gelijk aan 2.7. Voor de 2^e referentiesituatie is de beta gelijk aan 3.4.



Figuur 4.6 Vergelijking van de FN curve voor Nederland met mogelijke oriëntatielijnen (beta's).

Tabel 4.4 geeft schattingen van de reductiefactoren per deelsysteem om diverse beta's voor de FN curve voor Nederland te bereiken. We kijken daarbij alleen naar kansreductie. Om te voldoen aan de eerder genoemde TAW oriëntatiewaarde met $\beta=1$ is ten opzichte van de 1^e referentiesituatie een reductiefactor van 7.5 nodig op de landelijke FN curve. Volgens Tabel 4.4 moeten daarvoor de deelsystemen 'benedenrivieren' en 'bovenrivieren' worden aangepakt. De reductiefactor voor het deelsysteem benedenrivieren (10) is hoger dan de benodigde reductiefactor voor Nederland (7.5). Dit is een gevolg van de bijdrage van andere deelsystemen (in dit geval bovenrivieren, waarvoor een reductiefactor 3 geldt). De benodigde reductiefactoren ten opzichte van de 2^e referentiesituatie zijn weergegeven in Tabel 4.6.

Tabel 4.4: Benodigde reductie van overstromingskansen per deelsysteem om diverse beta's voor Nederland te bereiken. Ten opzichte van de 1^o referentiesituatie.

TAW beta	0.5	1	2	3
Benedenrivieren	50	10	1.8	1
Bovenrivieren	15	3	1	1
IJsselmeer	1	1	1	1
kust_noord	4	1	1	1
kust_zuid	3	1	1	1

Tabel 4.5: Benodigde reductie van overstromingskansen per deelsysteem om diverse beta's voor Nederland te bereiken. Ten opzichte van de 2^o referentiesituatie.

TAW beta	0.5	1	2	3
benedenrivieren	55	17	3	1.3
bovenrivieren	20	5	1	1
IJsselmeer	1	1	1	1
kust_noord	10	2	1	1
kust_zuid	5	1	1	1

De benodigde reductiefactoren voor de FN curve per deelsysteem kunnen vervolgens vertaald worden naar kansreductie per dijkkringdeel. Voor het beneden- en bovenrivierengebied zijn de benodigde reductiefactoren voor de overstromingskans per dijkkringdeel weergegeven in Tabel 4.6. Ook hier is het effect te zien dat de benodigde kansreductie van sommige dijkkringdelen (veel) groter is dan de reductiefactor voor het deelsysteem. Dit is wederom een gevolg van de ongelijke verdeling van de bijdragen voor verschillende aantallen slachtoffers en verschuivende raakpunten.

Tabel 4.6: Benodigde reductiefactoren voor overstromingskans per dijkkringdeel in het beneden- en bovenrivierengebied. Indicatieve waarden op basis van de 2^o referentiesituatie.

dijkkringdeel	beta=0.5	beta=1	beta=2	beta=3	dijkkringdeel	beta=0.5	beta=1	beta=2	beta=3
14_3	250	20	2	1	36	7	4	1	1
15	600	50	6	1.4	38	4	2	1	1
16	1000	70	10	2.1	38_2	2	2	1	1
17	200	20	2	1	40_1	2	1	1	1
18	150	5	1	1	41	5	3	1	1
19	50	1	1	1	41_2	3	2	1	1
20_2	15	2	1	1	42	3	2	1	1
20_3	150	10	1.5	1	43	7	4	1	1
21	15	1	1	1	44_1	6	4	1	1
22	200	15	2	1	45_1	7	4	1	1
24	80	10	1	1	47	2	1	1	1
25_2	10	1	1	1	48	5	3	1	1
34	15	1	1	1	48_2	3	2	1	1
34a	15	1	1	1	50	1	1	1	1
35	150	10	1.2	1	53	4	2	1	1

4.3 Gevoeligheidsanalyse

Bij de berekening van de FN curve speelt een aantal onzekerheden:

- Onzekerheden in de overstromingsmodellering. Deze beïnvloeden het overstromingspatroon en daarmee het aantal slachtoffers.

- Onzekerheid in de mortaliteit als functie van de maximale waterstand en de stijgsnelheid.
- De evacuatiefracties, met name voor het overgangsgebied tussen bovenrivieren (gemiddelde evacuatiefractie 75%) en benedenrivieren (evacuatiefractie 15%).
- De gewichten van het bovenmaatgevende scenario en de scenario's bij toetspeil in de berekening van de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers per dijkkring(deel).
- De indeling in deelsystemen en de aanname van onafhankelijkheid tussen deze deelsystemen.
- De gehanteerde correlatiecoëfficiënten voor dijkringen binnen een deelsysteem.
- Het effect van (positieve) systeemwerking.
- De keuze voor een exponentiële verdeling voor de spreiding van het aantal slachtoffers.

De eerste van deze onzekerheden worden in deze gevoeligheidsanalyse buiten beschouwing gelaten. De overstromingsmodellering wordt gezien als een aanname of uitgangspunt van de risicoanalyse. Deze overige onzekerheden worden hieronder nader toegelicht en gekwantificeerd.

4.3.1 Mortaliteit

De mortaliteit als functie van de maximale waterdiepte en stijgsnelheid zoals die in HIS-SSM wordt gebruikt is gebaseerd op slachtofferaantallen tijdens de watersnoodramp van 1953. Impliciet is daar kennis in opgenomen over factoren als stabiliteit van bebouwing, gedrag van mensen, communicatie, etc. Deze factoren zijn echter aan verandering onderhevig. De mortaliteit heden ten dage kan daardoor afwijken van de gevonden waarden in 1953.

Voor het LIR is een factor 2 onzekerheid (variabiliteit) in de mortaliteit geschat (zie paragraaf 3.2). In Bijlage H wordt aangegeven wat het effect is van deze onzekerheid op de FN curve en hoe deze onzekerheid is verdisconteerd in de gebruikte exponentiële kansverdeling van het aantal slachtoffers in een overstromingsscenario.

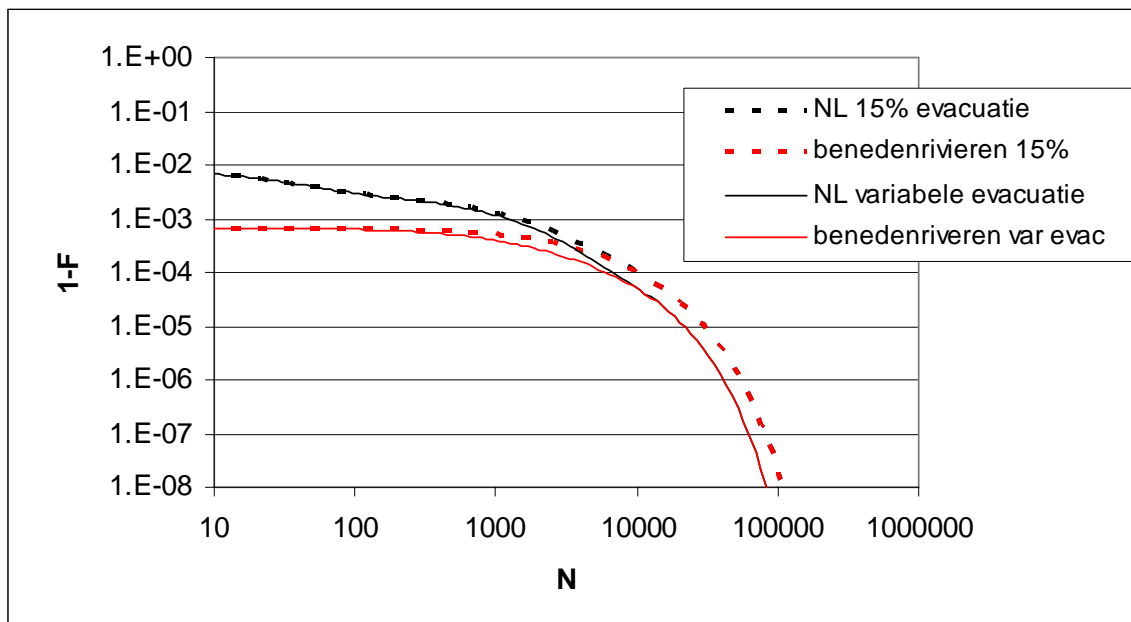
4.3.2 Evacuatiefracties

De gehanteerde evacuatiefracties zijn gebaseerd op Maaskant (2009b). In de referentieberekening worden voor dijkkring 15 en 16 en dijkkringdeel 14_3 relatief lage evacuatiefracties van 15% gehanteerd, op basis van een overstromingsdreiging door een noordwesterstorm met bijbehorende korte waarschuwingstijd. Echter, voor een aantal breslocaties in dijkkring 15, 16 en 14_3 wordt het hoogwater grotendeels door hoge rivierafvoeren gedomineerd. Deze dijkringen zijn tegelijkertijd zeer bepalend voor het groepsrisico.

In een alternatieve berekening is daarom een geleidelijke overgang gebruikt voor de evacuatiefractie in het overgangsgebied. Voor elk overstromingsscenario van de dijkringen 14-3, 15, 16, 17, 21, 22, 24, 34 en 35 is een aparte evacuatiefractie berekend aan de hand van de RD-X coördinaat van de breslocatie en een S-curve, beginnend op 15% ter hoogte van Rotterdam en eindigend op 75% ter hoogte van Gorinchem.

Figuur 4.7 geeft het resultaat weer, in de vorm van FN curven voor het benedenrivierengebied en Nederland voor de 1^e referentiesituatie (peiljaar 2040, 15% evacuatie) en de alternatieve berekening met hogere evacuatiefracties. De FN curven voor

de alternatieve berekening liggen bij een slachtofferaantal van 10.000 ongeveer een factor 2 lager. Dit verschil geldt zowel voor het deelsysteem benedenrivieren als voor Nederland als geheel.



Figuur 4.7 Effect van hogere evacuatiefracties in het benedenrivierengebied (obv 1^o referentiesituatie).

Ook in andere deelsystemen is de evacuatiefractie onzeker. Echter, vanwege de kleinere bijdrage van deze deelsystemen op de landelijke FN curve zal het effect van een alternatieve evacuatiefractie op de FN curve van Nederland beperkt zijn. Daarom is hiervoor geen gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

4.3.3 Verwachtingswaarde aantal slachtoffers

De gewichten van de scenario's bij toetspeil en het bovenmaatgevende scenario in de berekening van de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers per dijkkring(deel) zijn gebaseerd op een verloop van het aantal slachtoffers bij toenemende waterstand (zie Bijlage C). Het gewicht van het bovenmaatgevende scenario varieert tussen 20% en 40%, afhankelijk van de geschatte waarschijnlijkheid van dit scenario. Een gewicht van 20% is in de referentieberekening gebruikt voor het benedenrivierengebied, de IJssel-Vecht delta en de twee dijkkringen met A-keringen (geen duinen) tussen de Ooster- en Westerschelde (dijkkring 30 en 31). In de overige dijkkringen geldt een gewicht van 40%.

In de gevoeligheidsanalyse is onderzocht hoe het aantal slachtoffers per dijkkring(deel) varieert als voor *alle* dijkkringen een gewicht van 20% voor het bovenmaatgevende scenario wordt gebruikt. Het gemiddelde aantal slachtoffers per dijkkring is dan 203. Het andere uiterste, een gewicht van 40% voor het bovenmaatgevende scenario in alle dijkkringen levert een gemiddeld aantal slachtoffers per dijkkring van 294. Ter vergelijking: in de basisvariant is het gemiddelde aantal slachtoffers per dijkkring gelijk aan 222. Deze parameter heeft dus een aanzienlijke invloed. Dit vertaalt zich in een hogere FN curve (hogere beta) voor het geval waarin alle bovenmaatgevende scenario's met 40% worden meegewogen (zie Tabel 4.7). Dit

effect speelt vooral in het benedenrivierengebied, waar in de referentiesituatie voor alle dijkringen het bovenmaatgevende scenario met 20% meegewogen wordt.

Tabel 4.7 *Beta's voor alternatieve wegen van het bovenmaatgevende scenario.
Berekening op basis van de eerste referentiesituatie.*

	Referentie	Gewicht=40%	Gewicht=20%
benedenrivieren	3.42	4.90	4.68
bovenrivieren	1.21	1.21	0.99
IJsselmeer	0.07	0.25	1.13
kust noord	0.76	0.87	1.01
kust zuid	0.44	0.62	0.62
Nederland	3.44	4.93	4.70

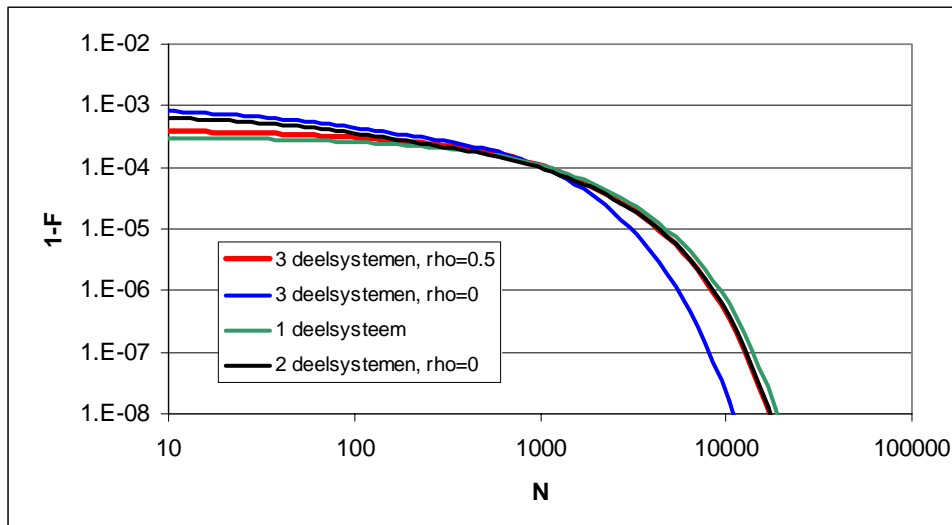
4.3.4 Indeling in deelsystemen

Onderzocht is in hoeverre de keuze voor twee kust-deelsystemen (kust-zuid en kust-noord) van invloed is op de resultaten. Daartoe zijn verschillende varianten van kust-deelsystemen en correlaties tussen de deelsystemen onderzocht. Daarbij zijn vanwege de rekentijd de Waddeneilanden en de dijkringen rond het IJsselmeer buiten beschouwing gelaten (vanwege de beperkte bijdrage aan het landelijke groepsrisico). De correlatie tussen twee dijkringen binnen een deelsysteem is telkens op 0.9 gesteld. Vervolgens zijn vier varianten onderzocht:

- Drie deelsystemen (dijkring 6; dijkring 13 en 14; dijkringen 25 tot 32), met een correlatiecoëfficiënt (ρ) tussen de deelsystemen van 0.5;
- Drie deelsystemen met een onderlinge correlatie van 0;
- Eén groot deelsysteem (met correlatiecoëfficiënten tussen de dijkringen van 0.9);
- Twee deelsystemen (dijkringen 6 en 13; dijkringen 14 t/m 32) met een onderlinge correlatie van nul.

De eerste variant wordt gezien als het meest realistisch, maar is vanwege de rekentijd niet haalbaar als ook de dijkringen rond het IJsselmeer moeten worden meegenomen. De correlatie tussen de waterstanden bij Groningen/Friesland is weliswaar gecorreleerd met die van de zuidelijke kustgedeeltes, maar minder sterk dan de correlatie van 0.9 voor dijkringen binnen het deelsysteem. De laatste variant is in feite de keuze voor de deelsystemen kust-noord en kust-zuid die in dit rapport wordt gehanteerd.

In Figuur 4.8 zijn de FN curves voor de vier varianten weergegeven. Hieruit blijkt dat de keuze van de correlatiecoëfficiënt voor de correlatie tussen de deelsystemen wel enige invloed heeft op de FN curve (verschil tussen $\rho=0$ en $\rho=0.5$ voor drie deelsystemen). Het verschil tussen de FN curve voor de variant met twee deelsystemen komt vrij goed overeen met de FN curve van de eerste variant (die als het meest realistisch wordt gezien). Alleen voor kleine slachtofferaantallen wordt de kans overschat. De keuze voor twee deelsystemen en het verwaarlozen van de onderlinge correlatie daartussen is daarom legitiem.

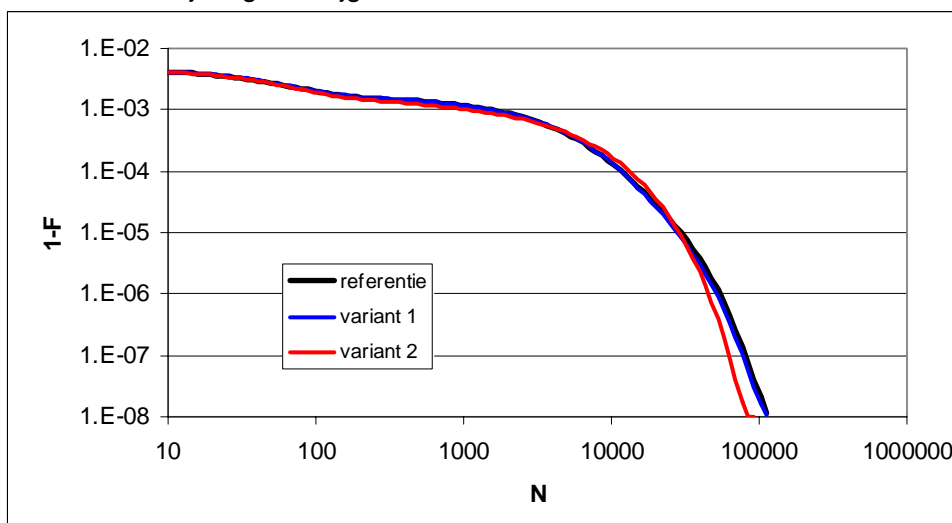


Figuur 4.8 Effect op de FN curve voor de kustgebieden van verschillende indelingen van de deelsystemen kust-noord en kust-zuid (zie tekst) en correlatie tussen de deelsystemen.

Onderzocht is in hoeverre de keuze voor de indeling van de deelsystemen bovenrivieren en benedenrivieren van invloed is op de resultaten. Daartoe zijn verschillende varianten bekeken:

- Referentie: waarin het deelsysteem benedenrivieren bestaat uit de dijkringen 14-3, 15-22, 24, 34 en 35; het deelsysteem bovenrivieren is enigszins samengevat om de rekentijd behapbaar te houden;
- Variant 1: waarbij dijkringen 24 en 35 zijn ingedeeld bij deelsysteem bovenrivieren;
- Variant 2: waarbij dijkringen 15 en 16 zijn ingedeeld bij deelsysteem bovenrivieren.

Figuur 4.9 geeft de gecumuleerde FN curven voor deze drie varianten weer. De tweede variant geeft vrijwel hetzelfde resultaat als de referentieversie. De laatste variant vertoont wel enige verschillen. Dijkkring 15 en 16 hebben een grote bijdrage aan de FN curve van een deelsysteem. Door een alternatieve indeling worden de slachtoffers in deze dijkringen meegeteld in andere dijkringoverstijgende scenario's.



Figuur 4.9 Som van de FN curven voor benedenrivieren en bovenrivieren voor verschillende indelingen.

4.3.5 Correlatie tussen dijkringen binnen een deelsysteem

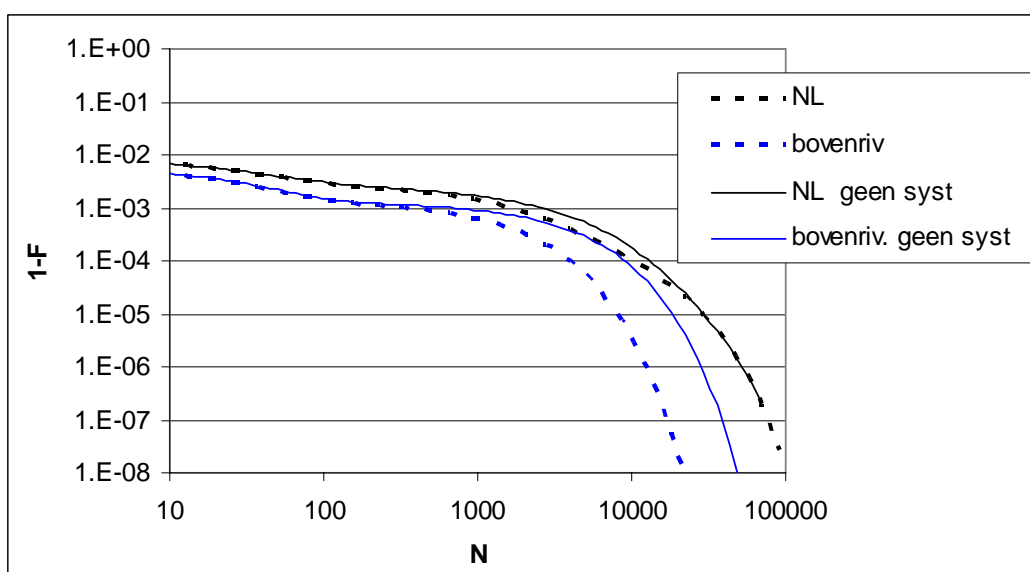
De correlatiecoëfficiënt geeft de mate van afhankelijkheid tussen het overstromen van twee dijkringen weer. Een correlatiecoëfficiënt van nul betekent dat het gelijktijdig overstromen van twee dijkringen berust op toeval. Een correlatiecoëfficiënt van 1 geeft aan dat de dijkkring met de kleinste overstromingskans altijd gezamenlijk overstroomt met de andere dijkkring. De dijkkring met de grootste overstromingskans kan nog wel individueel overstromen.

De invloed van de correlatiecoëfficiënt tussen dijkringen binnen een fictief deelsysteem is onderzocht. Bij grotere correlatie neemt de kans op scenario's waarbij veel dijkringen tegelijk overstromen toe ten opzichte van de ongecorreleerde situatie (correlatiecoëfficiënt=0). Tegelijk neemt de kans op kleine aantallen slachtoffers af. Als de correlatiecoëfficiënt groter wordt dan 0.7, benadert de FN curve het resultaat voor maximale correlatie (correlatiecoëfficiënt=1). Voor de huidige waarden van de correlatiecoëfficiënten (zie Tabel 2.6) is de FN curve dus relatief ongevoelig.

Een mogelijke uitzondering hierop is de correlatie van 0.5 tussen de Rijn- en Maasdijkringen en de Kust-noord en IJsselmeerdijkringen. De waarde voor de correlatie tussen de dijkringen langs de Rijn en Maas in het deelsysteem bovenrivieren is daarom gevarieerd tussen 0.2 en 0.9. Het effect op de FN curve voor de bovenrivieren is verwaarloosbaar, zodat we mogen concluderen dat de waarde van deze correlatiecoëfficiënt weinig invloed heeft.

4.3.6 Positieve systeemwerking

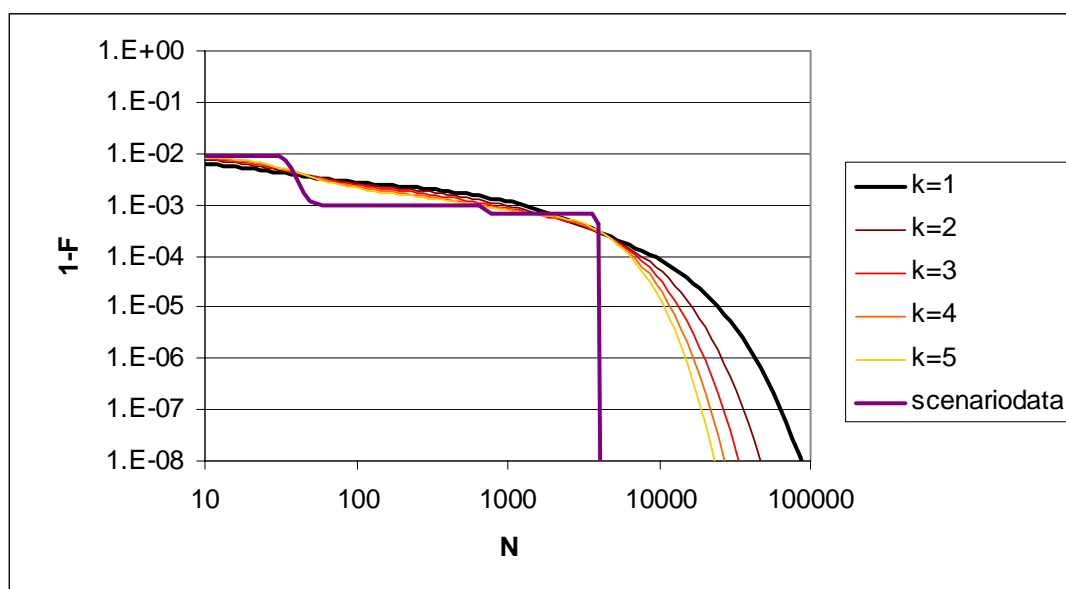
Positieve systeemwerking heeft een aanzienlijk effect op de FN curve voor het deelsysteem bovenrivieren. Het effect op de landelijke FN curve is weergegeven in Figuur 4.10.



Figuur 4.10 Effect van positieve systeemwerking op de FN curve voor bovenrivieren en Nederland, obv 1^e referentiesituatie.

4.3.7 Verdeling aantal slachtoffers

De spreiding van het aantal slachtoffers volgens de exponentiële verdeling is een aanname gebaseerd op resultaten voor een aantal dijkkringen die in het kader van VNK zijn onderzocht (Jonkman, 2008). In plaats van de exponentiële verdeling kan ook een andere verdeling gekozen worden met minder kansgewicht in de staart. In de gevoeligheidsanalyse is daartoe een Gammaverdeling gebruikt, waarin de parameter k gevarieerd is tussen 1 en 5. De exponentiële verdeling komt overeen met $k=1$.



Figuur 4.11 Effect van de verdeling van het aantal slachtoffers volgens een Gammaverdeling met verschillende parameters. Gamma=1 komt overeen met de exponentiële verdeling. Berekening op basis van de 1^e referentiesituatie.

Figuur 4.11 geeft de resultaten voor de FN curve voor Nederland weer. De verwachtingswaarde blijft in alle gevallen gelijk. Het effect op de 'staart' van de verdeling is duidelijk te zien.

Een nadere onderbouwing van het gebruik van een exponentiële verdeling wordt gegeven in Bijlage H.

4.4 Conclusies groepsrisico

De resultaten van dit hoofdstuk geven aan dat de kans op een overstroming in Nederland waarbij meer dan 100 slachtoffers vallen in de eerste referentiesituatie ongeveer 1/360 per jaar bedraagt. In de tweede referentiesituatie is dat 1/120 per jaar. Voor 1000 slachtoffers is deze kans respectievelijk 1/830 en 1/375 per jaar. Voor een overstroming met meer dan 10,000 slachtoffers bedraagt de kans ongeveer 1/14.000 en 1/8200 per jaar. Het groepsrisico voor grote aantallen slachtoffers wordt gedomineerd door het benedenrivierengebied. De resultaten geven aan dat dijkkringdeel 14_3 (Zuid-Holland; Nieuwe Waterweg Oost) en de dijkkringen 15 (Lopiker- en Krimpenerwaard) en 16 (Alblasserwaard en Vijfheerenlanden) de grootste bijdragen aan de FN curve leveren.

Om de betrouwbaarheid van de resultaten te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd ten aanzien van een aantal aannames en parameterwaarden. Hieruit blijkt dat de resultaten met name gevoelig zijn voor de aangenomen evacuatiefractie in het benedenrivierengebied en de mortaliteit. Het effect van een onzekere (variabele) mortaliteit is in zekere zin verwerkt in de exponentiële verdeling die per deelscenario wordt opgesteld (zie ook Bijlage H). Andere onzekerheden, bijvoorbeeld als gevolg van de indeling in deelsystemen zijn van minder grote invloed op het resultaat. De onzekerheden in de overstromingsmodellering is in de gevoeligheidsanalyse niet beschouwd. Deze worden gezien als een uitgangspunt voor de risicoberekening.

5 Conclusies, aanbevelingen en reflectie

Dit rapport geeft inzicht in het slachtofferrisico als gevolg van overstromingen bij de gekozen referentiesituatie. Het slachtofferrisico is in beeld gebracht met behulp van twee risico-indicatoren: het lokaal individueel risico (LIR) en het groepsrisico (GR). De belangrijkste conclusies en aanbevelingen worden in dit hoofdstuk samengevat. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een reflectie op de aanpak en resultaten van de gepresenteerde analyses.

5.1 Lokaal Individueel Risico (LIR)

Het LIR is de kans per jaar dat een persoon op een bepaalde locatie overlijdt als direct gevolg van een overstroming rekening houdend met de mogelijkheden van evacuatie. De berekeningen geven aan dat in de eerste referentiesituatie in een tiental dijkkringdelen LIR waarden voorkomen die hoger zijn dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In 20 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR hoger dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 39 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of hoger voor. Van de 5 dijkkringdelen met de hoogste LIR waarden zijn er 2 van het type 'bakje' (18 en 65). De overige dijkkringen met hoge LIR waarden liggen verspreid over het rivierengebied en Zeeland. In een aantal gevallen gaat het om een enkele buurt met een verhoogd risico vanwege lokale omstandigheden.

In de tweede referentiesituatie liggen de LIR waarden vaak een factor 2 hoger, door de grotere overstromingskans van een aantal dijkkringen. In de tweede referentiesituatie zijn er 22 dijkkringdelen met LIR waarden groter dan $1 \cdot 10^{-5}$ per jaar. In 35 dijkkringdelen komen locaties voor met een LIR groter dan $5 \cdot 10^{-6}$ per jaar en in 52 dijkkringdelen komen LIR waarden van $2 \cdot 10^{-6}$ per jaar of hoger voor.

Veel van de dijkkringdelen met hoge LIR-waarden zijn kleine bakjesdijkkringen die bij een overstroming snel onderlopen. Door de hoge stijgsnelheid en de plaatselijk grote waterdieptes is in deze kleine dijkkringen de mortaliteit hoog en daarmee ook de LIR-waarde. Hoge LIR-waarden worden ook gevonden voor kleine diepe compartimenten in grote dijkkringen, zoals bijvoorbeeld bij Alexanderpolder en Zuid-Beveland. Lokaal hoge LIR-waarden worden eveneens aangetroffen bij de stroomafwaartse begrenzing van hellende rivierdijkkringen, zoals bijvoorbeeld in dijkkring 43 (Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaarden) bij de Diefdijk. Het water kan daar niet weg, waardoor de waterdiepte snel stijgt.

De betrouwbaarheid van de resultaten van de LIR berekening is onderzocht door middel van een gevoeligheidsanalyse, waarin een aantal aannames en parameters in de berekening is gevarieerd. Een schatting van de totale bandbreedte van de berekende LIR waarden bedraagt een factor 2.3 tot 2.5 voor de meeste gebieden. Voor het benedenrivierengebied en de Maaskaden geldt een grotere onzekerheid van een factor 4 tot 6 vanwege de onzekerheid in de evacuatiefractie in die gebieden.

Voor een eventuele vervolgstudie wordt aanbevolen om de hoge LIR-waarden in de bakjesdijkkringen nader te verifiëren. De gebruikte evacuatiefracties voor die bakjesdijkkringen zijn dezelfde als de evacuatiefracties in andere grotere dijkkringen in dezelfde regio. Zo is de evacuatiefractie van Pernis gelijk aan die van alle dijkkringen in het benedenrivierengebied en die van Alem gelijk aan die van het bovenrivierengebied. De evacuatie van dergelijke kleine gebieden is mogelijk een stuk eenvoudiger dan van omliggende gebieden. Gezien de hoge waarden voor het LIR is het aan te raden de evacuatiemogelijkheden van deze kleine

dijkringen (waaronder de Maaskaden) nog eens nauwkeurig te onderzoeken en de evacuatiefractie mogelijk te heroverwegen.

5.2 Groepsrisico

Het groepsrisico beschrijft de kans op een overstroming waarbij meer dan 100, 1000 of meer slachtoffers vallen. Het groepsrisico wordt weergegeven met behulp van een FN curve, waarin de kans per jaar is uitgezet tegen het aantal slachtoffers. In de bepaling van het groepsrisico is rekening gehouden met preventieve evacuatie. Het gebruikte peiljaar voor groepsrisico's is 2040. Het landgebruik en de bevolkingsdichtheid in 2040 zijn gebaseerd op een trendscenario voor demografische ontwikkeling van het PBL.

De resultaten van dit hoofdstuk geven aan dat de kans op een overstroming in Nederland waarbij meer dan 100 slachtoffers vallen in de eerste referentiesituatie ongeveer 1/360 per jaar bedraagt. In de tweede referentiesituatie is dat 1/120 per jaar. Voor 1000 slachtoffers is deze kans respectievelijk 1/830 en 1/375 per jaar. Voor een overstroming met meer dan 10.000 slachtoffers bedraagt de kans ongeveer 1/14.000 en 1/8200 per jaar.

Het boven- en benedenrivierengebied leveren de grootste bijdragen aan de groepsrisico's. De bijdrage van het benedenrivierengebied is dominant voor de kans per jaar op meer dan 1000 slachtoffers. Het bovenrivierengebied is dominant voor de kans op kleinere aantallen slachtoffers. De grootste bijdragen worden geleverd door dijkkring 16 (Alblasserwaard en Vijfherenlanden), dijkkring 15 (Lopiker en Krimpenerwaard) en dijkkringdeel 14_3 (Zuid-Holland Nieuwe Waterweg Oost).

Om de betrouwbaarheid van de resultaten te onderzoeken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd ten aanzien van een aantal aannames en parameterwaarden. Hieruit blijkt dat de resultaten met name gevoelig zijn voor de aangenomen evacuatiefractie in het benedenrivierengebied en de mortaliteit. Het effect van een onzekere (variabele) mortaliteit is in zekere zin verwerkt in de exponentiële verdeling die per deelscenario wordt opgesteld (zie ook Bijlage H). Andere onzekerheden, bijvoorbeeld als gevolg van de indeling in deelsystemen zijn van minder grote invloed op het resultaat. De onzekerheden in de overstromingsmodellering is in de gevoeligheidsanalyse niet beschouwd. Deze worden gezien als een uitgangspunt voor de risicoberekening.

5.3 Reflectie op aanpak en resultaten

In deze paragraaf worden bij de resultaten in dit rapport nog enige opmerkingen gemaakt die van belang zijn voor de interpretatie van de resultaten.

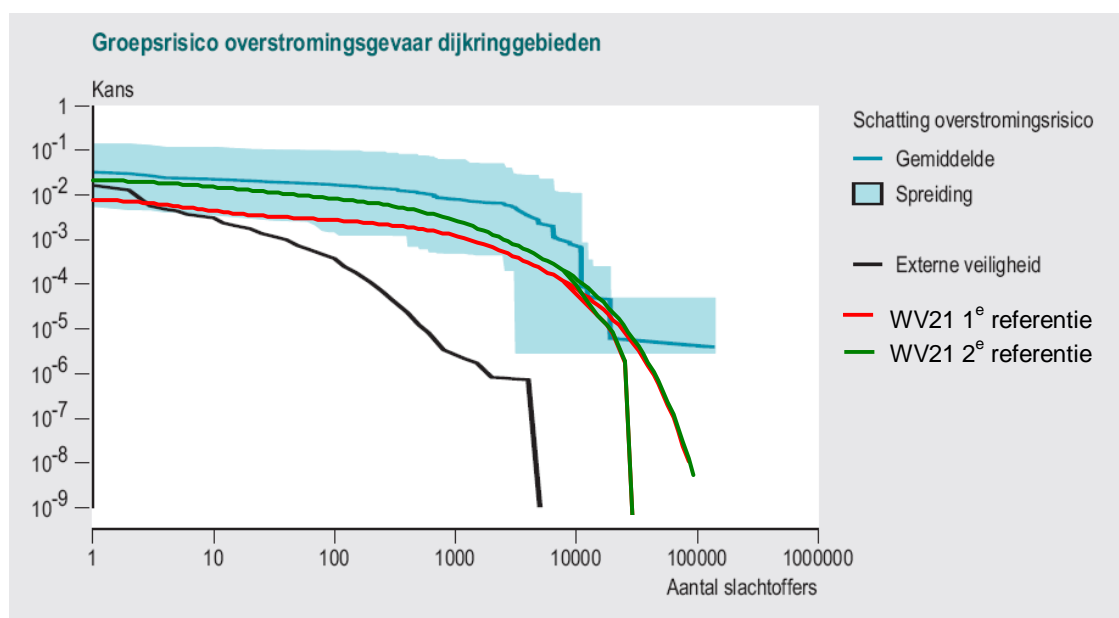
Resultaten horen bij gekozen referentiesituatie, niet bij actuele situatie

Dit rapport geeft inzicht in het slachtofferrisico als gevolg van overstromingen. Als uitgangspunt is niet de huidige situatie gekozen, maar een conceptuele referentiesituatie. Er zijn twee referentiesituaties beschouwd. In de eerste referentiesituatie is de overstromingskans van elk dijkkringdeel gelijk gesteld aan de huidige wettelijke normfrequentie van de maatgevende belasting op de betreffende dijkkring. In de tweede referentiesituatie zijn de overstromingskansen bijgesteld naar een verwachte waarde in 2040 als lopende

programma's op het gebied van waterveiligheid zijn afgerond. De overstromingskansen in de huidige situatie kunnen groter of kleiner zijn dan in deze referentiesituaties. De hier gepresenteerde slachtoffer risico's zullen dan ook niet voor elke dijkkring overeenkomen met de huidige situatie.

Vergelijking met eerdere resultaten

Het RIVM heeft in de studie 'Risico's in bedijkte termen' (RIVM, 2004) voor het eerst een landelijke FN-curve bepaald. De methode ging uit van expertschattingen van kansen op overstroming en een minimum en maximum aantal slachtoffers per dijkkring. Deze onder- en bovengrenzen werden gebruikt om tot een onzekerheidsmarge te komen. Voor de landelijke FN curve zijn de FN curves per dijkkring vervolgens opgeteld (dus onafhankelijk verondersteld). Tenslotte is het risico van overstromingen vergeleken met dat van destijds bekende externe veiligheidsrisico's.



Figuur 5.1 Groepsrisico van overstromingen en externe veiligheid uit 'RIVM (2004)' resp. 'WV21'.

In Figuur 5.1 wordt de FN curve uit 'Risico's in bedijkte termen' vergeleken met de FN curve zoals berekend in onderhavige studie (1^e referentiesituatie). De in WV21 kader berekende FN-curven liggen binnen de onzekerheidsband van de FN-curve uit RIVM (2004). Verschillen in slachtofferschattingen vormen de belangrijkste verklaring voor de gevonden verschillen in FN-curve. De in dit rapport gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op veel nieuwe kennis die de afgelopen jaren beschikbaar is gekomen. Onder andere zijn er voor alle dijkringen overstromingssimulaties beschikbaar gekomen, waarmee er een beter beeld is ontstaan van de omvang van overstromingen. Ook de mortaliteitsfuncties zijn de afgelopen jaren verbeterd. Daarnaast zijn voor WV21 de evacuatiefracties beter onderbouwd met verschillende evacuatiescenario's.

Het nu berekende groepsrisico is dus lager dan bij 'Risico's in bedijkte termen', maar nog steeds duidelijk groter dan het groepsrisico van externe veiligheid. Voordat we hieruit conclusies trekken moeten we ons echter realiseren dat er verschillen bestaan tussen de perceptie en de mate van acceptatie van het risico van overstromingen en dat van externe

veiligheid. De perceptie van risico's van industriële oorsprong is hoger dan voor risico's met een natuurlijke oorsprong (Sandman, 1993, Ale, 2003). Bovendien zijn in de FN-curve van externe veiligheid enkel de veiligheidsrisico's verwerkt van industriële activiteiten die destijds onder de het Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen (BEVI) vielen. De BEVI is vooral gericht op de opslag en het transport van brandbare, explosieve en toxische stoffen. Andere risico's van buitenaf, zoals epidemieën of rampen met kerncentrales, vallen hier niet onder.

Vergelijking uitkomsten LIR en Groepsrisico's

Er zijn dijkringen met zowel hoge LIR-waarden als hoge groepsrisico's. De belangrijkste zijn de diepe dijkringen 16 (Alblasserwaard en Vijfherenlanden) en 15 (Lopiker en Krimpenerwaard) en dijkkringdeel 14_3 (Zuid-Holland Nieuwe Waterweg Oost) in het benedenrivierengebied. Daarnaast zijn er dijkringen die sterk gecompartmenteerd zijn, waardoor ze lokaal snel diep kunnen worden, en die bovendien voldoende groot zijn om een significante bijdrage aan de groepsrisico's te leveren, zoals dijkkring 17 (IJsselmonde) en dijkkring 22 (Eiland van Dordrecht). Vanuit het perspectief van beheersing van slachtofferrisico's ligt het voor de hand om deze dijkringen bijzondere aandacht te geven.

Er zijn ook dijkringen met een heel hoge LIR waarde, maar een verwaarloosbaar groepsrisico. Dit zijn vooral de kleine bakjesdijkringen. Deze hebben een relatief hoog overstromingsrisico, maar zijn veelal dunbevolkt (bv. Alem).

Tenslotte zijn er dijkringen met een grote bijdrage aan de groepsrisico's en een relatief lage LIR waarde; een voorbeeld is dijkkringdeel 8_2 (Flevoland Zuidwest). Deze dijkkring kent geen buurten met hoge LIR waarden, maar heeft wel een relatief hoge mortaliteit in een groot gebied met veel inwoners.

De twee beschouwde indicatoren voor het slachtofferrisico kunnen dus deels in de richting van dezelfde en deels in de richting van andere dijkringen wijzen. In het algemeen geldt dat er geen relatie bestaat tussen de maximale LIR-waarden in een dijkkringgebied en (de bijdrage aan) het groepsrisico.

Reductie van slachtofferrisico's door andere maatregelen

Slachtofferrisico's kunnen worden verkleind door dijkversterking (of andere kansverlagende maatregelen) uit te voeren. Het is echter ook mogelijk om slachtofferrisico's te verlagen door andere maatregelen zoals het verbeteren van de evacuatiemogelijkheden of het enigszins ophogen van gebieden. Dit laatste kan belangrijk zijn in nog te bouwen nieuwbouwwijken die in het LIR voor 2040 een rol spelen (bijv. in Zuid-West Flevoland). Andere maatregelen dan dijkversterking kunnen relevant zijn wanneer slechts een enkele buurt of een zeer dun bevolkte dijkkring een hoge LIR-waarde heeft.

Een andere optie om het slachtofferrisico te verkleinen is het lokaal versterken van gedeeltes van een dijkkring en dan met name die trajecten waar een doorbraak tot veel slachtoffers kan leiden. Dit is het meest aan de orde in dijkringen waar de slachtofferaantallen ten gevolge van doorbraken sterk verschillen per doorbraaklocatie, bijvoorbeeld bij de gecompartmenteerde dijkringen in het Benedenrivierengebied (zoals IJsselmonde).

Referenties

- Ale, B.J.M. (2003) *Risico's en Veiligheid; Een historische schets*, Delft, juni 2003.
- Bruijn, K.M. de, (2009). *Slachtofferrisico's door overstromingen, Voorstel voor indicatoren voor gebruik in de discussie over nieuwe normen voor de waterkeringen*. Deltares rapport 1200165-002, september 2009.
- Deltacommissie (1953) *Rapport Deltacommissie, 6 Delen*. Staatsdrukkerij- en Uitgeverijbedrijf 's-Gravenhage, Eindrapportage verschenen in 1960-1961.
- Deltacommissie (2008) *Samen werken met water*, Bevindingen van de Deltacommissie 2008. Hollandia Printing, Eerste druk september 2008. www.deltacommissie.com
- Van der Doef, M.R. en de Bruijn, K.M. (2011) *Gevolgen van overstromingen – Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw*. Deltares Rapport 1204144, Delft.
- Hohenbichler, M. en R. Rackwitz (1983), *First-order concepts in system reliability* In: *Structural Safety*, 1, 1983. p. 177-188.
- Jonkman, S.N. (2007) *Loss of life estimation in flood risk assessment, Theory and applications* Proefschrift, TU Delft, juni 2007.
- Jonkman, S.N. (2008), *Schattingen groepsrisico's t.b.v. advies Deltacommissie*, Royal Haskoning memo nr 9T6387.A0/NN0001/902968/Rott. www.deltacommissie.com
- Kuiper, R. en A.A Bouwman (2009), *Trendkaart Nederland 2040, Achtergrondrapport bij het project 'Nederland Later'* Rapport van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), juli 2009
- Maaskant, B., Jonkman, S.N., Kok, M. (2009a), *Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties*. HKV Lijn in Water Rapport PR1669.10
- Maaskant, B., Kolen, B., Jongejan, R., Jonkman, S., en Kok, M. (2009b), *Evacuatieschattingen Nederland*. HKV Lijn in Water Rapport PR1718.10
- Van Mierlo, M.C.L.M. et al, (2007) *Assessment of floods risk accounting for River System Behaviour*, Intl J. River Basin Management Vol 5, (2), 93-104.
- Van Mierlo, M.C.L.M., Schweckendiek, T. and Courage, W.M.G. (2008), *Importance of River System Behaviour in Assessing Flood Risk Flood Risk Management: Research and Practice* - Samuels et al (eds.), 2009 Taylor & Francis Group, London, 327-337.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2009), *Het Nationaal Waterplan, Beleidsnota*. www.verkeerenwaterstaat.nl
- Riedstra, D. (2009) *Opties voor acceptabele niveaus voor het groepsrisico als gevolg van overstromingen*, Concept memo van 10 november 2009.

RIVM (2004), Risico's in bedijkte termen, een thematische evaluatie van het Nederlandse veiligheidsbeleid tegen overstromen, RIVM rapport 500799002, ISBN 90-6960-110-9, mei 2004

Sandman, P. (1993) Responding to Community Outrage: Strategies for Effective Risk Communication, American Industrial Hygiene Association ISBN 093262751X.

Thonus, Bart, Ferdinand Diermanse, Ingrid Lammers (2003), *De veiligheid van Nederland in Kaart - Hydraulische randvoorwaarden Fase 2 - Uitwerken en implementeren van belastingmodellen* Rapport Q3028 van WL | Delft Hydraulics en HKV Lijn in Water, april 2003.

Verheij, H.J. (2002): *Breaching in cohesive soils*, WL|Delft Hydraulics, research report Q2959.

Vrijling, J.K., Van Hengel, W., Houben, R.J. (1998) *Acceptable risk as a basis for design*. Reliability engineering and system safety, 59: 141-150.

Waterwet (2009), <http://www.helpdeskwater.nl/waterwet>

A Verwachtingswaarden slachtofferaantallen per dijkkringdeel

Verwachte slachtofferaantallen per dijkkringdeel, gegeven een overstroming en inclusief het effect van evacuatie. De aantallen zijn afgerond op gehele getallen. Een slachtofferaantal van nul betekent in feite een verwachtingswaarde kleiner dan 0.5.

nr	dijkkring	2000	2020	2040
1_1	Schiermonnikoog	0	0	0
2_1	Ameland	1	1	1
3_1	Terschelling	1	1	1
4_1	Vlieland	0	0	0
5_1	Texel	3	2	2
6_1	Friesland_Groningen_Lauwersmeer	4	4	6
6_2	Friesland_Groningen_Groningen	39	42	41
6_3	Friesland_Groningen_NoordFriesland	23	25	25
6_4	Friesland_Groningen_IJsselmeer	1	1	1
7_1	Noordoostpolder	89	97	107
8_1	Flevoland_Noordoost	296	368	334
8_2	Flevoland_ZuidWest	452	778	1069
9_1	Vollenhove	18	17	18
10_1	Mastenbroek	75	89	87
11_1	IJsseldelta	37	37	34
12_1	Wieringen	39	66	70
13_1	Noord-Holland_Noord	74	68	63
13_2	Noord-Holland_Westfriesland	206	228	232
13_4	Noord-Holland_Waterland	55	64	66
13b_1	Marken	1	0	0
14_1	Zuid-Holland_Kust	816	828	837
14_2	Zuid-Holland_NweWaterweg_West	6	6	6
14_3	Zuid-Holland_NweWaterweg_Oost	2982	3023	3059
15_1	Lopiker- en Krimpenerwaard	1052	1301	1253
16_1	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	2415	1967	2026
17_1	IJsselmonde	564	604	599
18_1	Pernis	665	360	394
19_1	Rozenburg	16	7	7
20_1	Voorne-Putten_West	107	119	148
20_2	Voorne-Putten_Midden	41	59	67
20_3	Voorne-Putten_Oost	540	711	715
21_1	Hoekse Waard	38	36	25
22_1	Eiland van Dordrecht	297	346	357
24_1	Land van Altena	211	162	164
25_1	Goeree-Overflakkee_Noordzee	6	9	15
25_2	Goeree-Overflakkee_Haringvliet	2	2	4
26_1	Schouwen Duiveland_West	9	10	10
26_2	Schouwen Duiveland_Oost	47	52	54
27_1	Tholen en St. Philipsland	63	49	61
28_1	Noord-Beveland	4	4	4
29_1	Walcheren_West	5	4	4
29_2	Walcheren_Oost	175	152	145
30_1	Zuid-Beveland_West	170	217	210

31_1	Zuid-Beveland_Oost	126	104	105
32_1	Zeeuwsch Vlaanderen_West	10	9	7
32_2	Zeeuwsch Vlaanderen_Oost	106	101	96
34_1	West-Brabant	15	16	15
34a_1	Geertruidenberg	28	17	16
35_1	Donge	196	214	209
36_1	Land van Heusden/de Maaskant	210	238	244
36_1a	Keent	2	12	19
37_1	Nederhemert	4	4	4
38_1	Bommelerwaard_Waal	180	227	263
38_2	Bommelerwaard_Maas	60	76	88
39_1	Alem	3	5	5
40_1	Heerenwaarden_Waal	63	38	67
40_2	Heerenwaarden_Maas	3	2	3
41_1	Land van Maas en Waal_Waal	191	229	242
41_2	Land van Maas en Waal_Maas	58	70	74
42_1	Ooij en Millingen	35	28	28
43_1	Betuwe & TCW	328	392	404
44_1	Kromme Rijn_Rijn	339	332	344
44_2	Kromme Rijn_Meren	4	4	4
45_1	Gelderse Vallei_Rijn	284	305	325
45_2	Gelderse Vallei_Meren	2	2	2
46_1	Eempolder	5	8	9
47_1	Arnhemse- en Velpsebroek	60	48	46
48_1	Rijn en IJssel_Boven	278	266	256
48_2	Rijn en IJssel_Beneden	119	130	133
49_1	IJsselland	3	4	4
50_1	Zutphen	31	37	34
51_1	Gorssel	1	2	2
52_1	Oost Veluwe	12	13	12
53_1	Salland	190	245	236
65_1	Arcen	2	3	3
68_1	Venlo	3	3	3
86_1	Maasband	0	0	0
87_1	Meers	3	3	3

B Overzicht LIR waarden

Overzicht van maximum LIR per dijkkring(deel). De bakjesdijkringen zijn geel gemarkeerd.

Dijkkringdeel	Naam	Maximum LIR	
		1e referentie	2e referentie
1-1	Schiermonnikoog	7.5E-07	7.5E-07
2-1	Ameland	4.3E-07	4.3E-07
3-1	Terschelling	7.1E-07	7.1E-07
4-1	Vlieland	2.0E-07	2.0E-07
5-1	Texel	5.1E-07	5.1E-07
6-1	Friesland_Groningen_Lauwersmeer	1.2E-06	1.2E-06
6-2	Friesland_Groningen_Groningen	6.8E-07	6.8E-07
6-3	Friesland_Groningen_NoordFriesland	6.2E-07	6.2E-07
6-4	Friesland_Groningen_IJsselmeer	3.9E-07	3.9E-07
7-1	Noordoostpolder	8.2E-07	1.6E-06
8-1	Flevoland_Noordoost	1.1E-06	1.1E-06
8-2	Flevoland_ZuidWest	1.2E-06	2.5E-06
9-1	Vollenhove	1.6E-06	7.8E-06
10-1	Mastenbroek	2.9E-06	5.8E-06
11-1	IJsseldelta	1.3E-06	2.6E-06
12-1	Wieringen	7.9E-07	1.6E-06
13-1	Noord-Holland_Noord	1.1E-06	1.1E-06
13-2	Noord-Holland_Westfriesland	8.9E-07	8.9E-07
13-4	Noord-Holland_Waterland	4.5E-07	4.5E-07
13b-1	Marken	1.0E-06	2.5E-06
14-1	Zuid-Holland_Kust	1.9E-06	1.9E-06
14-2	Zuid-Holland_NweWaterweg_West	1.0E-07	1.0E-07
14-3	Zuid-Holland_NweWaterweg_Oost	1.1E-05	1.1E-05
15-1	Lopiker- en Krimpenerwaard	4.9E-06	9.7E-06
16-1	Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	6.3E-05	1.3E-04
17-1	IJsselmonde	1.2E-05	2.4E-05
18-1	Pernis	3.6E-05	7.2E-05
19-1	Rozenburg	1.9E-06	3.8E-06
20-1	Voorne-Putten_West	6.7E-06	6.7E-06
20-2	Voorne-Putten_Midden	8.8E-07	8.8E-07
20-3	Voorne-Putten_Oost	5.5E-06	5.5E-06
21-1	Hoekse Waard	2.0E-06	4.1E-06
22-1	Eiland van Dordrecht	7.0E-06	1.4E-05
24-1	Land van Altena	2.4E-05	4.9E-05
25-1	Goeree-Overflakkee_Noordzee	2.6E-06	2.6E-06
25-2	Goeree-Overflakkee_Haringvliet	6.0E-07	1.2E-06
26-1	Schouwen Duiveland_West	8.9E-07	8.9E-07
26-2	Schouwen Duiveland_Oost	9.9E-06	2.0E-05
27-1	Tholen en St. Philipsland	3.0E-06	3.0E-06
28-1	Noord-Beveland	6.9E-07	6.9E-07
29-1	Walcheren_West	4.6E-07	4.6E-07
29-2	Walcheren_Oost	3.3E-06	3.3E-06
30-1	Zuid-Beveland_West	3.2E-05	3.2E-05
31-1	Zuid-Beveland_Oost	5.2E-06	5.2E-06

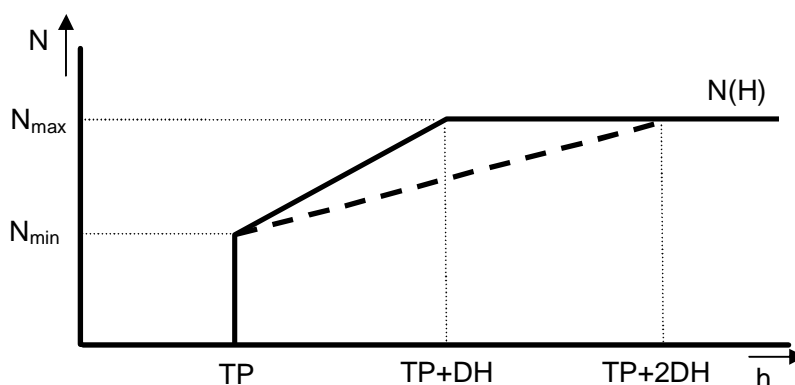
32-1	Zeeuwsch Vlaanderen_West	1.3E-06	1.3E-06
32-2	Zeeuwsch Vlaanderen_Oost	1.2E-06	1.2E-06
34-1	West-Brabant	1.3E-06	5.0E-06
34a-1	Geertruidenberg	3.4E-06	1.4E-05
35-1	Donge	2.1E-06	4.2E-06
36-1	Land van Heusden/de Maaskant	2.0E-06	1.0E-05
36a-1	Keent	4.4E-06	1.1E-05
37-1	Nederhemert	7.3E-06	1.8E-05
38-1	Bommelerwaard_Waal	2.3E-05	2.3E-05
38-2	Bommelerwaard_Maas	2.3E-06	5.8E-06
39-1	Alem	8.9E-06	2.2E-05
40-1	Heerenwaarden_Waal	1.5E-06	1.2E-05
40-2	Heerenwaarden_Maas	2.4E-06	4.9E-06
41-1	Land van Maas en Waal_Waal	2.9E-06	7.1E-06
41-2	Land van Maas en Waal_Maas	2.1E-06	5.2E-06
42-1	Ooij en Millingen	8.6E-06	2.1E-05
43-1	Betuwe & TCW	3.1E-06	1.6E-05
44-1	Kromme Rijn_Rijn	2.7E-06	6.8E-06
44-2	Kromme Rijn_Meren	4.0E-08	1.0E-07
45-1	Gelderse Vallei_Rijn	3.4E-06	3.4E-06
45-2	Gelderse Vallei_Meren	8.1E-07	2.0E-06
46-1	Eempolder	8.6E-07	2.2E-06
47-1	Arnhemse- en Velpsebroek	2.4E-06	6.0E-06
48-1	Rijn en IJssel_Boven	2.2E-05	5.6E-05
48-2	Rijn en IJssel_Beneden	1.9E-06	4.8E-06
49-1	IJsselland	1.4E-06	3.6E-06
50-1	Zutphen	1.2E-06	3.0E-06
51-1	Gorssel	7.8E-07	1.9E-06
52-1	Oost Veluwe	2.2E-05	1.1E-04
53-1	Salland	1.2E-06	2.9E-06
65-1	Arcen	4.1E-05	8.2E-05
68-1	Venlo	4.2E-06	8.5E-06
86-1	Maasband	6.5E-06	1.3E-05
87-1	Meers	5.4E-06	1.1E-05

C Berekening verwachtingswaarden

Voor zowel slachtofferrisico's als MKBA is de verwachte schade of het verwachte aantal slachtoffers, gegeven een overstroming, een belangrijk begrip. In deze bijlage wordt uitgelegd hoe deze verwachtingswaarde wordt berekend uit de beschikbare SOBEK en HIS-SSM berekeningen per dijkkring. Deze beschikbare informatie bestaat uit:

- 1 De scenario's bij toetspeil. Bij een waterstand gelijk aan het toetspeil wordt aangenomen dat er een enkelvoudige bres optreedt. Deze bres kan op meerdere locaties optreden. Elk scenario heeft een conditionele kans van optreden en een bijbehorend aantal slachtoffers. De som van de conditionele kansen is gelijk aan 1. Het verwachte aantal slachtoffers N_{\min} bij een overstroming waarbij de waterstand gelijk is aan het toetspeil is berekend als de gewogen som over de scenario's bij toetspeil. De gewichten zijn de conditionele kansen.
- 2 Het bovenmaatgevende scenario. Hierbij moeten we ons meerdere doorbraken voorstellen bij een waterstand ruim boven het toetspeil. Voor een aantal dijkringen zijn simulaties beschikbaar van enkelvoudige doorbraken bij een waterstand gelijk aan het toetspeil plus eenmaal de decimeringhoogte. Voor andere dijkringen echter niet. Het aantal slachtoffers N_{\max} bij het bovenmaatgevende scenario is in WV21 berekend uit de maximum mortaliteit van alle scenario's (bij beschikbaarheid van overstromingsberekeningen bij bovenmaatgevende omstandigheden) of het maximum aantal slachtoffers van alle scenario's van enkelvoudige bresdoorbraken.

De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers N , gegeven een overstroming, wordt berekend door een verband tussen de waterstand h en het aantal slachtoffers aan te nemen (zie Figuur C.0.1). Bij waterstanden lager dan het toetspeil (TP) vindt er geen overstroming plaats en vallen er geen slachtoffers. Bij nipte overschrijding van het toetspeil is het verwachte aantal slachtoffers N_{\min} . Bij toetspeil plus een decimeringhoogte (TP+DH) is het aantal slachtoffers N_{\max} . Tussen N_{\min} en N_{\max} neemt het aantal slachtoffers evenredig toe met de waterstand. Bij hogere waterstanden vallen niet meer slachtoffers.



Figuur C.0.1 Het aantal slachtoffers, gegeven een overstroming, als functie van de waterstand.

Het aantal slachtoffers N als functie van de waterstand h tussen TP en TP+DH is:

$$N(h) = N_{\min} + \alpha \frac{N_{\max} - N_{\min}}{\ln(10)} (h - TP)$$

Waarin α een parameter is die gerelateerd is aan de decimeringhoogte: $\alpha = \ln(10) / DH$. Voor de overschrijdingskans van de waterstand, gegeven dat $h > TP$ (dus gegeven falen van de dijkkring), wordt een exponentieel verloop met dezelfde parameter α aangenomen:

$$P(h > H | F) = \exp(-\alpha (H - TP))$$

Combinatie van de formules voor $N(h)$ en $P(h > H | F)$ levert:

$$P(n > N | F) = \exp\left(\frac{N - N_{\min}}{N_{\min} - N_{\max}} \ln(10)\right) = 10^{\frac{N - N_{\min}}{N_{\min} - N_{\max}}}$$

Het verwachte aantal slachtoffers gegeven falen van de dijkkring is dan:

$$E(N | F) = \int_0^{\infty} P(n > N | F) dn = \int_0^{N_{\min}} 1 dn + \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} 10^{\frac{n - N_{\min}}{N_{\min} - N_{\max}}} dn$$

Uitwerken van deze integraal levert:

$$E(N | F) = N_{\min} + \frac{0.9}{\ln(10)} (N_{\max} - N_{\min})$$

En dit is bij benadering gelijk aan:

$$E(N | F) = 0.61N_{\min} + 0.39N_{\max}$$

In het geval dat het bovenmaatgevende scenario pas optreedt bij $TP + 2DH$ vinden we:

$$E(N | F) = 0.79N_{\min} + 0.21N_{\max}$$

D Afleiding correlatiecoëfficiënten

De betrouwbaarheidsfunctie ($Z=R-S$) van een dijkkring is het verschil tussen de belasting (R) en de sterkte (S). De kans op falen is gedefinieerd als de kans dat de betrouwbaarheidsfunctie negatief wordt. De correlatie tussen de betrouwbaarheidsfuncties Z_i en Z_j van twee dijkringen i en j , wordt gegeven door de correlatiecoëfficiënt ρ_{ij} . Deze correlatiecoëfficiënt kan worden afgeleid uit de correlatie tussen stochasten k uit de belasting- en sterktefuncties en hun invloedscoëfficiënten α_{ki} en α_{kj} :

$$\rho_{ij} = \sum_k \rho_{kij} \alpha_{ki} \alpha_{kj} \quad (1)$$

De invloedscoëfficiënten α_{ki} en α_{kj} zijn een maat voor de bijdrage van elke stochast aan de faalkans. Voor de invloedscoëfficiënten van elke dijkkring i geldt:

$$\sum_k \alpha_{ki}^2 = 1 \quad (2)$$

De faalkansen per dijkkring en de invloedscoëfficiënten volgen uit de FORM faalkansanalyse per dijkkring. De kans op een scenario waarbij meerdere dijkringen falen wordt berekend uit de faalkansen van de individuele dijkringen of dijkringdelen en de correlatiecoëfficiënten. De hiervoor gebruikte methode is beschreven in Bijlage E.

De correlatie tussen de betrouwbaarheidsfuncties van een willekeurige combinatie van twee dijkringen kan worden afgeleid uit een faalkansberekening met PC-Ring. Deze berekening is echter nog niet uitgevoerd voor elke dijkkring in Nederland. De correlaties zijn daarom afgeleid van VNK2 voorbeeldberekeningen voor dijkringen 10, 25 en 48. De invloedscoëfficiënten voor deze drie dijkringen zijn gebruikt om de correlatie af te leiden voor:

- Twee dijkringen binnen hetzelfde deelsysteem. Hiervoor zijn twee identieke dijkringen met dezelfde invloedscoëfficiënten gebruikt, dus twee dijkringen 10 naast elkaar of twee dijkringen 25, etc.
- Twee dijkringen uit verschillende deelsystemen. Hiervoor zijn de onderlinge correlaties tussen de dijkringen 10, 25 en 48 gebruikt. De drie dijkringen liggen in verschillende deelsystemen en worden representatief geacht voor de correlatie tussen de deelsystemen.

De met formule (1) berekende correlatiecoëfficiënten tussen combinaties van twee dijkringen zijn weergegeven in *Tabel 1*. Bij deze berekening zijn de stochasten die betrekking hebben op piping en stabiliteit buiten beschouwing gelaten, omdat deze faalmechanismen niet bepalend zijn voor falen in de referentiesituatie (zie paragraaf 2.2). Uit *Tabel 1* blijkt dat de correlatie tussen identieke dijkringen binnen een deelsysteem groot is. Tussen de deelsystemen is de correlatie veel kleiner.

Tabel 1: Correlatiecoëfficiënten tussen combinaties van VNK2 voorbeelddijkringen.

	10	25	48
10	0.98	0.28	0.04
25	0.28	0.95	0.08
48	0.04	0.08	1.00

De correlatie wordt voor een groot gedeelte bepaald door de belastingstochasten (zoals het debiet bij Lobith). De correlatiecoëfficiënt voor deze stochasten staat in PC-Ring standaard ingesteld op 1. Binnen een dijkkring is dit een correcte aanname, maar op grotere afstanden zal de belasting minder sterk gecorreleerd zijn. Daarom is een tweede berekening gemaakt waarbij binnen een deelsysteem een correlatiecoëfficiënt voor belastingvariabelen van 0.9 is aangenomen en tussen deelsystemen een coëfficiënt van 0.5. De correlatiecoëfficiënten voor de verschillende combinaties van VNK2 dijkringen zijn dan gegeven in *Tabel 2*. De verminderde correlatie tussen de belastingvariabelen leidt tot lagere correlatiecoëfficiënten, zowel binnen als tussen de deelsystemen.

Tabel 2: Correlatiecoëfficiënten voor aangepaste correlatie van de belastingvariabelen (binnen een deelsysteem 0.9 en tussen de deelsystemen 0.5).

	10	25	48
10	0.89	0.15	0.03
25	0.15	0.86	0.04
48	0.03	0.04	0.90

Onderzocht is of voor andere dijkringen (VNK1 berekeningen met PC-Ring4) hetzelfde beeld bestaat. Dit bleek het geval. Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat de correlaties tussen dijkringen uit verschillende deelsystemen klein zijn. De coëfficiënten voor dijkringen binnen de deelsystemen worden hieronder afgeleid.

Dijkkring10

Dijkkring 10 (Mastenbroek) ligt aan de monding van de IJssel-Vecht delta. De invloedscoëfficiënten geven aan dat het IJsselmeerpeil de belangrijkste stochast is. Daarnaast spelen ook de windrichting en de modelfactor voor het Bretschneider golfmodel een belangrijke rol. Tezamen bepalen deze vier stochasten 75% van de faalkans van dijkkring 10. Volgens de PC-Ring instellingen zijn deze vier stochasten sterk gecorreleerd tussen verschillende dijkringen. Een naastgelegen dijkkring met een identieke betrouwbaarheidsfunctie zou daarom volgens *Tabel 2* een correlatiecoëfficiënt van 0.89 hebben.

De hoogste IJsselmeerpeilen in dit gebied worden veroorzaakt door harde N- of NW-wind. Deze wind bedreigt dan niet alleen dijkkring 10 maar ook de dijkringen 7, 8, 9 en 11. Een noordelijke wind zal bovendien een hoge belasting geven op de dijkkringgebieden 44-2 en 45-2. Deze dijkringen zijn daarom in hetzelfde deelsysteem ingedeeld. Aangenomen wordt dat de correlatie tussen de betrouwbaarheidsfuncties van al deze dijkringen 0.9 is.

Een N-NW wind bedreigt ook de noordelijke kust. Daarom zijn de eerder genoemde dijkringen ingedeeld bij het deelsysteem 'kust-noord'. Voor de kust-dijkringen zullen echter ook andere factoren een rol spelen (zoals de getijfase). Daarom wordt tussen de kust-dijkringen en de IJsselmeer dijkringen een kleinere correlatiecoëfficiënt van 0.5 aangehouden.

De dijkringen aan de noord-westelijke kant van het IJsselmeer (12 en 13) worden niet bedreigd door NW-storm en vormen daarom een apart deelsysteem 'IJsselmeer'. Aangenomen wordt dat de verschillende oriëntaties van de keringen van dijkkring 12 en 13 zorgen voor een kleinere correlatie tussen de dijkringen. De correlaties tussen de dijkringen binnen dit deelsysteem is geschat op 0.75.

Dijkkring 25

De faalkans van dijkkring 25 (Goeree-Overflakkee) wordt volgens de VNK2 berekening voor een groot gedeelte (50%) bepaald door onzekerheid in het faalmechanisme piping. Een van de aannames in de huidige studie is echter dat piping niet bepalend is voor het falen van een kering na afronding van lopende verbeterprogramma's (zie paragraaf 2.2). De waterstand bij Maasmond en de windrichting zijn andere belangrijke stochasten voor deze dijkkring. Deze stochasten zijn sterk gecorreleerd voor kust-dijkkringen. Een naburige dijkkring met een identieke betrouwbaarheidsfunctie zou een correlatie van 0.86 met dijkkring 25 hebben (zie *Tabel 2*).

In de groepsrisico berekening is gekozen voor een deelsysteem 'kust-zuid' met daarin de Zeeuwse eilanden en dijkkring 14. De correlatie tussen de dijkkringen binnen dit deelsysteem is gesteld op 0.9. Voor de kustdijkkringen binnen het deelsysteem 'kust-noord' is dezelfde correlatie van 0.9 aangenomen. Tussen 'kust-noord' en 'kust-zuid' geldt onafhankelijkheid, terwijl in werkelijkheid de dijkkringen in beide de deelsystemen wel gecorreleerd zullen zijn. Het aantal dijkkringen is echter te groot om hier een groot deelsysteem van te maken. In de gevoeligheidsanalyse is het effect van het verwaarlozen van deze correlatie tussen de deelsystemen onderzocht.

Dijkkring 48

Dijkkring 48 (Rijn en IJssel) wordt gedomineerd door het debiet bij Lobith. Deze stochast is voor 90% verantwoordelijk voor de faalkans. De correlatie tussen de Rijnafvoer voor verschillende dijkkringen in het bovenrivierengebied is zeer groot (de correlatiecoëfficiënt in PC-Ring is 1). Echter, we nemen aan dat tussen Rijn en Maas de correlatie kleiner zal zijn (Thonus, 2003). Bovendien zal de correlatie ver benedenstrooms (benedenrivieren) ook afnemen.

Daarom is gekozen voor een correlatie van 0.9 tussen dijkkringen langs dezelfde riviertak (Maas en Rijntakken) binnen het deelsysteem benedenrivieren. Tussen dijkkringen langs verschillende takken is een kleinere correlatie van 0.5 aangenomen. Tussen de deelsystemen bovenrivieren en benedenrivieren (vanaf Gorinchem) geldt onafhankelijkheid. In de gevoeligheidsanalyse wordt het effect onderzocht van deze aanname en de keuze van een indeling in boven- en benedenrivieren.

E Scenariokansen van dijkringoverstijgende scenario's

Voor de FN curve van Nederland moet rekening worden gehouden met scenario's waarbij meerdere dijkeringen overstromen. Het zijn juist deze scenario's waarbij grote aantallen slachtoffers vallen die van belang zijn voor het groepsrisico. Als we alle combinaties beschouwen zijn er $2^n - 1$ scenario's voor n dijkeringen, dus voor 50 dijkeringen zijn er meer dan 10^{15} scenario's. Om het aantal scenario's en daarmee de rekentijd te beperken onderscheiden we een aantal onafhankelijke deelsystemen. De FN curven worden per deelsysteem berekend en naderhand gecombineerd. Het aantal dijkringdelen per deelsysteem is maximaal 20. Het aantal dijkringoverstijgende scenario's is dan ongeveer één miljoen. De rekentijd hiervoor bedraagt ongeveer 40 minuten.

Het aantal slachtoffers per dijkringoverstijgend scenario is de som van de slachtoffers in de dijkeringen die overstromen in het betreffende scenario. De scenariokans wordt afgeleid uit de faalkansen van de betrokken dijkeringen en de onderlinge afhankelijkheden. De kans dat twee dijkeringen 1 en 2 gelijktijdig falen is:

$$P(Z_1 < 0 \text{ EN } Z_2 < 0) = P(Z_1 < 0)P(Z_2 < 0 | Z_1 < 0)$$

Waarin: Z_i = betrouwbaarheidsfunctie van dijkring i . De laatste term is de conditionele kans op het falen van dijkring 2, gegeven het falen van dijkring 1. Deze kans hangt af de correlatiecoëfficiënt ρ tussen de betrouwbaarheidsfuncties (Z -functies) van dijkring 1 en 2. Er geldt:

$$P(Z_2 < 0 | Z_1 < 0) = P\left(\rho u + v\sqrt{1-\rho^2} > \beta_2 \mid u > \beta_1\right)$$

Waarin: u, v = onafhankelijke standaard normaal verdeelde stochasten. De betrouwbaarheidsindex β_i is de kortste afstand van de oorsprong tot de lijn $Z_i=0$ in de standaard normale ruimte. In de methode Hohenbichler (1983) wordt de stochast u vervangen door u' , waarin de conditie $u > \beta_1$ is verwerkt:

$$P(Z_2 < 0 | Z_1 < 0) = P(Z_2' < 0) = P\left(\rho u' + v\sqrt{1-\rho^2} > \beta_2\right)$$

Waarin u' = een stochast uit een 'opgeschaalde' standaard normaalverdeling:

$$P(u' > U) = \frac{\Phi(-U)}{\Phi(-\beta_1)}$$

De kans $P(Z_2' < 0)$ kan iteratief worden bepaald met behulp van de FORM ontwerp punt methode. Daarin wordt een betrouwbaarheidsindex β_2' van Z_2' berekend als de minimale afstand van de lijn $\rho u' + v\sqrt{1-\rho^2} = \beta_2$ tot de oorsprong in de standaardnormale u' - v -ruimte. De kans $P(Z_2' < 0)$ volgt dan uit:

$$P(Z_2' < 0) = \Phi(-\beta_2')$$

F Positieve systeemwerking in de groepsrisicoberekening

Stel we hebben twee dijkringen (1 en 2) met elk een kans van falen ($P1=0.1$ en $P2=0.2$) en een bijbehorend aantal slachtoffers ($N1=20$ en $N2=10$). Als de dijkringen onafhankelijk zijn is de kans dat beide falen gelijk aan $P1 \cdot P2 = 0.02$. Er zijn in totaal drie mogelijke overstromingsscenario's, zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Scenario	Dijkring1	Dijkring2	Kans	Slachtoffers
1	Faalt	Faalt niet	$0.1 \cdot 0.02 = 0.08$	20
2	Faalt niet	Faalt	$0.2 \cdot 0.02 = 0.18$	10
3	Faalt	Faalt	0.02	30

Stel nu dat dijkring 1 ontlast wordt door falen van dijkring 2 en de kans dat dit gebeurt is 50%. De kans op gezamenlijk falen (scenario 3) wordt hierdoor 50% kleiner. De kans op scenario 2 wordt met hetzelfde bedrag vergroot.

Scenario	Dijkring1	Dijkring2	Kans	Slachtoffers
1	Faalt	Faalt niet	$0.1 \cdot 0.02 = 0.08$	20
2	Faalt niet	Faalt	$0.2 \cdot 0.01 = 0.19$	10
3	Faalt	Faalt	0.01	30

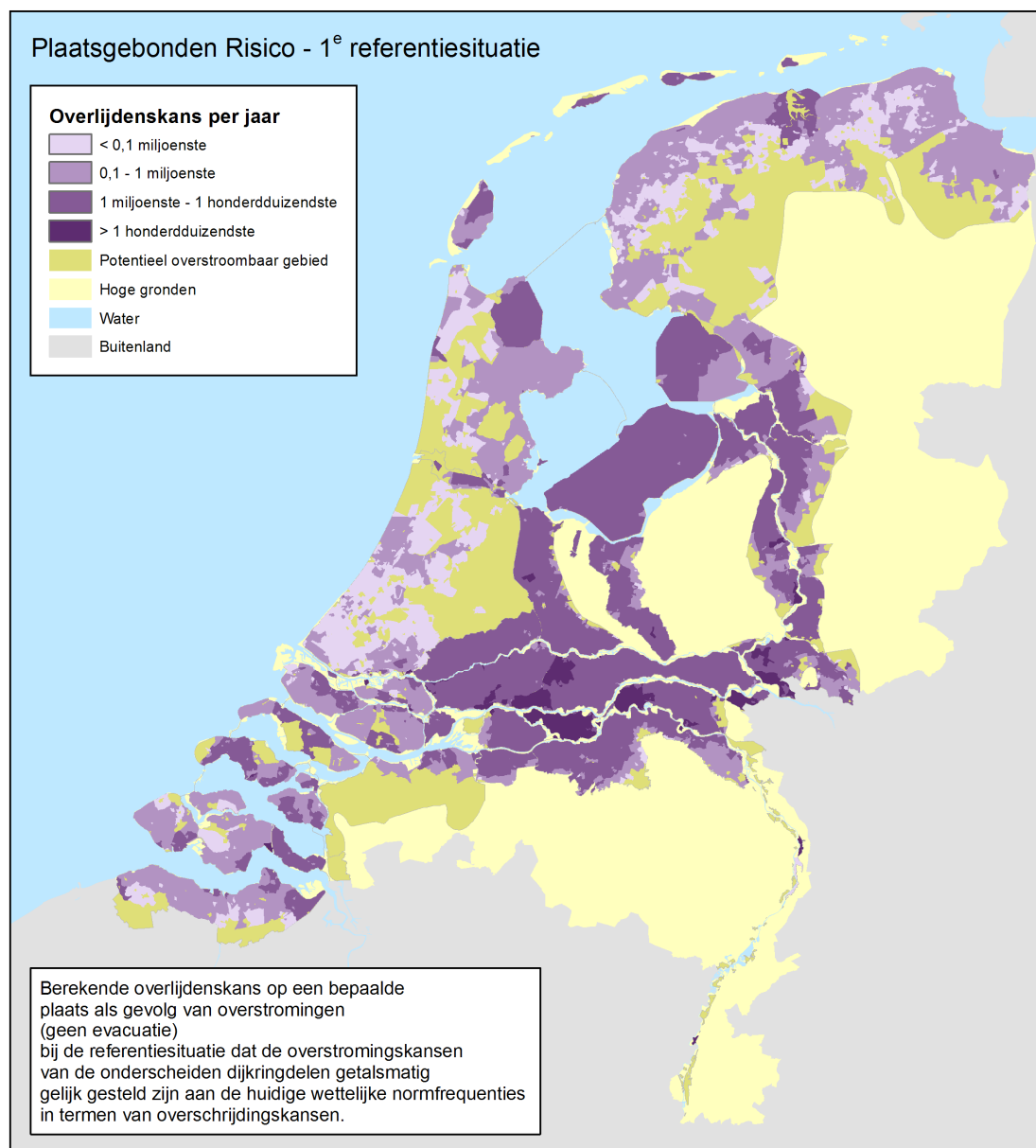
In de groepsrisicoberekeningen wordt het effect van positieve systeemwerking verdisconteerd door scenario 3 te splitsen in twee subscenario's (3a en 3b) en bij elk subscenario een gecorrigeerd aantal slachtoffers te berekenen. De correctie bestaat uit het aantal slachtoffers dat zou vallen in de dijkring die ontlast wordt. In dit geval gaat het om dijkring 1 met 20 slachtoffers.

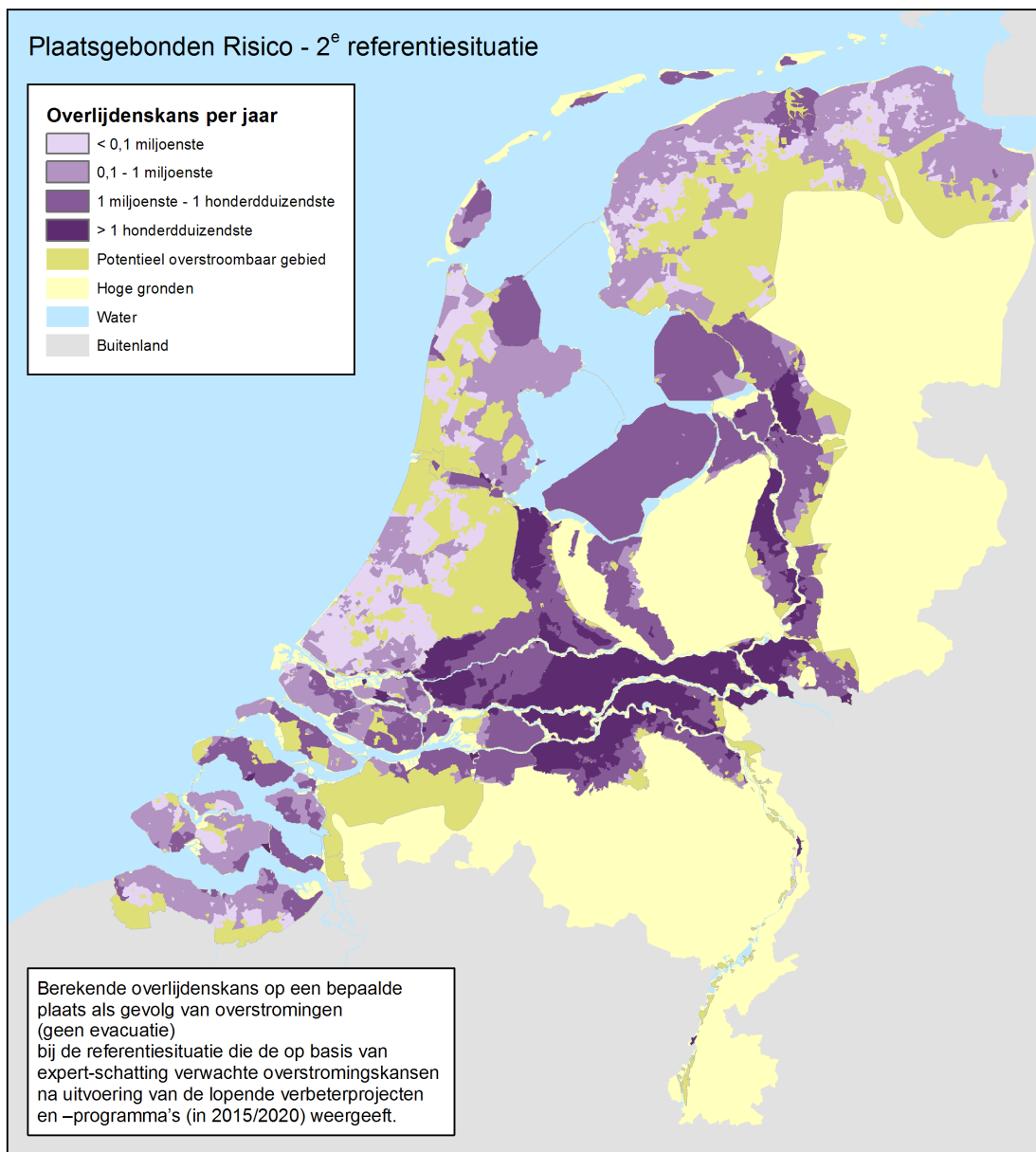
Scenario	Dijkring1	Dijkring2	Kans	Slachtoffers
1	Faalt	Faalt niet	$0.1 \cdot 0.02 = 0.08$	20
2	Faalt niet	Faalt	$0.2 \cdot 0.02 = 0.18$	10
3a	Faalt	Faalt	$0.5 \cdot 0.02 = 0.01$	30
3b	Faalt niet	Faalt	$0.5 \cdot 0.02 = 0.01$	$30 - 20 = 10$

Scenario 3b is in feite gelijk aan scenario 2. Het effect van het toevoegen van scenario 3b is daarom gelijk aan een correctie van de kans op scenario 2.

G Plaatsgebonden Risico

Het plaatsgebonden risico (PR) houdt, in tegenstelling tot het LIR, geen rekening met preventieve evacuatie. De berekening van LIR en PR is verder volledig analoog.





H Kansverdeling aantal slachtoffers

De FN curve in de hoofdtekst is gebaseerd op vele overstromingsscenario's met elk een berekende kans van vóórkomen en een aantal slachtoffers. Het aantal slachtoffers is daarbij gelijk gesteld aan de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers in de overstromde dijkringen in het betreffende scenario. In werkelijkheid kunnen er in elke dijkkring uiteraard meer of minder slachtoffers vallen, afhankelijk van de omstandigheden zoals de locatie van de bressen en de beschikbare tijd voor evacuatie. Door te rekenen met de verwachtingswaarden blijft het aantal scenario's en daarmee de rekentijd binnen de perken. Een nadelig effect is dat hierdoor de worst case scenario's met zeer grote aantallen slachtoffers buiten beschouwing blijven. In de berekening wordt daarom per overstromingsscenario een kansverdeling gebruikt, die de spreiding van het aantal slachtoffers als gevolg van gunstige of minder gunstige omstandigheden weergeeft.

In deze Bijlage wordt onderzocht welke kansverdeling hiervoor het meest geschikt is. Daarvoor wordt eerst gekeken welke kansverdelingen vanuit theoretisch oogpunt in aanmerking komen. Daarna wordt aan de hand van een aantal voorbeelden van deelsystemen (enkele dijkkring, systeem van drie dijkringen en de deelsystemen benedenrivieren en bovenrivieren) een onderzocht welke kansverdeling het meest geschikt is.

Kansverdelingen van extreme waarden

De keuze van de kansverdeling voor de spreiding van het aantal slachtoffers is vooral van belang voor de kans op grote aantallen slachtoffers (de 'staart' van de FN curve). De verzameling overstromingsscenario's die wordt gebruikt bij het berekenen van de FN curve heeft een maximum aantal slachtoffers. In werkelijkheid kunnen er meer slachtoffers vallen als gevolg van ongunstige omstandigheden, zoals een ongunstige breslocatie of een moeizaam verlopen evacuatie. De kans op deze deelscenario's wordt volledig bepaald door de gebruikte kansverdeling.

De staart van een kansverdeling bestaat uit de pieken of ook wel de uitschieters van een stochastisch proces. Voor de kans op een uitschieter boven een voldoende hoge drempelwaarde geldt voor een homogeen stochastisch proces (Poisson proces) volgens de theorie van extreme waarden een kansverdeling van het type "Gegeneraliseerde Pareto Verdeling" (GPV). De GPV heeft de volgende algemene uitdrukking voor de kans $1-F(N)$ op meer dan N slachtoffers:

$$1-F(N) = \begin{cases} \left(1 + \xi \frac{N}{\sigma}\right)^{-1/\xi}, & \text{voor } \xi \neq 0 \\ \exp\left(-\frac{N}{\sigma}\right), & \text{voor } \xi = 0 \end{cases}$$

Waarin σ de schaalparameter heet en ξ de vormparameter. Als de vormparameter ξ gelijk is aan nul dan is de GPV gelijk aan de exponentiële verdeling met verwachtingswaarde σ . Als de vormparameter ξ groter is dan nul, dan is de GPV gelijk aan een Pareto-verdeling. Als de vormparameter ξ kleiner is dan nul, dan is de GPV gelijk aan een zogeheten beta-verdeling.

De beta-verdeling heeft een bovengrens voor het aantal slachtoffers gelijk aan $N_{\max} = -\xi / \sigma$. De kans op een aantal slachtoffers groter dan N_{\max} is in dat geval gelijk aan nul.

De kansverdeling voor de spreiding van het aantal slachtoffers zal gekozen worden uit deze familie van GPV kansverdelingen, door deze te vergelijken met FN curven voor verschillende deelsystemen van dijkringen. In de volgende paragraaf worden overstromingsscenario's van enkele dijkringen onderzocht. Daarna zal gekeken worden naar dijkkringoverstijgende scenario's.

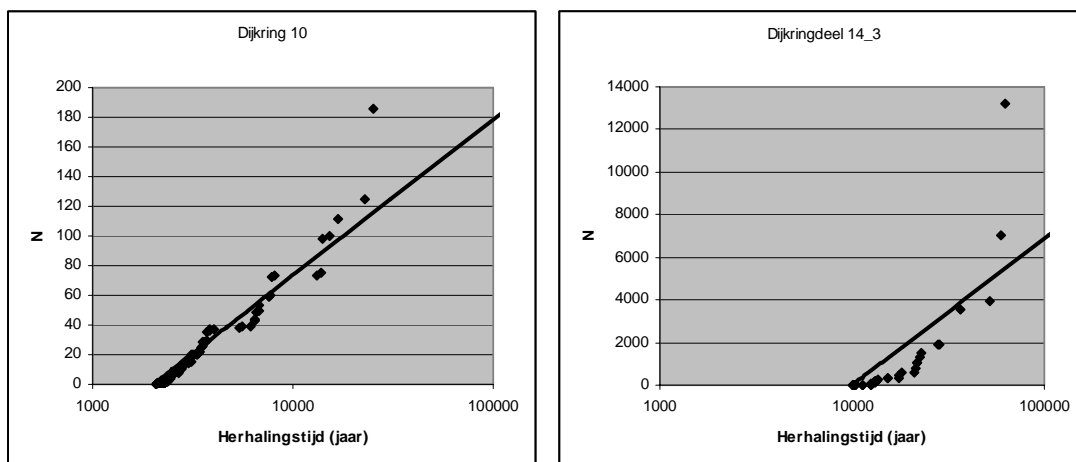
Overstromingsscenario's enkele dijkkring

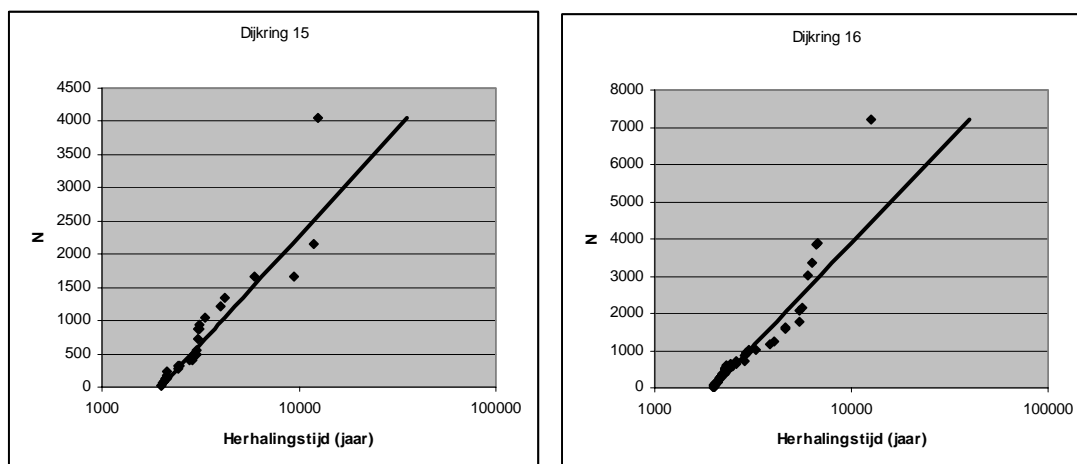
De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers per dijkkring (gegeven een overstroming) is gebaseerd op een groot aantal deelscenario's van mogelijke breslocaties en evacuaties. Elke breslocatie en elk evacuatiescenario heeft een bepaalde conditionele kans van vóórkomen en een berekend aantal slachtoffers. De verwachtingswaarde $E(N)$ voor de dijkkring is gelijk aan het gewogen gemiddelde van het aantal slachtoffers over de deelscenario's:

$$E(N) = \sum_{\text{evacuatie, breslocatie}} P_{\text{evacuatie}} P_{\text{breslocatie}} (1 - f_{\text{evacuatie}}) N_{\text{breslocatie}}$$

Het aantal deelscenario's hangt af van het aantal breslocaties waarvoor een SOBEK simulatie beschikbaar is en het aantal evacuatiescenario's voor het betreffende deelsysteem. In de berekening van de FN curve wordt alleen met de verwachtingswaarde per dijkkring gerekend, omdat de rekentijd anders te groot wordt. Voor een enkele dijkkring kunnen we echter wel alle deelscenario's gebruiken voor een FN curve voor de betreffende dijkkring.

Onderstaande Figuren geven de herhalings tijden van aantallen slachtoffers bij overstroming in en aantal belangrijke dijkkring(delen) (10, 14_3, 15 en 16) op basis van de deelscenario's. De plots zijn op halflogaritmische schaal. Dit is een gebruikelijke manier om de vormparameter van de GPV te bepalen. Een vormparameter ξ gelijk aan nul (exponentiële verdeling) vertaalt zich in een rechte lijn. Een negatieve vormparameter (beta-verdeling) levert een neerwaartse kromming. Een positieve vormparameter (Pareto-verdeling) geeft een opwaartse kromming.



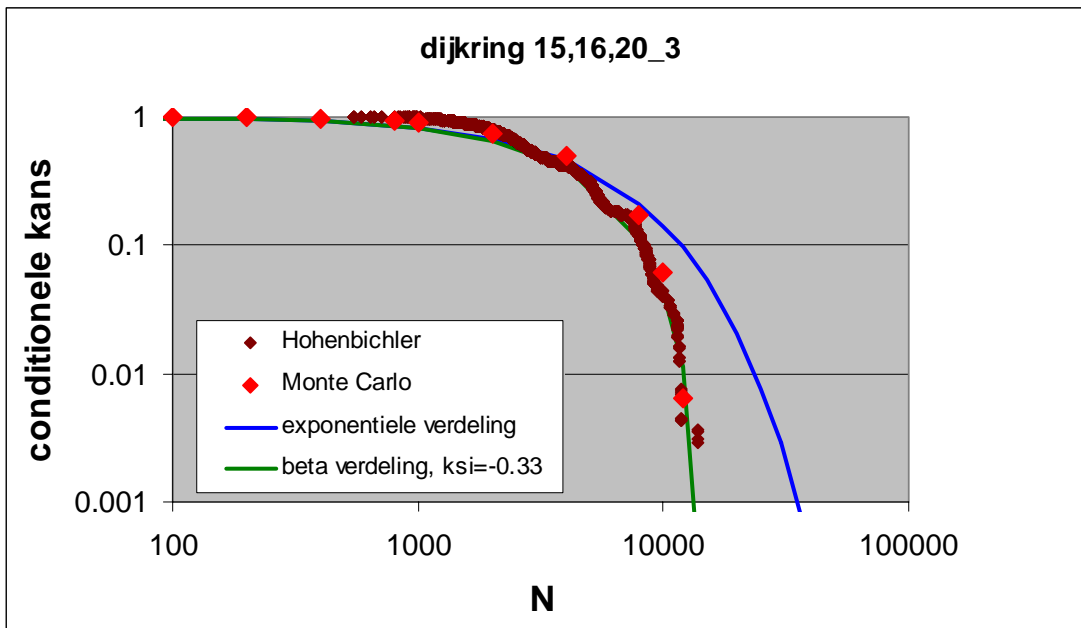


Figuur H.0. Herhalingstijden voor aantallen slachtoffers in vier dijkringen op basis van de deelscenario's, vergeleken met de exponentiële verdeling (doorgetrokken lijn).

De Figuren geven aan dat, voor zover er sprake is van een afwijking van de exponentiële verdeling, deze neigt naar een opwaartse kromming (Pareto-verdeling). In dijkkringdeel 14_3 is dit effect het sterkst. In de overige dijkringen is de kromming zwak en geeft de exponentiële verdeling een redelijke benadering van de kansverdeling. Echter, deze analyse voor enkele dijkringen is van minder belang voor de staart van de landelijke FN curve. Daarvoor zijn vooral de dijkringoverstijgende scenario's waarbij zeer veel slachtoffers kunnen vallen belangrijk.

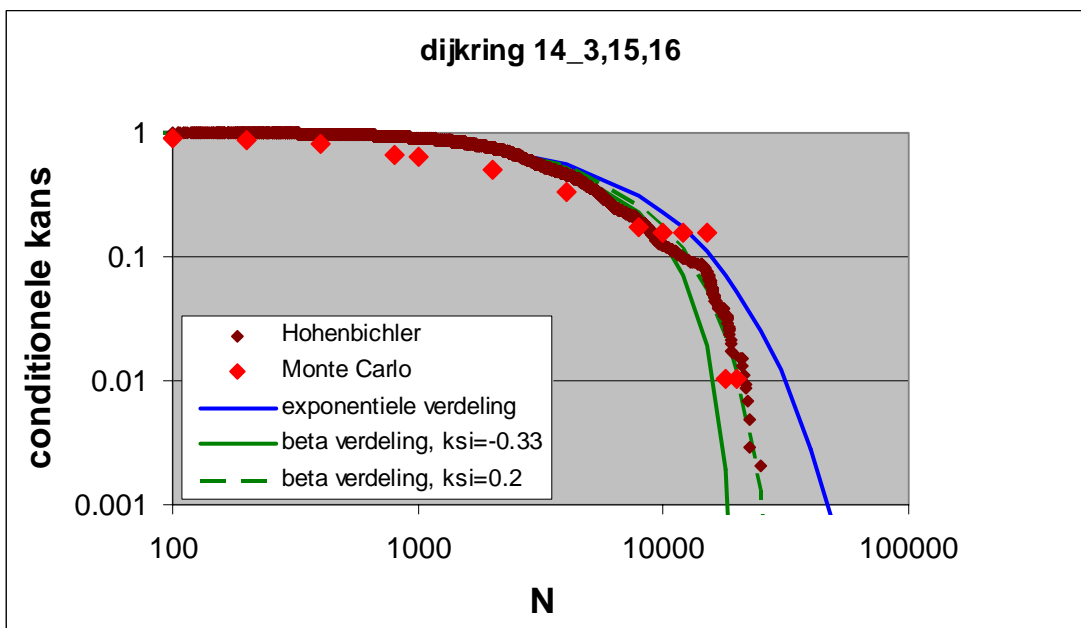
Systeem van drie dijkringen

Voor een systeem van drie dijkringen is het nog (net) mogelijk om alle mogelijke deelscenario's door te rekenen met de standaardmethode (Hohenbichler, 1983). Dit is gedaan voor twee sets van drie dijkringen in het benedenrivierengebied die van grote invloed zijn op de staart van de FN curve. Om de meest geschikte kansverdeling voor de spreiding van het aantal slachtoffers te bepalen is ervoor gekozen om alleen de scenario's te beschouwen waarbij alle drie de geselecteerde dijkringen overstromen. De resultaten voor twee systemen van drie dijkringen in het benedenrivierengebied zijn weergegeven in onderstaande Figuren. De resultaten zijn ook vergeleken met die van een Monte Carlo berekening (voor nadere uitleg hierover zie volgende paragraaf). De standaardmethode (Hohenbichler) komt goed overeen met de Monte Carlo berekening.



Figuur H.0.2 Conditionele FN curven voor alle scenario's van doorbraken van dijkkring 15, 16 en 20_3, vergeleken met de exponentiële kansverdeling en een beta-verdeling met vormparameter -0.33..

De exponentiële verdeling lijkt voor het systeem van dijkkring 15, 16 en 20_3 een forse overschatting te geven van de kans op grote aantallen slachtoffers. Een beta-verdeling met vormparameter -0.33 geeft een betere fit op de FN curve. Echter, voor combinaties van dijkkring 14_3, 15 en 16 (zie Figuur onder) geeft deze vormparameter een onderschatting van de staart van de FN curve. Hier geeft een beta-verdeling met een vormparameter van -0.2 het beste resultaat. De optimale waarde van de vormparameter is dus niet eenduidig.



Figuur H.0.3: Conditionele FN curven voor alle scenario's van doorbraken van dijkkring 14_3, 15 en 16, vergeleken met de exponentiële kansverdeling en beta-verdelingen met vormparameters -0.33 en -0.2.

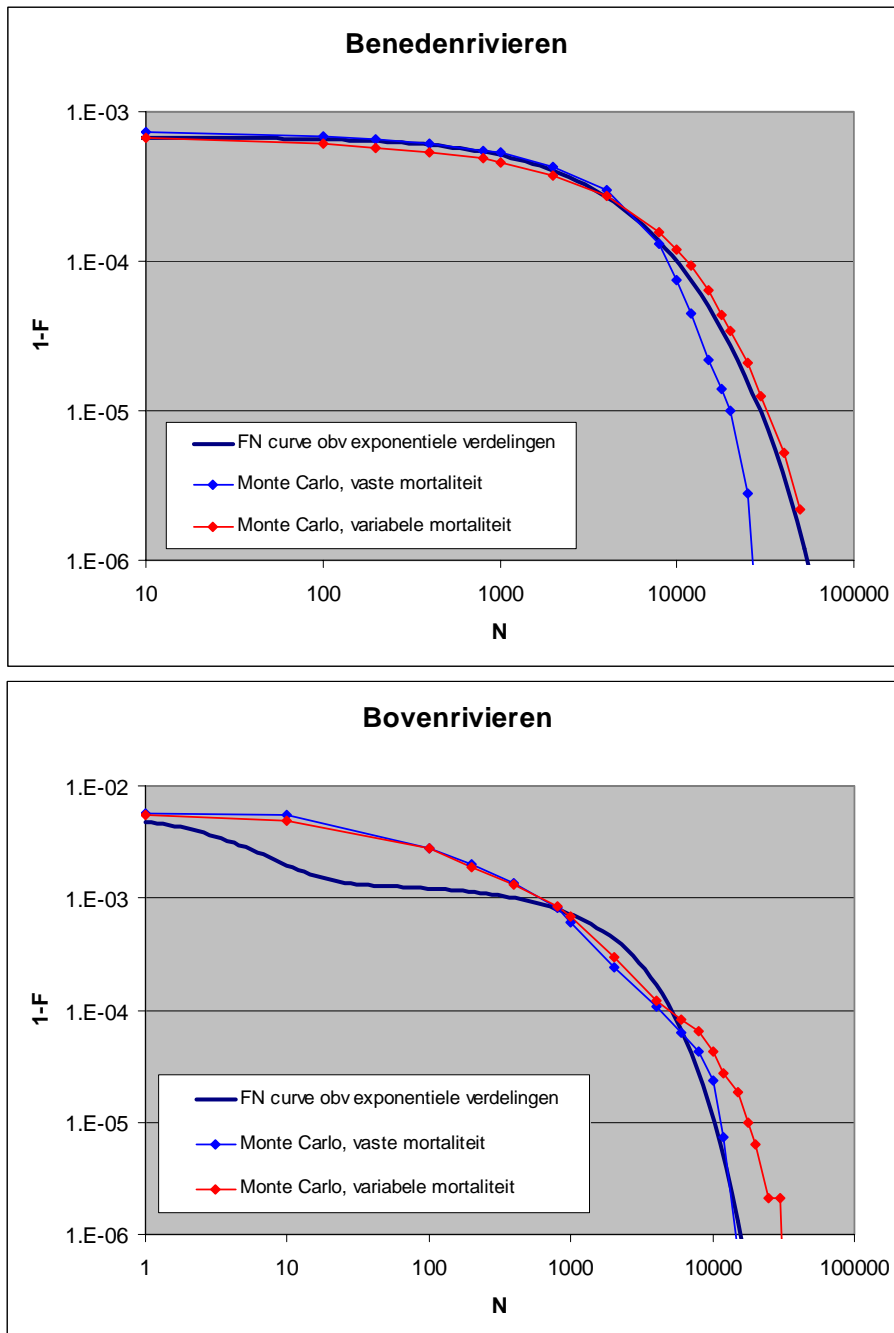
Deelsystemen benedenrivieren en bovenrivieren

Voor een deelsysteem zoals de benedenrivieren, met meer dan 10 dijkkringen, is het niet langer mogelijk om alle deelscenario's te beschouwen. In plaats daarvan is een Monte Carlo berekening uitgevoerd, waarbij trekkingen worden gedaan uit de verzameling van alle mogelijke deelscenario's. In de Monte Carlo berekening worden niet alle mogelijke scenario's gegenereerd, omdat dat er teveel zijn. Een groot aantal trekkingen levert wel genoeg informatie om een goed beeld te krijgen van de FN curve.

Bij het trekken van de scenario's wordt rekening gehouden met de overstromingskans van elke dijkkring en met de onderlinge correlaties tussen dijkkringen. Een dijkkring met een kleine kans op overstromen heeft een kleinere kans om getrokken te worden. Een naburige dijkkring heeft een verhoogde kans op doorbraak als deze gecorreleerd is met de eerste dijkkring. Voor elke dijkkring wordt een doorbraaklocatie gekozen volgens een trekking uit de conditionele kansverdeling van breslocaties. Ook de evacuatiefractie wordt bepaald door een gewogen trekking uit de verschillende mogelijkheden. Vanwege de kleine kans op overstromingen is het volledig willekeurig trekken van scenario's niet efficiënt. Daarom is een "bias" toegepast die de trekkans groter maakt dan in werkelijkheid. Voor deze bias wordt achteraf gecorrigeerd.

De resultaten zijn weergegeven in onderstaande Figuren. Voor het deelsysteem benedenrivieren geeft de exponentiële verdeling een lichte overschatting ten opzichte de FN curve op basis van de Monte Carlo berekening (factor 1.3 bij $N=10,000$, factor 2 tot 3 bij $N=20,000$). Echter, als rekening wordt gehouden met een variabele mortaliteit (onzekerheid met een factor 2 standaarddeviatie) dan komen de Monte Carlo berekening en de standaardberekening nagenoeg overeen. De mortaliteit kan door omstandigheden variëren, net als de evacuatiefractie. Het is daarom logisch om ook deze variabiliteit als een stochast te behandelen.

Voor het deelsysteem bovenrivieren geeft de Monte Carlo berekening aan dat de exponentiële verdeling de staart van de FN curve goed benadert. De beta-verdeling met een negatieve vormparameter zou in dit geval waarschijnlijk leiden tot een onderschatting van de staart. Toevoegen van variabiliteit van de mortaliteit (factor 2 standaarddeviatie) heeft in het deelsysteem bovenrivieren alleen invloed op de kans op meer dan 10,000 slachtoffers.



Figuur H.0.4: FN curven voor de deelsystemen benedenrivieren en bovenrivieren, zoals berekend volgens de standaardmethode (Hohenbichler) en daarbij gebruikmakend van een exponentiële verdeling. Het resultaat is vergeleken met dat van een Monte Carlo berekening. Van de Monte Carlo berekening zijn twee varianten uitgevoerd: één met een vaste mortaliteit en één met een variabele (onzekere) mortaliteit.

Conclusie

De analyses in deze bijlage geven aan dat de exponentiële verdeling een goede keuze is voor de spreiding van het aantal slachtoffers per deelscenario. Alleen voor het deelsysteem benedenrivieren lijkt daardoor een overschatting van de staart van de FN curve te ontstaan.

Voor dit deelsysteem zou een beta-verdeling een betere fit opleveren. Echter, de waarde van de vormparameter in de beta-verdeling is niet eenduidig. Deze blijkt per deelscenario te variëren. Voor enkele dijkkringen en voor het deelsysteem bovenrivieren blijkt de exponentiële verdeling zelfs een betere weergave van de staart van de FN curve op te leveren dan de beta-verdeling. Voor elk deelscenario geldt dus eigenlijk een aparte vormparameter, die varieert tussen negatieve waarden (beta-verdeling) en waarden rond nul (exponentiële verdeling). Het is niet werkbaar om voor elk deelscenario een aparte vormparameter af te leiden. Dit zou bovendien bij tot grotere gevoeligheid van de resultaten kunnen leiden. De exponentiële verdeling is daarom een robuuste en conservatieve keuze voor een kansverdeling voor de spreiding van het aantal slachtoffers.

De keuze is robuust omdat de exponentiële verdeling ongevoelig is voor de instelling van een vormparameter. De exponentiële verdeling is conservatief omdat zij in voorkomende gevallen de kans op een aantal slachtoffers hoger inschat dan op basis van de Monte Carlo berekening. De mogelijke overschatting in het deelsysteem benedenrivieren blijft in het bereik van 10,000 tot 20,000 slachtoffers beperkt tot een factor 2 tot 3. Indien rekening wordt gehouden met een variabele in plaats van een vaste mortaliteit (onzekerheid van een factor 2), dan is de overschatting niet langer aanwezig. Aangezien de mortaliteit ook in werkelijkheid kan variëren is dit geen onrealistische benadering.