

Overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke en financiële keuzes



HKV



Overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke en financiële keuzes



Eindrapport

Auteurs

Bas Kolen
Robin Nicolai

R00917
maart 2023

Samenvatting

Dit rapport gaat over een overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke en financiële vraagstukken. Dit nieuwe model is ontwikkeld, omdat er bij het opstellen van business cases voor ruimtelijke ontwikkelingen, beleggingen en verzekeringen behoefte is aan een rekenmethode die leidt tot realistischere overstromingskansen, lagere risicopremies en kosten in vergelijking met de bestaande methode. Het nieuwe model maakt gebruik van dezelfde openbare basisgegevens over kansen en gevolgen van overstromingen, maar het corrigeert voor veilige aannames in de deze publiekelijk beschikbare gegevens.

De kans op een overstroming door doorbraak van een waterkering in Nederland is klein. Als het misgaat dan kunnen de maatschappelijke gevolgen echter groot zijn. Overstromingen hebben meerdere oorzaken, zoals bijvoorbeeld extreme neerslag of stormvloed op zee. Extreme neerslag komt vaker voor, maar over het algemeen is de waterdiepte dan kleiner. Men spreekt dan vaak van wateroverlast.

In dit rapport combineren we wateroverlast en overstroming; het gaat om de gevolgen van piekneerslag, regionale gebiedsneerslag, doorbraken van primaire & regionale keringen en over hoogwater in buitendijkse gebieden. Het model maakt gebruik van openbaar beschikbare en gevalideerde informatie over verschillende overstromingsscenario's, neerslag- en waterstandstatistieken en de faalkansen van waterkeringen. Onderscheid kan worden gemaakt in verschillende zichtjaren, hoe het nu is en voor de zichtjaren 2050 en 2100 kunnen scenario's worden opgesteld, rekening houdend met klimaatverandering en continuering van het huidige beleid.

De kern van de methode is gelijk aan de methodiek, zoals die wordt gebruikt in de risicoanalyse voor het afleiden van de normen van de verschillende oorzaken van wateroverlast en overstromingen. Voor primaire waterkeringen is een verbetering van de risico-inschatting nodig, omdat de kans op overstroming conservatief blijkt te zijn ingeschat. Dit heeft verschillende oorzaken. Bij de schatting van de faalkansen van primaire waterkeringen is tot nu toe uitgegaan van een faaldefinitie conform de wijze waarop waterkeringen worden beoordeeld. Deze faaldefinitie leidt tot conservatisme in de faalkansen (uitgedrukt in een kans per jaar) van een dijktraject, omdat alleen met het begin van falen en niet met vervolgstappen in het faalproces rekening wordt gehouden. Er is ten tweede geen rekening gehouden met systeemwerking (een dijkdoorbraak leidt in rivieren en meren tot lagere waterstanden elders) en niet met meervoudige bressen. Ten derde zijn noodmaatregelen zoals het leggen van zandzakken niet meegenomen.

De kans op een dijkdoorbraak van een primaire waterkering ergens in Nederland, uitgezonderd Limburg, zou volgens de oude methode vaker dan gemiddeld eens in de 10 jaar (in het huidige klimaat) zijn. De laatste dijkdoorbraak was echter in 1953, hierna zijn vele waterkeringen versterkt en is het klimaat nauwelijks veranderd. Een overschatting van de faalkansen heeft tot gevolg dat risico's te hoog worden ingeschat voor ruimtelijke vraagstukken, verzekeringsoplossingen en investeringsbeslissingen over vastgoed en nutsvoorzieningen.

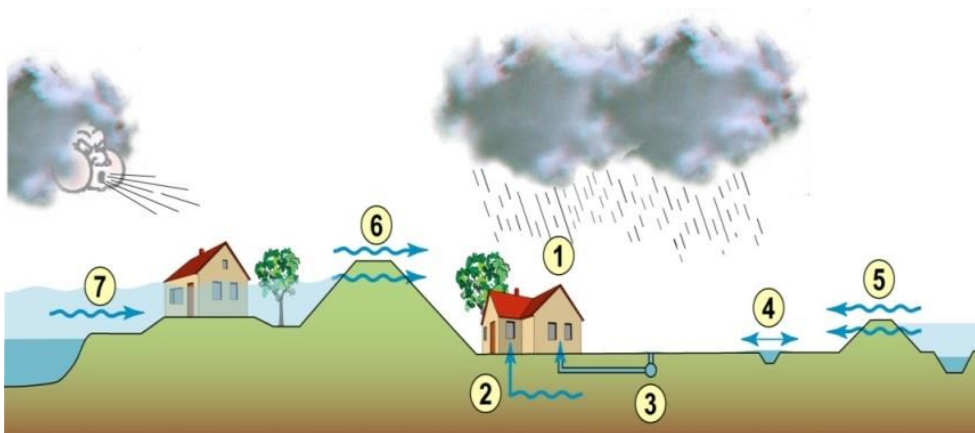
Het nieuwe model beschreven in dit rapport leidt tot realistischere doorbraakkansen en geeft inzicht in de frequentie en intensiteit waarmee gebieden en objecten getroffen worden door overstromingen. Het voorziet hiermee in de specifieke informatiebehoefte van ruimtelijke ordenaars, verzekeraars en investeerders in vastgoed en nutsvoorzieningen; zo kan voor overstromingen ook gekeken worden naar het gelijktijdig (dreigen van) overstromen van objecten (met schadecumulatie tot gevolg), en naar informatie op microniveau, zoals risicoprofielen per locatie.

Inhoud

1	Overstromingen in Nederland	1
1.1	Waterkeringen	2
1.2	Overstromingen in gebieden die niet beschermd worden door waterkeringen: buitendijkse gebieden	4
1.3	Neerslag	4
2	Beschikbare informatie over overstromingen en wateroverlast	5
3	Overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke investeringen en financiële vraagstukken	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Nieuw overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke planning en investeringsbeslissingen door aanscherping modellering van primaire waterkeringen	8
4	Resultaten	17
4.1	Kans op een doorbraak van primaire waterkeringen	17
4.2	Kans op blootstelling in een gebied	18
4.3	Lokaal overstromingsrisicoprofiel (microniveau)	20
5	Conclusies en aanbevelingen	23
6	Referenties	25
	Bijlage	27
A	Expertsessie	29

1 Overstromingen in Nederland

In dit onderzoek worden verschillende vormen van wateroverlast beschouwd: overlopen van riolen door extreme neerslag (type 3 in Figuur 1), overlopen van sloten en watergangen (type 4), doorbreken van regionale (type 5) en primaire (type 6) waterkeringen en tot slot, wateroverlast in buitendijks gebied (type 7)¹. Ontwerprichtlijnen en normering van dijken leiden tot een bepaalde inrichting van de infrastructuur. Deze inrichting bepaalt de omvang van wateroverlast. De gevolgen van extreme neerslag worden vaak wateroverlast genoemd, en de gevolgen van doorbreken van primaire keringen een overstroming. In dit onderzoek worden ze gecombineerd, omdat ze beide gevolgen voor bewoners, gebouwen en infrastructuur kunnen hebben.

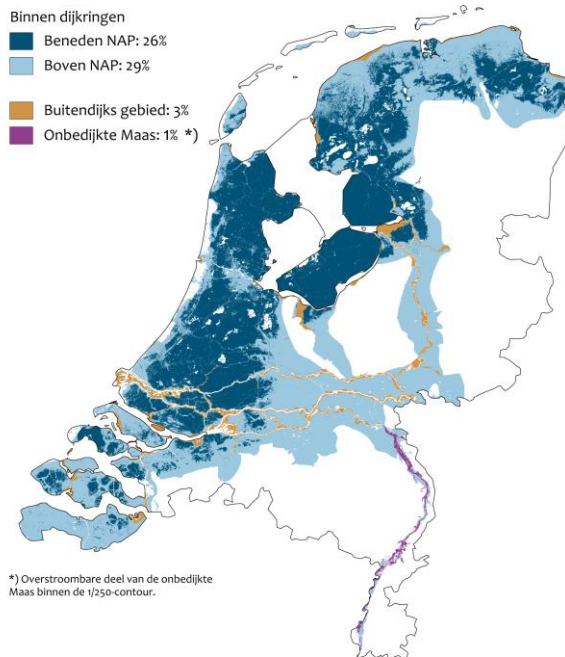


Figuur 1 Onderscheid in verschillende oorzaken die kunnen leiden tot wateroverlast en overstromingen. 1. Water in huis; 2. Hoge grondwaterstanden; 3. Overbelasting riool; 4. Overstroming oppervlaktewater; 5. Bezijken regionale kering; 6. Bezijken primaire kering; 7. Buitendijkse gebieden. (Klopstra en Kok 2009).

Ongeveer 26% van het landoppervlak van Nederland ligt onder NAP. Ongeveer 59% van het landoppervlak kan overstroomd vanuit de zee, de meren en de grote rivieren (zie Figuur 2). Heel Nederland is kwetsbaar voor neerslag. De diepte van een overstroming of wateroverlast is niet alleen afhankelijk van de (lokale) maaiveldhoogte. Ook andere gebiedskenmerken (hellend of niet), het watersysteem en het aanbod van water is van belang. Langs de kust is de periode van extreem hoge waterstanden door een stormvloed bijvoorbeeld korter dan langs de rivier waar afvoergolven weken kunnen aanhouden. Het reliëf van het gebied, de ligging van snelwegen en de aanwezigheid van bijvoorbeeld hoge zandruggen hebben ook invloed op de verspreiding van het water. Watergangen kunnen het water weer sneller verspreiden. Sommige diepe polders kunnen met meer dan 5 meter overstroomd, maar dit betreft slechts een klein deel van Nederland (ENW, 2016).

¹ Neerslag die direct in woningen valt (1) laten we buiten beschouwing omdat dit los staat van het ontwerp van het watersysteem of waterkeringen. Ook overlast door grondwater (2) laten we buiten beschouwing omdat dit niet gekoppeld is aan piekneerslaggebeurtenissen die leiden tot overlopen van sloten en riolen en dijkdoorbraken maar veel meer gerelateerd is aan jaarsommen en peilbeheer.

Overstromingsgevoelig gebied



Figuur 2 Overstromingsgevoelig gebied en landoppervlak onder zeeniveau. Bron: PBL (2007).

1.1 Waterkeringen

Het is niet realistisch dat al het overstroombaar gebied in Nederland tijdens één overstromingsgebeurtenis overstroomt. Dit heeft onder andere te maken met het type overstroming en de bescherming van gebieden tegen overstromingen. Een zware stormvloed kan leiden tot doorbraken langs de kust maar zal niet leiden tot overstromingen in het rivierengebied. Een stormvloed zal in de meeste gevallen ook niet leiden tot een overstroming van het gehele gebied langs de kust. Zo zal ook hoogwater in het rivierengebied niet leiden tot overstroming van gebieden langs de kust, en is de kans op extreme afvoer op de rivieren en een stormvloed die leidt tot doorbraken langs de kust vrijwel nihil. Combinaties van beperkte stormvloed op zee en hoogwater op de rivier kunnen in overgangsgebieden wel overstromingen tot gevolg hebben (bijvoorbeeld rondom Dordrecht) maar die zullen in het rivierengebied en langs de kust weer niet leiden tot dijkdoorbraken. Het is daarom niet realistisch dat een overstromingsgebeurtenis heel Nederland tegelijkertijd onder water zet.

Bij de bescherming tegen overstromingen wordt onderscheid gemaakt tussen primaire en regionale waterkeringen.

1.1.1 Primaire waterkeringen

Primaire waterkeringen, een stelsel van dijken, duinen en kunstwerken met een lengte van grofweg 3.500 km, beschermen Nederland tegen overstromingen vanuit zee, de grote rivieren en de meren (buitenwater genoemd). In de Waterwet zijn eisen gesteld aan deze primaire waterkeringen. Die eisen zijn gebaseerd op afwegingen over welke overstromingsrisico's (de combinatie van kans en gevolg) acceptabel zijn (ENW, 2016). Hierbij is uitgegaan van twee principes.

Ten eerste kan iedere inwoner rekenen op dezelfde minimale bescherming tegen overlijden (solidariteitsprincipe) wat basisveiligheid wordt genoemd.

Het minimale beschermingsniveau is uitgedrukt in een lokaal individueel risico waarbij rekening is gehouden met de evacuatiemogelijkheden. Het tweede principe is economische doelmatigheid. Via een MKBA en het groepsrisico is bepaald dat daar waar de gevolgen groot zijn in termen van schade en aantallen slachtoffers, de kans op een overstroming navenant kleiner moet zijn, rekening houdend met de kosten van dijkversterking. De gevolgen van een dijkdoorbraak zijn bepaald met behulp van modellen. Voor de primaire keringen zijn ongeveer 1900 verschillende overstromingsscenario's uitgewerkt. Uiteindelijk is op basis van beide principes de norm voor iedere primaire waterkering bepaald. De norm is sinds 2017 uitgedrukt in een overstromingskans en vastgelegd in de Waterwet.

Om ervoor te zorgen dat waterkeringen blijven voldoen aan de normen worden deze keringen periodiek beoordeeld. Dit gebeurt minstens iedere 12 jaar. Bij een beoordeling wordt gecontroleerd of de waterkering voldoet aan de gestelde eisen. Als een kering niet voldoet, dan moet deze worden versterkt. Momenteel voldoet een groot deel van de waterkeringen niet aan de sinds 2017 geldende normen. Dijkversterkingen zijn onderdeel van het HoogWaterBescheringsProgramma (HWBP). Veelal wordt dan een dijkontwerp gemaakt dat tenminste meerdere decennia mee kan gaan, waarbij rekening wordt gehouden met klimaatverandering. Uiterlijk in 2050 zullen de waterkeringen (moeten) voldoen aan de eisen die in de Waterwet staan. Om te blijven voldoen aan de norm zullen de keringen waarschijnlijk ook na 2050 versterkt moeten worden.

Overstromingsrisico's zullen door nieuwe inzichten over klimaatverandering, het inwoneraantal en de economische waarde in de tijd veranderen, eens in de 12 jaar wordt geëvalueerd of de normen nog voldoen, of strenger of minder streng moeten worden.

1.1.2 Regionale waterkeringen

Regionale waterkeringen, met een totale lengte van ongeveer 14.000 km, beschermen Nederland tegen dijkdoorbraken van binnenwateren zoals kanalen, boezems en regionale (bedijkte) rivieren. De eisen (normen) aan regionale waterkeringen worden vastgelegd door provincies en uitgedrukt in een overschrijdingskans van de waterstand, bij deze waterstand moet de kering blijven staan. De hoogte van de norm hangt af van de schade na een doorbraak; hoe hoger deze schade, hoe strenger de norm. Deze kans is niet gelijk aan de kans op een overstroming, omdat de sterkte van de waterkering niet opgenomen is in de norm. In de ontwerprichtlijn voor boezemkades is al aangegeven dat de faalkans van een regionale waterkering een factor 5 kleiner kan zijn dan de overschrijdingskans van de waterstand bij deze kering (Fugro 1999). In de praktijk lijkt deze factor zelfs nog wat groter te zijn (Rikkert en Kok 2019), en de faalkans dus kleiner. Dat komt omdat de sterkte van de waterkering veelal veel groter is dan de veelal conservatieve aannames in de modellen.

De eisen voor regionale waterkeringen zijn vastgelegd in provinciale verordeningen.

Hierin is ook voorzien dat deze waterkeringen worden beoordeeld en zo nodig versterkt door de waterbeheerders.

1.2 Overstromingen in gebieden die niet beschermd worden door waterkeringen: buitendijkse gebieden

Een deel van Nederland ligt direct aan buitenwater (zee, rivier, grote meren) en wordt helemaal niet beschermd door waterkeringen, bijvoorbeeld de uiterwaarden langs de rivier. Deze buitendijkse gelegen gebieden kunnen overstromen bij hoge rivierafvoeren en/of stormvloed. Dit gaat om ongeveer 2% van het landoppervlak van Nederland.

Voor de volledigheid merken we op dat een deel van Nederland uit 'hoge gronden' bestaat.

Dit zijn simpel gezegd gebieden die door hun natuurlijke ligging niet kunnen overstromen (denk aan hoger gelegen gebieden zoals de Veluwe, maar ook het grootste deel van Drenthe en delen van Overijssel, Noord-Brabant en Limburg zijn hoge grond).

1.3 Neerslag

Gebieden kunnen ook overstromen wanneer (onbedijkte) regionale wateren, zoals beken, buiten hun oevers treden. Dit gebeurt als de waterstanden in het regionale systeem snel stijgen door langdurende (> 1 dag) hevige neerslag (zoals bijvoorbeeld in Valkenburg in de zomer van 2021). Dit wordt overstroming vanuit het regionale watersysteem genoemd en gebeurt als de waterstanden in het regionale systeem snel stijgen door grote hoeveelheden neerslag. Op nationaal niveau zijn 92 scenario's verspreid over heel Nederland ontwikkeld. De terugkeertijden van deze neerslaggebeurtenissen variëren van 10 tot 1.000 jaar. De extreme waterstanden in het systeem volgen uit berekeningen met bijvoorbeeld een SOBEK2D model bij maatgevende neerslag in het stroomgebied.

Daarnaast kan extreme piekneerslag zorgen voor water op straat. Dit betreft over het algemeen lokale buien die tot geringe waterdieptes leiden. Op nationaal niveau zijn 3 scenario's ontwikkeld voor wateroverlast door kortdurende hevige regenval. Deze scenario's gaan uit van neerslaggebeurtenissen met een duur van 2 uur. De bijbehorende neerslagvolumina die in die tijdsperiode van twee uur vallen hebben terugkeertijden van 10, 100 en 1.000 jaar. De scenario's schetsen dus de wateroverlast die ontstaat door oppervlakkige afstroming bij piekbuien van 2 uur.

Genoemde neerslagscenario's zijn ook gebruikt voor het opstellen van de overstromingsgevaarkaarten door Nederland in het kader van de EU Hoogwaterrichtlijn.

De kans op neerslag kan overigens worden bepaald op basis van de neerslagstatistieken voor waterbeheer (Beersma et al., 2019). Deze statistiek is voor zowel korte duren (< 12 uur) als voor lange duren (> 1 dag) afgeleid.

2 Beschikbare informatie over overstromingen en wateroverlast

De informatie over scenario's en faalkansen is openbaar beschikbaar en gevalideerd door de aanbieder van informatie. De volgende informatiebronnen zijn van belang:

- LIWO (aangeboden door RWS) als bron voor overstromingsscenario's en faalkansen van waterkeringen;
- De neerslagstatistieken voor waterbeheer van STOWA;
- Hydra-NL en OI2014 voor waterstandstatistieken in 2050 en 2100 gegeven klimaatscenario's (uitgegeven door RWS).

Via het webportaal LIWO² is veel informatie over overstromingen beschikbaar, deze informatie wordt aangeboden door Rijkswaterstaat, jaarlijks geactualiseerd en bijvoorbeeld gebruikt voor EU-rapportages. De onderliggende informatie is afkomstig van de verschillende waterbeheerders in Nederland. De versie van de zomer van 2022 bevat voor 4.851 unieke overstromingsscenario's informatie over het overstroomd gebied, de maximale inundatiediepte, de duur, de schade en het aantal slachtoffers. De data worden ieder jaar geactualiseerd. De scenario's zijn onderverdeeld in de vier genoemde categorieën: primaire waterkeringen (1846), regionale waterkeringen (2889), regionale wateren (92) en buitendijks gebied (24). Voor ieder scenario is een overstroming gesimuleerd. Het verloop van de overstroming hangt onder andere af van aannames over de waterstand tegen de dijk ofwel de hoeveelheid neerslag, de bresgroei, de gebruikte resolutie van de hoogteligging in het achterland (AHN) en het type simulatiemodel (van heel eenvoudig tot heel geavanceerd). Economische schade wordt bepaald met schadefuncties die de waterdiepte aan een percentage van de maximale schade relateren.

Daarnaast bevat LIWO-informatie over faalkansen van waterkeringen. Het gaat hierbij zowel om de normen waar de waterkeringen (in 2050) aan moeten voldoen en de actuele faalkansen van waterkeringen. De actuele faalkansen zijn tot stand gekomen door een analyse van de hydraulische belastingen en de sterkte van de waterkeringen voor verschillende faalmechanismen. Hierbij zijn de volgende aannames gedaan:

1. Faalgebeurtenissen van dijktrajecten (en gevolgen) zijn onafhankelijk verondersteld. Falen van een waterkering is dus geheel onafhankelijk van falen van andere waterkeringen. Ook bij het bepalen van de gevolgen is hiervan uitgegaan. Ten slotte is er uitgegaan van enkelvoudige bressen;
2. De kans op falen (dijkdoorbraak) volgt uit een bepaalde faaldefinitie. De faaldefinitie is afkomstig uit de wijze waarop waterkeringen worden beoordeeld en ontworpen. Over het algemeen is in deze definities verondersteld dat het 'begin van falen' (bijvoorbeeld een ontbrekende steen in de steenbekleding) betekent dat de waterkering bezwijkt. In werkelijkheid is echter nog geen sprake van falen omdat andere mechanismen nog moeten optreden.

² LIWO versie 2022.2.0 - <https://basisinformatie-overstromingen.nl/#/maps>

Voor mechanisme piping is het begin van falen bijvoorbeeld het ontstaan van horizontale pipegroei (zie Figuur 3). De faaldefinitie is dus conservatief en hierdoor is de faalkans groter dan de daadwerkelijke kans op een overstroming;

3. Noodmaatregelen, zoals het opkisten van wellen en het plaatsen van zandzakken, worden niet meegenomen bij de bepaling van de faalkansen van waterkeringen.



Toename waterspanningen en opdrijven / Heave / Horizontale pipegroei / doorgaande pipe / kruinverlaging en bresgroei

Figuur 3 Voorbeeld faaldefinitie en reststerkte bij piping. De huidige faaldefinitie bevat de stappen tot en met horizontale pipegroei (4^e plaatje van links).

Met Hydra-NL en OI2014 zijn er databases beschikbaar die ontwerpwaterstanden bevatten voor verschillende zichtjaren en klimaatscenario's zoals die nu worden gebruikt voor primaire waterkeringen. Deze informatie is gebruikt om de kans op hoogwater in buitendijks gebied op te stellen rekening houdend met klimaatverandering, en de kansen aan te passen voor de belastingcombinaties waarbij overstromingsscenario's zijn opgesteld.

In het onderzoek van STOWA naar neerslagstatistieken voor het waterbeheer (Beersma et al., 2019) is de kans op een bepaald neerslagvolume gegeven een duur berekend. Onderscheid kan worden gemaakt in gebeurtenissen met korte duur (piekbuien) en langere duur van meerdere dagen (gebiedsneerslag die leidt tot overlopen watergangen zoals in 1998 in Delfland en Noordoost Nederland). Deze statistieken bevatten ook de impact van klimaatverandering.

LIWO bevat geen scenario's voor toekomstige situaties. De waterdiepte kaarten houden dus geen rekening met door klimaatverandering toegenomen hoogwaterstanden. In het nieuwe overstromingsrisicomodel verwerken we het effect van klimaatverandering op de waterdieptes daarom op een andere manier. Wanneer LIWO ook scenario's voor andere zichtjaren bevat, dan kunnen deze ook aan het model worden toegevoegd. Dit geldt ook voor zogenaamde waterbom scenario's, extreme neerslaggebeurtenissen met een bovenregionale impact.

3 Overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke investeringen en financiële vraagstukken

3.1 Inleiding

Het combineren van alle informatie over overstromingen en wateroverlast zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk geeft inzicht in de kans op blootstelling aan de gevolgen van overstromingen en wateroverlast in een gebied of bij een object. Hierbij zal rekening moeten worden gehouden met de afhankelijkheid tussen overstromingen van primaire waterkeringen.

Voordat de informatie is gecombineerd is nog gekeken naar de kans op een overstroming als gevolg van de verschillende oorzaken van wateroverlast.

- Voor neerslag zijn kansen gebaseerd op puntneerslagstatistiek. Op het schaalniveau van heel Nederland is de kans dat bijvoorbeeld een 1/1.000 per jaar gebeurtenis optreedt groter dan de kans dat het ergens in Nederland op een bepaalde locatie valt. Neerslaggebeurtenissen hebben een veel kleinere schaal dan geheel Nederland. Op verschillende plekken kunnen dus (onafhankelijk van elkaar) 1/1000 per jaar gebeurtenissen optreden.
- Voor buitendijkse gebieden is een aantal scenario's uitgewerkt gegeven de verschillende terugkeertijden. Onderscheid kan worden gemaakt in het rivierengebied, het overgangsgebied en de kust.
- Voor regionale keringen zijn er verschillende overstromingsscenario's beschikbaar. Hierbij is de veronderstelling dat als een regionale waterkering faalt dat dit tot gevolg heeft dat de waterstanden op de regionale systemen zodanig dalen dat er geen andere waterkering meer faalt. Op basis van de mogelijke gevolgen van regionale doorbraken is dan ook een samengesteld scenario opgesteld dat hoort bij een bepaalde terugkeertijd. Voor regionale waterkeringen is de norm uitgedrukt in een overschrijdingskans van de waterstand. Deze overschrijdingskans van de waterstand is geen faalkans van de waterkering. In de modellering is hier rekening mee gehouden.

In het vorige hoofdstuk is toegelicht hoe de faalkansen van primaire keringen zijn ingeschat. Indien we uitgaan van de in LIWO beschikbare faalkansen en de rekenmethode gebruikt bij de normering, dan is de kans op een overstroming door een doorbraak van een primaire waterkering groter dan eens in de 10 jaar. Hierbij zijn de waterkeringen in Limburg nog buiten beschouwing gelaten. Deze kans is opvallend groot. De laatste doorbraak van een primaire kering was in 1953: in de 1953 gebeurtenis zijn vele keringen doorgebroken. Sindsdien zijn vrijwel alle waterkeringen versterkt, de Deltawerken zijn aangelegd en de normen zijn strenger gemaakt. Dit vraagt om een nieuwe rekenmethode.

Om tot een nieuwe methode te komen, beschouwen we nogmaals de aannames van de faalkansen en de redenen waarom deze tot een overschatting van de overstromingskans, en dus overstromingsrisico's, leiden:

1. *Onafhankelijke faalgebeurtenissen.* De gebieden die kunnen overstroomd zijn geen van elkaar afgezonderde eilanden. In geval van een overstroming op de rivier zal de waterstand benedenstrooms dalen, waardoor elders de kans op een doorbraak kleiner wordt (systeemwerking). Ook kan een gebied overstroomd via een ander gebied (cascadewerking). Ook bestaan normverschillen tussen aansluitende en tegenover elkaar liggende dijktrajecten.
2. *Faaldefinitie.* Een beschadigde bekleding of het ontstaan van een 'pipe' onder de dijk hoeft echter niet direct het bezwijken van de waterkering als gevolg te hebben. Hiertoe moeten eerst nog andere gebeurtenissen optreden (zie Figuur 3). Er is dus nog enige reststerkte.
3. *Noodmaatregelen.* Onderzoek van Rijkswaterstaat in de Verenigde Staten laat zien dat noodmaatregelen de faalkans daar met een factor 2 tot 5 kunnen verlagen. Ook in Nederland worden noodmaatregelen genomen, zoals onlangs nog bij het hoogwater in 2021 in Limburg langs de Maas.

De werkelijke overstromingsrisico's zijn natuurlijk niet afhankelijk van een rekenwijze, maar in de modellering maken we keuzes en doen we aannames om de risico's te kwantificeren. Vanuit een risicomijdend waterveiligheidsbeleid voor het afleiden van de normen en dimensies van waterkeringen zijn de keuze voor een conservatief model verdedigbaar zijn. De impact van een overstroming is dermate groot dat enig conservatisme te rechtvaardigen is. Het gevolg hiervan is dat waterkeringen over het algemeen iets sterker zijn dan ze moeten zijn (en dat de kosten van dijkverbetering iets hoger uitvallen dan nodig). De vraag is of dit conservatisme in de aannames ook toegepast moet worden bij ruimtelijke afwegingen en investeringsbeslissingen. Dit zou namelijk leiden tot hogere berekende risico's en ook nog een keer tot extra investeringen in ruimtelijke maatregelen en hogere risicopremies. Hierbij wordt opgemerkt dat op basis van meerlaagsveiligheid analyses bekend is dat in Nederland investeringen in preventie vele malen doelmatiger zijn dan investeringen in gevolgbeperking (ENW, 2016).

Om de risico's beter in te schatten op basis van de beschikbare informatie is een andere, nieuwe, modelmatige aanpak vereist, waarin op een andere manier wordt omgegaan met bovenstaande aannames. Dit begint bij het definiëren van deelgebieden van het watersysteem waarbinnen systeemwerking en afhankelijkheid van faalgebeurtenissen bestaat, op zo'n manier dat overstromingen in verschillende deelgebieden als onafhankelijke gebeurtenissen worden verondersteld.

3.2 Nieuw overstromingsrisicomodel voor ruimtelijke planning en investeringsbeslissingen door aanscherping modellering van primaire waterkeringen

Het nieuwe overstromingsrisicomodel (dus inclusief neerslag) gaat uit van dezelfde basis aan informatie over neerslag, dijktrajecten, kansen, normen en gevolgen als eerder beschreven. Alleen voor de benadering van primaire waterkeringen is de rekenwijze aangepast door minder conservatieve keuzes te maken.

In het nieuwe model zijn de volgende parameters van een overstromingsscenario van belang:

- De faalkans van een normtraject in de huidige situatie;
- Norm van een waterkering (faalkans die uiterlijk in 2050 wordt nagestreefd);
- Breslocatie van een scenario;
- Terugkeertijd van de hydraulische belastingen die gebruikt zijn opgelegd aan een overstromingsscenario;
- Waterdieptes bij een overstromingsscenario.

Aan deze basisinformatie is in het nieuwe model kennis toegevoegd over afhankelijkheden tussen overstromingen van verschillende gebieden. Ook is een schatting gemaakt van het effect van andere aannames op de overstromingskans. Het nieuwe model bestaat uit de volgende stappen:

1. Opstellen van een gebiedsindeling voor de normtrajecten in Nederland in (on)afhankelijke gebieden (bijvoorbeeld Rivierengebied en Kust Zuid);
2. Het definiëren van kansklassen (bijvoorbeeld 1/100-1/200);
3. Het samenstellen van mogelijke (meervoudige) overstromingsscenario's;
4. Het bepalen van kansen per scenario;
5. Het bepalen van overstromingsrisico's van gebieden en risicoprofielen.

3.2.1 Stap 1: Opstellen van een gebiedsindeling in (on)afhankelijke gebieden

De aard van de dreiging (rivierafvoer, stormvloed, windopzet, regionale keringen, etc.) en de samenhang hiertussen bepalen welke gebieden juist wel of niet op hetzelfde moment door hoogwater worden bedreigd. Hoogwaterstanden op de Waddenzee en de Maas zijn onafhankelijk, omdat de stormopzet op de Waddenzee onafhankelijk is van de rivierafvoer op de Maas.

Op basis van de aard van de dreiging kunnen voor primaire keringen acht deelgebieden worden onderscheiden, op een zelfde manier zoals bij het opstellen van de 'worst credible floods' is gedaan (Ten Brinke et al., 2010). Dit gaat om 3 deelgebieden langs de kust, 3 in het rivierengebied, het merengebied en het benedenrivierengebied (zie Tabel 1).

Naam gebied	Dreiging
Bovenrivierengebied Maas en Waal	Hoge afvoeren op de Maas en Waal
Bovenrivierengebied Rijn en IJssel	Hoge afvoeren op de Rijn en IJssel
Merengebied	Stormopzet IJsselmeergebied
Kust Zuid	Stormopzet Zeeuwse Delta
Kust Midden	Stormopzet Hollandse Kust
Kust Noord	Stormopzet Waddenzee
Benedenrivierengebied	Hoge rivierafvoer in combinatie met stormopzet
Limburgse Maas	Hoge afvoer Limburgse Maas

Tabel 1 Definitie gebieden.

Eventuele systeemwerking kan in het model dus alleen optreden binnen ieder gebied.

De systeemwerking in een gebied kan leiden tot een gebeurtenis met één of meer bressen in dat gebied. Faalgebeurtenissen in verschillende gebieden zijn onafhankelijk verondersteld.

In de LIWO-database zijn 6 EDO scenario's opgenomen (Ten Brinke et al., 2010). Deze ergst denkbare scenario's zijn aan ons model toegevoegd. Deze scenario's leiden tot gebiedsoverstijgende overstromingsgebeurtenissen.

Een voorbeeld hiervan is de EDO Noordelijke Kust, waarin grote delen van Friesland en Groningen, de Noordoostpolder en de Kop van Noord-Holland overstromen. Dit komt overeen met overstromingen in de door ons gedefinieerde gebieden Kust Noord, Kust Midden en Merengebied.

Relatie met andere oorzaken wateroverlast

Het model maakt ook onderscheid tussen buitendijkse gebieden, het regionale watersysteem en regionale keringen. Faalgebeurtenissen van regionale keringen en inundaties vanuit het regionale watersysteem zijn onafhankelijk verondersteld van faalgebeurtenissen van primaire keringen. Het overstromen van buitendijks gebied is gecorreleerd met de overstroming van primaire keringen.

3.2.2 Stap 2: Het definiëren van kansklassen

De faalkansen, zoals berekend met de modellen betreffen puntschattingen. Vanwege de overzichtelijkheid in de toepassing zijn er kansklassen opgesteld. Deze kansklassen zijn afgestemd op de wensen van investeringsbeslissingen en verzekeringen die iets fijnmaziger zijn dan voor ruimtelijke planning.

Er zijn 9 kansklassen gedefinieerd met als klassemiddens 1/100, 1/200, 1/500, 1/1.000, 1/2.000, 1/5.000, 1/10.000, 1/100.000, 1/1.000.000. De kansklassen zijn op basis van de logaritme van de kansen gedefinieerd (zie Tabel 2). Zo loopt de klasse met midden 1/200 van 1/141 tot 1/316 en de klasse met midden 1/500 van 1/316 tot 1/707.

Naam klasse	Klassenmidden	Ondergrens	Bovengrens
T100	1/100	-	1/141
T200	1/200	1/141	1/316
T500	1/500	1/316	1/707
T1000	1/1000	1/707	1/1414
T2000	1/2000	1/1414	1/3162
T5000	1/5000	1/3162	1/7071
T10000	1/10000	1/7071	1/31623
T100000	1/100000	1/31623	1/316228
T1000000	1/1000000	1/316228	-

Tabel 2 Definitie kansklassen.

Op basis van de faalkansen van waterkeringen in LIWO is bepaald in welke kansklassen dijkdoorbraken mogelijk zijn in de acht gebieden.

Vervolgens is voor primaire keringen middels een Delphi aanpak met een groep van 5 experts bepaald wat de kans is op één of meer doorbraken bij een gebeurtenis horende bij deze kansklasse in het gebied (zie bijlage A). Met deze expertinschatting worden de aannames in de faalkans aangepast in het nieuwe model. Zo is geschat wat de kans is op 0, 1, 2, 3 of meer dijkdoorbraken gegeven een afvoergolf, stormvloed of combinatie hiervan met een bepaalde overschrijdingskans (1/100, 1/1.000, ..., 1/1.000.000 jaar). Dit heeft geleid tot een matrix met conditionele kansen voor het aantal bressen in ieder gebied per kansklasse.

Een voorbeeld van zo'n matrix is gegeven in Tabel 3 voor een willekeurig gebied. We lichten de geel gemarkeerde cellen toe. De conditionele kans op geen enkele bres (0 bressen) bij T2000 gelijk aan 0,6 (60%). De kans op precies één bres in de kansklasse 1/2000 gelijk aan 0,3 (30%). De kans op twee bressen is 0,1 (10%). De kans op geen enkele bres is 0,6 en de kans op 1 of meer bressen is 0,4.

Num	T100	T200	T500	T1000	T2000	T5000	T10000	T100000	T1000000
0	1.0	1.0	0.8	0.7	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1
2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

Tabel 3 Conditionele kans op 0, 1, 2, ... bressen in een regio voor verschillende terugkeertijden (1/kansklasse).

Relatie met andere oorzaken wateroverlast

Voor buitendijkse gebieden is uitgegaan van de waterstandstatistiek op de aanliggende (buiten)wateren. Wederom worden deze gebeurtenissen dan op basis van de kans van voorkomen toegekend aan een klasse zoals hierboven beschreven.

Voor neerslag is zoals beschreven uitgegaan van de puntstatistiek uit STOWA (2019), waarbij verondersteld wordt dat de scenario's voor de lange duren (gebiedsneerslag) en de korte duren (piekneerslag) onafhankelijke gebeurtenissen zijn.

Voor regionale waterkeringen is verondersteld dat de kans op een doorbraak 5 x kleiner is dan de norm (overschrijdingskans van de waterstand). Hierbij is rekening gehouden met de sterkte van de regionale keringen en de afhankelijkheid in een boezemstelsel. Ook is aangenomen dat het bezwijken van een regionale kering leidt tot een dusdanige daling van de waterstand ('ontlasting') dat een doorbraak elders in het watersysteem nihil is. Op basis van de faalkans van de verschillende scenario's worden deze scenario's gekoppeld aan de bovengenoemde klassen.

3.2.3 Stap 3: Het samenstellen van mogelijke (meervoudige) overstromingsscenario's

Per gebied uit stap 1 is voor iedere kansklasse uit stap 2 een lijst met overstromingsscenario's opgesteld, deze gebeurtenissen horen bij een gebied zoals gedefinieerd in stap 1. Dit kan dus gaan om enkelvoudige en meervoudige doorbraken maar ook de kans dat er geen doorbraak plaatsvindt. De individuele overstromingsscenario's uit LIWO gaan uit van een waterstandsverloop wat gekoppeld is aan de overschrijdingskans van de buitenwaterstand, bijvoorbeeld 1/1.250 en 1/12.500 per jaar.

De huidige (of genormeerde in 2050 en verder) faalkans van een waterkering bij een breslocatie bepaalt aan welke kansklassen de breslocatie wordt gekoppeld. Als de jaarlijkse overstromingskans 1/10.000 is, dan komt de breslocatie terecht in alle klassen met kans kleiner of gelijk aan 1/10.000.

Vervolgens worden scenario's aan de hand van de overschrijdingskans van de gehanteerde buitenwaterstand in die scenario's toegewezen aan de bressen in iedere kansklasse. Zo zijn de scenario's waarvan de buitenwaterstand een overschrijdingskans van 1/1.250 resp. 1/12.500 per jaar heeft, gekoppeld aan de kansklasse 1/1.000 resp. 1/10.000 per jaar. Als de overschrijdingskansen niet precies in de kansklassen liggen, dan is het scenario met de meest nabijgelegen overschrijdingskans toegewezen. Merk op dat per breslocatie maximaal 1 scenario wordt toegewezen aan een kansklasse.

Naast de ruim 1900 overstromingsscenario's voor primaire waterkeringen in LIWO zijn ook meervoudige doorbraakscenario's in een gebied beschouwd. Deze meervoudige scenario's zijn gebaseerd op combinaties van de enkelvoudige doorbraakscenario's in LIWO.

Voor scenario's met 4 of meer bressen zijn afzonderlijke 'maximale' overstromingsscenario's opgesteld voor iedere kansklasse waarvoor dit van toepassing is. Een maximaal scenario is hierbij gedefinieerd als de gebeurtenis waarbij alle enkelvoudige bressscenario's in een gegeven gebied voor een bepaalde kansklasse optreden. Uit Tabel 3 volgt bijvoorbeeld dat de conditionele kans op 4 of meer bressen voor de kansklasse 1/2000 (T2000) gelijk is aan 0. In dat geval is een maximaal scenario niet van toepassing.

3.2.4 Stap 4: Het bepalen van de kans op een scenario

In deze stap wordt de kans op een mogelijk scenario bepaald op basis van de voorgaande stappen. Ieder mogelijk scenario krijgt zo een unieke kans van voorkomen.

De werkwijze voor het afleiden van de conditionele kans is hierbij als volgt:

- De conditionele kans voor de enkelvoudige bressen in de kansklasse is gelijk aan p_1/N_1 , waarbij p_1 de conditionele kans op 1 bres voor de gegeven kansklasse is en N_1 het aantal enkelvoudige bressscenario's is in het betreffende gebied zoals gedefinieerd in stap 1 voor de gegeven kansklasse. De kans p_1 volgt uit de inschatting van de experts. Het aantal N_1 volgt uit stap 2. Bijvoorbeeld als er 3 enkelvoudige overstromingsscenario in de klasse 1/1.000 zijn opgenomen betekent dat deze gelijkwaardig worden beschouwd binnen deze kansklasse. Als er zwakkere plakken zijn dan zouden die in een hogere kansklasse al zijn opgenomen, en sterkere keringen bij een lagere kansklasse. De kansen op de scenario's zijn dus uniform verdeeld.
- Voor meervoudige bressen is de procedure nagenoeg hetzelfde. De conditionele kans is gelijk aan p_i/N_i , waarbij p_i de conditionele kans op $i > 1$ bressen is en N_i het aantal scenario's met precies i bressen. De kans p_i volgt uit de inschatting van de experts. Het aantal N_i volgt uit stap 2 en is gelijk aan $\binom{N_1}{i}$ met $i = 2, 3, \dots$. De kansen op de meervoudige bressscenario's zijn dus uniform verdeeld.
- De conditionele kans op het maximale scenario is de helft van de kans op 4 of meer bressen, de kans op 3 bressen is nog vermeerderd met de overige helft van de kans op 4 bressen of meer. Deze kansruimte is verdeeld om niet alle kansruimte toe te kennen aan het maximale scenario, omdat dit een veel kleinere kans heeft.

De bepaling van de conditionele kansen ofwel de kansbijdragen van de gebeurtenissen wordt in Tabel 4 toegelicht met een voorbeeld voor één bepaalde kansklasse. Het linkerdeel bevat de conditionele kansen op i bressen (de geel gemarkeerde waarden in Tabel 3). Het rechterdeel specificeert het aantal bressscenario's voor ieder aantal bressen (0, 1, 2, 3) en voor het maximale scenario. De experts (zie bijlage A) schatten dat de kans op precies 1 bres gelijk is aan 0,3. Stel dat in stap 2 een lijst met $N_1 = 7$ scenario's is samengesteld voor deze kansklasse.

De conditionele kans op ieder van deze 7 enkelvoudige bresscenario's is dan gelijk aan $0,3/7=3/70$. Er zijn $\binom{7}{2} = 21$ scenario's met precies twee bressen en deze scenario's hebben ieder een conditionele kans van $0,1/21=1/210$. Aangezien de kans op 3 bressen is ingeschat op 0, is de kansbijdrage van scenario's met drie bressen gelijk aan 0 (en worden ze ook niet beschouwd). De kans op het maximaal scenario is in dit geval ook gelijk aan 0, omdat de kans op 4 of meer bressen gelijk is aan 0. Merk tot slot op dat de som van de conditionele kansen van alle overstromingsgebeurtenissen per definitie gelijk is aan de kans op 1 of meer bressen, in dit geval $0,4 (= 7 \times 3/70 + 21 \times 1/210 + 35 \times 0)$.

#bressen	Conditionele kans	i bressen	#scenario's met i bressen	Conditionele kans per bres
0	0.6			
1	0.3	1	7	$0,3/7=3/70$
2	0.1	2	21	$0,1/21=1/210$
3	0	3	35	$0/35=0$
4-10	0	maximaal	1 (per definitie)	$0/1 = 0$

Tabel 4 Voorbeeld toekenning conditionele kansen aan scenario's in een bepaalde kansklasse.

Waterdieptes

Voor ieder afzonderlijk overstromingsscenario (met 1 bres) is een ruimtelijk raster met maximale waterdieptes beschikbaar. Voor de samengestelde scenario's is de omhullende van de waterdieptea-rasters bepaald. Op de locaties waar overlap is, is de waterdiepte gelijk gekozen aan het maximum van de waterdieptes op die locaties.

Naar een doorbraakkans

Per kansklasse tellen de kansen van de gebeurtenissen op tot de conditionele kansen die de experts hebben opgesteld in stap 2. Door de conditionele kansen op de gebeurtenissen te wegen met de kansklasse wordt de onvoorwaardelijke overstromingskans van een gebeurtenis verkregen. De wegingsfactoren zijn in Tabel 5 opgenomen.

T100	T200	T500	T1000	T2000	T5000	T10000	T100000	T1000000
1/200	1/333	1/1000	1/2000	1/3333	1/10000	1/11111	1/111111	1/1000000

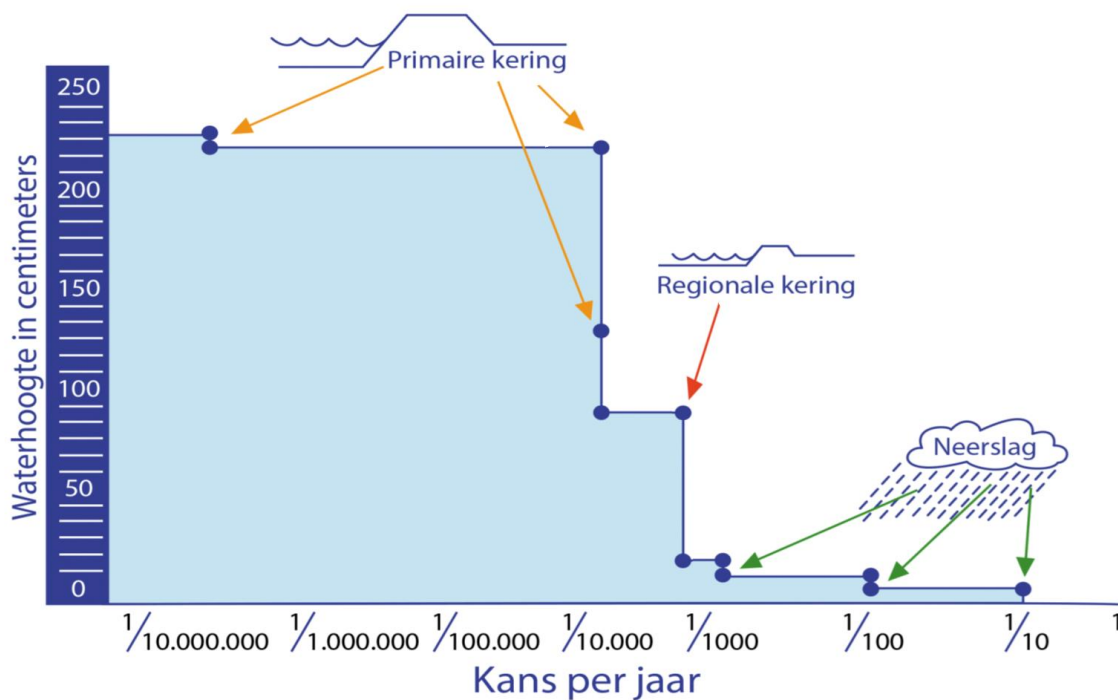
Tabel 5 Wegingsfactoren voor de bepaling van onvoorwaardelijke doorbraakkansen.

De getallen zijn tot stand gekomen als het verschil in de kansen van opeenvolgende kansklassen. Dus, de wegingsfactor van kansklasse T5000 is gelijk aan $1/5.000-1/10.000=1/10.000$. Op deze manier wordt rekening gehouden met het optreden van extremere gebeurtenissen en tellen de wegingsfactoren op tot de (maximale) kans van 1/100 voor een gebied. Dit betekent niet dat de overstromingskansen optellen tot 1/100, want de kans op 1 of meer bressen is in veel gebieden voor de lagere kansklassen (1/100, 1/200, 1/500) veel kleiner dan 1. Anders gezegd, de kans dat er geen enkele bres optreedt is relatief groot.

3.2.5 Stap 5: Het bepalen van overstromingsrisico's van gebieden en risicoprofielen

Door de kansen van alle gebeurtenissen die een locatie kunnen treffen (waterdiepte groter dan 0) te sommeren, kan ten eerste de kans op een overstroming op een locatie worden bepaald. Ten tweede kan de kans op overschrijding van waterdieptes worden berekend op basis van de kansen van deze gebeurtenissen. Zo ontstaat het risicoprofiel (een stapfunctie) wat de jaarlijkse overschrijdingskansen van de waterdiepte beschrijft op een locatie.

De punten in Figuur 4 zijn combinaties van de waterhoogte en de overschrijdingskans. Ieder scenario heeft een kans van voorkomen en een bijbehorende waterhoogte. De kans dat een waterdiepte wordt overschreden is de som van de kansen van alle scenario's die leiden tot deze waterdiepte of hoger.



Figuur 4 Voorbeeld overstromingsrisicoprofiel: overstromingsdiepte (waterhoogte in cm) als functie van de overschrijdingskans (van laag naar hoog).

Op een soortgelijke manier kunnen de risico's worden berekend door niet te kijken naar waterstanden maar naar schadefuncties en grondgebruik. De risico's kunnen worden uitgedrukt in een kans per jaar, maar ook bijvoorbeeld in de gevolgen bij een 1/200 gebeurtenis.

Het model geeft ook de mogelijkheid om cumulatie (het gelijktijdig overstromen van gebieden of objecten) mee te nemen voor verschillende gebieden of objecten. Voor alle gebieden en locaties is bekend welke scenario's leiden tot een overstroming op deze plaats. Voor een set locaties kan worden bepaald of deze wel of niet tegelijk overstromen bij (samengestelde) scenario's, al dan niet met een ondergrens voor een waterdiepte.

Daarnaast kan het model ook operationeel worden gebruikt bij een naderend hoogwater. Uit de resultaten kan zeer snel worden afgeleid welke objecten mogelijk gevaar lopen (met bijbehorende waterdiepte) gegeven een bepaalde verwachte afvoer of stormvloed, gebruik makend van de kans van voorkomen van het hoogwater.

Stel er komt een hoogwater met een terugkeertijd van 1/1000 per jaar, dan kan snel worden bepaald welke objecten in het bedreigd gebied liggen en wat hier ongeveer verwacht kan worden (waterdiepte, waarschijnlijkheid).

Het model kan worden toegepast voor verschillende zichtjaren. Voor de huidige situatie is uitgegaan van de kansen en gevolgen zoals beschreven in LIWO. Voor het zichtjaar 2050 worden de overstromingskansen van primaire keringen gelijk verondersteld aan de norm, omdat alle keringen dan minimaal aan de norm moeten voldoen. De frequentie van de waterstand die hoort bij een overstromingsscenario is aangepast op basis van de verwachte klimaatverandering. Hiertoe zijn Hydra-NL berekeningen voor het W+ scenario gemaakt.

Klimaatverandering beïnvloedt de buitenwaterstand en daarmee ook de waterdiepte na een dijkdoorbraak. Op dit moment zijn in LIWO alleen overstromingsscenario's voor de huidige situatie beschikbaar. De waterdiepte bij een scenario met een hogere buitenwaterstand moet via extrapolatie worden bepaald. Per gebied is bepaald wat de gemiddelde stijging van de waterdiepte bij een factor 10 extremere situatie is. Dit verschilt namelijk per watersysteem. Deze extrapolatie is toegepast in situaties waar er geen scenario's beschikbaar zijn tot een terugkeertijd van 1/100.000 per jaar (en 1/10.000 per jaar in Limburg). Bij extremere situaties is aangenomen dat waterdieptes niet stijgen door systeemwerking. Deze aanname kan worden verbeterd door het opstellen van nieuwe overstromingsscenario's voor toekomstige zichtjaren.

De aanpak resulteert in een realistischere kans op een bepaalde mate van lokale blootstelling en de cumulatie van schade. Dat betekent dat zowel de risico's voor een hele portefeuille bepaald kunnen worden als voor individuele objecten.

Relatie met andere oorzaken wateroverlast

Voor de buitendijkse gebieden zijn de overstromingskansen in 2050 vanwege klimaatverandering aangepast, hierbij is uitgegaan van de bestaande klimaatscenario's en de toename van de kans op hoge waterstanden op basis van Hydra-NL en OI2014.

Voor regionale waterkeringen is er geen rekening gehouden met klimaatverandering, omdat het watervolume in boezemsystemen niet significant zal veranderen en de waterdieptes dus niet zullen stijgen. Voor regionale rivieren kan de piekwaterstand wel hoger zijn, maar de hoogwatergebeurtenissen hier zullen kort van duur zijn waardoor de instroomperiode ook beperkt is. De kans op deze gebeurtenissen neemt (conform uitgangspunt klimaatscenario W+) op basis van de STOWA (Beersma et al., 2019) statistieken toe met 21% in 2050 en 42% in 2100.

4 Resultaten

4.1 Kans op een doorbraak van primaire waterkeringen

Met het 'realistische' overstromingsrisicomodel kan de kans op een overstroming in Nederland opnieuw worden bepaald (zowel voor gebieden als op objectniveau). Het effect van de expertschattingen hierop is het grootst voor de gebieden achter primaire keringen met relatief strenge normen en waar systeemwerking veel invloed heeft.

Hieronder staat hoeveel kleiner – orde grootte – de kans op een overstroming in de gebieden is ten opzichte van de kans die volgt uit de actuele overstromingskansen in LIWO en de methode gebaseerd op de aanpak voor de normering en beoordeling van waterkeringen³:

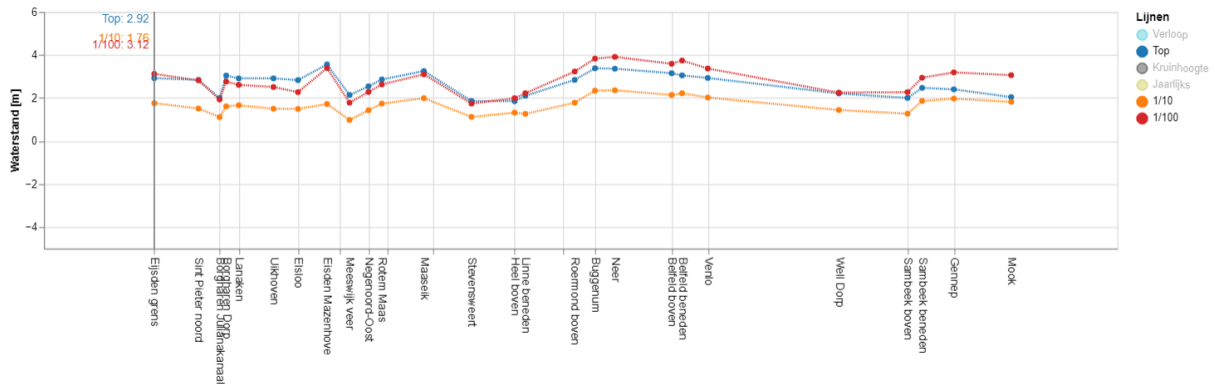
- Merengebied: factor 10-15;
- Kust: factor 2-5;
- Rivierengebied en benedenrivierengebied: factor 25-40;
- Limburgse Maas: factor 2-5.

Deze waarden zijn gemiddeld over de dijkvakken in de gebieden. De spreiding in een gebied is relatief groot. De nieuw berekende faalkans van een dijkvak is incidenteel groter dan de kans uit LIWO kans. Dit betreft vooral dijkvakken die in LIWO een faalkans hebben die (veel) kleiner is dan de norm.

Volgens het nieuwe model is de kans op een overstroming door een doorbraak van primaire waterkeringen in Nederland orde grootte 1/100 per jaar exclusief de Limburgse Maas. Dat betekent dus dat de kans op een overstroming door een doorbraak van een primaire kering in Nederland een factor 10 lager is dan die volgt uit de bestaande methode met de basisdata (kans groter dan 1/10 per jaar). Gezien de historie van dijkdoorbraken en de dijkversterkingen in de afgelopen jaren is deze inschatting een stuk aannemelijker en wellicht nog steeds aan de veilige kant.

Als we ook rekening houden met de Limburgse Maas dan is de faalkans 1/50 per jaar (de algehele kans op een doorbraak langs de Limburgse Maas is dus 1/100 per jaar). Hierbij wordt opgemerkt dat tijdens het hoogwater van 2021 er geen primaire waterkeringen zijn bezweken, wat een aanwijzing is dat de nieuwe inschatting (mogelijk) nog steeds aan de veilige kant is. Er zijn namelijk geen dijken doorgebroken, hoewel de terugkeertijd van de waterstand wel varieerde tussen 1/10 per jaar benedenstrooms en iets extremer dan 1/100 per jaar bovenstrooms op de Maas (zie Figuur 5).

³ Dit is de aanpak die ook is toegepast in mijnwaterrisicoprofiel.nl en bij het bepalen van de plaatsgebonden overstromingskansen die via LIWO beschikbaar zijn.



Figuur 5 Piekwaterstand (top) op de Maas gedurende het hoogwater van 2021 ten opzichte van de 1/10 en 1/100 per jaar waterstand (bron: <https://hoogwater2021.hkvservices.nl/>).

4.2 Kans op blootstelling in een gebied

Bij ruimtelijke beslissingen is de kans op een bepaalde mate van blootstelling in gebieden relevant (inclusief neerslag). Bij het bepalen van de blootstelling kan onderscheid gemaakt worden tussen:

- Een benadering waarbij ieder pixel afzonderlijk wordt beschouwd;
- Een benadering waarbij voor primaire en regionale keringen is uitgegaan van homogene gebieden. Dit zijn gebieden met een oppervlakte van enkele hectare tot enkele km² waarbinnen overstromingen tot ongeveer gelijke gevolgen leiden (Zethof et al., 2021). Figuur 6 toont een voorbeeld van homogene gebieden. De overige effecten (buitendijks en neerslag) kunnen dan per pixel nog worden toegevoegd.

Hier is uitgegaan van de tweede benadering. Hierbij is per homogeen gebied één representatieve locatie bepaald op basis van de mediaan van de maximale waterdiepte van de inliggende gridcellen⁴.

⁴ Noot: deze aanpak wijkt af van de uitwerking bij de plaatsgebonden overstromingskaarten op LIWO (Zethof en De Jong, 2021). In deze methode is de plaatsgebonden overstromingskans bepaald door per gebied rekening te houden met de scenario's die kunnen leiden tot een overstroming groter dan een kritische waarde van de waterstand, waarbij vervolgens gekozen is om de mediane waarde te gebruiken.

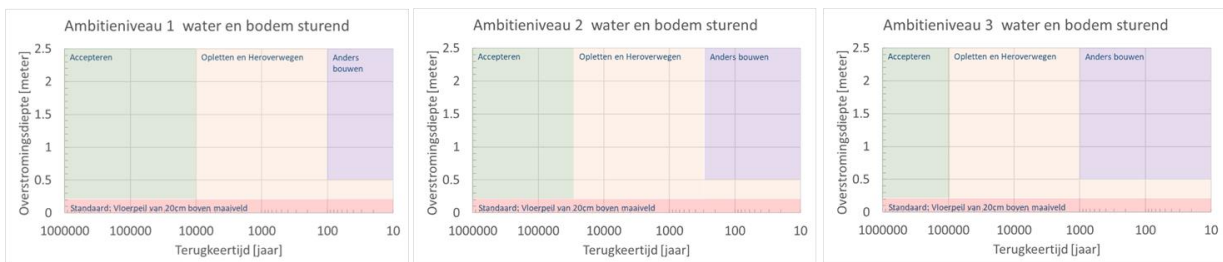
	Waterdiepte	Plaatsgebonden overstromingskans	Plaatsgebonden overstromingskans
	[cm]	$w_d \geq 0$ cm [jaar]	$w_d \geq 20$ cm [jaar]
Cel 1	10	1/1.000	-
Cel 2	14	1/1.000	-
Cel 3	8	1/1.000	-
Cel 4	25	1/100	1/100
Cel 5	30	1/100	1/100
Mediane waarde		1/1.000	1/100

Ter verduidelijking volgt een voorbeeld voor een fictieve buurt. Stel deze buurt bestaat uit 5 gridcellen die overstromen; m.a.w. de waterdiepte is groter dan 0 cm. In de tabel links staat de plaatsgebonden overstromingskans voor waterdieptes groter dan 0 cm per gridcel. Dit betekent dat de mediane waarde van de plaatsgebonden overstromingskans voor waterdiepte groter dan 0 cm voor deze buurt 1/1.000 per jaar is. In cel 4 en 5 is de waterdiepte groter dan 20 cm. De mediane waarde van plaatsgebonden overstromingskans voor waterdiepte groter dan 20 cm voor deze buurt is 1/100 per jaar.



Figuur 6 Homogene gebieden o.b.v. overstromingskarakteristieken (uitsnede regio Amsterdam).

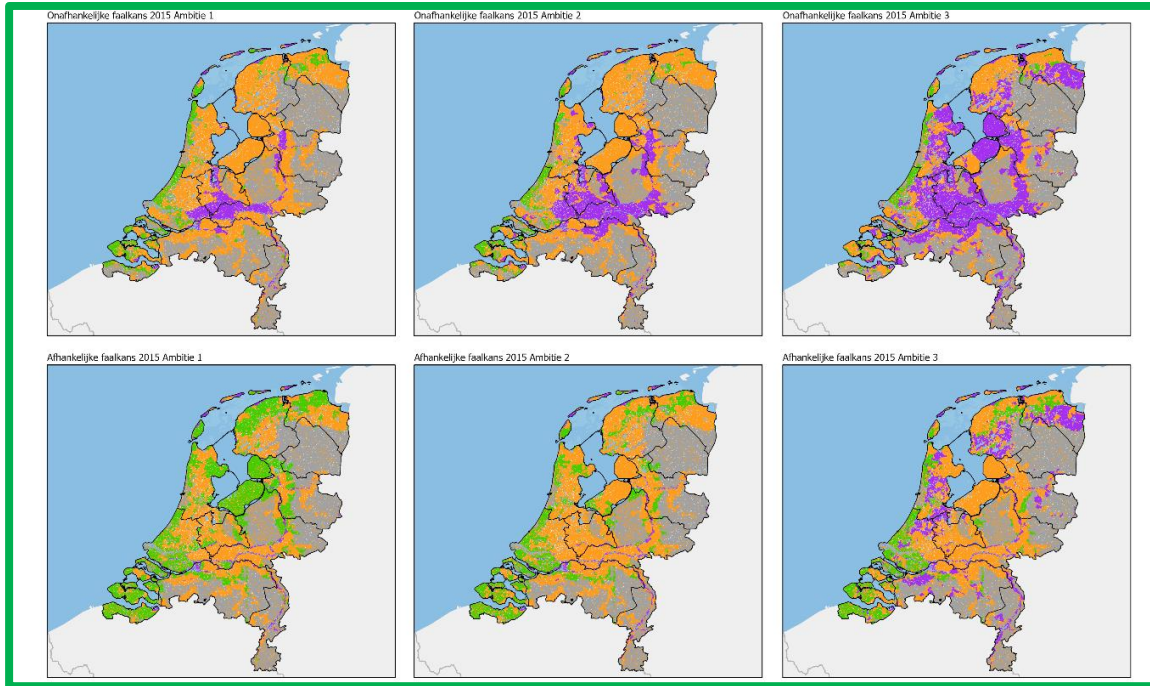
Voor de toepassing van het model binnen ruimtelijke adaptatie zijn drie afwegingskaders in de vorm van ambitieniveaus uitgewerkt (Kolen et al., 2022). Figuur 7 toont de drie verschillende ambitieniveaus, waarbij een indeling in klassen van waterdieptes en kansen is gemaakt. De klasse paars betreft relatief grote risico's, de klasse groen kleine risico's en oranje zit hier tussenin. De klasse rood betreft alle situaties die leiden tot een overstroming of wateroverlast van minder dan 20cm (op de kaart zijn deze grijs weergegeven).



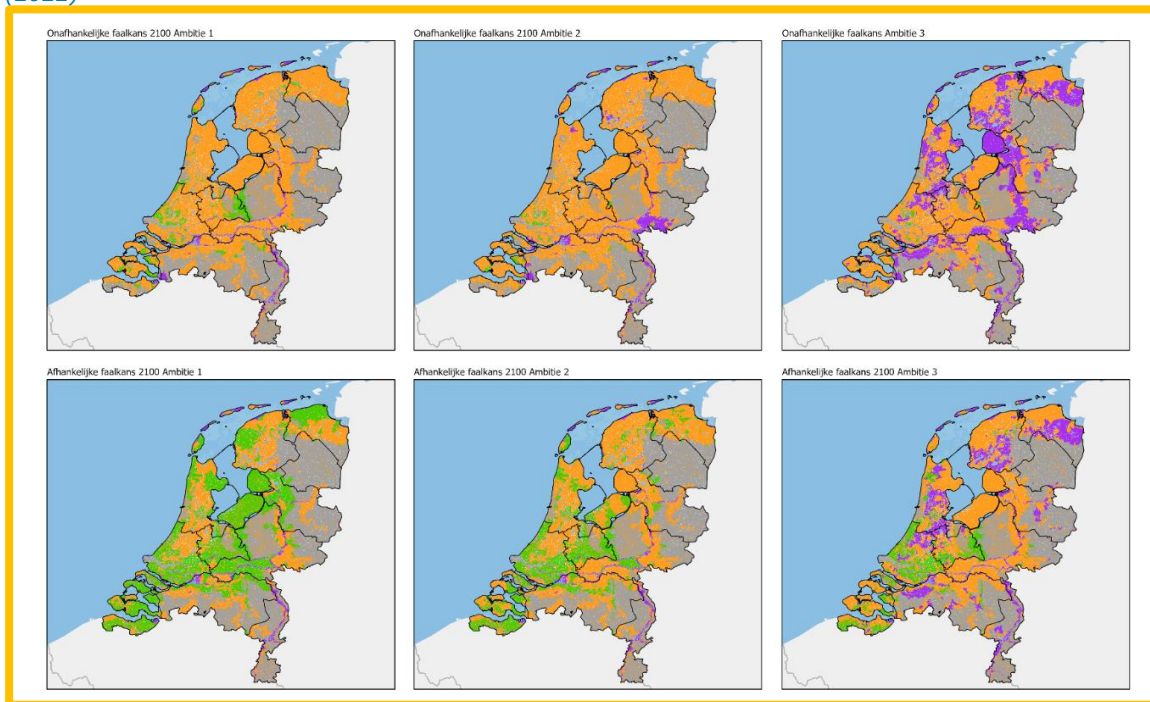
Figuur 7 Ambitieniveaus voor de mate van blootstelling (Kolen et al., 2022).

De afwegingskaders zijn toegepast op de huidige situatie en de situatie in 2100. Het verschil tussen de huidige situatie en 2100 zijn de dijkversterkingen die zijn gepland voor de primaire keringen (die leiden tot risicoreductie) en de klimaatverandering (waardoor risico's toenemen).

Voor beide situaties zijn kaarten gemaakt waarmee het nieuwe overstromingsrisicomodel kan worden vergeleken met de conservatieve methode (de oorspronkelijke modellering zonder correcties voor de aannames van faalkansen van primaire waterkeringen). Figuur 8 bevat de kaart van Nederland voor de drie ambitieniveaus (van links naar rechts) voor de conservatieve methode (boven) en het nieuwe overstromingsrisicomodel (onder) in de huidige situatie. Figuur 9 bevat dezelfde kaart voor het zichtjaar 2100.



Figuur 8 De kans op een bepaalde mate van blootstelling in 2015 volgens de drie ambitieniveaus gedefinieerd in Figuur 7 berekend met de conservatieve methode (boven) en de nieuwe methode (onder). Bron: Kolen et al. (2022)

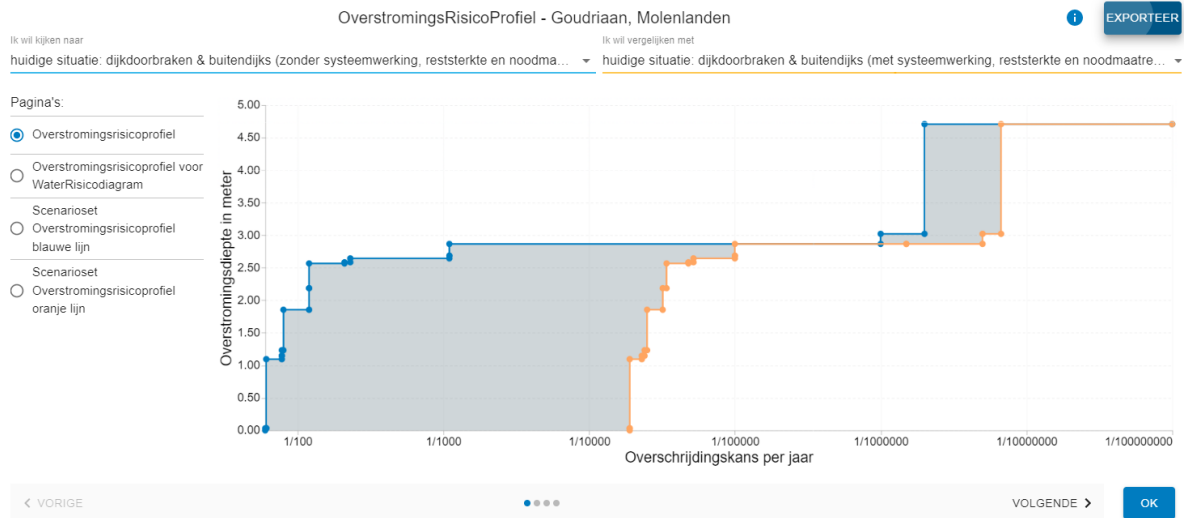


Figuur 9 De kans op een bepaalde mate van blootstelling in 2100 volgens de drie ambitieniveaus gedefinieerd in Figuur 7 berekend met de conservatieve methode (boven) en de nieuwe methode (onder). Bron: Kolen et al. (2022)

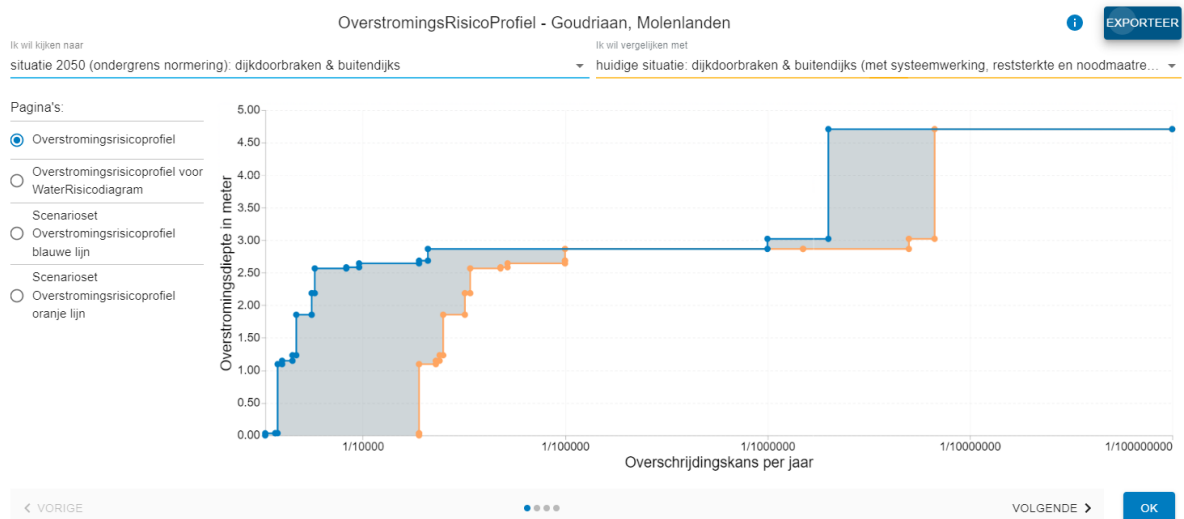
4.3 Lokaal overstromingsrisicoprofiel (microniveau)

Naast het effect op het schaalniveau van heel Nederland kan ook worden gekeken naar het lokaal effect. Voor twee willekeurige locaties is een lokaal overstromingsrisicoprofiel opgesteld. De locatie Goudriaan ligt in de polder Alblasserwaard en wordt bedreigd door hoge waterstanden op de Lek en de Boven-Merwede als gevolg van stormvloed en hoge afvoeren (Benedenrivierengebied).

De maximale waterdiepte is 4,71 m. De profielen zijn opgesteld exclusief neerslag omdat het gaat om de verandering in aanpak rondom primaire waterkeringen.



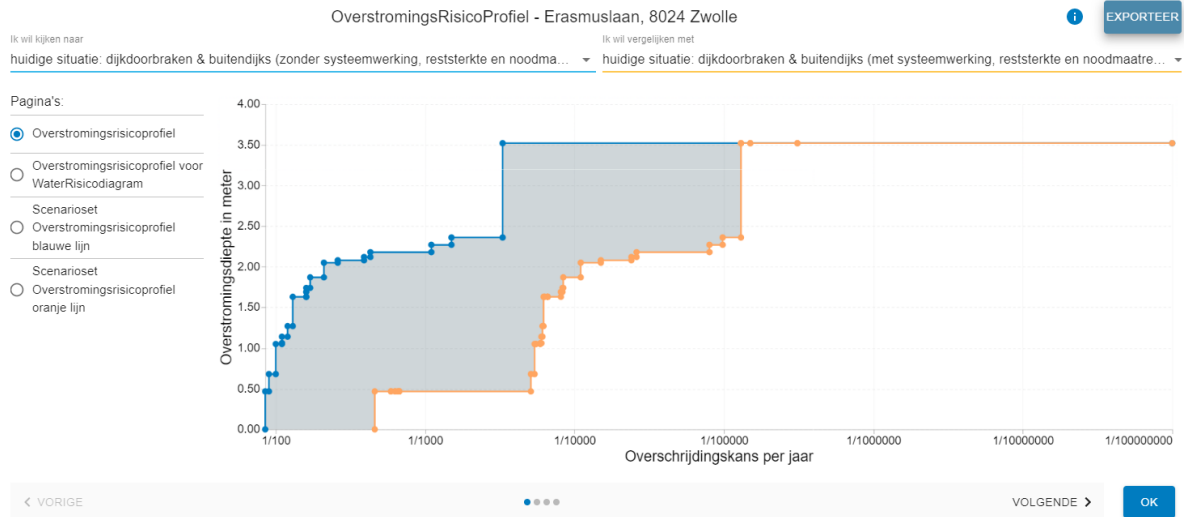
Figuur 10 Overstromingsrisicoprofiel Goudriaan in de huidige situatie volgens de bestaande methode (blauw) en de nieuwe methode (oranje).



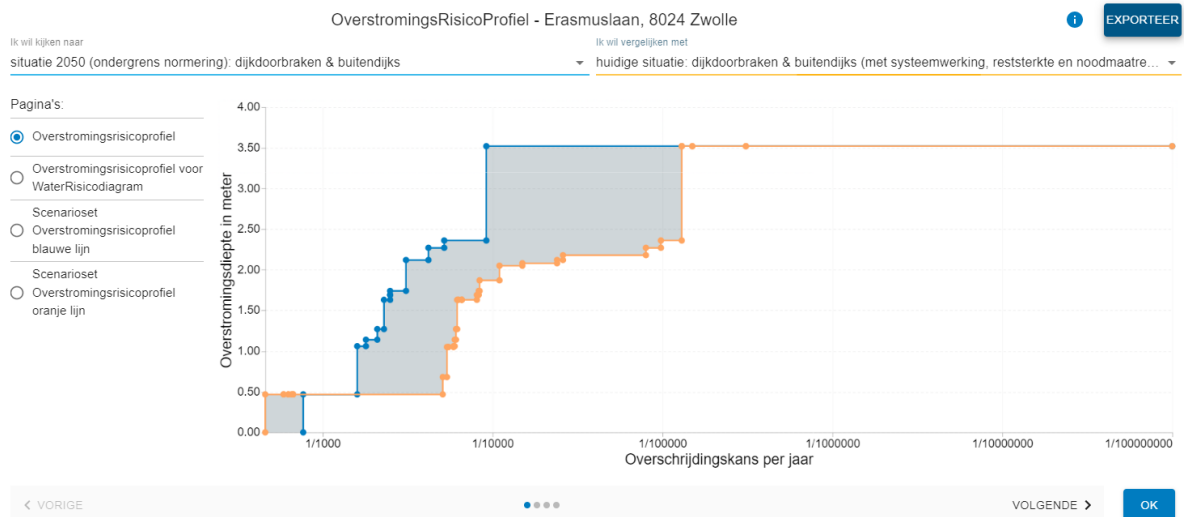
Figuur 11 Overstromingsrisicoprofiel Goudriaan als voldaan wordt aan de nieuwe normen (blauw) en volgens de nieuwe methode voor de huidige situatie (oranje).

De berekening van de overstromingsrisicoprofielen is met de bestaande en nieuwe methode uitgevoerd. Figuur 10 laat zien wat het verschil is in de actuele situatie. Te zien is dat de kans op overschrijding van een bepaalde waterdiepte met meer dan een orde grootte afneemt voor de meeste waterdieptes te Goudriaan. Daar waar wellicht gezegd kan worden dat het effect op de kans op een overstroming voor heel Nederland nog beperkt is zien we wel een duidelijk lokaal effect. De kans op een overstroming in Goudriaan is in de huidige situatie 1/60 volgens de oude rekenwijze en 1/19.000 per jaar in de nieuwe rekenwijze. Het effect van het nieuwe model is bovendien groter dan het effect van de strengere normen (Figuur 11).

De locatie Zwolle-Berkum ligt aan de Vecht, op de rand van het Bovenrivierengebied en het Merengebied. De dreiging komt vanuit hoge waterstanden op de Vecht, voornamelijk veroorzaakt door een hoge afvoer op de Vecht. De maximale waterdiepte is 3,52 m.



Figuur 12 Risicoprofielen Zwolle-Berkum: in de huidige situatie volgens de bestaande methode (blauw) en volgens de nieuwe methode (oranje).



Figuur 13 Risicoprofielen Zwolle-Berkum: als voldaan wordt aan de nieuwe normen (blauw) en volgens de nieuwe rekenmethode voor de huidige situatie (oranje).

Figuur 12 laat zien dat de kans op overschrijding van een bepaalde waterdiepte met een orde grootte afneemt voor de meeste waterdieptes te Berkum volgens het nieuwe model (huidige situatie). De overstromingskans verandert van 1/80 in 1/460 per jaar. Net als voor Goudriaan is het overstromingsrisicoprofiel in de huidige situatie volgens het nieuwe model gunstiger dan het profiel dat uit het bestaande model volgt voor de situatie in 2050 als aan de nieuwe normen wordt voldaan (Figuur 13).

5 Conclusies en aanbevelingen

Met het hier gepresenteerde model kunnen risico's voor ruimtelijke afwegingen en investeringsbeslissingen rondom vastgoed en verzekeringen worden ingeschat. Het model maakt gebruik van publiek beschikbare basisgegevens, die worden verwerkt in een aangepast overstromingsrisico-model. Door deze werkwijzen worden onnodige conservatieve aannames in de basisgegevens aangepast. Dit voorkomt een stapeling van conservatieve keuzes met bijvoorbeeld te hoge risicopremies voor (her)verzekeringen tot gevolg. Toepassing van het model leidt tot een realistischer beeld van het overstromingsrisico.

Het model levert ook inzicht in de bijdrage aan het risico in relatie tot de terugkeertijd van extreme hydraulische belastingen (zoals extreme rivierafvoeren). Ook kan in het model rekening worden gehouden met frequentere overstromingen waarbij de gevolgen veel kleiner zijn in termen van getroffen gebied en jaarlijkse schadecumulatie in Nederland. Hierdoor wordt ook de worst case situatie (Ergst Denkbare Overstroming) in een plausibele context geplaatst wat kan leiden tot meer maatwerk in ruimtelijke keuzes en financiële arrangementen.

De informatie over lokale risico's kan ook van meerwaarde zijn voor ruimtelijke ontwikkelingen. Immers, daar worden keuzes en afwegingen gemaakt hoe in het ontwerp van ruimte en gebouwen rekening te houden met overstromingen. De toegevoegde waarde van het model voor crisisbeheersing ligt vooral in het feit dat het inzicht geeft in de gebieden die tegelijkertijd kunnen worden getroffen als gevolg van mogelijke dijkdoorbraken die horen bij een dreiging. Voor de organisatorische voorbereiding is het onderscheid in kans minder van belang: deze voorbereiding is sowieso nodig.

Zoals in ieder model zijn verbeteringen mogelijk. Denk hierbij aan het steeds verversen van de actuele kennis over basisinformatie voor het verbeteren van inschattingen van overstromingsgevolgen en faalkansen van waterkeringen. Updates in overstromingsgevolgen worden door de waterschappen gedaan in het kader van de voorbereiding op overstromingen en voor de Europese hoogwaterrichtlijn (EU Floods Directive).

Ook rondom het meenemen van expertschattingen kunnen nog verbeteringen worden gerealiseerd. De huidige aanpak is gebaseerd op een Delphi benadering. Het kan interessant zijn om een andere manier van expertschattingen naast te leggen waarin de verdeling van de gewichten over de experts niet uniform is.

6 Referenties

Beersma, Hakvoort, Jilderda, Overeem, Versteeg 2019.

Neerslagstatistieken in -reeksen voor het waterbeheer. STOWA, KNMI, HKV.

ENW 2016

Grondslagen voor hoogwaterbescherming. Expertise netwerk waterveiligheid. December, 2016.

Fugro 1999.

IPO-richtlijn ter bepaling van het veiligheidsniveau van boezemkaden. Fugro in opdracht van het IPO.

Klopstra en Kok 2009.

Van neerslag tot schade, eindrapport. HKV, KNMI en Universiteit Twente in opdracht van 'Leven met Water', STOWA, Provincie Zuid-Holland, Waterschap Zuiderzeeland en het Verbond van Verzekeraars, met begeleiding van Waterschap Rivierenland, Waterschap Zuiderzeeland, Hoogheemraadschap van Delfland, Hoogheemraadschap Rijnland en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

Kolen, Nicolai, Stenfert en Van Hoek 2022

Sturingskaarten voor extreme neerslag en overstromingen; Verkenning voor Water en Bodem sturend. HKV in opdracht van IenW, augustus 2022.

PBL 2022

<https://www.pbl.nl/correctie-formulering-over-overstromingsrisico> (bezoekt 4/12/2022).

Rikkert en Kok 2019

Faalkansen van boezemkaden vanuit een statistisch perspectief. Water Matters. April 2019.

Ten Brinke, W.B.M., Kolen, B., Dollee, A., Van Waveren, H. and Wouters, K. 2010

Contingency Planning for Large-Scale Floods in the Netherlands. Journal of Contingencies and Crisis Management, 18: 55-69.

Zethof en De Jong 2021

Plaatsgebonden risicokaarten Actualisatie 2019. HKV voor Rijkswaterstaat WVL.

Zethof, De Jong, Thonus en Kolen 2021

Toelichting afleiding homogene gebieden op basis van overstromingskarakteristieken. Memorandum. HKV voor Rijkswaterstaat WVL.

Bijlage

A Expertsessie

Op 3 september 2018 heeft een expertsessie plaatsgevonden in Lelystad. Tijdens deze bijeenkomst hebben vijf experts vragen beantwoord over de overstromingskans van de acht verschillende gebieden onder diverse omstandigheden (waterstanden met terugkeertijden van 100, 1.000 of 10.000 jaar). Daarnaast hebben de experts uitspraken gedaan over systeemwerking in die scenario's en hebben zij de kans op meervoudige dijkdoorbraken ingeschat. Een voorbeeld van de vragenlijst voor één van de deelgebieden en scenario's is hieronder toegevoegd.

De betrokken experts en hun expertise staan in Tabel 6. Bij het bundelen van de uitspraken over de overstromingskansen is aan de mening van iedere expert evenveel gewicht toegekend.

Nr.	Organisatie	Expertise
1.	HKV	Systeemwerking
2.	HKV	Overstromingsrisico's, systeemwerking, VNK
3.	HKV	Overstromingsrisico's, systeemwerking, VNK
4.	TU Delft	Overstromingsrisico's, VNK
5.	HKV	Overstromingsrisico's, EDO's

Tabel 6 Affiliatie en expertise van experts

Voorbeeld vragenlijst voor het scenario "Benedenrivierengebied: T1000"

Een stormachtige wind uit het westnoordwesten (Bft 8) stuwt de zeewaterstand langs de kust van Zuid-Holland op tot een hoogte van bijna 3,4 m+NAP. Deze zeewaterstand heeft een overschrijdingsfrequentie van ongeveer 1/50^e per jaar. De Maeslantkering is niet gesloten. De Rijnafvoer is gemiddeld. De omstandigheden leiden op de Nieuwe Maas bij Rotterdam tot een waterstand met een overschrijdingsfrequentie van 1/1.000^e per jaar. Rondom de Drechtsteden en op het Haringvliet/Hollands Diep bereiken de waterstanden hoogtes die zich gemiddeld eens in de 300 jaar voordoen. In andere delen van het Benedenrivierengebied (Lek, Merwedese, Bergsche Maas) zijn de waterstanden ook verhoogd, maar daar hebben de waterstanden een overschrijdingsfrequentie van 1/10^e tot 1/100^e per jaar.

Door een combinatie van factoren is de waterstand te Rotterdam opgestuwd tot een hoogte die gemiddeld eens in de duizend jaar voorkomt. De waterstanden op het Haringvliet, het Hollands Diep, de Oude Maas, de Noord en Dordtse Kil hebben een iets hogere overschrijdingsfrequentie van 1/300^e per jaar. De windrichting is WNW (292,5 graden t.o.v. Noord) en de (maximale) snelheid is 21 m/s (Bft 8). De piekafvoer op de Rijn is 2.000 m³/s. In dit scenario worden de dijkkringgebieden 14 t/m 22 en 34 bedreigd.

Bijgevoegd zijn kaarten en tabellen die de overstromingskansen en de dominante faalmechanismen van de dijkringen bevatten:

- Overstromingskansen: inschatting op basis van referentieberekening VNK (met Ruimte voor de Rivier en HBWP2, zonder noodmaatregelen en systeemwerking);
- Dominante faalmechanismen op basis van referentieberekening VNK.

De vraag is hoe systeemwerking en afhankelijkheden tussen belastingen de overstromingskansen van de bedreigde dijkkringgebieden beïnvloeden in dit scenario.

Onderstaande vragenlijst gaat in op drie aspecten:

- Bedreigde dijkkringgebieden;
- Systeemwerking;
- Overstromingskansen.

1. Bedreigde dijkkringgebieden

- a. Worden er naast de dijkkringgebieden 14 t/m 17, 21, 22 en 34 nog andere dijkkringgebieden bedreigd door de omstandigheden in dit scenario?

- b. Zo ja, welke? Noteer de namen en/of nummers.

N.B. Neem deze dijkkringgebieden bij de beantwoording van onderstaande vragen mee.

2. Systeemwerking

- a. Zijn er vormen van systeemwerking die de overstromingskansen van de bedreigde dijkkringgebieden beïnvloeden? Cascade-effecten, short-cutting of waterstanddaling elders?

- b. Zo ja, welke dijkkringgebieden betreft het? En welke vormen?

- c. Specificeer voor de genoemde dijkkringgebieden de meest waarschijnlijke vormen van systeemwerking die kunnen optreden.
Geef ook aan wat de invloed is op de overstromingskans. Wordt deze kleiner (+), groter (-) of blijft deze gelijk? Is de invloed op de overstromingskans substantieel (factor 2 of groter)?

d. Wat is de meest waarschijnlijke vorm van systeemwerking in dit scenario?

Op de overstromingskans van welke dijkkringgebieden heeft systeemwerking het grootste effect?

3. Overstromingskansen

De vraag is nu welke invloed de systeemwerking getalsmatig heeft op de overstromingskansen van dijkkringgebieden.

a. Wat is de kans dat er geen enkel dijkkringgebied overstroomt in dit scenario?

b. Wat is de kans dat er 1 of 2 dijkkringgebieden overstromen in dit scenario?

c. Wat is de kans dat er 3 of meer dijkkringgebieden overstromen in dit scenario?

d. Hoeveel dijkkringgebieden overstromen er naar verwachting in dit scenario (0, 1, 2, ..., alle bedreigde)?

e. Schat de overstromingskans voor ieder bedreigd dijkkringgebied in dit scenario.

f. Welke dijkkringgebieden zullen in dit scenario naar verwachting gezamenlijk overstromen?

g. Welke dijkringgebieden overstromen zeker *niet* gezamenlijk in dit scenario?

Noteer hier eventuele opmerkingen of suggesties



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 294242

info@hkv.nl

www.hkv.nl