



Kennis
voor
Klimaat

Analyse van systeemrobuustheid

Een toepassing op de IJssel



COLOFON
Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl) binnen Thema 1 'Climate-proof flood risk management' en werd medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (Deltaprogramma, deelprogramma Rivieren).

KvK rapportnummer: 048/2012
ISBN/EAN: 978-94-90070-55-7
Deltares projectnummers: 1201987.003 en 1204292.001

Copyright © 2012
Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (KvK). Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.

Aansprakelijkheid
Hoewel uiterste zorg is besteed aan de inhoud van deze publicatie aanvaarden de Stichting Kennis voor Klimaat, de leden van deze organisatie, de auteurs van deze publicatie en hun organisaties, noch de samenstellers enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Gebruik van de inhoud van deze publicatie is voor de verantwoordelijkheid van de gebruiker.

Contactinformatie
Deltares
Ir. Marjolein Mens
Postbus 177
2600 MH Delft
Tel: 088 335 8542
marjolein.mens@deltares.nl

Analyse van systeemrobuustheid

Een toepassing op de IJssel

Marjolein Mens (Deltares)

Foto’s kaft: beeldbank Rijkswaterstaat

Samenvatting

In dit rapport is de systeemrobuustheid en het overstromingsrisico van de IJsselvallei (dijkringen 48 t/m 53) gekwantificeerd. Systeemrobuustheid staat voor de mate waarin een systeem kan blijven functioneren bij (onzekere) externe verstoringen. Deze is gekwantificeerd aan de hand van het analysekader zoals voorgesteld in Mens et al. (2011). De volgende twee vragen zijn geadresseerd:

1) Welke inzichten levert de robuustheidsanalyse over het functioneren van de IJsselvallei bij hoge afvoeren? Sluit dit aan bij de definitie van robuustheid?
2) Welke systeemconfiguratie verhoogt de robuustheid van de IJsselvallei voor hoge afvoeren?

Het overstromingsrisico is berekend aan de hand van overstromingssimulaties voor 13 doorbraaklocaties. De gevolgen van overstromen zijn gekwantificeerd met het schademodel DamageScanner. De kans op overstromen is berekend door de afvoerfrequentie bij Lobith te vertalen naar een waterstandfrequentie per doorbraaklocatie (met het hydrodynamische model Delft-FLS), en deze te combineren met een faalkans van de dijk (de kans op bezwijken gegeven een waterstand).

De systeemrobuustheid is berekend door de gevolgen van overstromen uit te zetten tegen de afvoerpiek: de reactiecurve. Uit de reactiecurve zijn drie van de vier robuustheidcriteria afgeleid: reactiedrempel, ernst, proportionaliteit. Het vierde criterium, omslagpunt, is semi-kwantitatief beoordeeld op basis van economische, fysische en menselijke herstelcapaciteit.

De volgende systeemconfiguraties zijn vergeleken op basis van overstromingsrisico en systeemrobuustheid:

- Huidig systeem (referentie)
- Verhoogde dijken
- Rivierverruiming
- Dijken die niet kunnen bezwijken

Alle configuraties zijn berekend met het landgebruik van 2000 en met twee scenario's voor ruimtelijke ontwikkeling tot 2050. Dit geeft aan welke toename van het overstromingsrisico verwacht kan worden door ruimtelijke ontwikkeling en wat de potentie is van landgebruiksplanning.

Voor het huidige systeem werd een overstromingsrisico van 10 miljoen euro per jaar berekend. Alle alternatieven reduceerden het risico significant (met meer dan 50%). Het risico is echter sterk afhankelijk van de mate van zekerheid over de dijksterkte en de fractie van de Lobith-afvoer die richting de IJssel stroomt. Vanwege deze laatste factor heeft het overstromingsrisico van het huidige systeem een bandbreedte van 5.5 tot 27.4 miljoen euro per jaar. De voorkeursvolgorde van de alternatieve systeemconfiguraties veranderde niet. De mate van zekerheid over de dijksterkte (uitgedrukt in de vorm van de faalcurve van de dijken) heeft een grotere invloed. Het risico van het huidige systeem heeft hierdoor een bandbreedte van 1.2 tot 100 miljoen euro per jaar. Bovendien verandert de voorkeursvolgorde, omdat deze factor geen invloed heeft op de systemen met een deltadijk en wel op de andere alternatieve systemen.

Alle alternatieven scoorden beter op de meeste robuustheidcriteria dan het huidige systeem, waarbij de onbezwijkbare dijken het beste scoorden op alle criteria. Dijken verhogen en rivier verruimen verhogen de reactiedrempel (de laagste afvoer waarbij schade kan ontstaan) het meest. Onbezwijkbare dijken zorgen voor de laagste systeemkans (kans dat er ergens in het systeem een overstroming plaatsvindt door het bezwijken of overlopen van een of meerdere dijken). Onbezwijkbare dijken scoren ook het best op de proportionaliteit en het bereiken van het omslagpunt.

De analyse van systeemrobuustheid heeft geleid tot de formulering van drie basisprincipes van systeemrobuustheid: vermijdbaarheid, beheersbaarheid en herstelbaarheid. De eerder voorgestelde criteria passen goed bij deze indeling. De reactiedrempel zegt iets over de vermijdbaarheid, de ernst en de proportionaliteit geven informatie over de beheersbaarheid en het omslagpunt zegt iets over de herstelcapaciteit. De onzekerheid over het verloop van de reactiecurve en de reactiedrempel is ook belangrijk gebleken bij de analyse van robuustheid. Dit was echter nog geen onderdeel van het analysekader. Door onbezwijkbare dijken te bouwen wordt de onzekerheid over waar een bres optreedt zodanig gereduceerd dat de schade niet meer afhankelijk is van de doorbraaklocatie. Bij rivierverruiming wordt de gevoeligheid van de schade voor de afvoergolf gereduceerd, waardoor de onzekerheid over het verloop van de reactiecurve ook kleiner wordt. Er kan gesteld worden dat als beter bekend is waar, wanneer en hoe erg het misgaat, de gevolgen van overstromingen beter beheersbaar zijn. Beheersbaarheid is dus te vergroten door gevoeligheid van het systeem voor onzekere factoren (zoals bresgroei en afvoergolfvorm) te verkleinen, of door de onzekerheid van de factoren te verkleinen. Een gevoeligheidsanalyse wordt daarom gezien als belangrijk element van een robuustheidanalyse.

De belangrijkste conclusies ten aanzien van de eerste onderzoeksvraag zijn:
- De reactiecurve is een effectieve manier om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van het systeem voor afvoergolven;
- De mate van onzekerheid over de reactiedrempel en reactiecurve is ook een maat voor systeemrobuustheid;
- De grens van beheersbaarheid wordt waarschijnlijk eerder bereikt dan de grens van herstelbaarheid.

De belangrijkste conclusies ten aanzien van de tweede onderzoeksvraag zijn:
- Een systeem met rivierverruiming is robuuster dan een systeem met hoge dijken, omdat de gevolgen van overstroming bij alle afvoeren lager zijn en de gevoeligheid voor de hoogte van de afvoergolf kleiner is. Overstromingen kunnen echter nog steeds tot een onbeheersbare situatie leiden.
- Een systeem waarbij dijken niet kunnen bezwijken is robuuster dan een systeem met bezwijkbare dijken (huidig systeem), omdat de schade bij overlopen veel lager is dan de schade als gevolg van een doorgebroken dijk. Ook neemt de schade bij hogere afvoergolven veel geleidelijker toe. De gevoeligheid voor afvoergolfvormen is echter wel groter, een onbezwijkbare dijk is wellicht duurder dan een conventionele dijk en het is onduidelijk of het technisch mogelijk is om een bestaande dijk doorbraakvrij te maken.
- Een systeem met hoge dijken heeft een laag overstromingsrisico en een hoge reactiedrempel, maar de gevoeligheid voor afvoergolven neemt toe.
- In een systeem waarbij dijken niet kunnen bezwijken èn waarbij dijken in hoogte zijn gedifferentieerd, kan ruimtelijke planning zeer effectief zijn in het reduceren van schade en risico.

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Achtergrond 1
1.2 Het begrip systeemrobuustheid 1
1.3 Doel en onderzoeksvragen 3
1.4 Aanpak 3
1.5 Studiegebied 3

2 Aanpak analyse **5**
2.1 Systeemrisico 5
2.2 Systeemrobuustheid 7
2.2.1 Reactiecurve 7
2.2.2 Reactiedrempel 8
2.2.3 Proportionaliteit 8
2.2.4 Ernst 9
2.2.5 Omslagpunt 9
2.3 Beschrijving en aanpak alternatieve systeemconfiguraties 10
2.3.1 Dijken versterken 10
2.3.2 Rivier verruimen 10
2.3.3 Deltadijken 11
2.3.4 Landgebruik aanpassen 13

3 Resultaten **15**
3.1 Systeemrisico 15
3.2 Systeemrobuustheid 16
3.2.1 Reactiecurve 16
3.2.2 Robuustheidcriteria 18

4 Gevoeligheidsanalyse **21**
4.1 Doel 21
4.2 Referentiewaarden 21
4.3 Afvoerverdeling 22
4.4 Vorm van de faalcurve 23
4.5 Golfvorm 24
4.6 Correlatie tussen de doorbraaklocaties 27
4.7 Overzicht resultaten 28

5 Discussie **29**
5.1 Drie robuustheidprincipes 29
5.2 Robuustheid versus risico 30
5.3 Mag de faalkans van een deltadijk verwaarloosd worden? 31
5.4 Discussie over het kansbegrip 31

6 Conclusie **33**

Bijlagen

A Modellen en input **A-1**

B Methode ter bepaling van de systeemkans en het systeemrisico **B-1**

C Overstromingskaarten per doorbraaklocatie (huidige systeem) **C-1**

D Overstromingskaart hele gebied (deltadijken) **D-1**

E Vergelijking tussen schademodellen **E-1**

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Dit rapport vormt onderdeel van het promotieonderzoek 'robustness and water management' (in het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat) en is meegefinancierd door het Deltaprogramma Rivieren. Het doel van het promotieonderzoek is om het begrip robuustheid praktisch toepasbaar te maken voor *Flood Risk Management* en *Water Resources Management* in Nederland en daarbuiten. Een belangrijk onderdeel in het onderzoek is het testen van het analysekader voor systeemrobuustheid, dat beschreven is in Mens et al. (2011). Het onderhavige rapport beschrijft een toepassing van het analysekader op de IJssel.

Het Deltaprogramma (deelprogramma Rivieren) doet op dit moment verkennend onderzoek naar lange-termijnontwikkelingen in het bovenrivierengebied (waaronder de IJssel) en welke maatregelen nodig zijn om op de veranderingen in te spelen. Dit rapport draagt bij aan de ontwikkeling en evaluatie van maatregelen die het overstromingsrisico langs de IJssel reduceren.

1.2 Het begrip systeemrobuustheid

Het begrip robuustheid wordt in de Nederlandse waterwereld steeds meer gebruikt, maar door velen verschillend gedefinieerd. Dit rapport gaat over *systeem*robuustheid, wat niet verward moet worden met *beslis*robuustheid. Systeemrobuustheid is een eigenschap van een systeem en verwijst naar de mate van ongevoeligheid van het functioneren van dit systeem voor onzekerheden en extreme omstandigheden. Het begrip heeft een sterke relatie met de begrippen weerstand en veerkracht (zie De Bruijn, 2005), beide systeemeigenschappen die bijdragen aan robuustheid. Beslisrobuustheid is een eigenschap van een beslissing over een bepaalde beleidsstrategie. Het verwijst naar de gevoeligheid van een besliscriterium (bv. kosten/baten) voor onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen in bijvoorbeeld klimaat of beleidsvoorkeuren (zie Kwakkel et al., 2011; Haasnoot et al., ingediend). De belangrijkste verschillen tussen de twee robuustheidbegrippen zijn het onderwerp van studie (systeem of beslissing) en het soort onzekerheden. Bij systeemrobuustheid gaat het niet zozeer om onzekerheden over de toekomst, maar om onzekerheden die er over de huidige situatie ook al zijn (natuurlijke variabiliteit).

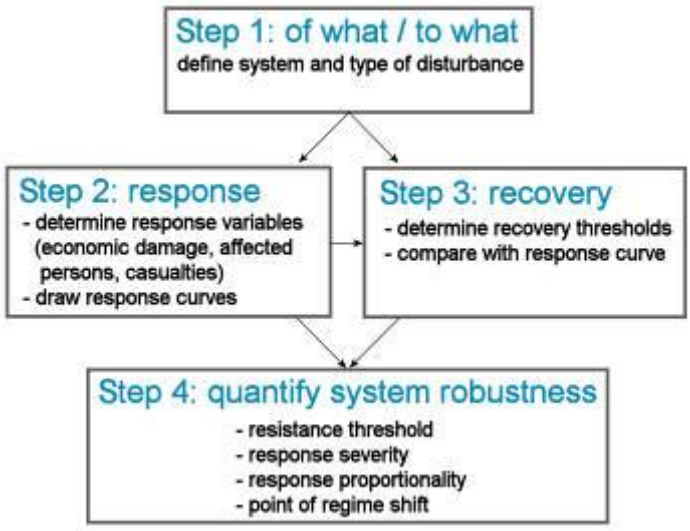
In de context van hoogwater op een rivier, kan systeemrobuustheid gedefinieerd worden als de mate waarin een gebied blijft functioneren tijdens en na externe druk op het systeem. Dit betekent dat het gebied zodanig wordt ingericht dat sociale en economische activiteiten zoveel mogelijk door kunnen gaan tijdens hoge rivierafvoeren, en dat het socio-economische systeem zich snel kan herstellen na een overstroming. Met 'systeem' wordt het gekoppelde fysische en socio-economische systeem bedoeld, dus de rivier zelf en het achterliggende gebied dat is blootgesteld aan overstromingen.

Mens et al. (2011) hebben een analysekader voor robuustheid voorgesteld, ter ondersteuning van de besluitvorming over een robuuste gebiedsinrichting ten aanzien van hoogwater. Een robuust systeem heeft de volgende eigenschappen:

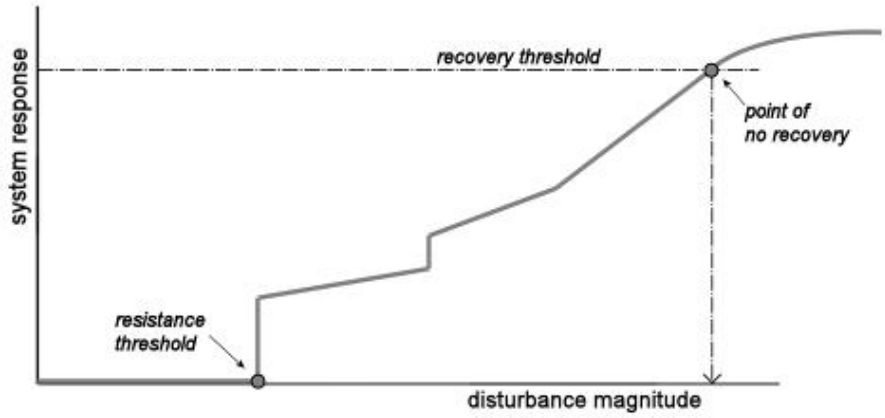
- Het heeft weerstand tegen hoogwater (dus: tot een bepaalde mate van verstoring treden er geen overstromingen op);
- Als de weerstand wordt overschreden, blijft de overstromingsschade beperkt;
- Het systeem kan zich eenvoudig/snel herstellen na een overstroming;

- Bij toenemende hoogwatergolven neemt de verwachte schade geleidelijk toe (of blijft zelfs gelijk). Plotselinge overgangen in systeemreactie zijn een indicatie voor onbeheersbaarheid van de overstroming.

In relatie tot deze eigenschappen, zijn de volgende robuustheidcriteria afgeleid (Mens et al., 2011): reactiedrempel, ernst van de gevolgen, proportionaliteit van de gevolgen, en het omslagpunt ('point of no recovery') (Figuur 1.2). *Reactiedrempel* geeft aan hoe hoog de afvoer moet worden voordat een overstroming plaatsvindt, omdat dan de dijken overlopen of bezwijken. De reactiedrempel zegt iets over de weerstand van het systeem. *Ernst van de gevolgen* verwijst naar het uit evenwicht raken van het systeem, dus hoe groot de schade is als er een overstroming plaatsvindt. In de reactiecurve is de schade uitgezet tegen de hoogte van de afvoergolf. *Proportionaliteit* verwijst naar de verandering van de schade bij een verandering in afvoer, en zegt iets over de geleidelijkheid van de overstroming. Een grote sprong in schade bij een kleine toename van de afvoer (zoals in figuur 1.2) kan duiden op het bezwijken van een regionale kering. *Omslagpunt* geeft aan bij welke afvoer de schade zo groot is dat het systeem zich niet meer kan herstellen. Dit kan weergegeven worden door een maximaal geaccepteerde schade vast te stellen en te analyseren hoever de reactiecurve verwijderd is van dit punt.



Figuur 1.1 Analysekader systeemrobuustheid



Figuur 1.2 Theoretische reactiecurve met robuustheidcriteria, waarin 'disturbance magnitude' vervangen kan worden door rivierafvoer en 'system response' door overstromingsschade.

1.3 Doel en onderzoeksvragen

Met de IJsselcasus wordt het analysekader voor systeemrobuustheid getoetst. De twee onderzoeksvragen zijn:

1 Welke inzichten levert de robuustheidanalyse over het functioneren van de IJsselvallei bij hoge afvoeren? Sluit dit aan bij de definitie van robuustheid?
2 Welke systeemeigenschappen verhogen de robuustheid van de IJsselvallei voor hoge afvoeren?

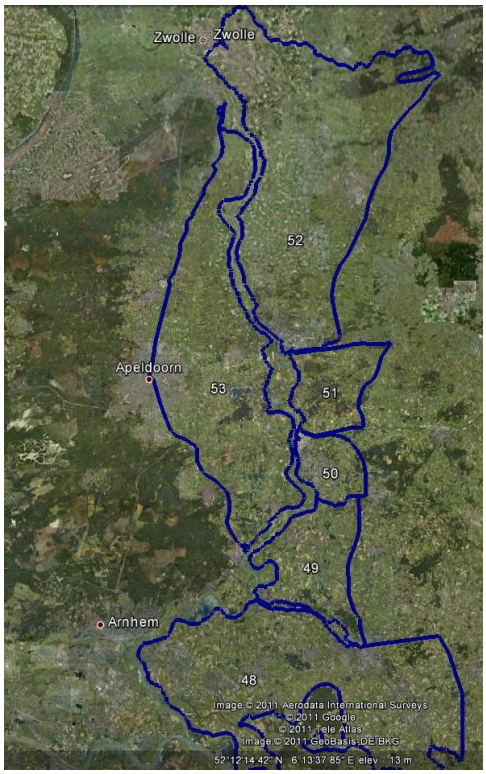
De tweede onderzoeksvraag dient niet te worden verward met beslisrobuustheid (zie vorige paragraaf). In dit rapport worden verschillende systeemconfiguraties in het *variabele huidige klimaat* met elkaar vergeleken. Er wordt niet gekeken naar hoe goed maatregelen presteren bij onzekere *toekomstige omstandigheden*.

1.4 Aanpak

In deze studie is het overstromingsrisico en de systeemrobuustheid geanalyseerd voor het huidige IJsselsysteem en vier alternatieve configuraties. Door de robuustheidcriteria te kwantificeren en te vergelijken voor deze systemen ontstaat inzicht in waarom de ene systeemconfiguratie beter kan omgaan met hoogwatergolven dan de andere. Door de scores op robuustheid te vergelijken met de mate van risicoreductie (als de alternatieve systemen geïmplementeerd zouden worden), kan de meerwaarde van de robuustheidanalyse bepaald worden.

1.5 Studiegebied

Het studiegebied omvat de rivier de IJssel en de aangrenzende dijkringen 48 t/m 53 (Figuur 1.3), van Arnhem tot Zwolle. Dijkring 47 is buiten beschouwing gelaten, omdat het beschikbare model niet ver genoeg reikte en de bijdrage van deze dijkring aan het totale overstromingsrisico gering is. Dijkringen 10 (Mastenbroek) en 11 (IJsseldelta) worden naast de IJssel ook bedreigd vanuit het IJsselmeer (norm van 1/2000 per jaar) en zijn daarom buiten beschouwing gelaten.



Figuur 1.3 Overzicht studiegebied met dijkringen 48 t/m 53

2 Aanpak analyse

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe overstromingsrisico's en systeemrobuustheid zijn berekend. Om onderscheid te maken tussen overstromingsrisico per dijkring en overstromingsrisico van de hele IJsselvallei, wordt voor dit laatste begrip de term 'systeemrisico' gebruikt. Op dezelfde manier wordt onderscheid gemaakt tussen overstromingskans (per doorbraaklocatie) en systeemkans (= de kans dat er ergens langs de IJssel een overstroming plaatsvindt). Tevens worden hier de alternatieve systeemconfiguraties geïntroduceerd.

2.1 Systeemrisico

Van afvoergolf naar systeemrisico

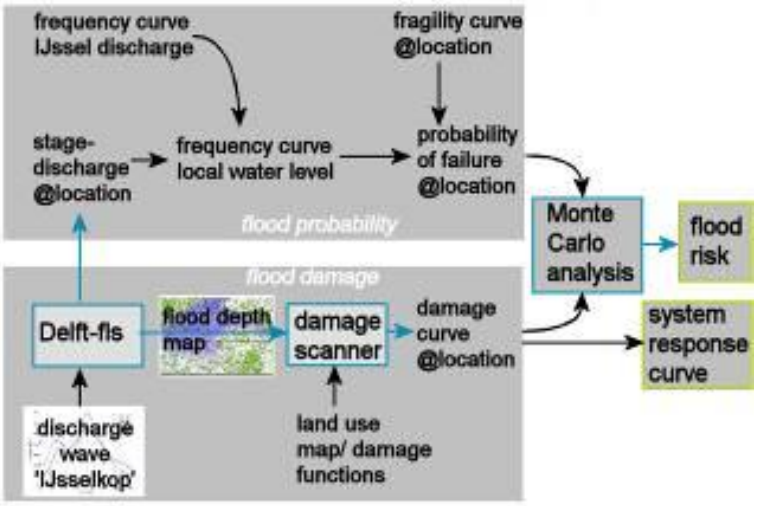
Het systeemrisico is het geheel aan overstromingskansen en bijbehorende gevolgen in het IJsselgebied (dijkring 48 t/m 53). Figuur 2.1 geeft een overzicht van de stappen die zijn genomen om tot een schatting van het systeemrisico te komen. Allereerst is een model nodig dat simuleert hoe een afvoergolf zich door de IJssel beweegt en welke waterstanden optreden bij de dijk. Hiervoor is het tweedimensionale hydrodynamische model Delft-FLS gebruikt (WL, 2001; bijlage B). In dit model kan tevens worden ingesteld waar een dijk breekt en hoe de bres zich ontwikkelt in de tijd. Er zijn in totaal dertien doorbraaklocaties gekozen langs de IJssel, die onafhankelijk van elkaar gesimuleerd zijn. Door een bres stroomt water het gebied in: de overstromingsberekening. Eén van de uitkomsten van deze berekening is de maximale waterdiepte in het gebied als gevolg van de dijkdoorbraak. Door deze waterdieptekaarten te combineren met landgebruikkaarten en schadefuncties (met behulp van een schademodel), ontstaat een beeld van de economische schade als gevolg van de dijkdoorbraak. In deze studie is gebruik gemaakt van het schademodel 'Damage Scanner' (De Bruijn, 2006). Ter vergelijking is voor een aantal overstromingsscenario's ook gerekend met de standaardmethode schade en slachtoffers (Kok et al., 2005). De verschillen worden getoond in bijlage E.

Overschrijdingskans, faalkans en overstromingskans

Elke doorbraak heeft een kans van voorkomen: de overstromingskans. Dit is een combinatie van de kans dat een bepaalde waterstand optreedt en de kans dat bij die waterstand de dijk faalt[1] ('fragility curve' in Figuur 2.1). De frequentieverdeling van de waterstand ter plaatse van de dijkdoorbraak ('frequency curve local water level' in Figuur 2.1) wordt berekend uit de relatie tussen waterstand en afvoer (Qh-relatie) ter plaatse ('stage-discharge at location' in Figuur 2.1) en de frequentieverdeling van de afvoer bij Lobith. De Lobith-afvoer die correspondeert met de IJssel-afvoer hangt af van de afvoerverdeling. Volgens het huidige beleid zou er 15% van de afvoer bij Lobith naar de IJssel geleid moeten worden, maar in modellen die gebruikt worden voor het afleiden van hydraulische randvoorwaarden voor toetsen van waterkeringen is dit percentage vaak iets hoger: 15.4 %. Als in de toekomst de Nederrijn wordt ontzien bij hogere afvoeren dan 16000 m^3/s bij Lobith, zal er relatief meer water over de IJssel gaan. Bovendien is het onzeker hoe de afvoerverdeling in de praktijk zal zijn, omdat extreme afvoeren nooit gemeten zijn. In dit hoofdstuk wordt aangenomen dat 16% van de Lobith-afvoer over de IJssel gaat. Om te laten zien wat de invloed is van deze aanname op het systeemrisico, is ook met 15% en 18% gerekend (zie Hoofdstuk 4 Gevoeligheidsanalyse).

1. *Met falen wordt in dit rapport bedoeld dat de dijk bezwijkt (dus er stroomt water het gebied in), tenzij anders aangegeven*

De faalkans van de dijk, gegeven een waterstand, is berekend door een aanname te doen over de overstromingskans per dijkring en de vorm van de faalcurve. Er wordt uitgegaan van een overstromingskans per dijkring, die in getal overeenkomt met de huidige norm uitgedrukt als overschrijdingskans. Dit betekent voor de IJssel dat *per dijkring* de kans dat er ergens in die dijkring iets misgaat (wat leidt tot een overstroming) gelijk is aan 1/1250 per jaar. Hoe meer doorbraaklocaties per dijkring, hoe kleiner de faalkans voor één dijkvak (zie verderop bij *faalcurve*). De faalcurve wordt gefit aan de hand van de overstromingskans per dijkring en de frequentiecurve van de lokale waterstand. De faalcurve wordt beschreven door een cumulatieve normaalverdeling met een μ en een σ. Voor de fit is een aanname nodig over de vorm van de faalcurve, dus over de σ. In eerste instantie is σ = 0.5 m gekozen. In bijlage B wordt dit verder toegelicht. In de gevoeligheidsanalyse in Hoofdstuk 4 wordt het effect van σ=0.3 m en σ=0.8 m op het overstromingsrisico bepaald.



Figuur 2.1 Stappen in de berekening van het systeemrisico en de reactiecurve ('system response curve')

MonteCarlo-analyse

De methode om van overstromingskans en schade per locatie te komen tot een benadering van het systeemrisico (alle locaties samen) wordt uitgelegd in bijlage B. In het kort komt de methode neer op een MonteCarlo-analyse, waarin trekkingen worden gedaan uit de overstromingskansverdelingen van de locaties. De overstromingskansen per locatie zijn eerst omgezet naar grenstoestandsfuncties (Z) met een normale verdeling. Deze functies zijn zodanig gekozen dat de kans op Z<0 (=dijk bezwijkt) gelijk is aan de opgegeven overstromingskans. Er is rekening gehouden met statistische afhankelijkheid tussen de locaties. Bij volledige afhankelijkheid zouden ze enkel allemaal tegelijk kunnen bezwijken, maar bij volledig onafhankelijkheid zouden ze niks met elkaar te maken hebben – wat niet waar is, want als een afvoergolf bij de één passeert, gebeurt dat bij de ander ook. Afhankelijkheid wordt aangeduid met ρ tussen 0 (volledig onafhankelijk) en 1 (volledig afhankelijk). In deze studie worden de locaties gecorreleerd volgens ρ =0.8. Met een gevoeligheidsanalyse (Hoofdstuk 4) is berekend wat het effect is van een andere correlatie op het risico.

De MonteCarlo-analyse resulteert in duizenden realisaties van mogelijke combinaties van dijkdoorbraken. Het aantal realisaties waarbij een of meer van de locaties faalt gedeeld door het totale aantal realisaties geeft een benadering van de systeemkans. Om tot een

systeemrisico te komen wordt bij elke realisatie de bijbehorende schade gezocht. Uitgangspunt hierbij is de som van schades per falende locatie bij een standaard afvoergolf van 16000 m^3/s bij Lobith. Beter zou zijn om de schade te laten afhangen van de werkelijk opgetreden waterstand in de betreffende realisatie. Voor de vergelijking tussen maatregelen maakt dit waarschijnlijk niet uit. De kans op overschrijden van de schade wordt vervolgens berekend door wederom het aantal realisaties waarbij de schade overschreden wordt te delen door het totale aantal realisaties. Overschrijdingskans van de schade uitgezet tegen de schade wordt een risicocurve genoemd. De oppervlakte onder deze risicocurve is het systeemrisico.

Als meer doorbraaklocaties tegelijk falen, wordt de schade in de verschillende dijkringen bij elkaar opgeteld. Door positieve hydraulische systeemwerking zal de schade bij gecombineerde dijkdoorbraken echter lager zijn. Er wordt dus een kleine overschatting van het risico gemaakt. Als er meer dan vier locaties tegelijk falen, wordt de totale schade bij deze realisatie verwaarloosd. De kans op zo'n realisatie is heel klein en de bijbehorende schade lastig te bepalen (vanwege de hydraulische systeemwerking en omdat er binnen de realisatie weer meerdere mogelijkheden zijn met verschillende combinaties van de doorbraaklocaties).

2.2 Systeemrobuustheid

2.2.1 Reactiecurve

Om de systeemrobuustheid te analyseren is een reactiecurve nodig die het verband laat zien tussen piekafvoer op de IJssel en de schade door overstroming bij die afvoer. Hiervoor zijn per doorbraaklocatie voor een aantal afvoergolven de gevolgen van een dijkdoorbraak berekend. De reactiecurve kan hiermee worden samengesteld voor zowel een dijkring als het hele systeem.

De reactiecurve biedt aanknopingspunten om de robuustheidcriteria af te leiden: reactiedrempel (beschermingsniveau), ernst van de gevolgen (overstromingsrisico), proportionaliteit van de gevolgen, en het omslagpunt. Voor het omslagpunt is tevens informatie nodig over de herstelcapaciteit of hoeveel schade acceptabel is.

Voor een reactiecurve van het hele systeem is een schatting nodig van de totale schade bij elke afvoergolf. Hiervoor moet een aanname worden gedaan over welke doorbraaklocaties tegelijk kunnen falen. Deze schades worden vervolgens bij elkaar opgeteld. In werkelijkheid zal de schade bij twee of meer doorbraken iets lager zijn, omdat er sprake is van hydraulische systeemwerking, waardoor de waterstand ter plaatse van de tweede doorbraaklocatie lager is dan wanneer enkel die locatie zou breken. Een lagere waterstand betekent minder schade. Dit effect is niet meegenomen, waardoor de schade wordt overschat.

Om het effect van de onzekerheid over aantal en locatie van dijkdoorbraken in beeld te brengen, is een bandbreedte om de reactiecurve berekend. Hiervoor zijn de volgende twee opties berekend:

1 Conservatief: de vier dijkringen met de meeste schade overstromen tegelijk, ongeacht de hoogte van de afvoergolf;
2 Optimistisch: per dijkring is gekeken welke doorbraaklocatie de laagste schade geeft. Vervolgens is voor de laagste golf de dijkring met de minste schade gekozen, voor de

middelste golf zijn de schades van de twee dijkringen met de minste schade opgeteld, en voor de hoogste afvoergolf zijn de schades van de vier dijkringen met de minste schade opgeteld. Welke dijkringen samen de laagste schade hebben is afhankelijk van de golfvorm.

De drie genoemde afvoergolven zijn ref14, ref16 en ref19. Voor een bespreking van de gebruikte afvoergolven wordt verwezen naar Bijlage A.

2.2.2 Reactiedrempel

De reactiedrempel geeft aan wat de weerstand van het systeem is ten aanzien van hoogwatergolven. Omdat de dijksterkte onzeker is, is de reactiedrempel ook onzeker. Bij verschillende afvoeren is er een kans dat er een dijk bezwijkt. De reactiedrempel is daarom op twee manieren gekwantificeerd:

1. Systeemkans (1/jaar)
2. Laagste afvoer met schade (m^3/s)

De systeemkans is de kans dat er ergens in het systeem een overstroming plaatsvindt. De laagste afvoer met schade is berekend door te bepalen bij welke afvoer de doorbraaklocaties een faalkans > 0.1 hebben. Vervolgens is de laagste afvoer gekozen als indicator. Dit betekent dus dat er bij deze afvoer een kans is van minstens 1 op 10 dat er ergens in het systeem iets misgaat.

2.2.3 Proportionaliteit

Als indicator voor proportionaliteit is ‘graduality’ gekozen (zie De Bruijn, 2005). De graduality neemt een waarde aan tussen 0 en 1, waarbij 1 staat voor volledig gradueel (lineair verband tussen afvoer en schade). Een graduality van 0 betekent dat alle schade in één keer optreedt (Figuur 2.2).

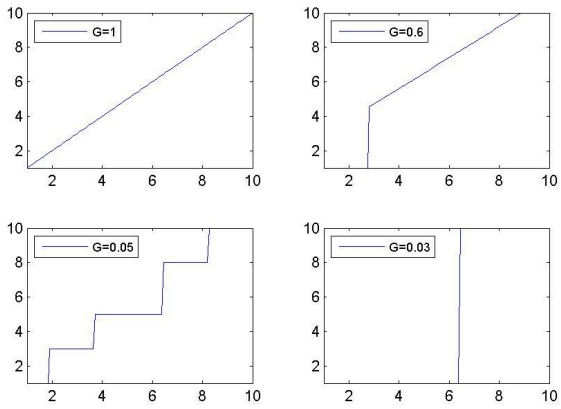
Graduality wordt als volgt berekend:

$$Graduality = 1 - \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{N} \left| \frac{\Delta Q_n}{\left(Q_{\max} - Q_{\min}\right)} - \frac{\Delta S_n}{\left(S_{\max} - S_{\min}\right)} \right|$$

Waarbij:

N	=	1000 (aantal stukken waarin de reactiecurve wordt opgedeeld)
ΔQ	=	verandering in piekafvoer voor deel *n* (= Q_n - Q_{n-1})
ΔS	=	verandering in schade voor deel *n* (= S_n - S_{n-1})
Q_{max}-Q_{min}	=	verschil tussen maximale afvoer en minimale afvoer in het rekenbereik
S_{max}-S_{min}	=	verschil tussen maximale schade en minimale schade in het rekenbereik (S_{min}=0)

In deze studie is Q_{min} gelijkgesteld aan de reactiedrempel, dus de laagste afvoer met schade, en Q_{max} gelijkgesteld aan de hoogste afvoer waarvoor schade is berekend. Over het algemeen geldt dat een nog hogere afvoer de graduality niet beïnvloedt.



Figuur 2.2 Theoretische reactiecurves verschillend in 'graduality'(G)

2.2.4 Ernst

De ernst van de gevolgen is gekwantificeerd aan de hand van het risico. De berekening daarvan is uitgelegd in paragraaf 2.1.

2.2.5 Omslagpunt

Het omslagpunt geeft aan bij welke afvoer de schade door overstromen zo erg is dat herstel niet meer mogelijk is. Voor het bepalen van het omslagpunt is in principe een acceptatiegrens voor de schade nodig, waarbij men verwacht dat herstel heel lastig wordt of heel lang gaat duren. Deze grens is moeilijk in absolute zin te bepalen. Het heeft wel een duidelijke relatie met de herstelcapaciteit.

Een semikwantitatieve analyse van de herstelcapaciteit is mogelijk door te kijken naar de volgende factoren (zie De Bruijn, 2005):

1. Economische herstelcapaciteit: of mensen en overheden in het gebied financieel in staat zijn om gebouwen en infrastructuur te herstellen;
2. Menselijke herstelcapaciteit: opleiding, gezondheid, communication, politieke toestand, voorbereiding (rampenbestrijdingsplannen);
3. Fysische herstelcapaciteit: hoe snel kan het water weggepompt worden? Is het zout of zoet water?

Deze factoren samen geven een indruk van hoe snel een gebied kan herstellen van een overstroming. Dit is een eigenschap van het gebied en onafhankelijk van de overstroming. Gezien de eigenschappen van de IJsselvallei (goede economische situatie, hoogopgeleide inwoners, goede gezondheid, zoet water dat uit zichzelf richting IJsselmeer stroomt) zal de herstelcapaciteit groot zijn en moet er heel wat gebeuren voordat een omslagpunt wordt bereikt.

In plaats van te zoeken naar een absolute schadegrens, is bepaald in welke alternatieve systeemconfiguratie een eventueel omslagpunt als eerste zal worden bereikt.

2.3 Beschrijving en aanpak alternatieve systeemconfiguraties

Overstromingsrisico's kunnen gereduceerd worden door overstromingskansen te verkleinen, overstromingsgevolgen te verkleinen, of een combinatie. Aansluitend bij de zoekrichtingen in het deltaprogramma Rivieren, worden in deze studie vier alternatieven onderscheiden:

- Dijken versterken,
- Rivier verruimen,
- Deltadijken bouwen en
- Landgebruik aanpassen.

Dijken versterken is een typische 'kansenverkleiner' en landgebruik aanpassen is een typische 'gevolgenbeperker' (laag 2 van de meerlaagsveiligheidbenadering). Zowel met ruimte voor de rivier als met deltadijken worden kansen verkleind én gevolgen beperkt. Hierna volgt een beschrijving van elk alternatief systeem en een uitleg van de analyse.

De ontwikkeling van het overstromingsrisico in de tijd wordt niet berekend. In plaats daarvan worden de alternatieve systemen naast elkaar gelegd en worden het overstromingsrisico en de systeemrobuustheid volgens prijspeil 2000 vergeleken. Dit geeft inzicht in welk type maatregel tot een robuuster systeem leidt.

2.3.1 Dijken versterken

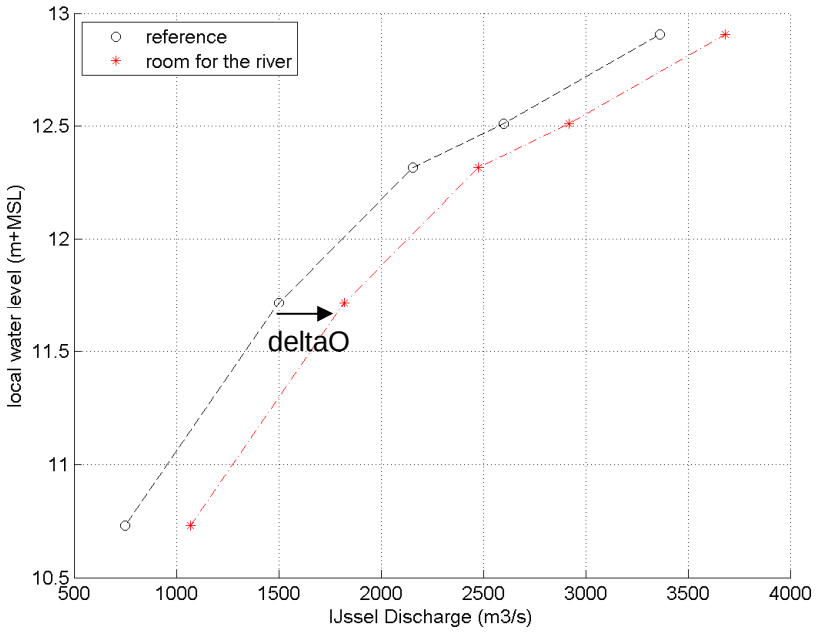
Dijken versterken is de traditionele manier om het beschermingsniveau op peil te houden bij veranderde randvoorwaarden (bv. maatgevende afvoer, golfopzet). Er zijn verschillende manieren om dijken te versterken. In dit alternatief worden dijken enkel verhoogd volgens conventioneel ontwerp. Conventioneel betekent dat andere faalmechanismen dan overloop minder dan 10% aan de overstromingskans bijdragen. Dijken verhogen verkleint de kans op een dijkdoorbraak gegeven een bepaalde waterstand bij de dijk. Dit is terug te zien in een verandering van de faalcurve: deze curve verschuift naar rechts met Δh (Figuur 2.4). Δh is het verschil tussen een waterstand met overschrijdingskans van 1/1250 per jaar en een waterstand met overschrijdingskans 1/5000 per jaar. Dit is een arbitraire keuze en komt overeen met een verschil in afvoer van ongeveer 300 m^3/s, net zoals bij rivier verruimen. Δh is afhankelijk van de Th-relatie (T = herhalingstijd) en verschilt dus per locatie. De vorm van de faalcurve blijft hetzelfde als in het huidige systeem.

2.3.2 Rivier verruimen

Bij rivierverruiming worden de lokale waterstanden bij een bepaalde afvoer verlaagd, door dijkteruglegging, uiterwaardvergraving, nevengeulen, etc. Ook deze maatregelen verkleinen de overstromingskans. Hoe de maatregelset er precies uitziet blijft in het midden. De aanname is dat een toename van de maatgevende afvoer bij de IJsselkop van ongeveer 300 m^3/s met rivierverruiming wordt opgelost. Deze deltaQ komt overeen het verschil tussen een afvoer met overschrijdingskans van 1/1250 per jaar en een afvoer met overschrijdingskans van 1/5000 per jaar. De waterstand bij maatgevend afvoer in het referentiesysteem komt dus overeen met de waterstand bij maatgevende afvoer+300 m^3/s in het systeem met rivierverruiming. Omdat de waterstand bij een bepaalde afvoer (zie Qh-relatie) verlaagd wordt, zal de schade door overstroming bij die afvoer ook kleiner zijn. NB. Deze aanname komt het meest overeen met een uiterwaardverlaging. Een dijkverlegging heeft een niet-lineaire invloed op de Qh-relatie, waardoor nieuwe representatieve Qh-relaties beter berekend kunnen worden met een hydrodynamisch model zoals WAQUA.

Per locatie wordt de Qh-relatie aangepast, zodat bij dezelfde waterstand een hogere afvoer hoort. In principe zal de Qh-relatie niet bij alle afvoeren dezelfde verschuiving hebben. Bij lage afvoeren is er waarschijnlijk helemaal geen effect, omdat het bodemprofiel tussen de zomerdijken niet is aangepast (tenzij het om zomerbedverdieping gaat). Echter, het lage deel van de curve is niet relevant voor bepaling van het risico, omdat de kans op dijkdoorbraak bij die afvoer verwaarloosbaar klein is. Er is aangenomen dat het effect van rivierverruiming op de afvoer overal gelijk is (zie Figuur 2.3) De faalcurve verandert niet, omdat de dijk zelf ook niet verandert, maar de kans op een waterstand verandert wel. Hierdoor verandert ook de overstromingskans per locatie.

Samenvatting van de effecten van ruimte voor de rivier:
- Verlaging van de potentiële schade door overstroming bij een bepaalde afvoer
- Verschuiving van de Qh-relatie, en daardoor:
- Verkleining van de overstromingskans per locatie



Figuur 2.3 Effect van ruimte voor de rivier op de Qh-relatie, bij doorbraaklocatie 48p (Giesbeek)

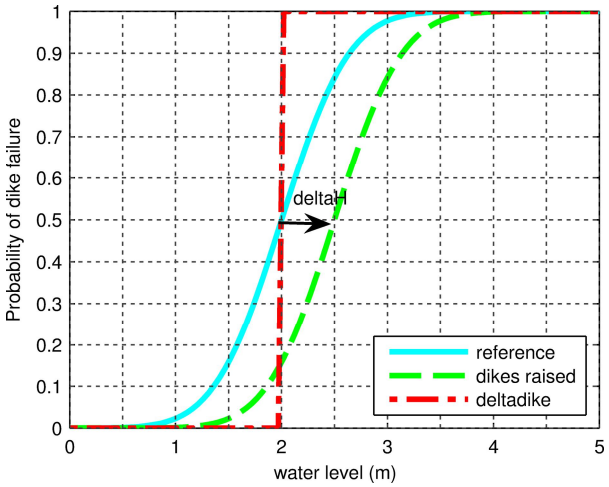
2.3.3 Deltadijken

Aan deltadijken worden scherpere eisen aan de sterkte gesteld dan in de huidige normen is vastgelegd (Knoeff & Ellen, 2011). Deze extra eisen beogen het voorkomen van plotselinge en oncontroleerbare overstromingen. In onderliggende studie wordt dit vertaald in een verwaarloosbare faalkans. Dit houdt in dat het water nog wel over de dijk heen kan slaan, maar dat de dijk hierdoor niet zal bezwijken. Bij dezelfde waterstand zal minder water het gebied instromen en zodoende zal minder schade optreden. De maatregel deltadijken verkleint dus zowel de overstromingskans als het gevolg.

Theoretisch verandert de definitie van de faalcurve: de dijk ‘faalt’ nu alleen als er water overheen stroomt, maar hij bezwijkt daarbij niet. Voor alle andere faalmechanismen wordt aangenomen dat de kansbijdrage zo klein is dat deze kan worden verwaarloosd. Voor de analyse van systeemrisico is de faalcurve niet meer nodig. De faalcurve voor deltadijken is nu een stapfunctie, omdat de kans op falen nul is bij een waterstand kleiner of gelijk aan de

normwaterstand (=waterstand die eens in de 1250 jaar overschreden wordt). Boven deze normwaterstand is de 'faalkans' (hier: overloopkans) gelijk aan 1 (zie Figuur 2.4). In dit geval is de overstromingskans dus gelijk aan de overschrijdingskans. Echter, omdat de dijken in het model afgeleid zijn van een afvoergolf met een piek van 2600 m3/s, is de overstromingskans gelijk aan 1/1500 per jaar, dus iets kleiner dan de huidige wettelijke norm.

De berekening van het systeemrisico is eenvoudiger geworden. Er zijn geen aannames meer nodig over waar de dijk breekt en welke dijkringen tegelijk kunnen onderlopen. De overschrijdingskans van de afvoer in combinatie met de schade bij die afvoer geeft het systeemrisico.



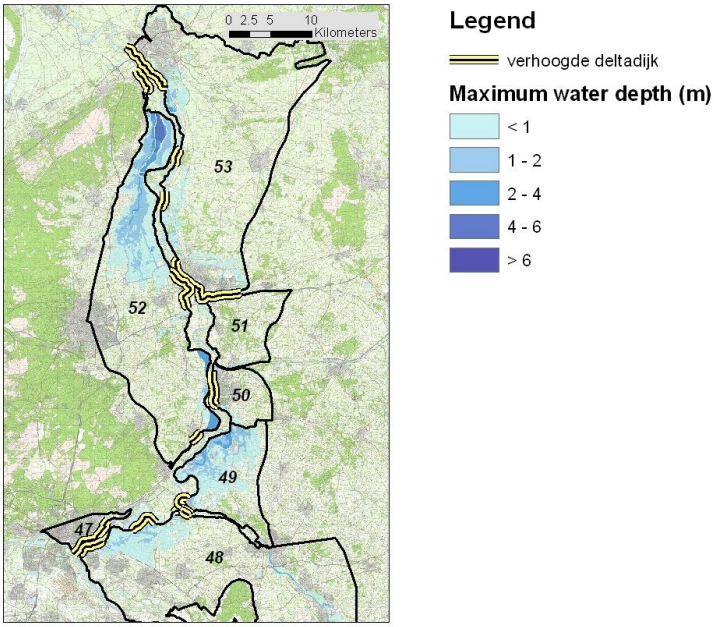
Figuur 2.4 Voorbeeld van verschuiven van faalcurve als gevolg van dijkverzwaring of bouwen deltadijk, op een fictieve locatie k met een normwaterstand van 2 meter

Deltadijken variant 1

In de eerste variant van deltadijken krijgen alle dijken een hoogte gelijk aan de waterstand ter plaatse die hoort bij een afvoer van 2600 m3/s. Uitgaande van een afvoerverdeling van 0.16 komt dit overeen met een herhalingstijd van 1500 jaar (en met Q_{Lobith} = 16250 m^3/s). De schade zal sterk afhankelijk zijn van de afvoergolf: hoe hoger de piekafvoer, hoe meer water over de dijk slaat. Echter, van de drie afvoergolven in de referentiesituatie veroorzaken er twee geen schade, omdat de dijk hoog genoeg is en niet bezwijkt. Voor dit alternatief zijn daarom twee extra afvoergolven afgeleid: ref17 (Q_{Lobith} = 17000 m^3/s) en ref18 (Q_{Lobith} = 18000 m3/s). De waterdieptekaart behorende bij ref17 staat in bijlage D. NB. De schade bij ref19 is lager berekend dan bij ref18. Omdat hiervoor bij het schrijven van dit rapport nog geen verklaring voor was gevonden, is de schade bij ref19 gelijkgesteld aan de schade bij ref18. Dit heeft geen invloed op de resultaten.

Deltadijken variant 2

Het nadeel van deltadijken variant 1 is dat er vrijwel overal water over de dijken zal stromen, omdat de dijken precies de hoogte van de normwaterstand hebben gekregen. Daarom zijn in de tweede variant dijken nabij steden en dorpen een halve meter hoger gemaakt dan maatgevende waterstand (zie Figuur 2.5). Bij sommige steden kan er nog steeds wateroverlast zijn, maar dan alleen 'via de achterdeur'.



Figuur 2.5 Waterdieptekaart (afvoergolf ref17) voor systeem met gedifferentieerde deltadijken (DE2)

2.3.4 Landgebruik aanpassen

Met deze optie wordt de potentie van sturing op landgebruik verkend. Dit is niet een los alternatief, maar wordt gecombineerd met alle eerder genoemde alternatieven. Het huidige landgebruik vergeleken met dat volgens twee scenario's in het deltaprogramma: Regional Communities (RC) en Global Economy (GE) (Bruggeman et al., 2011). Hieruit volgt een indicatie van de toename van het overstromingsrisico door alleen landgebruiksverandering (bijvoorbeeld de uitbreiding van stedelijk gebied). Het geeft dus inzicht in welke toename van het overstromingsrisico door landgebruiksveranderingen met behulp van landgebruiksplanning voorkomen kan worden. Waardevermeerdering in de tijd wordt niet in beschouwing genomen, dus economische groei tot bijvoorbeeld 2050 wordt niet meegenomen.

Praktisch betekent het dat de landgebruikskaarten in het schademodel vervangen zijn door kaarten met toekomstig landgebruik volgens de twee scenario's.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden het risico en de robuustheid van de referentie vergeleken met die van de alternatieve systeemconfiguraties. Onder een systeemconfiguratie wordt het geheel van eigenschappen (bijvoorbeeld dijkhoogtes, landgebruik, rivierdimensies, regionale keringen, etc.) verstaan, die samen het overstromingsrisico bepalen.

3.1 Systeemrisico

Uitgaande van afvoergolven met een standaard vorm en een afvoerverdeling van 0.16 (16% van de Lobith-afvoer gaat over de IJssel), is het systeemrisico voor de referentiesituatie 10 miljoen euro per jaar. Bij een smalle golfvorm is het systeemrisico 8 miljoen euro per jaar, bij een brede golfvorm is dit 13 miljoen euro per jaar.

De afvoerverdeling heeft invloed op de frequentieverdeling van de waterstanden en daarmee op de systeemkans en het systeemrisico. Het systeemrisico bij een standaard golfvorm voor verschillende afvoerverdelingen is weergegeven in Tabel 3.1. De bandbreedte die ontstaat door de golfvorm is -20% tot +30%, terwijl de afvoerverdeling een effect heeft van -50% tot +200%. Het effect van de afvoerverdeling op het systeemrisico van de IJssel is dus groter dan het effect van de golfvorm. Het effect op het risico van deze en andere aannames wordt besproken in Hoofdstuk 4.

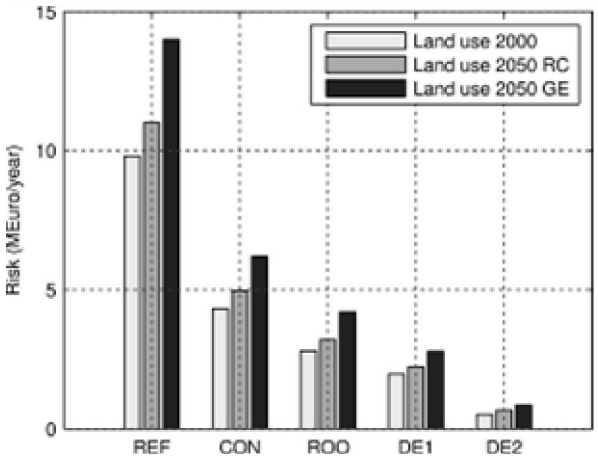
Afvoerverdeling	**Systeemrisico (x10^6 euro / jaar)**		
	Smal	*Standaard*	*Breed*
0.15	4	5	7
0.16	8	10	13
0.18	22	28	36

Tabel 3.1 Systeemrisico van de IJssel voor verschillende afvoerverdelingen, voor de drie verschillende afvoergolfvormen

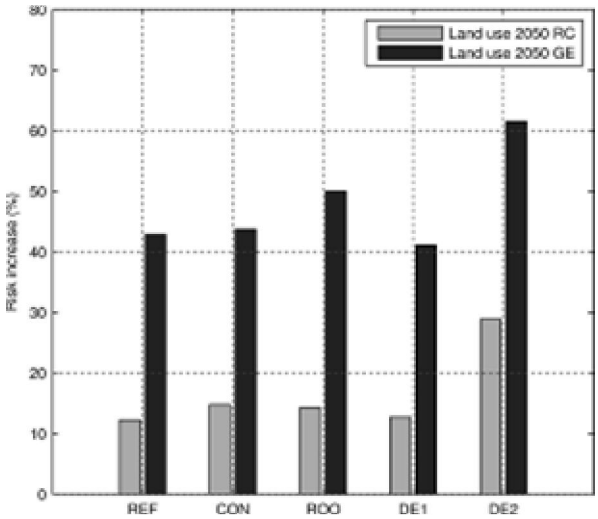
Figuur 3.1 toont het systeemrisico voor het referentiesysteem en de alternatieve systemen. Deltadijken variant 2 (DE2) geeft de grootste risicoreductie. Hoewel dijken verhogen (CON) en ruimte voor de rivier (ROO) uitgaan van dezelfde afvoertoename, is de systeemkans en het risico van ROO lager. Het verschil in systeemkans komt doordat CON invloed heeft op de ligging van de faalcurve (bij dezelfde waterstand is er een kleinere kans dat de dijk bezwijkt), terwijl ROO ingrijpt op de Qh-relatie (bij dezelfde waterstand hoort een lagere afvoer met een lagere kans van voorkomen) en daarmee op de QT-relatie. Bij CON wordt dus de faalkans bij een bepaalde waterstand kleiner, terwijl bij ROO de kans op voorkomen van die waterstand kleiner wordt. Het verschil in risico wordt vergroot doordat de schade bij ROO lager is door de lagere waterstanden bij dezelfde afvoer. Dit laatste is goed te zien in de reactiecurve (zie volgende paragraaf).

Figuur 3.2 toont de procentuele toename van het systeemrisico in alle alternatieven als gevolg van landgebruikveranderingen. De relatieve toename is in bijna alle alternatieven vergelijkbaar. Opvallend is de relatief grote risicotoename in variant 2 van deltadijken (DE2). In het GE scenario neemt het risico met ruim 60% toe, ten opzichte van 40-50% in de andere configuraties. Dit komt waarschijnlijk omdat twee van de dijkringen waar met DE2 nog overstromingen plaatsvinden (48, 49 en 52) ook relatief grote verandering in landgebruik ondervinden (40% van het oppervlak verandert ten opzichte van ongeveer 30% in de meeste andere dijkringen). Dit kan als volgt worden geïnterpreteerd: het sturen van

landgebruikontwikkelingen is effectiever in combinatie met deltadijken die in hoogte gedifferentieerd zijn.



Figuur 3.1 Systeemrisico van referentiesysteem en alternatieve systemen, voor huidig landgebruik en 2 landgebruikscenario's



Figuur 3.2 Procentuele toename van systeemrisico ten opzichte van huidig landgebruik, door geringe (RC) en forse (GE) landgebruiksveranderingen

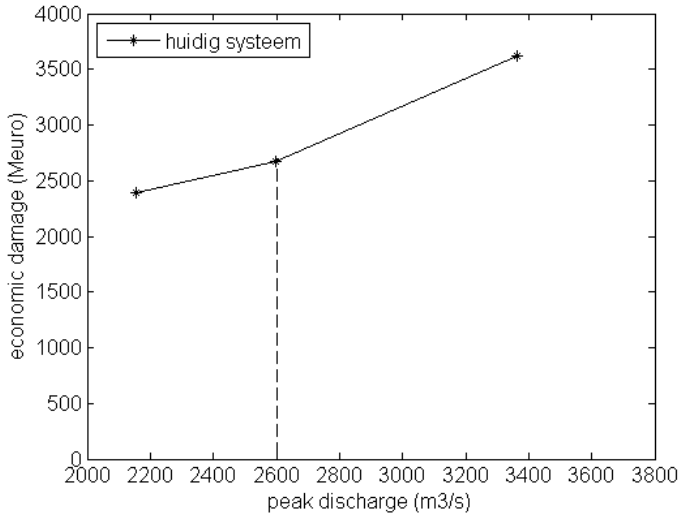
3.2 Systeemrobuustheid

3.2.1 Reactiecurve

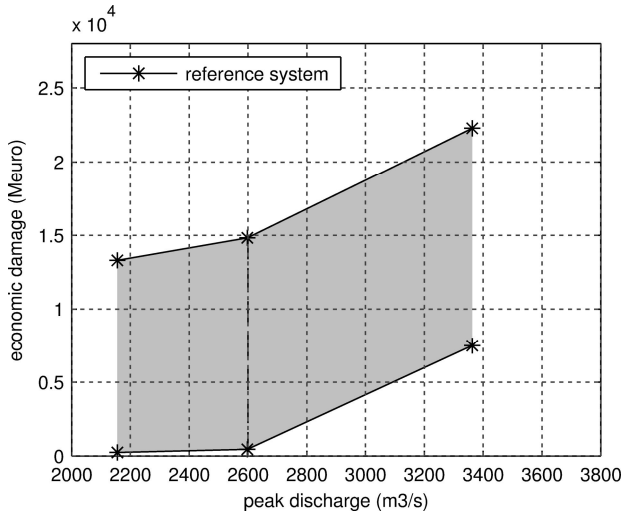
Figuur 3.3 geeft de reactiecurve voor dijkring 48. Het wordt duidelijk dat de schade licht toeneemt met een toenemende afvoer. Figuur 3.4 toont de reactiecurve voor het hele huidige systeem. De bandbreedte komt voort uit de onzekerheid over welke dijken tegelijk doorbreken[2] (conservatieve en optimistische schatting, zie paragraaf 2.2.1). Figuur 3.5 toont de reactiecurve voor het hele systeem, voor alle systeemconfiguraties. DE1 en DE2 staan in

2. *In dijkring 51 is de schade door overstromen het laagst, maar omdat de IJssel in deze dijkring ook weinig water kwijtraakt, wordt het onwaarschijnlijk geacht dat het bij een enkele doorbraak zou blijven. Na dijkring 51 heeft dijkring 52 (doorbraaklocatie p) de laagste schadeschatting.*

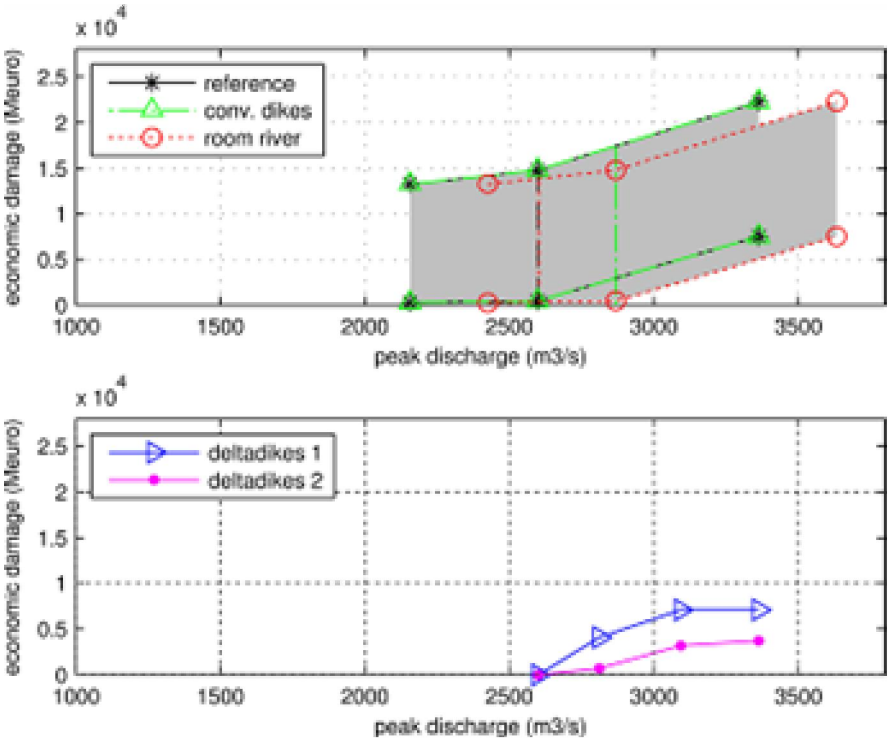
een aparte figuur, omdat hier geen onzekerheid is over waar de dijk doorbreekt en de schade daardoor geen bandbreedte heeft. Bij DE1 en DE2 is dus niet alleen de absolute schade lager; er is ook minder onzekerheid over de schade. Omdat de dijken alleen overlopen en niet bezwijken is veel beter bekend waar schade op zal treden. De scores op de criteria voor systeemrobuustheid zijn uit de reactiecurves afgeleid. Ze worden besproken in de volgende paragraaf en weergegeven in Tabel 3.2.



Figuur 3.3 Reactiecurve dijkring 48 (REF), met verticale stippellijn als indicatie van de maatgevende afvoer



Figuur 3.4 Reactiecurve van het hele IJsselsysteem (REF) met bandbreedte als gevolg van onzekerheid over de doorbraaklocaties.



Figuur 3.5 Reactiecurve van referentiesysteem en alternatieve systemen: economische schade als functie van de afvoer, als bij die afvoer de dijken zouden bezwijken (boven) of overlopen (onder)

3.2.2 Robuustheidcriteria

Aan de hand van de reactiecurve in de vorige paragraaf, zijn de robuustheidcriteria gekwantificeerd. De resultaten worden weergegeven in Tabel 3.2.

Reactiedrempel
Dit criterium geeft aan tegen welke afvoer het systeem beschermd is, en wordt gekwantificeerd aan de hand van twee indicatoren: de laagste afvoer waarbij schade optreedt, en de kans dat er ergens in het systeem schade ontstaat (=systeemkans). De eerste indicator is onzeker omdat de dijksterkte onzeker is: bij een range aan afvoeren is er een kans dat de dijk bezwijkt. De reactiedrempel wordt daarom gelijkgesteld aan de afvoer waarbij de kans op dijkfalen (gegeven die afvoer) gelijk is aan 0.1. Dit wordt bekeken per doorbraaklocatie en vervolgens wordt de laagste reactiedrempel van alle locaties geselecteerd. De reactiedrempel geeft dus aan dat bij deze afvoer de kans dat er ergens in het systeem een overstroming plaatsvindt minstens 0.1 is. Bij DE1 en DE2 wordt de onzekerheid over de dijksterkte klein verondersteld (immers, de aanname is dat de dijk alleen overloopt en niet bezwijkt, dus alleen de dijkhoogte doet er nog toe en die is relatief nauwkeurig te bepalen), waardoor de reactiedrempel gelijk wordt gesteld aan de maatgevende afvoer (2600 m^3/s).

Hoe hoger de reactiedrempel, hoe groter de systeemrobuustheid. CON en ROO scoren dus het best op dit criterium, en REF het slechtst. De tweede indicator geeft echter een ander beeld: de systeemkans is het grootst in REF en het kleinst in DE1 en DE2. Dit is als volgt te verklaren. Bij de indicator systeemkans zijn kans van voorkomen (frequentie) en onzekerheid over de dijksterkte (=faalcurve) samengevoegd in één schatting voor de kans. Dit betekent dat verschillende combinaties van frequentieverdeling en mate van kennisonzekerheid over

dijksterkte tot eenzelfde systeemkans kunnen leiden. Bijvoorbeeld: dijkverhogen verkleint de kans op overschrijden van de kritieke waterstand, maar de onzekerheid over bezwijken bij lagere waterstanden blijft gelijk. Bij deltadijken wordt juist de onzekerheid over bezwijken verkleind, terwijl de frequentieverdeling van de waterstand gelijk blijft. Doordat deze twee elementen zijn samengevoegd is niet in één oogopslag duidelijk wat die systeemkans zegt over de reactiedrempel van het systeem. Dit wordt verder besproken in Hoofdstuk 5 (Discussie).

Ernst van de gevolgen
Omdat de schade afhangt van de afvoer, is de ernst van de gevolgen uitgedrukt in overstromingsrisico. Deze getallen zijn overgenomen uit de vorige paragraaf. Het referentiesysteem heeft het hoogste risico. Dit is ook te verwachten, aangezien de alternatieven tot doel hadden het risico te verkleinen. Het alternatieve systeem met verhoogde traditionele dijken (CON) heeft een groter risico dan het alternatief 'ruimte voor de rivier' (ROO). De twee varianten met deltadijken hebben het kleinste risico.

Proportionaliteit
Dit criterium geeft aan wat de mate van geleidelijkheid is van de schadetoename, bij toenemende afvoer. Als indicator is de 'graduality' gekozen. Deze komt voor alle alternatieve systemen uit op 0.6 of 0.7. Deze indicator maakt dus weinig onderscheid tussen de alternatieve systemen, terwijl de reactiecurves op het oog duidelijk wel verschillen in proportionaliteit. Bij CON en REF is de schade in één klap hoog, zodra de dijken bezwijken. Bij deltadijken, dus doorbraakvrije dijken, neemt de schade geleidelijk toe. Dit wil zeggen dat wanneer een hogere afvoergolf langskomt dan de reactiedrempel, niet meteen het hele gebied onderloopt. ROO zou wat betreft proportionaliteit dicht tegen gewone dijken aan moeten zitten. De absolute schade bij een dijkdoorbraak is weliswaar lager dan bij CON en REF, maar de maximale schade (bij hele hoge afvoeren) is ook lager. Het gaat bij proportionaliteit om hoeveel van die maximale schade in één keer wordt bereikt. In die zin verschillen CON, REF en ROO niet veel. De schade bij DE1 en DE2 verloopt wel veel proportioneler dan de schade van de andere configuraties. Op basis hiervan wordt geconstateerd dat 'graduality' geen goede indicator is voor proportionaliteit. Nieuwe scores zijn geschat op basis van kwalitatieve beoordeling van de reactiecurve. Daarbij is de vraag gesteld hoever de curve afwijkt van een denkbeeldige rechte lijn tussen de reactiedrempel en de schade bij een afvoer van 3400 m^3/s. Geen afwijking krijgt een score van 1, volledige stapfunctie krijgt een score van 0 (deze twee uitersten komen wel overeen met de graduality). Nu scoort DE2 het hoogst. ROO verlaagt de absolute schade bij alle afvoeren, waardoor de 'sprong' van geen schade naar schade iets minder groot is dan bij REF. Het blijft echter wel een grote overgang, dus de proportionaliteit is niet veel groter dan dat van REF.

Omslagpunt
De herstelcapaciteit van het IJsselgebied is hoog (zie Hoofdstuk 2), en vergelijkbaar in alle alternatieve systeemconfiguraties. Het voorgestelde criterium 'omslagpunt' verwijst naar de afvoer waarbij de schade zo groot is dat de herstelcapaciteit wordt overschreden. Zoals ook al aangegeven in Mens et al. (2011) is een absoluut schademaximum moeilijk vast te stellen, maar de hoge herstelcapaciteit geeft aan dat het omslagpunt waarschijnlijk bij een extreme afvoer ligt. DE1 en DE2 scoren het hoogst, omdat de absolute schade bij alle afvoeren lager is dan bij de andere alternatieven, waardoor een eventueel omslagpunt pas bij een hogere afvoer bereikt wordt. Referentie en traditionele dijken scoren vergelijkbaar op dit criterium, omdat dijken verhogen alleen invloed heeft op de kans op bezwijken en niet op de schade die optreedt bij een bepaalde afvoer gegeven dat de dijk bezwijkt.

Synthese

De scores op de individuele criteria zijn samengevat in tabel 4.1. De vraag is nu welk systeem robuuster is voor afvoergolven. Alle alternatieven zijn een verbetering ten opzichte van de referentie. Deltadijken 1 en 2 verbeteren in ieder geval de ernst, de proportionaliteit en het omslagpunt. De reactiedrempel is minder onzeker geworden, maar in absolute zin wel iets lager dan dat van traditionele dijken en ruimte voor de rivier. Ruimte voor de rivier is nog iets robuuster dan traditionele dijken, omdat ruimte voor de rivier beter scoort op ernst en omslagpunt. Dit houdt in dat de absolute schade minder groot is over de hele range aan mogelijke afvoeren, en het omslagpunt later bereikt wordt. In termen van systeemkans is de reactiedrempel van ruimte voor de rivier iets hoger (=robuuster) dan die van traditionele dijken, maar de laagste afvoer waarbij schade ontstaat is vergelijkbaar.

In volgorde van robuustheid: Deltadijken 2, Deltadijken 1, Ruimte voor de rivier, traditionele dijken.

Robuustheids-criterium	***Indicator***	**Referentie**	**Traditionele dijken**	**Rivier verruimen**	**Deltadijken**	
		REF	**CON**	**ROO**	**DE1**	**DE2**
Reactiedrempel	*Systeemkans (1/jaar)*	1/300	1/700	1/1000	1/1500	1/1500
	Laagste afvoer met schade (m3/s)	2550	2850	2850	2600	2600
Ernst	*Systeemrisico (Meuro/jaar)*	9.9	4.3	2.8	2.0	0.6
Proportionaliteit	*Graduality (-)*	0.3	0.3	0.4	0.7	0.8
Omslagpunt	*Volgorde bereiken schade-maximum*	1 of 2	1 of 2	3	4	5

Tabel 3.2 Overzicht robuustheid indicatoren voor de geanalyseerde systemen

4 Gevoeligheidsanalyse

4.1 Doel

Er zijn twee redenen om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. De ene is om de *betrouwbaarheid* van modeluitkomsten te toetsen, de andere is om, gegeven dit model, de *gevoeligheid* van modeluitkomsten voor invoer te toetsen. In dit rapport wordt 'model' gezien als de manier waarop overstromingsschade en systeemrisico zijn berekend (dus de combinatie van methoden en modellen, bv. MonteCarlo-analyse, Delft-FLS en DamageScanner).

De *betrouwbaarheid* van het model wordt bepaald door aannames die nodig zijn om de werkelijkheid te versimpelen. Eén van de aannames in dit rapport is de keuze voor 13 representatieve doorbraaklocaties. Als andere representatieve locaties waren gekozen zouden de conclusies van dit rapport niet mogen veranderen. Een ander voorbeeld is het gebruik van het tweedimensionale rivier- en overstromingsmodel, gebaseerd op een 100x100 meter hoogtegrid. Als gerekend was met een model met hogere resolutie, zou een ander systeemrisico berekend worden en andere overstromingsschades. Dit effect is echter voor alle alternatieve systeemconfiguraties vergelijkbaar, en omdat het hier gaat om de vergelijking tussen alternatieven voldoet een grover model. Andere versimpelingen van de werkelijkheid zijn onder meer de schadefuncties (DamageScanner) en het achterwege laten van snelweg- en spoorwegviaducten. Vanwege deze noodzakelijke 'versimpelingen' zijn de berekende risico's afgerond op maximaal 1 cijfer achter de komma. Ze moeten als indicatie worden gezien en niet als absolute waarheid. Gegeven het doel van de studie is het model voldoende betrouwbaar verondersteld.

De hier beschreven gevoeligheidsanalyse heeft tot doel de *gevoeligheid* van systeemrisico en schade voor invoerwaarden te toetsen, omdat dat een beeld geeft van de gevoeligheid van het systeem voor onzekere factoren. In onderstaande gevoeligheidsanalyse is gekeken hoe systeemrisico en schade veranderen als gevolg van meer of minder zekerheid over de dijksterkte (σ), de afvoergolfvorm, afvoerverdeling en correlatie tussen doorbraaklocaties. Deze lijst is zeker niet volledig. In een vervolgstudie zouden meerdere 'bronnen van onzekerheid' geïdentificeerd moeten worden om te bepalen welke de modeluitkomst het meeste beïnvloedt. De resultaten in dit hoofdstuk geven een indruk van hoe 'onzekerheidsinformatie' gebruikt kan worden in een robuustheidanalyse.

Voor een voorbeeld van een uitgebreidere gevoeligheidsanalyse wordt verwezen naar Asselman et al. (2010). Zij hebben berekend dat breslocatie, standzekerheid regionale keringen, breseigenschappen en duur van het hoogwater een effect hebben op de waterstand van enkele decimeters.

4.2 Referentiewaarden

De referentiewaarden voor de parameters staan in Tabel 4.1. In de volgende paragrafen is telkens 1 parameter gevarieerd, terwijl de andere parameterwaarden constant zijn gebleven. In principe zouden alle combinaties doorgerekend moeten worden om een goed beeld te krijgen van de gevoeligheid, maar dat voert te ver voor deze studie. Ter vergelijking is naast het absolute systeemrisico ook het relatieve systeemrisico berekend: het risico van ieder alternatief gedeeld door het risico in het huidige systeem (REF). Sommige parameters hebben ook invloed op de systeemkans, de reactiedrempel en de reactiecurve. Als dat het geval is worden ook die resultaten hieronder besproken.

Parameter	Uitleg	Referentie waarde
afvoerverdeling	Deel van de afvoer bij Lobith dat naar de IJssel stroomt	0.16
σ	Onzekerheid over de kritieke waterstand, oftewel de vorm van de faalcurve (m)	0.5
golfvorm	Vorm van de afvoergolf	standaard
ρ	Correlatie tussen de doorbraaklocaties	0.8

Tabel 4.1 Referentiewaarde van de parameters die in de gevoeligheidsanalyse worden gevarieerd

4.3 Afvoerverdeling

De afvoerverdeling beïnvloedt het systeemrisico via de afvoerfrequentiecurve. Bij een hogere verdelingsfactor (0.18 x Q_{lobith} in plaats van 0.15 x Q_{lobith}) heeft dezelfde afvoer dus een grotere kans van voorkomen. Tabel 4.2 laat zien wat het effect is van een andere keuze voor de afvoerverdeling. Het risico bij een verdeling van 0.15 is ongeveer 50% lager dan het risico bij een verdeling van 0.16. Het risico bij een verdeling van 0.18 is 3 tot 4 keer zo hoog als bij verdeling van 0.16. Dit betekent in de praktijk dat als de afvoerverdeling zo uitpakt dat er meer water over de IJssel gaat dan verwacht, het risico exponentieel toeneemt (zie Figuur 4.1). De absolute verschillen tussen de alternatieven nemen hierdoor toe, maar de voorkeursvolgorde verandert niet (zie relatief systeemrisico).

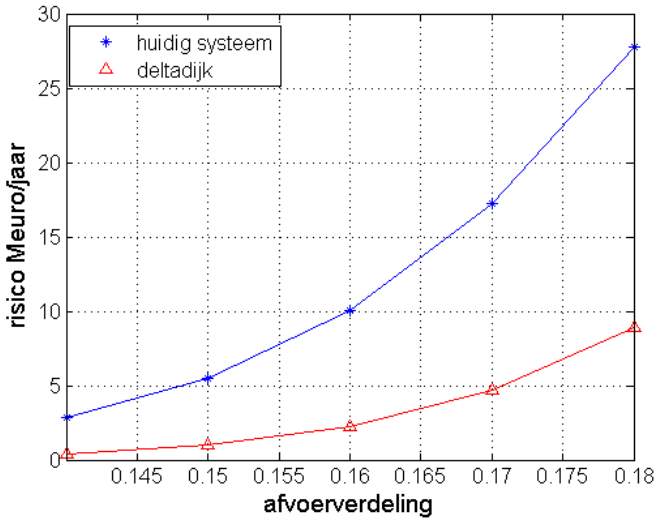
systeemrisico (M€/jaar)

afvoerverdeling	***0,15***	***0,16***	***0,18***
REF	5,5	9,9	27,4
CON	2,4	4,3	13,3
ROO	1,7	2,8	9,6
DE1	1	2,0	8,9
DE2	0,3	0,6	2,6

relatief systeemrisico

afvoerverdeling	***0,15***	***0,16***	***0,18***
REF	1,0	1,0	1,0
CON	0,4	0,4	0,5
ROO	0,3	0,3	0,4
DE1	0,2	0,2	0,3
DE2	0,1	0,1	0,1

Tabel 4.2 Gevoeligheid van systeemrisico voor afvoerverdeling tussen Lobith en de IJssel, bij verschillende configuraties



Figuur 4.1 Risico als functie van de afvoerverdeling voor huidig systeem en deltadijk

De afvoerverdeling beïnvloedt de absolute schade niet. In de reactiecurve wordt de schade weergegeven als functie van de afvoergolfhoogte, ongeacht de frequentie die hierbij hoort.

4.4 Vorm van de faalcurve

De overstromingskans is berekend uit de overschrijdingskans van de waterstand en de kans op bezwijken gegeven een waterstand (faalcurve). Deze laatste is gefit in de huidige situatie om op een overstromingskans van 1/1250 per jaar uit te komen (per dijkring). Voor de vorm van de faalcurve is een normale verdeling aangenomen, waarvoor een verwachte dijksterkte (μ) en een onzekerheid daarover (σ) nodig zijn. In eerste instantie is gekozen voor σ = 0.5 m. Op basis daarvan is een μ afgeleid voor dijken in het huidige systeem. Wat is nu het effect op het systeemrisico als de μ gelijkblijft, maar de σ groter of kleiner wordt? Zie ook Figuur B.1 in bijlage B.

Tabel 4.3 laat zien dat het systeemrisico van REF, CON en ROO zeer gevoelig is voor de onzekerheid over de dijksterkte. Het systeemrisico van Deltadijken (DE1 en DE2) is ongevoelig hiervoor, omdat aangenomen is dat de kans op bezwijken te verwaarlozen is. In deze alternatieve systemen is alleen de overschrijdingskans van belang voor de overstromingskans en het systeemrisico. Hoe groter de onzekerheid over de dijksterkte, hoe groter het systeemrisico van REF, CON en ROO.

Uit de tabel blijkt tevens dat een kleinere σ invloed heeft op de voorkeursvolgorde van de alternatieven. Omdat het risico van DE1 en DE2 wel gelijkblijft, is hun risico kleiner dan dat van de andere systemen bij σ >= 0.5 m. Bij minder onzekerheid (σ = 0.3 m) is het risico bij DE1 het grootst, zelfs groter dan dat van REF. Dit is te verklaren, omdat het hele idee van deltadijken juist is om de σ te verkleinen. Als deze bij de andere alternatieve systemen klein genoeg wordt gemaakt, is daar eigenlijk ook sprake van een deltadijk. Het enige verschil is dan nog dat CON en REF hogere dijken hebben en ROO een gunstiger Qh-relatie. Bij gelijke dijkhoogte zou de systeemkans van DE1 vergelijkbaar worden met die van het huidige systeem.

Tabel 4.4 en Tabel 4.5 laten een vergelijkbaar beeld zien: bij een lage onzekerheid over dijksterkte komen CON en ROO het beste uit de bus (kleine kans en hoge reactiedrempel), maar bij een hoge onzekerheid scoren DE1 en DE2 het beste.

systeemrisico (M€/jaar)			
σ van de faalcurve	***0.3***	***0.5***	***0.8***
REF	1.2	9.8	100
CON	0.5	4.3	61
ROO	0.3	2.8	39
DE1	2.2	2.2	2.2
DE2	0.6	0.6	0.6

relatief systeemrisico			
σ van de faalcurve	***0.3***	***0.5***	***0.8***
REF	0.5	1.0	1.0
CON	0.2	0.4	0.6
ROO	0.1	0.3	0.4
DE1	1.0	0.2	0.0
DE2	0.3	0.1	0.0

Tabel 4.3 Gevoeligheid van systeemrisico voor de vorm van de faalcurve, bij verschillende configuraties

Herhalingstijd in jaren (=1/systeemkans)			
σ van de faalcurve	***0.3***	***0.5***	***0.8***
REF	2200	300	30
CON	4400	700	50
ROO	7700	1000	70
DE1	1500	1500	1500
DE2	1500	1500	1500

Tabel 4.4 Gevoeligheid van systeemkans voor de vorm van de faalcurve, bij verschillende configuraties

Laagste afvoer met schade (m3/s)			
σ van de faalcurve	***0.3***	***0.5***	***0.8***
REF	2900	2550	2050
CON	3200	2850	2300
ROO	3200	2850	2350
DE1	2600	2600	2600
DE2	2600	2600	2600

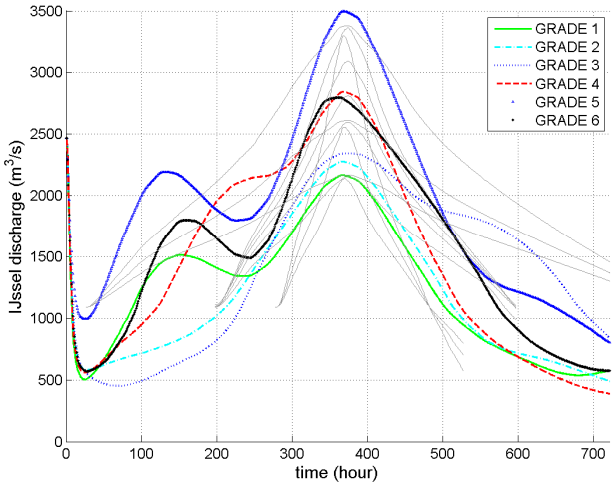
Tabel 4.5 Gevoeligheid van reactiedrempel (laagste afvoer met schade) voor de vorm van de faalcurve, bij verschillende configuraties

4.5 Golfvorm

Het effect van de golfvorm op de schade wordt duidelijk door naast de standaard golfvorm ook met smalle en brede golfvormen te rekenen. Deze golven zijn echter nog steeds heel theoretisch. Hierin zit bijvoorbeeld niet het effect van afvoergolven met een dubbele piek. Om ook het effect in beeld te brengen van golven met een meer fysische vorm, zijn nog 6 extra afvoergolven doorgerekend voor REF. Deze golven zijn geselecteerd uit het GRADE-instrumentarium (Wit en Buishand, 2007), voor zowel de huidige situatie als de situatie 2100 (volgens klimaatscenario GE), op de volgende manier:

1 Selectie van golven met een piek > 14000 m^3/s bij Lobith;
2 Van deze selectie de drie golven met het grootste volume (tussen 15uur voor de piek en 15uur na de piek).

Vervolgens zijn de golven weer vertaald naar de IJssel met behulp van WAQUA. Figuur 4.2 toont de resulterende afvoergolven voor de IJssel in vergelijking met de eerder besproken afvoergolven. Door het tweede criterium zijn voornamelijk golven met twee pieken geselecteerd.

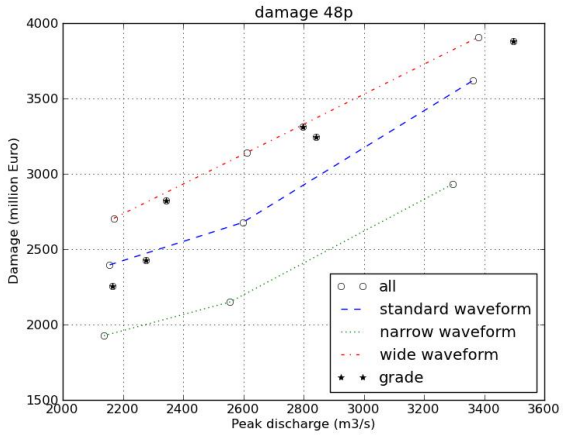


Figuur 4.2 Geselecteerde afvoergolven uit GRADE, omgerekend naar de IJssel

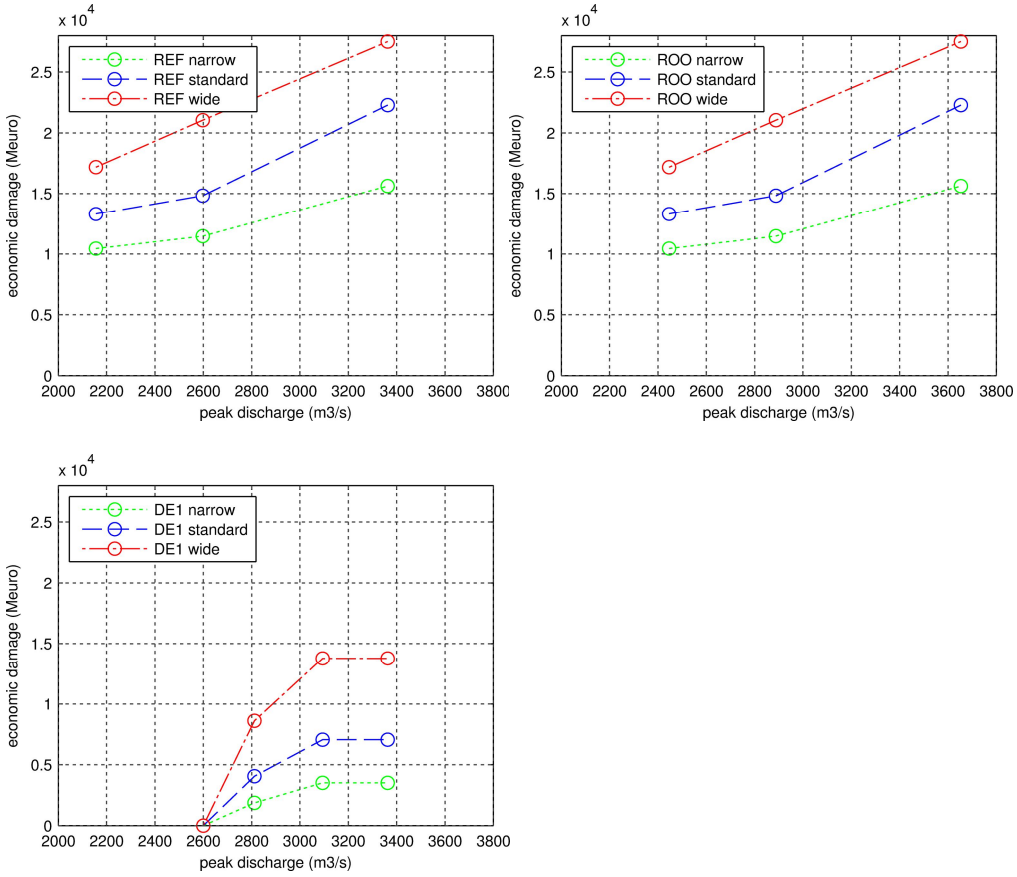
Het effect van GRADE golfvormen op de schade wordt getoond aan de hand van de reactiecurve van dijkring 48 (Figuur 4.3). De schade door GRADE golven ligt tussen die van de smalle en brede golven in. Dit geeft aan dat de bandbreedte in schade door onzekerheid over de golfvorm goed kan worden weergegeven door met de theoretische smalle en brede golven te rekenen.

Het effect van de onzekerheid over de golfvorm op de reactiecurve wordt duidelijk uit de figuren voor het hele systeem (Figuur 4.4) en die voor dijkring 48 (Figuur 4.3). Voor REF geldt dat het verschil in schade tussen een smalle golfvorm en een brede golfvorm vrijwel net zo groot is als het verschil in schade tussen de laagst en hoogst berekende golfhoogte. Een hogere piek dan de standaard afvoergolf heeft dus een vergelijkbare invloed op de schade als een bredere golfvorm. Met andere woorden: het huidige systeem is net zo gevoelig voor de vorm van de afvoergolf als voor zijn hoogte. Rivierverruimen verandert niets aan de gevoeligheid voor de golfvorm. Bij DE1 is de gevoeligheid voor de golfvorm sterk afhankelijk van de afvoerpiek, maar over het algemeen groter dan bij REF en ROO. Bij een smallere vorm neemt de schade met 50% af, en bij een bredere vorm neemt de schade met 50% toe.

Tabel 4.6 laat ten slotte zien hoe gevoelig het systeemrisico is voor de golfvorm. Zoals te verwachten valt uit bovenstaande effecten op de reactiecurve, is het risico van DE1 en DE2 het gevoeligst voor andere golfvormen. Bij REF, CON en ROO is het effect -20% en +30%, terwijl bij DE1 is het -50% en +100% en bij DE2 is het effect zelfs -70% en +170%. Als een brede golfvorm wordt gebruikt, dan is het risico van DE1 vergelijkbaar met dat van ROO (afgerond 4 Meuro per jaar), terwijl het risico van ROO bij een standaard afvoergolf anderhalf keer zo groot is. Van de onderzochte onzekerheidsbronnen is de golfvorm dus de enige die invloed heeft op de voorkeursvolgorde op basis van systeemrisico.



Figuur 4.3 Reactiecurve dijkring 48 in huidig systeem (REF)



Figuur 4.4 Reactiecurve hele systeem in huidig systeem (REF, linksboven), systeem met rivierverruiming (ROO, rechtsboven), en systeem met deltadijken (DE1, linksonder)

	Systeemrisico (M€/jaar)		
Vorm afvoergolf	***smal***	***standaard***	***breed***
REF	8,0	9,9	12,8
CON	3,4	4,3	5,7
ROO	2,3	2,8	3,6
DE1	0,9	2,0	4,0
DE2	0,2	0,6	1,6

	Relatief systeemrisico		
Vorm afvoergolf	***smal***	***standaard***	***breed***
REF	1,0	1,0	1,0
CON	0,4	0,4	0,4
ROO	0,3	0,3	0,3
DE1	0,1	0,2	0,3
DE2	0,03	0,1	0,1

Tabel 4.6 Gevoeligheid van het systeemrisico voor de vorm van de afvoergolf, bij verschillende configuraties

4.6 Correlatie tussen de doorbraaklocaties

De afhankelijkheid ten aanzien van sterkte en belasting is gecombineerd in één correlatiecoëfficiënt (ρ) voor alle locaties. Als referentiewaarde is ρ=0.8 gekozen. De correlatie tussen doorbraaklocaties beïnvloedt de systeemkans en het systeemrisico, maar niet de overstromingskans per locatie.

In Tabel 4.7 staat het effect van ρ op het systeemrisico. In Tabel 4.8 staat het effect van ρ op de systeemkans. Hoe kleiner de correlatie, hoe groter de systeemkans en hoe groter het risico. Vergeleken met het effect van de afvoerverdeling, is het effect van de correlatiecoëfficiënt klein. Wederom verandert de voorkeursvolgorde niet. De mate van correlatie heeft geen invloed op de systeemkans en het systeemrisico van DE1 en DE2, omdat de kans op overstromen volledig bepaald wordt door de dijkhoogte. Hoe groter de correlatie tussen de dijkringen, hoe kleiner het verschil in systeemkans tussen ROO en DE1/DE2 wordt. Mede hierdoor wordt ook het verschil in risico tussen ROO en DE1 klein bij een hogere correlatie. De correlatiecoëfficiënt heeft geen invloed op de reactiedrempel uitgedrukt in minimale afvoer met schade.

	systeemrisico (M€/jaar)		
Correlatiecoëfficiënt ρ	***0,5***	***0,8***	***0,9***
REF	11,0	9,9	7,3
CON	4,7	4,3	3,3
ROO	2,9	2,8	2,0
DE1	2,0	2,0	2,0
DE2	0,6	0,6	0,6

	relatief systeemrisico		
Correlatiecoëfficiënt ρ	***0,5***	***0,8***	***0,9***
REF	1,0	1,0	1,0
CON	0,4	0,4	0,5
ROO	0,3	0,3	0,3
DE1	0,2	0,2	0,3
DE2	0,1	0,1	0,1

Tabel 4.7 Gevoeligheid van systeemrisico voor de correlatiecoëfficiënt ρ, bij verschillende configuraties

	Herhalingstijd in jaren (=1/systeemkans)		
Correlatiecoëfficiënt ρ	***0.5***	***0.8***	***0.9***
REF	200	300	400
CON	500	700	900
ROO	800	1000	1500
DE1	1500	1500	1500
DE2	1500	1500	1500

Tabel 4.8 Gevoeligheid van systeemkans voor de correlatiecoëfficiënt ρ, bij verschillende configuraties

4.7 Overzicht resultaten

In deze gevoeligheidsanalyse is gekeken naar het effect van aannames op systeemkans, systeemrisico, reactiecurve en reactiedrempel. Dit heeft geleid tot de volgende inzichten:

- Van de onderzochte parameters is het systeemrisico is het meest gevoelig voor de mate van onzekerheid over de dijksterkte en voor de afvoerverdeling. Als de onzekerheid over de dijksterkte groter is, neemt het risico exponentieel toe. Als er meer water naar de IJssel gaat dan verwacht neemt het overstromingsrisico van het hele systeem exponentieel toe.
- De voorkeursvolgorde van de alternatieve systemen op basis van systeemrisico verandert bij een bredere afvoergolf. In dat geval hebben rivierverruimen en deltadijken bouwen (variant 1) hetzelfde risico.
- De voorkeursvolgorde op basis van systeemrisico verandert ook bij kleine onzekerheid over dijksterkte. In dat geval gaat de voorkeur uit naar CON, ROO en DE2.
- De reactiedrempel in termen van laagste afvoer waarbij schade kan ontstaan is alleen gevoelig voor de mate van onzekerheid over de dijksterkte (σ).
- De reactiedrempel in termen van systeemkans is gevoelig voor zowel de mate van onzekerheid over de dijksterkte (σ) als de correlatiecoëfficiënt (ρ).
- De reactiecurve is gevoelig voor de golfvorm. Deze gevoeligheid wordt groter door deltadijken te bouwen.

5 Discussie

5.1 Drie robuustheidprincipes

Op basis van de resultaten van de casus, kunnen drie basisprincipes van robuustheid worden afgeleid: vermijdbaarheid, beheersbaarheid en herstelbaarheid. Hierna wordt uitgelegd bij welk principe de voorgestelde robuustheidcriteria passen, en welke criteria extra nodig zijn.

Vermijdbaarheid

Een gebied blijft het beste functioneren als er helemaal geen overstroming is. Hoe hoger de reactiedrempel, hoe groter de robuustheid. De casus laat echter zien dat de onzekerheid over de reactiedrempel ook een rol speelt. Een hoge reactiedrempel kan toch samengaan met een grote overstromingskans als de dijksterkte onzeker is. Hoe groter deze onzekerheid, hoe lager de robuustheid. De reactiedrempel is gevoelig voor onder andere dijksterkte en afvoergolfvorm.

Beheersbaarheid

De gevolgen van overstromen (criterium 'ernst') zijn gekwantificeerd aan de hand van het overstromingsrisico. Het risico ging in alle alternatieve configuraties omlaag en de grootste afname in risico werd bereikt in DE2 (deltadijken gedifferentieerd in hoogte). De bedoeling van het criterium 'ernst' is echter om te laten zien hoe erg de gevolgen van overstroming zijn in absolute zin. Door het te kwantificeren met overstromingsrisico worden gevolgen gewogen met de kans van voorkomen. Op deze manier is er geen onderscheid tussen systemen met kleine-kans-groot-gevolg en systemen met grote-kans-klein-gevolg. Het systeemrisico is wel waardevol gebleken ter vergelijking met de robuustheidcriteria, omdat risicoreductie de gebruikelijke manier is om het effect van maatregelen te kwantificeren.

Uit de casus blijkt hoe onzeker de reactie van een systeem op hoogwater is. Hoogwaterstanden op de IJssel kunnen 24-48 uur van tevoren behoorlijk goed voorspeld worden, maar zolang onbekend is of en waar een doorbraak zal plaatsvinden, is er een range aan overstromingsscenario's mogelijk. In de praktijk betekent dit dat het volledige overstroombare gebied geëvacueerd zou moet worden. Een groot deel van het gebied kan daardoor tijdelijk niet functioneren. Als het doel is dat een gebied moet kunnen blijven functioneren bij hogere afvoeren dan de maatgevende, dan is een goede voorspelling van waar en hoe een dijk zal bezwijken een belangrijke voorwaarde.

Er zijn nog meer factoren die de systeemreactie beïnvloeden. Deze onzekerheid over de systeemreactie kan gereduceerd worden door onzekerheid over deze factoren te verkleinen (bv. door meer kennis te vergaren of het reduceren van onzekerheid over dijksterkte door het bouwen van deltadijken) of de gevoeligheid van de systeemreactie voor deze factoren te verkleinen (bv. de gevoeligheid voor afvoerhoogte verkleinen door rivierverruiming). De mate van zekerheid over de systeemreactie draagt bij aan de systeemrobuustheid. Dit criterium ontbreekt in de voorgestelde robuustheidcriteria.

Een van de voorgestelde robuustheidcriteria is proportionaliteit. Deze eigenschap laat zien of schade als gevolg van een overstroming plotseling toeneemt bij toenemende afvoer, of dat het juist geleidelijk toeneemt. De alternatieven met een deltadijk hadden duidelijk een betere proportionaliteit, maar ook daar kunnen de gevolgen in absolute zin te groot worden om nog te kunnen beheersen (bijvoorbeeld in dijkring 48 bij een brede golf). Het gaat dus om de beheersbaarheid, waar proportionaliteit en ernst aan bijdragen. De beheersbaarheid kan verder vergroot worden met gevolgbeperkende maatregelen zoals compartimenteren,

aangepast bouwen en het verhoogd aanleggen van wegen en vitale gebouwen zoals ziekenhuizen. Dit soort maatregelen (zie ook Wardekker et al., 2010) passen goed bij systeemrobuustheid en zijn voor meerlaagsveiligheid relevante principes om verder te verkennen.

Herstelbaarheid
Herstelbaarheid heeft twee componenten: de herstelcapaciteit (algemene eigenschappen die onafhankelijk zijn van de overstroming), en het omslagpunt (overstromingsschade in vergelijking met de herstelcapaciteit). Herstelcapaciteit wordt bepaald door factoren als gezondheid en opleidingsniveau van de inwoners, waarschuwingssysteem, economische toestand, reliëf, etc. Het criterium 'omslagpunt' verwijst naar de afvoer waarbij de schade te groot is om (snel) van te herstellen. De IJsselcasus laat zien dat dit punt moeilijk te bepalen is. Daarbij is het de vraag of dit criterium relevant is. Er moet heel wat gebeuren voordat de IJsselvallei na een overstroming echt verlaten wordt. Dat is echter geen argument om niet te werken aan het beperken van de absolute gevolgen. Voor een robuust systeem is het essentieel om ervoor te zorgen dat een overstroming beheersbaar blijft. Een omslagpunt in termen van beheersbaarheid wordt onder andere bepaald door de maximale waterdiepte (verschillend per landgebruikstype), het aantal snelwegen dat onderloopt en het aantal bedrijven dat failliet zal gaan als gevolg van de (individuele) schade. Het criterium omslagpunt betekent dan niet dat het gebied niet meer zal herstellen, maar dat de overstroming onbeheersbaar is geworden.

Een oordeel over het omslagpunt in termen van het overschrijden van de beheersbaarheid, dus over 'hoe erg is erg', vereist een gedetailleerde analyse van overstromingspatronen op dijkringniveau (of nog kleinere schaal) in relatie tot het landgebruik (waaronder schade op bedrijfsniveau). Dat is in deze studie niet gebeurd.

Robuustheidprincipe	**Criterium**	**Indicator**
Vermijdbaarheid	reactiedrempel	overschrijdingskans van kritische afvoer
	onzekerheid over de reactiedrempel	bandbreedte
Beheersbaarheid	proportionaliteit	graduality
	ernst van de gevolgen	economische schade / slachtoffers
	onzekerheid over de gevolgen	bandbreedte schade
Herstelbaarheid	herstelcapaciteit	*kwalitatief*
	omslagpunt	*kwalitatief*

Tabel 5.1 Nieuwe robuustheidcriteria met indicatoren (grijs=voorgesteld in Mens et al., 2011)

5.2 Robuustheid versus risico

In dit rapport is gekeken naar verschillende systeemconfiguraties en hoe ze reageren op verschillende afvoergolven. Dit geeft inspiratie voor de ontwikkeling van maatregelen in het IJsselgebied. Voor een werkelijke keuze tussen alternatieve systeemconfiguraties is het noodzakelijk om ook naar kosten en slachtoffers te kijken. Het wordt vaak verondersteld dat het in Nederland kosteneffectiever is om iets aan de dijken te doen (kansverkleinen) dan aan ruimtelijke ordening (gevolgen beperken). Dit komt omdat het huidige systeem een hoge reactiedrempel heeft (voortkomend uit de strenge normen) en het meestal goedkoper is om in een weerstandig systeem de weerstand verder te vergroten.

Het is echter de vraag of risicoreductie het enige gewenste criterium is. Met meerlaagsveiligheid wordt bedoeld dat er aandacht is voor zowel preventie als ruimtelijke ordening en rampenbestrijding. De drie lagen samen vormen een totaalpakket voor de

bescherming tegen overstromingen: dus zowel kansen klein houden als gevolgen beperken. Het robuustheidconcept past hier goed bij: een systeem wordt niet alleen beoordeeld op het weerstaan van maatgevende condities, maar ook op 'wat als' deze weerstand wordt overschreden. De casus geeft twee redenen om verder te denken dan de dijken:

1. Ondanks de wettelijke hoogwaterbeschermingsnormen is de reactiedrempel (bij welke afvoer een overstroming verwacht kan worden) in de werkelijkheid onzeker, wat beheersbaarheid van een overstroming bemoeilijkt;
2. Er zijn misschien grenzen aan de acceptatie van absolute gevolgen (Klijn en De Grave, 2008); ook al is de kans op extreme overstromingen zeer klein, ook in die uitzonderlijke situaties moet een overstroming beheersbaar blijven.

Als deze argumenten belangrijk worden gevonden, dan is risicoreductie misschien niet de enige maat om kosteneffectiviteit te bepalen. Effectiviteit betekent dan ook dat de beheersbaarheid en herstelbaarheid vergroot wordt. Het beoordelen van alternatieve systemen op hun systeemrobuustheid zou dus tot andere keuzes kunnen leiden.

5.3 Mag de faalkans van een deltadijk verwaarloosd worden?

Dit rapport laat zien hoeveel het risico gereduceerd kan worden en de robuustheid verhoogd kan worden als conventionele dijken vervangen worden door deltadijken die niet meer kunnen bezwijken. Conventionele dijken tegenover deltadijken is echter een scherpere tegenstelling dan in de praktijk kan worden gerealiseerd. Men zal nooit kunnen garanderen dat de bezwijkkans van een dijk gelijk is aan nul. Er zijn altijd mechanismen waar te weinig kennis over is, en bij de aanleg van een dijk kunnen ook fouten gemaakt worden. In werkelijkheid is het een glijdende schaal van gewone dijken (met ongeveer 10% bijdrage van andere faalmechanismen dan overloop/overslag) naar deltadijken (met minder dan 1% bijdrage van andere faalmechanismen dan overloop/overslag). Aan de andere kant wordt de bezwijkkans van een deltadijk zodanig klein dat het in de orde grootte van een meteorietinslag komt. De vraag is dan in hoeverre men zich daarop nog wil voorbereiden. Met andere woorden: hoe klein moet de bezwijkkans van een dijk zijn voordat deze kans verwaarloosd kan worden in de praktijk?

5.4 Discussie over het kansbegrip

Het begrip 'kans' wordt hier impliciet op twee manieren gebruikt: als gemiddelde frequentie (= volgens 100 jaar metingen) en als uitdrukking van kennisonzekerheid over de sterkte van de dijk (faalcurve). In de berekening van systeemkans worden deze twee 'kansen' samengevoegd. In de reactiecurve worden deze twee juist uit elkaar getrokken. Wat is nu informatiever?

In de literatuur (o.a. Vrouwenvelder, 2003; Hall & Solomatine, 2008) worden twee kansbegrippen onderscheiden: frequentistisch en Bayesiaans. Volgens het frequentistische kansbegrip is een kans een eigenschap van het systeem, objectief en enkel te kennen met voldoende metingen. Frequentisten maken graag onderscheid tussen inherente onzekerheid en kennisonzekerheid. Alleen inherente onzekerheid kan, met voldoende data, worden gekwantificeerd als kans. Andere soorten onzekerheid worden uitgedrukt in de vorm van een bandbreedte. De frequentiecurve van afvoeren en waterstanden voldoet (min of meer) aan deze definities. Maar om iets te zeggen over de kans op overstromingen zijn er veel te weinig metingen. Het Bayesiaanse kansbegrip is subjectief en een kans wordt gezien als 'geloof' (*degree of belief*, *degree of confidence*) van een individu of een groep. Bayesianen hebben geen moeite om verschillende soorten onzekerheid te combineren in één kansgetal.

In het vakgebied van ‘reliability engineering’ is het gebruikelijk om de kennisonzekerheid over de sterkte van een object uit te drukken als conditionele kans (d.m.v. de faalcurve) en dit te combineren met de kans op overschrijden van de belasting. Dit is een Bayesiaanse benadering. Overstromingskans wordt hierdoor gezien als een uitdrukking van de onzekerheid (van de analist) over het optreden van extreme afvoergolven én of de dijk dit kan weerstaan. Het begrip ‘systeemkans’ in dit rapport is dus een Bayesiaanse kans. Met de reactiecurve worden de twee soorten onzekerheid juist uit elkaar getrokken. Immers, de reactiecurve geeft de schade bij een bepaalde afvoer ervan uitgaande dat de dijk faalt. Omdat de dijksterkte in werkelijkheid onzeker is, ontstaat een onzekerheidsband om de reactiedrempel. En omdat de plek van falen onzeker is, ontstaat een onzekerheidsband om de schade.

Bij deltadijken (DE1 en DE2) is de systeemkans gelijk aan de afvoerfrequentie, omdat de onzekerheid over dijkbezwijken verwaarloosbaar wordt verondersteld. Bij de andere alternatieven en bij het huidige systeem is de systeemkans een combinatie van afvoerfrequentie en de conditionele kans op bezwijken, omdat er onzekerheid is over de sterkte van de dijken. In feite is de onzekerheid over de reactiedrempel uitgeïntegreerd in één getal voor systeemkans. Mogelijke verwarring ontstaat als geprobeerd wordt om de verandering van de systeemkans te verklaren. Een kleinere systeemkans duidt op een kleinere onzekerheid over de overstroming, maar welke onzekerheid wordt dan bedoeld: de natuurlijke variabiliteit of de kennisonzekerheid? De kans op een overstroming bij Ruimte voor de Rivier (ROO) is kleiner dan bij de huidige dijken (REF). In dit geval komt dat omdat de kans (frequentie) van optreden van de waterstand kleiner is geworden (want: bij dezelfde afvoer zijn waterstanden lager). De onzekerheid over dijkbezwijken is hetzelfde gebleven, want de vorm van de faalcurve is niet veranderd. Bij dijken versterken (CON) blijft de frequentie juist gelijk, maar wordt de faalkans *gegeven een bepaalde waterstand* kleiner. Maar: de onzekerheid over falen verandert niet, want alleen de verwachtingswaarde verandert en niet de standaarddeviatie. De overstromingskans wordt bij zowel REF als CON kleiner, maar bij ROO is de schade bij bepaalde afvoer lager dan bij CON. Dit kan een extra reden zijn om in ROO te investeren, hoewel de kosten hoger kunnen zijn voor een vergelijkbaar effect op de overstromingskans.

Als men wil weten waar een maatregel op ingrijpt, is het informatief om de twee soorten onzekerheid uit elkaar te halen, bijvoorbeeld door middel van een reactiecurve.

6 Conclusie

In dit onderzoek is het raamwerk voor analyse van systeemrobuustheid toegepast op het overstromingsrisicosysteem van de IJssel. Hierbij is het overstromingsrisico berekend en de systeemrobuustheid bepaald voor zowel het huidige systeem als alternatieve systemen. Tevens is aandacht besteed aan onzekerheden. De eerste onderzoeksvraag ging over het inzicht dat verkregen wordt door de analyse van systeemrobuustheid aan de hand van reactiecurves en robuustheidcriteria. De tweede vraag ging over welk systeem robuuster is. Voor elke vraag volgen hier de belangrijkste resultaten en de daaruit volgende conclusie.

Vraag 1. Inzicht door robuustheidsanalyse

Met een analyse van systeemrobuustheid wordt beoogd inzicht te geven in hoe het systeem functioneert bij een range aan afvoergolven. Dit is gedaan aan de hand van reactiecurves en de daarvan afgeleide indicatoren. De volgende resultaten zijn verkregen:

1 Systeemrobuustheid is samen te vatten in drie principes: vermijdbaarheid, beheersbaarheid en herstelbaarheid. Dit sluit goed aan op de meerlaagsveiligheidbenadering uit het Nationaal Waterplan.
2 De reactiecurve is een effectieve manier om zicht te krijgen op de gevolgen van overstromingen bij bovenmaatgevende afvoeren. Hierdoor is er meer ruimte voor een discussie over ‘wat als’ in aanvulling op de discussie over ‘wat is de kans’. Dit inspireert om ook over beheersbaarheid en herstelbaarheid na te denken. Het beoordelen van alternatieve systemen op hun systeemrobuustheid zou tot andere keuzes kunnen leiden dan wanneer alleen naar (systeem)risico wordt gekeken.
3 De robuustheidcriteria reactiedrempel, proportionaliteit, ernst en omslagpunt geven aanknopingspunten voor het kwantificeren van de systeemrobuustheid. Ze zijn echter niet volledig in het beschrijven van de drie robuustheidprincipes. De beheersbaarheid wordt niet alleen bepaald door de gevoeligheid van het systeem voor de hoogte van de afvoergolf (gevisualiseerd met de reactiecurve), maar onder andere ook voor de golfvorm, de doorbraaklocatie, en de sterkte van de dijk. De beschrijving van de reactiecurve zou zodoende niet alleen moeten gaan over de absolute schade als functie van de afvoer, maar ook over de mate van onzekerheid hierover.
4 Onzekerheid over de gevolgen van overstromen kan gereduceerd worden door onzekerheid over invloedsfactoren te verkleinen (bv. het reduceren van onzekerheid over dijksterkte door het bouwen van doorbraakvrije dijken) of de gevoeligheid voor deze factoren te verkleinen (bv. de gevoeligheid voor afvoergolfhoogte en -vorm verkleinen door rivierverruiming). Een gevoeligheidsanalyse is daarom een belangrijk element van een robuustheidanalyse.
5 De onzekerheid over de reactiedrempel en de reactiecurve moeten worden toegevoegd aan de lijst robuustheidcriteria. Een grotere voorspelbaarheid van waar en hoeveel overstromingsschade kan optreden betekent een grotere beheersbaarheid en daarmee een grotere systeemrobuustheid.
6 Bij een robuust systeem gaat het er niet alleen om hoe *vaak* het misgaat, maar ook *hoe* het misgaat: het proces van bezwijken en het proces van overstromen (beiden aspecten van beheersbaarheid). Hoe geleidelijker deze processen, hoe meer tijd er is om maatregelen te treffen en dus hoe robuuster het systeem.
7 Het criterium ‘omslagpunt’ zou moeten verwijzen naar de grens van beheersbaarheid in plaats van de grens van herstelbaarheid, omdat de eerste grens eerder zal worden bereikt, relevanter is en wellicht makkelijker kan worden bepaald.

8 ‘Graduality’ (zoals berekend in dit rapport) is geen geschikte maat voor proportionaliteit.
9 Ook voor het criterium ‘ernst’ zou een alternatieve indicator gezocht moeten worden.

Vraag 2. Welk systeem is robuuster?

De vergelijking tussen de alternatieve systeemconfiguraties en met het huidige systeem levert de volgende inzichten:

- Het systeem met rivierverruiming is robuuster dan het huidige systeem en het systeem met verhoogde dijken, omdat de absolute gevolgen bij alle afvoeren (boven maatgevende afvoer) lager zijn. Dit is te zien in de reactiecurve. Een overstroming kan echter nog steeds tot een onbeheersbare situatie leiden. Rivierverruiming leidt ook tot een kleinere gevoeligheid voor de hoogte van de afvoerpiek. De gevoeligheid voor afvoergolfvormen blijft gelijk.
- Een systeem waarbij de dijken niet kunnen bezwijken is robuuster dan een systeem waarbij deze wel kunnen breken. Dit komt omdat 1) de absolute schade bij het overlopen van de dijken veel lager is dan bij conventionele dijken, 2) beter bekend is vanaf welke afvoer water over de dijk gaat lopen, 3) de schade geleidelijk toeneemt naarmate de afvoer groter wordt. Een deltadijk is waarschijnlijk wel duurder dan een conventionele dijk en het is de vraag in hoeverre het technisch mogelijk is om een bestaande dijk doorbraakvrij te maken.
- Een systeem waarbij dijken verhoogd zijn leidt tot een lager risico, een lagere systeemkans en een hogere reactiedrempel. De gevoeligheid voor afvoergolven neemt echter toe. De gevoeligheid voor afvoergolfvormen en dijksterkte verandert niet.
- De systeemkans bij rivierverruiming is kleiner dan die bij dijkverhogen, hoewel ze evenveel extra afvoer kunnen verwerken in vergelijking met het huidige systeem. Dit komt omdat rivierverruimde maatregelen ingrijpen op de relatie tussen afvoer en waterstand, terwijl dijkverhogen ingrijpt op de faalkans van de dijk. De laagste afvoer waarbij dijken kunnen bezwijken is vergelijkbaar.
- Het differentiëren van de hoogte van doorbraakvrije dijken is interessant. Het gericht hoger maken van onbezwijkbare dijken op kwetsbare locaties (bij stedelijk gebied) kan de absolute schade (voor het hele systeem) nog verder verlagen en maakt ruimtelijke planning nog effectiever in termen van risicoreductie.
- Toekomstige landgebruiksontwikkelingen laten het overstromingsrisico in de IJssel met 10-60% toenemen, afhankelijk van de gevolgde strategie en de socio-economische ontwikkeling. Het sturen van landgebruiksontwikkelingen heeft het grootste effect op het risico als het gecombineerd wordt met doorbraakvrije dijken die in hoogte zijn gedifferentieerd.

Andere mogelijkheden om de systeemrobuustheid te vergroten zijn:

- Het geleidelijk laten breken van de dijk (bezwijkproces beter onder controle houden), zodat de bres niet in een keer heel groot kan worden;
- Meer doen met gevolgbeperking: bouwen in minder overstromingsgevoelige gebieden en/of anders bouwen (laag 2 van meerlaagsveiligheid).
- Essentiële functies (zoals ziekenhuizen, belangrijke transportroutes) verplaatsen naar minder overstromingsgevoelige gebieden.

Deze mogelijkheden zijn niet onderzocht in dit rapport, maar dragen wel bij aan het vergroten van de robuustheid van het systeem.

Referenties

Asselman, N., Wesselius, C., Leenders, J., & Zwaaftink, M. G. (2010). Onzekerheden in overstromingsmodellering: Hoe uiten onzekerheden in modelschematisatie en scenariokeuze zich in berekende overstromingskenmerken? Deltares.

Bruggeman, W., Haasnoot, M., Hommes, S., Linde, A. t., Brugge, R. v. d., Rijken, B., Dammers, E., & Born, G. J. v. d. (2011). Deltascenario's: Verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21ste eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het deltaprogramma 2011-2012. Deltares & PBL.

De Bruijn, K. M. (2005). Resilience and flood risk management. A systems approach applied to lowland rivers. PhD thesis. Delft.

De Bruijn (2006). Bepalen van schade ten gevolge van overstromingen
In verschillende scenario's en bij verschillende beleidsopties. WL | Delft Hydraulics, rapport Q4290.

Deltares (2011). SOBEK: Hydrodynamics, rainfall-runoff and real-time control (draft version: 0.00.20025). Deltares.

De Wit en Buishand (2007). Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. M. de Wit en A. Buishand, Rijkswaterstaat RIZA/KNMI, RWS RIZA-rapport 2007.027, KNMI-publicatie 218, ISBN 9789036914062, Lelystad.

EA (2007) Performance and Reliability of Flood and Coastal Defences. R&D Technical Report FD2318/TR1 (http://evidence.environment-agency.gov.uk/FCERM/Libraries/FCERM_Project_Documents/FD2318_5925_TRP_pdf.sflb.ashx)

Gudden, J. (2008) Overstromingsberekeningen in het kader van VNKII, Provincie Gelderland

Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., Beek, E. v., & Deursen, W. P. A. v. (submitted). Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Climatic Change*.

Hall, J., & Solomatine, D. (2008). A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions. *International Journal of River Basin Management*, pp. 85-98.

HR (2006) Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen, voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006). Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Klijn & De Grave (2008) Grenzen aan de gevolgen van een overstroming? Discussiestuk voor 'Waterveiligheid 21e eeuw'. Deltares.

Knoeff, H., & Ellen, G. J. (2011). Verkenning deltadijken. Deltares.

Kok, M., Huizinga, H. J., Vrouwenvelder, A. C. W. M., & Braak, W. E. W. v. d. (2005). Standaardmethode 2005: Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen. Lelystad: HKV Lijn in Water en TNO Bouw.

Kwakkel, J. H., Mens, M. J. P., Jong, A. d., Wardekker, J. A., Thissen, W. A. H., & Sluijs, J. P. v. d. (2011). Uncertainty Terminology. Knowledge for Climate report, draft version 1.0.

Mens, M. J. P., Klijn, F., de Bruijn, K. M., & van Beek, E. (2011). The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 14(8), 1121-1131.

Ter Horst, W. L. A. (2005). The safety of dikes during flood waves: Analysis of the failure probability of dike ring areas in flood wave situations. TU Delft/Rijkswaterstaat.

Thonus, B., Diermanse, F., Lammers, I. (2003). De veiligheid van Nederland in kaart: Hydraulische randvoorwaarden. Fase 2 - Uitwerken en implementeren van belastingmodellen. Rapport Q3028, WL|Delft Hydraulics.

Van de Waart (2010). Overstromingsberekeningen t.b.v. VNK2, Dijkring 53. Provincie Overijssel. Juni 2010. Rapport 9V6747.B0, Royal Haskoning.

Van der Knaap, F. (2000). Breach growth as a function of time. Technical report Q2655, WL|Delft Hydraulics.

Van Velzen, E.H., M.J.M. Scholten, D. Beyer (2007) Achtergrondrapport HR 2006 voor de Rijn. Thermometerrandvoorwaarden 2006. Rijkswaterstaat RIZA Rapport 2007.021

Vrouwenvelder,A.C.W.M. en H.M.G.M. Steenbergen (2003) Theoriehandleiding PC-Ring, versie 4.0, deel C: rekentechnieken. Rapport 2003-CI-R0022, TNO.

Wardekker, J. A., de Jong, A., Knoop, J. M., & van der Sluijs, J. P. (2010). Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(6), 987-998.

WL (2001) Manual Delft-FLS 2.55, WL|Delft Hydraulics.

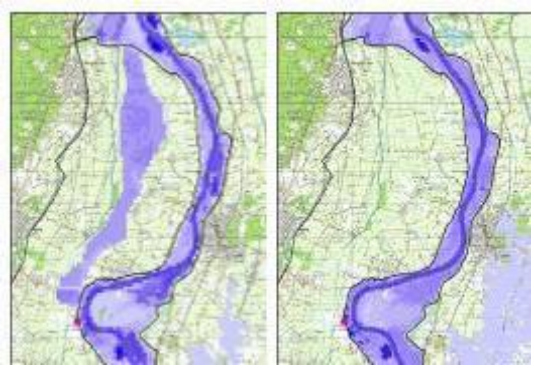
Bijlagen

A Modellen en input

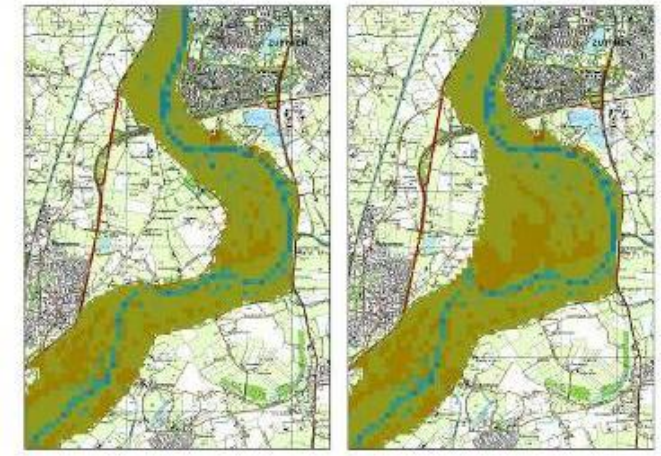
A.1 Delft-FLS en WAQUA

Voor de overstromingsberekeningen is gebruikt gemaakt van de (tweedimensionale) Delft-FLS modellen (WL, 2001) die geschematiseerd zijn in het kader van VNK (Veiligheid Nederland in Kaart). Het model van dijkringen 48 t/m 52 (bron: Johan Gudden, provincie Gelderland) is gecombineerd met die van dijkring 53 (bron: Dianne Laarman, provincie Overijssel; Van de Waart, 2010).

Ten opzichte van de oorspronkelijke modellen zijn de volgende wijzigingen doorgevoerd:
- uitvoerbestand is aangepast om model werkend te krijgen: versie 255.05.
- grid van dijkring 48 t/m 52 is 'afgeknipt' bij de IJssel. Oorspronkelijke model begon bij Lobith en bevatte nog een stuk Waal en Nederrijn. Dit kostte onnodig veel rekentijd.
- bodemhoogte en ruwheidsgrid van dijkring 53 zijn omgezet van een 50 x 50 meter grid naar een 100 x 100 meter grid.
- een aantal laterale toestromingen zijn toegevoegd: Oude IJssel, Twentekanaal en Schipbeek. De afvoer is constant en gelijkgesteld aan de afvoer in het WAQUA-model.
- Twee ruimte-voor-de-rivier-projecten zijn ingebouwd: de geplande nevengeul bij Veessen-Wapenveld (zie Figuur A.1) en de geplande dijkverlegging bij Cortenoever (zie Figuur A.2). Gegevens over de nieuwe bodemhoogtes zijn wederom afgeleid uit het WAQUA-model, dat gebruikt wordt voor de rivierverruimingsprojecten.



Figuur A.1 De IJssel bij Veessen, met (links) en zonder (rechts) de geplande nevengeul Veessen-Wapenveld



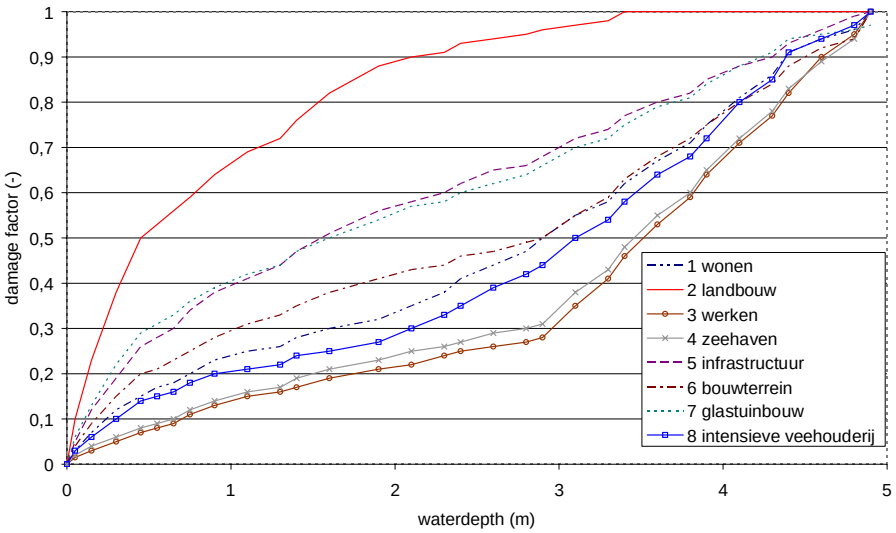
Figuur A.2 Ligging van de rivierbodem van de IJssel bij Cortenoever: voor (links) en na (rechts) de geplande dijkverlegging in het kader van Ruimte voor de Rivier

A.2 Damage Scanner

Om de schade door overstromen te berekenen, is het model Damage Scanner (DS) gebruikt. Dit model is in 2006 bij Deltares ontwikkeld met als doel overstromingsschade te kunnen berekenen met verschillende landgebruikskaarten als ondergrond (De Bruijn, 2006). Het is een afgeleide van het standaard schade en slachtoffermodel HIS-SSM (Kok et al., 2005). Het belangrijkste verschil met HIS-SSM is dat de DS de schade niet per object maar per landgebruiksklasse berekent. De landgebruiksklassen met maximale schade per hectare en de bijbehorende schadefunctie zijn weergegeven in Tabel A.1Tabel A.1 . De schadefuncties per landgebruiksklasse zijn weergegeven in Figuur A.3.

ID	Landgebruiksklasse	Maximale schade (M€/ha)	Schadefunctie	Schadeklasse
1	wonen CSBC	9.65	1	Wonen
2	wonen GSCD	4	1	Wonen
3	wonen LW	3.9	1	Wonen
4	verblijfsrecreatie	0.11	2	Landbouw HIS
5	dagrecreatie	0.11	2	Landbouw HIS
6	werken	6.4	3	Werken
7	zeehaven	4.8	4	Zeehaven
8	natuur	0.09	2	Landbouw HIS
9	akkerbouw	0.02	2	Landbouw HIS
10	grondgebonden veeteelt	0.02	2	Landbouw HIS
11	glastuinbouw	0.7	7	Glastuinbouw
12	intensieve veehouderij	0.9	8	Intensieve veehouderij
13	infrastructuur	1.7	5	Infrastructuur
14	water	0	0	
15	zee	0	0	
16	bouwterrein	1.4	6	Bouwterrein

Tabel A.1 Landgebruiksklassen in de DamageScanner met maximale schadebedragen (De Bruijn, 2006)



Figuur A.3 Schadefuncties in de DamageScanner (De Bruijn, 2006)

A.3 Uitgangspunten en aannames

A.3.1 Afvoergolven

Bij elke doorbraak wordt voor drie afvoergolven het overstromingspatroon berekend. De basis voor de afvoergolven bij de IJssel is de standaard afvoergolf bij Lobith met een piek van 16000 m^3/s ('ref16' in Tabel A.2). Hierbij verwijzen de toevoegingen 'b' en 's' naar de golfvorm 'breed' en 'smal'. Geen toevoeging verwijst naar de standaard golfvorm. Dezelfde standaard afvoergolf wordt gebruikt bij het afleiden van hydraulische randvoorwaarden voor toetsen van waterkeringen. In TMR2006, de thermometer randvoorwaarden van 2006, is de golfvorm voor het laatst gecorrigeerd. Deze golf, en de brede en smalle variant, zijn tevens gebruikt in VNK2. Voor deze studie zijn hieruit twee extra afvoergolven afgeleid met een piek van 14000 m^3/s en 19000 m3/s bij Lobith. Figuur A.4 toont de resulterende golfvormen voor de IJssel. De brede en smalle varianten zijn gebruikt in de gevoeligheidsanalyse.

Uitgangspunt voor de afvoergolven was de standaard afvoergolf uit TMR2006 (Van Velzen et al., 2007), die ook gebruikt is in VNK2 (zie ook Gudden, 2008). In VNK2 zijn tevens de volgende golven gebruikt:

- 16000 m^3/s plus 1 decimeringshoogte: piek van 18750 bij Lobith, standaard vorm
- 16000 m^3/s min 1 decimeringshoogte: piek van 13150 bij Lobith, standaard vorm
- 16000 m^3/s smalle vorm
- 16000 m^3/s brede vorm

De laatste twee afvoergolven zijn direct overgenomen. De eerste twee golven zijn omgerekend om tot een piek bij de IJssel te komen van respectievelijk ~2100 m^3/s en ~3500 m^3/s. Er is aangenomen dat dit een redelijke bandbreedte is van afvoeren die voor kunnen komen én die voor overstromingsdreiging zorgen. De afvoer bij Lobith die hierbij hoort hangt af van de afvoerverdeling. Er is gekozen voor 14000 m3/s en 19000 m^3/s als minimum en maximum. Bij een afvoerverdeling van 0.15 leidt 14000 m3/s bij Lobith tot een piek van 2100 m^3/s bij de IJsselkop. Bij een afvoerverdeling van 0.18 leidt 19000 m^3/s bij Lobith tot een piek van 3420 m^3/s bij de IJsselkop.

De volgende formule is gebruikt om de bestaande VNK2-afvoergolven om te rekenen naar de golven met nieuwe piekwaarden (14000 m^3/s en 19000 m^3/s):

$$dQ^{new}(t) = dQ^{old}(t) \cdot \frac{(Q^{new}_{\max} - Q^{new}_{\min})}{(Q^{old}_{\max} - Q^{old}_{\min})}$$

Hiermee wordt dus dezelfde verhouding aangehouden tussen verandering in afvoer over de tijd en het verschil tussen laagste en hoogste afvoer van de golf. Deze verhoudingen zijn verschillend voor een standaard golf, een smalle golf en een brede golf.

Vervolgens is WAQUA gebruikt om de afvoergolven bij Lobith om te rekenen naar de IJsselkop. Hierbij is een vrije afvoerverdeling aangehouden, dus de verdeling varieert met de afvoer. Hierdoor zijn de laagste en hoogste pieken bij de IJssel niet exact 2100 m^3/s en 3500 m^3/s geworden. Een overzicht van de uiteindelijke piekafvoeren wordt gegeven in Tabel A.2.

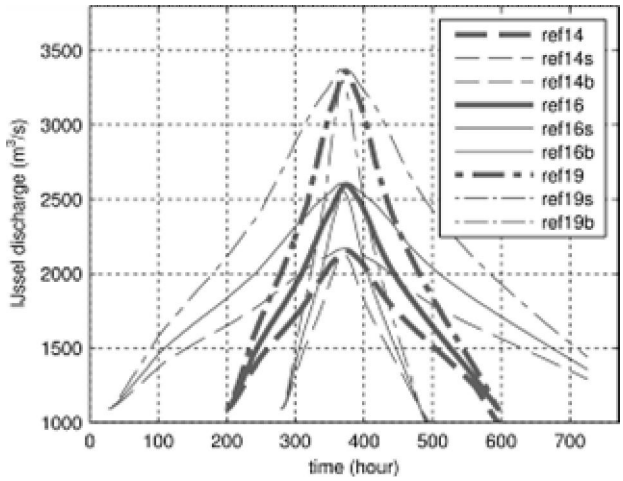
Codering	Afvoerpiek Lobith (m^3/s)	Golfvorm	Afvoerpiek IJssel (m^3/s)
ref14	14000	standaard	2156
ref14b	14000	Breed	2170
ref14s	14000	Smal	2137
ref16	16000	standaard	2598
ref16b	16000	Breed	2611
ref16s	16000	Smal	2556
ref19	19000	standaard	3363
ref19b	19000	Breed	3381
ref19s	19000	Smal	3296

Tabel A.2 Overzicht afvoergolven en bijbehorende piekwaarden bij Lobith en de IJsselkop

De extra golven die alleen voor de deltadijk-berekeningen zijn gebruikt, dus de afvoergolven met piekwaarden tussen ref16 en ref19, zijn direct afgeleid van ref16 (bij de IJssel), volgens dezelfde bovenstaande formule. Voor deze golven is WAQUA dus niet meer gebruikt. Als piekwaarde zijn de volgende afvoeren gekozen (Tabel A.3):

Codering	Afvoerpiek Lobith (m^3/s)	Afvoerpiek IJssel (m^3/s)
ref17	17000	3094
ref18	18000	2812

Tabel A.3 Afvoergolven en bijbehorende piekwaarden bij Lobith en de IJsselkop, gebruikt voor de deltadijken



Figuur A.4 Afvoergolven die gebruikt zijn voor de overstromingsberekeningen met Delft-FLS

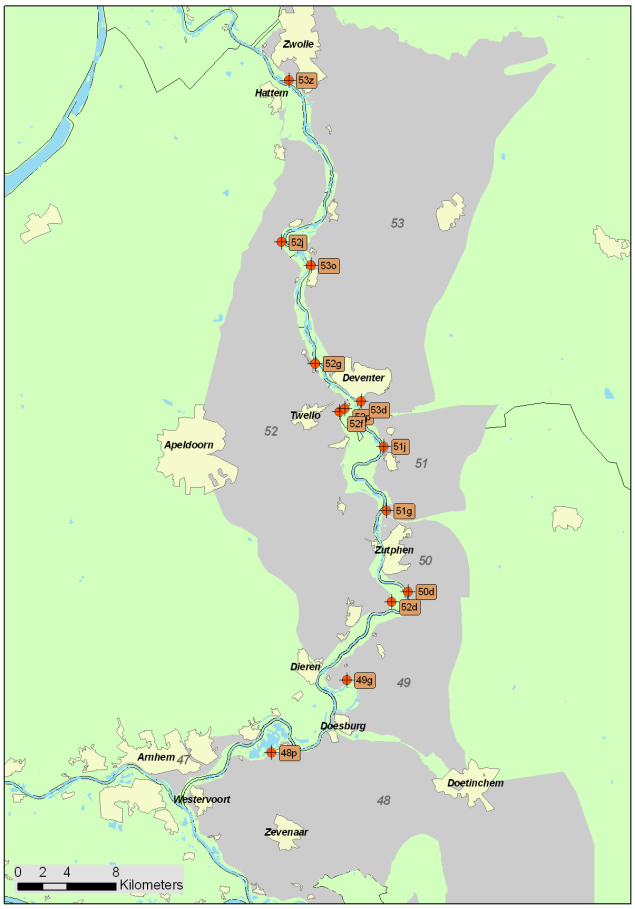
A.3.2 Doorbraaklocaties

Dertien doorbraaklocaties zijn representatief beschouwd voor wat er binnen een dijkring zou kunnen gebeuren (Tabel A.4 en Figuur A.5). Deze keuze komt grofweg overeen met die in het project VNK2[3]. Voor elke locatie zijn overstromingsberekeningen gedaan voor een aantal afvoergolven. De resulterende waterdieptekaarten per locatie zijn te vinden in bijlage C.

3.http://www.rijkswaterstaat.nl/water/veiligheid/bescherming_tegen_het_water/organisatie/veiligheid_nederland_in_kaart

Codering	Dijkring	Naam
48p	48	Giesbeek
49g	49	Zuivering Olburgseweg
50d	50	Vierakker
51g	51	Mettray
51j	51	Gorssel-Noord
52d	52	Cortenoever
52f	52	't Schol
52g	52	Gemaal Terwolde
52j	52	De Nijenstee
52p	52	Hoven Zuid
53d	53	Deventer
53o	53	Olst
53z	53	IJsselcentrale Zwolle

Tabel A.4 Overzicht van de representatieve doorbraaklocaties



Figuur A.5 Studiegebied met doorbraaklocaties

A.3.3 Dijkhoogtes

De dijkhoogte voor de referentiesituatie is ongeveer gelijk aan maatgevend hoogwater, in dit geval overeenkomend met een lokale waterstand die hoort bij een afvoer van 2600 m^3/s bij de IJsselkop. De precieze dijkhoogte is voor de berekening niet zo relevant, omdat er met

faalcurves wordt gerekend. De kans op bezwijken gegeven een normwaterstand kan hieruit worden afgeleid. De dijkhoogtes in het model zijn dus niet gelijk aan de werkelijke dijkhoogtes in het veld.

A.3.4 Frequentieverdeling van de locale waterstand

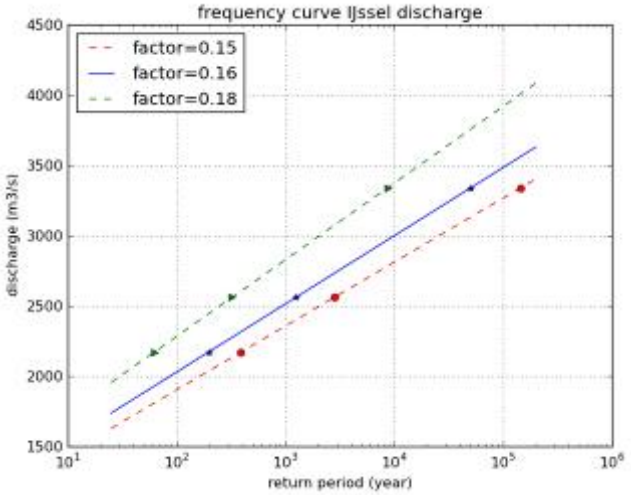
Om te berekenen wat de kans is dat een bepaalde waterstand ter plaatse van de doorbraaklocatie wordt overschreden, is de frequentieverdeling van de afvoer bij Lobith nodig evenals een aanname over de afvoerverdeling. De frequentieverdeling van de afvoer bij Lobith is overgenomen uit TMR2006:

$Q = a \cdot \ln(T) + b$ voor: 25 < T < 10.000 jaar

Waarbij:

Q = afvoer bij Lobith
T = herhalingstijd (jaren)
a = 1316,43
b = 6612,61 m^3/s

Aan de hand van deze 'werklijn', de afvoerverdeling en de Qh-relatie op locatie (volgend uit het Delft-FLS-model), is een verband gelegd tussen de maximale waterstand (h) en de herhalingstijd T(h) op locatie: de Th-relatie. Uitgangspunt is de piekafvoer op de IJssel, die gebruikt is in de overstromingsberekeningen. Vervolgens is voor drie afvoerverdelingen (0.15, 0.16 en 0.18) de bijbehorende afvoer bij Lobith bepaald. Uit de frequentieverdeling van de afvoer bij Lobith is ten slotte de bijbehorende overschrijdingsfrequentie afgelezen. De aanname is dat deze overschrijdingsfrequentie voor extreme afvoeren een goede benadering is van de overschrijdingskans per jaar. Figuur A.6 laat zien dat de keuze voor afvoerverdeling veel invloed heeft op de herhalingstijd van IJsselafvoer. De afvoerverdeling is daarom meegenomen in de gevoeligheidsanalyse van het systeemrisico.



Figuur A.6 Overschrijdingsfrequentie van de IJssel-afvoer voor drie verschillende afvoerverdelingen. De IJsselafvoer blijft gelijk, maar de herhalingstijd die hierbij hoort hangt af van de afvoerverdeling.

A.3.5 De faalcurve

De faalcurve geeft aan wat de kans is op bezwijken van de dijk, gegeven een bepaalde belasting ('load'). Voor het rivierengebied wordt de 'load' vooral bepaald door de waterstand. De gecombineerde faalcurve voor alle mogelijke faalmechanismen kan uitgedrukt worden als een cumulatieve normaalverdeling (Horst, 2005; EA, 2007). Er is aangenomen dat de standaardafwijking van deze verdeling voor dijken langs de IJssel gemiddeld 50 cm is. De μ van de faalcurve is vervolgens zodanig gekozen dat de faalkans voor de dijkring (dus de faalcurve in combinatie met de overschrijdingskans van de waterstand) gelijk is aan 1/1250 per jaar. In formule:

$P(Z<0) = P(Z<0 \mid h) \cdot P(h)$ =1/1250 per jaar

Waarbij:

Z = grenstoestandsfunctie (Z<0 betekent dat de dijk bezwijkt)
h = lokale waterstand
P = kans

Voor dijkringen met meerdere doorbraaklocaties, wordt eerst de overstromingskans per locatie (representatief voor een dijkvak) bepaald, zodanig dat de *dijkringkans* gelijk is aan 1/1250. Hierbij wordt dezelfde methode gevolgd als voor het berekenen van de systeemkans van de IJssel. Dit is in detail beschreven in bijlage B. Tabel A.5 toont de resulterende overstromingskans per locatie. Een voorbeeld van de faalcurve staat in bijlage B.

Doorbraaklocatie	Herhalingstijd (jaren)	Overstromingskans (1/jaar)
48p	1250	0.00080
49g	1250	0.00080
50d	1250	0.00080
51g	2170	0.00046
51j	2130	0.00047
52d	5000	0.00020
52f	5000	0.00020
52g	5000	0.00020
52j	5000	0.00020
52p	5000	0.00020
53d	3030	0.00032
53o	3030	0.00033
53z	3030	0.00033

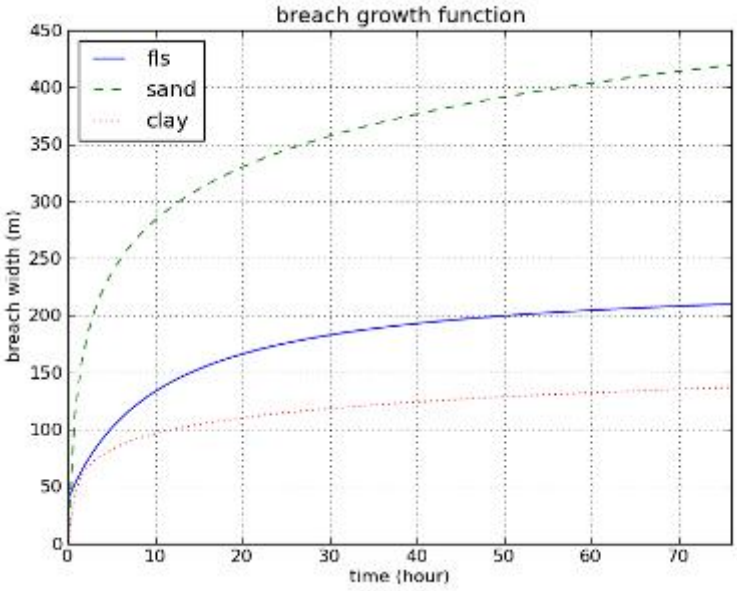
Tabel A.5 Faalkans per doorbraaklocatie

A.3.6 Breseigenschappen

Om te bepalen wanneer de dijk bezwijkt, is eerst de piekwaterstand ter plaatse van de doorbraaklocatie bepaald met behulp van het hydrodynamische model Delft-FLS voor een standaard afvoergolf van 2600 m^3/s bij de IJsselkop (zie bijlage A). Bij deze en lagere afvoergolven breekt de dijk precies op de top van de golf. Voor alle hogere golven breekt de dijk zodra deze waterstand is overschreden,

De bresontwikkeling in de tijd is weergegeven in Figuur A.7. Ter vergelijking is ook de bresontwikkeling weergegeven voor zand en klei, volgens de formule van Van der Knaap

(2000) die in het hydrodynamische model SOBEK-2D (Deltares, 2011) wordt gebruikt. De gebruikte Delft-FLS bresformule zit er tussenin.



Figuur A.7 Bresgroei functie in Delft-FLS: bresbreedte als functie van de tijd vanaf doorbraakmoment. Gebruikte functie in FLS vergeleken met de Van der Knaap formule in SOBEK 2D (zand en klei)

B Methode ter bepaling van de systeemkans en het systeemrisico

B.1 Algemene uitleg

Aannames

- Overstromingskans van elke dijkring is bekend. Dit is de kans dat er ergens in die dijkring een overstroming plaatsvindt.
- De overschrijdingskans van afvoeren aan de rand van het systeem (IJsselkop/Westervoort) is bekend (= de afvoerfrequentiecurve)
- De verwachte economische schade is beschikbaar voor een aantal doorbraaklocaties
- Meerdere doorbraken tegelijk zijn mogelijk met een maximum van vier.

Notatie

k index voor doorbraaklocatie (1 t/m 13)
i index voor gesimuleerde afvoergolfpiek (1 t/m 3)
$h^k(Q_i)$ waterstand op locatie k als functie van de afvoer

Pf^k = Overstromingskans per jaar van een locatie (representatief voor een dijkstuk)
$F^k(h)$ = Overschrijdingskans per jaar van de waterstand op locatie k (frequentiecurve van de waterstand)
$Pc^k(h)$ = Faalkans van de dijk gegeven een waterstand als functie van de waterstand op locatie k (=faalcurve)

Berekenen van de overstromingskans en de systeemkans

Pf^k is een functie van $F^k(h)$ en $Pc^k(h)$. De faalcurve ($Pc^k(h)$) is gefit voor elke locatie, aan de hand van de aanname van overstromingskans per dijkring, en de frequentiecurve van de waterstand. Deze laatste is afgeleid uit de afvoerfrequentiecurve en de Qh-relatie op lokatie (volgens het Delft-FLS model).

Het fitten gebeurt volgens de vergelijking:

$$P_f^k = P(Z < 0) = \int f^k(h) \cdot P_c^k(h) \cdot dh$$

Bij sommige dijkringen zijn er meerdere doorbraaklocaties. Voor deze locaties komt de individuele overstromingskans lager uit, zodat de gezamenlijke dijkringkans weer uitkomt op 1/1250 per jaar. Er is uitgegaan van een correlatie van 0.8. Zie verdere uitleg in B.5.

Voor iedere locatie is nu een overstromingskans, een overschrijdingskans en een faalkans bekend. De volgende stap is het combineren van alle overstromingskansen in een systeemkans en een systeemrisico. Voor de huidige situatie (referentie) zijn hiervoor geen faalkansen en overschrijdingskansen nodig. Voor de alternatieve systemen worden nieuwe overstromingskansen per locatie berekend met aangepaste faalcurves en Qh-relaties.

Elke stap wordt hierna verder uitgelegd.

B.2 Berekenen van de overstromingskans per locatie (Pf^k)

De overstromingskans per *dijkring* is gelijkgesteld aan 1/1250 per jaar. Als er meerdere doorbraaklocaties per dijkring zijn, dan moet Pf^k verdeeld worden over deze locaties. Hiervoor is een MonteCarlo-benadering gevolgd zoals beschreven in B.4. De overstromingskansen per

locatie zijn zo gekozen dat ze, met een aangenomen correlatie van 0.8, samen weer een overstromingskans per dijkring geven van 1/1250 per jaar.

B.3 Overschrijdingkans van de waterstand per doorbraaklocatie ($F^k(h)$)

De lokale overschrijdingskans van de waterstand is afgeleid uit de afvoerfrequentiecurve bij Lobith, een afvoerverdelingsfactor voor de IJssel en de Qh-relaties zoals berekend met Delft-FLS.

De frequentieverdeling van de afvoer bij Lobith kan als volgt worden beschreven (Thonus et al., 2003):

$$Q_{Lobith} = a + b \cdot \ln(T)$$

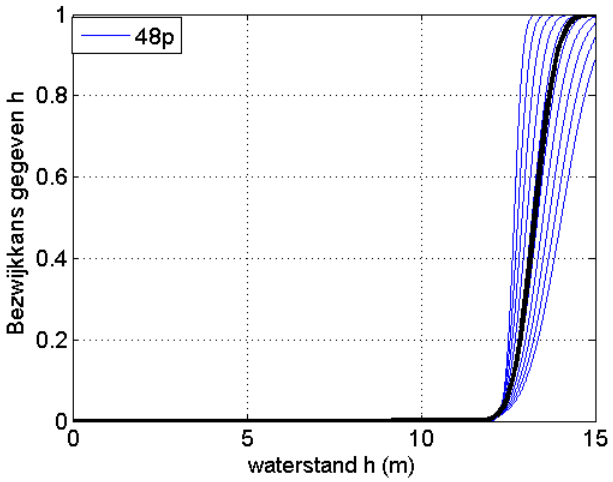
Waarbij (voor T>25 year):

a = 6612.61
b = 1316.43
T = Herhalingstijd per jaar

Om een verband te leggen tussen afvoer bij Lobith en lokale waterstanden, zijn negen afvoergolven eerste vertaald naar de IJssel en daarna gesimuleerd met Delft-FLS (zie A.3). Vervolgens is voor iedere doorbraaklocatie een Qh-relatie afgeleid (relatie tussen Q_{ijssel} en h^k). De bovenstaande formule kan hiermee omgeschreven worden naar h^k als functie van T. De resulterende overschrijdingskans van de waterstand ($F^k(h)$) is locatie-afhankelijk.

B.4 Faalcurves

Faalcurves geven een relatie tussen de waterstand en de waarschijnlijkheid dat bij deze waterstand de dijk zal bezwijken. De faalcurve heeft de vorm van een cumulatieve normaalverdeling met een verwachtingswaarde en standaardafwijking, en representeert alle mechanismen die tot dijkbezwijken kunnen leiden. Voor elke doorbraaklocatie is een faalcurve afgeleid uit de overstromingskans per locatie en de overschrijdingskans van de waterstand (zie paragraaf B.1). De standaardafwijking is ingesteld op 50 cm. Zie voorbeeld van faalcurve voor doorbraaklocatie 48p in Figuur B.1. De gevoeligheid van de systeemkans voor deze aanname is getest in de gevoeligheidsanalyse.



Figuur B.1 Gefitte faalcurve voor doorbraaklocatie 48p (x-as: waterstand, y-as: kans op doorbraak bij die waterstand, dikke zwarte lijn: sigma=0.5), voor de referentiesituatie, voor verschillende sigma's (0.2 – 0.8)

B.5 Combineren van overstromingskansen per locatie in een schatting voor systeemkans

MonteCarlo-analyse

De MonteCarlo-analyse gaat uit van een set met Pf's (overstromingskansen per locatie) binnen hetzelfde systeem. De overstromingskans op een locatie kan beschreven worden met een 'limit-state function' Z. Deze functie beschrijft de kansverdeling van een stochastische variabele Z, waarbij P(Z<0) staat voor falen, of dijkbezwijken. De stochast Z heeft een normale verdeling die afgeleid is van u, waarbij u standaard normaal is verdeeld (Φ(u)). Z wordt voor de eerste locatie in het systeem als volgt beschreven:

$$Z_1 = \beta_1 - u$$

Waarbij:

u	=	standaard normaal verdeelde stochast horende bij Z1
β_1	=	betrouwbaarheidsindex van de eerste locatie

De Z-functies van de andere locaties zijn gecorreleerd met de eerste locatie en worden als volgt beschreven (zie Vrouwenvelder en Steenbergen, 2003):

$$Z_k = \beta_k - \rho \cdot u \ - w_k \cdot \sqrt{1-\rho^2}$$

Waarbij:

ρ	=	correlatiecoëfficiënt
w_k	=	standaard normaal verdeelde stochast horende bij locatie k
β_k	=	betrouwbaarheidsindex van locatie k

Met de MonteCarlo-benadering worden duizenden scenario's gegenereerd van combinaties van Z-waarden. Met de resultaten wordt de systeemkans benaderd als het aantal scenario's waarbij de Z van ten minste 1 locatie kleiner is dan nul, gedeeld door het totaal aantal scenario's. Hierbij wordt geen rekening gehouden met hydraulische systeemwerking.

Correlatiecoëfficiënt ρ

De correlatie geeft aan wat de kans is dat er meerdere doorbraken tegelijkertijd plaatsvinden. Hoe hoger de correlatie, hoe groter deze kans. In deze studie wordt een correlatiecoëfficiënt gebruikt voor de grenstoestandfuncties (belasting min sterkte) van de doorbraaklocaties. Als de correlatie groter wordt, wordt de kans kleiner dat een dijk individueel bezwijkt. Bij correlatie van 1 falen alle dijken tegelijk als ze hetzelfde beschermingsniveau hebben. De correlatiecoëfficiënt van de grenstoestandfuncties wordt idealiter samengesteld uit de afhankelijkheden van sterkte en belasting tussen elke combinatie van twee doorbraaklocaties. De afhankelijkheid van de belasting (in dit geval de waterstand) is 1; als bij locatie A een hoge waterstand optreedt, dan treedt dit bij locatie B ook op (zij het iets later in de tijd en geen rekening houdend met hydraulische systeemwerking). Of de dijk bij deze omstandigheden faalt, hangt af van de sterkte van de dijk (onder andere zijn hoogte). De afhankelijkheid van de sterkte tussen de doorbraaklocaties is onzeker. Over het algemeen zal de hoogte niet erg variëren, maar de sterkte ten aanzien van andere faalmechanismen (zoals 'piping') is variabeler. Hoe variabeler, hoe kleiner de afhankelijkheid. De afhankelijkheid ten aanzien van sterkte en belasting is gecombineerd in één correlatiecoëfficiënt die voor alle locaties hetzelfde is: ρ =0.8.

B.6 Systeemrisico

Voor een benadering van het systeemrisico wordt dezelfde methode gevolgd als beschreven in B.5. Het enige verschil is dat de schade als gevolg van dijkbezwijken wordt toegekend aan het betreffende scenario, voordat de scenario's worden gesommeerd. Bijvoorbeeld, als een van de scenario's aangeeft dat locaties 1, 2 and 5 bezwijken, dan wordt de gesommeerde

schade bij deze drie locaties aan dit scenario toegekend. De kans op overschrijden van een bepaalde schade wordt vervolgens berekend door het aantal scenario's te tellen waarbij deze schade wordt overschreden en te delen op het totale aantal scenario's. Dit wordt gedaan voor een aantal schadeklassen en resulteert in een zogenaamde loss-exceedance curve of FD-curve (waarbij D staat voor 'damage', dus schade). Het systeemrisico is gelijk aan de oppervlakte onder deze curve:

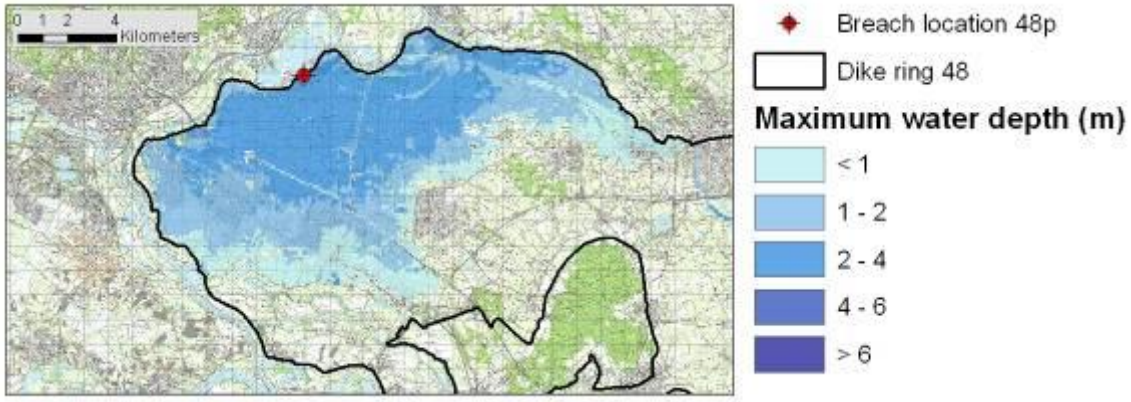
$$Systeemrisico = E(D) = \int P(D) \cdot D \cdot dD = \int F(D) \cdot dD$$

Waarbij:

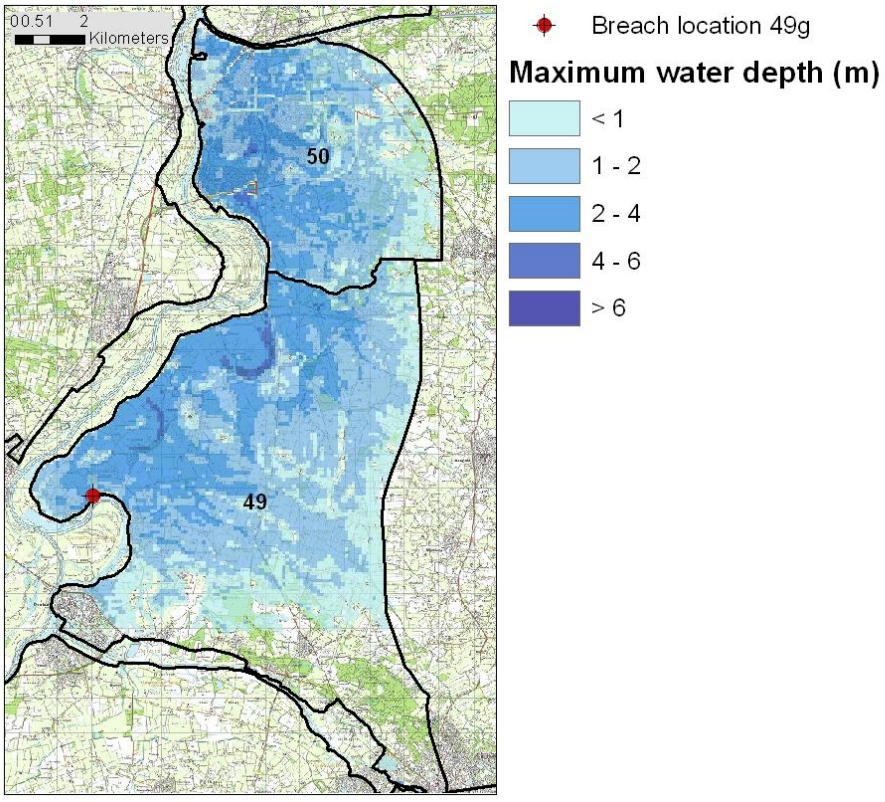
D = schade in miljoen euro
F(D) = kansverdeling van de schade
P(D) = kans op schade
E(D) = verwachtingswaarde van de schade

De schades die horen bij een bepaald scenario worden afgeleid uit de schadeberekening met een standaard golfvorm. Voor het systeemrisico is dus geen rekening gehouden met enerzijds de kans op bredere of smallere golfvormen (waardoor de schade verandert) en anderzijds de toenemende schade bij hogere piekafvoeren. Voor een preciezere schatting van het systeemrisico zou dit wel meegenomen moeten worden. Echter, het effect van andere aannames wordt groter geacht.

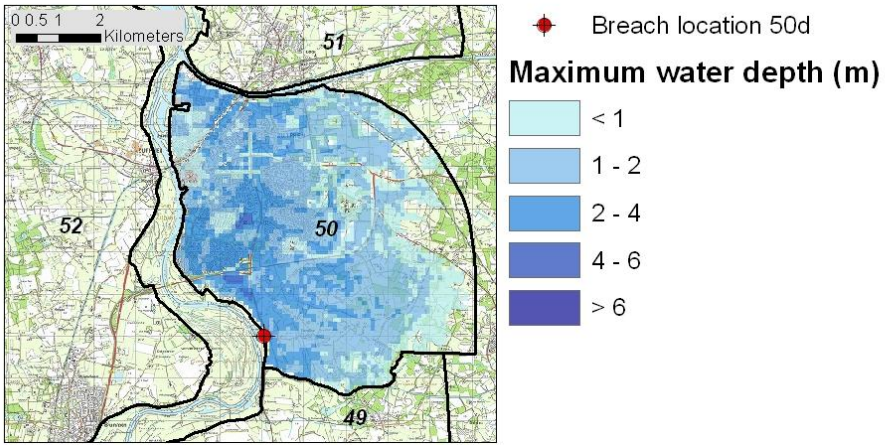
C Overstromingskaarten per doorbraaklocatie (huidige systeem)



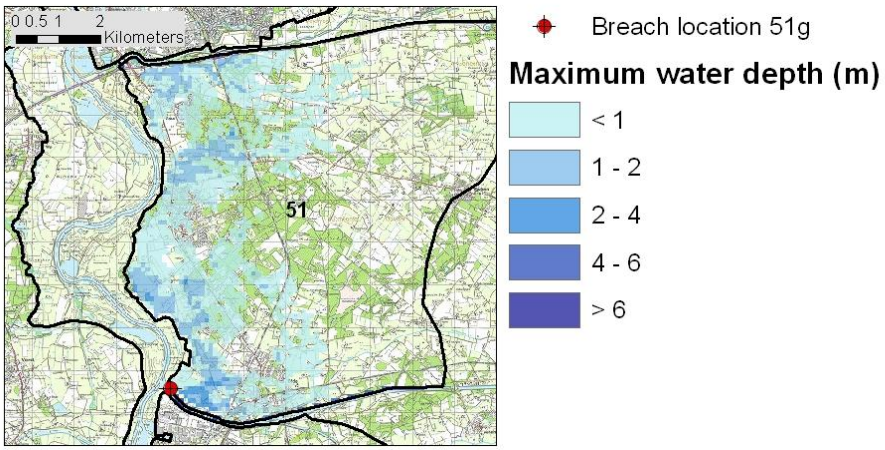
Figuur C.1 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 48p (Giesbeek) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



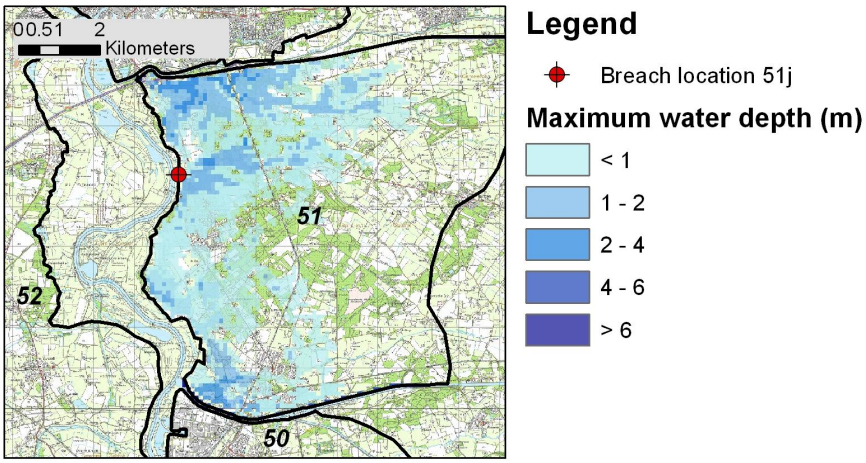
Figuur C.2 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 49g (Olburgseweg) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



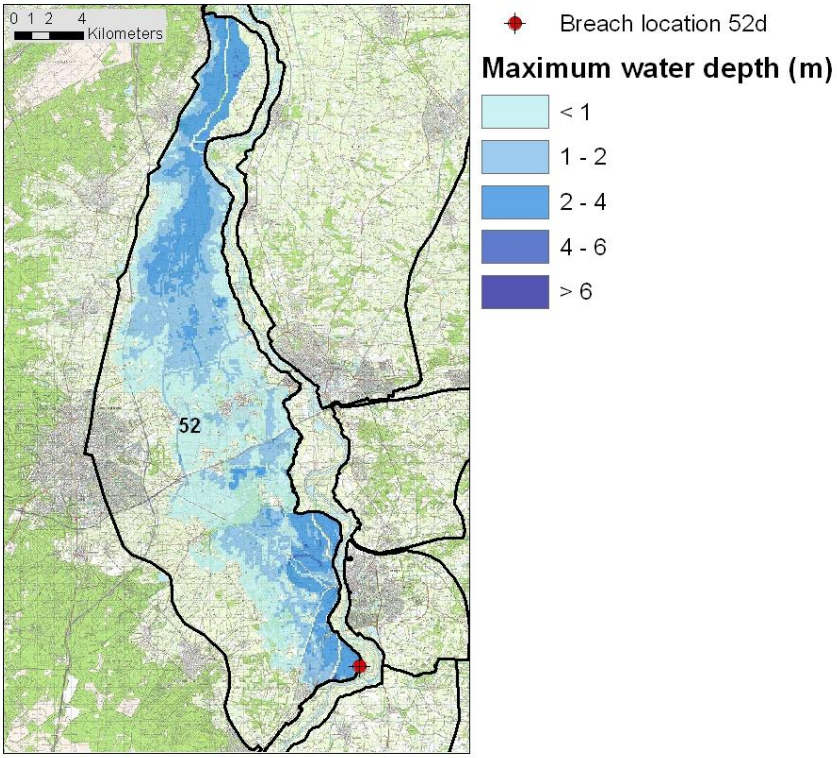
Figuur C.3 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 50d (Vierakker) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



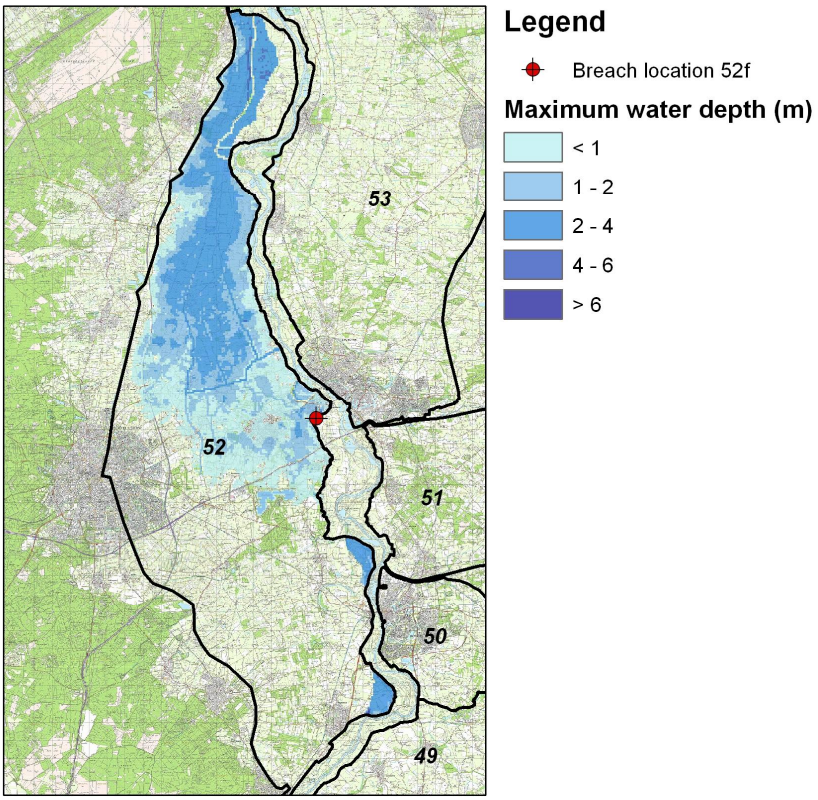
Figuur C.4 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 51g (Metrray) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



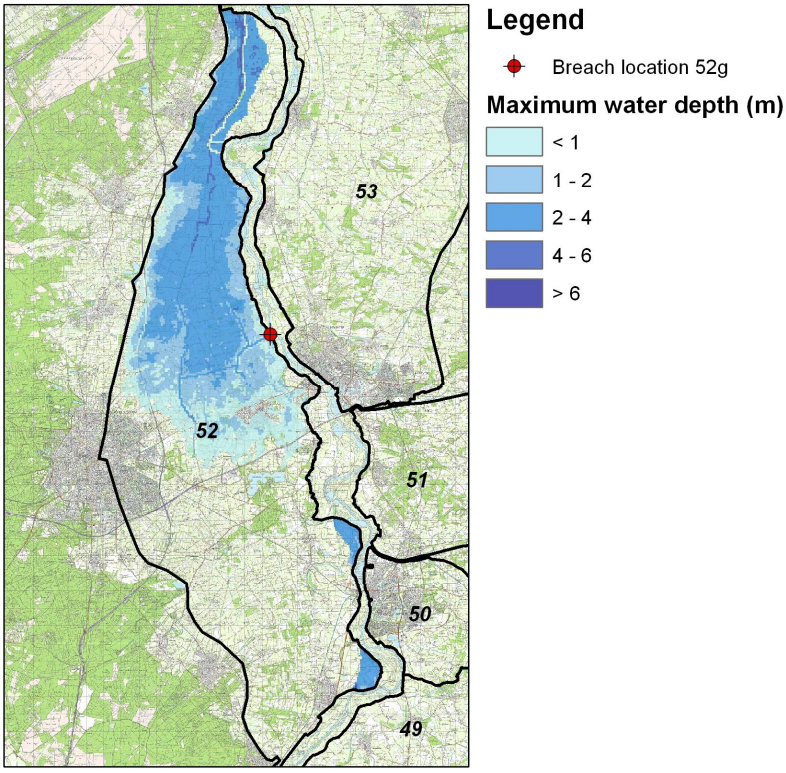
Figuur C.5 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 51j (Gorssel-Noord) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



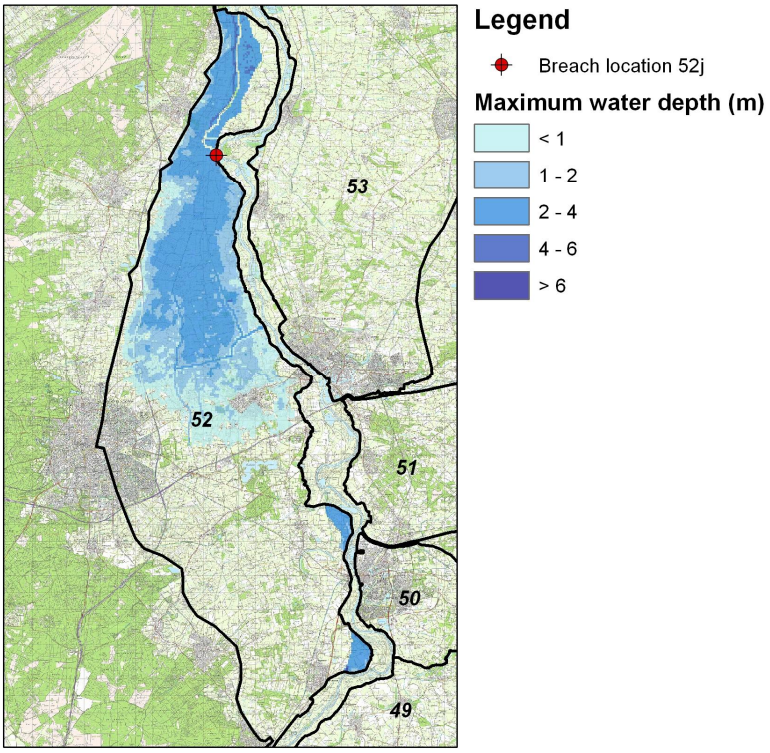
Figuur C.6 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 52d (Cortenoever) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



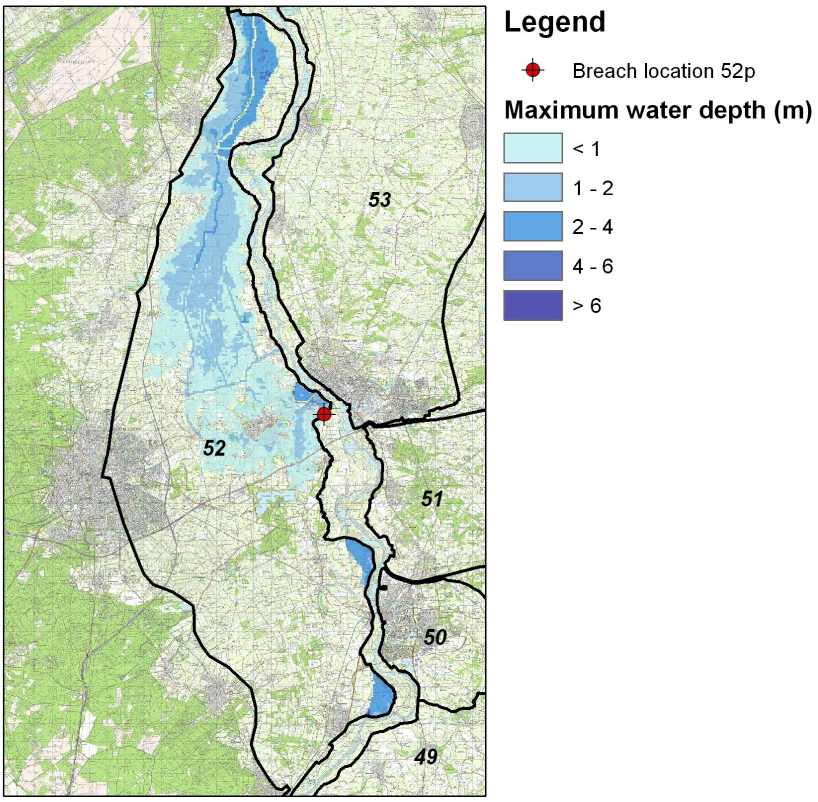
Figuur C.7 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 52f ('t Schol) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



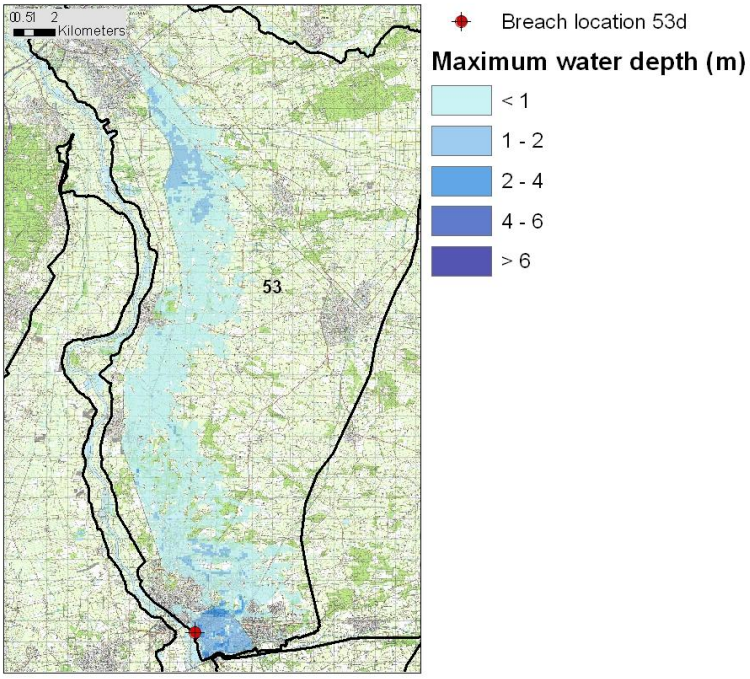
Figuur C.8 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 52g (Gemaal Terwolde) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



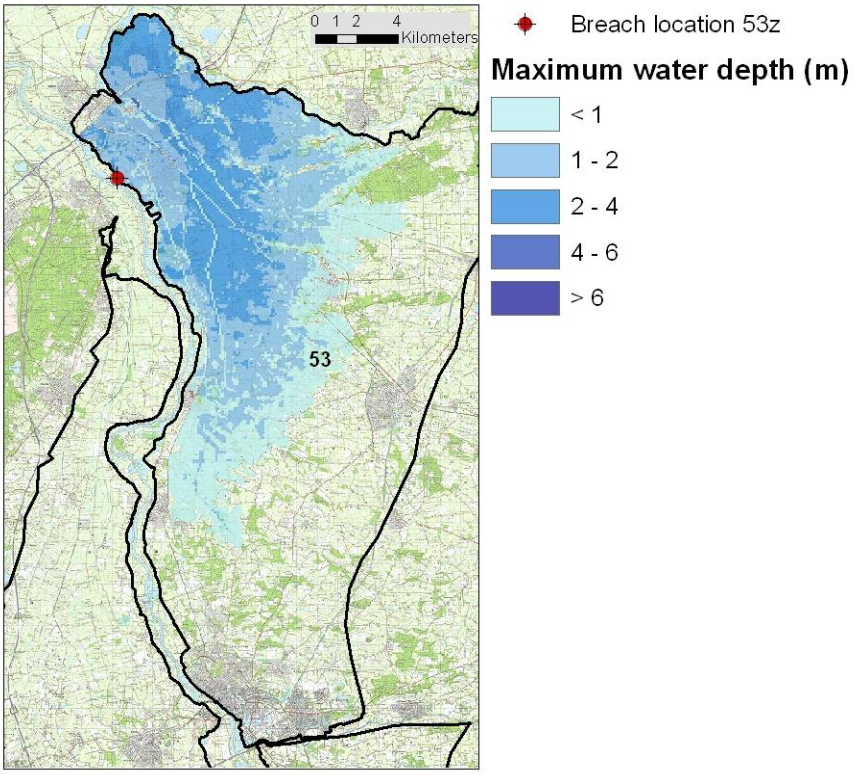
Figuur C.9 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 52j (De Nijenstee) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



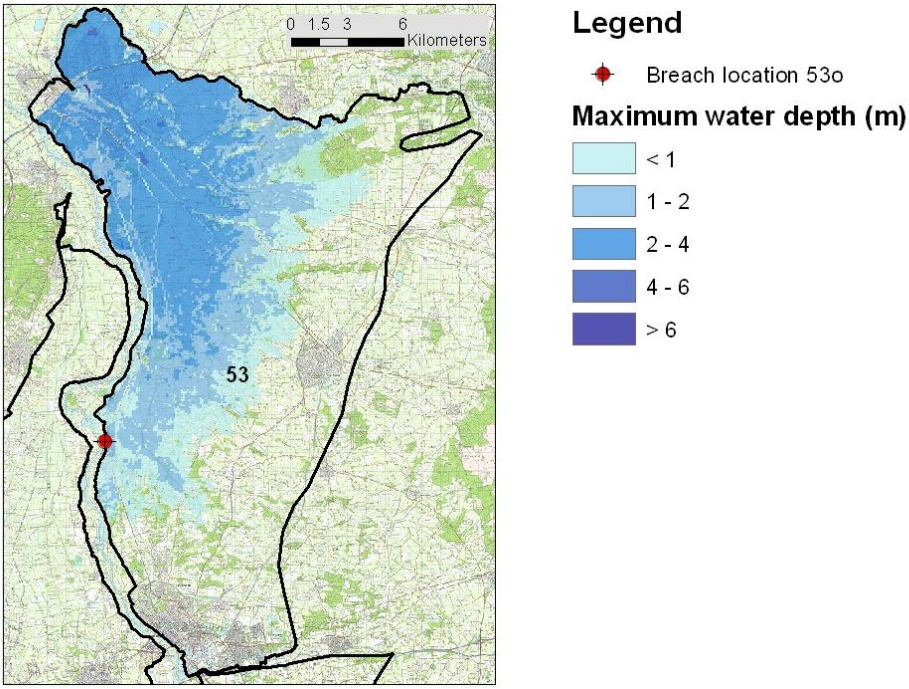
Figuur C.20 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 52p (Hoven Zuid) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



Figuur C.11 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 53d (Deventer) als gevolg van afvoergolf 'ref16'

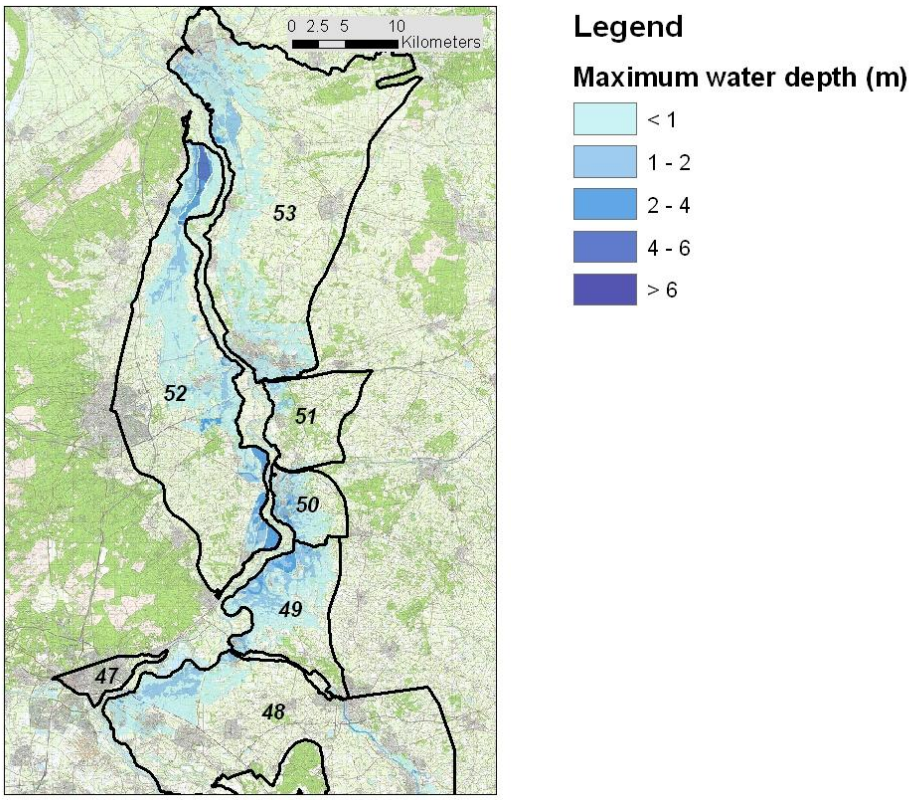


Figuur C.12 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 53z (IJsselcentrale Zwolle) als gevolg van afvoergolf 'ref16'



Figuur C.13 Maximale-waterdieptekaart voor doorbraaklocatie 53o (Olst) als gevolg van afvoergolf 'ref16'

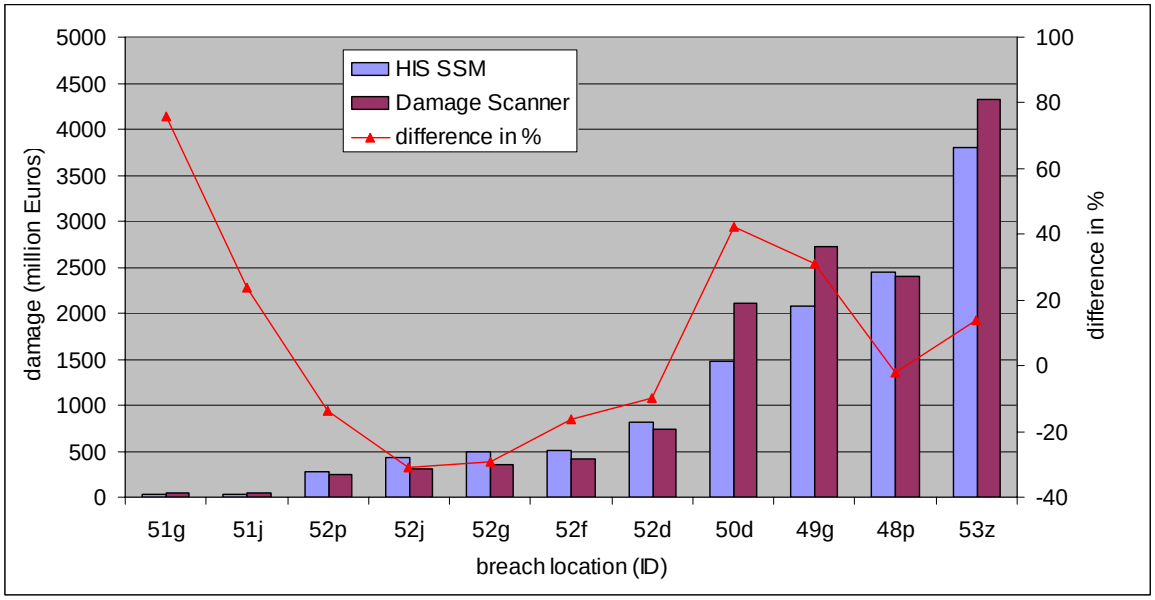
D Overstromingskaart hele gebied (deltadijken)



Figuur D.3 Waterdieptekaart als gevolg van afvoergolf ref17, voor de systeemconfiguratie met deltadijken

E Vergelijking tussen schademodellen

In deze studie is gebruik gemaakt van de DamageScanner, een overstromingsschademodel dat is afgeleid van de standaard schade en slachtoffermodule van het Hoogwater Informatie Systeem (HIS-SSM). Figuur E.14 laat zien wat het absolute en relatieve verschil is in berekende schade tussen de beide modellen. Voor deze vergelijking zijn de waterdieptekaarten van afvoergolf ref14 gebruikt. Het valt op dat het verschil soms negatief en soms positief is. In dijkring 48 en dijkring 52 is de schade volgens DS hoger dan volgens HIS-SSM, terwijl voor de andere dijkringen de schade volgens DS lager is. Er is dus geen systematische afwijking. Het relatieve verschil is voor locatie 51g het grootst. Dit komt omdat de absolute schade heel klein is.



Figuur E.14 Verschil in schade per doorbraaklocatie tussen HIS-SSM en DamageScanner

www.kennisvoorklimaat.nl