

Kennis
voor
Klimaat

Robuustheidsanalyse bedijkte Maas



Copyright © 2013

Nationaal Onderzoeksprogramma 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.

Robuustheidsanalyse bedijkte Maas

Marjolein Mens¹⁾
Janneke IJmker¹⁾

Met medewerking van:
Ralph Schielen²⁾
Nathalie Asselman¹⁾
Frans Klijn¹⁾



⁽¹⁾ Deltares

⁽²⁾ Rijkswaterstaat / Deltaprogramma Rivieren

KvK rapportnummer

KvK 94/2013

Dit onderzoeksproject (projectnummer HSGR3.1; Robuustheidsanalyse Maas) werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoeksprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.



Samenvatting

Om het rivierengebied voor te bereiden op klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen, verkent het Deltaprogramma Rivieren verschillende strategieën met daarbij horende maatregelpakketten. Deze worden beoordeeld op basis van overstromingsrisico's en kosten. Hieruit volgt echter niet hoe goed het gebied met extreme afvoeren kan omgaan. In Kennis voor Klimaat wordt onderzoek gedaan naar robuustheid als aanvullend besliscriterium om met onzekerheden om te gaan. Hiervoor is in een eerder onderzoek een methode ontwikkeld voor robuustheidsanalyse en toegepast op de IJssel. In dit voorliggende onderzoek is de methode verder uitgewerkt en toegepast op de bedijkte Maas.

Dit rapport beschrijft een generieke aanpak om van waterstanden en schades per dijkkring tot een beoordeling van robuustheid te komen. Als voor een gebied bekend is hoe gevolgen van overstromingen samenhangen met de rivierafvoer in de huidige situatie, en hoe waterstanden en dijkhoogtes veranderen als gevolg van een maatregelpakket, kan ook het effect op robuustheid worden bepaald. Deze aanpak is toegepast op de bedijkte Maas, gebruik makend van de resultaten van de Proeve Maas van het Deltaprogramma Rivieren. In de Proeve Maas zijn maatregelpakketten vergeleken op basis van het overstromingsrisico in 2050 en investeringskosten. In dit rapport is naast totale kosten (restrisico+investeringskosten) ook de baten/kosten-verhouding van elk maatregelpakket berekend.

De resultaten laten zien dat op basis van de twee economische criteria geen eenduidig beeld ontstaat van het 'beste' maatregelpakket. Het is niet automatisch zo dat een hoge baten/kosten verhouding leidt tot de laagste totale kosten (optelsom van investeringskosten en restrisico). Met het robuustheidscriterium kan verder onderscheid worden gemaakt tussen maatregelpakketten.

Het differentiëren in kritische waterstanden (door ruimte voor de rivier of dijkverhoging) leidt in de bedijkte Maas tot een hogere proportionaliteit, en dus tot een robuuster systeem waarin bij het overschrijden van de norm de schade beperkt blijft. Doordat de schade proportioneel toeneemt met een vergroting in afvoer, duurt langer voordat de acceptabele schade wordt overschreden. Hierdoor kan het systeem hogere afvoeren aan.

Op dit moment kan de robuustheidsanalyse alleen uitgevoerd worden voor de vooraf gedefinieerde maatregelpakketten. In de toekomst kan de robuustheidsanalyse verder geautomatiseerd worden voor andere maatregelpakketten en andere gebieden. Het uiteindelijke doel is dat een gebruiker zelf een maatregelpakket kan samenstellen (bijvoorbeeld een Ruimte voor de Rivierpakket in combinatie met dijkverhoging) en de robuustheid en het overstromingsrisico hier direct uit volgen.

De webbased tool (www.robustheid.nl) laat de resultaten van de robuustheidanalyse voor de bedijkte Maas zien, en toont de robuustheid naast kosten en het restrisico. De gebruiker kan zelf één van de maatregelpakketten aanklikken en ziet direct het effect. Op 17 april 2013 is de website gedemonstreerd in het inhoudelijk overleg van het Deltaprogramma Rivieren. Het algemene beeld is dat de robuustheidsanalyse nuttige resultaten oplevert die meegenomen zouden moeten worden in het regioproces. Men vindt de website inzichtelijk en gaat er graag zelf mee aan de slag.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding en doelen	9
1.2	Wat is systeemrobustheid	9
2	Aannames en uitgangspunten	11
2.1	Algemeen	11
2.2	Uitgangspunten voor de robuustheidsanalyse	11
2.3	Uitgangspunten voor de risicoanalyse	12
2.4	Uitgangspunten voor kostenschattingen	13
3	Toelichting maatregelpakketten	15
4	Robuustheidsanalyse	17
4.1	Inleiding	17
4.2	Reactiecurve	17
4.3	Robuustheidcriteria	20
5	Berekening van risico's en kosten	21
5.1	Overstromingsrisico	21
5.2	Kosten	23
6	Resultaten	25
6.1	Robuustheid: veerkracht en weerstand	25
6.2	Kosten en baten	26
7	Inzichten	29
8	Literatuurverwijzingen	31



1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doelen

Dit is de technische rapportage bij de webbased tool 'Robuustheidsanalyse Maas' (www.robustheid.nl), die gemaakt is voor het Deltaprogramma Rivieren. Dit rapport beschrijft de rekenmethode die gevolgd is om robuustheid te kwantificeren. De tool visualiseert de resultaten van deze methode.

Het project 'Robuustheidsanalyse Maas' had twee doelen:

1. een generieke aanpak om van kansen/waterstanden/gevolgen op eenvoudige wijze een robuustheidscore te verkrijgen;
2. een instrument gericht op de bestuurder met een aantrekkelijk gevisualiseerde robuustheidscore, geplaatst naast kosten, baten en eventueel andere criteria.

Dit rapport bouwt voort op de inzichten uit het project 'Analyse van systeemrobuustheid: een toepassing op de IJssel' in Kennis voor Klimaat Thema 1 'Climate-proof flood risk management' (Mens, 2012). De resultaten van de IJsselstudie zijn tevens gepresenteerd op het FLOODrisk2012 congres (Mens et al., 2012).

1.2 Wat is systeemrobuustheid

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, 2012)

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 afvoertreden er geen overstromingen op);

- Als de weerstand wordt overschreden, blijft de overstromingsschade beperkt;
- De schade neemt proportioneel toe met een toename in de afvoer;
- Het systeem kan zich eenvoudig/snel herstellen na een overstroming.

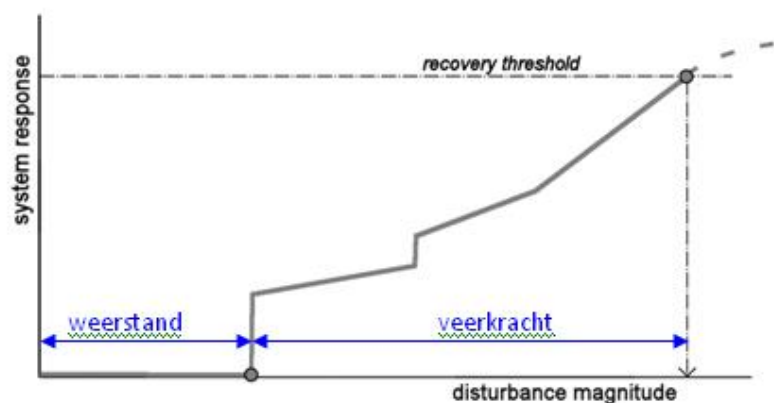
In dit onderzoek is de robuustheidsanalyse vereenvoudigd tot een score op weerstand en veerkracht, beide uitgedrukt in termen van rivierafvoer (zie Figuur 1). Hiermee volgen we Kwadijk et al. (2006), die robuustheid hebben gedefinieerd als een functie van weerstand en veerkracht, waarbij:

Weerstand = het vermogen om een externe druk/ stress te weerstaan zonder te reageren, en

Veerkracht = het vermogen om te reageren op externe druk en weer snel te herstellen na het wegvallen van de druk.

In dit rapport wordt robuustheid uitgedrukt als de som van deze twee eigenschappen:

$$\text{Robuustheid} = \text{Weerstand} + \text{Veerkracht}$$



Figuur 1 Theoretische reactiecurve: overstromingsschade ('system response') als functie van de rivierafvoer ('disturbance magnitude'), met aanduiding van weerstand en veerkracht



2 Aannames en uitgangspunten

2.1 Algemeen

We hebben zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de analyses ten behoeve van de Proeve Maas (Asselman et al., concept), waarin de overstromingsrisico's zijn berekend voor verschillende alternatieven die zijn voorgesteld in het Deltaprogramma. Dit betekent ook dat we uitgaan van de aanwezigheid van hoge kades in de onbedijkte Maas, waardoor pas bij een hogere afvoer overstromingen zullen optreden in het Maasdal. De reden is dat ook bij lage kades zandzakken zullen worden geplaatst en dit in de praktijk neerkomt op hoge kades. De huidige maatgevende afvoer is $3800 \text{ m}^3/\text{s}$, hoewel berekeningen met GRADE laten zien dat dit mogelijk iets lager ligt (Bruggeman et al., 2011). Wij gaan uit van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$, omdat daarmee gerekend is in de waterstandsmodellen en dit de correcte QH-relatie geeft.

Niet alle dijkkringdelen van de Proeve Maas zijn meegenomen, ofwel omdat ze heel klein zijn, ofwel omdat ze niet grenzen aan de Maas (zie tabel). Dit kan kleine verschillen in risico veroorzaken tussen deze studie en de Proeve Maas.

Tabel 1 Overzicht van dijkkringdelen: doorgestreept betekent dat ze wel in Proeve Maas zitten, maar niet in deze studie zijn meegenomen

24-1 Land van Altena
35-1 Donge
36-1 Land v. Heusden/de Maaskant
36a-1 Keent
37-1 Nederhemert
38-1 Bommelerwaard (Rijn)
38-2 Bommelerwaard (Maas)
39-1 Alem
40-1 Heerewaarden (Maas)
40-2 Heerewaarden (Rijn)
41-1 Land v. Maas en Waal (Rijn)
<u>41-2 Land v. Maas en Waal (Maas)</u>

2.2 Uitgangspunten voor de robuustheidsanalyse

Voor de robuustheidsanalyse hebben we de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- We nemen een lineair verband aan tussen schade bij toetspeil en schade bij toetspeil + decimeringshoogte. Tusseliggende schades zijn geïn-terpoleerd. De waterstanden zijn vervangen door bijbehorende afvoer

ren. Dit geeft het benodigde verband tussen afvoer en schade per breslocatie.

- Breslocaties binnen een dijkkringdeel die niet aan de Maas grenzen, zijn niet meegenomen in de robuustheidsanalyse, omdat deze niet terugvertaald kunnen worden naar een waterstand en schade bij een bepaalde Maasafvoer. Het gaat om de breslocaties Woudrichem en Werkendam (24-1).
- De hoogste afvoer die we in beschouwing nemen is $4600 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze afvoer is de verwachte toekomstige maatgevende afvoer volgens het KNMI W+ scenario in 2100 (Bruggeman et al., 2011). Bovendien wordt aangenomen dat een hogere afvoer tot overstromingen zal leiden langs de Belgische Maas, waardoor de afvoergolven afgetopt worden. Hoewel onderzoek nog moet uitwijzen wat precies het effect is van die overstromingen, wordt in beleidsstudies uitgegaan van een fysisch afvoermaximum van $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Borgharen (Silva en Van Velzen, 2008).

Toelichting bij Deltadijken: voor de schade bij overloop is uitgegaan van 10% van de schade bij een bres. De schade neemt lineair toe van 0 bij $Q=3800 \text{ m}^3/\text{s}$ naar 10% van de referentieschade bij $Q = 4600 \text{ m}^3/\text{s}$. We merken op dat dit een zeer grove aanname is, maar dat op dit moment goede analyses missen om deze aanname te onderbouwen. Om dit goed te berekenen zijn 1D/2D overstromingsberekeningen nodig.

Een Deltadijk kan ook bezwijken bij een extreem hoge afvoer, maar we verwachten niet dat afvoeren hoger dan $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ voorkomen in de Maas. In de Proeve Maas is wel rekening gehouden met een kans op bezwijken. Deze kans is 100 keer kleiner aangenomen dan de huidige overstromingskansen.

2.3 Uitgangspunten voor de risicoanalyse

Bij de meeste maatregelpakketten zijn het overstromingsrisico en de kosten overgenomen uit de Proeve Maas. Voor drie maatregelenpakketten waren de risico's of de kosten nog niet berekend, namelijk RvdR1+, Norm4000 en Norm4000diff (zie uitleg maatregelpakketten verderop).

Bij het bepalen van het overstromingsrisico in 2050 zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Methode komt overeen met methode Proeve Maas
- De overstromingskansen uit WV21 gelden als referentiesituatie (2^e referentie)
- In alle situaties wordt uitgegaan van hoge Maaskades voor jaartal 2050



2.4 Uitgangspunten voor kostenschattingen

De kosten zijn bepaald met behulp van het KOSWAT-instrumentarium (De Grave en Baarse, 2011).



3 Toelichting maatregelpakketten

Hier worden de maatregelpakketten beschreven waarvoor de robuustheid is berekend. De meeste pakketten zijn overgenomen uit de Proeve Maas, met uitzondering van RvdR1+.

RvdR1, RvdR2 en RvdR3: Ruimte voor de Rivierpakketten

Dit zijn drie verschillende Ruimte voor de Rivierpakketten, die voor Proeve Maas zijn samengesteld door de regio. De waterstandsdalingen zijn direct overgenomen uit Proeve Maas. Zie Tabel 2 voor een overzicht van de maatregelen.

RvdR1+: Ruimte voor de Rivierpakket 1 plus dijkversterkingen

RvdR1 gecombineerd met dijkversterkingen waar nodig. Het W+ klimaatscenario voor 2050 bij hoge kades levert een waterstandstijging en dus een toename van de overstromingskans. Deze toename wordt (deels) gecompenseerd door Ruimte voor de Rivierpakket 1. Na toepassen van dit pakket worden de dijken opgehoogd, zodanig dat de oorspronkelijke overstromingskans volgens WV21 (2e referentie) weer wordt bereikt. De kosten zijn hoger dan RvdR1, vanwege de additionele dijkversterkingen.

Huidig beleid: Huidig beleid voortzetten

In Proeve Maas houdt deze maatregel in dat dijken worden verhoogd zodanig dat in 2050 de overstromingskans gelijk is aan de huidige kans, volgens de 2^e referentie in WV21. Dit betekent een overstromingskans van 1/250 tot 1/500 per jaar. We hebben dit vertaald naar een maatgevende afvoer van 4200 m³/s in 2050. De dijken worden dus verhoogd, zodat deze afvoer niet tot overloop/overslag leidt. Echter, er is hier nog geen rekening gehouden met nieuwe pipinginzichten. Dit houdt in dat de dijken nog steeds kunnen bezwijken bij een lagere afvoer. De bijbehorende kritische waterstand is gelijkgesteld aan de kritische waterstand in de referentie plus de mate van dijkverhoging.

Norm4000: Normverhoging naar 1/4000 per jaar in 2050

In dit alternatief worden de dijken versterkt tot een toekomstige overstromingskans van 1/4000 jaar. Terugvertaald naar nu betekent dit een dijkverhoging tot een afvoer van 4400 m³/s met een huidige herhalingstijd van ongeveer 7500 jaar. In dit geval zijn er wel pipingbermen aangelegd. Vanuit deze herhalingstijd en afvoer berekenen we de benodigde dijkverhoging. De QH-relaties blijven hetzelfde.

Norm4000diff: Differentiatie in de 1/4000 norm in 2050

Zoals het vorige alternatief, maar dan alleen dijken verhogen op plekken waar de schade groot is. Dit werd in Proeve Maas per bres bepaald.

Deltadijken

Er wordt overal een deltadijk aangelegd volgens het principe: de kans op een overstroming als gevolg van een doorbraak wordt verkleind met een factor 100. De kans op schade als gevolg van overloop is groter, maar de optredende schade is kleiner dan bij een doorbraak.

Tabel 2 Overzicht van Ruimte voor de Rivierpakketten 1, 2 en 3 in Proeve Maas (Asselman et al., concept)

	Maatregelenpakket 1	Maatregelenpakket 2	Maatregelenpakket 3
Venloslenk	Hoogwatergeul Meerkampen (N19)		Zomerbedverbreding (ZBV+_T5 en ZBV+_T6)
			Zomerbedverdieping (zuid) (ZDPb_T5)
Benedenmaas	Weerdverlaging (WV+_T7)	Zomerbedverbreding (ZBV+_T7)	Nevengeul Keent- Loonse Waard (N20)
	Knelpunt spoorbrug Ravenstein (K5+)	Retentie Kraaijenbergse Plassen (R22)	Nevengeul Batenburg (N21)
			Nevengeul Diedense Uiterdijk (N22)
			Nevengeul Gouden Ham (N23+)
			Nevengeul Hemelrijkse Waard (N24)
			Dijkverlegging Kraaijenbergse Plas (D4+)
			Dijkverlegging Overasselt (D11)
			Retentie ZO Wijchen (R24+)
			Retentie bij Keent (R26)
Getijdenmaas	Zomerbedverbreding (ZBV+_T8)	Dijkverlegging Moordhuizen (D7+)	
	Weerverlaging (WV+_T8)	Dijkverlegging Alem (D8+, D13)	
	Hoogwatergeul Lithse Ham (N27)	Dijkverlegging Bokhoven-Hedikhuizen (D10)	
	Hoogwatergeul Over de Maas (N26)		
	Knelpunt A2 en spoorbrug Hedel (K8)		
	Nevengeul Alem (G20)		



4 Robuustheidsanalyse

4.1 Inleiding

Bij een robuustheidsanalyse van een rivierengebied draait het om inzicht in de gevolgen van hoge afvoeren. Een reactiecurve geeft het verband tussen afvoer en economische schade en geeft zo een beeld van de gevoeligheid van de schade voor variatie in de afvoer. Bij lage afvoeren zal de schade nihil zijn, terwijl hoge afvoeren leiden tot overstromingen en dus economische schade. We berekenen hier enkel economische schade, maar een robuustheidsanalyse met slachtoffers en getroffen en is ook mogelijk.

De reactiecurve geeft dus een beeld van de overstromingsgevolgen als functie van de rivierafvoer. Uit deze curve kunnen vervolgens robuustheidsindicatoren worden afgeleid: weerstand, proportionaliteit en beheersbaarheid. Weerstand geeft aan vanaf welke afvoer overstromingen verwacht kunnen worden. Proportionaliteit is een maat voor de geleidelijkheid van de schadetoename ten opzichte van een toename in de afvoer. Over het algemeen geldt: hoe groter de proportionaliteit, hoe groter het afvoerbereik waarbinnen een gebied nog kan blijven functioneren. De beheersbaarheid, ten slotte, zegt iets over hoe eenvoudig het gebied weer kan herstellen van een overstroming. In dit rapport is de robuustheidsanalyse teruggebracht naar een score op weerstand en een score op veerkracht (zie 4.3).

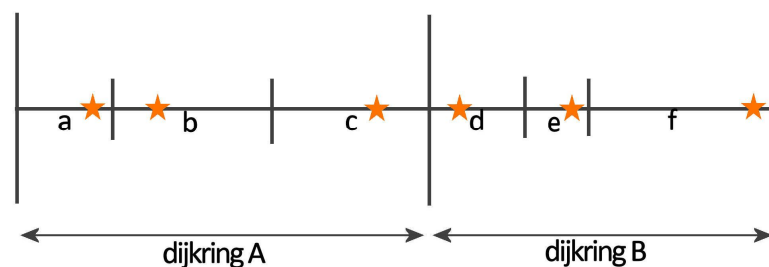
4.2 Reactiecurve

Deze paragraaf beschrijft de stappen in de berekening van de reactiecurve. Uitgangspunt is de relatie tussen afvoer en waterstand (Q/H-relatie) per doorbraaklocatie, de relatie tussen waterstand en schade (H/S-relatie) en de dijkhoogte. De Q/H-relaties van de referentie en de alternatieven zijn afgeleid uit Proeve Maas evenals de H/S-relatie. De waterstanden die horen bij een afvoer van $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn gelijkgesteld aan de maatgevende waterstanden van Proeve Maas in klimaatscenario 'W+ 2050'. De waterstanden die horen bij een afvoer van $4600 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn gelijkgesteld aan de maatgevende waterstanden van Proeve Maas in klimaatscenario 'W+ 2100'. De dijkhoogte in de referentie is gelijkgesteld aan de waterstand bij de huidige maatgevende afvoer van $3800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zoals gezegd gaan we uit van de overstromingskansen conform de 2^e referentie van WV21. Dit houdt in dat de overstromingskansen groter zijn dan de overschrijdingskansen, omdat er rekening wordt gehouden met dijkfalen door andere mechanismen dan overloop. Vanwege het faalmechanisme 'piping' kunnen dijken in de huidige situatie al bezwijken voordat de maatgevende afvoer

wordt bereikt. In de huidige situatie en bij sommige maatregelpakketten gaan we er vanuit dat piping nog **niet** is opgelost (Tabel 4). In de Proeve Maas is dit doorvertaald in de overstromingskans en in de kosten. Als pipingbermen zijn aangelegd wordt de overstromingskans kleiner en gaan de kosten omhoog. Voor de reactiecurve betekent de mogelijkheid van piping dat de weerstand lager is dan de maatgevende afvoer. In de referentie hebben de meeste dijktringen een overstromingskans van 1/250 per jaar. De afvoer met een overschrijdingskans van 1/250 per jaar is als maat genomen voor de weerstand in de referentie: 3300 m³/s. Dit is dus 500 m³/s lager dan de maatgevende afvoer in de referentie.

We spreken hier van breslocaties, dijktringen en dijk lengtes. Deze termen worden toegelicht in **Figuur 2**. Uiteindelijk zijn we op zoek naar één schadegetal voor het hele studiegebied, maar de schadegetallen die beschikbaar zijn gelden per doorbraaklocatie, met meerdere doorbraaklocaties per dijkkring. De procedure is als volgt. Eerst wordt (bij een gegeven afvoer) de verwachte schade berekend per dijkkring, met wegingsfactoren op basis van de dijk lengte. Daarna wordt bepaald welke combinaties van dijkkringoverstromingen mogelijk zijn. Dit geeft een beeld van de variatie in totale overstromingsschade in het hele studiegebied. Met een statistische aanpak wordt vervolgens berekend wat de mediaan is van de totale overstromingsschade. Mediaan betekent dat 50% van de schades hoger en 50% van de schades lager is dan deze waarde. Er is hierbij geen rekening gehouden met positieve systeemwerking (in de zin van 'ontlasting'). Wel is er een maximum van 4 gesteld aan het aantal dijktringen dat tegelijk kan overstromen. Het schadegetal is dus aan de hoge kant, maar omdat dit bij alle alternatieve systeemconfiguraties het geval is, maakt het voor de onderlinge vergelijking niet uit.



Figuur 2 Voorbeeld schematisatie dijktringen in dijkkringtrajecten (a,b,c) en bijbehorende representatieve doorbraaklocaties, zie ook Tabel 3.



Tabel 3 Fictieve lengte, weging en schadeberekening bij Figuur 2

Dijkring	Dijkring-traject	Lengte (m)	Weging (%)	Schade per breslocatie (euro)	Schade per dijkring (euro)
A	a	15	0.15	50	7.5+13.5+40 = 61
	b	45	0.45	30	
	c	40	0.4	100	
B	d	16	0.2	50	10+3+70 = 83
	e	8	0.1	30	
	f	56	0.7	100	

Stappen in de berekening, per afvoergolf:

1. Op basis van de Q/H relatie wordt voor verschillende afvoeren bekeken bij welke afvoer de waterstand hoger wordt dan de kritische waterstand. De kritische waterstand is de waterstand waarbij dijken kunnen bezwijken. Deze is gelijk aan het toetspeil als alleen overloop een rol speelt, maar zolang nog geen pipingbermen zijn aangelegd is de kritische waterstand gelijkgesteld aan een waterstand met overschrijdingskans = 1/250 per jaar;
2. Bij een reeks waterstanden wordt de bijbehorende schade gezocht, op basis van de H/S-relatie. Als de waterstand ergens lager is dan de kritische waterstand, is er geen overstroming en is er dus geen schade.
3. Per dijkring wordt een gewogen schade bepaald, op basis van de lengte van de dijkringtrajecten die bij de betreffende doorbraaklocaties horen;
4. Voor het hele gebied worden alle mogelijke combinaties van schade berekend en daarvan de mediaan bepaald. Om toch een beetje met 'ontlasting' rekening te houden, stellen we een maximum van 4 dijkringen die gelijktijdig (d.w.z. bij dezelfde afvoergolf) kunnen onderlopen.

Bij sommige Ruimte voor de Rivierpakketten wordt impliciet de dijkhoogte gedifferentieerd. Met andere woorden: de waterstand gaat op sommige locaties omlaag en op andere locaties niet. Daar waar de waterstand niet beïnvloed wordt, kan dus bij de huidige maatgevende afvoer nog steeds een overstroming plaatsvinden. Het aantal mogelijke combinaties is wel kleiner dan in de referentiesituatie. Zodoende zal de mediaan van de schade bij deze betreffende afvoer kleiner zijn, terwijl de weerstand gelijk blijft.

NB. Bij dijkring 24 (Land van Altena) en 35 (Dongen) wordt de waterstand in werkelijkheid mede bepaald door de zeewaterstand. Omdat we het toetspeil hebben gekoppeld aan een rivierafvoer, houden we geen rekening met de mogelijkheid dat het toetspeil ook bereikt kan worden door een andere combinatie van rivierafvoer en zeewaterstand. In werkelijkheid is de weerstand (=bij welke afvoer overstromingen plaatsvinden) dus mede afhankelijk van de zee-

waterstand. In deze studie hebben we de zeewaterstand constant verondersteld.

Tabel 4 Bij welke maatregelpakketten is een pipingberm aangelegd?

ID	Maatregelpakket	Pipingberm?
Ref	Referentie	nee
RvdR1	Ruimte voor de Rivier - pakket 1	nee
RvdR2	Ruimte voor de Rivier - pakket 2	nee
RvdR3	Ruimte voor de Rivier - pakket 3	nee
RvdR1+	Ruimte voor de Rivier - pakket 1 + dijkverhoging	nee
Norm1250	Dijken verhogen om aan huidige norm te blijven voldoen	nee
Norm4000	Dijken verhogen om aan strengere norm te voldoen	ja
Norm4000diff	Sommige dijken verhogen om aan strengere norm te voldoen	ja
Delta	Deltadijken	ja

4.3 Robuustheidcriteria

Weerstand

Weerstand is de hoogste afvoer waarbij nog net geen overstromingen plaatsvinden. Deze wordt uitgedrukt m^3/s .

Veerkracht en acceptabele schade

Veerkracht geeft aan of een gebied na het overschrijden van de weerstand nog makkelijk/snel kan herstellen van de gevolgen van de overstroming. Je kunt hierbij kijken naar steilheid en abruptheid van de reactiecurve (proportionaliteit) en naar de beheersbaarheid. De beheersbaarheid geeft aan hoe erg de overstroming zal zijn: van wateroverlast via overstroming naar ramp.

In deze toepassing vergelijken we de berekende schade uit de reactiecurve met een kritische grenswaarde. De grenswaarde van acceptabele schade geeft aan bij welke schade het gebied nog binnen afzienbare tijd kan herstellen (bijvoorbeeld binnen 1 jaar). Deze waarde is te kiezen door de gebruiker. Als richtlijn ('default') gebruiken we 3,6 Miljard euro. Toelichting: herverzekeraar Munich Re noemt een overstroming catastrofaal als (onder andere) de schade groter is dan 50.000 maal het bbp per hoofd van de bevolking. Het Bruto Binnenlands Product van Nederland in 2010 wordt geschat op €35.616,- (statline.cbs.nl: geraadpleegd op 25-02-2013). Deze richtlijn is dus 1,8 Miljard euro. Dit gaat echter uit van enkel materiële schade aan gebouwen en niet schade aan infrastructuur of andere landgebruikstypes, en ook niet indirecte schade. Deze schade-soorten zijn in de berekende overstromingsschade van de Maas wel meegenomen. Daarom is de drempelwaarde verhoogd met een factor 2.



5 Berekening van risico's en kosten

5.1 Overstromingsrisico

Het overstromingsrisico is opgebouwd uit:

- economisch risico
- gemonetariseerd slachtofferrisico
- gemonetariseerd getroffenrisico

De berekening van economisch risico verloopt via het volgende stappenplan:

1. Bepalen van de verandering in waterstand

- Voor HK2050 (HK = hoge kades langs de onbedijkte Maas): afkomstig uit Proeve Maas. Was gegeven voor 2100 en voor de 2050-situatie is geïnterpoleerd tussen nu en 2100;
- Voor het effect van Ruimte voor de Rivierpakketten is gebruik gemaakt van de Blokkendoos voor de Integrale Verkenningen Maas (zie Deltaportaal voor een recentere versie hiervan).

2. Berekenen hoeveel effect de waterstand heeft op de overstromingskansen.

Hiervoor wordt de waterstandstijging vergeleken met de decimeringshoogte. Een stijging van 1x de decimeringshoogte, levert een 10x zo grote kans op een overstroming. Aangenomen wordt dat deze relatie gelijk blijft, ook als de waterstandstijging een veelvoud van de decimeringshoogte bedraagt. Als de waterstandsverandering dus twee maal de decimeringshoogte bedraagt, dan wordt de kans op overstroming 10^2 is 100x zo groot.

$$\frac{P_{oud}}{P_{nieuw}} = e^{\Delta h \cdot \frac{\ln(10)}{\Delta h_{10}}}$$

Waarin P_{oud} =overstromingskansen referentie, P_{nieuw} =overstromingskansen na klimaatverandering of Ruimte voor de Rivierpakket, Δh = waterstandsverandering, en Δh_{10} =decimeringshoogte

3. Bereken het effect van de hogere waterstand op de gevolgen van een overstroming. Hiervoor is gekeken naar de gevolgen bij toetspeil en die bij toetspeil plus decimeringshoogte. Hieruit is een factor (a) afgeleid

om de verandering in gevolgen van een overstroming te relateren aan een verandering in de waterstand. Bijvoorbeeld: een 10 keer kleinere kans (behorend bij een bepaalde decimeringshoogte) levert een toename van de schade van 20%. Als de waterstandsverandering bekend is, wordt gekeken hoe dit in verhouding staat tot de decimeringshoogte. De verandering van het effect van de overstroming wordt bepaald met de formule:

$$\Delta \text{schade} = \frac{\Delta h}{\Delta h_{10}} \cdot a$$

Waarin: Δh = waterstandsverandering, Δh_{10} decimeringshoogte en a = de schadeverandering bij een 10 keer kleinere kans.

Voorbeeld schadeberekening: bij een waterstandsverandering van 20 cm, een decimeringshoogte van 40 cm, en $a=40\%$, is de schade bij de nieuwe waterstand toegenomen met $(20/40 \cdot 40 =)$ 20%.

4. Met behulp van de nieuw berekende kansen en gevolgen, worden nieuwe risico's berekend, per dijkkring.
5. De risico's per dijkkring worden vervolgens gewogen bij elkaar opgeteld. 'Gewogen', omdat er ook rekening wordt gehouden met een worstcase (zie Asselman et al., concept).

De berekening van slachtofferisico en getroffenrisico gebeurt op dezelfde manier.

De laatste stap in de risicoanalyse is het combineren van de drie soorten risico's in één risicogetal, door slachtofferisico en getroffenrisico te monetariseren, het toevoegen van een aantal correctiefactoren en het omrekenen van het risico naar 2050. Dit heeft te maken met, enerzijds, het corrigeren van de getallen van referentiejaar 2000 naar referentiejaar 2015, en anderzijds het toevoegen van de verwachte economische groei en bevolkingsgroei tussen 2015 en 2050. Hieronder staat de gebruikte formule. Voor verdere uitleg wordt verwezen naar de Proeve Maas.

$$R_{\text{tot}}(2050) = \sum_{i=1:N} \left((ER_i \cdot a \cdot b \cdot \alpha^{\Delta t} \cdot \beta^{\Delta t}) + (SR_i \cdot c \cdot v_s \cdot \alpha^{\Delta t} \cdot \beta^{\Delta t}) + (GR_i \cdot c \cdot v_g \cdot \alpha^{\Delta t} \cdot \beta^{\Delta t}) \right)$$

Waarin:

$$R_{\text{tot}}(2050) = \text{Totale gemonetariseerde risico in 2050}$$



R_e	=	Economisch risico (referentiejaar 2000)
R_s	=	Slachtofferisico (referentiejaar 2000)
R_g	=	Getroffenenrisico (referentiejaar 2000)
N	=	aantal dijkringen

Correctiefactoren:

a	=	factor voor onvolledig schademodel en risicoaversie (=1,6)
b	=	correctie prijspeil 2000→ 2011 (=1,4)
c	=	correctie aantal inwoners vanwege bevolkingsgroei tussen 2000 en 2011 (=1,05)

Bevolkingsgroei en economische groei:

α	=	factor voor bevolkingsgroei per jaar (=1,002)
β	=	factor voor groei in BBP/hoofd per jaar (=1,01697)
Δt	=	2050-2011

Monetariseren slachtoffers en getroffen:

v_s	=	waarde van een slachtoffer (= 6,7 miljoen euro)
v_g	=	waarde van een getroffene (= 12500 euro)

5.2 Kosten

De berekening van kosten voor dijkverhogingen gebeurt als volgt. De stijging van de waterstand creëert een opgave voor dijkverhoging. Dijkverhoging bestaat uit twee componenten: 1) compensatie voor de gestegen waterstand en 2) extra ophogen voor het verkleinen van de overstromingskans. De benodigde dijkverhoging is berekend door het waterstandsverschil te berekenen van referentiesituatie tussen huidige maatgevende afvoer en gewenste maatgevende afvoer (bv 4200 m³/s). Indien gecombineerd wordt met een van de RvdR-pakket wordt de berekende dijkverhoging gecorrigeerd met de behaalde waterstandsval op die locatie. Met behulp van gegevens uit KOSWAT (De Grave en Baarse, 2011) kan voor ieder dijkvak berekend worden welke kosten er verbonden zijn aan het ophogen van de dijk.



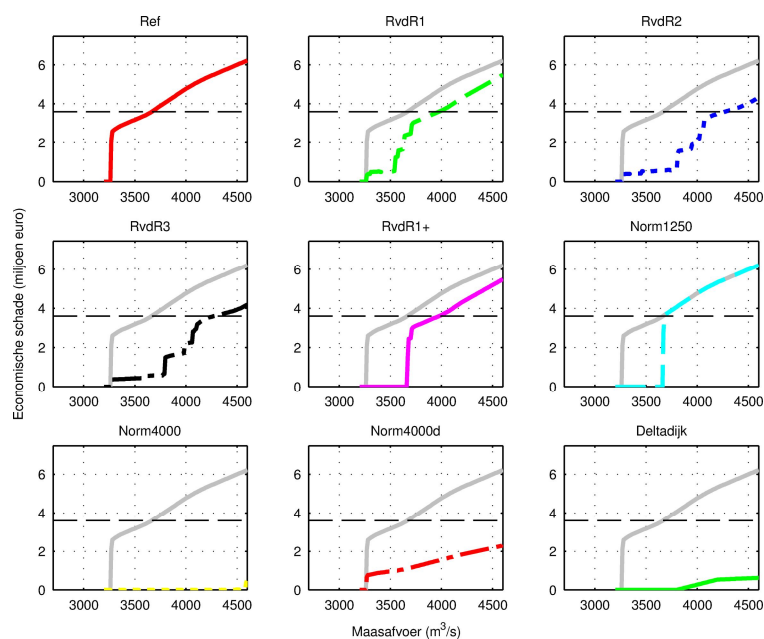
6 Resultaten

6.1 Robuustheid: veerkracht en weerstand

Figuur 3 toont de reactiecurve voor de referentie en de alternatieven, en de drempelwaarde (acceptabele schade) van 3,6 Miljard euro. Hieruit kunnen nu de robuustheidcriteria worden afgeleid (Tabel 5). De robuustheid wordt in alle pakketten groter, maar de verhouding tussen weerstand en veerkracht is verschillend. De pakketten RvdR1+, Norm1250 en Norm4000 verhogen de weerstand, terwijl bij RvdR1, RvdR2, RvdR3 en Norm4000d de robuustheid vooral vergroot wordt door verhoging van de veerkracht.

25

In de pakketten met alleen RvdR is niet overal de waterstand gedaald, waardoor er nog steeds overstromingen kunnen plaatsvinden bij maatgevende afvoer. Dit komt omdat Ruimte voor de Rivier alleen effect heeft op het riviergedomineerde deel van de bedijkte Maas, en dus niet langs de dijkringen 24 en 35 (zeegedomineerd).



Figuur 3 Reactiecurve voor referentie en maatregelpakketten

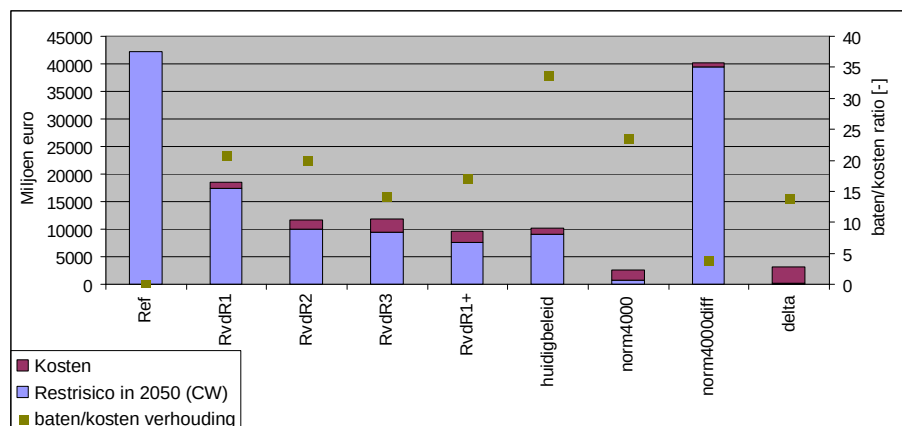
Tabel 5 Weerstand en veerkracht per maatregelpakket

ID	Maatregelpakket	Weerstand (W) [m3/s]	Veerkracht (V) [m3/s]	Robuustheid (=V+W) [m3/s]
Ref	Referentie	3300	0	3300
RvdR1	Ruimte voor de Rivier - pakket 1	3300	700	4000
RvdR2	Ruimte voor de Rivier - pakket 2	3300	1000	4300
RvdR3	Ruimte voor de Rivier - pakket 3	3300	1000	4300
RvdR1+	Ruimte voor de Rivier - pakket 1 + dijkverhoging	3700	300	4000
Norm1250	Dijken verhogen om aan huidige norm te blijven voldoen	3700	0	3700
Norm4000	Dijken verhogen om aan strengere norm te voldoen	4500	100	4600
Norm4000diff	Sommige dijken verhogen om aan strengere norm te voldoen	3300	1300	4600
Delta	Deltadijken	3800	800	4600

6.2 Kosten en baten

Figuur 4 toont een vergelijking van de maatregelpakketten op basis van twee economische beslisriteria: het restrisico plus de investeringskosten in contante waarde (totale kosten), en de baten/kosten verhouding (B/C). De baat is de risicoreductie ten opzichte van de referentie. Als B/C groter is dan 1, kan het economisch gezien uit. Dit is het geval bij alle maatregelpakketten. Handhaven van het huidige beleid scoort het best met B/C = 34. Op basis van totale kosten scoren Norm4000 en Delta het beste. Echter, omdat de investeringskosten van deze maatregelen groot zijn, ligt hun baten/kosten verhouding lager dan die van huidig beleid. Op baten/kosten verhouding scoort Norm4000diff het laagst (weinig risicoreductie) en huidig beleid continueren het hoogst. Tabel 6 toont de rangorde op basis van de twee economische beslisriteria.

Als men kijkt naar de totale kosten, dan scoren RvdR2, RvdR3, RvdR1+ en huidig beleid vergelijkbaar. Mocht de voorkeur uitgaan naar een van deze pakketten, dan kan de robuustheidsanalyse helpen bij een verdere onderlinge vergelijking. Op robuustheid scoren Norm4000, Norm4000diff en Deltadijken het hoogst. Hoewel de baten/kosten verhouding van Norm4000diff het laagst is, is het wel de goedkoopste manier om de robuustheid te vergroten.



Figuur 4 Optelsom van restrisico en investeringskosten per maatregel (contante waarde, linkerass), en baten/kosten verhouding (rechterass)



Tabel 6 Rangorde van de maatregelpakketten op basis van (1) restrisico+kosten en (2) baten/kosten verhouding

naam	1 restrisico+kosten (miljoen euro)	2 B/C ratio (-)	rangorde (1)	rangorde (2)
Ref	42160	0	9	9
RvdR1	18600	21	7	3
RvdR2	11623	20	5	5
RvdR3	11847	14	6	6
RvdR1+	9377	20	3	4
Huidigbeleid	10128	34	4	1
Norm4000	2290	27	1	2
Norm4000diff	40187	4	8	8
Deltadijken	3222	14	2	7



7 Inzichten

→ We hebben laten zien dat zelfs op basis van economische criteria niet een eenduidig beeld ontstaat van het 'beste' maatregelpakket. Het is niet automatisch zo dat een hoge baten/kosten verhouding leidt tot de laagste totale kosten (optelsom van investeringskosten en restrisico).

→ Een hoge proportionaliteit zorgt ervoor dat de overstromingsschade beperkt blijft bij overschrijden van de maatgevende afvoer. Hierdoor wordt de range aan afvoeren waarbij het systeem kan blijven functioneren groter.

→ Met robuustheid wordt verder onderscheid gemaakt tussen maatregelpakketten die vergelijkbaar scoren op de economische criteria.

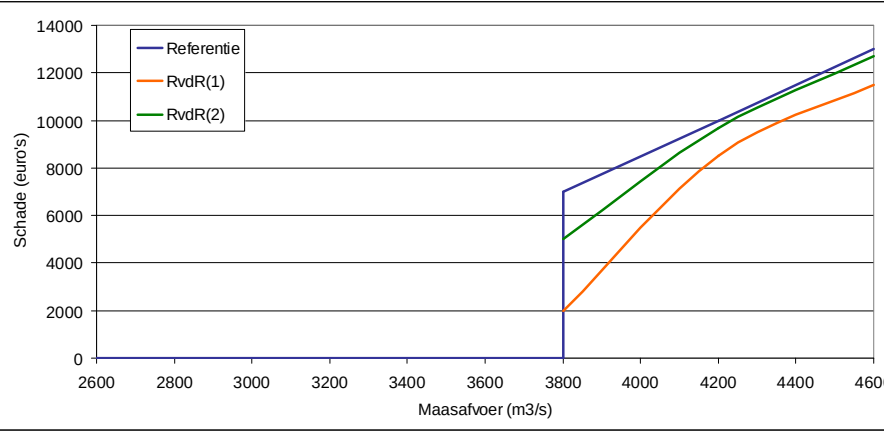
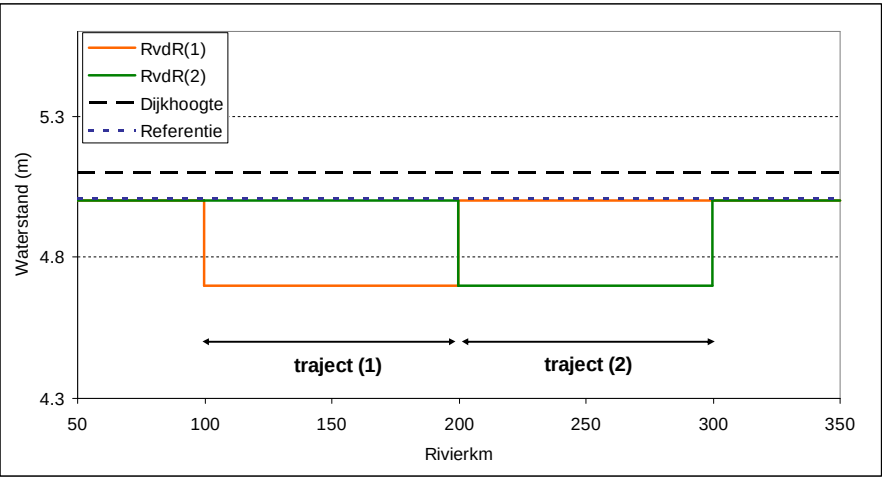
→ De voorgestelde Ruimte voor de Rivierpakketten, zonder extra dijkversterkingen, hebben een positieve invloed op de robuustheid. Dit komt omdat de waterstand niet overal evenveel wordt verlaagd, waardoor het beschermingsniveau niet overal meer gelijk is. De weerstand verandert niet, omdat bij huidige maatgevende afvoer nog steeds overstromingen kunnen plaatsvinden, maar de veerkracht wordt wel groter. Met andere woorden: het duurt langer voordat de acceptabele schade wordt overschreden; het systeem kan hogere afvoeren aan.

→ Het differentiëren in kritische waterstanden (door ruimte voor de rivier of dijkverhoging) leidt altijd tot een hogere proportionaliteit, en dus tot een robuuster systeem waarin bij het overschrijden van de norm de schade beperkt blijft.

→ Met een grote daling van de waterstand op een plek met weinig economische waarde achter de dijk beperk je het risico maar beperkt. Waterstands daling zegt dus niet alles: 20 cm op plek A is wellicht waardevoller in termen van schade en risico dan 20 cm op plek B. Met een reactiecurve wordt dit verschil in effect direct duidelijk. Zie voorbeeld in de tekstbox hieronder.

Tekstbox: fictief voorbeeld van effect ruimte voor de rivier op de schade en de reactiecurve

	traject (1)			traject(2)			Schade (euro)	Tot schade (euro)
	Q (m3/s)	H (m)	Hdijk (m)	Schade (el H (m)	Hdijk (m)	Schade (euro)		
referentie	3800	5	5.1	5000	5	5	2000	7000
	4200	5.5	5.1	7500	5.5	5	2500	10000
	4600	6	5.1	10000	6	5	3000	13000
RvdR(1)	3800	4.7	5.1	0	5	5	2000	2000
	4200	5.2	5.1	6000	5.5	5	2500	8500
	4600	5.7	5.1	8500	6	5	3000	11500
RvdR(2)	3800	5	5.1	5000	4.7	5	0	5000
	4200	5.5	5.1	7500	5.2	5	2200	9700
	4600	6	5.1	10000	5.7	5	2700	12700





8 Literatuurverwijzingen

Asselman, N., Ijmker, J., Kolen, B. en Maaskant, B. (concept). Proeve Maas. Rapport 1206095 (versie 04), Deltares, Delft.

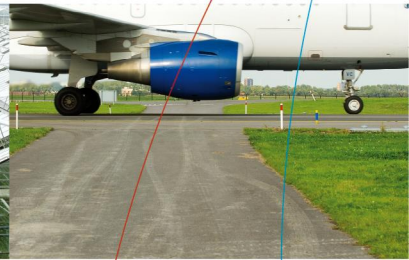
Bruggeman W., Haasnoot M., Hommes S., Linde A.t., Brugge R.v.d., Rijken B., Dammers E., Born G.J.v.d. (2011). Deltascenario's: Verkenning van mogelijke fysieke en sociaaleconomische ontwikkelingen in de 21ste eeuw op basis van KNMI'06 en WLO-scenario's, voor gebruik in het deltaprogramma 2011-2012. Deltares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

De Grave, P. en Baarse, G. (2011). Kosten van maatregelen: Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw. Rapport 1204144, Deltares, Delft.

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.

Mens, M.J.P. (2012). Analyse van systeemrobustheid: Een toepassing op de IJssel. Rapport 048/2012, Kennis voor Klimaat, Utrecht.

Mens M.J.P., Klijn F., Schielen R. (2012). Enhancing flood risk system robustness in practice, in: F. Klijn and T. Schweckendiek (Eds.), *Floodrisk2012*, Rotterdam.



Ontwikkelen van wetenschappelijke en toegepaste kennis voor een
klimaatbestendige inrichting van Nederland en het creëren van een
duurzame kennisinfrastructuur voor het omgaan met klimaatverandering

Contactinformatie

Programmabureau Kennis voor Klimaat

Secretariaat:

p/a Universiteit Utrecht

Postbus 85337

3508 AH Utrecht

T +31 88 335 7881

E office@kennisvoorklimaat.nl

Communicatie:

p/a Alterra, Wageningen UR

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T +31 317 48 6540

E info@kennisvoorklimaat.nl

www.kennisvoorklimaat.nl

