

ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier
ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier
ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier
ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier ruimte voor de rivier



Kosten-batenanalyse

Ruimte voor de Rivier

deel 1

Veiligheid tegen overstromen



CPB Document

No 82

april 2005

Veiligheid tegen overstromen

Kosten-batenanalyse voor Ruimte voor de Rivier, deel 1

C.J.J. Eigenraam

Centraal Planbureau
Van Stolkweg 14
Postbus 80510
2508 GM 's-Gravenhage

Telefoon	+31 70 338 33 80
Telefax	+31 70 338 33 50
Website	www.cpb.nl

ISBN 90-5833-212-8

Korte samenvatting

Dit deel 1 van de kosten-batenanalyse voor het project Ruimte voor de Rivier bevat een nieuwe methode om voor dijkringen het optimale veiligheidsniveau tegen overstromen te bepalen met de bijbehorende investeringsstrategie. Deze methode is toegepast op 22 dijkringen in het rivierengebied. Uitkomst is dat de huidige normen in de Wet op de waterkering uit economisch oogpunt niet optimaal zijn. Voor 16 dijkringen is de gemiddelde optimale veiligheid groter dan nu wettelijk is vereist, voor 9 daarvan zelfs meer dan twee keer zoveel. Dit geldt met name voor de Utrechtse dijkringen Kromme Rijn en Gelderse Vallei. Dijkkring Biesbosch (Noordwaard) komt daarentegen voor ontpooling in aanmerking. De resultaten zijn in het algemeen een ondersteuning voor ‘robust ontwerpen’.

Steekwoorden:

Overstromingsrisico's, kosten-batenanalyse, optimalisatie, rivierengebied

Abstract

This report is part 1 of a Cost-Benefit Analysis of the project ‘Space for the Rivers’, which aims at improving the safety against flooding along the river Rhine. A new method has been developed to find the optimal safety level for dike rings against flooding and the accompanying investment strategy. This method has been applied to 22 dike rings along the rivers. An important outcome is that the current safety norms in the Act on the Water defences turn out to be not optimal from an economic point of view. For 16 dike rings, the optimal safety level is higher than their present legal norm, for 9 of them even more than twice. This is especially true for the two dike rings in the province Utrecht: Kromme Rijn and Gelderse Vallei. On the other hand, the dike ring Biesbosch (Noordwaard) should no longer be a well-protected dike ring. The outcomes support a ‘robust’ investment strategy which takes future changes fully into account.

Key words:

Cost-benefit analysis, optimisation, risk of flooding, rivers

A comprehensive summary is available at www.cpb.nl.

Inhoud

Ten geleide	9
Samenvatting en conclusies	11
Conclusies over veiligheid voor de PKB RvdR	11
Samenvatting	13
1 Inleiding	27
1.1 Plaats KBA in project Ruimte voor de Rivier	27
1.2 Achtergrond en doel veiligheidsonderzoek	29
1.2.1 Achtergrond	29
1.2.2 Doel en karakter veiligheidsonderzoek	29
1.3 Werkwijze en de rest van deze studie in vogelvlucht	31
2 Schets van de oplossing van het veiligheidsprobleem	33
2.1 Probleem	33
2.2 Het optimale schade-interval	34
2.2.1 Vaste kosten bij investeren leiden tot sprongen bij de dijkhoogte	34
2.2.2 Sprongen bij de dijkhoogte leiden tot schommeling in veiligheid	35
2.2.3 Bovengrens veiligheidsinterval S^+ = Hoeveel investeren?	35
2.2.4 Ondergrens veiligheidsinterval s^- = Wanneer investeren?	36
2.2.5 Verwachte overstromingsschade is het criterium	37
2.3 Economische formulering van het beslissingsprobleem	38
2.3.1 Beslissing voor een periode	38
2.3.2 Beslissing voor meer perioden	39
2.3.3 Betekenis tijdshorizon en vervolginvesteringen	42
2.4 Wat is de beste strategie voor de bepaling van de dijkhoogte?	43
2.4.1 Algemene aanpak	43
2.4.2 Bijzondere gevallen	43

3	Gegevens	45
3.1	Benodigde gegevens	45
3.2	Dijkringen	46
3.3	Kans op overstroming	49
3.3.1	Bovenrivieren	49
3.3.2	Benedenrivieren	51
3.4	Schade bij overstroming	52
3.4.1	Monetaire schade	52
3.4.2	Waardering van niet-monetaire schades	55
3.4.3	Waardering toekomstige schades	57
3.5	Investeringskosten van dijkverhoging	58
4	Uitkomsten aparte veiligheidsberekeningen per dijkkring	61
4.1	Berekeningswijze optimale strategie per dijkkring	61
4.2	Uitkomsten optimale strategie per dijkkring	62
4.2.1	Overzicht van diverse overstromingskansen in 2015	62
4.2.2	Uitkomsten in lijn met verwachting	67
4.2.3	Optimale investeringspatronen	69
4.2.4	Kanttekeningen bij de basisuitkomsten in het licht van het project Ruimte voor de Rivier	72
4.3	Optimale strategie per dijkkring in combinatie met toepassing wettelijke norm in 2015	74
4.4	Variant: 'Veiliger' parameterwaarden voor BER	77
4.5	Variant: Maatgevende afvoer blijft in BOR 16 dzd m ³ /s in Lobith	79
4.6	Andere overstromingskansen bij de bovenrivieren	82
4.6.1	Zonder wettelijke normen	82
4.6.2	Met wettelijke normen	84
5	Onzekerheid en onzekerheidsvarianten	85
5.1	Omgaan met risico's en onzekerheden	85
5.1.1	Verschillende soorten risico en onzekerheid	85
5.1.2	Omgaan met onzekerheid over de juistheid van de cijfers en de uitkomsten	86
5.1.3	Onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen: optiewaarde van uitstel	87
5.1.4	Liever zekerheid dan onzekerheid: risico-aversie	89
5.1.5	Overstroming geeft altijd grote schade: groepsrisico	90
5.2	Toelichting op de uitkomsten van varianten	90
5.2.1	Effect op het schade-interval	91
5.2.2	Effect op overstromingskansen	92

5.2.3	Effect op de eerste investeringsbeslissing	92
5.3	Variant 1: Schade bij overstromen (V) +20%	92
5.4	Variant 2: Hogere economische groei (γ) van 3%	95
5.5	Variant 3: Stijging waterstanden volgens hoge klimaatscenario ($\eta \approx$ tweemaal zo groot)	97 97
5.6	Variant 4: Rentevoet (δ) 7% in plaats van 4%	98
5.7	Variant 5: Investeringskosten (I en I') +20%	101
5.8	Variant 6: Verschuiving van vaste naar variabele kosten	103
5.9	Variant 7: Combinatie van weinig of geen stijging water en weinig economische groei (γ = 1% per jaar)	105
5.10	Variant 8: Verdubbeling overstromingskans in basisjaar ($2 * P_o$)	106
5.11	Wat als achteraf blijkt dat de overstromingskans het dubbele was?	108
5.12	Wat als achteraf blijkt dat de waterstanden in BOR niet verder stijgen?	110
5.13	Wat als achteraf blijkt dat de stijging van de verwachte schade veel kleiner is? Of: Waarom is er geen opslag voor het macro-economische risico?	111 111
5.14	Wat als achteraf blijkt dat de stijging van de waterstand veel groter is?	113
5.15	Enkele methodologische opmerkingen over het veiligheidsonderzoek	115
5.15.1	Invloed kennis over herhalingsinterval op de huidige beslissing gering	115
5.15.2	Overige methodologische conclusies	115
6	Systeemwerking en maatregelen die bij overstroming schade beperken	119
6.1	Systeemwerking	119
6.1.1	Wat is systeemwerking?	119
6.1.2	Cascadewerking	120
6.1.3	Overstromingskans versus overschrijdingskans	121
6.1.4	Benedenrivieren	121
6.1.5	Complicaties door systeemwerking	122
6.2	Informatie over waterstandveranderingen door overstroming	122
6.3	Optimale overstromingsvolgorde bij systeemwerking	123
6.3.1	Alle dijkkringen in BOR	123
6.3.2	Systeemwerking bij de splitsingspunten	125
6.4	Maatregelen die bij overstroming schade beperken	127
6.4.1	Algemeen	127
6.4.2	Compartimentering	128
6.4.3	Inlaten	131
6.4.4	Instroming situeren op de plaats van uitstroompunten	132
6.5	Berekening van de optimale veiligheid	132

7	KBA rentabiliteitscriterium veiligheid van pakketten	133
7.1	Inleiding	133
7.2	KBA-criterium veiligheid	134
7.3	Berekening kritische grens investeringen I_g	135
7.3.1	Splitsing van het projectgebied	135
7.3.2	Benodigde gegevens	136
7.4	Resultaten	139
	Literatuur	141
	Bijlagen	145
	Bijlage A	147
	Bijlage B	187
	Bijlage C	197
	Bijlage D	203

Ten geleide

Op verzoek van de projectorganisatie 'Ruimte voor de Rivier' heeft het Centraal Planbureau voor dit project een kosten-batenanalyse uitgevoerd. Deze KBA is in twee delen uitgevoerd, waarover afzonderlijk wordt gerapporteerd. Het voorliggende deel 1 bevat een studie naar de optimale veiligheid van dijkringen, een bekend probleem onder Nederlandse besliskundigen. De studie bevat een verbeterde en uitgebreidere methode om het optimale veiligheidsniveau en de optimale dijkhoogte van dijkringen te bepalen, samen met de optimale investeringsstrategie.

Deze nieuwe methode is toegepast op 22 dijkringen in het rivierengebied. De uitkomsten van deze studie wijken hier en daar sterk af van de normen in de Wet op de waterkering. Het is dan ook te overwegen om deze nieuwe methode met actuele cijfers ook toe te passen op andere dijkringen in Nederland en de veiligheidsfilosofie tegen overstromen opnieuw te doordenken en in de wet vast te leggen. Dat blijkt overigens uitvoering van het project Ruimte voor de Rivier niet in de weg te staan, mits de maatregelen goed zijn gekozen. Op die keuze concentreert zich het tweede deel van deze kosten-batenanalyse, namelijk de kosteneffectiviteitsstudie van maatregelen en pakketten.

Het onderzoek stond onder leiding van C.J.J. Eijgenraam, die ook de nieuwe methode heeft bedacht en uitgewerkt en de hoofdauteur is van dit rapport. J.P. Blokdijk heeft het programma geschreven en de berekeningen uitgevoerd en H.J.J. Stolwijk heeft meegewerkt aan de opzet van het veiligheidsonderzoek en onderdelen van de tekst geschreven.

De voor dit onderzoek benodigde gegevens zijn voornamelijk aangeleverd door diensten van Rijkswaterstaat, waarbij in alle gevallen J. Kind (RIZA) een belangrijke coördinerende rol heeft gespeeld. Cijfers over overstromingskansen en ontwikkelingen van waterstanden kwamen van M. Schropp en Q. Lodder (beiden RIZA). S. Holterman en M. Brinkhuis-Jak (beiden DWW) verstrekten schadebedragen per dijkkring. De studie van de ingenieurscombinatie ARF over de investeringskosten is opgezet en begeleid door J. Weijers (DWW) en H. Stefess (Bouwdienst). Naast genoemde personen hebben ook vele andere medewerkers van RIZA, DWW en de projectorganisatie kennisbijdragen geleverd.

De KBA is vanuit de projectorganisatie begeleid door H. Luiten en een begeleidingscommissie onder voorzitterschap van P. Vermeer (DG Water). Een Commissie van deskundigen, bestaande uit de hoogleraren H. Verbruggen, P. Rietveld, J. van den Berg en M. Hajer, met E. Ruijgrok als secretaris, heeft een aantal keren advies uitgebracht over de KBA.

Het Centraal Planbureau is al deze betrokkenen dank verschuldigd voor hun bijdragen aan de totstandkoming van dit rapport.

F.J.H. Don
directeur

Samenvatting en conclusies

Conclusies over veiligheid voor de PKB RvdR

Doel veiligheidsonderzoek is KBA van projectdoelstelling

Het eerste deel van de Kosten-Batenanalyse (KBA) voor de PKB Ruimte voor de Rivier (RvdR), het veiligheidsonderzoek, richt zich op het beantwoorden van de vraag wat de optimale veiligheidsniveaus van dijkringen in het rivierengebied zijn. Zodoende is het veiligheidsonderzoek ook een kosten-batenanalyse van de veiligheidsnormen in de Wet op de waterkering en is daardoor het nut van de PKB Ruimte voor de Rivier globaal onderzocht.

Eerste theoretisch verantwoorde, economische model voor veiligheidsnormen voor dijkringen leidt vooral tot strengere normen dan nu in de wet staan

In de in dit rapport ontwikkelde optimale veiligheidsstrategie wordt de som van de kosten van investeringen (en onderhoud) en de resterende kosten van verwachte schade bij overstromingen geminimaliseerd. Dit leidt tot een investeringsstrategie die er voor zorgt dat de verwachte schade binnen een optimaal interval blijft. De grenzen van dit schade-interval kunnen vervolgens door deling met de schade bij overstroming omgerekend worden tot grenzen voor overstromingskansen. Door de stijging van de schade bij overstroming in de tijd (door economische groei) zullen de resulterende optimale grenzen voor de overstromingskansen in de loop der tijd dalen, waardoor het na te streven optimale veiligheidsniveau stijgt.

Uit een vergelijking van de berekende optimale overstromingskansen met de huidige normen in de Wet op de waterkering blijkt dat bij de vaststelling van die normen niet, of in ieder geval niet voldoende, rekening is gehouden met de invloed van groei op de tegen overstromingen te beschermen aantallen inwoners en economische waarden en daarmee op de verwachte schade. Zowel de verbetering van de berekeningswijze als de uitkomsten in de KBA geven aanleiding om de bestaande veiligheidsfilosofie en de getalsmatige uitwerking daarvan in (wettelijke) normen opnieuw te doordenken en te berekenen voor alle dijkringen in Nederland.

Actie is vereist om veiligheid in rivierengebied weer boven ondergrens te brengen

Het onderzoek levert voor de 22 onderzochte dijkringen in het rivierengebied verschillende economisch optimale veiligheidsniveaus op, zowel afhankelijk van de in deze dijkringen te beschermen inwoners en (economische) waarden als van de voor bescherming daarvan benodigde investeringskosten. In 16 van de 22 dijkringen zijn de berekende gemiddeld optimale overstromingskansen kleiner (dus een hogere na te streven veiligheid) dan de wettelijke normen, in 9 van die 16 gevallen meer dan twee keer zo klein.

Onzekerheid: eerder meer actie dan minder

Vanzelfsprekend zitten er rond die uitkomsten onzekerheidsmarges. In deze studie blijkt de onzekerheid over de ligging van het echte, maar onbekende optimum de richting van de beslissing te beïnvloeden. Dat komt, omdat de totale kosten bij te weinig investeren door de

snelle stijging van de overstromingskansen harder stijgen dan de totale kosten bij te veel investeren. Daarom is het wegens de onzekerheidsmarge rond de uitkomsten rationeel om iets vroeger te investeren dan de berekende optimale investeringsstrategie aangeeft.

Verder blijkt dat het economisch verstandig is om bij grote, samenhangende acties, zoals een dijkverlegging, duidelijk rekening te houden met toekomstige verslechtingen in het watersysteem en met economische groei. Dit geeft een theoretische basis voor ‘robuust ontwerpen’ bij maatregelen met grote vaste kosten, zoals bij de Noordwaard.

Extra kosten die samenhangen met een achteraf verkeerde inschatting van het klimaatscenario, zijn bij uitvoering van de berekende optimale strategie zeer gering, in de orde van 1% van de juiste totale kosten van investeren en restschade. Dit komt omdat een misschatting altijd in de verdere toekomst gecorrigeerd kan worden door eerder dan wel later dan nu gepland te investeren. Hetzelfde geldt voor een foute inschatting van economische groei.

De uitkomsten ondersteunen in het algemeen het streven in de PKB om een afvoer van 16 dzd m³/s in Lobith nog veilig af te kunnen voeren, ook gelet op de internationale situatie.

De KBA-resultaten zijn bruikbaar bij prioritering van PKB-maatregelen, of voor het lokaal later investeren dan 2015 als dit een betere oplossing mogelijk maakt, zoals in de IJsseldelta.

Een aantal opvallende uitkomsten wijst in de richting van bijzondere acties

Het blijkt economisch verstandig te zijn om de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei met grote stedelijke concentraties en een korte dijk langs de Nederrijn beduidend kleinere overstromingskansen te geven dan andere dijkringen langs de bovenrivieren. Dat is nu al feitelijk het geval door overhoogte bij de dijken van deze twee dijkringen. Dat pleit ervoor om het bestaande hoogteverschil in stand te houden en in het project Ruimte voor de Rivier niet eenzijdig te kiezen voor dijkverhoging langs de noordzijde van de Betuwe.

Dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) is aan alle kanten omgeven door dijken en telt slechts enige honderden inwoners. Dat resulteert in een hoge optimale overstromingskans voor deze dijkkring. Dit ondersteunt het voorstel in de PKB om deze dijkkring te ontpolderen en op die manier de veiligheidsopgave op de Merwedebetuwe te realiseren. Tevens is dit een voorbeeld van ‘robuust investeren’: namelijk een maatregel treffen met hoge aanvangskosten, waarbij echter al vooruit wordt gelopen op de verwachte stijging van de waterproblematiek in de toekomst; in dit geval niet alleen vanuit de rivieren, maar vooral ook vanuit zee.

Omvang investeringen VKA stemt globaal overeen met daardoor verkregen baten

Het in de PKB voorziene investeringsbedrag van 2,2 mld euro is globaal in overeenstemming met de beoogde veiligheidsbaten in de onderzochte dijkringen (rentabiliteit groter dan 4%). In deze berekening is geen rekening gehouden met de invloeden van systeemwerking of andere faalmechanismen en ook niet met eventuele andere baten van het project, zoals een mogelijke verbetering van ruimtelijke kwaliteit. Of het voorgestelde pakket ook een efficiënt pakket is, is onderzocht in deel 2 van deze KBA, namelijk de Kosten-effectiviteitsanalyse van maatregelen en pakketten. Daaruit blijkt dat meer kosteneffectieve pakketten tot de mogelijkheden behoren.

Samenvatting

Aanleiding en doelstelling veiligheidsonderzoek

De Projectorganisatie 'Ruimte voor de Rivier' heeft het Centraal Planbureau gevraagd een kosten-batenanalyse (KBA) uit te voeren voor de Planologische Kernbeslissing (PKB) 'Ruimte voor de Rivier'. Deze PKB behelst de keuze van een pakket maatregelen waarmee, uiterlijk in 2015, het veiligheidsniveau in het rivierengebied in overeenstemming wordt gebracht met de wettelijke normen toegepast in de situatie van het jaar 2001. Nevendoel van het project is het bevorderen van ruimtelijke kwaliteit.

Om het veiligheidsprobleem en het vraagstuk van de ruimtelijke kwaliteit goed te kunnen analyseren is de KBA Ruimte voor de Rivier in twee delen gesplitst. Dit hangt ook samen met de verschillende, elkaar aanvullende doelstellingen van de twee onderzoeksdelen.

Deel 1: Kosten-batenanalyse van veiligheid

Het eerste deel (KBA van veiligheid) richt zich op een vergelijking van de baten van meer veiligheid met de kosten die moeten worden gemaakt om die extra veiligheid tot stand te brengen. Het resultaat van dit deel is een optimale veiligheidsstrategie, in eerste instantie zonder daarbij rekening te houden met de wettelijke normen. Zodoende is het veiligheidsonderzoek ook een kosten-batenanalyse van de veiligheidsnormen in de Wet op de waterkering en is daardoor het nut van de PKB globaal onderzocht. Het veiligheidsonderzoek gaat echter niet zover dat daaruit de lokaal meest efficiënte combinatie van maatregelen kan worden afgeleid.

Deel 2: Kosten-effectiviteitsanalyse (KEA) van maatregelen en pakketten

Het tweede deel (Kosten-effectiviteitsanalyse (KEA) van maatregelen en pakketten) richt zich op de onderlinge vergelijking van de kosten van maatregelen en maatregelpakketten in verhouding tot hun effecten. Hierbij is de projectdoelstelling op het gebied van veiligheid wel als uitgangspunt genomen. Het resultaat van de KEA is een rangschikking van maatregelen op basis van het daarin meer of minder efficiënt combineren van veiligheidswinst en ruimtelijke kwaliteit. Daarmee kan de efficiëntie van de voorgestelde oplossing van het veiligheidsprobleem geëvalueerd worden.

Consequentie van deze tweedeling in het onderzoek is dat er niet één overzicht is waarin alle maatschappelijke baten en kosten bijeen staan.

Dit deelrapport is verder uitsluitend gewijd aan het eerste deel, de KBA veiligheid.

Achtergrond

Volgens recente inzichten zijn de werkelijke overstromingskansen uitgestegen boven de wettelijk veiligheidsnormen. (In dit rapport gebruiken we het woord overstromingskansen ook als we eigenlijk de woorden overschrijdingskansen of overbelastingskansen moeten gebruiken, zie daarvoor het kader op pagina 28). Door allerlei veranderingen in het klimaat- en watersysteem

worden de kansen op overstromingen zonder ingrijpen bovendien nog groter. Door de groei van de bevolking en de economie nemen verder de gevolgen bij overstroming toe, in de vorm van menselijke slachtoffers en van schade aan de fysieke en de economische infrastructuur.

Met het oog op deze veranderende omgeving richt het veiligheidsonderzoek zich in eerste instantie op het ontwikkelen van een optimale veiligheidsstrategie. Tegen de achtergrond van deze strategie kan vervolgens een evaluatie plaatsvinden van het voorkeurspakket in de PKB, voorzover gericht op het bereiken van meer veiligheid.

Optimale veiligheidsstrategie

Het veiligheidsonderzoek richt zich op het beantwoorden van de volgende vraag: wat zijn de optimale overstromingskansen in het rivierengebied? Onder 'optimaal' wordt in dit verband een situatie verstaan waarin de kosten van verdere investeringen in veiligheid niet meer opwegen tegen de extra veiligheidsbaten die door die verdere investeringen worden verkregen.

Omdat de kosten en baten per dijkkring verschillen, zullen ook de optimale overstromingskansen per dijkkring verschillend zijn. Daarnaast moet worden gelet op de invloed van een overstroming van een dijkkring op de overstromingskansen van andere, vooral benedenstroomse dijkringen. Dit wordt systeemwerking genoemd. Ondanks een forse inspanning zijn we er niet in geslaagd om voorafgaand aan de PKB deel 1 een cijfermatige studie over systeemwerking af te ronden. Dit rapport beperkt zich daarom tot enige kwalitatieve beschouwingen over systeemwerking. Wel zijn er berekeningen gemaakt voor iedere dijkkring afzonderlijk. De resultaten daarvan kunnen echter duidelijk afwijken van een optimale investeringsstrategie waarin wel met systeemwerking rekening wordt gehouden. Dat geldt zowel voor de investeringsinspanning in zijn geheel als voor de richting daarvan.

Een veiligheidsstrategie bestaat uit een serie acties, bijvoorbeeld dijkverhoging, die op verschillende momenten in de tijd worden uitgevoerd. De optimale strategie minimaliseert de gediscoteerde som van de kosten van de acties en de resterende kosten van schade door overstromingen. Zowel de kosten van de acties als de baten daarvan in de vorm van vermindering van verwachte schade worden ten behoeve van de berekening in geld uitgedrukt. Dat is langs de rivieren nog relatief makkelijk mogelijk. Hoge waterstanden met grote kans op overstromingen kondigen zich met name langs de bovenrivieren enige tijd van tevoren aan, hetgeen evacuatie van inwoners mogelijk maakt. Daarom is langs de (boven)rivieren de materiële schade het belangrijkste gevolg van overstroming.

Enkele aspecten van de oplossing van het veiligheidsprobleem

Door de voortdurende verandering van het watersysteem en van de schade bij overstroming is het niet verstandig, en waarschijnlijk ook niet mogelijk, om slechts één keer een maatregel te nemen die het veiligheidsprobleem eens en voor altijd oplost. De oplossing bestaat dus uit een serie maatregelen in de loop der tijd. Het Deltaplan Grote Rivieren en de PKB Ruimte voor de

Rivier zijn beide te beschouwen als onderdelen van een al eeuwen lopende serie projecten om de veiligheid langs de rivieren voortdurend op een acceptabel peil te houden.

De tweede complicatie is dat er bij investeringen sprake is van vaste kosten. Het is daarom niet efficiënt een maatregel vaak in een beperkte omvang te treffen. Wel is duidelijk dat, naarmate een maatregel groter wordt ingezet, de tijd toeneemt dat die maatregel moet voldoen. Ook dit is een in de waterstaat bekend fenomeen. Zo zijn er vuistregels in omloop dat een duur kunstwerk toch wel 100 jaar mee moet kunnen. Het is echter niet erg om een eenvoudige dijk in landelijk gebied iedere 30 jaar te verhogen.

Resultaat van de theorie in hoofdstuk 2 is precies zo'n investeringsstrategie, maar dan getalsmatig ingevuld voor iedere dijkkring. Deze strategie geeft het antwoord op twee vragen:

- Wanneer is het volgende moment dat we het beste weer kunnen investeren?
- Hoeveel moeten we dan investeren?

Iedere optimale strategie moet daarom aan twee optimaliteitsvoorwaarden voldoen. De eerste voorwaarde heeft betrekking op het *wanneer* van de investering. Kenmerkend voor het optimum is dat de investering vanaf het jaar van investeren rendabel is. De tweede voorwaarde betreft het *hoeveel* van de investering. De investeringsomvang is optimaal als de investeringskosten van een extra centimeter dijkhoogte niet meer opwegen tegen de extra veiligheidsbaten die er door worden verkregen. Vooral bij deze laatste voorwaarde is van belang om rekening te houden met nieuwe acties in de toekomst. Dit beperkt de omvang van de nu te nemen beslissing en maakt het mogelijk daarbij het scherpe rentabiliteitscriterium te gebruiken dat kijkt naar het eerste jaar na investering.

Onder bepaalde veronderstellingen over de gelijkmatigheid van het tempo waarin omstandigheden – en in het bijzonder de investeringskosten – veranderen, volgt hieruit een constant of regelmatig verschuivend interval voor de verwachte schade. Een groeiende economie brengt met zich mee dat de schade bij overstroming in de loop der tijd stijgt. Het tempo van economische groei is vooralsnog duidelijk hoger dan het tempo waarmee de investeringskosten stijgen. Daarom hoort bij een toename van de schade bij overstroming een daling van de overstromingskansen, dat wil zeggen een toename van het veiligheidsniveau. Dit is een reden om de normen in de Wet op de waterkering, die nu zijn geformuleerd in de vorm van vaste overschrijdingskansen, in de loop der tijd aan te scherpen.

Conclusies veiligheid

Bovengenoemde en andere conclusies geven aanleiding om de veiligheidsfilosofie en de getalsmatige uitwerking daarvan, bijvoorbeeld in de vorm van wettelijke normen, opnieuw te doordenken en te berekenen voor alle dijkringen in Nederland. Dit vergt meer tijd dan nu binnen de voorbereiding van deze PKB ter beschikking staat. De KBA-uitkomsten geven in het

algemeen echter geen aanleiding om de in de PKB voorziene acties op te schorten totdat er meer duidelijkheid is over eventuele nieuwe maatschappelijke veiligheidsnormen.

De hieronder vermelde conclusies hebben vooral betrekking op een evaluatie van het in de PKB voorgestelde pakket in het licht van de resultaten van het veiligheidsonderzoek, die zijn samengevat in de tabel 1. Een deel van de conclusies dat betrekking heeft op de wijze van aanpak en toekomstig onderzoek, staat aan het einde van hoofdstuk 5.

Tabel 1 Belangrijkste resultaten onderzoek optimale veiligheid (door dijkverhoging)

Nr.	Naam	Overstromingskans		Gemiddeld optimaal	Optimale jaar voor eerste investering
		Wettelijke norm	Feitelijk in 2001		
1	2	3	4	5	6
Bovenrivierengebied BOR		1/jaar	1/jaar	1/jaar	jaartal
38	Bommelerwaard	1/1250	1/1010	1/2350	2017
40	Heerwaarden (Waalkant)	1/2000	1/1550	–	–
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/995	1/6100	2015
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/715	1/1950	2024
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/645	1/2200	2015
44	Kromme Rijn	1/1250	1/2565	1/35100	2015
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/4140	1/53700	2015
47	Arnhemse- en Velperbroek	1/1250	1/470	1/3250	2015
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/550	1/2100	2015
49	IJsselland	1/1250	1/565	1/900	2033
50	Zutphen	1/1250	1/425	1/8800	2015
51	Gorssel	1/1250	1/320	1/700	2018
52	Oost Veluwe	1/1250	1/525	1/2350	2015
53	Salland	1/1250	1/315	1/7100	2015
10	Mastenbroek	1/2000	1/2630	1/2800	2053
11	IJsseldelta	1/2000	1/785	1/1350	2042
Benedenrivierengebied BER					
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	1/2000	1/730	1/4400	2015
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	1/2000	1/905	1/4200	2015
22	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1800	1/6400	2015
23	Biesbosch (Noordwaard)	1/2000	1/730	1/150	2059
24	Land van Altena	1/2000	1/530	1/1600	2015
35	Donge	1/2000	1/510	1/2200	2015

Bronnen: tabel 4.1; tabel 4.2; tabel 4.4 en tabel 4.10.

Tabel 1 geeft een overzicht van alle onderzochte dijkringen in het rivierengebied.

Achtereenvolgens staan vermeld de wettelijke norm voor de maximale overstromingskans (kolom 3), de feitelijke overstromingskans in 2001 (kolom 4), de in dit onderzoek berekende optimale gemiddelde overstromingskans in 2015 (kolom 5) en het optimale jaar voor (het gereedkomen van) de eerstvolgende investering (kolom 6), waarbij 2015 het eerste jaar is waarin dat uitvoerbaar is gedacht. In het optimale jaar voor de eerstvolgende investering (kolom

6) wordt de hoogst toelaatbare overstromingskans die volgt uit het optimale schade-interval, overschreden. Uit de laatste kolom blijkt dat er in 2015 volgens de optimale strategie in 14 van de 22 onderzochte dijkkringen achterstanden zijn in veiligheid. Volgens de wettelijke normen is dat in 2001 het geval in 19 van de 22 dijkkringen (vergelijk de kolommen 3 en 4).

Wat betekenen de uitkomsten voor de wettelijke normen?

1. De huidige wettelijke normen (kolom 3), in de vorm van maximale overschrijdingskansen, zijn al geruime tijd geleden vastgelegd en daarbij is niet, of in ieder geval niet voldoende, rekening gehouden met de invloed van economische groei op de verwachte schade. Toch blijkt uit de berekeningen niet dat de wettelijk vastgelegde maximale overstromingskansen nu over de hele linie (veel) te groot (d.w.z. te weinig veilig) zouden zijn in vergelijking tot de maximale kansen die voor het jaar 2015 volgen uit de optimale strategie bij dijkverhoging. Om twee hieronder in 2 en 3 genoemde redenen is het echter de vraag of deze vergelijking correct is.
2. De wettelijke norm is formeel bedoeld als *bovengrens voor de overstromingskansen*, die nooit overschreden mag worden. In de praktijk blijkt de norm echter vaak ook, of wellicht zelfs meer, te werken als een streefgetal of als een *ondergrens voor de overstromingskansen*. Uit de feitelijke overstromingskansen blijkt dat volgens de informatie uit 1996 bij bijna alle dijkkringen de wettelijke norm maar net werd gehaald door de uitvoering van het Deltaplan Grote Rivieren. Er is dus vroeger niet geïnvesteerd om de overschrijdingskansen duidelijk onder de wettelijke bovengrens te brengen. Nu en de komende jaren wordt de bovengrens zeker overschreden en datzelfde gold voorafgaand aan de uitvoering van het Deltaplan Grote Rivieren. De werking als ondergrens blijkt ook uit het feit dat het project Ruimte voor de Rivier erop is gericht om in 2015 te voldoen aan eisen op basis van de informatie voor 2001, zonder bijvoorbeeld rekening te houden met de waterstandsontwikkelingen volgens de klimaatscenario's, zie ook punt 7. De wettelijke norm wordt in de praktijk dus meer gehanteerd als een streefgetal dat op (middel)lange termijn gehaald dient te worden, dan als een absolute norm.
3. De andere reden is dat de optimale maximale overstromingskansen slechts voor één moment in de, zeg, 50 jaar relevant zou zijn. Voor de hele periode tussen twee investeringen geeft de gemiddelde optimale overstromingskansen over die periode een veel beter idee van het globaal na te streven veiligheidsniveau. Daarbij komt dat dit gemiddelde veel minder afhankelijk is van de keuze van het soort maatregelen waarvan de kosten in de berekening zijn gebruikt.
4. In de berekeningen is bij de investeringskosten informatie gebruikt over de kosten van dijkverhoging. In veel situaties is dijkverhoging de financieel goedkoopste manier om meer veiligheid te bereiken. De uitkomsten in dit rapport geven daarom een goed beeld van de gemiddeld na te streven overstromingskansen, ook in geval andere typen maatregelen worden getroffen. Maar de berekende optimale afstand tussen de boven- en ondergrens voor de

overstromingskans hangt wel sterk samen met de specifieke kostenverhoudingen bij dijkverhoging. De grenzen van het interval zijn dus niet zonder meer algemeen toepasbaar.

5. Om beide redenen kunnen de wettelijke normen in kolom 3 nog het beste worden vergeleken met de gemiddelde optimale overstromingskansen in kolom 5. In dat geval blijkt voor 16 van de 22 onderzochte dijkkringen de wettelijke overstromingskans wel groter te zijn dan de gemiddeld optimale overstromingskans in 2015. De wettelijk na te streven veiligheidsniveaus lijken dus laag, alleen al gelet op de mogelijke materiële schade. In 9 van die 16 dijkkringen blijken de wettelijke overstromingskansen meer dan het dubbele te zijn van de overstromingskansen die gemiddeld optimaal zijn. Er is dus aanleiding om de veiligheidsfilosofie opnieuw te doordenken en te herberekenen met deze nieuwe methode en met actuele cijfers.

Urgentie en omvang acties

6. Door de aanpassing van de maatgevende hoogwaterstanden (MHW) in 2001 ligt bij de meeste dijkkringen de overstromingskans (kolom 4) nu ook al boven de wettelijke norm in kolom 3. Wordt bovendien rekening gehouden met ontwikkelingen van de waterstanden die consistent zijn met het midden klimaatscenario – dat voor dit type beslissingen beleidsmatig het uitgangspunt zou moeten zijn –, dan wordt het beeld voor 2015 nog ongunstiger. Er is dus aanleiding voor actie.
7. Doelstelling van het project Ruimte voor de Rivier is om in 2015 weer te voldoen aan de wettelijke norm. Daarbij is de wettelijke norm vertaald in het kunnen verwerken van een maatgevende afvoer van 16 dzd m³/s in Lobith in 2015. Hierbij wordt er van uitgegaan dat de hydraulische situatie tussen 2001 en 2015 (en ook de eerstkomende tijd daarna) niet verandert.
8. Dit uitgangspunt lijkt niet goed te sporen met het feit dat er in de beleidsvoorbereiding op het gebied van water drie scenario's voor veranderingen in het watersysteem worden gehanteerd, die passen bij drie klimaatscenario's: laag, midden en hoog. Beleidsmatig is het idee dat iedere actie op watergebied getoetst moet worden op robuustheid tegen een van deze scenario's. Voor de typen maatregelen die in het kader van Ruimte voor de Rivier worden overwogen, is minimaal het midden klimaatscenario relevant. Voor de zeer grote maatregelen binnen het project en voor de ruimtelijke reserveringen zou het hoge klimaatscenario van toepassing zijn. Zoals gezegd, wordt er in het project echter geen rekening gehouden met (relatieve) waterstijging na 2001.
9. Bij de bovenrivieren is er echter een complicatie. Voor dit gebied lijkt de keuze voor 16 dzd m³/s als maatgevende afvoer inmiddels tot 2020 ondersteund te worden door de – hier verder niet besproken – resultaten van de recente, gezamenlijke Nederlands-Duitse Hoogwaterstudie. Daarin is rekening gehouden met de nu in Duitsland tot 2020 voorziene maatregelen. Voor de

periode na 2020 wordt in de Hoogwaterstudie een verdere stijging echter niet uitgesloten geacht.

Voor de benedenrivieren geldt er echter niet zoiets als een fysiek maximum.

10. In de optimale strategie blijken de investeringssprongen bij dijkverhoging groot te zijn; afhankelijk van de dijkkring voldoende voor 40 tot 65 jaar. Dit aantal jaren spoort met ideeën over de ontwerpduur uit de waterstaatkundige praktijk. Dit hangt samen met de relatief grote omvang van de vaste kosten bij dijkverhoging. Bij dijkverhogingen zijn optimale waarden berekend voor een eerste verhoging van tussen de 40 en 120 cm, terwijl 30 cm vaak voldoende is om nu de wettelijke norm voor 2001 te halen.
11. De vraag kan dus rijzen of de keuze in de PKB om in de bovenrivieren over het algemeen niet verder te gaan dan 16 dzd m³/s economisch gezien de meest rendabele is. Die keuze kan enerzijds worden gegrond op de overweging dat er bij de bovenrivieren in afwijking van de klimaatscenario's sprake zou zijn van een fysiek maximum en anderzijds op het feit dat de kostenopbouw van de voorgestelde maatregelen een andere is dan die van dijkversterking. Verder is dan vereist dat alle voorgestelde maatregelen een 'geen spijt' karakter hebben, dat wil zeggen dat we de voorgestelde maatregelen achteraf gezien niet of niet anders zouden hebben uitgevoerd als later toch blijkt dat de stijging van de waterstand is onderschat.
12. Als er bij maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier sprake is van een grote, samenhangende actie waarvan de omvang vrij gekozen kan worden – zoals bij stedelijke hoogwatergeulen of dijkverleggingen –, dan kan het wel voordelig zijn om die actie niet te beperken tot wat nodig is voor 16 dzd m³/s. Het is dan voordeliger om in het ontwerp al rekening te houden met verslechtingen in het watersysteem en economische groei op langere termijn. In waterstaatskringen wordt dit wel aangeduid als 'robuust ontwerpen'. De resultaten van dit onderzoek geven een duidelijke ondersteuning voor deze werkwijze. Voorzover deze maatregelen het karakter hebben van een ruimtelijke reservering op lange termijn, is volgens punt 7 de waterstandsstijging in het hoge klimaatscenario relevant.
13. Deze aanpak is niet optimaal bij maatregelen die moeilijk in omvang gevarieerd kunnen worden, zoals de verwijdering van obstakels. Als zo'n type maatregel vooralsnog voldoende is om op een traject de beoogde veiligheid te halen, is er geen duidelijke reden om op dit moment daarnaast nog een andere maatregel te nemen louter met het oog op de verdere toekomst.

Onzekerheid en het tijdstip van acties

14. Als toekomstige ontwikkelingen, wat verwachte schade betreft, beter of slechter uitkomen dan nu verwacht, heeft dat vanzelfsprekend invloed op de totale kosten en de investeringsstrategie in de toekomst. Op die ontwikkelingen zelf heeft beleid meestal niet veel invloed en dus ook niet op de daarmee samenhangende, soms grote verschillen in kosten en in strategie. De

urgentie van investeren is echter nu voor de meeste dijkringen zo groot, dat nieuwe informatie meestal niets verandert aan een nabijliggend optimale eerste jaar van investeren.

Interessanter is hoeveel kosten we hadden kunnen vermijden door nu al die – pas achteraf bekende – beste strategie te volgen. Alleen het verschil in totale kosten tussen nu de strategie uitvoeren die op grond van de huidige informatie optimaal lijkt, en direct de strategie uitvoeren die achteraf optimaal blijkt te zijn, is het maximale bedrag dat mogelijk door betere kennis en beleid vermijdbaar zou zijn geweest. Dit maximale kostenverschil ligt bij beginnen met uitvoering van de nu optimaal lijkende strategie echter slechts in de orde van 1% van de totale kosten van investeren en restschade. Dat komt omdat een strategie altijd achteraf aangepast kan worden. Een nu berekende optimale investeringsstrategie uitvoeren is dus zeer robuust ten opzichte van een verkeerde inschatting van toekomstige ontwikkelingen. Bij strategieën die nu niet optimaal zijn, kan een misschatting echter tot een veel groter kostenverschil leiden.

15. De cijfermatige invulling van de optimale strategie hangt vanzelfsprekend af van de gebruikte gegevens. Rond al die gegevens zit altijd een onbetrouwbaarheidsmarge. Daarmee geldt hetzelfde voor het resultaat. De vraag rijst dan hoe daarmee bij de beslissing moet worden omgegaan. Het verloop van de totale kosten van investeren en restschade aan weerszijden van het optimale punt is niet gelijk. Naarmate we *minder* investeren dan in werkelijkheid optimaal zou zijn, stijgen de werkelijke totale kosten snel door de snelle stijging van de overstromingskansen. Naarmate we *meer* investeren dan in werkelijkheid optimaal zou zijn, stijgen de totale kosten ook, maar over het algemeen minder snel. Als we bij de beslissing rekening willen houden met de onbetrouwbaarheidsmarge die er altijd rond de berekende waarde voor het optimum zit, dan ligt het in de rede *aan de veilige kant* te gaan zitten. Dat betekent vooral iets *vroeger* investeren dan de berekende optimale strategie aangeeft.
16. Toepassing van de wettelijke normen bij de 7 dijkringen waarvoor afzonderlijk bekeken volgens de optimale strategie in 2015 nog niet geïnvesteerd hoeft te worden, kan soms worden opgevat als het ‘iets vroeger’ investeren dan de berekende optimale strategie aangeeft, zoals bedoeld in het vorige punt. Voor de meeste normale dijkringen nemen de berekende totale kosten van schade en investeren dan met enkele procenten toe. Slechts in één geval, waarin het om een aanzienlijke vervroeging gaat, nemen de kosten met ongeveer 16% toe.
17. Naar voren halen van investeringen is niet altijd nuttig. Zo is gebruikmaken van nu bestaande overhoogte, waardoor investeringen op die dijkvakken kunnen worden uitgesteld, in overeenstemming met een optimale investeringsstrategie. Dit geldt ook als daardoor een stukje reserve voor de verdere toekomst na 2015 verdwijnt.
18. Een afwijking van de echte optimale strategie die nu al wel bekend is, is dat in de berekeningen nog niet rekening kon worden gehouden met systeemwerking. Zeer waarschijnlijk leidt rekening houden met systeemwerking tot lagere investeringen en daarmee tegelijkertijd tot een

hoger optimaal veiligheidsniveau van het gebied als geheel dan nu uit de berekeningen per afzonderlijke dijkkring volgt. Ook dit is een reden waarom naar voren halen van investeringen ten opzichte van de hier gepresenteerde uitkomsten niet altijd nuttig hoeft te zijn.

19. Verschillen in de urgentie van investeren volgens de optimale strategie geven een mogelijkheid tot prioritering van de maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier. Een complicatie kan zijn dat veel in de PKB voorgestelde maatregelen betrekking hebben op waterstandverlaging, waarmee de veiligheid van meer dan één dijkkring in het geding is. Aan die soort maatregelen kan alleen een lage prioriteit worden gegeven als de urgentie aan beide zijden van de rivier niet groot is. Dat komt op enkele plaatsen voor, zowel langs de Maas als de IJssel. Een lage urgentie kan ook aanleiding zijn voor het lokaal oprekken van de tijdslimiet als daardoor plaatselijk een betere oplossing mogelijk wordt. Voorbeeld is de lage urgentie voor maatregelen in de IJsseldelta in combinatie met de complicaties rond de hoogwatergeul Kampen.

Bovenrivieren (niet onder invloed zee)

20. De stijging van de verwachte schade langs de bovenrivieren waarmee is gerekend, is structureel ruim 3% per jaar, opgebouwd uit ruim 1% door stijging van de overstromingskansen als gevolg van wijzigingen in de rivierafvoeren volgens het midden klimaatscenario en 2% als gevolg van economische groei.
21. Als in de toekomst de afvoerverdeling zodanig wordt aangepast dat het maatgevende volume voor de Nederrijn gelijk blijft, dan kan voor de dijkringen langs de Nederrijn de stijging van de waterstand op nul worden gezet. Dit leidt voor deze dijkringen tot een enigszins lagere optimale gemiddelde overstromingskans (dus hogere veiligheid) dan vermeld in tabel 1. Wel valt de waterstandstijging op de Waal en de IJssel dan hoger uit, zodat voor de dijkringen langs die riviertakken dan iets hogere optimale overstromingskansen dan in tabel 1 aan de orde zijn.
22. Wordt naar optimale veiligheid gestreefd, dan zou in 9 van de 16 dijkringen van het bovenrivierengebied de overstromingskansen op korte termijn moeten worden verkleind. Deze dijkringen zijn: 48 Rijn en IJssel, 43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard, 41 Land van Maas en Waal, 47 Arnhemse en Velperbroek, 45 Gelderse Vallei, 44 Kromme Rijn, 52 Oost Veluwe, 50 Zutphen en 53 Salland. Kort na 2015 is dat ook nodig bij 38 Bommelerwaard en 51 Gorssel.

Specifieke gebieden bovenrivieren

23. Het blijkt verstandig te zijn om de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei, waarin grote stedelijke concentraties voorkomen en die een essentiële rol spelen in de verbindingen in Nederland, een beduidend kleinere overstromingskansen te geven dan de zuidelijk van de Nederrijn gelegen Betuwe. Dit kan bijvoorbeeld door onder alle omstandigheden een duidelijk verschil in dijkhoogte te handhaven.

24. Op dit moment bestaat dit verschil in dijkhoogte langs de Nederrijn. Dit pleit ervoor om in het project Ruimte voor de Rivier niet eenzijdig te kiezen voor dijkverhoging langs de noordzijde van de Betuwe, maar juist op deze trajecten bijvoorbeeld te kiezen voor maatregelen waarbij het bestaande verschil in dijkhoogte – en daarmee van overstromingskansen – intact blijft. Dat kunnen waterstandverlagende maatregelen zijn of dijkversterking zonder verhoging.
25. Plaatsen met minder urgentie voor verbetering, gedacht vanuit een optimale strategie, zijn vooral te vinden langs de IJssel, met name de IJsseldelta. Dit kan van invloed zijn op de prioritering van maatregelen. Ook een uitstel is daar soms te overwegen als daardoor het uitvoeren van gewenste gecompliceerde maatregelen mogelijk wordt. Langs de IJssel kan daarbij een moeilijkheid zijn dat het optimale beschermingsniveau van de dijkkring 50 Zutphen het op twee na hoogste is in de berekeningen.
26. Het oplossen van het knelpunt Veur-Lent is een voorbeeld van een groot project waarvan de dimensies in aanleg beduidend groter gekozen dienen te worden – rekening houdend met de ontwikkelingen in het hoge klimaatscenario – dan vereist is om nu precies aan de wettelijke norm te voldoen. De maatschappelijke kosten van een achteraf gebleken te krappe opzet zullen groot zijn. Vanzelfsprekend sluit 'robuust ontwerpen' fasering binnen de uitvoering van die maatregel niet uit. Het kan soms ook kostenbesparend werken om zo'n fasering afhankelijk te maken van de feitelijke ontwikkeling van de maatgevende afvoeren in de toekomst.

Systeemwerking bij de bovenrivieren

27. Rekening houden met systeemwerking heeft grote invloed op de overstromingskansen en daarmee op de optimale strategie. Vermoedelijk kunnen daardoor de investeringen in totaal lager uitvallen dan nu langs de bovenrivieren berekend per dijkkring. Door de lagere investeringskosten zal het optimale veiligheidsniveau voor het gebied als geheel hoger komen te liggen. De echte optimale investeringsstrategie zal er dus zowel qua omvang als samenstelling anders uitzien dan bij een berekening per dijkkring.
28. Systeemwerking kan grote invloed hebben op overstromingskansen. Als er een overstroming optreedt, dan lijkt onder de huidige omstandigheden in veel gevallen overstroming van dijkkring 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaarden niet te voorkomen. Een overstroming van deze dijkkring biedt alle andere dijkringen in het bovenrivierengebied dan wel voldoende veiligheid.
29. Een mogelijkheid om bij overstroming de schade te beperken is compartimentering. Daarbij moet er wel voor worden gewaakt dat compartimentering niet leidt tot ergere cascade-effecten dan in de huidige omstandigheden. Ook gedeeltelijke compartimentering kan al helpen om evacuatie te vergemakkelijken.

30. Als er voor wordt gezorgd dat het bestaande uitlaatwerk van Rijnstrangen ook als regelbaar inlaatwerk kan functioneren, dan zou daarmee wel op zeer korte termijn en tegen relatief zeer lage kosten een extra veiligheidsvoorziening gerealiseerd kunnen worden.

Benedenrivieren (rivierafvoer plus invloed zee)

31. De urgentie van investeren is in het gebied van de benedenrivieren over het algemeen nu al hoger dan bij de bovenrivieren. Daar komt bij dat ook de stijging van de verwachte schade veel groter is, omdat de relatieve stijging van de zeespiegel belangrijker is dan de verwachte vergroting van de rivierafvoer. In het middenscenario voor waterstandstijging neemt de verwachte schade zonder ingrijpen grofweg met 6% per jaar toe, opgebouwd uit gemiddeld 4% per jaar door waterstandstijging en 2% door economische groei. In een 'veiliger' berekening binnen ditzelfde midden klimaatscenario, die op sommige, maar onbekende plaatsen meer relevant kan zijn dan de hoofdvariant, ligt de stijging van de verwachte schade door waterstandstijging rond de 5% per jaar en de totale stijging van de verwachte schade dus rond de 7% per jaar.
32. Uit een oogpunt van optimale veiligheid zou in 5 van de 6 onderzochte dijkkringen van het benedenrivierengebied oostelijk van Dordrecht de overstromingskansen op korte termijn moeten worden verkleind. Deze dijkkringen zijn: 15 Lopiker- en Krimpenerwaard, 16 Alblasserwaard en Vijfheerenlanden, 22 Eiland van Dordrecht, 24 Land van Altena en 35 Donge.

Specifieke gebieden benedenrivieren

33. De dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) kent een zeer grote optimale overstromingskansen. Vlak voor het optimale tijdstip van investeren zou de overstromingskansen zelfs 1/30 mogen bedragen. De huidige wettelijke norm is 1/2000. Vanuit het oogpunt van een optimale investeringsstrategie lijkt deze dijkkring daarom voor ontpoldering in aanmerking te komen.
34. Vanuit het oogpunt van het kiezen van een goede omvang voor een maatregel is ook de ontpoldering van de Noordwaard een voorbeeld van een grote maatregel die in principe op een veel hogere waterstand ontworpen moet worden dan nu strikt noodzakelijk is om aan de wettelijke norm te voldoen. Dat sluit natuurlijk een fasering binnen de uitvoering van een dergelijke omvangrijke maatregel niet uit.
35. Op diverse plekken langs de benedenrivieren zijn in het Basis-Voorkeursalternatief in de PKB dijkverhogingen voorzien, zoals langs de Lek. Gezien de betrekkelijke hardheid van de verwachting van relatieve zeespiegelstijging zijn deze dijkverhogingen ook voorbeelden van grote maatregelen waarvan de omvang duidelijk groter moet zijn dan nu volgens de wettelijke norm is vereist. Fasering in de verhoging van een dijk is gelet op de omvang van de vaste kosten juist niet goed (d.w.z. rendabel) mogelijk.

36. Snelle uitvoering van bovengenoemde maatregelen in combinatie met het buitendijken van de Overdiepe polder maakt langs de Maas het uitvoeren van de overige maatregelen wellicht minder urgent, tenminste gedacht vanuit een optimale investeringsstrategie.

Conclusies investeringsbedrag project Ruimte voor de Rivier

Uit de theorie over de optimale veiligheid kan een maat worden afgeleid voor het maximale investeringsbedrag dat op het moment van investeren nog net rendabel (4% reëel) is bij de daardoor bereikte schadevermindering. Deze grens voor het investeringsbedrag is dus niet afhankelijk van de aard van de toegepaste maatregelen. Voor de verwachte schadevermindering die door uitvoering van het project RvdR in 2015 wordt beoogd in het gebied ten oosten van de lijn Krimpen-Dordrecht, is die rentabiliteitsgrens – uitgerekend per dijkkring – een investeringsbedrag dat ligt rond de 2,7 à 2,8 mld euro, afhankelijk van de bijbehorende stijging van onderhoudskosten. Daarvan heeft zo'n 1 mld euro betrekking op de Benedenrivieren en 1,7 à 1,8 mld euro op de Bovenrivieren, waarvan rond 1 mld euro langs de IJssel. Het in de PKB voor dit hele gebied voorziene investeringsbedrag van 2,1 mld euro blijft daar binnen en is dus in totaal een rendabele uitgave als daardoor overal de wettelijke norm precies wordt gehaald.¹

Bij deze conclusie is alleen rekening gehouden met baten die voortkomen uit de beoogde toename van de veiligheid, en is dus niet gelet op andere baten (of maatschappelijke kosten), zoals mogelijke positieve effecten op ruimtelijke kwaliteit. Verder geldt ook dat iets eerder investeren dan precies volgt uit de berekening, beter is dan later. Ook is het mogelijk dat de grote maatregelen meer mogelijkheden voor toekomstige waterstandverlaging inhouden dan nu in het project aan bestaande overhoogte wordt opgebruikt.

Het is echter niet correct om per afzonderlijke dijkkring te rekenen zoals bij de berekening van de genoemde cijfers is gebeurd. Rekening houden met systeemwerking betekent vermoedelijk dat vooral in het gebied van de bovenrivieren de vermindering van de verwachte schade minder groot is dan voor elke dijkkring afzonderlijk is becijferd. Dit betekent dat het totale grensinvesteringsbedrag veel lager zou liggen dan nu door optelling is berekend. De voorziene berekening over systeemwerking heeft echter nog geen aanwijzing opgeleverd hoe groot dit effect mogelijk kan zijn. Anderzijds is ook geen rekening gehouden met het effect van en invloeden op andere faalmechanismen. Dit werkt vermoedelijk de andere kant uit, tenzij (de effecten van) andere risico's geheel zouden worden opgevangen door de (effecten van) reststerkte in het ontwerp van dijken.

¹ Omdat de dijkkringen ten westen van de lijn Krimpen-Dordrecht niet in dit veiligheidsonderzoek zijn betrokken, kon voor deze dijkkringen niet dezelfde berekening worden gemaakt. De voor dit gebied in de PKB voorziene investeringen bedragen 85 mln euro, zodat de totale investeringen in de PKB 2,212 mld euro bedragen.

Dat ieder pakket van minder dan 2,7 mld euro dat de projectdoelstelling haalt, meer rendabel is dan 4%, betekent natuurlijk niet dat zo'n pakket ook efficiënt is. Of het in de PKB voorgestelde Basis-Voorkeursalternatief ook een efficiënt pakket is, is onderzocht in deel 2 van deze KBA, namelijk de Kosten-effectiviteitsanalyse van maatregelen en pakketten. Daaruit blijkt dat meer kosteneffectieve pakketten tot de mogelijkheden behoren.

1 Inleiding

1.1 Plaats KBA in project Ruimte voor de Rivier²

De Projectorganisatie 'Ruimte voor de Rivier' heeft het Centraal Planbureau gevraagd een kosten-batenanalyse (KBA) uit te voeren ten behoeve van de Planologische Kernbeslissing (PKB) 'Ruimte voor de Rivier'. De PKB behelst de keuze van een voorkeurspakket bestaande uit een goede mix van technische en ruimtelijke maatregelen waarmee, uiterlijk in 2015, het veiligheidsniveau in het rivierengebied in overeenstemming kan worden gebracht met de wettelijke normen toegepast op de situatie in het jaar 2001. Concreet gaat het hierbij om een aanpassing van het riviersysteem zodat een afvoer van 16.000 m³/s van de Rijn en 3.800 m³/s van de Maas kan worden verwerkt. Bij de keuze van het pakket moet rekening worden gehouden met mogelijke toekomstige maatregelen waarmee een afvoer van maximaal 18.000 m³/s bij de Rijn kan worden verwerkt in combinatie met een verdergaande stijging van de zeespiegel. Nevendoel van het project is het bevorderen van ruimtelijke kwaliteit.

Het project 'Ruimte voor de Rivier' is gericht op twee belangrijke baten: veiligheid en ruimtelijke kwaliteit. Hoe deze baten afgewogen moeten worden tegen de kosten, is niet op voorhand duidelijk. Om analytisch enig grip op het veiligheidsvraagstuk te krijgen, is de KBA daarom in tweeën 'geknipt'. In het eerste deel richten we ons op een vergelijking van de baten van meer veiligheid met de kosten die moeten worden gemaakt om die extra veiligheid te realiseren. Aan de orde is dan de vraag: Is nu investeren in veiligheid nuttig? De gevolgen voor de ruimtelijke kwaliteit blijven in dit eerste deel buiten beschouwing. In het tweede deel van het onderzoek zal duidelijk worden, dat deze splitsing zeker niet betekent dat de gevolgen van maatregelen voor de ruimtelijke kwaliteit van ondergeschikt belang worden geacht. Integendeel, in dat deel zal getracht worden om juist aan de combinatie van de gevolgen van maatregelen voor zowel veiligheid als ruimtelijke kwaliteit recht te doen. Aan de orde is dan de vraag: Welk pakket maatregelen is de beste oplossing? De scheiding in het onderzoek is uitsluitend om analytische redenen doorgevoerd: in onze opinie kunnen de afwegingen tussen kosten, veiligheid en ruimtelijke kwaliteit op deze wijze het beste duidelijk gemaakt worden.

Consequentie van deze tweedeling is dat er niet één overzicht is waarin alle maatschappelijke baten en kosten bijeen staan. Dat hangt ook samen met de verschillende, elkaar aanvullende doelstellingen van de twee onderzoeken. Het veiligheidsonderzoek richt zich op het ontwikkelen van een optimale veiligheidsstrategie, in eerste instantie zonder daarbij

² In dit rapport wordt in aansluiting op de terminologie in de zgn. OEEI-leidraad voor kosten-batenanalyse (Eijgenraam e.a.(2000)), die volgens besluit van het kabinet als uitgangspunt moet worden gehanteerd bij de evaluatie van infrastructuurprojecten, consequent gesproken over 'kosten-batenanalyse' en 'KBA' als de methode waarin in principe *alle maatschappelijke* kosten en baten van een project systematisch aan de orde moeten komen. De toevoeging van het woord 'maatschappelijk' in de naamsaanduiding is dus overbodig en sluit niet aan bij de internationale literatuur, omdat daarin het begrip 'social cost benefit analysis' een geheel andere betekenis heeft dan in Nederland wel wordt bedoeld met toevoeging van het woord maatschappelijk.

Overstromingskansen en andere kansen

Een overstroming kan verschillende oorzaken hebben. De Wet op de waterkering kijkt slechts naar één daarvan, namelijk dat het water zo hoog komt te staan dat het over de dijk heen de dijkkring instroomt. De kans dat zo'n type overstroming plaatsvindt, is simpel gezegd gelijk aan de kans dat het water op een plek langs de rivier hoger komt te staan dan de plaatselijke kruin van de dijk, ofwel dat de hoogte van het water de hoogte van de dijk overschrijdt.

Om die overschrijdingskans te bepalen is eerst onderzoek gedaan naar de kansverdeling van de waterafvoeren (in m^3/s) bij Lobith. De resultaten van dit onderzoek kunnen voor hoge afvoeren goed worden samengevat in een exponentieel verband tussen de omvang van de afvoer in Lobith en de kans daarop. Optelling van alle kansen op afvoeren hoger dan een zekere hoeveelheid geeft dan de kans dat er in Lobith meer water langs stroomt dan die hoeveelheid, met andere woorden: de kans dat een zekere hoeveelheid water wordt overschreden, kortweg overschrijdingskans genoemd. Ook dit verband tussen de omvang van een grote afvoer in Lobith en de kans op overschrijding daarvan is goed te benaderen met een exponentiële kromme. Dit verband staat bij rivierkundigen bekend als "de werklijn in Lobith".

Tot voor kort werd een werklijn gehanteerd waarin een afvoer van 15 dzd m^3/s bij Lobith een overschrijdingskans had van 1/1250 per jaar. Mede door het optreden van hoge afvoeren in 1993 en 1995 wordt vanaf 2001 echter een nieuwe werklijn gehanteerd waarin bij hoge afvoeren de overschrijdingskansen zijn verhoogd. Bij 15 dzd m^3/s hoort nu een overschrijdingskans van 1/585 per jaar. De hoeveelheid water waarbij de overschrijdingskans lager wordt dan 1/1250, is nu verschoven naar 16 dzd m^3/s .

In de Wet staat dat de overschrijdingskans bij de dijkeringen in het gebied van de bovenrivieren niet groter mag zijn dan 1/1250. Daarom wordt de bij die overschrijdingskans behorende afvoer in Lobith de maatgevende afvoer genoemd. In 2001 is de maatgevende afvoer op de Rijn dus gewijzigd van 15 dzd m^3/s in 16 dzd m^3/s in Lobith en op de Maas van 3,65 dzd m^3/s in 3,8 dzd m^3/s in Borgharen. Van deze maatgevende afvoer wordt op iedere plek in het midden van de rivier de plaatselijke Maatgevende Hoogwaterstand (MHW) afgeleid (uitgedrukt in meter boven NAP). Ruwweg heeft de verandering van werklijn in het bovenrivierengebied een effect van bijna 30 cm op de MHW.

In het project Ruimte voor de Rivier wordt eerst geprobeerd door middel van waterstandverlagende maatregelen, zoals verbreding of verdieping van de rivier, de MHW weer te verlagen tot het oude niveau. Voorzover dat niet lukt, wordt de resterende opgave met dijkverhoging opgelost.

In het gebied van de benedenrivieren is niet alleen de wettelijk norm scherper – de overschrijdingskans mag daar niet hoger zijn dan 1/2000 –, ook moet in dit gebied rekening worden gehouden met de waterstanden op zee en met een aanzienlijke invloed van de wind op de kans dat water over de top van de dijk gaat stromen. De overschrijdingskansen waarin met de invloed van wind rekening is gehouden, worden wel aangeduid met overbelastingskansen.

De reden dat in de Wet alleen over overschrijdingskansen wordt gesproken en niet over overstromingskansen, is dat er in civieltechnische ontwerpen naar wordt gestreefd om de overstromingskans door andere oorzaken dan overschrijding kleiner te houden dan 1/10-de van de overschrijdingskans. Dit is tevens de reden waarom we verder in dit rapport overal de term overstromingskansen zullen hanteren, waar we eigenlijk moeten spreken over overschrijdings- of overbelastingskansen. Die laatste termen gebruiken we uitsluitend als dat nodig is om verwarring te voorkomen.

Of de overstromingskansen ook in werkelijkheid niet veel groter zijn dan de overschrijdingskansen, is op dit moment in onderzoek bij het project 'Veiligheid Nederland in Kaart' (VNK). Resultaten zijn nog niet gepubliceerd. Voorlopige uitkomsten wijzen in de richting dat ook andere oorzaken dan overschrijding een niet verwaarloosbare bijdrage kunnen leveren aan de echte overstromingskansen. Anderzijds is er reststerkte in het ontwerp en kan ook de verhoging voor wind en golfoverslag een kerende werking hebben. Het is dus niet per definitie zo dat echte overstromingskansen altijd groter zijn dan overschrijdingskansen.

Waar in het navolgende wordt gesproken over overstromingskansen, mag dus niet uit het oog worden verloren dat resultaten uit VNK niet zijn gebruikt en dat het in dit rapport louter gaat om overschrijdings- of overbelastingskansen.

rekening te houden met de wettelijke normen. Zodoende is het veiligheidsonderzoek ook een kosten-batenanalyse van de veiligheidsnormen in de wet en is daardoor het nut van de PKB globaal onderzocht. Het veiligheidsonderzoek gaat echter niet zover dat daaruit de lokaal meest efficiënte combinatie van maatregelen kan worden afgeleid. Het slim combineren van maatregelen staat wel centraal in deel 2 van de KBA, de kosteneffectiviteitsanalyse (KEA). In de KEA is de projectdoelstelling wel als uitgangspunt genomen en is het doel de daarvoor aangedragen oplossingen in de vorm van maatregelen en pakketten onderling te vergelijken en te evalueren.

Dit deelrapport is verder uitsluitend gewijd aan deel 1 van de KBA, het veiligheidsonderzoek.

1.2 Achtergrond en doel veiligheidsonderzoek

1.2.1 Achtergrond

Volgens klimatologen en andere deskundigen is het klimaat aan het veranderen. Die verandering komt onder meer tot uitdrukking in een toename van de pieken in de waterafvoer via de Rijn en de Maas. Ook rijst de zeespiegel. Hierdoor kan het overtollige water van de rivieren moeilijker een uitweg naar zee vinden. Er is een brede consensus dat deze processen in combinatie met bodemdaling en verstedelijking in het aangrenzende buitenland (Duitsland, België) de komende decennia door zullen gaan.

Zonder ingrijpen worden daardoor de kansen op overstromingen groter. De werkelijke overstromingskansen zijn volgens recente inzichten al boven de wettelijk gegarandeerde veiligheidsnormen uitgestegen, zie kader (pagina 28). Door de groei van de bevolking en de economie nemen bovendien de gevolgen van overstromen toe, in de vorm van menselijke slachtoffers en leed en in de vorm van schade aan de fysieke en de economische infrastructuur.

Tegen deze achtergrond wordt in de PKB een voorkeurspakket aan maatregelen uitgewerkt waarmee, uiterlijk in 2015, de overstromingskansen in het deel van het rivierengebied dat onder invloed staat van de Rijn, in overeenstemming kunnen worden gebracht met de wettelijke normen in 2001. Omdat er naast dit voorkeurspakket ook vele andere pakketten, met meer of minder nadruk op veiligheid en ruimtelijke kwaliteit, denkbaar zijn, zal het veiligheidsonderzoek zich richten op het ontwikkelen van een *optimale* veiligheidsstrategie. Doel hiervan is om bij te dragen aan een rationele besluitvorming over de veilige inrichting van het rivierengebied in een situatie waarin zowel de hydraulische omstandigheden als de te beschermen waarden voortdurend aan veranderingen onderhevig zijn.

1.2.2 Doel en karakter veiligheidsonderzoek

Het veiligheidsonderzoek richt zich op het beantwoorden van de vraag: ‘wat zijn de optimale overstromingskansen in het rivierengebied?’ Onder ‘optimaal’ wordt hier een situatie verstaan waarin de kosten van verdere investeringen in veiligheid niet meer opwegen tegen de extra

Klimaatscenario's, mogelijk fysiek maximum en voor de KBA relevante tijdstippen

In het kader overstromingskansen is uitgelegd dat de verandering van de maatgevende afvoeren in 2001 de aanleiding is voor het project Ruimte voor de Rivier. Doelstelling van dit project is om in 2015 weer te voldoen aan de wettelijke norm, dat de overstromingskansen langs de bovenrivieren bij de Rijn niet hoger mag zijn dan 1/1250 en niet hoger dan 1/2000 langs de benedenrivieren. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de hydraulische situatie tussen 2001 en 2015 niet verandert.

Dit uitgangspunt staat op gespannen voet met het feit dat er in de beleidsvoorbereiding op het gebied van water drie scenario's voor de veranderingen in het watersysteem worden gehanteerd, die passen bij drie klimaatscenario's: laag, midden en hoog. Deze drie scenario's beogen een redelijke indruk te geven van de mogelijke, maar onbekende veranderingen, die eerst tot het jaar 2050 en daarna tot 2100 kunnen optreden. In het lage scenario zijn de veranderingen klein ingeschat (relatieve zeespiegelstijging 20 cm per eeuw, Rijnafvoer +0,8 dzd m³/s per eeuw) en in het hoge scenario groot (relatieve zeespiegelstijging 85 cm per eeuw plus 20% toename wind, Rijnafvoer +3,2 dzd m³/s per eeuw). Vanzelfsprekend ligt het midden scenario daar tussenin (relatieve zeespiegelstijging 60 cm per eeuw, Rijnafvoer +1,6 dzd m³/s per eeuw).

Beleidsmatig is het idee dat iedere actie op watergebied getoetst moet worden op robuustheid tegen een van deze scenario's. De keuze van het daarbij te hanteren scenario is afhankelijk gemaakt van de mate van spijt die men later kan hebben van een disproportionele omvang van een maatregel, zie bijv. 3^e Kustnota (V&W, 2000). Is de omvang van een maatregel in de toekomst nog makkelijk naar boven corrigeerbaar, zoals bij zandsuppleties langs de kust, dan hoeft vooraf met niet al teveel stijging rekening te worden gehouden en volstaat een omvang die past bij het lage scenario. De omvang van grote investeringen met een ontwerpduur van zeg 50 tot 100 jaar, zoals dijken en stormvloedkeringen, moet passen in het middenscenario. Is aanpassing later zeer kostbaar, bijvoorbeeld achteraf noodzakelijk gebleken ruimte is dan al voor andere doeleinden benut, dan moet de maatregel qua omvang ook goed passen in het hoge scenario. Dit laatste geldt dus voor ruimtelijke reserveringen.

Voor de typen maatregelen die in het kader van Ruimte voor de Rivier worden overwogen, is minimaal het midden scenario relevant. Voor de zeer grote maatregelen binnen het project en voor de ruimtelijke reserveringen zou het hoge scenario het uitgangspunt moeten zijn. Zoals gezegd, wordt er in het project echter geen rekening gehouden met waterstijging na 2001. Bij de bovenrivieren is er echter een complicatie.

Voor de bovenrivieren lijkt de keuze voor 16 dzd m³/s als maatgevende afvoer tot 2020 ondersteund te worden door de – hier verder niet besproken – resultaten van de recente, gezamenlijke Nederlands-Duitse Hoogwaterstudie (RIZA, 2004), waarin rekening is gehouden met de nu tot dat jaar in Duitsland voorziene maatregelen. In deze studie wordt voor de periode na 2020 een verdere stijging niet uitgesloten geacht. Voor de benedenrivieren geldt er echter niet zoiets als een fysiek maximum.

De KBA-berekeningen worden uitgevoerd voor het jaar 2015, omdat dit het zichtjaar is binnen het project en uitvoering van alle maatregelen eerder dan dat jaar niet realistisch lijkt. In de berekening worden alle investeringskosten uitgegeven in 2015 en wordt geen rekening gehouden met mogelijke schades voorafgaand aan 2015. Wel zal in de berekeningen standaard rekening worden gehouden met de verwachte ontwikkelingen volgens het midden scenario, zowel van 2001 tot 2015 als daarna. Zonder ingrijpen verslechteren de overstromingskansen tot 2015 dus nog.

Het gebruikte prijspeil is zoveel mogelijk dat van 2003. Kosten zijn steeds contant gemaakt in het jaar 2015.

veiligheidsbaten die door die extra investeringen worden verkregen. Omdat de situatie per dijkkring verschilt, zullen de optimale overstromingskansen niet in alle dijkkringen gelijk zijn. Daarom moet de vraag naar de optimale overstromingskansen in het meervoud worden gesteld. Daarnaast moet worden gelet op de invloed van overstroming op de overstromingskansen van andere dijkkringen, ook wel systeemwerking genoemd.

De KBA veiligheid neemt dus *niet* de opdracht aan de projectorganisatie: “hoe krijgen we 16 dtd m³/s veilig door het riviersysteem?” als vertrekpunt. Sterker nog: dit deel van de KBA gaat zelfs niet uit van de normen in de Wet op de waterkering. Het onderzoek probeert juist voor zulke normen een wetenschappelijke basis te leggen en die uit te werken in een veiligheidsstrategie.

Een veiligheidsstrategie bestaat uit een serie vervolgacties, bijvoorbeeld dijkverhoging, die op bepaalde momenten worden uitgevoerd. De optimale strategie minimaliseert de som van de kosten van de acties en de resterende kosten van schade door overstromingen. Zowel de kosten van de acties als de baten daarvan in de vorm van vermindering van verwachte schade worden ten behoeve van de berekening in geld uitgedrukt en bij elkaar opgeteld. Uit deze werkwijze blijkt dat het veiligheidsonderzoek – behalve een optimalisatie – ook een echte kosten-batenanalyse is. De optimale veiligheidsstrategie die de uitkomst is van de KBA, wordt vastgelegd in de vorm van het optimale veiligheidsinterval (de veiligheidsniveaus direct voor en na investeren) en de daarbij behorende optimale investeringsstrategie.

1.3 Werkwijze en de rest van deze studie in vogelvlucht

Bij de start van dit onderzoek dachten we gebruik te kunnen maken van de theoretische oplossing van het veiligheidsprobleem door middel van dijkverhoging die is ontwikkeld door Van Dantzig in 1953 (Van Dantzig, 1956 en Deltacommissie 1960). Bij nader inzien bleek deze oplossing zowel onvolledig als onjuist. Het was dus nodig om de theorie en de daaruit volgende formules opnieuw te ontwikkelen. Hoofdstuk 2 geeft aan de hand van enige plaatjes de hoofdlijn van de redenering weer. De wiskundige achtergrond staat volledig beschreven in bijlage A.

De theorie is verwerkt in een rekeninstrument voor alle dijkringen langs de rivieren. Voor alle berekeningen is informatie nodig welke staat beschreven in hoofdstuk 3. Diverse onderdelen van Rijkswaterstaat (RIZA, DWW, Bouwdienst) hebben deze informatie aangeleverd. Delen van de informatie worden toegelicht in de bijlagen B en C.

Hoofdstuk 4 geeft de resultaten per dijkkring in voor de PKB relevante situaties. Onzekerheid en hoe daarmee in dit kader om te gaan, is het onderwerp van hoofdstuk 5.

Systeemwerking wordt kwalitatief behandeld in hoofdstuk 6.

Aan de theorie over het optimaal investeren in veiligheid is een rentabiliteitscriterium te ontleen voor de maximale omvang van de investeringen van een project in relatie tot de daardoor bereikte, van tevoren bekende verwachte schadevermindering. In hoofdstuk 7 wordt de bovengrens voor het investeringsbedrag gegeven die past bij de in het project Ruimte voor de Rivier beoogde veiligheidsverbetering.

2 Schets van de oplossing van het veiligheidsprobleem

In de optimale veiligheidsstrategie wordt de som van de kosten van investeringen en de resterende kosten van verwachte schade door overstromingen geminimaliseerd. Dit leidt tot een investeringsstrategie die er voor zorgt dat de verwachte schade binnen een optimaal schade-interval blijft. De grenzen van dit interval worden bepaald door de antwoorden op twee vragen. De eerste heeft betrekking op het wanneer van de investering. Kenmerkend voor het optimum is dat de investering vanaf het jaar van investeren rendabel is. De tweede voorwaarde betreft het hoeveel van de investering. De investeringsomvang is optimaal als de investeringskosten van een extra centimeter dijkhoogte niet meer opwegen tegen de extra veiligheidsbaten van die centimeter verhoging. Vooral bij deze laatste voorwaarde is van belang om rekening te houden met nieuwe acties in de toekomst. Dit beperkt de omvang van de nu te nemen beslissing en maakt het mogelijk om bij de beslissing het scherpe rentabiliteitscriterium te gebruiken dat kijkt naar het eerste jaar na investering. De grenzen van het schade-interval kunnen door deling met de schade bij overstroming worden omgerekend tot grenzen voor overstromingskansen. Door de stijging van de schade bij overstroming in de tijd (door economische groei) zullen de resulterende grenzen voor de overstromingskansen in de loop der tijd dalen, waardoor het na te streven optimale veiligheidsniveau stijgt.

2.1 Probleem

In het kader van de KBA Ruimte voor de Rivier komt de vraag aan de orde wat een goede veiligheidsnorm voor dijkringen is. We beantwoorden die vraag in dit hoofdstuk voor één dijkkring door het ontwerpen van een optimale beschermingsstrategie.³ Als instrument daarvoor noemen we alleen dijkverhoging, zonder daarmee te willen zeggen dat dijkverhoging in de praktijk altijd het beste middel zou zijn om de veiligheid te verhogen. Voor het wiskundige model maakt de aard van de maatregel bijna geen verschil.

We bekijken een simpel systeem van één dijkkring, die (alleen) kan overstromen als de waterstand hoger komt dan de dijken.⁴ We nemen aan dat de dijkhoogte aanvankelijk zo was vastgesteld dat de daarvoor gemaakte kosten maatschappelijk gezien opwogen tegen de

³ We gaan in dit hoofdstuk dus niet in op systeemwerking, dat wil zeggen dat overstroming van de ene dijkkring het veiligheidsniveau van een andere dijkkring verandert. Systeemwerking kan met name relevant zijn voor het bovenrivierengebied, maar is veel minder relevant langs de benedenrivieren of de kust (zie hoofdstuk 6).

⁴ Dit kan materieel een belangrijke beperking zijn. Door niet te kijken naar andere mogelijke oorzaken van overstroming dan overschrijding van een bepaalde waterhoogte is de overstromingskans bijvoorbeeld niet afhankelijk van de lengte van de dijk. Anderzijds zijn de technische ontwerpnormen van dijken zodanig dat de kans op overstroom door andere faalmechanismen dan overschrijding een factor tien kleiner moet zijn dan die van overschrijding. We sluiten met deze vereenvoudiging aan bij de huidige stand van zaken in het project Ruimte voor de Rivier. Het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK) beoogt de stap naar echte overstromingskansen wel te maken. Voorlopige uitkomsten daarvan wijzen in de richting dat enerzijds de bijdrage van andere faalmechanismen niet verwaarloosd mag worden, maar dat de ontwerpnormen inderdaad tegenwicht bieden.

Analytisch maakt deze beperking voor de verdere afleiding vermoedelijk niet veel uit. Wel natuurlijk voor de interpretatie en het feitelijke gebruik van de in de formules voorkomende overstromingskansen. Bij optimalisatie rekening houden met meer faalmechanismen vereist vermoedelijk Monte Carlo-simulaties van specifiek samengestelde situaties.

verwachte voorkomen schade in het gebied. Bij aanleg resteerde een (kleine) kans op overstroming. Zo'n overstroming heeft steeds dezelfde omvang.

Dit systeem is echter aan wijziging onderhevig. Ieder jaar stijgt de schade bij overstroming als gevolg van stijging van het aantal inwoners en economische groei. Ook het watersysteem verandert door diverse oorzaken: ieder jaar stijgt de kans op een waterstand hoger dan de dijkhoogte een beetje. Om beide redenen stijgt de verwachte schade. Daarom hebben we een strategie nodig voor dijkverhoging om zodoende in de loop der tijd een efficiënt veiligheidsniveau te handhaven. Dit is het probleem waarvoor dit hoofdstuk probeert een oplossing te vinden.

Door de dynamische aspecten is de wiskundige oplossing van het probleem is niet zo eenvoudig. Vandaar dat we in de rest van dit hoofdstuk een kwalitatieve, economische uiteenzetting geven, waarin we de principes en de hoofdconclusies uitleggen. Deze schets is intuïtief en kan om begrijpelijk te blijven ook niet altijd helemaal precies zijn. De wiskundige afleidingen van het werkelijk voor de berekeningen gebruikte model staan in bijlage A.

We gaan kort in op de uitkomsten van Van Dantzig, die zich eind 1953 voor de dezelfde vragen gesteld zag bij de voorbereiding van het Deltaplan. De verschijnselen die Van Dantzig heeft willen opnemen in zijn model, zijn in principe dezelfde als waarmee hier wordt gestart. In zijn formule blijken echter fouten te zitten. Bovendien is de hier gevolgde aanpak uitgebreider, omdat Van Dantzig zich heeft geconcentreerd op het antwoord op de vraag: 'hoeveel?' en de 'wanneer?' vraag niet heeft beantwoord.⁵

2.2 Het optimale schade-interval

2.2.1 Vaste kosten bij investeren leiden tot sprongen bij de dijkhoogte

Om de sluipende verslechtingen in het systeem te compenseren zouden we de dijk voortdurend een klein stukje kunnen verhogen. Dit is echter zeer duur, want iedere verhoging brengt – afgezien van de kosten van de verhoging zelf – ook vaste investeringskosten met zich mee. Vaste kosten zijn de noodzakelijke kosten die moeten worden gemaakt voordat tot een verhoging van de dijken kan worden overgegaan. Hiertoe behoren onder andere de plankosten en de kosten van aanvoer van materieel. Ook het verwijderen van een wegdek op de dijk en de bekleding ervan en de vermoedelijke overlast voor de omgeving zijn voor een belangrijk deel niet afhankelijk van de omvang van de verhoging. Wegens de vaste kosten is het beter om meer ineens te doen, zodat we daarna een tijd lang niet hoeven te investeren. We zouden ook kunnen overwegen zoveel ineens te doen dat we daarna zeer lange tijd niet meer hoeven investeren. Gezien de voortdurende systeemverandering zouden we dan heel veel ineens moeten doen,

⁵ Er is ook een hoofdstuk van Vrijling en Van Beurden (V&B, 1990) in het boek *Coastal Engineering*, maar daarin wordt geen rekening gehouden met economische groei. Sommige van hun formules zijn een bijzonder geval van de hier afgeleide formules, maar dat geldt niet voor alle. Ook zijn zij er niet in geslaagd om de formule af te leiden met het antwoord op de 'wanneer' vraag.

zodat we zitten met zeer hoge rentekosten en een lange tijd overdreven hoog veiligheidsniveau. Ook dit lijkt dus geen goede strategie.

Het beste lijkt dus een aanpak met periodiek een flinke investering in dijkverhoging en daarna een tijd wachten. Maar het is wel verstandig om bij die eerste investeringsbeslissing rekening te houden met het feit dat er later nog meer verhogingen zullen volgen, zodat we de huidige verhoging beperkt kunnen houden.

2.2.2 Sprongen bij de dijkhoogte leiden tot schommeling in veiligheid

Door de sprongen in de dijkhoogte gaan de overstromingskansen en daardoor de jaarlijks verwachte overstromingsschade schommelen.⁶ Na een dijkverhoging zijn ze beide laag (bovengrens van het veiligheidsinterval). Daarna nemen ze beide weer toe; de verwachte schade wegens de economische groei overigens sneller dan de overstromingskansen. Op een zeker moment vinden we de overstromingskansen en verwachte overstromingsschade zo groot geworden (ondergrens veiligheidsinterval) dat er opnieuw geïnvesteerd wordt. Door de investering dalen overstromingskansen en verwachte schade dan in een klap weer een stuk.

Waar het nu om gaat, is de optimale grenzen te bepalen van dat veiligheidsinterval. Hebben we die grenzen eenmaal vastgesteld, dan is de beslissing op ieder moment duidelijk. Zolang het systeem zich boven de ondergrens van het veiligheidsinterval bevindt, doen we niets. Zodra het systeem echter op of onder de ondergrens van het veiligheidsinterval uitkomt, investeren we zoveel dat we na dijkverhoging weer op de bovengrens van het veiligheidsinterval zitten.⁷

Uit deze formulering blijkt ook hoe de twee grenzen samenhangen met de twee basisvragen: Wanneer? en: Hoeveel? De ondergrens geeft – in vergelijking met de actuele situatie – het antwoord op de vraag: ‘Wanneer investeren?’ De bovengrens geeft – gegeven de beslissing om nu te investeren – antwoord op de vraag: ‘Hoeveel investeren?’

2.2.3 Bovengrens veiligheidsinterval S^+ = Hoeveel investeren?

Gegeven een beslissing om te investeren zullen we zoveel ineens willen investeren dat de kosten van nog iets meer dijkverhoging net niet meer opwegen tegen de met die verhoging samenhangende vermindering van de verwachte schade. De ondergrens van het schade-interval (= bovengrens veiligheidsinterval), S^+ , kan dus worden bepaald als de dijkverhoging waarbij de marginale investeringskosten en de marginale baten (verwachte schadevermindering) van die dijkverhoging aan elkaar gelijk zijn. Merk op dat de vaste kosten van investeren in deze afweging niet voorkomen. Alleen de variabele investeringskosten zijn hier van belang, dat wil zeggen het deel van de investeringskosten dat rechtstreeks afhangt van de omvang van de actie.

⁶ Verwachte schade is het product van de kans op overstroomd maal de kosten bij overstrooming. Dit begrip wordt onder technici ook wel aangeduid als ‘risico’, gedefinieerd als kans maal gevolg. Het woord risico wordt echter ook gebruikt in de betekenis van onzekerheid en dus ook wel als een soort equivalent van kans. Vandaar dat we in dit rapport uitsluitend zullen spreken over verwachte schade en het woord risico niet zullen gebruiken.

⁷ Dat deze (s^-, s^+) strategie voor het ‘aanvullen van voorraden’ optimaal is, is bewezen door Scarf in 1960. Hier hebben we weliswaar te maken met een ingewikkelder situatie, maar in essentie zijn de hier afgeleide criteria dezelfde als zijn formules.

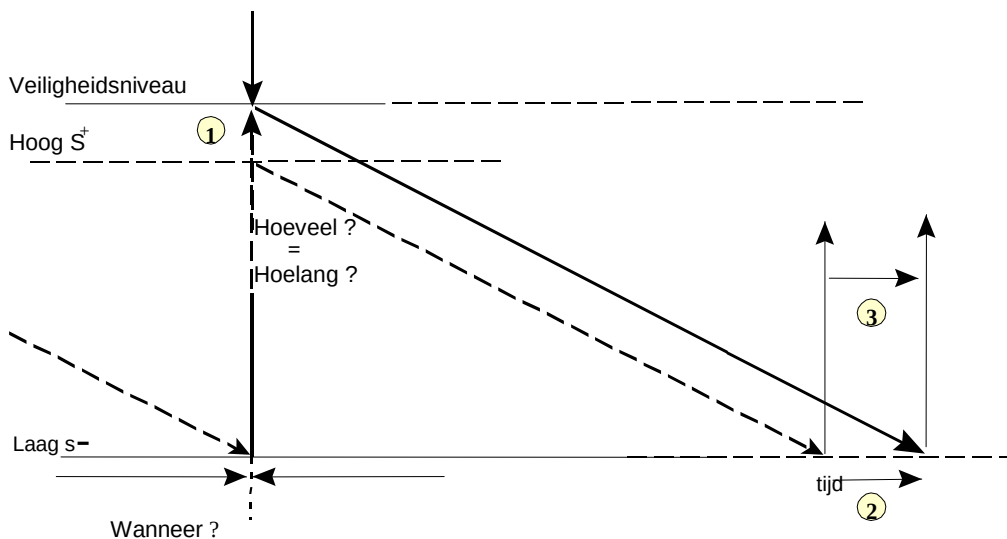
Maar met deze formulering zijn we er nog niet. Immers, meer investeren betekent dat het ook langer gaat duren voordat we aan de volgende investering toekomen. Daardoor komt niet alleen de onderkant van het interval met weinig schade lager te liggen, maar ook de bovenkant van het interval met veel schade hoger te liggen. Bovendien verschuift het tijdstip van de volgende investering naar achteren en daarmee ook alle daarmee samenhangende investerings- en schadekosten.

Figuur 2.1 illustreert de beslissingsvragen. Horizontaal staat de tijd afgezet en verticaal de overstromingskans of de verwachte schade. Beide stijgen in de loop der tijd. De figuur laat de drie plaatsen zien waar de hoeveelheidsvraag invloed heeft op de kosten. Meer investeren heeft, zoals gezegd, drie effecten:

1. De directe stijging van het beschermingsniveau aan het begin;
2. De verlenging van het gebied met meer schade aan het einde⁸, en
3. Het opschuiven naar de toekomst van alle kosten die samenhangen met volgende perioden.

De formule die het optimale antwoord geeft op de hoeveelheidsvraag, is dan ook gecompliceerd.

Figuur 2.1 Schematische weergave van de twee keuzes en effecten daarvan



2.2.4 Ondergrens veiligheidsinterval s^- = Wanneer investeren?

Na dijkverhoging neemt de veiligheid weer langzamerhand af totdat een maximaal schadeniveau s^- is bereikt. Op dat moment moet de dijk opnieuw worden verhoogd. Twee

⁸ In figuur 2.1 is alleen de verlenging getekend, maar bij een groter interval wordt zowel het maximum hoger als het minimum lager.

overwegingen spelen bij de bepaling van dat moment een rol. De eerste is dat we de verwachte schade zo min mogelijk willen laten oplopen en dus zo snel mogelijk opnieuw willen investeren. Anderzijds moet die vervolginvestering wel rendabel zijn. De vermindering van de verwachte schade van een nieuwe actie moet opwegen tegen de kosten, inclusief de vaste kosten. Het helpt dat de jaarlijkse baten van een dijkverhoging jaar voor jaar toenemen omdat de verwachte schade zonder dijkverhoging voortdurend zou stijgen wegens economische groei en klimaatverandering. De jaarkosten van de dijkverhoging (bestaande uit de rentekosten en het gewone onderhoud) blijven echter ongeveer gelijk. We gaan er daarbij vanuit dat de dijk bij normaal onderhoud in de loop der tijd dezelfde waterkerende prestatie kan blijven leveren, zodat afschrijving niet nodig is. Door de combinatie van stijgende jaarlijkse baten en gelijkblijvende jaarlijkse kosten mogen we aannemen dat als een investering het eerste jaar rendabel is, hij zeker rendabel is over de verdere levensduur.

Als we een optimale investering met een jaar uitstellen, missen we de opbrengst in het eerste jaar, maar verandert er verder niets aan toekomstige situaties en afwegingen. Vervroegen we een optimale investering met een jaar, dan voegen we een jaar toe met een negatief rendement omdat de jaarkosten van de investering dan groter zijn dan de verwachte schadevermindering. Ook dan verandert er niets aan toekomstige afwegingen. Uit de twee negatieve ontwikkelingen bij variëren in de tijd blijkt dat het optimale moment voor investeren aanbreekt zodra het eerstejaarsrendement nul (of positief) wordt. Het voor dit probleem relevante rendementscriterium is dus het eerstejaarsrendement en niet de netto contante waarde.⁹

Omdat het om het rendement van de totale kosten gaat, hangen het tijdstip, en daarmee ook de omvang van de optimale dijkverhoging, af van de relatieve omvang van de vaste kosten bij investeren. De omvang van de dijkverhoging bepaalt samen met het tempo van de verslechtering van het systeem de lengte van de periode tussen twee investeringen.

2.2.5 Verwachte overstromingsschade is het criterium

Tot nu toe hebben we nog wat vaag gelaten op welke variabele het veiligheidsinterval betrekking heeft. Gaat het om de overstromingskans of om de verwachte overstromingsschade?

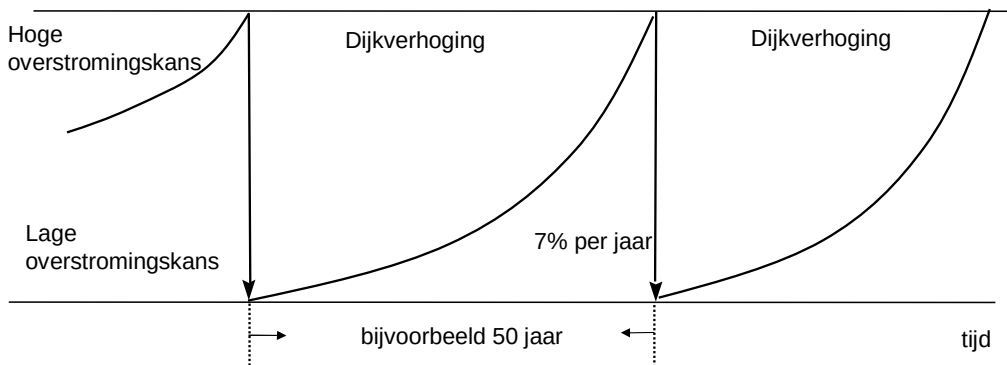
Wie let op de Wet op de waterkering, zal zeggen dat het de overstromingskans is. Immers, de wet geeft voor de overstromingskans een constante, maximale waarde (p), die in de huidige dijkverhogingstrategie dus de ondergrens vormt van het veiligheidsinterval.¹⁰ Als de werkelijke overstromingskans stijgt boven de maximaal toegelaten kans p , moet actie worden ondernomen. Het kan aan de specifieke omstandigheden liggen welke actie dan het meest

⁹ Het eerstejaarsrendement staat in hoofdstuk 7, formule (7.1) en wordt daar als criterium gebruikt om de rentabiliteit van het voorkeurspakket te evalueren.

¹⁰ Let op, de gebruikelijke terminologie kan bij dit probleem leiden tot misverstanden! In het navolgende bedoelen we steeds met de *ondergrens* van het *veiligheidsinterval* de veiligheid die hoort bij een *lage dijkhoogte* H^- . De bijbehorende overstromingskans p^- en verwachte overstromingsschade s^- zijn dan juist het hoogst. Evenzo bedoelen we met de *bovengrens* van het *veiligheidsinterval* de veiligheid die hoort bij een *hoge dijkhoogte* H^+ . De bijbehorende overstromingskans p^+ en verwachte overstromingsschade s^+ zijn dan juist het laagst.

rendabel is. Volgens de wet is het interval dus als geschetst in Figuur 2.2, waarbij de wet zich dus niet uitspreekt over de bovengrens van het veiligheidsinterval, P^+ . Tot nu toe leverde de formule van Van Dantzig een wiskundig-economische onderbouwing voor deze strategie.

Figuur 2.2 Schematisch verloop van de overstromingskansen volgens de wet bij herhaald investeren



Wie echter goed let op de bovengenoemde criteria voor de twee grenzen van het veiligheidsinterval:

- Marginale investeringskosten gelijk aan marginale schadevermindering plus kostenverschuiving;
- Verwachte schadevermindering in het eerste jaar gelijk aan de jaarkosten van de investering;

ziet dat de goede variabele in de criteria de verwachte overstromingsschade is en niet de overstromingskans. Dit blijkt ook uit de volgende economische formulering van het probleem.

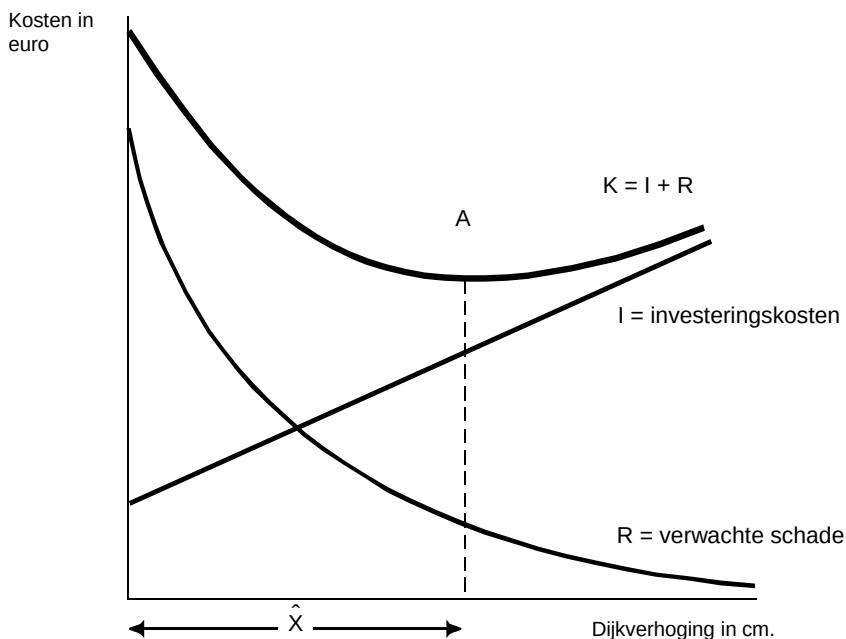
2.3 Economische formulering van het beslissingsprobleem

2.3.1 Beslissing voor een periode

Het probleem is economisch het makkelijkst te formuleren als kostenminimalisatie over een zeer lange (oneindige) tijdshorizon. Gedurende die lange periode lopen we enerzijds een toenemende kans op overstromingsschade. Anderzijds maken we af en toe investeringskosten waarmee we de kans op schade in een klap weer verkleinen. Wat we willen minimaliseren, is de gediscoteerde som van alle verwachte overstromingskosten en alle investeringskosten in de toekomst. Daarbij gaat het uitdrukkelijk niet alleen over financiële kosten en baten, maar om alle maatschappelijke kosten en baten. Instrumenten om de som van alle kosten te minimaliseren zijn de momenten waarop we investeren, en de omvang van die investeringen.

Voor een eenmalige investering schetst Figuur 2.3 het beslissingsprobleem.¹¹ In dat geval gaat het alleen om de omvang van de eenmalige dijkverhoging, X . De omvang van de dijkverhoging staat aangegeven op de horizontale as. Verticaal staan de kosten getekend. Van linksonder naar rechtsboven lopen de investeringskosten I , hier getekend met een rechte lijn. Van linksboven naar rechtsonder dalen de verwachte schadekosten R naarmate de dijk verder wordt verhoogd. Door de kromlijnjige daling van de overstromingskansen bij verdere dijkverhoging worden deze kosten van de restschade wel steeds kleiner, maar nooit gelijk aan nul. De bovenste lijn geeft de som van beide kosten weer. Wat we proberen te vinden, is de omvang van de dijkverhoging (X) waarbij de totale kosten zo klein mogelijk zijn, namelijk in het punt A.

Figuur 2.3 Totale kosten in afhankelijkheid van de dijkverhoging bij een eenmalige verhoging



Eenmalige oplossing van het probleem met behulp van Figuur 2.3 leidt tot een van de twee eerder genoemde criteria. In het punt A zijn de marginale kosten van investeren gelijk aan de marginale baten van minder schade. In het getekende geval van eenmalig investeren is het wanneer-criterium niet echt duidelijk.¹²

2.3.2 Beslissing voor meer perioden

Het beslissingsprobleem voor meer perioden is ingewikkelder. De keuzen die we maken over het moment waarop we de eerste investering doen en de omvang van die dijkverhoging,

¹¹ Figuur 2.3 is een kopie van figuur 3.1.3 uit het rapport van de Deltacommissie (1960), zij het dat hieraan vaste kosten bij actie zijn toegevoegd.

¹² Omdat er geen veranderingen zijn in de loop der tijd, is er slechts één beslissing te nemen: nu of nooit. Die beslissing komt tot uitdrukking in de eis dat ook de totale kosten van het investeren van X kleiner moeten zijn dan het verschil in schade tussen al dan niet investeren en wel over de hele tijd dat de investering effect heeft. Met andere woorden ook de netto contante waarde moet positief zijn. Dit is niet getekend in de figuur.

beïnvloeden vanzelfsprekend het tijdstip waarop we de tweede keer willen investeren. Hetzelfde geldt weer voor alle daaropvolgende investeringen. Bij het nemen van de eerste beslissing zouden we dus met de gevolgen daarvan voor alle mogelijke beslissingen tot in de oneindige toekomst in onderlinge samenhang rekening moeten houden. Dat lijkt in het algemeen onmogelijk.

Er kan echter sprake zijn van regelmaat en daarmee van herhaling van eerdere situaties en acties. Dit vergemakkelijkt de constructie van een optimaal interval voor de verwachte schade. Er is af te leiden dat onder vrij algemene omstandigheden het interval voor de verwachte schade constant is.¹³ Daarvoor moet onder andere gelden:

- De levensduur van de dijk(verhoging) is zeer lang;
- De snelheden van alle veranderingen blijven in de toekomst gelijk;
- De kosten van dijkverhoging zijn constant in de tijd en niet afhankelijk van de hoogte van de aanwezige dijk.

De eerste voorwaarden hebben meer het karakter van enige stilering van de verre toekomst dan dat ze essentiële beperkingen inhouden. Het zijn vooral de groeisnelheden voor de eerstkomende tijd, zeg 50 jaar, die bepalend zijn voor de huidige beslissing (zie verder paragraaf 2.3.3). Op de veronderstelling over het verloop van de investeringskosten komen we aan het einde van deze paragraaf terug.

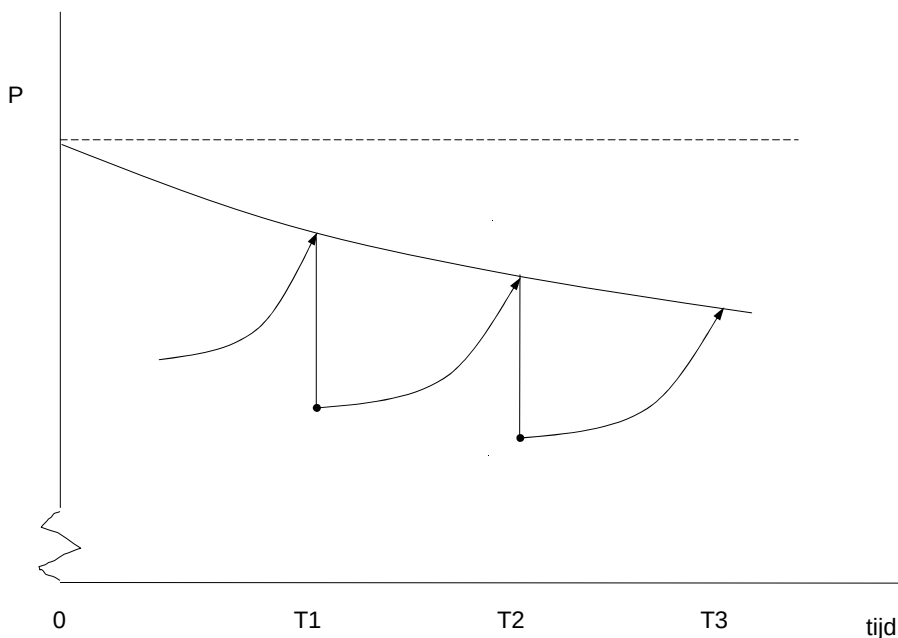
Het gevolg van de constantheid van het optimale schade-interval en de stijging van de schade bij overstroming is, dat de kans op overstroming structureel ongeveer even veel moet dalen als het tempo van de economische groei binnen de dijkring. De noodzaak van daling van de overstromingskansen om deze reden wordt tegenwoordig ook door velen in de praktijk onderkend, zie bijvoorbeeld Jorissen (2003) of het rapport van de Commissie Noodoverloopgebieden (Luteijn, 2002). Het blijkt ook uit het centraal stellen van de verwachte overstromingsschade in het project VNK, daar overstromingsrisico genoemd. De gewenste nieuwe veiligheidspolitiek is getekend in Figuur 2.4. In Figuur 2.4 geeft de horizontale as de tijd weer, de verticale as het veiligheidsniveau. Het veiligheidsniveau is uitgedrukt als P , de overstromingskansen. Dus, hoe kleiner P , des te groter de veiligheid. De figuur laat zien dat op de tijdstippen T_1 , T_2 , T_3 in dijkverhoging wordt geïnvesteerd. De veiligheid verbetert dan sprongsgewijs. Direct na de investering is ze gelijk aan P^+ , het veiligheidsniveau, dat hoort bij het zwarte bolletje. Na de investering neemt het veiligheidsniveau door een toename van de waterafvoer gestaag af. Dit is weergegeven met de kromme, stijgende lijntjes vanuit de zwarte bolletjes. Wanneer een bepaalde veiligheidsondergrens wordt bereikt, wordt opnieuw geïnvesteerd, waardoor de overstromingskansen weer sprongsgewijs daalt. Dit is weergegeven met de verticale, dalende lijntjes naar het volgende zwarte bolletje.

¹³ Het algemene probleem is ook oplosbaar als niet aan deze voorwaarden is voldaan, maar dan is het schade-interval niet constant. Daarom zijn dan veel ingewikkelder oplosmethoden nodig, welke worden toegelicht in bijlage A, paragraaf 9.

Zoals uit de figuur blijkt, daalt de overstromingskans in de tijd. De p 's die horen bij de tijdstippen waarop besloten wordt om te investeren, komen namelijk steeds lager te liggen. Dit heeft te maken met de waarde van de te beschermen goederen die door economische groei toeneemt. In de figuur is deze bovengrens voor de overstromingskans weergegeven met een kromme, dalende lijn. Om dezelfde reden stijgt ook het veiligheidsniveau dat wordt verkregen, direct nadat de investering is gedaan. Dit komt in de figuur tot uitdrukking in het steeds lager liggen van de zwarte bolletjes.

Bij constant blijvende investeringskosten blijkt het nu optimaal om er voor te zorgen dat de stijging van de veiligheid (= dalende overstromingskansen in de tijd) precies de stijging van de schade bij overstroming compenseert. Dit resulteert in een constant interval voor de verwachte schade in de loop der tijd.

Figuur 2.4 Schematisch verloop van de overstromingskansen bij herhaald investeren



In rapport gebruikte model is ingewikkelder

Om de uiteenzetting eenvoudig te houden is in dit hoofdstuk 2 alleen het meest eenvoudige geval behandeld met een constante investeringskosten functie. Inmiddels is het model zodanig uitgebreid dat de investeringskosten ook afhankelijk mogen zijn van de dijkhoogte. Dit blijkt veel beter aan te sluiten bij de inzichten van de ingenieurs. Gevolg is dat het optimale schade-interval op dezelfde wijze met de dijkhoogte mee gaat schuiven als de investeringskosten. De standaard dijkverhoging bij herhaling en de tijd tussen de herhalingen blijven wel gelijk.

Voorafgaand aan de herhalingsinvesteringen is er – afhankelijk van het feit of de huidige schadeverwachting hoger of lager ligt dan de ondergrens van het veiligheidsinterval – of een aanloopperiode of er wordt onmiddellijk geïnvesteerd. De omvang van een onmiddellijke

investering kan afwijken van de standaardinvestering omdat er bij onmiddellijk investeren meestal een achterstand moet worden ingehaald. Bijlage A levert voor deze strategie de wiskundig-economische onderbouwing. Dit is het model dat in de hoofdstukken 4 en 5 wordt gebruikt om de resultaten per dijkkring te berekenen.

2.3.3 Betekenis tijdshorizon en vervolginvesteringen

De vraag kan rijzen wat het belang is om nu zo nadrukkelijk met de verre toekomst rekening te houden als in de vorige paragraaf beschreven, en dan nog wel in de vorm van een oneindige horizon. Bestaan die uitkomsten over een oneindige horizon wel altijd? Kunnen we niet voor iedere afzonderlijke beslissing volstaan met alleen rekening te houden met de kosten en baten daarvan over bijvoorbeeld de eerste 100 jaar? In hoeverre beïnvloedt de toevoeging van de vervolginvesteringen de beslissing over de eerste?

Het eerste antwoord op deze vragen is dat rekening houden met vervolginvesteringen juist leidt tot een inperking van de horizon voor de eerste investering. Hoe die vervolginvesteringen er uit zien, blijkt eigenlijk niet echt van belang, zie de toelichting in paragraaf 5.15.1 aan de hand van de varianten in dat hoofdstuk. Het enige aspect van vervolginvesteringen dat voor de beslissing over de huidige omvang van de investering echt van belang is, is dat bij de keuze van de omvang ook het moment van de eerste vervolginvestering in de tijd wordt opgeschoven of dichterbij gehaald. Kortom, het eerder beschreven derde effect van de eerste investering. Met de omvang van de eerste investering wordt de relevante tijdshorizon van de eerste vervolgperiode bepaald. Wat er precies wordt opgeschoven, doet minder ter zake. De beste gok die we daarover nu kunnen maken, is de optimale investeringsstrategie die behoort bij een aantal gestileerde veronderstellingen over de verre toekomst. Stileren vergemakkelijkt het rekenwerk aanzienlijk. Bovendien bestaat de oneindige oplossing wiskundig altijd, ongeacht mogelijke waarden van de parameters.¹⁴ Dat komt omdat het de investeringen zijn die de omvang van de schade beperkt houden, en niet de waarden van de parameters.

Integendeel, juist als we vervolginvesteringen buiten beschouwing laten, komen we in situaties terecht die – over de flinke tijdsperioden die hier aan de orde zijn – al snel tot volledig onjuiste resultaten gaan leiden, omdat de baten dan over een te lange periode worden meegenomen, zie bijlage A, paragraaf 8.2. Het niet of onvoldoende rekening houden met toekomstige investeringen zou leiden tot te vroege en te grote investeringsbeslissingen. Illustratief daarvoor is dat de formule van Van Dantzig, waarin niet goed met de toekomst rekening wordt gehouden, altijd leidt tot hogere eerste investeringen dan volgen uit de hier ontwikkelde formules. Goed rekening houden met het bestaan van vervolginvesteringen is dus meestal zeer nuttig voor de rentabiliteit van de huidige investering, ongeacht de precieze waarden van groeivoeten of tijdshorizon die we daarbij hanteren.

¹⁴ Dat is in de foutieve formule van Van Dantzig overigens niet het geval. Daarin moet de economische groei bijvoorbeeld kleiner blijven dan de disconteringsvoet, hetgeen in het verleden over lange periodes niet het geval is geweest.

Aan een voorwaarde moet dan wel zijn voldaan, namelijk dat de tijdshorizon voor de werkelijke veranderingen echt lang is. Dat kan een probleem zijn bij de bovenrivieren, als we rekening mogen en willen houden met een maximum in de rivierafvoer. De overschrijdingskans wordt dan boven een zekere dijkhoogte theoretisch echt nul. Op dit probleem gaan we hier niet verder in en verwijzen naar bijlage A, paragraaf 9. Wel zou het niet moeilijk zijn om in de periode voorafgaand aan de eerste vervolginvestering rekening te houden met andere groeivoeten dan tijdens de vervolginvesteringen.

2.4 Wat is de beste strategie voor de bepaling van de dijkhoogte?

2.4.1 Algemene aanpak

Uit de twee voorafgaande paragrafen kunnen we nu de strategie afleiden die voor ieder moment de beste beslissing geeft over de dan gewenste verandering van de dijkhoogte.

1. De eerste stap is berekenen wat de actuele grenzen van het optimale schade-interval zijn met gebruikmaking van de twee rendementscriteria uit par. 2.2. Daarmee weten we ook de ideale investeringsomvang aan het begin van een nieuwe periode en de kosten daarvan.
2. De tweede stap is nagaan hoe de huidige schadeverwachting ligt ten opzichte van dit interval. Is de huidige schadeverwachting lager dan de maximaal toegelaten schade van het in stap 1 berekende optimale interval, dan doen we voorlopig niets. Is de huidige schadeverwachting groter dan of gelijk aan de in stap 1 berekende maximaal toegelaten schade, dan voeren we een zodanige dijkverhoging uit dat we uitkomen op de ondergrens van het schade-interval.¹⁵
3. Herhaal de bovenstaande procedure regelmatig met de dan beste gegevens. Daarmee corrigeren we regelmatig de inschattingfouten over de afgelopen periode. Daardoor blijft het systeem boven de dan actuele ondergrens voor de veiligheid.

2.4.2 Bijzondere gevallen

Belangrijke bijzondere gevallen ontstaan als het tempo waarmee de verwachte schade stijgt, sterk varieert in de tijd. De meest voor de hand liggende reden is de omvang van de economische groei. Het is heel goed mogelijk dat voor een afzonderlijke dijkkring het groeitempo van te beschermen waarden vele malen hoger ligt dan gemiddeld in Nederland, denk bijvoorbeeld aan IJburg. Een dergelijk voorbeeld suggereert dan ook direct de oplossing. Gebruik in de berekening niet de huidige schade bij overstroming en de groei daarvan, maar ga onmiddellijk uit van de schade bij overstroming na voltooiing van het investeringsproject binnen de dijkkring. Wegens die investeringsprojecten maakt het gewenste veiligheidsniveau een sprong. Na afloop van het grote investeringsproject is de extreme economische groei voorbij en kunnen de formules met een normaler groeitempo worden toegepast. Zoals gezegd is er bij ieder tempo van economische groei een optimale oplossing.

¹⁵ De uitspraak geldt niet zonder meer als er te laat wordt geïnvesteerd en de verwachte schade al beduidend groter is dan de optimale bovengrens. Dit wordt meer precies uiteengezet in hoofdstuk 4.

De tweede oorzaak kan liggen bij het watersysteem. De verslechtering daarvan moet dan groot zijn. De kosten om dat tegen te gaan zullen dan vermoedelijk ook sterk toenemen. Dan wordt ook de laatste voorwaarde van groot belang, namelijk of de kosten van het verhelpen van dit probleem wel beperkt blijven of ook relatief sterk gaan toenemen. Er is namelijk wel een bovengrens voor het tempo waarin de investeringskosten mogen stijgen. Stijgen die te hard, dan is geen economisch rationele veiligheidsactie meer mogelijk en zal het gebied moeten worden opgegeven.

Met de beschrijving van enige belangrijke bijzondere gevallen is het beslissingsprobleem in principe opgelost. Zoals gezegd staat de afleiding van de formules in bijlage A, zowel op de wiskundig correcte manier (paragraaf A.3) als op een eenvoudige manier op basis van een voor de hand liggende veronderstelling over regelmatige herhaling (paragraaf A.4).

3 Gegevens

Voor het uitvoeren van de berekeningen zijn voor de 22 onderzochte dijkringen gegevens nodig over de overstromingskansen en de ontwikkeling daarvan; over de schade bij overstroming en de ontwikkeling daarvan; over de investeringskosten; en tenslotte over de te hanteren disconteringsvoet.

3.1 Benodigde gegevens

Om de in hoofdstuk 2 geschetste oplossing van het veiligheidsprobleem daadwerkelijk voor dijkringen uit te kunnen rekenen zijn gegevens nodig. De algemene gegevens worden achtereenvolgens in dit hoofdstuk besproken. Op twee plaatsen zal voor meer details worden verwezen naar de bijlagen B en C. Voor de berekeningen met systeemwerking is meer informatie vereist dan voor de berekeningen per afzonderlijke dijkkring. Die specifieke informatie wordt behandeld in hoofdstuk 6.

We beginnen met een opsomming van alle variabelen die in de berekeningen een rol spelen. Een deel daarvan zijn de gegevens die in de volgende paragrafen uitgebreider worden besproken en gekwantificeerd: (De letters tussen haakjes verwijzen naar de symbolen die in de formules worden gebruikt, bijvoorbeeld in bijlage A).

Exogene variabelen (variabelen waarvan de waarde buiten het rekeninstrument moet worden vastgesteld):

- De overstromingsschade in de te beschermen dijkkring in het uitgangsjaar (V);
- De toename van de overstromingsschade door dijkverhoging (ζ);
- Het tempo van economische groei (= toename schade bij overstroming) (γ);
- De disconteringsvoet (δ).

Deze vier variabelen hebben te maken met de schade bij een overstroming. Door economische groei neemt die schade toe. Ook is er een positief verband tussen overstromingsschade en hoogte van de waterstand bij overstroming. Om de verwachte overstromingsschade (kans op overstroming maal schade) over de jaren heen op eenzelfde noemer te brengen zodat we ze mogen optellen, worden de verwachte schades in de toekomst gedisconteerd.

- De parameter van de kansverdeling van de wateraanvoer in het uitgangsjaar (α);
- De structurele stijging van de waterstand per jaar (η);
- Dijkhoogte of overstromingskans in uitgangsjaar (H_0 of P_0).

Met deze drie variabelen kan de kans op overstroomen worden berekend in jaar t bij een gegeven dijkhoogte.

- De kosten van een investering in dijkverhoging als functie van de omvang van de verhoging (u) en de hoogte van de dijk ($I(u,H)$), waaruit de variabele kosten van een investering in dijkhoogte per centimeter ($I'(u,H)$) zijn af te leiden.

De laatste twee variabelen bepalen de hoogte en de vorm van de investeringskosten. De kosten per extra centimeter dijkverhoging behoeven niet voor iedere centimeter gelijk te zijn, maar mogen afhankelijk zijn van de hoogte van de dijk.

Endogene variabelen (variabelen die uitkomst zijn van het rekeninstrument):

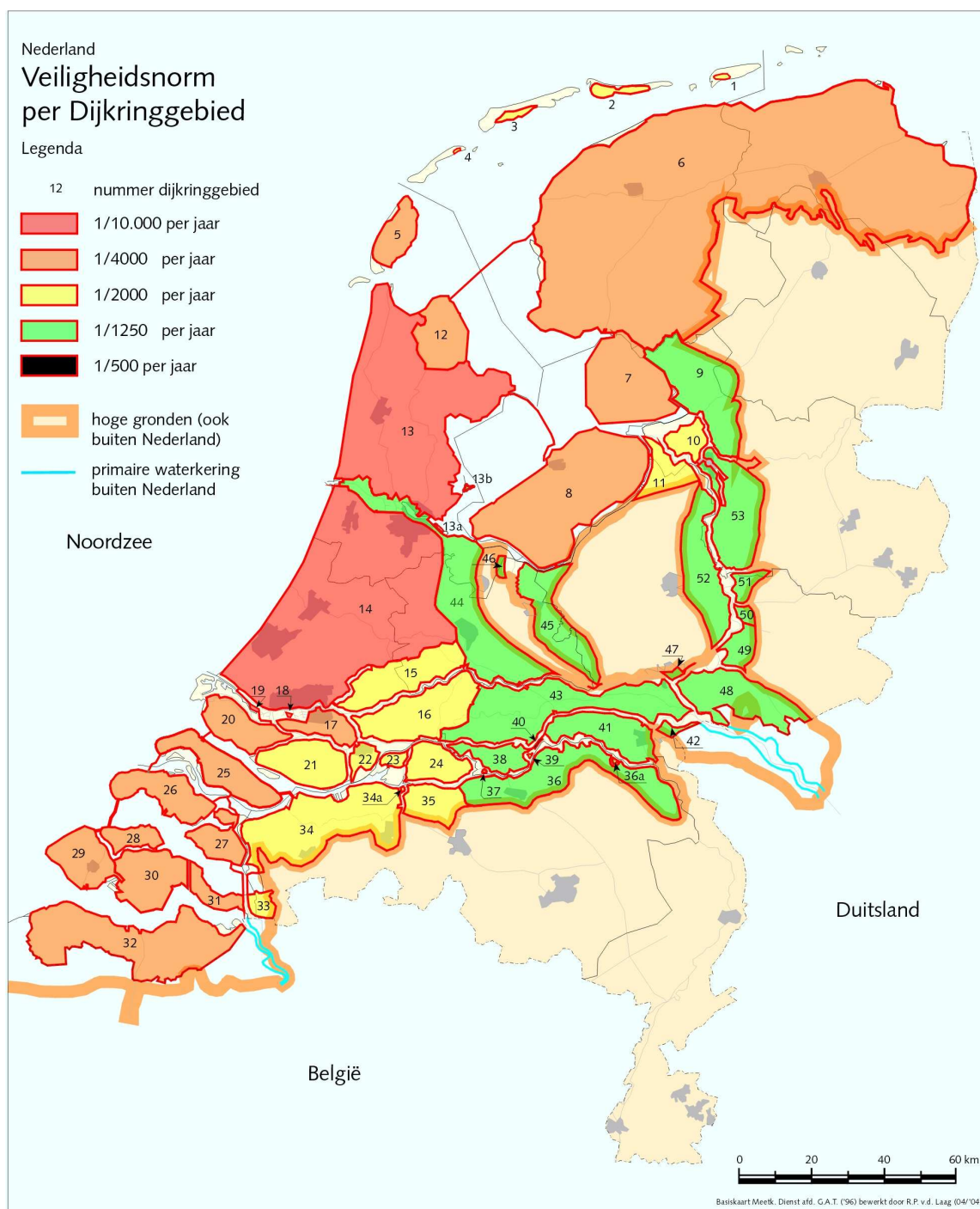
Indien de waarden voor de exogene variabelen bekend zijn, levert het rekeninstrument voor iedere dijkkring de volgende uitkomsten:

- Jaar waarin tot de eerstvolgende investering in veiligheid moet worden overgegaan (T_1);
- Omvang van de dijkverhoging in dat jaar in centimeters (X)
- Kans op overstroming in diverse jaren (P_t),
- Lengte van de herhaalperiode tussen jaren waarin opnieuw moet worden geïnvesteerd (D);
- Hoogte van de dijkverhoging bij herhaling (u);
- Verwachte overstromingsschade (restschade) in diverse jaren (S_t);
- Kosten van de investeringen ($I(X)$ en $I(u)$);
- Totale kosten van investeren en restschade (netto contante waarde van investeringskosten en resterende verwachte overstromingsschade) (K_t)

3.2 Dijkkringen

In de berekeningen wordt een onderscheid gemaakt in de dijkkringen van het bovenrivierengebied (BOR) en het benedenrivierengebied (BER). Tabel 3.1 en Tabel 3.2 bevatten een opsomming van de dijkkringen waarvoor de berekeningen worden uitgevoerd. De bijgevoegde kaart geeft de geografische ligging van de dijkkringen weer. De toelichting op de in de tabellen vermelde waterparameters staat in de volgende paragraaf.

Figuur 3.1 Dijkkringen



Tabel 3.1 Dijkkringen bovenrivierengebied BOR (zie ook tabel 3.3)

Nr.	Naam	Maximale wettelijke overstromingskans	Overstromingskans in 2001 P_0	Kansparameter op hoogste punt α	Stijging waterstand middenscenario η
		1/jaar	1/jaar	1/cm	cm per jaar
38	Bommelerwaard	1/1250	1/585	0,025	0,41
40	Heerwaarden	1/2000 (Waal)	1/855	0,025	0,42
		1/500 (Maas)	–	–	–
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/585	0,025	0,42
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/585	0,026	0,45
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/585	0,025	0,45
44	Kromme Rijn	1/1250	1/3050	0,032	0,32
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/6120	0,033	0,32
47	Arnhemse- en Velperbroek	1/1250	1/585	0,029	0,36
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/585	0,023	0,50
49	IJsselland	1/1250	1/585	0,035	0,30
50	Zutphen	1/1250	1/585	0,033	0,32
51	Gorssel	1/1250	1/585	0,036	0,29
52	Oost Veluwe	1/1250	1/585	0,036	0,30
53	Salland	1/1250	1/585	0,032	0,34
10	Mastenbroek	1/2000	1/2270	0,033	0,32
11	IJsseldelta	1/2000	1/855	0,032	0,32

De dijkkringen 10 Mastenbroek en 11 IJsseldelta horen eigenlijk tot het benedenrivierengebied, omdat ze onder andere ook grenzen aan het IJsselmeer. Daarom hebben ze ook een wettelijke norm van 1/2000. Omdat de overstromingskansen van deze dijkkringen langs de rivieren sterk beïnvloed worden door de rivierafvoer en door eventuele overstroming van bovenstrooms gelegen dijkkringen, worden ze in het veiligheidsonderzoek tot het bovenrivierengebied gerekend.¹⁶ De dijkvakken die niet direct aan de IJssel grenzen, zoals die langs het IJsselmeer, zijn niet in het onderzoek betrokken.

Tabel 3.2 Dijkkringen benedenrivierengebied BER

Nr.	Naam	Maximale wettelijke overstromingskans	Overstromingskans in 2001 P_0	Kansparameter op kritieke punt α	Stijging waterstand middenscenario η
		1/jaar	1/jaar	1/cm	cm per jaar
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	1/2000	1/729	0,050	0,76
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	1/2000	1/906	0,057	0,76
22	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1802	0,070	0,62
23	Biesbosch (Noordwaard)	1/2000	1/729	0,053	0,80
24	Land van Altena	1/2000	1/531	0,044	1,06
35	Donge	1/2000	1/509	0,036	1,06

¹⁶ Dit wordt bevestigd door het in bijlage B.9 besproken onderzoek van het RIZA.

3.3 Kans op overstroming

3.3.1 Bovenrivieren

In dit onderzoek stellen we de kans op overstroming van een dijkkring gelijk aan de kans op een waterhoogte boven de dijkhoogte.¹⁷ Het gaat dus steeds om de overschrijdings- of overbelastingskansen, zie ook het kader overstromingskansen in hoofdstuk 1.¹⁸ Deze overstromingskans is bij de in het onderzoek betrokken bovenrivieren afhankelijk van de wateraanvoer bij Lobith in combinatie met de relatie tussen die wateraanvoer en de lokale waterhoogte. Met betrekking tot de wateraanvoer bij Lobith is relevant:

- Dat er variatie is rond de gemiddelde waterafvoer en
- Dat dit gemiddelde in de tijd toeneemt.

Overstromingskansen in 2001 (P_0)

De variatie in de aanvoer kan bij hoge afvoeren worden beschreven met een exponentiële verdelingsfunctie voor de waterafvoeren (Noortwijk e.a., 2002). Dit resulteert in een exponentieel verband tussen de overschrijdingskansen en de omvang van de aanvoer, welk verband bekend staat als de ‘werklijn’ (in Lobith). De parameters van de werklijn zijn ontleend aan Parmet et al. (2002). Deze gelden voor het jaar 2001 en vervangen een oude werklijn die gold voor de periode 1996-2000. Met behulp van de nieuwe werklijn zijn de actuele overstromingskansen van de dijkringen in 2001 als volgt berekend.

Het Deltaplan Grote Rivieren is erop gericht (geweest) om langs de rivieren de dijken zodanig te verhogen dat overal aan de toenmalige invulling van de wettelijke norm was voldaan. Daarom kan zonder probleem worden aangenomen dat alle dijken in 2001 minimaal voldoen aan hun wettelijke norm toegepast in 2000. Die norm was meestal gebaseerd op een 1/1250 overstromingskans voor een aanvoer bij Lobith van 15 dzd m³/s, zie ook Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Een aantal dijkringen was in 2000 veiliger dan de wettelijke norm in die situatie voorschreef: er was sprake van bruikbare overhoogte. In de berekeningen wordt hiermee in principe rekening gehouden. Het bleek echter te lastig om overal aan voldoende duidelijke informatie te komen (zie echter ook onder). Vandaar dat de overstromingskansen in 2001 meestal zo zijn ingesteld dat zij in dat jaar corresponderen met de overschrijdingskans van een afvoer van 15 dzd m³/s in Lobith bij toepassing van de nieuwe werklijn, waarin bij 16 dzd m³/s in Lobith een overschrijdingskans behoort van 1/1250. Dat geeft standaardwaarden voor de overstromingskansen in 2001 (P_0) van 1/585 resp. 1/855, afhankelijk van het feit of de wettelijke overstromingskans 1/1250 dan wel 1/2000 bedraagt. De verandering van werklijn van 2000 op

¹⁷ Onder aftrek van de waakhoogte voor (golf)overslag door wind.

¹⁸ Zoals reeds gemeld, wordt in het project VNK onderzocht wat de echte overstromingskansen zijn. Voorlopige resultaten wijzen in de richting dat zij om allerlei redenen groter zijn dan de overschrijdingskansen. In het onderzoek Rampenbeheersingsstrategie bij overstroming (RBSO) wordt er daarnaast mee gerekend dat er op kritieke momenten ook nog oversterkte aanwezig is bij de waterkeringen, zodat de overstromingskansen in RBSO niet veel afwijken van de overschrijdingskansen waarmee hier wordt gerekend.

2001 impliceerde dus, dat de overstromingskansen waarmee in 2001 rekening wordt gehouden, meer dan het dubbele zijn van hetgeen tot 2000 werd aangenomen.

Uitzonderingen op deze standaardsituatie worden veroorzaakt door overhoogte langs de hele dijkkring en staan aangegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2.

Bij het afsluiten van het rapport is betere informatie ter beschikking gekomen over de overstromingskansen in 2001 langs de bovenrivieren, zie Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Verbeterde overstromingskansen voor dijkringen in het bovenrivierengebied				
Nr.	Naam	Maximale wettelijke	Overstromingskans	Overstromingskans
		overstromingskans	in 2001	in 2001
			volgens tabel 3.1	verbeterde opgave
			P_0	P_0
		1/jaar	1/jaar	1/jaar
38	Bommelerwaard	1/1250	1/585	1/1010
40	Heerewaarden	1/2000 (Waal)	1/855	1/1550
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/585	1/995
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/585	1/715
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/585	1/645
44	Kromme Rijn	1/1250	1/3050	1/2565
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/6120	1/4140
47	Arnhemse- en Velperbroek	1/1250	1/585	1/470
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/585	1/550
49	IJsselland	1/1250	1/585	1/565
50	Zutphen	1/1250	1/585	1/425
51	Gorssel	1/1250	1/585	1/320
52	Oost Veluwe	1/1250	1/585	1/525
53	Salland	1/1250	1/585	1/315
10	Mastenbroek	1/2000	1/2270	1/2630
11	IJsseldelta	1/2000	1/855	1/785

In de laatste kolom van Tabel 3.3 is met alle wijzigingen in maatgevende waterstanden tussen 1996 en 2001 rekening gehouden. De hierboven gegeven redenering is echter niet principieel gewijzigd. De belangrijkste verschillen in de maatgevende hoogwaterstanden zitten langs de Waal na Nijmegen, waar de stijging belangrijk minder groot is dan boven- en benedenstrooms, en langs de IJssel, waar de toename van de zijdelingse toestroom hier en daar tot veel hogere overstromingskansen heeft geleid. Deze verbeterde informatie kon nog slechts op enkele plaatsen in het rapport worden verwerkt, namelijk in paragraaf 4.6 en in hoofdstuk 7. Ook in de samenvatting en conclusies wordt uitsluitend gebruik gemaakt van deze betere informatie.

Kansparameter α

De relatie tussen de wateraanvoer bij Lobith en de waterhoogte op een zeker punt kan worden beschreven met een zogeheten Q/h-relatie. Per dijkkring is het meest kritieke (kwetsbare) punt vastgesteld. Bij de bovenrivieren is dat bovenstrooms het vermoedelijke instroompunt bij een overstroming. Voor deze punten zijn vervolgens de Q/h-relaties vastgesteld. De benodigde

gegevens zijn ontleend aan Schropp (2003). In combinatie met de werklijn in Lobith levert dit een parameter (α) voor de kansverdeling van de waterhoogten (gemeten in centimeters) die afhankelijk is van de dijkkring. Bij de dijkringen in de bovenrivieren varieert deze kansparameter van 0,025 tot 0,036.

Verandering in afvoer (η)

De aanvoer neemt jaarlijks structureel iets toe. De gemiddelde stijging hangt af van veranderingen in het klimaat en de investeringen in waterbeheersing in Duitsland (Rijn) en België (Maas). Bij de Rijn is uitgegaan van een stijging van de gemiddelde waterstand in Lobith (η) met afgerond 0,5 centimeter per jaar. Deze waarde volgt uit het middenscenario dat voor de afvoeren is opgesteld en is ontleend aan Buiteveld en Schropp (2003). In het kader klimaatscenario's (pag 30) staat vermeld wat de drie klimaatscenario's behelzen. Mede door de verschillende Q/h-relaties per dijkkring werkt deze stijging in de afvoer lokaal enigszins verschillend uit in de stijging van de waterhoogte. De in Tabel 3.1 vermelde cijfers voor η zijn mede ontleend aan aanvullende informatie van het RIZA (WSR 2003-012 en 019).

Interessant is daarbij het product van de parameters α en η . Dit geeft het stijgingstempo per jaar van de verwachte schade als gevolg van waterstandsveranderingen. Deze procentuele stijging is daarmee vergelijkbaar met bijvoorbeeld het tempo van economische groei. Het stijgingstempo door waterstandsveranderingen ligt bij BOR op ruim 1% per jaar. Dit tempo is dus in de regel lager dan het structurele tempo van de economische groei. Daarvoor wordt in deze studie 2% per jaar gebruikt (zie paragraaf 3.4.3). Bij BOR is economische groei dus een belangrijker reden om te streven naar meer veiligheid dan de verslechtering van het watersysteem.

3.3.2 Benedenrivieren

Bij de benedenrivieren is de situatie ingewikkelder. Naast de bovengenoemde elementen spelen ook wind en waterstand op zee of IJsselmeer een belangrijke(re) rol. Daarom is bij het RIZA een kansverdeling uitgerekend van golfoverslag als gevolg van de combinatie van rivierafvoer en wind in relatie tot verschillende dijkhoogtes. Dit verband staat bekend als de decimeringshoogte. Het vergt enige berekeningen om de decimeringshoogten en de stijgingen van de waterstanden om te rekenen in de voor dit model geschikte parameters. Een complicatie daarbij is dat geen algemeen geldend verband is te geven voor de invloed van de wind op de waterstanden. Onder sommige omstandigheden zijn veranderingen in waterstanden bijna onafhankelijk van de invloed van de wind en kunnen effecten maar het beste worden opgeteld. Onder andere omstandigheden werkt wind versterkend op een waterstandstijging en moet deze stijging worden vermenigvuldigd met een windfactor groter dan 1.¹⁹

¹⁹ Hoe de informatie ontleend aan Lodder, 2004, is verwerkt tot parameters in het model, staat uitgebreid toegelicht in bijlage B. Daarin staat ook een alternatieve verzameling 'veiliger' parameters beschreven die gebruikt worden in de berekening van een variant in paragraaf 4.4.

De decimeringshoogten zijn op de grens van het bovenrivierengebied gelijk aan die welke volgen uit de lokale ‘werkklijn’ (dus $\alpha \approx 0,035$), maar lopen ondanks de extra invloed van de wind sterk af richting het ‘vaste’ waterniveau van zee of IJsselmeer. Per centimeter waterstandsverhoging is er dan een grotere verandering in de kans dan bij de bovenrivieren. Dit komt tot uitdrukking in een hogere waarde van de parameter α in Tabel 3.2.

Door dit verloop in decimeringshoogte en door lokale verschillen in de trend van de waterstand is de omvang van een dijkverhoging om weer een gelijke overstromingskans te bereiken als eerder niet uniform langs een dijkkring. Om hiermee rekening te houden wordt een aanpassing uitgevoerd op de omvang van de investeringskosten. Ook deze aanpassing wordt toegelicht in bijlage B.

Gezien de vaste onderlinge relatie tussen de dijkverhogingen op diverse plaatsen maakt het voor de vorm van de berekening van de investeringskosten niet uit op welke plaats de dijkverhoging als standaard voor de dijkkring wordt gekozen. Dit is wel van belang voor de veranderingen in de overstromingskans en daarmee voor het stijgingstempo van de verwachte schade. Daarom wordt per dijkkring gerekend met de parameters die behoren bij de locatie waar de combinatie van kansparameter α en de trend η de grootste verslechtering van de overstromingskans te zien geeft. In de praktijk blijkt dit punt vaak samen te vallen met het punt met de laagste dijkhoogte boven NAP. Dit zijn meestal de meest benedenstroomse punten, maar nog net voor de grote wateren. Want naar zee toe lopen de dijken weer op t.o.v. NAP.

Het is interessant om te bezien hoe groot in BER de invloed is van de veranderingen in het watersysteem op de verwachte schade. Het product $\alpha\eta$ levert in BER groeitempi die uiteenlopen van 3,8 tot 4,3% per jaar. Dat is aanzienlijk meer dan bij BOR en ook ongeveer het dubbele van het tempo van economische groei waarmee op lange termijn wordt gerekend. Bij ‘veiliger’ waarden van de parameters ligt dit groeitempo van de verwachte schade als gevolg van waterstandstijging zelfs in de buurt van 5% per jaar.

3.4 Schade bij overstroming

3.4.1 Monetaire schade

Maximale omvang schade bij overstroming

De schade bij overstroming van een dijkkring is van uiteenlopende aard. Beperken we ons in eerste instantie tot de schade die zonder al te veel problemen in een geldbedrag kan worden uitgedrukt, dan kan die worden ontleend aan de schademodule in het HoogWaterInformatiesysteem (HIS). Bij de samenstelling van de schadebedragen is een onderscheid gemaakt in de volgende drie schadecategorieën (DWW 2003-056):

1. Directe schade aan bestaande goederen

Hieronder wordt de schade verstaan die optreedt aan roerende en onroerende goederen, inclusief dieren en oogst, indien het gebied waarin die goederen zich bevinden, overstroomt. Soms zal er slechts sprake zijn van beschadiging, soms zullen goederen bij een overstroming in

zijn geheel verloren gaan. Er is in beperkte mate rekening gehouden met mogelijke evacuatie van roerende goederen of dieren. Maar de schade aan onroerende zaken is verreweg het grootst.

2. Directe schade door bedrijfsuitval

Bij overstroming van een gebied moeten bedrijven hun bedrijfsvoering stilleggen: er is sprake van bedrijfsuitval. De omvang van de schade die dit veroorzaakt, hangt niet alleen af van de duur van de overstroming maar vooral ook van de aard van de economische activiteiten in de betreffende dijkkring. Na een overstroming zullen, grosso modo, de meeste activiteiten die tot de dienstensector worden gerekend zich sneller herstellen dan veel industriële activiteiten.

3. Indirecte schade

Behalve directe schade kan er ook indirecte schade optreden. Na een overstroming kunnen doorvoerwegen (soms) niet meer worden gebruikt zodat van omwegen gebruik moet worden gemaakt. Toeleverende en afnemende bedrijven in dijkkringen die niet zijn overstroomd, kunnen eveneens in de problemen komen. De bovengrens van de indirecte schade in een dijkkring is berekend met een input- outputmodel. Omdat er ook verplaatsing van activiteiten van de overstroomde dijkkringen naar niet overstroomde dijkkringen plaats zal vinden, is die bovengrens een overschatting van de werkelijke indirecte schade. Daarvoor is in de schademodule gecorrigeerd. Bovendien, indien er meerdere dijkkringen overstromen, is (een deel van) de indirecte schade voor de overstroomde dijkkring I, een directe schade in de eveneens overstroomde dijkkring J. Er is dan een gevaar op dubbeltellingen. Hier kan rekening mee worden gehouden. In dit onderzoek is er voor gekozen de indirecte schade zoals opgenomen in het HIS ongewijzigd te gebruiken.

Zoals gezegd bevat de slachtoffer- en schademodule van het HIS per dijkkring gegevens over de maximale directe en indirecte schade (1, 2 en 3) in het jaar 2002 in het prijspeil van 2000. Voor een verantwoording van de basisgegevens zij verwezen naar Briene et al. (2002). Slachtoffers en het aantal gewonden, gevolgen voor milieu en schade aan landschap, natuur en cultuur-historische objecten (LNC waarden) zijn in het HIS niet beschouwd, zie daarvoor paragraaf 3.4.2. Verder is in paragraaf 5.3 een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Schade bij overstroming afhankelijk van de dijkhoogte

De schadebedragen in de schade- en slachtoffer module zijn in eerste instantie maximale schades. Bij een overstroming zal de schade echter niet altijd gelijk zijn aan dit maximum. De schade is afhankelijk van de hoogte tot waar het water komt te staan. Die hoogte, de overstromingsdiepte, kent een bovengrens. Ze zal langs de rivieren nooit hoger zijn dan de laagste kruinhoogte van de dijkkring. Een dijkkring kan in dit verband als een ‘bakje’ worden beschouwd dat bij een overstroming volloopt. Het laagste punt van de opstaande randen (de laagste kruinhoogte boven NAP) bepaalt dan de maximale waterdiepte in de dijkkring. Bij de bepaling van de maximale waterdiepte na overstroming is rekening gehouden met het feit dat de meeste dijkkringen langs de rivieren als het ware ‘scheve bakjes’ zijn. Als het water naar de laagste gelegen gebieden loopt, richt het onderweg ook schade aan. De schade in de hellende

gebieden, waar het water bij een overstroming doorheen loopt maar die zelf niet onder water komen te staan, is gelijk gesteld aan de waterschade bij een overstroming van 1 meter. Tabel 3.4 en Tabel 3.5 geven een overzicht van de schadebedragen per dijkkring in 2002 bij de huidige dijkhoogten en bij een laagste kruinhoogte die 150 centimeter hoger ligt dan de huidige.²⁰

Tabel 3.4 Informatie over schade in dijkringen bovenrivierengebied BOR in 2002 (prijspeil 2000)

Nr.	Naam	Aantal inwoners	Materiële schade bij bestaande kruinhoogte	Materiële schade bij kruinhoogte + 1,5 m	ζ
			mln euro	mln euro	1/cm
38	Bommelerwaard	45300	2543	4918	0,0041
40	Heerewaarden	1100	34	65	0,0039
41	Land van Maas en Waal	251200	7854	12438	0,0027
42	Ooij en Millingen	14100	915	1115	0,0012
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	307000	16352	22708	0,0020
44	Kromme Rijn	651500	30797	53953	0,0035
45	Gelderse Vallei	262600	8169	12214	0,0024
47	Arnhemse- en Velperbroek	77100	882	1656	0,0033
48	Rijn en IJssel	193300	5453	9159	0,0031
49	IJsselland	19000	653	1210	0,0037
50	Zutphen	42400	1710	3289	0,0040
51	Gorssel	10600	464	930	0,0043
52	Oost Veluwe	110700	3114	4174	0,0017
53	Salland	202000	7901	12298	0,0027
10	Mastenbroek	30200	1268	2337	0,0038
11	IJsseldelta	46600	1316	2357	0,0035
	Totaal	2264700	89425	144818	

Bron: DWW (2003-056), tabel 1 en tabel 3.

Tabel 3.5 Informatie over schade in dijkringen benedenrivierengebied BER in 2002 (prijspeil 2000)

Nr.	Naam	Aantal inwoners	Materiële schade bij bestaande kruinhoogte	Materiële schade bij kruinhoogte + 1,5 m	ζ
			mln euro	mln euro	1/cm
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	202800	9683	17719	0,0038
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	209700	19379	26620	0,0020
22	Eiland van Dordrecht	106300	8170	12761	0,0028
23	Biesbosch (Noordwaard)	300	54	74	0,0020
24	Land van Altena	51300	2197	4019	0,0037
35	Donge	97200	3631	7092	0,0041
	Totaal	667600	43114	68285	

²⁰ DWW heeft de berekeningen uitgevoerd (DWW, 2003). Bij de twee schadebedragen in het overstroomde deel volgens tabel 1 is het verschil geteld door schade op het hellend vlak in tabel 3. De laatste informatie heeft alleen betrekking op de huidige kruinhoogte. Daardoor is de schade bij kruinhoogte +1,5 m iets overschat, maar in alle dijkringen nog steeds duidelijk minder dan het maximum.

Deze benadering van de overstromingsschade impliceert dat bij een verhoging van de dijken van een dijkkring (verhoging van de opstaande randen van het bakje) de schade bij een overstroming kan toenemen. Niet alleen omdat bij hogere dijken een groter deel van de dijkkring onder water kan komen te staan, maar ook omdat het water hoger komt te staan. In de berekening wordt een exponentieel verband verondersteld tussen de schade bij overstroming (V_t) en de dijkhoogte (H_t):

$$V_t = V_o e^{\zeta(H_t - H_o)} \quad (3.1)$$

waarin V schade bij overstroming volgens formule (3.3)
 H dijkhoogte in cm

De parameter wordt berekend uit het verschil tussen de huidige schade en die bij een kruinhoogte van 150 cm hoger.

$$\zeta = \frac{1}{150} \ln \left(\frac{V_{+150}}{V_o} \right) \quad (3.2)$$

Deze parameter staat in de laatste kolom van Tabel 3.4 en Tabel 3.5. De stijging van de overstromingsschade door de stijging van de overstromingsdiepte bij dijkverhoging verkleint het effect van de vermindering van de verwachte schade als gevolg van daling van de overstromingskansen door dijkverhoging.²¹ Bij de bovenrivieren gaat het om een verkleining met ongeveer 10% ($\zeta \approx 0,1\alpha$).

3.4.2 Waardering van niet-monetaire schades

Behalve schades die redelijkerwijs in een geldbedrag kunnen worden uitgedrukt, zijn er ook schades waarvoor dit moeilijker en, dikwijls ook, meer omstreken is omdat markten voor de deze schades ontbreken, zie bijv. Diamond e.a. of Stolwijk (2004).

Deze moeilijker in geld uit te drukken schades zijn van verschillende aard. Allereerst zijn er de slachtoffers, het dode vee (en dan niet de gebruikswaarde), het psychische leed, de nadelige gevolgen van een sociale ontwrichting. Recent Belgisch onderzoek (KINT, 2001) naar deze ‘niet-tastbare’ gevolgen van de overstroming die in 1998 delen van de provincie Luik trof, wijst uit dat die gevolgen aanzienlijk zijn. In dit Belgische onderzoek wordt onder andere gewezen op verliezen van persoonlijke voorwerpen met een hoge emotionele waarde, het ongemak, gezondheidsproblemen van lichamelijke aard, psychische problemen in de vorm van stress en

²¹ Tegelijkertijd geldt na een stijging van de laagste kruinhoogte natuurlijk dat bij een overstroming van de dijkkring de kans op overstroming van de benedenstrooms gelegen dijkkringen afneemt doordat bij overstroming meer water wordt opgevangen. Dit effect wordt meegenomen in de berekening van systeemwerking.

depressies enz. Een poging om via ‘contingent valuation’ de persoonlijke ‘niet-tastbare’ kosten in een geldbedrag uit te drukken, leverde overigens maar bescheiden bedragen op.

Van een andere orde zijn de schade aan ecosystemen, historische monumenten en cultuurhistorische en landschappelijke waarden. In zoverre het om unieke objecten gaat, kan de markt geen aanwijzing geven voor de waardering ervan.

Om in de empirische uitwerking toch rekening te houden met deze moeilijk of niet te waarderen schades, wordt in principe met twee correcties gewerkt. De eerste is een uitdrukking van de psychische en sociale schade. Ze is gelijk aan het product van aantal inwoners (N) en geschatte immateriële schade per inwoner (inclusief een bedrag voor de evacuatiekosten) (V(immaterieel)). De tweede is een opslagfactor (μ) die refereert aan de ecologische, cultuurhistorische en dergelijke schade. Deze factor is gelijk gesteld aan een bepaald percentage van de berekende materiële schade. Per dijkkring wordt voor het jaar waarin de berekening start, dus de volgende berekening gemaakt:

$$V = \mu * V(\text{materieel}) + N * V(\text{immaterieel}) \quad (3.3)$$

waarin: V	totale schade door onderlopen van een dijkkring
V(materieel)	materiële schade bij overstroming (mln euro, uit HIS)
N	aantal inwoners van een dijkkring
V(immaterieel)	immateriële schade per bewoner bij onderlopen van een dijkkring
μ	opslagfactor om met schade aan collectieve goederen rekening te houden en met aanpassing prijspeil naar 2003

Het aantal inwoners staat in Tabel 3.4 en Tabel 3.5. In eerste instantie zal voor V(immaterieel) een bedrag van 5000 euro per inwoner worden gebruikt. De gedachte daarachter is dat het hier vooral de overlast en evacuatiekosten betreft en veel minder een waardering voor het verlies door gewonden en door overlijden. Hierbij is gelet op het bovenvermelde Belgische onderzoek en op de waardering van een gezond levensjaar in berekeningen voor de efficiëntie van medische behandelingen. Aan een toegevoegd gezond levensjaar (QUALY, quality adjusted life year) wordt daarin een bedrag van 18 dzd euro toegekend. Voor dijkkring 15 Lopiker- en Krimpenerwaard met ong. 200 dzd inwoners resulteert dit in een bedrag van 1 mld euro voor immateriële schade bovenop het bedrag voor alle mogelijke materiële schade van bijna 10 mld euro in 2002. Het is de vraag of in het bedrag van 5000 euro per inwoner voldoende rekening is gehouden met het feit dat evacuatie reeds zal plaatsvinden in kritiek lijkende situaties en daarom waarschijnlijk vaker zal plaatsvinden dan een feitelijke overstroming. Het gaat dus om verscheidene evacuaties per overstroming. Bovendien kunnen meerdere evacuaties die niet worden gevolgd door een overstroming, leiden tot burgerlijke ongehoorzaamheid en daarmee bij een overstroming tot extra slachtoffers, die bij een goed verlopende evacuatie te vermijden waren geweest.

De opslagfactor voor collectieve goederen is voorlopig op 1 gezet. De factor μ geeft dan alleen de prijsstijging weer tussen 2000 en 2003. Deze is gelijk gesteld aan de stijging van de bouwkosten van woningen van 11,5%, dus $\mu = 1,115$.

We wegen een grote schade ineens niet zwaarder dan hetzelfde bedrag, maar dan als som van een aantal kleinere schades.²²

Door middel van een gevoeligheidsanalyse kan het effect van een andere (waardering van) (niet-tastbare) schade worden nagegaan, zie paragraaf 5.3.

3.4.3 Waardering toekomstige schades

De waardering van de te beschermen waardes kent nog twee andere aspecten, die te maken hebben met de tijd.

Ten eerste veranderen de hoeveelheden te beschermen goederen en andere waardes in de tijd. Als er vanuit wordt gegaan dat de economie binnen een dijkkring blijft groeien en dat ook de bevolking blijft toenemen, dan zal de waarde V eveneens toenemen. De schade bij overstroming op tijdstip t is dan:

$$V_t = V_o e^{\gamma t} \quad (3.4)$$

waarin: V_t schade bij overstroming op tijdstip t (mln euro)
 V_o schade bij overstroming op tijdstip 0 (=2002), volgens (3.3) (mln euro)
 γ tempo economische groei (perunen per jaar)

Omdat de investeringen in dijkverhoging ook betrekking hebben op een vergroting van de bescherming tegen het water in de (verre) toekomst (de optimalisering betreft in beginsel een oneindige horizon), is economische groei van groot belang. Gemakshalve veronderstellen we in de berekeningen dat de verandering in de te beschermen waardes in alle relevante dijkkringen gelijk is aan de lange termijn verwachting van de groei van de Nederlandse economie, zeg $\gamma = 2\%$.

Omdat we de waarde van schaarse collectieve goederen, voorzover die tot uitdrukking komt in de opslagfactor μ , laten meegroeien met de omvang van de overige goederen, wordt recht gedaan aan de toenemende relatieve schaarste van die goederen.

Een tweede kwestie is de waardering van de toekomst. De toekomst wordt, in het algemeen, lager gewaardeerd dan het heden. Daarom worden toekomstige waarden gediscoteerd met de gebruikelijke disconteringsvoet (δ) van 4% (reëel, risicovrij). Recent is ook een aanbeveling

²² Deze evenredigheid wijkt af van de huidige indicatieve norm voor groepsrisico in Nederland. Daarin wordt het aantal dodelijke slachtoffers in een ongeluk kwadratisch gewaardeerd. Een groot aantal doden bij een ongeluk wordt 10 keer zo erg gevonden als hetzelfde aantal doden maar dan als gevolg van 10 kleine ongelukken met ieder 1/10e van het aantal doden. In het buitenland hanteert men vaak andere, meer lineaire normen. Verder is hier aangenomen dat er door tijdige evacuatie weinig slachtoffers zullen vallen.

verschenen over hoe moet worden omgegaan met het niet-diversificeerbare, macro-economische risico (V&W et al., 2004). In paragraaf 5.6 en 5.13 wordt beargumenteerd waarom in dit geval hiervoor geen risico-opslag nodig is.

3.5 Investeringskosten van dijkverhoging

De beslissing om een dijk te verhogen is de uitkomst van een afweging. In die afweging spelen de investeringskosten van dijkverhoging een belangrijke rol. De investeringskosten bestaan uit twee elementen. Ten eerste zijn er de vaste kosten. Dit zijn de noodzakelijke kosten die moeten worden gemaakt voordat tot een verhoging van de dijken kan worden overgegaan. Hiertoe behoren onder andere de plankosten en de kosten van aanvoer van materieel. Daarnaast zijn er de variabele kosten. Dit zijn de kosten die worden gemaakt als daadwerkelijk tot een verhoging wordt overgegaan. Hoe hoger de dijk, hoe breder hij moet zijn. Dit betekent dat, *ceteris paribus*, de variabele kosten iets meer dan lineair toenemen met een centimeter dijkverhoging.

Van belang is ook dat de investeringscurven niet alleen betrekking hebben op gemiddelde omstandigheden. Lokaal, en dan moet vooral gedacht worden aan bewoonde gebieden, kunnen de kosten aanzienlijk hoger zijn. Soms is het dan niet voor de hand liggend (niet realistisch) om de dijken zonder meer te verhogen maar om, in plaats daarvan, voor een alternatief te kiezen, bijvoorbeeld voor het slaan van een damwand of voor een beweegbare kering. De stad Dordrecht is een voorbeeld van zo'n knelpunt. Naarmate de dijken hoger worden, blijken dit soort situaties meer voor te komen. De kosten van meer bijzondere constructies zijn in de schattingen voor de kostenfuncties opgenomen.

De projectorganisatie heeft informatie aangeleverd, die terzake kundige ingenieursbureaus hebben verzameld en opgesteld over de huidige investeringskosten bij enige verhogingen. In bijlage C is uiteen gezet hoe deze informatie is omgezet tot voor dit onderzoek bruikbare investeringskostenfuncties. Het is daarbij gebleken dat de kosten inderdaad afhankelijk zijn van de hoogte van de dijk. Daarom is het in hoofdstuk 2 ontwikkelde model aangepast en uitgebreid om ook met dit verschijnsel rekening te kunnen houden, zie bijlage A.

Om een indruk te geven van de uitkomsten zijn in Tabel 3.6 de investeringskosten per kilometer van het verhogen van de dijken met resp. 50, 75 en 100 centimeter weergegeven. De kosten per km dijk zijn in BER veel hoger dan in BOR. Voor de berekening worden die kosten nog verhoogd met een opslag van 25% als een schatting van de contante waarde van het extra onderhoud, dat ruwweg geschat is op 1% per jaar van het investeringsbedrag.²³ Deze gegevens worden niet rechtstreeks in het model gebruikt, maar in de vorm van investeringskostenfuncties. De kosten van een investering zijn daarbij lineair afhankelijk van de omvang van de dijkverhoging en tegelijk exponentieel afhankelijk van de hoogte van de dijk.

²³ Achteraf gezien is het mogelijk dat deze opslag te hoog is, als het gaat om verhoging van een bestaande dijk. In dat geval nemen de onderhoudskosten met veel minder toe dan 1% van het totale investeringsbedrag (incl. vaste kosten) van de toevoeging. Daardoor wordt het optimale veiligheidsniveau onderschat. Zie paragraaf 5.7 voor een variant over de investeringskosten.

Tabel 3.6 Investeringskosten dijkverhoging per kilometer

Nr.	Naam	Lengte dijk km	50 cm mln euro per km	75 cm	100 cm
Bovenrivieren					
38	Bommelerwaard	28,0	2,2	2,9	4,0
40	Heerewaarden	4,0	2,5	3,2	4,4
41	Land van Maas en Waal	37,0	2,8	3,7	4,8
42	Ooij en Millingen	18,5	2,2	2,8	3,7
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	171,9	3,5	4,6	5,9
44	Kromme Rijn	29,2	2,4	3,5	4,6
45	Gelderse Vallei	5,5	1,2	2,0	3,2
47	Arnhemse en Velperbroek	14,1	1,2	1,7	2,2
48	Rijn en IJssel	57,0	1,2	1,8	3,0
49	IJsselland	32,0	1,6	2,3	3,3
50	Zutphen	13,0	1,2	1,6	2,1
51	Gorssel	24,0	1,3	2,1	3,5
52	Oost Veluwe	68,8	2,2	3,0	4,1
53	Salland	42,0	2,6	3,4	4,5
10	Mastenbroek	14,5	2,8	4,0	5,0
11	IJsseldelta	25,0	4,3	5,5	7,0
Benedenrivieren					
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	45,1	6,8	8,9	11,1
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	85,2	8,5	11,0	13,3
22	Eiland van Dordrecht	37,3	6,6	8,4	10,2
23	Biesbosch (Noordwaard)	21,0	2,5	3,2	4,3
24	Land van Altena	43,0	3,5	4,7	6,1
35	Donge	27,6	4,7	6,4	7,9

Bron: Bijlage C

De lengte van de dijk in Tabel 3.6 is gemeten langs het stuk van de dijkring dat ligt in het gebied dat door het project Ruimte voor de Rivier wordt bestreken. Zo zijn dijken langs het IJsselmeer of langs het deel van de Maas in de bovenrivieren niet meegeteld.

4 Uitkomsten aparte veiligheidsberekeningen per dijkkring

Uitkomsten van de economisch gezien optimale strategie per dijkkring laten zien dat de gemiddeld optimale overstromingskans in 16 van de 22 onderzochte dijkringen kleiner is dan de wettelijke norm. Het lijkt verstandig om voor 9 van deze dijkringen te kiezen voor een gemiddelde overstromingskans die minstens twee keer zo klein is als de huidige wettelijke norm. Het meest extreem geldt dit voor de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei. Deze uitkomsten worden bevestigd door een eenvoudige controleberekening met het aantal inwoners per km dijk. Altijd in 2015 minimaal investeren tot de wettelijke norm, verhoogt de kosten niet sterk, behalve bij dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard). Het berekende optimale veiligheidsniveau voor die dijkkring indiceert ontpoldering. Bij BER kunnen er lokaal ongunstiger situaties zijn dan in de hoofdvariant, hetgeen leidt tot wat meer investeren. Bij BOR kan het lokaal meevallen. In het algemeen zijn de uitkomsten een ondersteuning voor ‘robuust ontwerpen’.

4.1 Berekeningswijze optimale strategie per dijkkring

Op basis van de theorie uit hoofdstuk 2 en de empirische gegevens over het rivierengebied uit hoofdstuk 3 is een rekeninstrument ontwikkeld waarmee de optimale veiligheidsniveaus voor alle dijkringen afzonderlijk kunnen worden berekend. In dit hoofdstuk presenteren we de uitkomsten van deze berekeningen voor de 22 onderzochte dijkringen in het rivierengebied.

Door de berekening voor iedere dijkkring apart uit te voeren blijft het effect van systeemwerking buiten beschouwing. Met systeemwerking bedoelen we de positieve of negatieve invloed die een overstroming van een dijkkring kan hebben op de overstromingskansen van andere dijkringen. Voor een dijkkring als 40 Heerewaarden, die dient als scheiding tussen de Waal en de lager gelegen Maas, leidt een afzonderlijke berekening niet tot zinvolle resultaten. (Meestal sterk lijkend op die van dijkkring 23 Biesbosch.) Dijkkring 40 Heerewaarden ontleent zijn hydraulische waarde namelijk vooral aan het voorkomen van systeemwerking, in dit geval van een cascade-effect. Voor de volledigheid zijn sommige uitkomsten voor Heerewaarden toch gepresenteerd. Voor de meeste andere dijkringen is het effect van systeemwerking (vermoedelijk) veel minder groot. In hoofdstuk 6 gaan we kwalitatief in op systeemwerking. Daarbij beperken we ons tot het bovenrivierengebied; in het benedenrivierengebied is het effect van systeemwerking namelijk kleiner wegens de invloed van de zee.

Anders dan in het bovenrivierengebied hebben in het benedenrivierengebied, behalve de rivierafvoer, ook zee en wind een belangrijke(re) invloed op de overstromingskansen. Om daarmee rekening te houden zijn voor de dijkringen van het benedenrivierengebied aanpassingen in de gegevens over de kansverdeling op overstroming en de investeringen uitgevoerd, zie hoofdstuk 3 en bijlage B. Afgezien daarvan zijn de berekeningen voor dijkringen in het benedenrivierengebied in dit hoofdstuk identiek aan de berekeningen voor dijkringen in het bovenrivierengebied.

De waarden voor de economische en hydraulische parameters in het startjaar van de berekening zijn gelijkgesteld aan de ‘werkelijke’ waarden van die parameters in het jaar 2015.

De keuze voor 2015 als zichtjaar heeft te maken met het feit dat in dat jaar het project Ruimte voor de Rivier zou moeten zijn uitgevoerd. Een belangrijke veronderstelling daarbij is dat er tot het jaar 2015 geen andere investeringen in veiligheid gereedkomen.

Leeswijzer

In de volgende paragrafen zijn de belangrijkste uitkomsten samengevat. Om duidelijk te maken hoe het model werkt, worden eerst in paragraaf 4.2 de uitkomsten uitgebreid behandeld zonder rekening te houden met allerlei complicaties. Iedere oplossing van het model voldoet aan de twee optimaliteitsvoorwaarden van hoofdstuk 2. De eerste voorwaarde heeft betrekking op het *wanneer* van de investering. Kenmerkend voor een optimum is dat de investering vanaf het jaar van investeren rendabel is. De tweede voorwaarde betreft het *hoeveel* van de investering. Een kenmerk van de optimale investeringsomvang is dat de investeringskosten van een extra centimeter dijkhoogte niet opwegen tegen de extra veiligheidsbaten die er door worden verkregen.

Uitbreidingen en nuanceringen worden pas in de daarop volgende paragrafen getoond. In paragraaf 4.3 wordt rekening gehouden met de wettelijke norm. De gevolgen van het gebruik van andere en soms betere parameters voor de benedenrivieren staan in paragraaf 4.4. In 4.5 wordt een beleidsvoorstel uit de PKB behandeld dat relevant wordt bij toekomstige aanpassing van de afvoerverdeling.

Andere varianten komen meer voort uit onzekerheid over de waarden van parameters of variabelen. Deze zijn samengebracht in hoofdstuk 5, waar ze ieder kort worden besproken voorafgegaan door meer algemene beschouwingen over omgaan met risico en onzekerheid. De beleidsmatige conclusies die we uit dit alles trekken, staan bij elkaar in de Samenvatting en conclusies. Een aantal meer algemene conclusies staat aan het einde van hoofdstuk 5.

Bij de afsluiting van het rapport is nieuwe informatie ontvangen over de overstromingskansen in 2001, zie tabel 3.3. Deze informatie kon niet meer in het hele rapport worden verwerkt. Wel is aan het einde van dit hoofdstuk paragraaf 4.6 toegevoegd. Deze geeft aan welke in Tabel 4.1 en Tabel 4.3 vermelde uitkomsten wijziging behoeven. Die wijzigingen betreffen niet de optimale normen, maar uitsluitend de eerste stap om de norm te halen. Deze nieuwe informatie is wel integraal meegenomen in de rentabiliteitsberekening in hoofdstuk 7 en in de Conclusies en samenvatting in het begin van het rapport.

4.2 Uitkomsten optimale strategie per dijkkring

4.2.1 Overzicht van diverse overstromingskansen in 2015

Uit de theoretische afleiding in hoofdstuk 2 volgt dat de uitkomsten van het model resulteren in een optimaal interval voor de verwachte schade. Dat is echter moeilijk direct interpreteerbaar. Vandaar dat deze normbedragen voor de schade in tabel 4.1 en tabel 4.2 zijn omgerekend naar de overeenkomstige overstromingskansen in 2015. Wel moet in het navolgende steeds worden

bedacht dat deze voor 2015 geldende optimale overstromingskansen bij een vervolginvestering moeten dalen om de stijging van de te beschermen waarden op te vangen. Op dit dynamische aspect gaan we verder niet in. We beperken ons tot een presentatie van de situatie in het voor het project Ruimte voor de Rivier relevante jaar 2015.

Tabel 4.1 Jaarlijkse overstromingskansen van de dijkringen in het bovenrivierengebied

1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Feitelijk in 2001 tabel 3.1	Feitelijk in 2015	Optimale ondergrens in 2015	Optimale bovengrens in 2015	Gemiddelde in optimaal traject
38	Bommelerwaard	1/1250	1/585	1/500	1/840	1/3100	1/2350
40	Heerewaarden (Waalkant)	1/2000	1/855	1/740	–	–	–
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/585	1/500	1/1620	1/8700	1/6100
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/585	1/500	1/470	1/2850	1/1950
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/585	1/500	1/580	1/3250	1/2200
44	Kromme Rijn	1/1250	1/3050	1/2650	1/11630	1/46850	1/35100
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/6120	1/5280	1/19970	1/71150	1/53700
47	Arnhemse en Velperbroek	1/1250	1/585	1/500	1/1030	1/4300	1/3250
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/585	1/500	1/980	1/2700	1/2100
49	IJsselland	1/1250	1/585	1/500	1/290	1/1200	1/900
50	Zutphen	1/1250	1/585	1/500	1/2030	1/12200	1/8800
51	Gorssel	1/1250	1/585	1/500	1/260	1/950	1/700
52	Oost Veluwe	1/1250	1/585	1/500	1/680	1/3300	1/2350
53	Salland	1/1250	1/585	1/500	1/1540	1/10450	1/7100
10	Mastenbroek	1/2000	1/2270	1/1960	1/730	1/3850	1/2800
11	IJsseldelta	1/2000	1/855	1/740	1/310	1/1800	1/1350

Tabel 4.2 Jaarlijkse overstromingskansen van de dijkringen in het benedenrivierengebied

1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Feitelijk in 2001 tabel 3.2	Feitelijk in 2015	Optimale ondergrens in 2015	Optimale bovengrens in 2015	Gemiddelde in optimaal traject
15	Lopiker- en Krimpenervwaard	1/2000	1/730	1/430	1/1130	1/13900	1/4400
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	1/2000	1/905	1/490	1/930	1/16850	1/4200
22	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1800	1/980	1/990	1/30800	1/6400
23	Biesbosch (Noordwaard)	1/2000	1/730	1/400	1/30	1/400	1/150
24	Land van Altena	1/2000	1/530	1/280	1/410	1/5050	1/1600
35	Donge	1/2000	1/510	1/300	1/810	1/5400	1/2200

De eerste twee kolommen van tabel 4.1 en tabel 4.2 vermelden het nummer en de naam van de dijkkring. In de derde kolom staat de wettelijke veiligheidsnorm. De wettelijke normen moeten als de *wettelijk toegestane maximale overschrijdingskansen* worden geïnterpreteerd. Voor de meeste dijkringen in het bovenrivierengebied is de wettelijke norm 1/1250 per jaar.

Uitzonderingen zijn de Waalkant van de dijkkring 40 Heerewaarden en de dijkkringen 10 Mastenbroek en 11 IJsseldelta. Die kennen, net als de dijkkringen van het benedenrivierengebied, een wettelijke norm van 1/2000 per jaar.

Hoe verhielden de feitelijke overstromingskansen zich in 2001 tot de wettelijke norm? Het antwoord op die vraag is te vinden in kolom 4 van de tabellen. Het blijkt dat, met uitzondering van de dijkkringen 44 Kromme Rijn, 45 Gelderse Vallei en 10 Mastenbroek, de feitelijke overstromingskansen in 2001 in alle gevallen groter waren dan de wettelijke normen. Voor de meeste dijkkringen gold zelfs dat de overstromingskans meer dan twee keer zo groot was als de wettelijke norm.

Omdat de eerstkomende jaren nog niet in veiligheid geïnvesteerd wordt, zal de discrepantie tussen wettelijke norm en feitelijke overstromingskans voorlopig alleen maar groter worden. Immers, de hoeveelheid water die ons land binnenkomt, neemt trendmatig toe en tevens stijgt het peil van het zeewater. Kolom 5 laat zien tot welk niveau de overstromingskansen als gevolg van deze ontwikkelingen (volgens het midden klimaatscenario) tot 2015 zullen zijn gestegen. Zonder ingrijpen zullen voor sommige dijkkringen, bijvoorbeeld 24 Land van Altena en 35 Donge, de feitelijke overstromingskansen in 2015 zo'n 7 maal groter zijn dan die welke in de wet zijn vastgelegd.

Ook los van de wettelijke normen komt er een moment waarop het economisch aantrekkelijk is om in extra veiligheid te investeren (zie figuur 2.4). Zoals in hoofdstuk 2 is betoogd, hangt dit moment af van enerzijds de kosten van de investering en anderzijds de vermindering van de kans op overstroming. Met behulp van het model is de situatie berekend waarin het aantrekkelijk wordt om in dijkverhoging te investeren. De uitkomsten zijn omgerekend naar de bijbehorende optimale grenzen voor de overstromingskansen in 2015. De ondergrenzen voor de veiligheid staan in kolom 6 vermeld. In het bovenrivierengebied variëren de bij die situatie behorende maximale jaarlijkse overstromingskansen in 2015 van bijna 1/20000 voor dijkkring 45 Gelderse Vallei tot bijvoorbeeld 1/260 voor dijkkring 51 Gorssel. De kleine kans voor dijkkring 45 Gelderse Vallei heeft vooral te maken met de betrekkelijke korte lengte van de dijk langs de Nederrijn, maar ook de grote economische waarden die in deze dijkkring tegen overstroming moeten worden beschermd, zijn daarbij van belang. Ook in het benedenrivierengebied zijn de verschillen in overstromingskansen vlak voor het optimale tijdstip van investeren in dijkverhoging groot: 1/1130 per jaar voor dijkkring 15 Lopiker- en Krimpenerwaard tegenover een kans van 1/30 voor dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard).

Het blijkt dat de optimale ondergrenzen, de overstromingskansen net voor het optimale tijdstip van dijkverhoging, in 2015 voor de meeste dijkkringen (16 van de 21) weliswaar (veel) groter zijn dan de wettelijke normen, maar voor tweederde van de dijkkringen kleiner zijn dan de feitelijke overstromingskansen in dat jaar. Vanuit een gezichtspunt van economische rationaliteit duidt dit laatste op achterstallig onderhoud in veiligheid. Zo bedraagt, bijvoorbeeld, de berekende optimale maximale overstromingskans (ondergrens) in 2015 voor dijkkring 50 Zutphen 1/2030 per jaar. De feitelijke jaarlijkse overstromingskans in 2015 is echter 1/500,

ongeveer viermaal zo groot. Voor dijkkring 35 Donge is in 2015 de optimale jaarlijkse overstromingskans vlak voor investeren, 1/810, aanmerkelijk kleiner dus dan de feitelijke in 2015, die 1/300 bedraagt.

Nadat er is geïnvesteerd in veiligheid, neemt de kans op overstromen vanzelfsprekend in een klap fors af. Kolom 7 geeft aan hoe groot de overstromingskansen in 2015 zouden zijn direct nadat er in dat jaar een dijkverhoging van optimale omvang heeft plaatsgevonden. Niet verrassend, blijken die kansen beduidend kleiner te zijn dan voor de investering. Met uitzondering van de vier dijkringen 49 IJsselland, 51 Gorssel, 11 IJsseldelta en 23 Biesbosch (Noordwaard) zou de veiligheid voor de andere dijkringen dan aanmerkelijk boven de wettelijke normen liggen. Bijvoorbeeld, dijkkring 38 Bommelerwaard kent direct na een optimale investering een jaarlijkse overstromingskans van 1/3100, terwijl de wettelijke norm slechts het halen van een kans van (niet meer dan) 1/1250 voorschrijft.

Gemiddelde optimale overstromingskansen

Na een investering neemt de veiligheid van de dijkkring langzamerhand weer af (zie figuur 2.4). Aan de andere kant nemen de te beschermen economische waarden jaarlijks juist toe. Beide verschijnselen leiden dus tot een stijging van de verwachte schade. Na verloop van tijd wordt daarom een moment bereikt waarop het aantrekkelijk is om opnieuw in veiligheid te gaan investeren. Kolom 8 geeft aan wat in iedere dijkkring de gemiddelde optimale veiligheid is tussen twee optimale investeringsmomenten.²⁴ Deze gemiddelde veiligheid ligt, per definitie, tussen de berekende optimale bovengrens, de overstromingskans vlak na de eerste investering, en de optimale ondergrens, de overstromingskans vlak voor de volgende investering.²⁵

Bij de bepaling van de (gemiddelde) veiligheidsniveaus is de omvang van de te beschermen economische waarden wel belangrijk, maar niet overheersend. Doorslaggevend is de verhouding tussen de kosten van een optimale investering en de schade bij overstroming. Dat blijkt bijvoorbeeld uit een vergelijking van de dijkringen 42 Ooij en Millingen (O&M) en 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaard (BTC). Ondanks het feit dat de schade bij overstroming in 43 BTC maar liefst 18 keer zo groot is als in de kleine dijkkring 42 O&M (tabel 3.4), is er geen groot verschil in de berekende overstromingskansen. Dat komt omdat de dijken in de zeer uitgerekte dijkkring 43 BTC met rondom dijken 9 keer zo lang zijn als bij dijkkring 42 O&M met dijken aan slechts één kant, terwijl ook de kosten per km dijk bij BTC fors hoger zijn dan die bij O&M (Tabel 3.6).

Een vergelijking met de wettelijke normen laat zien dat in 12 van de 15 dijkringen in het bovenriviereengebied de optimale gemiddelde veiligheid (soms ver) boven de wettelijke normen ligt. Bijvoorbeeld, de gemiddelde veiligheid volgens het optimaliteitscriterium in dijkkring 41

²⁴ Bij de berekening is de voor 2015 geschatte waarde van de bovengrens (kolom 7) gebruikt, zodat ook de gemiddelde optimale kansen gerelateerd zijn aan dat jaar, zie bijlage A, paragraaf 8.1.

²⁵ Let wel dat de optimale ondergrens voor de *volgende* investering niet meer gelijk is aan de waarde in kolom 6! Niet alleen wordt de overstromingskans dan niet meer uitgerekend met behulp van de schade bij overstroming in 2015, maar ook zijn de investeringskosten afhankelijk van de gestegen dijkhoogte. Direct voorafgaande aan een volgende investering ligt het schade-interval daarom ook hoger dan bij de laatst uitgevoerde investering.

Land van Maas en Waal bedraagt 1/6100 terwijl de wettelijke norm slechts 1/1250 voorschrijft. In de overige drie dijkringen is in 2015 de gemiddelde optimale overstromingskans groter dan de wettelijke norm. Dit zijn dezelfde dijkringen waarvan we eerder al constateerden dat zelfs de minimale overstromingskansen groter zijn dan de wettelijke norm. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat in deze dijkringen het verschil met de wettelijke norm ieder jaar kleiner wordt onder invloed van de economische groei, die in deze berekening overal is gezet op structureel 2% per jaar.

Bij de benedenrivieren blijkt de gemiddelde optimale overstromingskans in de drie grootste dijkringen veel kleiner te zijn dan de wettelijke norm. Dat scheelt meer dan een factor 2. In dijkkring 24 Land van Altena en dijkkring 35 Donge liggen de optimale gemiddelde overstromingskansen rond de wettelijke norm. In dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) ligt optimale veiligheid zeer veel lager dan de wettelijke norm nu aangeeft.

Evaluatie van wettelijke normen

Bij de beoordeling van de wettelijke norm mag niet uit het oog worden verloren dat de wettelijke normen formeel betrekking hebben op de minimale veiligheid (= de maximale overstromingskansen) van een dijkkring. Dat ze hierboven toch zijn afgezet tegen de gemiddelde optimale overstromingskansen, komt omdat de wettelijke normen feitelijk ook fungeren als een bovengrens voor de veiligheid. De afgelopen decennia kan een voortdurende achterstand op de normen worden geconstateerd, zoals ook nu weer het geval is (vergelijk de wettelijke norm in kolom 3 met de feitelijke situaties in kolommen 4 en 5). Daardoor komt het werkelijke gemiddelde veiligheidsniveau niet eens overeen met de wettelijke norm. Beleidsmatig bestaat bovendien de neiging om met verbeteringen in het algemeen niet verder te gaan dan de wettelijke norm vereist.²⁶ Dat blijkt ook uit de handelwijze in het project Ruimte voor de Rivier om in 2015 te willen voldoen aan de norm voor 2001, dus zonder rekening te houden met de verwachte waterstandstijging volgens de klimaatscenario's. Dit terwijl uit de beleidslijn voor het hanteren van de klimaatscenario's volgt dat de voorgestelde maatregelen zouden moeten passen bij een toekomst volgens het midden klimaatscenario (V&W,2000). De wettelijke norm wordt in de praktijk dus meer gehanteerd als een continu streefgetal voor de veiligheid dan als de ondergrens zoals formeel de bedoeling is.

In de optimale strategie is er echter niet één streefgetal voor de veiligheid, maar een optimaal interval. Moeilijkheid daarbij is dat de omvang van het interval sterk afhangt van de verhouding tussen de vaste en variabele kosten van de investeringsactie en daarmee van de specifieke invulling; hier dus in de vorm van dijkverhoging. Voor de globale ligging van het interval is de gemiddelde optimale overstromingskans een betere indicator. Immers, de investeringsacties zijn erop gericht om gemiddeld in een herhalingsperiode dat veiligheidsniveau te bereiken, ook al ligt de feitelijke veiligheid in het begin boven en later onder dat niveau. Voor dit gemiddelde veiligheidsniveau zijn de gemiddelde investeringskosten

²⁶ Sommigen wijzen zelfs op mogelijke juridische problemen, bijvoorbeeld bij onteigening, als een project verder gaat dan de wettelijke norm.

per cm effect doorslaggevend (zie bijlage A, paragraaf 8.1). Die kosten zijn bij andere typen acties gemiddeld eerder hoger dan lager dan die van dijkverhoging, hetgeen zou resulteren in een lager gemiddeld veiligheidsniveau. Globaal gesproken geeft rekenen met de kosten van dijkverhoging dus het beste beeld van de economisch gezien optimale gemiddelde veiligheid. Daarom kan de wettelijke norm, geïnterpreteerd als streefgetal, wellicht nog het beste worden vergeleken met het gemiddelde optimale veiligheidsniveau.

Uit die vergelijking blijkt dat het verstandig is om voor 9 van de 22 onderzochte dijkringen te kiezen voor een gemiddeld veiligheidsniveau dat minstens twee keer zo hoog is als de huidige wettelijke norm. Het meest extreem geldt dit voor de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei met gemiddelde optimale overstromingskansen van 1/35100 resp. 1/53700. Vergeleken met de huidige wettelijke norm van 1/1250 zou de (wettelijke) bescherming van deze dijkringen tegen overstromingen vanuit de Nederrijn aanzienlijk moeten worden vergroot.

4.2.2 Uitkomsten in lijn met verwachting

De berekening en de boven gegeven argumentatie voor de uitkomsten zijn wellicht moeilijk te volgen. Daarom is een simpele controle op deze uitkomsten bedacht met behulp van slechts twee direct begrijpelijke variabelen die iets zeggen over schade en kosten, namelijk het aantal inwoners van een dijkkring (zie tabel 3.4 en 3.5) en de lengte van de rivierdijk (zie tabel 3.6).²⁷ We mogen verwachten dat de optimale overstromingskans kleiner wordt (dus hogere veiligheid) naarmate het aantal inwoners (en dus de schade) toeneemt. Anderzijds mogen we verwachten dat de optimale overstromingskans groter wordt naarmate de lengte van de rivierdijk (en dus de investeringskosten) toenemen. Dit verband volgt ook uit de volgende formele benadering.

Vertrekpunt is de benaderingsformule voor de gemiddelde optimale verwachte schade tussen twee investeringen (zie bijv. paragraaf 5.2.1, formule 5.1). Daaruit blijkt dat de gemiddelde optimale verwachte schade evenredig is met de investeringskosten ($I(u)$). Verder is de verwachte schade (S) per definitie gelijk aan de overstromingskans (P) maal de schade bij overstromen (V). In formulevorm:

$$P^{gem} V = S^{gem} \equiv const \times I(u) \quad (4.1)$$

Deling van beide kanten door de schade bij overstromen V en benadering van de variabelen in teller ($I(u)$) en noemer (V) door de twee genoemde variabelen lengte rivierdijk (l) en aantal inwoners (N) geeft:

²⁷ Bij deze vergelijking moet wel bedacht worden dat in BOR alleen de dijkvakken langs de Rijntakken in de beschouwing zijn betrokken en niet die langs andere wateren als de Maas of het IJsselmeer. Zie voor een gelijksoortige vergelijking met schade i.p.v. inwoners: Kind (2004), welke cijfers ook staan in RIVM (2004) paragraaf 6.5.

$$P^{gem} \cong \text{const} \frac{I(u)}{V} \cong \text{const} \frac{l}{N} \quad (4.2)$$

waarin: P^{gem}	gemiddelde optimale overstromingskans
V	schade bij overstroom
S^{gem}	gemiddelde optimale verwachte schade
$I(u)$	investeringskosten van de optimale investering
l	lengte van de dijk in km
N	aantal inwoners
const	bij benadering gelijk getal voor iedere dijkkring

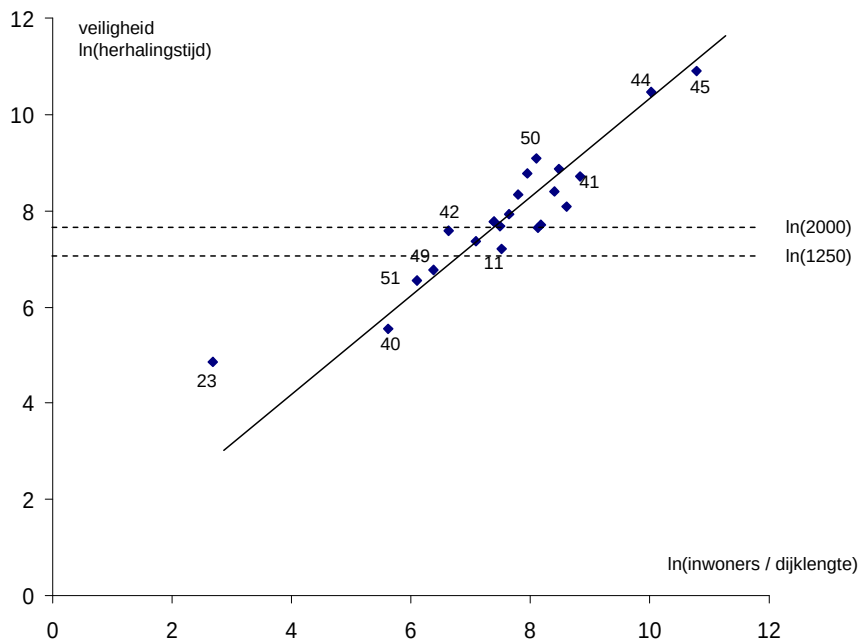
De investeringskosten $I(u)$ veronderstellen we evenredig te zijn met de dijk lengte l , d.w.z. voor iedere dijkkring eenzelfde investeringsbedrag per kilometer dijk. Voor de schade bij overstroom V veronderstellen we dat deze een vast bedrag per inwoner is. Beide veronderstellingen zijn niet juist, maar zij stellen ons wel in staat om tot een heel simpel controleerbaar resultaat te komen, namelijk dat de gemiddeld optimale overstromingskans grofweg evenredig is met de verhouding tussen dijk lengte en aantal inwoners, zie formule (4.2). Zou de combinatie van alle veronderstellingen voor iedere dijkkring exact juist zijn, dan zou de constante in vergelijking (4.2) voor alle dijkkringen een gelijke waarde hebben. In figuur 4.1 is dit verband (logaritmisch) getekend met de omgekeerde van de variabelen, dat wil zeggen de gemiddelde veiligheid ($1/P$), ofwel de herhalingsstijd in jaren, en anderzijds het aantal inwoners per km dijk (N/l). Als het verband in formule (4.2) exact zou kloppen zouden alle punten op een rechte lijn liggen. Vanzelfsprekend is het verband niet exact rechtlijnig. Immers de schade per inwoner kan per dijkkring een factor 2 tot 3 schelen (zie tabel 3.4 en 3.5) en de investeringskosten per km lopen zelfs een factor 5 uiteen (zie tabel 3.6). Daarmee rekening houdend is het verband tussen de berekende gemiddelde optimale overstromingskans en het aantal inwoners per km dijk verrassend goed.²⁸

Duidelijk vallen de twee (groepen) bijzondere gevallen op. Aan de ene kant het lage berekende veiligheidsniveau voor dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) dat duidelijk samenhangt met de grote dijk lengte per inwoner. Aan de andere kant de dijkkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei met veel inwoners en een korte rivierdijk. De in dit rapport getrokken conclusies ten aanzien van deze twee bijzondere groepen dijkkringen zijn dus zeer begrijpelijk, ook als we alleen maar zouden letten op de verhouding tussen het aantal inwoners en de lengte van de dijk.

Ook voor de dijkkringen met minder extreme verhoudingen spoort het verband goed, zoals voor de dijkkringen 51 Gorssel en 49 IJsselland met lage optimale veiligheidsniveaus en dijkkringen 50 Zutphen en 41 Land van Maas en Waal met de op twee na hoogste optimale veiligheidsniveaus. Maar perfect kan het verband natuurlijk niet zijn, zie bijvoorbeeld

²⁸ De constante in formule (4.2) blijkt in de buurt van 1 te liggen. De numerieke omvang van de constante hangt af van de gebruikte maten en heeft dus geen inhoudelijke betekenis.

Figuur 4.1 Gemiddelde veiligheid en aantal inwoners per kilometer dijk (logaritmisch)



het omdraaien van de volgorde bij de dijkringen 11 IJsseldelta en 42 Ooij en Millingen. Bij de laatste verklaren de lage investeringskosten per km mede het relatief hoge berekende veiligheidsniveau. Een grote dijkring als 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaarden ligt op de lijn die het beste een evenredig verband tussen de twee grootheden in de grafiek laat zien.

In ieder geval toont figuur 4.1 dat de uitkomsten van de berekeningen, ondanks alle onzekerheden, globaal gesproken goed in lijn zijn met de verwachting die we op grond van duidelijke variabelen als inwoners en dijklength hebben over optimale veiligheidsniveaus.

Een laatste opvallende observatie is hoe weinig optimale gemiddelde veiligheidsniveaus er zitten in de strook rond de wettelijke overstromingskansen van 1/1250 en 1/2000.

4.2.3 Optimale investeringspatronen

Hoe ziet het investeringspatroon eruit dat bij de berekende optimale veiligheidsniveaus hoort? Op deze vraag geven tabel 4.3 en tabel 4.4 een antwoord.²⁹

Eerste investering

Kolom 3 van de tabellen geeft het jaar aan waarin volgens de optimale strategie de eerste investering plaats zou moeten vinden. Het is voor 15 van de 21 dijkringen aantrekkelijk om direct, dat wil zeggen in het zichtjaar 2015, al in extra veiligheid te investeren. Deze 15 dijkringen zijn precies die dijkringen waarvoor in tabel 4.1 en tabel 4.2 geldt dat de feitelijke overstromingskansen in 2015 groter zijn dan de optimale maximale overstromingskansen. In deze dijkringen is dus in 2015 sprake van een onderinvestering in veiligheid ofwel van achterstallig veiligheidsonderhoud. Bij de overige 7 dijkringen kan worden gewacht met

²⁹ Zie in plaats van Tabel 4.3 voor cijfers op grond van betere informatie Tabel 4.10.

investeren. Soms slechts een beperkt aantal jaren, zoals voor dijkkring 42 Ooij en Millingen. Maar soms kan ook langer worden gewacht, zoals bij de dijkringen 23 Biesbosch (Noordwaard) en 10 Mastenbroek.

Tabel 4.3 Investeren in dijkhoogte bovenrivierengebied: tijdstip, omvang en kosten (prijspeil 2003)						
1	2	3	4	5	6	7
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte van eerste dijkverhoging	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten investeringen en schade
		jaartal	cm	jaren	cm	mln euro
38	Bommelerwaard	2015	79	51	62	200
40	Heerewaarden (Waalkant)	–	–	62	79	–
41	Land van Maas en Waal	2015	115	63	75	360
42	Ooij en Millingen	2018	72	61	72	100
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	78	65	73	1510
44	Kromme Rijn	2015	87	55	49	230
45	Gelderse Vallei	2015	71	51	41	40
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	78	52	56	70
48	Rijn en IJssel	2015	70	42	51	480
49	IJsselland	2034	46	53	46	100
50	Zutphen	2015	110	59	62	60
51	Gorssel	2038	40	51	40	70
52	Oost Veluwe	2015	53	58	46	280
53	Salland	2015	98	69	66	340
10	Mastenbroek	2048	57	57	57	50
11	IJsseldelta	2045	62	59	62	150
Totaal kosten investeren en restschade vanaf 2015 (NCW in 2015, pr. 2003)						4040

Tabel 4.4 Investeren in dijkhoogte benedenrivierengebied: tijdstip, omvang en kosten (prijspeil 2003)						
1	2	3	4	5	6	7
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte van eerste dijkverhoging	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten investeringen en schade
		jaartal	cm	jaren	cm	mln euro
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	69	52	54	640
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	61	54	52	1320
22	Eiland van Dordrecht	2015	51	60	51	410
23	Biesbosch (Noordwaard)	2059	53	46	53	30
24	Land van Altena	2015	70	43	63	370
35	Donge	2015	80	42	59	440
Totaal kosten investeren en restschade vanaf 2015 (NCW in 2015, pr. 2003)						3220

Kolom 4 van tabel 4.3 en tabel 4.4 geeft aan met hoeveel centimeters de dijken de eerste keer moeten worden verhoogd. Dit aantal is het grootst voor de dijkringen waarvan de feitelijke

overstromingskansen (kolom 5 van tabel 4.1 en tabel 4.2) sterk afwijken van de optimale kansen vlak voor de investering (kolom 6 van tabel 4.1 en tabel 4.2). Dat zijn de dijkringen waarin het meest van achterstallig onderhoud kan worden gesproken. Bijvoorbeeld, in dijkkring 41 Land van Maas en Waal bedraagt de eerste investering 115 centimeter.³⁰ In tabel 4.2 kan worden afgelezen dat de feitelijke veiligheid voor deze dijkkring in 2015 sterk afwijkt van de optimale ondergrens voor veiligheid.

In de dijkringen zonder achterstallig veiligheidsonderhoud, de dijkringen dus waarin niet direct al in 2015 behoeft te worden geïnvesteerd, kan het jaar van eerste investering nog vrij worden gekozen. Vandaar dat de hoogte van de eerste dijkverhoging (kolom 4) dan gelijk is aan de optimale hoogte van de volgende dijkverhogingen (kolom 6 van tabel 4.3 en tabel 4.4).

Vervolginvesteringen

Na een dijkverhoging kan een aantal jaren worden gewacht voordat de dijken opnieuw moeten worden verhoogd. Kolom 5 geeft een indruk van de lengte van die periode.³¹ Omdat de verhouding tussen de vaste en de variabele investeringskosten per dijkkring uiteen loopt, is de periode tussen twee optimale investeringsmomenten niet voor iedere dijkkring even lang. In dijkkring 35 Donge bijvoorbeeld, kan het beste al na 42 jaar opnieuw worden geïnvesteerd, terwijl in dijkkring 53 Salland beter 69 jaar kan worden gewacht. De herhalings tijden bij de andere dijkringen liggen daar tussenin. Gemiddeld ligt de herhalings tijd in de buurt van de 50 jaar. Dat komt goed overeen met de vuistregel die in waterstaatskringen wordt gehanteerd voor de herhalings tijd bij een ‘gemiddeld’ moeilijk dijkvak. Bij een eenvoudige dijk die onbebouwd is, kan de gebruikelijke herhalings tijd lager zijn, bijvoorbeeld 30 jaar. Maar voor kunstwerken wordt in de praktijk vaak een herhalings tijd (levensduur) van 100 jaar gebruikt.

Totale veiligheidskosten

Tot slot zijn in de laatste kolom (kolom 7) van tabel 4.3 en tabel 4.4 de totale gediscoteerde veiligheidskosten in en vanaf 2015 vermeld, afgerond op 10 mln euro.³² Deze kosten bestaan uit twee componenten: de eerste component is de verwachte gediscoteerde schade door overstromingen vanaf 2015 over een oneindige tijdshorizon.³³ Voor een willekeurig jaar zijn die kosten gelijk aan de overstromingskans maal de te beschermen economisch waarden. De

³⁰ Aan het einde van deze paragraaf gaan we kort in op de vraag wat de gevolgen zijn van het rekening houden met een maximum op de rivierafvoer.

³¹ Kolom 5 geeft de periode tussen twee herhalingsinvesteringen. Als de eerste verhoging groter is dan de standaardverhoging, is de periode tot de volgende investering iets korter dan bij een herhalingsperiode. Dit wordt – voor de omgekeerde situatie – uitgelegd in paragraaf 4.3. Omdat er een achterstand goed gemaakt moet worden, is de optimale eerste investering weliswaar groter dan de optimale herhalingsinvestering, maar anderzijds is die eerste verhoging niet voldoende om helemaal het maximale veiligheidsniveau weergegeven in kolom 7 van Tabel 4.1 en Tabel 4.2 te bereiken. Gevolg is dat voor de dijkringen met achterstand in 2015 de tijd tot de tweede investering wat korter is dan aangegeven in kolom 5 van Tabel 4.3 en Tabel 4.4.

³² In prijspeil 2003. Overstromingskosten tussen nu en 2015 zijn dus niet meegenomen. Alle investeringskosten tot 2015 worden geacht plaats te vinden in 2015.

³³ Deze component wordt ook wel het restrisico genoemd.

tweede component bestaat uit de gediscoteerde investeringskosten in dijkverhoging. Deze kunnen sterk afhangen van het aantal (wacht)jaren tot aan de eerste investering.

Er blijkt sprake te zijn van grote verschillen in totale kosten tussen de dijkringen. De totale kosten voor dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) zijn in 2015 met een bedrag van 30 miljoen euro het kleinst. Dit komt zowel door de lange wachttijd tot de eerste investering als door de relatief geringe schade bij overstroming. De schade bij overstroming is bij dijkkring 45 Gelderse Vallei weliswaar hoog, maar door het hoge beschermingsniveau blijft de verwachte schade laag. Dat komt natuurlijk door de lage investeringskosten wegens de korte lengte van de rivierdijk. Ook bij deze dijkkring is de netto contante waarde van de totale kosten daarom niet meer dan 40 mln euro. Daarentegen heeft dijkkring 43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard met 1510 miljoen euro in 2015 veruit de hoogste kosten.

4.2.4 Kanttekeningen bij de basisuitkomsten in het licht van het project Ruimte voor de Rivier

Andere strategieën

Uit de opzet van het model volgt dat de berekende kosten voor iedere dijkkring de minimale kosten zijn. Er is dus bij de gebruikte gegevens geen mogelijkheid om door meer of minder in dijkverhoging te investeren, de totale investerings- en schadekosten op lange termijn nog verder te verlagen.

Daarmee is nog niet gezegd dat deze uitspraak ook zonder meer geldt in het licht van alle andere investeringsstrategieën dan dijkverhoging, die niet in het veiligheidsonderzoek zijn betrokken. Wel zijn de formules voor waterstandverlagende maatregelen wiskundig precies dezelfde als voor dijkverhoging.³⁴ De enige belangrijke verschillen van andere maatregelen kunnen dan zitten in de hoogte en de vorm van de investeringskosten.

Over de hoogte van de kosten kan worden gezegd dat de gemiddelde investeringskosten per centimeter effect bij andere typen acties meestal hoger zijn dan bij dijkverhoging.³⁵ Hogere investeringskosten leiden ook tot gemiddeld grotere optimale verwachte schade en daarmee tot hogere optimale overstromingskansen, d.w.z. een lager na te streven veiligheidsniveau.³⁶ Het ligt dus niet voor de hand dat er met andere maatregelen dan dijkverhoging een veel goedkopere strategie mogelijk is op lange termijn. In deze uitspraak is al rekening gehouden met het opwaartse effect van dijkverhoging op de schade bij overstromen.

Het andere verschil kan zitten in andere verhoudingen tussen vaste en variabele kosten of in de mogelijkheid om de omvang van maatregelen makkelijk kleiner te kiezen dan optimaal is bij dijkverhoging. Zodoende kan een strategie met maatregelen die in omvang specifiek op de huidige behoefte zijn toegesneden, op korte termijn mogelijk leiden tot een lagere som van overstromingsschade en investeringskosten. Een voorbeeld is kribverlaging op de Waal, die

³⁴ Alleen het schadeverhogend effect van dijkverhoging ontbreekt. Dat scheelt in de bovenrivieren ongeveer 10%. Bij de benedenrivieren is het nog minder.

³⁵ Zie daarvoor het andere deel van de totale KBA voor RvdR, namelijk de kosteneffectiviteitsanalyse.

³⁶ Zie bijvoorbeeld paragraaf 5.2.1, vergelijking (5.1).

zowel goedkoop is als ook om rivierkundige redenen nodig is. Het geldt overigens niet voor het hele Voorkeursalternatief in de PKB, want dat is duurder dan het Referentie-alternatief Dijkversterking. In hoofdstuk 7 zal worden gezien hoe het zit met de rentabiliteit van het totale investeringsbedrag dat hoort bij het Voorkeursalternatief in de PKB.

Doelstelling Ruimte voor de Rivier

De omvang van de optimale eerste verhoging in kolom 4 van Tabel 4.3 is zeer groot vergeleken bij de achterstand op de wettelijke norm die het project Ruimte voor de Rivier beoogt in te halen. Die achterstand is ongeveer 30 cm langs de Bovenrijn en de Waal en wat minder langs de Nederrijn en de IJssel. De berekende grote optimale dijkverhogingen zijn wel een aanwijzing dat het nuttig kan zijn om 'robuust te ontwerpen'. Als er bij maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier sprake is van een grote, samenhangende actie waarvan de omvang (vrij) gekozen kan worden – zoals bij stedelijke bypasses of dijkverleggingen –, dan kan het voordelig zijn om die actie niet te beperken tot wat nodig is voor 16 dzd m³/s. Het is dan voordeliger om in het ontwerp al rekening te houden met verslechtingen in het watersysteem en economische groei op langere termijn. Omdat deze maatregelen het karakter hebben van een ruimtelijke reservering op lange termijn, verdient het verder aanbeveling om de verslechting van het watersysteem hierbij te baseren op de stijging in het hoge klimaatscenario, zie paragraaf 5.5. Dit sluit fasering bij de uitvoering natuurlijk niet uit. Ook kan het kostenbeperkend werken om de fasering afhankelijk te maken van de feitelijk optredende verslechting van het systeem in de toekomst.

Maximum bij de rivierafvoer

Een vergelijkbare vraag is hoe deze uitkomsten zich verhouden tot die bij een fysiek maximum voor de rivierafvoer. Bij de Rijn is zo'n maximum mogelijk, zolang de veiligheidsniveaus in Duitsland lager zijn dan in Nederland en in extreme situaties overstromingen aldaar veel water aan de rivier onttrekken. Uit de recent verschenen gezamenlijke Nederlands-Duitse Hoogwaterstudie (RIZA, 2004), waarin rekening is gehouden met de nu tot 2020 in Duitsland voorziene maatregelen, blijkt dat tot 2020 ongeveer 16 dzd m³/s tot 16,5 dzd m³/s in Lobith als een fysiek maximum mag worden beschouwd. In deze studie wordt echter voor de periode na 2020 een verdere stijging niet uitgesloten geacht.

In paragraaf 2.3.3 is uiteengezet dat voor het bepalen van het juiste tijdstip en omvang van de eerste investering het noodzakelijk is om rekening te houden met vervolginvesteringen, maar dat het in het algemeen van minder belang is hoe die vervolginvesteringen er precies uitzien. Uitzondering op deze regel is een situatie waarin een 'eindpunt' zo dicht bij ligt, dat dit eindpunt directe invloed heeft op de verdeling van de investeringen over slechts één of enkele ingrepen.

Als 18 dzd m³/s in Lobith echt beschouwd moet worden als het fysieke maximum – wat dus sterk afhankelijk is van de tolerantie in Duitsland op lange termijn voor grote overstromingen –

dan is een dijkverhoging van tegen de 90 cm langs Bovenrijn en Waal voldoende om de overstromingskans door overschrijding tot nul te reduceren. Bij de andere riviertakken in de bovenrivieren is dat iets minder hoog. Bij de benedenrivieren kan moeilijk van een fysiek maximum worden gesproken wegens de invloed van de zee.

Voor die dijkringen waarvoor met de eerste verhoging in kolom 4 van tabel 4.3 de 18 dzd m^3/s al (bijna) gehaald wordt, is de beslissing dan duidelijk. In één keer investeren tot de 18 dzd m^3/s grens is dan de optimale uitkomst. Aan het andere uiterste zit een dijkkring als 51 Gorssel met een optimale investering van 40 cm. Voor deze dijkkring is het vermoedelijk goedkoper om de stap in twee keer te maken. Bij andere dijkringen kan het beste door uitrekenen worden bepaald of de dijkverhoging ineens dan wel in twee keer uitvoeren de goedkoopste strategie is. Dit is in het kader van dit onderzoek niet verder onderzocht, omdat de aandacht in het project Ruimte voor de Rivier met name uitgaat naar waterstandverlagende maatregelen die allemaal andere kostencurven kennen.

Hoewel er dus geen varianten zijn uitgerekend met fysiek maximum, zijn er wel twee varianten uitgerekend bij een lager tempo van verandering van waterstand. In paragraaf 4.5 wordt een beleidsvariant behandeld om door verandering van de afvoerverdeling de MHW langs de Nederrijn niet verder te laten toenemen dan hoort bij 16 dzd m^3/s in Lobith. In paragraaf 5.12 wordt een onzekerheidsvariant behandeld als pas later blijkt dat de rivierafvoer niet meer toeneemt.

Verskil in veiligheidsniveaus betekent systeemwerking

Optimale veiligheid betekent dat voor verschillende dijkringen uiteenlopende veiligheidsniveaus worden gehandhaafd. Voor dijkringen met, in verhouding tot de investeringskosten, veel inwoners en veel economische activiteiten zouden volgens figuur 4.1 hogere veiligheidsnormen moeten gelden dan voor dijkringen waarin, in verhouding tot de investeringskosten, weinig mensen wonen en minder economische activiteiten plaatsvinden. Door de verschillende veiligheidsniveaus gaan dijkringen met een laag beschermingsniveau automatisch fungeren als noodoverloopgebied voor benedenstroomse dijkringen met een hoger beschermingsniveau. Als daarmee rekening wordt gehouden, kan een ander investeringspatroon optimaal zijn ten opzichte van hetgeen wordt uitgerekend zonder rekening te houden met systeemwerking, zoals in deze paragraaf is gebeurd. In hoofdstuk 6 behandelen we deze kwestie verder.

4.3 Optimale strategie per dijkkring in combinatie met toepassing wettelijke norm in 2015

Bij de vaststelling van de optimale investeringsstrategie in paragraaf 4.2 is geen rekening gehouden met de wettelijke normen. Gezien het verplichtende karakter van die normen is het interessant om na te gaan in hoeverre het optimale pad er anders uit ziet indien in 2015 wel met de wettelijke normen rekening wordt gehouden. Om dit te onderzoeken moet de optimalisering

plaatsvinden onder de extra voorwaarde dat in 2015 aan de wettelijke veiligheidsnormen wordt voldaan.

Uit tabel 4.1 en tabel 4.2 met de jaarlijkse overstromingskansen kan worden geconcludeerd dat dit voor tweederde van de dijkringen geen gevolgen zal hebben voor de optimale strategie. Immers, de feitelijke overstromingskansen zijn in 2015 groter dan de optimale maximale overstromingskansen, zodat er ook in de optimale strategie onmiddellijk geïnvesteerd moet worden. De na een optimale investering resulterende overstromingskansen zijn bijna altijd kleiner dan de kansen die de wet voorschrijft. Neem bijvoorbeeld dijkkring 38 Bommelerwaard. De eerste investering vindt in 2015 plaats (kolom 3, tabel 4.3). De veiligheid stijgt dan naar een jaarlijkse kans op overstromen van 1/3100 (kolom 7, tabel 4.1), ruim boven de wettelijke norm van 1/1250 per jaar (kolom 3, tabel 4.1).³⁷ Kortom, als er volgens de optimale strategie direct geïnvesteerd wordt, hoeven we ons bij bijna al deze dijkringen geen zorgen te maken dat direct daarna de wettelijke norm niet gehaald zou worden. Er zijn dus geen complicaties bij de berekening van het herhalingsinterval.

Voor die dijkringen waarin volgens de optimaliteitscriteria nog niet in 2015 hoeft te worden geïnvesteerd, blijkt de veiligheid in 2015 in alle gevallen wel beneden de wettelijke norm te liggen. Bijvoorbeeld, uit kolom 3 van tabel 4.3 kan worden afgelezen dat de dijken van dijkkring 10 Mastenbroek pas in 2048 behoeven te worden verhoogd. Echter, volgens kolom 5 van tabel 4.1, ligt de feitelijke overstromingskans van dijkkring 10 Mastenbroek in 2015 met 1/1960 al wel boven de wettelijke norm van 1/2000. Naleving van de wettelijke norm betekent dan dat de dijken van dijkkring 10 Mastenbroek al in 2015 moeten worden verhoogd.

Bij de dijkringen waarvoor het voldoen aan de wettelijke norm tot een ander investeringspad leidt, gebeurt het volgende. Toepassing van de norm bepaalt het eerste moment van investeren op 2015 en vervangt daarmee het resultaat van het ‘wanneer?’-criterium. Maar de wettelijke norm geeft geen volledig antwoord op de hoeveelheidsvraag, want de norm geeft daarvoor alleen een minimum aan. Op de hoeveelheidsvraag kan dus wel een optimaal antwoord worden gegeven, gegeven het andere, wettelijk bepaalde moment van investeren en de minimum omvang.

Gezien vanuit de optimale strategie leidt eerder investeren tot een overinvestering. Uit dien hoofde zou het dus verstandig zijn om niet meer te investeren dan tot de wettelijke norm of zeker niet verder dan tot de optimale bovengrenzen voor de veiligheid, zoals aangegeven in kolom 7 van tabel 4.1 en tabel 4.2. Anderzijds worden door de investeringsdwang toch al de vaste investeringskosten gemaakt en het is ook weer onverstandig om daar niet van te profiteren, bijvoorbeeld door de optimale omvang van de dijkverhoging toe te passen. Het model zoekt daarin een optimale tussenweg. Enerzijds is de gedwongen dijkverhoging daarom

³⁷ Hoewel in de dijkringen met achterstand in 2015 het maximale veiligheidsniveau als weergegeven in kolom 7 van Tabel 4.1 en Tabel 4.2 niet geheel gehaald wordt (zie de rest van deze paragraaf), zijn de verschillen niet zo groot dat de wettelijke norm niet wordt gehaald.

kleiner dan de optimale bij een vrije keuze van het investeringstijdstip, maar anderzijds is de dijkverhoging wel zo groot dat daarmee vaak de optimale bovengrens van het veiligheidsinterval wordt overschreden. De tijd tot de volgende investering wordt dus langer dan de optimale, vermeld in kolom 5 van tabel 4.3 en tabel 4.4, die is berekend bij een vrij te kiezen investeringsmoment. De uitkomsten staan in tabel 4.5.³⁸

Tabel 4.5 Optimale strategie in combinatie met handhaving wettelijke norm in 2015

1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Actuele overstromingskansen in 2015 zonder investering	Jaar eerste investering volgens optimum pad	Omvang eerste dijkverhoging in 2015	Totale kosten volgens optimale pad	Totale kosten bij volgen wettelijke norm
		1/jaar	1/jaar	jaartal	cm	mln euro	mln euro
40	Heerewaarden	1/2000	1/740	–	47	–	14
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/500	2018	70	95	95
49	IJsselland	1/1250	1/500	2034	32	96	103
51	Gorssel	1/1250	1/500	2038	29	72	78
10	Mastenbroek	1/2000	1/1960	2048	27	54	65
11	IJsseldelta	1/2000	1/740	2045	35	146	172
23	Biesbosch (Noordwaard)	1/2000	1/400	2059	31	34	65

Uit kolom 4 van tabel 4.5 blijkt dat de actuele overstromingskansen in 2015 ruim boven de in kolom 3 vermelde wettelijke normen liggen. Volgens de wettelijke norm moeten de overstromingskansen dus al in 2015 worden verlaagd, minimaal tot de wettelijke overstromingskansen. Volgens de optimale strategie echter, zou er beter nog voor kortere of langere tijd gewacht kunnen worden met investeren, zie kolom 5. Voor bijvoorbeeld dijkkring 10 Mastenbroek betekent toepassing van de wettelijke norm dat de investering 33 jaar eerder plaats moet vinden, in 2015 in plaats van in 2048 volgens de optimale strategie. Voor dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) zou de investering zelfs 44 jaar naar voren worden gehaald.

De in kolom 6 vermelde optimale omvang van de eerste investering is daarom in alle gevallen kleiner dan de optimale verhoging, die staat in kolom 6 van tabel 4.3 en tabel 4.4. Dit is het spiegelbeeld van de eerder besproken hoger dan optimale dijkverhoging in de dijkringen waar sprake is van een veiligheidsachterstand. Slechts in drie van de zeven gevallen, 42 Ooij en Millingen, 49 IJsselland en 10 Mastenbroek, komt er een optimale dijkverhoging uit waarmee de wettelijke norm (ruim) wordt gepasseerd. In de overige vier gevallen is de dijkverhoging zo uitgerekend dat deze net voldoende is om in 2015 de norm te halen, maar wel rekening houdend met een bijstelling van de waterstanden tot 2015 volgens het midden klimaatscenario.

De kosten die dit gewijzigde investeringspatroon met zich meebrengt, zijn in kolom 8 van tabel 4.5 vermeld. Ter vergelijking zijn in kolom 7 de totale kosten volgens het optimale pad uit de tabellen tabel 4.3 en tabel 4.4 weergegeven, maar voor de vergelijking niet afgerond. Het zal

³⁸ Zie voor de bovenrivieren in plaats van Tabel 4.5 ook de resultaten op basis van betere cijfers in Tabel 4.11.

duidelijk zijn dat de additionele voorwaarde dat aan de wettelijke veiligheidsnormen moet worden voldaan, met zich meebrengt dat de totale kosten van het wettelijk pad hoger zijn dan de kosten van het optimale pad. Immers om te voldoen aan de wettelijke norm moeten investeringen naar voren worden gehaald. Weliswaar wordt hierdoor extra veiligheid verkregen, maar die extra veiligheidswinst weegt niet op tegen de extra investeringskosten.

Wel zorgt de veiligheidswinst ervoor dat de absolute verschillen in de totale kosten niet heel groot zijn. Dit verschil hangt per dijkkring vooral af van het aantal jaren dat de investering ten opzichte van de optimale strategie wordt vervroegd. In dijkkring 42 Ooij en Millingen is dat maar 3 jaar. Afgerond neemt de netto contante waarde van de totale kosten van schade en investeringen voor deze dijkkring daarom niet zichtbaar toe. Relatief grote verschillen zijn er bij de dijkringen 40 Heerewaarden en 23 Biesbosch (Noordwaard). Het handhaven van de hoge norm bij 40 Heerewaarden heeft een andere reden dan bescherming van de polder zelf. Bij 23 Biesbosch (Noordwaard) wijzen het verschil in kosten en het zeer lage optimale veiligheidsniveau (tabel 4.2, kolom 6) in de richting van een beslissing tot ontpolderen.

Uit de overige berekeningen mag worden geconcludeerd dat de keuze voor de wettelijke veiligheidsnorm voorzover die afwijkt van de berekende optimale veiligheid, slechts een beperkt effect heeft op de contante waarde van alle toekomstige kosten. Bij de normale dijkkring waar het relatieve verschil het grootst is, 10 Mastenbroek, scheelt het 20%. Dit is ook de dijkkring waar de investering het grootste aantal jaren, namelijk 33, naar voren wordt gehaald. Bij de vier andere normale dijkringen scheelt het veel minder. Zoals gezegd, is het verschil bij dijkkring 42 Ooij en Millingen niet waarneembaar.

Het omgekeerde geldt overigens niet: kiezen voor een lagere veiligheid dan de optimale leidt snel tot een forse stijging van de totale kosten, zoals het kostenverloop in figuur 2.3 laat zien. In hoofdstuk 5 komen we terug op dit asymmetrische verloop van de totale kosten en welke gevolgen we daaraan kunnen verbinden bij onzekerheid over de gebruikte gegevens.

4.4 Variant: 'Veiliger' parameterwaarden voor BER

Reden

Een praktisch voorbeeld van onzekerheid over de waarden van gebruikte informatie is dat niet in het algemeen kan worden aangegeven hoe in het gebied van de benedenrivieren het samenspel van waterhoogte en wind uitwerkt. In bijlage B, paragraaf 3 wordt uitgelegd dat het daarom in BER niet zonder meer mogelijk is om per dijkkring een overal gelijk verband te leggen tussen de veranderingen in waterstanden en de voor de kansberekeningen benodigde parameters. Dat komt omdat de invloed van de wind mede als gevolg van het dijkprofiel plaatselijk zeer verschillend kan zijn, van versterkend tot zelfs afzwakkend (als de in kritieke situaties overheersende wind van het betreffende dijkvak afstaat). In de voorafgaande paragrafen wordt een soort middelwaarde gebruikt die ook goed aansluit bij de rekenwijze voor

het project Ruimte voor de Rivier. Die berekeningswijze komt er op neer dat bij veranderingen de invloeden van water en wind elkaar niet versterken.

In deze paragraaf worden – mede bij wijze van onzekerheidsvariant – de uitkomsten gepresenteerd, als voor deze parameters een ‘veiliger’ variant wordt gebruikt. Daarbij worden de stijgingen van de waterstanden vermenigvuldigd met een windfactor, die bijna altijd groter is dan 1.³⁹

Uitkomsten

Door de ‘veiliger’ keuze van de parameters blijkt in tabel 4.6 de feitelijke toestand in 2001, maar nog sterker die in 2015, veel slechter te zijn dan in de kolommen 4 en 5 van tabel 4.2.

Tabel 4.6 Jaarlijkse overstromingskansen van de dijkringen in het benedenrivierengebied bij een ‘veiliger’ keuze van parameters

1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Feitelijke in 2001 bijlage B.3	Feitelijke in 2015	Optimale ondergrens in 2015	Optimale bovengrens in 2015	Gemiddelde in optimaal traject
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	1/2000	1/730	1/410	1/1120	1/14400	1/4250
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	1/2000	1/760	1/350	1/920	1/21350	1/4150
22	Eiland van Dordrecht	1/2000	1/1680	1/810	1/940	1/30750	1/5450
23	Biesbosch (Noordwaard)	1/2000	1/730	1/400	1/20	1/300	1/100
24	Land van Altena	1/2000	1/260	1/130	1/390	1/4600	1/1450
35	Donge	1/2000	1/350	1/170	1/840	1/7000	1/2350

Tabel 4.7 Investeren in dijkhoogte benedenrivierengebied: tijdstip, omvang en kosten, bij een ‘veiliger’ keuze van parameters

1	2	3	4	5	6	7
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte van eerste dijkverhoging	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten investeringen en schade
		jaartal	cm	jaren	cm	mln euro
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	71	50	55	680
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	76	49	62	1500
22	Eiland van Dordrecht	2015	81	54	78	480
23	Biesbosch (Noordwaard)	2060	78	42	78	40
24	Land van Altena	2015	81	41	61	470
35	Donge	2015	97	38	65	510
Totaal kosten investeren en restschade vanaf 2015 (NCW in 2015, pr. 2003)						3670

³⁹ Daar deze factor voor BOR gelijk is aan 1, is er bij BOR geen verschil tussen beide berekeningswijzen.

Niet alleen de uitgangspositie is slechter, ook heeft de windfactor een groter effect op de verandering van de overstromingskansen door de opvermenigvuldiging van de stijging van de waterstanden in de loop der tijd in de klimaatscenario's. Als gevolg daarvan veranderen de optimale grenzen van het schade-interval (vergelijk de kolommen 6 en 7 in tabel 4.2 en tabel 4.6). Vanzelfsprekend verandert dan ook de optimale investeringsstrategie, zoals blijkt uit een vergelijking van tabel 4.4 met tabel 4.7.

Een 'veiliger' keuze van de parameters leidt, niet verrassend, tot grotere eerste dijkverhogingen. Vooral door deze eerste dijkverhogingen zijn de totale kosten van investeren en schade hoger. Maar ook in het vervolgtraject is dat merkbaar omdat – op een na – de tijd tussen twee opeenvolgende investeringen duidelijk kleiner is en de optimale dijkverhogingen groter. Ook in het vervolgtraject zijn de investeringskosten dus hoger.

In de optimale oplossing is er evenwicht tussen investeringskosten en restschade. De ene post kan niet verder worden verlaagd zonder dat de andere meer stijgt dan het bedrag waarmee de eerste post omlaag gaat. De hogere investeringskosten wijzen dus in de richting van gemiddeld meer restschade. Daar staat in dit geval echter tegenover dat ook de voor dit evenwicht relevante parameters veranderen en wel in een richting die het effect van de hogere investeringen compenseert.⁴⁰ De uitkomst van beide invloeden staat dus niet van tevoren vast. De gemiddelde optimale overstromingskansen in kolom 8 van tabel 4.6 zijn daarom meestal wel hoger en maar soms lager dan die in kolom 8 van tabel 4.2.

4.5 Variant: Maatgevende afvoer blijft in BOR 16 dzd m³/s in Lobith

Reden

Een tweede voor de PKB relevante variant, tenminste voor sommige dijkkringen in BOR, is geen verdere stijging van de maatgevende rivierafvoer boven het huidige niveau, minimaal voor een zeer lange periode, bijvoorbeeld deze eeuw. Diverse redenen zijn denkbaar.

Het zou in de toekomst kunnen blijken dat de klimaatveranderingen niet leiden tot een sterke toename van de pieken in de neerslag in het hele, relevante stroomgebied tegelijkertijd. En het zijn juist de grote pieken in de neerslag over een groot deel van het stroomgebied, en niet de neerslag als zodanig, die tot een topafvoer kunnen leiden. Een andere reden kan zijn, dat er in Duitsland – al dan niet door beleid – voor wordt gezorgd dat de maatgevende afvoer bij Lobith niet verder stijgt.⁴¹ In al deze gevallen zou de maatgevende afvoer constant blijven in het hele gebied van de bovenrivieren voorzover afhankelijk van de Rijn.

Maar ook als de maatgevende afvoer bij Lobith in de toekomst wel stijgt, kan constant blijven toch relevant zijn voor een deel van de dijkkringen en wel als de afvoerverdeling onder maatgevende omstandigheden wordt aangepast. Dit is relevant voor de Nederrijn. In de PKB Ruimte voor de Rivier wordt het voornemen uitgesproken dat de Nederrijn onder maatgevende omstandigheden niet meer zal hoeven te verwerken dan overeenkomt met de huidige

⁴⁰ Zie de beschouwing hierover in bijlage A, paragraaf 8.1.1.

⁴¹ Hierover zijn ook internationale afspraken gemaakt.

maatgevende afvoer in Lobith van 16 dzd m³/s. De beslissingen in het kader van Ruimte voor de Rivier hebben dan voor die dijkringen een zeer definitief karakter.⁴² Met name zijn dat de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei. Het geldt ook voor de noordzijde van dijkkring 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaard, maar deze kant van de dijkkring is in de huidige berekening niet te scheiden van de andere dijkvakken. Tabel 4.8 en tabel 4.9 geven een overzicht van de uitkomsten, deels in vergelijking met de uitkomsten in tabel 4.1 en tabel 4.3.

Wel moet worden bedacht dat bij een beperking van de afvoer langs de Nederrijn er meer water zal gaan langs de Waal en de IJssel. Voor de dijkringen langs die riviertakken zouden de uitkomsten in tabel 4.1 en tabel 4.3 juist in de tegenovergestelde richting aangepast moeten worden dan blijkt uit de vergelijking van die tabellen met tabel 4.8 en tabel 4.9.

Uitkomsten

Tabel 4.8 Jaarlijkse overstromingskansen van de dijkringen in het bovenrivierengebied bij verschillende veronderstellingen over toekomstige stijging van de Maatgevende Hoogwaterstand (MHW)							
1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Feitelijke in 2001 (en 2015 bij $\Delta MHW = 0$)	Optimale ondergrens in 2015 met stijging MHW	Optimale bovengrens in 2015	Optimale ondergrens in 2015	Optimale bovengrens in 2015 en gemiddeld geen stijging MHW
38	Bommelerwaard	1/1250	1/585	1/840	1/3100	1/870	1/2800
40	Heerewaarden (Waal)	1/2000	1/855	–	–	–	–
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/585	1/1620	1/8700	1/1690	1/7500
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/585	1/470	1/2850	1/490	1/2350
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/585	1/580	1/3250	1/610	1/2750
44	Kromme Rijn	1/1250	1/3050	1/11630	1/46850	1/12100	1/42250
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/6120	1/19970	1/71150	1/20790	1/64900
47	Arnhemse en Velperbroek	1/1250	1/585	1/1030	1/4300	1/1070	1/3850
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/585	1/980	1/2700	1/1020	1/2550
49	IJsselland	1/1250	1/585	1/290	1/1200	1/300	1/1050
50	Zutphen	1/1250	1/585	1/2030	1/12200	1/2120	1/10150
51	Gorssel	1/1250	1/585	1/260	1/950	1/270	1/850
52	Oost Veluwe	1/1250	1/585	1/680	1/3300	1/710	1/2850
53	Salland	1/1250	1/585	1/1540	1/10450	1/1600	1/8700
10	Mastenbroek	1/2000	1/2270	1/730	1/3850	1/760	1/3300
11	IJsseldelta	1/2000	1/855	1/310	1/1800	1/320	1/1500

Een eerste gevolg van het constant blijven van de MHW is dat de feitelijke overstromingskansen na de aanpassing in 2001 zonder ingrijpen niet meer veranderen. Voor dit

⁴² Let wel dat deze beperking dus niet hoeft te gelden bij bovenmaatgevende afvoeren. Er is dus geen fysiek maximum verondersteld. Absolute veiligheid is in deze variant dus niet bereikbaar. Zie ook paragraaf 4.2.4.

geval is de overstromingskans in 2015 gelijk aan die in 2001, welke is herhaald in kolom 4 van tabel 4.8. Op grond hiervan zou dus pas later geïnvesteerd hoeven worden.

De volgende twee kolommen in tabel 4.8 zijn eveneens ontleend aan tabel 4.1. Uit een vergelijking van het interval ingeval er geen verdere MHW-stijging meer optreedt, vermeld in de laatste twee kolommen van tabel 4.8, met het interval als er wel MHW-stijging optreedt, vermeld in de voorafgaande kolommen, blijkt dat het kansinterval zonder MHW-stijging kleiner is. Bij dijkkring 44 Kromme Rijn bijvoorbeeld daalt de optimale bovengrens voor de kansen van 1/11630 naar 1/12100, terwijl de optimale ondergrens stijgt van 1/46850 naar 1/42250. Gevolg is dat er – afgemeten aan optimale overstromingskansen – zonder MHW-stijging eerder geïnvesteerd zal gaan worden (vergelijk kolom 7 met kolom 5) maar minder ineens. In tabel 4.9 is te zien hoe de verschillende effecten per saldo uitwerken uitgedrukt in andere maten.

Tabel 4.9 Investeren in dijkhoogte bovenrivierengebied: tijdstip, omvang en kosten, zonder toekomstige stijging van de Maatgevende Hoogwaterstand (MHW)

1	2	3	4	5	6	7
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte van eerste dijkverhoging	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten investeringen en schade
		jaartal	cm	jaren	cm	Mln euro
38	Bommelerwaard	2015	69	70	56	170
40	Heerewaarden (Waalkant)	–	–	84	70	–
41	Land van Maas en Waal	2015	103	86	66	320
42	Ooij en Millingen	2025	63	85	63	80
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	66	90	65	1270
44	Kromme Rijn	2015	80	75	44	200
45	Gelderse Vallei	2015	65	70	37	30
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	69	70	49	60
48	Rijn en IJssel	2015	63	60	46	380
49	IJsselland	2049	41	72	41	70
50	Zutphen	2015	98	78	54	50
51	Gorssel	2055	36	71	36	50
52	Oost Veluwe	2015	45	79	40	240
53	Salland	2015	88	93	58	300
10	Mastenbroek	2070	50	77	50	40
11	IJsseldelta	2065	55	78	55	110

Bij alle dijkeringen waar bij stijging van de MHW al uitstel mogelijk was, verschuift de datum van eerste investering verder naar de toekomst, en soms zelfs fors verder. Bij de andere dijkeringen blijken de achterstanden in veiligheid ten opzicht van het optimale interval in 2015 zo groot dat er toch onmiddellijk geïnvesteerd moet worden. De duidelijkste voorbeelden daarvan blijven de dijkeringen 50 Zutphen en 41 Land van Maas en Waal.

Uit kolom 4 en kolom 6 blijkt in vergelijking met de overeenkomstige kolommen in tabel 4.3, dat de omvang van de dijkverhogingen kleiner is. Bij dijkkring 44 Kromme Rijn is dat

zonder stijging MHW 80 resp. 44 cm, terwijl dat met stijging MHW 87 en 50 cm is. Door de verkleining van de dijkverhoging gaan de vaste kosten zwaarder wegen. Gedeeltelijk is dit in de oplossing gecompenseerd doordat de optimale lengte van het interval gemeten in jaren is uitgerekt, hetgeen op zichzelf de omvang van de dijkverhoging weer iets heeft vergroot. Bij dijkkring 44 Kromme Rijn neemt de lengte van het herhalingsinterval toe van 55 jaar met stijging MHW tot 75 jaar zonder stijging MHW.

De gemiddelde optimale overstromingskans blijft constant op het niveau direct na – in ieder geval de tweede – investering en is dus gelijk aan de minimale overstromingskans in kolom 8 van tabel 4.8. Deze overstromingskansen liggen inderdaad beduidend lager dan de overeenkomstige gemiddelde optimale overstromingskansen vermeld in kolom 8 van tabel 4.1. Ook de totale kosten van investeren en restschade zijn lager dan bij stijging van de MHW, zoals ook te verwachten was. De niet-gedisconteerde gemiddelde kosten van restschade (niet zichtbaar in de tabel) veranderen echter nauwelijks. Ze zijn soms fractioneel hoger en soms fractioneel lager dan bij stijging van de waterstand.

Zonder stijging van de MHW ligt het optimale veiligheidsniveau in 12 van de 15 dijkkringen dus veel hoger dan de wettelijke norm (vergelijk de kolommen 3 en 8 in tabel 4.8). In tweederde van de dijkkringen is de optimale overstromingskans zelfs slechts de helft of minder van de wettelijke norm.

Voor de twee dijkkringen waarvoor volgens het voornemen in de PKB de informatie uit tabel 4.8 en tabel 4.9 meer relevant is dan die in tabel 4.1 en tabel 4.3, namelijk 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei, blijken deze uitkomsten hun uitzonderingspositie als de twee meest beschermingswaardige van alle 22 onderzochte dijkkringen nog te versterken. De gemiddeld optimale veiligheidsniveaus voor deze dijkkringen liggen meer dan 30 tot 50 keer zo hoog als de wettelijke norm!

4.6 Andere overstromingskansen bij de bovenrivieren

4.6.1 Zonder wettelijke normen

Bij de afsluiting van het rapport is nieuwe informatie beschikbaar gekomen over de overstromingskansen in 2001 voor de dijkkringen in BOR. Deze nieuwe informatie staat in tabel 3.3. Over het algemeen blijkt de situatie langs de Waal na Nijmegen in 2001 en 2015 gunstiger te zijn dan vermeld in Tabel 3.1 en Tabel 4.1, maar de uitgangssituatie langs de IJssel is ongunstiger. Het was niet meer mogelijk om deze nieuwe informatie in heel hoofdstuk 4 en 5 te verwerken. Daarom is ervoor gekozen de nieuwe informatie hier alleen te presenteren als een soort variant op de informatie uit Tabel 4.1, Tabel 4.3 en Tabel 4.5. Verder is de nieuwe informatie meegenomen in de rentabiliteitsberekening in hoofdstuk 7 en in de Conclusies en samenvatting. Voor een uitgebreide bespreking van een verandering als deze zij verwezen naar de paragrafen 5.10 en 5.11, die beide gaan over een verdubbeling van de overstromingskansen in het basisjaar.

Belangrijk voor het begrip van de verschillen met paragraaf 4.2 is dat de situatie in het basisjaar geen invloed heeft op de optimale norm. Alles wat naar aanleiding van Tabel 4.1 is gezegd over het optimale interval voor de overstromingskansen en over de optimale gemiddelde overstromingskansen, blijft ongewijzigd. En datzelfde geldt dus voor de standaarddijkverhoging en de tijdsspanne daartussen in Tabel 4.3. Wat verandert, is de positie in de uitgangssituatie ten opzicht van de norm. Ten eerste kan het tijdstip van investeren daardoor later worden dan 2015 of juist naar 2015 verschuiven, al naar gelang de situatie in 2015 zonder investeren beter of slechter is dan bleek uit Tabel 3.1. Als het optimaal is om de eerste investering in 2015 te doen, dan zal die verhoging meestal afwijken van die van de standaardverhoging in Tabel 4.3. In alle gevallen zullen hierdoor de totale kosten van investeren en schade afwijken van die in Tabel 4.3. De mogelijk afwijkende uitkomsten staan in Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Uitkomsten voor de dijkringen in bovenrivierengebied bij de overstromingskansen uit tabel 3.3							
1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Feitelijk in 2001 tabel 3.3	Feitelijk in 2015	Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte van eerste dijkverhoging	Totale kosten investeringen en schade
		1/jaar	1/jaar	1/jaar	jaartal	cm	mln euro
38	Bommelerwaard	1/1250	1/1010	1/870	2017	62	160
40	Heerewaarden (Waalkant)	1/2000	1/1550	1/ 1340	–	–	–
41	Land van Maas en Waal	1/1250	1/995	1/860	2015	96	310
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/715	1/610	2024	72	90
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	1/1250	1/645	1/550	2015	76	1470
44	Kromme Rijn	1/1250	1/2565	1/2230	2015	91	250
45	Gelderse Vallei	1/1250	1/4140	1/3560	2015	79	40
47	Arnhemse en Velperbroek	1/1250	1/470	1/400	2015	85	80
48	Rijn en IJssel	1/1250	1/550	1/470	2015	72	490
49	IJsselland	1/1250	1/565	1/490	2033	46	100
50	Zutphen	1/1250	1/425	1/370	2015	121	60
51	Gorssel	1/1250	1/320	1/280	2018	40	100
52	Oost Veluwe	1/1250	1/525	1/450	2015	55	290
53	Salland	1/1250	1/315	1/270	2015	116	390
10	Mastenbroek	1/2000	1/2630	1/2270	2053	57	50
11	IJsseldelta	1/2000	1/785	1/680	2042	62	150
Totaal kosten investeren en restschade vanaf 2015 (NCW in 2015, pr. 2003)							4040

Bij de meeste dijkringen zijn de verschillen beperkt. Duidelijk latere of mindere investeringen zijn mogelijk in de dijkringen langs de Waal: 38 Bommelerwaard en 41 land van Maas en Waal. Daarentegen verschuiven de eerste investeringen langs de IJssel in dijkkring 51 Gorssel sterk naar voren en zijn ze in dijkkring 53 Salland groter dan eerder nodig leek. Het totale bedrag aan kosten van investeren en restschade in BOR is bij deze betere informatie toevallig niet anders dan blijkt uit Tabel 4.3.

4.6.2 Met wettelijke normen

Een verschuiving in het eerste jaar van investeren heeft ook invloed op de optimale omvang van de investering als we die op grond van de wettelijke norm toch in 2015 willen doen. Voor die dijkringen langs de bovenrivieren waar volgens de optimale strategie in 2015 nog niet geïnvesteerd hoeft te worden, zie Tabel 4.10, staan in Tabel 4.11 de uitkomsten onder handhaving van de wettelijke norm. Ten opzichte van Tabel 4.5 is dijkkring 38 Bommelerwaard toegevoegd. Eén ontbreekt, dijkkring 10 Mastenbroek, omdat die in 2015 nog wel aan de norm blijkt te voldoen. Daar ontstaat pas in 2019 een probleem ten opzichte van de wettelijke norm. Voor de overige dijkringen in het bovenrivierengebied wijken de resultaten in Tabel 4.11 niet sterk af van die in Tabel 4.5.

Tabel 4.11 Optimale strategie in combinatie met handhaving wettelijke norm in 2015

1	2	3	4	5	6	7	8
		Wettelijke norm	Actuele overstromingskans in 2015 zonder investering	Jaar eerste investering volgens optimum pad	Omvang eerste dijkverhoging in 2015	Totale kosten volgens optimale pad	Totale kosten bij volgen wettelijke norm
		1/jaar	1/jaar	jaartal	cm	mln euro	mln euro
38	Bommelerwaard	1/1250	1/870	2017	61	163	163
40	Heerewaarden	1/2000	1/1340	–	19	–	10
42	Ooij en Millingen	1/1250	1/610	2024	63	88	90
49	IJsselland	1/1250	1/490	2033	33	98	104
51	Gorssel	1/1250	1/280	2018	47	99	100
11	IJsseldelta	1/2000	1/680	2042	38	153	177

Bij de dijkringen 40 Heerewaarden en 11 IJsseldelta is de optimale eerste verhoging precies voldoende om in 2015 de wettelijke norm te halen. Bij de overige dijkringen zijn de verschillen met de optimale strategie geringer. Daarom is de optimale omvang bij gedwongen investeren zo groot dat daardoor een lagere overstromingskans wordt gerealiseerd dan de minimale vermeld in Tabel 4.1. De reden van deze overinvestering is toegelicht in paragraaf 4.3. Toch zijn de verschillen in totale kosten van investeren en restschade zeer klein, met uitzondering van dijkkring 11 IJsseldelta, waar het kostenverschil 16% bedraagt.

5 Onzekerheid en onzekerheidsvarianten⁴³

Andere veronderstellingen over de waarden van variabelen en parameters leiden vanzelfsprekend tot andere uitkomsten. Zo leidt hogere schade bij overstromen tot meer en eerder investeren en tot hogere totale kosten. Omdat er bij de meeste dijkeringen echter achterstanden zijn in veiligheid, verandert de urgentie meestal niet of niet veel. Het al of niet in de werkelijkheid voorkomen van dit soort varianten is verder niet beïnvloedbaar, tenzij het gaat om een andere waardering van een situatie. Bovendien is het altijd mogelijk een strategie later aan te passen aan actuele informatie.

Beleidsmatig veel interessanter is daarom hoe groot de fout is die we maken als we nu investeren volgens de hoofdstrategie beschreven in paragraaf 4.2 – in de gedachte dat de daarvoor gebruikte informatie juist is –, maar achteraf op grond van nieuwe informatie zou blijken dat een andere strategie beter was geweest. Dit is het maximale bedrag dat door betere informatie en besluiten vermijdbaar was geweest. De verschillen in de netto contante waarde van de totale kosten blijken dan gering, zelfs bij grote afwijkingen in de uitgangspunten. Zo leidt kennis achteraf dat de overstromingskans eigenlijk het dubbele was van hetgeen we bij investering dachten, slechts tot 2% hogere kosten dan in de situatie dat we deze kennis nog net wel op tijd zouden hebben gehad. Als onverwacht de MHW's voor BOR niet verder stijgen dan behorend bij 16 dzd m³/s in Lobith, levert dat 0,9% hogere kosten dan als we nu al van constant blijven waren uitgegaan. Realisatie achteraf van het hoge klimaatscenario leidt in totaal tot 1% meer kosten dan wanneer onze huidige verwachting over realisatie van het middenscenario uitkomt.

De conclusie is dat investeren volgens de optimale strategie op basis van de beste kennis van dit moment een robuuste investeringsstrategie is.

5.1 Omgaan met risico's en onzekerheden

5.1.1 Verschillende soorten risico en onzekerheid

Er bestaan verschillende soorten risico en onzekerheid, die ieder hun eigen invloed kunnen hebben op het nemen van beslissingen op basis van de hiervoor gepresenteerde berekeningen. Onderscheiden kunnen worden:

- Onzekerheid over de juistheid van gebruikte cijfers in de basisperiode en het gebruikte model;
- Onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen;
- Afkeer van mensen tegen het onderworpen zijn aan onvoorspelbare gebeurtenissen (risico-aversie);
- Een overstroming treft niet alleen afzonderlijke personen (individueel risico), maar altijd grote groepen mensen tegelijkertijd (groepsrisico).

Voor een deel kunnen over deze aspecten van onzekerheid en het omgaan daarmee nog kwantitatieve uitspraken worden gedaan; voor een deel echter zal de behandeling in deze

⁴³ Alle berekeningen in hoofdstuk 5 zijn gebaseerd op de standaardinformatie in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Alle uitkomsten in hoofdstuk 5 kunnen dus worden vergeleken met de uitkomsten in Tabel 4.1 tot en met Tabel 4.4.

paragraaf zich beperken tot het kwalitatief aangeven van een richting waarin een rationele beslissing zou afwijken van de uitkomsten van de in hoofdstuk 4 gegeven centrale uitkomsten. Wel kan dan middels de varianten in de rest van dit hoofdstuk een aanduiding worden gegeven van mogelijke ordes van grootte van de invloed van de bovengenoemde aspecten op de beslissing.

De varianten in dit hoofdstuk vallen in twee groepen uiteen. In de paragrafen 5.3 tot en met 5.10 staan de effecten van andere waarden voor parameters en variabelen op de optimale beslissingen. Deze varianten geven echter geen informatie over hoe erg het is als we op basis van de huidige informatie handelen volgens de hoofdvariant beschreven in paragraaf 4.2, maar achteraf blijkt dat de werkelijkheid er anders uitziet. Daarvoor zijn de vier varianten in de paragrafen 5.11 tot en met 5.14 gemaakt. Gelukkig laten deze varianten zien dat die gevolgen zeer beperkt zijn.

Tenslotte staan in paragraaf 5.15 nog een aantal conclusies bij elkaar over onderzoek en informatieverzameling, die niet zijn opgenomen in de Samenvatting en conclusies.

5.1.2 Omgaan met onzekerheid over de juistheid van de cijfers en de uitkomsten

De gegevens waarop de uitkomsten berusten, zijn behept met grote onzekerheidsmarges. Zo geven de ingenieurs marges aan tot 40% voor de investeringskosten (ARF, 2004a). Maar ook de (gedeeltelijk statistisch geschatte) betrouwbaarheidsmarge rond de maatgevende hoogwaterstand is niet gering en belooft tientallen procenten (Noortwijk e.a., 2002). Mogelijk zijn de onzekerheidsmarges nu voor sommige variabelen nog extra groot omdat dit de eerste keer is dat dit type onderzoek is gedaan. Maar ook als in de toekomst de informatieverzameling meer systematisch wordt ingericht op het maken van dit type berekeningen, zullen de onzekerheidsmarges groot blijven.

De grote marges rond de parameters en variabelen doen de vraag rijzen in welke mate de gepresenteerde uitkomsten nog zinvolle informatie geven. Daarvoor verwijzen we terug naar figuur 4.1 waarin een simpele controle op de uitkomsten wordt getoond. Daarin worden slechts twee variabelen gebruikt die met relatief grote nauwkeurigheid zijn vast te stellen, namelijk het aantal inwoners van een dijkkring en de lengte van de dijk langs de rivier.

Duidelijk vallen daarbij de twee bijzondere groepen gevallen op aan de boven- en aan de onderkant. De in dit rapport getrokken conclusies ten aanzien van deze twee bijzondere groepen dijkkringen zijn dus zeer begrijpelijk, ook als we alleen maar zouden letten op de verhouding tussen het aantal inwoners en de lengte van de dijk.

Meer in het algemeen maakt figuur 4.1 duidelijk dat de uitkomsten van de in hoofdstuk 4 getoonde berekeningen, ondanks alle onzekerheden, globaal gesproken goed in lijn zijn met onze verwachtingen over het optimale veiligheidsniveau op grond van eenvoudig te hanteren variabelen als aantal inwoners en dijk lengte.

Niettemin zal de berekende uitkomst in het algemeen afwijken van het echte, maar onbekende optimum. Ten opzichte van het echte optimum zitten we dus altijd of te hoog of te laag. De asymmetrie in het verloop van de totale kosten van restschade en investeren, waar in paragraaf 4.3 al op werd gewezen, levert ook een belangrijk inzicht op hoe we het beste kunnen omgaan met onzekerheid. De echte totale kosten lopen – gezien vanuit de optimale situatie – bij dijkhoogten die lager zijn dan de echte optimale, steiler op dan bij hogere dijkhoogten, zie figuur 2.3. Als de berekende verhoging groter is dan de echte optimale verhoging, dan leidt de gemaakte fout niet tot veel extra kosten, zie paragraaf 5.12 en 5.13. Als de berekening lager uitkomt dan het echte optimum, zijn de gevolgen relatief groter, zie paragrafen 5.11 en 5.14. Daaruit is de conclusie te trekken dat het rationeel is om ten opzichte van de berekende optimale strategie *altijd* aan de veilige kant te gaan zitten, zodat we minder kans lopen lager te zitten dan het echte optimum. Dat betekent vooral iets eerder investeren dan volgt uit de berekening. Daardoor investeren we gemiddeld genomen ook wat meer.

Vanzelfsprekend zal eerder investeren dan berekend in veel afzonderlijke gevallen achteraf gezien een minder goede beslissing blijken te zijn geweest. Maar juist het veelvuldig voorkomen van beslissingen als deze op allerlei beleidsterreinen (gezondheid, verkeer) geeft de overheid de zekerheid dat altijd wat meer doen aan veiligheid dan afzonderlijk berekend, op de lange termijn altijd gunstig (d.w.z. goedkoper) uitpakt voor de maatschappij als geheel dan investeren volgens de afzonderlijk berekende optima.⁴⁴

Hoeveel veiliger het meest rationeel is, is moeilijk aan te geven. Het hangt per geval af van de inschatting van de onbetrouwbaarheden in het model en de gebruikte gegevens. Doorslaggevend is echter de mate waarin de totale kosten een asymmetrisch verloop hebben. Naarmate het effect van de dijkhoogte op de investeringskosten (λ) groter is, is dat minder het geval.

De paragrafen 5.11, 5.13 en 5.14 geven vrij extreme voorbeelden van het effect van achteraf onjuist blijkende informatie. De gevolgen van het investeren volgens de hoofdvariant in paragraaf 4.2 blijken dan (zeer) beperkt te zijn. Ook dit is een reden om niet erg bezorgd te zijn over de onzekerheden in de berekeningen van de optimale strategie in hoofdstuk 4.

Let wel, dat deze uitspraken alleen gelden bij uitvoering van de optimale strategie. Als er minder is geïnvesteerd dan de optimale strategie aangeeft, dan is het mogelijk dat achteraf anders uitvallende kosten wel sterk afwijken van de eerder voorziene kosten.

5.1.3 Onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen: optiewaarde van uitstel

Een bijzondere vorm van cijfermatige onzekerheid is de onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen: Verloopt de stijging van de waterstanden wel volgens het midden klimaatscenario? Of: Hoe groot is de specifieke economische groei per dijkkring? Naarmate we opschuiven in de tijd, komen we over ontwikkelingen tot dan toe steeds meer te weten en daarmee soms ook over het toekomstige verloop van verschijnselen. Denk bijvoorbeeld aan de

⁴⁴ Daarvoor is wel vereist dat die oplossingen zelf een lange levensduur hebben. Als oplossingen echter snel hun waarde verliezen, geldt de stelling niet zonder meer.

groeïende kennis over klimaatverandering of het recent gereed komen van de Nederlands-Duitse Hoogwaterstudie (RIZA, 2004). Op basis van nieuwe informatie zouden we betere berekeningen kunnen maken en mogelijk betere beslissingen kunnen nemen.

Ook in dit geval is er sprake van asymmetrie. Als we recent een flinke investering hebben gedaan, hebben we een tijd lang niet veel aan nieuwe informatie want tijdstip en omvang van de laatst gedane investering liggen al vast en het is kostbaar direct weer een nieuwe actie te ondernemen. Als we echter de investeringsbeslissing iets hadden uitgesteld, dan hadden we wellicht over meer informatie beschikt en dus over het algemeen een betere beslissing kunnen nemen.

Het instandhouden van de mogelijkheid om een investeringsbeslissing nog aan te kunnen passen, heeft een zekere waarde die de 'optiewaarde van uitstel' heet. Omdat kennis altijd toeneemt, is de 'optiewaarde van uitstel' bruto een positief bedrag. Dit bedrag verdwijnt op het moment dat het besluit tot investeren onherroepelijk is genomen en verhoogt daardoor als het ware de investeringskosten. Het verlies van de optiewaarde is niet in de berekeningen meegenomen.

Tegenover de bruto waarde van de optie staat de te betalen optiepremie. De optiepremie is hier het verschil tussen de verwachte schade en het rentevoordeel van niet investeren, beide gedurende de periode van uitstel. Omdat het alleen gaat om uitstel na het optimale moment van investeren volgens de rechttoe-rechtaan berekening, is de optiepremie per definitie altijd een positief bedrag en stijgt deze bovendien snel naarmate het verschil met het optimale tijdstip groter wordt. (In figuur 2.3 schuiven we naar links.)

De maatschappij heeft alleen voordeel bij uitstel ten opzichte van het optimale tijdstip uit de rechttoe-rechtaan berekening, als de bruto waarde van de optie groter is dan die van de optiepremie. Onmiddellijk na het optimale tijdstip is dat mogelijk het geval. Meenemen van het verlies van een positieve 'optiewaarde van uitstel' bij investeren betekent theoretisch per saldo dat het investeringsmoment naar de toekomst wordt geschoven.

De vraag is of we nog iets kunnen zeggen over de praktische betekenis van de 'optiewaarde van uitstel'. Hoewel een echte berekening de strekking van dit onderzoek ver te buiten gaat, laat een benadering op basis van een plotselinge verdubbeling van de overstromingskansen in paragraaf 5.11 zien dat het om niet veel meer kan gaan dan een uitstel van enkele weken, als het al zoveel is (zie bijlage A, paragraaf 11). Deze variant is een realistische want beschrijft de bijstelling van de overstromingskansen in 2001 op basis van de hoogwaters in 1993 en 1995. Informatie op korte termijn die voldoende zou zijn om te besluiten tot veel lagere overstromingskansen dan we dachten, is eigenlijk niet goed voorstelbaar. Dit is inclusief een inschatting van de kans op eventuele goede en betrouwbare informatie die niet afkomstig is van feitelijke gebeurtenissen, maar komt uit bijvoorbeeld simulatiestudie over de toekomst.

Gezien het feit dat er alom zorg is of de grote maatregelen voorzien in de PKB echt wel uiterlijk in 2015 gerealiseerd kunnen worden, is 'enkele weken uitstel voor het gebruik van meer informatie' een termijn die in het licht van het bestuurlijke proces betekenisloos is.

5.1.4 Liever zekerheid dan onzekerheid: risico-aversie

De in hoofdstuk 2 beschreven en in hoofdstuk 4 berekende afweging tussen meer verwachte schade aan de ene kant en meer investeringskosten aan de andere kant heeft een aspect dat tot nu toe nog niet is genoemd. Deze afweging is namelijk ook een afweging tussen iets dat zeker is, en iets dat onzeker is. De verwachte schade is de uitkomst van een onvoorspelbaar proces, terwijl de uitgave aan bijvoorbeeld dijkverhoging vast staat.

Mensen waarderen een biljet van 20 euro anders dan een lot met een kans van 1/10-de op 200 euro. Zij zullen niet bereid zijn beide zaken ongelimiteerd tegen elkaar in te wisselen en iets soortgelijks geldt dus ook bij de afweging die hier aan de orde is. Mensen waarderen een euro extra verwachte schade (kans maal schade bij overstromen) dus anders dan een euro extra investeringskosten.

Over het algemeen waarderen mensen een bate die zeker is, hoger dan een bate uit een loterij die gemiddeld over alle mogelijke uitkomsten op hetzelfde bedrag uitkomt. Deze houding van mensen staat bekend als risico-aversie. In dit geval, waarin de bate bestaat uit het vermijden van een grote schade, zullen mensen meer aan investeringen willen uitgeven dan strikt overeenkomt met de vermindering van de verwachte schade, puur om het lopen van dit risico te vermijden.^{45,46} Ook om deze reden zou er dus steeds iets eerder geïnvesteerd moeten worden dan volgt uit de berekening, hetgeen de investeringskosten verhoogt.

Het is niet duidelijk of risico-aversie ook altijd geldt voor de overheid als hoeder van het algemeen belang. Juist de overheid zou een rationele afweging kunnen maken, lettend op het veelvuldig voorkomen van beslissingen als deze. Als in een aantal gevallen om deze reden tot hogere uitgaven wordt besloten, dan blijft er voor andere, ook nuttige uitgaven minder geld over waardoor daar wellicht juist meer risico moet worden gelopen dan rationeel gezien optimaal is. Op dit punt kan risico-aversie dus afwijken van de aanbeveling op grond van asymmetrie bij het verloop van de totale kosten als besproken in paragraaf 5.1.2. Die aanbeveling is namelijk gebaseerd op de wet van de grote aantallen en levert dus juist voor het totaal van veel gevallen lagere kosten dan volgt uit de som van de afzonderlijk berekende minima.

Een goede reden voor risico-aversie, juist door de overheid, kan zijn het voorzorgsmotief om toekomstige generaties niet met een groot probleem op te zadelen. Dit argument lijkt hier geen grote rol te spelen, omdat de strategie later altijd nog aangepast kan worden. Een andere reden kan zijn dat niet alle schade van een overstroming wordt ‘gepooled’ en over alle Nederlanders omgeslagen, zoals bij het afbranden van een overheidsgebouw. Een deel van de

⁴⁵ Het is bekend dat een fors deel van de premies voor een brandverzekering opgaat aan alles wat met het verzekeren zelf te maken heeft en niet met een uitkering bij schade. *Gemiddeld* genomen is iemand dus beter af door zich niet te verzekeren. Toch verzekeren ook miljonairs hun huis van bijvoorbeeld 5 ton, ook al kunnen zij de schade dragen zonder failliet te gaan. Alleen een instantie die zo groot is als het Rijk en die niet failliet kan gaan omdat het Rijk kan terugvallen op alle belastingbetalers, verzekert zich niet tegen brand.

⁴⁶ Let wel dat het bij risico-aversie niet gaat om een (impliciete) waardering voor niet-monetaire schade, zoals schade in de vorm van verdriet van mensen. Hoe moeilijk te waarderen ook: een waardering voor alle niet-monetaire schades behoort al opgenomen te zijn in het schadebedrag bij overstromen, al was het maar bij wijze van opslag.

schade bij overstromen, bijvoorbeeld het immateriële deel, wordt alleen door de getroffen en gedragen. Daarom zou de overheid met hun risico-aversie rekening moeten houden.

Als we met risico-aversie rekening willen houden, dan kan dat het makkelijkst door het bedrag aan schade bij overstromen te verhogen, zie paragraaf 5.3. Het is echter niet te zeggen wat daarvoor een goede schatting zou zijn. Een andere mogelijkheid, waarin vooral het voorzorgsmotief naar voren komt, is verlaging van de disconteringsvoet, zie paragraaf 5.6.

5.1.5 Overstroming geeft altijd grote schade: groepsrisico

Een argument dat – net zoals risico-aversie – niet alleen te maken heeft met de omvang van de schade maar ook met de waardering daarvan, is dat aan een groot ongeluk zwaarder wordt getild dan aan een aantal kleine ongelukken met in totaal dezelfde directe schade. Voor een deel is dit emotioneel, voor een deel is het rationeel omdat een groot ongeluk een relatief grotere maatschappelijke verstoring teweeg brengt dan een aantal kleine. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk om reguliere hulpverlening af te stemmen op de grootste mogelijke ramp. Zo is het niet erg moeilijk de bewoners van een afgebrand huis elders onder te brengen; bij de vernietiging van een wijk, zoals bij de vuurwerkramp, is dat al moeilijker en het wordt helemaal een moeilijke zaak om bijvoorbeeld 250 dzd inwoners van een grote dijkkring na een overstroming minimaal enige weken/maanden tot meer dan een jaar elders onder te brengen.

Om al dit soort redenen kan het zinvol zijn om grote schades zwaarder te wegen dan de som van een aantal kleine. Of een kwadratische waardering – zoals in Nederland wordt gehanteerd bij de voorgestelde, maar nog niet vastgestelde norm voor groepsrisico op dodelijke slachtoffers – het meest geschikt is, is de vraag. In het buitenland blijken veel minder steil oplopende waarderingen te worden gebruikt. Maar om een groot risico zwaarder te wegen, daarvoor zijn ook voor de overheid goede argumenten te geven. De gemakkelijkste manier om daarmee rekening te houden is een ophoging van het schadebedrag, zie paragraaf 5.3.

5.2 Toelichting op de uitkomsten van varianten

De voornaamste uitkomsten ten behoeve van de PKB, die in hoofdstuk 4 staan, geven nog geen goed beeld van onzekerheidsmarges rond die uitkomsten wanneer parameters of variabelen gevarieerd worden. Vandaar dat in dit hoofdstuk eerst een aantal onzekerheidsvarianten wordt gepresenteerd (paragrafen 5.3 tot en met 5.10). De toelichting op deze varianten beperkt zich tot de hoofdlijnen. Achtereenvolgens komen daarin aan de orde:

- De effecten op het schade-interval, waaronder de standaardverhoging en de periodelengte;
- Het effect op de gemiddelde overstromingskansen;
- Het effect in de aanloopperiode en met name in 2015.

Hieronder wordt eerst een korte algemene toelichting gegeven met behulp van een aantal vereenvoudigde formules die de hoofdlijnen van de verbanden schetsen. Aan de hand daarvan zijn de verschillende uitkomsten in de volgende paragrafen makkelijk te interpreteren.

5.2.1 Effect op het schade-interval

Bij het schade-interval kunnen zowel de ligging als de omvang van belang zijn. De omvang komt tot uitdrukking in zowel de standaard dijkverhoging als de lengte van de periode.

Wat de ligging betreft, is het handig om een formule in gedachten te houden die bij benadering beschrijft wat de gemiddelde optimale verwachte schade is. Volgens bijlage A, paragraaf 8.1 is dat:

$$S^{gem} \approx \delta \frac{1}{\theta} \frac{I(u)}{u} \quad (5.1)$$

waarin: S	gemiddelde optimale verwachte schade
I	investeringskosten
u	optimale omvang dijkverhoging
δ	disconteringsvoet
θ	effect van een cm dijkverhoging op de verwachte schade

De laatste factor (breuk) in (5.1) is de gemiddelde kosten per centimeter optimale dijkverhoging. $1/\theta$ is een aantal centimeters. De laatste twee factoren samen zijn dus een investeringsbedrag. Dit eenmalige bedrag wordt met behulp van de rentevoet δ omgezet in een equivalent bedrag per jaar (annuïteit). Deze formule is exact als de investeringskosten niet afhankelijk zijn van de dijkhoogte. In het algemeen is dat laatste echter wel het geval ($\lambda > 0$), maar ook dan geeft formule (5.1) nog steeds een goede benadering van de effecten op de gemiddeld optimale schade.

Met betrekking tot de omvang van het schade-interval is het van belang dat uit bijlage A, paragraaf 7 duidelijk wordt dat de omvang van het interval vooral wordt bepaald door de verhouding tussen de totale kosten en de marginale kosten:

$$u \approx I(u) / I'_u(u) \quad (5.2)$$

ofwel door de verhouding tussen de vaste en de variabele kosten. De absolute omvang van de investeringen (bijvoorbeeld de lengte van de dijk in kilometers) heeft in het algemeen dus geen invloed op de omvang van de standaardverhoging u of de standaardlengte van de periode D.

5.2.2 Effect op overstromingskansen

De gemiddelde overstromingskansen worden weliswaar uitgerekend met een formule die nog wat ingewikkelder is dan de correcte versie van (5.1), maar het resultaat wijkt niet veel af van:

$$P_{2015}^{gem} \approx \frac{S^{gem}}{V_{2015}} \quad (5.3)$$

waarin: P overstromingskansen
 S verwachte schade
 V schade bij overstromen

Ook als het schade-interval in een variant (bijna) constant blijft – en daarmee ook de gemiddeld optimale schade –, kan de overstromingskansen wijzigen door een verandering in de schade bij overstroming.

5.2.3 Effect op de eerste investeringsbeslissing

Er verandert – in ieder geval voorlopig – niet veel zolang de werkelijk verwachte schade S_t kleiner blijft dan de (voor dat jaar geldende) waarde van de optimale bovengrens voor de schade s^- . Of in formule vorm, er wordt niet geïnvesteerd zolang:

$$S_t < s^- \quad (5.4)$$

5.3 Variant 1: Schade bij overstromen (V) +20%

Reden

Er is een aantal redenen waarom een grotere schade bij overstromen dan waarmee in hoofdstuk 4 is gerekend, relevant kan zijn voor de beslissing. Grotere schade kan voortkomen uit een onderschatting van de schade in het HIS, bijvoorbeeld omdat de schoonmaakkosten van vervuilde grond (gif) en andere milieuschade niet of onvoldoende in het HIS zijn meegenomen. Een tweede reden kan zijn dat de opslagfactor voor landschap, natuur en cultuurhistorische waarden in de hoofdvariant ten onrechte niet is gebruikt ($\mu = 1$, zie paragraaf 3.3). Verder kan de opslag voor niet-monetaire waarden per inwoner (5000 euro) te laag zijn gesteld, bijvoorbeeld omdat er bij een grote overstroming toch een klein, maar niet verwaarloosbaar aantal slachtoffers valt te betreuren. Dit kan mede te maken hebben met het feit dat er meer evacuatieën zullen zijn dan overstromingen. Ook de evacuatiekosten kunnen dus onderschat zijn. Al deze argumenten betreffen de (fysieke) omvang van de schade.

Daarnaast zijn hierboven nog twee argumenten voor verhoging gegeven die gedeeltelijk gebaseerd zijn op de waardering van schade, namelijk risico-aversie (zie 5.1.4) en groepsrisico (zie 5.1.5).

Er is ook een argument om bij sommige dijkkringen te rekenen met minder schade dan af te leiden is uit het DWW-rapport (DWW, 2003). Inmiddels heeft o.a. WL Delft Hydraulics commentaar geleverd op dit DWW-rapport, zie WL en HKV (2004). Voor de meeste dijkkringen zien zij na een beoordeling geen reden om van de DWW-cijfers af te wijken. In een paar dijkkringen is er reden om 10% hoger of lager te gaan zitten. Er zijn echter drie dijkkringen waar zij reden vinden voor een forse afwijking, namelijk voor 44 Kromme Rijn en wel bij een overstroming vanuit de Lek een correctie van maar liefst –80%, bij dijkkring 11 IJsseldelta een correctie van –21% en bij dijkkring 15 Lopiker- en Krimpenerwaard een correctie van –50%. De reden is vooral dat WL e.a. van mening zijn dat onder de beschreven omstandigheden niet de hele dijkkring onderloopt, maar slechts een laag gelegen deel.

Uitkomsten

Tabel 5.1 Variant 1: Schade bij overstromen V + 20%

Nr.	Naam	Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromingskans	Totale kosten van schade en Investeren
		jaartal	cm	1/jaar	mln euro
Bovenrivierengebied BOR					
38	Bommelerwaard	2015	85	1/2800	210
40	Heerwaarden	-	-	-	-
41	Land van Maas en Waal	2015	121	1/7350	380
42	Ooij en Millingen	2015	76	1/2350	100
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	84	1/2600	1.600
44	Kromme Rijn	2015	92	1/42100	250
45	Gelderse Vallei	2015	80	1/64500	40
47	Arnhemse- en Velperbroek	2015	84	1/3900	80
48	Rijn en IJssel	2015	76	1/2500	520
49	IJsselland	2028	46	1/1050	110
50	Zutphen	2015	116	1/10600	60
51	Gorssel	2032	40	1/850	80
52	Oost Veluwe	2015	57	1/2850	300
53	Salland	2015	104	1/8550	350
10	Mastenbroek	2042	57	1/3350	60
11	IJsseldelta	2039	62	1/1600	160
Benedenrivierengebied BER					
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	72	1/5300	670
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	63	1/5000	1.370
22	Eiland van Dordrecht	2015	54	1/7650	420
23	Biesbosch (Noordwaard)	2056	53	1/150	40
24	Land van Altena	2015	73	1/1900	380
35	Donge	2015	83	1/2650	460

Door het hogere schadeniveau bij overstromen wordt de norm voor de verwachte schade eerder of meer overschreden dan in de basisvariant. Daarom zal er eerder of meer worden geïnvesteerd om de grotere achterstand in te halen.

Het niveau van de schade bij overstromen speelt echter geen enkele rol in de bepaling van de norm voor de verwachte schade. Het optimale schade-interval wordt zowel qua ligging als qua vorm vooral bepaald door de omvang en de vorm van de investeringen. Van de schade speelt daarbij alleen de groeivoet een rol, zie daarvoor paragraaf 5.4. In overeenstemming met formules (5.1) en (5.2) blijven absolute ligging en omvang van het schade-interval dus ongewijzigd. Hetzelfde geldt daarom voor de kosten van restschade en investeren tijdens herhaalperioden.

De uit het onveranderde schade-interval volgende overstromingskansen blijven echter niet gelijk, zie formule (5.3). Omdat de optimale verwachte schade niet wijzigt en de schade bij overstromen wel, dalen alle optimale overstromingskansen even hard als de toename van de schade bij overstromen (dat wil hier zeggen ook 20%). Het optimale veiligheidsniveau stijgt dus even veel als de schade bij overstromen stijgt.

Waar de grotere schade bij overstromen wel rechtstreeks invloed op heeft, is de eerste investeringsbeslissing. Immers, de verwachte schade stijgt onmiddellijk met 20% en dus is het mogelijk dat niet meer is voldaan aan formule (5.4). Voorzover er in 2015 nog niet geïnvesteerd werd, kan dat nu wel het geval zijn, zie bijvoorbeeld dijkkring 42 Ooij en Millingen. Uit vergelijking van tabel 5.1 met Tabel 4.3 blijkt dat het moment van eerste investering afgerond 6 jaar naar voren schuift. Wanneer er toch al in 2015 geïnvesteerd werd, dan wordt de eerste dijkverhoging groter en wel bij de bovenrivieren ongeveer 6 cm. In beide gevallen treedt een stijging van de totale kosten op.

Bij de benedenrivieren heeft een centimeter dijkverhoging een groter effect op de overstromingskansen (α is groter, zie tabel 3.2). Vandaar dat de benodigde extra verhoging in BER rond de 3 cm ligt.

De verandering in de totale kosten van schade en investeren blijft veel beperkter dan de initiële verhoging van de schadekosten met 20%. Dat komt voor een deel omdat verwachte schade maar een deel is van alle kosten. Maar ook omdat de optimale investeringsstrategie reageert op de verhoging van de schade, waardoor het effect van die verhoging wordt gemitigeerd. Zo veranderen ondanks de verhoging van de schade bij overstromen toch de schadenormen niet en blijft de gemiddeld verwachte schade dus ook onveranderd. Wel moet daarvoor de eerste keer meer geïnvesteerd worden.

In de onderstaande tabel staan de uitkomsten voor de drie dijkkringen vermeld bij de veel lagere inschatting van de schade door WL.

Tabel 5.2 Schade volgens deskundigenoordeel WL

Nr.	Naam	Afwijking WL t.o.v. DWW	Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromings kans	Totale kosten van schade en investeren
		%	jaartal	cm	1/jaar	mln euro
44	Kromme Rijn	– 80	2020	49	1/7000	140
11	IJsseldelta	– 21	2052	62	1/1050	120
15	Lopiker- en Krimpenewaard	– 50	2015	58	1/2200	550

De resultaten zijn naar verwachting. De eerste verhoging kan (verder) worden uitgesteld of kleiner uitvallen. Aan de normen voor de schade en de omvang van het herhalingsinterval verandert niets. De gemiddelde optimale overstromingskans komt veel hoger te liggen, maar blijft niettemin bij 44 Kromme Rijn relatief klein. Zelfs bij een 80% lagere schade is een veel hoger veiligheidsniveau dan nu in de wet staat, voor deze dijkkring alleszins verantwoord. De totale kosten van schade en investeren vallen natuurlijk lager uit, maar veel minder laag dan de verlaging van de schade bij overstromen. Ook voor de variant met lagere schade blijft de gemiddeld optimale verwachte schade ongewijzigd.

5.4 Variant 2: Hogere economische groei (γ) van 3%

Reden

In de vier nieuwe lange termijnscenario's van het CPB tot 2040 loopt de economische groei (volume bbp) uiteen van 0,7% tot 2,6% per jaar. De groei van 2% die in de hoofdvariant wordt gehanteerd, wordt in slechts één van de vier scenario's overtroffen, de andere drie groeivoeten blijven er meer of minder onder. In dit onderzoek gaat het echter niet zozeer om de economische groei in heel Nederland, maar om de economische groei per dijkkring. Juist de laatste jaren is er een toenemende tendens om de steden uit te breiden in lage gebieden, denk aan Arnhem Zuid of de Waalsprong bij Nijmegen. Vandaar dat vanwege de veiligheid toch wordt onderzocht wat een iets hoger structureel groeitempo van 3% per jaar betekent. In paragraaf 5.9 staat een variant met onder andere een lagere economische groei.

Uitkomsten

De ligging van het schade-interval wordt bepaald door de rechterkant van formule (5.1). Daarin komt de parameter voor de economische groei niet rechtstreeks voor. Die invloed kan alleen lopen via een andere optimale omvang van de dijkverhoging, waardoor de gemiddelde investeringskosten veranderen. Maar ook de invloed van de optimale standaarddijkverhoging op de gemiddelde investeringskosten per cm verhoging is beperkt. Per saldo is er dus nauwelijks een effect van andere economische groei op de gemiddeld verwachte schade.

Aan de omvang van het schade-interval verandert wel iets. Het makkelijkst is dat af te leiden uit de lengte van de periode D. Door de hogere economische groei wordt de bovengrens

van de verwachte schade eerder bereikt. De periode D wordt dus korter en er wordt frequenter geïnvesteerd. Daardoor stijgt relatief de omvang van de vaste kosten bij investeren. Als gevolg daarvan wordt de standaard dijkverhoging u wat groter, waarmee de verkorting van de herhaalperiode weer enigszins wordt teruggedrongen. Per saldo wordt de herhaalperiode D korter, en wel rond de 10 jaar in BOR en rond 5 jaar in BER. De verkorting van de periode is in BER kleiner, omdat economische groei daar relatief beperkter van invloed is ten opzichte van de stijging van de waterstanden. De standaarddijkverhoging u wordt 5 à 7 cm groter bij de bovenrivieren en eveneens ongeveer de helft daarvan bij BER. De totale kosten van restschade en investeren gedurende de herhaalperioden worden belangrijk groter.

Tabel 5.3 Variant: Economische groei $\gamma = 3\%$

1	2	3	4	5	6	7	8
		Optimale jaar voor eerste investering	Eerste verhoging	Gemiddelde overstro- mingskans	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten van schade en investeren
		jaartal	cm	1/jaar	jaren	cm	mln euro
Bovenrivierengebied BOR							
38	Bommelerwaard	2015	86	1/3050	42	67	230
40	Heerewaarden (Waal)	–	–	–	51	86	–
41	Land van Maas en Waal	2015	123	1/8300	51	81	410
42	Ooij en Millingen	2015	80	1/2700	51	79	110
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	87	1/2950	53	80	1.750
44	Kromme Rijn	2015	92	1/45450	45	53	270
45	Gelderse Vallei	2015	75	1/68850	41	45	50
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	85	1/4300	42	60	80
48	Rijn en IJssel	2015	76	1/2600	34	54	580
49	IJsselland	2027	49	1/1150	43	49	120
50	Zutphen	2015	119	1/12300	49	68	60
51	Gorssel	2030	44	1/900	42	44	90
52	Oost Veluwe	2015	58	1/3150	47	50	320
53	Salland	2015	107	1/9950	56	72	380
10	Mastenbroek	2038	62	1/3800	47	62	70
11	IJsseldelta	2035	69	1/1850	49	68	180
Benedenrivierengebied BER							
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	73	1/6300	47	57	730
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	65	1/6150	49	55	1.490
22	Eiland van Dordrecht	2015	55	1/10000	55	54	450
23	Biesbosch (Noordwaard)	2051	55	1/200	42	55	40
24	Land van Altena	2015	75	1/2200	39	65	410
35	Donge	2015	84	1/2950	37	62	520

Door de hogere economische groei vanaf 2002 is de verwachte schade in 2015 ruim 10% groter dan in de hoofdvariant. Dit betekent dat voor overstromingskansen en voor tijdstip en omvang eerste investering in principe hetzelfde geldt als in de vorige variant, waarin de schade met 20% is verhoogd. Op den duur wordt dit effect op de verwachte schade steeds groter, zodat verder in de toekomst gelegen jaren van eerste investering nog iets meer naar voren opschuiven. Ook tikt het groeiverschil iets zwaarder dan in de vorige variant door in de gemiddelde overstromingskans over een complete herhalingsperiode. Hoewel de ligging van het optimale schade-interval niet veel verandert, verandert er wel vrij veel aan de gemiddelde optimale overstromingskans. Ook moet deze op de lange duur 1%-punt sneller dalen dan in de hoofdvariant. Daarnaast nemen de schommelingen in de overstromingskansen af, omdat D afneemt. De totale kosten van schade en investeren nemen meer toe dan in de vorige variant.

5.5 Variant 3: Stijging waterstanden volgens hoge klimaatscenario ($\eta \approx$ tweemaal zo groot)

Reden

Ligt het effect van andere economische groei op verwachte schade mogelijk in de orde van grootte van 1% per jaar, bij de overstap van het midden naar het hoge klimaatscenario gaat het om een verdubbeling van de bijbehorende percentages. Bij de bovenrivieren is dat een verdubbeling van ruim 1% per jaar tot ruim 2% per jaar, maar bij de benedenrivieren kan het gaan om een verdubbeling van 4 à 5% per jaar tot 8 à 10% per jaar!

De onzekerheid ligt niet alleen naar boven. In paragraaf 4.5 zijn echter voor BOR al de uitkomsten getoond van een variant die nog wat extremer is dan het lage klimaatscenario, namelijk geen enkele stijging van de Maatgevende Hoogwaterstand. In paragraaf 5.9 is diezelfde variant uit paragraaf 4.5 gecombineerd met minder stijging van de waterstanden in BER en met weinig economische groei.

Uitkomsten

Zowel economische groei als stijging waterstanden werken slechts via een en dezelfde combinatieparameter (β) in het model door. Een aantal effecten is dus qua richting precies hetzelfde als bij hogere economische groei, alleen de omvang is hier groter. Bij de bovenrivieren is het effect vergelijkbaar met 1,1% meer economische groei en daardoor zijn de effecten slechts iets groter dan die in de vorige variant. In BER zijn de verschillen veel groter.

Wat ten opzichte van de vorige variant ontbreekt, is de verkleining van de gemiddelde overstromingskans, zie formule (5.3). Integendeel, overstromingskansen worden wat hoger dan in de hoofdvariant omdat de investeringskosten duidelijk toenemen. Dat is met name te zien in BER. Het effect van de sneller stijgende waterstanden wordt door meer investeren dus wel gemitigeerd, maar niet volledig opgeheven.

Tabel 5.4 Variant: hoge klimaatscenario (η ongeveer tweemaal zo groot)

1	2	3	4	5	6	7	8
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijk- verhoging	Gemiddelde overstromings- Kans	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten schade en investeren
	Bovenrivierengebied BOR	jaartal	cm	1/jaar	jaren	cm	mln euro
38	Bommelerwaard	2015	87	1/2100	41	67	240
40	Heerewaarden (Waal)	–	–	–	50	86	–
41	Land van Maas en Waal	2015	124	1/5400	51	82	420
42	Ooij en Millingen	2015	81	1/1750	50	79	110
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	89	1/1900	52	80	1.790
44	Kromme Rijn	2015	93	1/31100	44	54	270
45	Gelderse Vallei	2015	75	1/47900	41	45	50
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	86	1/2950	42	61	80
48	Rijn en IJssel	2015	77	1/1850	33	55	600
49	IJsselland	2026	50	1/800	43	50	120
50	Zutphen	2015	120	1/8200	48	69	60
51	Gorssel	2029	44	1/600	41	44	90
52	Oost Veluwe	2015	59	1/2100	47	50	330
53	Salland	2015	107	1/6300	56	72	380
10	Mastenbroek	2037	63	1/2550	47	63	70
11	IJsseldelta	2035	69	1/1250	49	69	180
	Benedenrivierengebied BER						
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	85	1/3900	40	64	900
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	78	1/3750	41	63	1.850
22	Eiland van Dordrecht	2015	63	1/5600	48	59	520
23	Biesbosch (Noordwaard)	2043	55	1/100	33	55	70
24	Land van Altena	2015	82	1/1400	35	69	490
35	Donge	2015	89	1/1950	33	65	620

5.6 Variant 4: Rentevoet (δ) 7% in plaats van 4%

Reden

In kosten-batenanalyses mag niet zonder meer de basisdisconteringsvoet van 4% (reëel, risicovrij) worden gebruikt. Er dient expliciet aandacht te worden besteed aan een risico-opslag. Dat kan het geval zijn als (delen van) projecten privaat gefinancierd worden. Bij het Rijk kan het niet-diversificeerbare macro-economische risico een reden zijn, dat wil meestal zeggen de samenhang van de baten van het project en economische groei. Ook hierover is inmiddels een leidraad verschenen, die voorschrijft om in geval er geen specifiek onderzoek is gedaan, een

opslag van 3% te hanteren (V&W e.a., 2004). Dit macro-economische risico speelt hier in principe een rol, daar de omvang van de baten van een investeringsactie – namelijk de vermindering van de verwachte schade – positief samenhangt met de algemene economische groei in Nederland.

Waarom geen risico-opslag in de hoofdvariant?

De invloed van deze samenhang op de baten is bij dit project echter beperkt, zie bijvoorbeeld paragraaf 5.13. Dat geldt met name de kans dat een nu optimaal lijkend project uiteindelijk toch een negatieve rentabiliteit zou krijgen. De stijging van de verwachte schade is in BER voor een groter deel afhankelijk van de stijging van de waterstanden (4 à 5% per jaar) dan van de economische groei (2% in de hoofdvariant). Zelfs bij de bovenrivieren zouden de te beschermen waarden nog met ruim 1% per jaar mogen dalen (dus structureel negatieve economische groei) voordat de verwachte schade niet meer stijgt. Bij de benedenrivieren is dat een veelvoud daarvan. Zowel de paragrafen 5.12 als 5.13 laten zien dat zelfs bij grote afwijkingen achteraf de contante waarden van nu optimaal lijkende projecten niet ver aflaggen van de kosten die achteraf gezien optimaal zouden zijn geweest.

Ten tweede gaat de echte beslissing slechts over de eerste investering en dan nog alleen als het eerste investeringsmoment niet (veel) verder ligt dan 2015. Over alle andere uitkomsten van de strategie wordt nu geen beslissing genomen en die kunnen dus altijd later nog worden aangepast. De optimaliteitsvoorwaarden houden in dat een investering al direct in het eerste jaar rendabel is. Verder laat het eerste argument zien dat een negatieve opbrengst in de periode daarna eigenlijk uitgesloten mag worden geacht binnen ieder ‘verrassingsvrij’ scenario.⁴⁷ Het macro-economisch risico speelt dus eigenlijk alleen in de periode dat al wel een onomkeerbaar aanlegbesluit is genomen en Nederland tot 2015 terecht komt in een zware economische crisis. Op grond van deze (project specifieke) overwegingen is besloten om in de hoofdvariant geen opslag toe te passen voor het macro-economische risico. De variant in paragraaf 5.13 is speciaal toegevoegd om deze keuze te onderbouwen.

Uitkomsten

Met een stijging van de parameterwaarde van liefst 75% is dit een relatief veel grotere variant dan de meeste andere varianten in dit hoofdstuk. De renteverhoging heeft een rechtstreeks en bovendien groot effect op de optimale verwachte schade, zie formule (5.1). In het rechterlid nemen de investeringskosten op jaarbasis (annuïteit) met een factor 7/4 (75%) toe. Bij de meeste dijkeringen is de verandering van de gemiddeld optimale verwachte schade afgerond daaraan gelijk. De verandering van de overstromingskansen is evenredig met de verandering van de verwachte schade. Ook de optimale overstromingskansen gaan dus met een factor 7/4 omhoog.

⁴⁷ De term ‘verrassingsvrij’ is hier gebruikt in de betekenis die Kahn en Wiener daaraan gaven in hun standaardwerk ‘Het jaar 2000’. Het is een scenario waarin grote wereldrampen (denk aan een nucleaire derde wereldoorlog, een nieuwe (pest)epidemie of een botsing met een planetoïde) niet in de beschouwing worden betrokken

Tabel 5.5 Variant: disconteringsvoet 7%

1	2	3	4	5	6	7	8
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromings- kans	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten van schade en investeren
	Bovenrivierengebied BOR	jaartal	cm	1/jaar	jaren	cm	mln euro
38	Bommelerwaard	2016	54	1/1250	44	54	140
40	Heerewaarden (Waalkant)	–	–	–	53	67	–
41	Land van Maas en Waal	2015	87	1/3050	54	64	270
42	Ooij en Millingen	2034	61	1/950	52	61	60
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2027	63	1/1100	56	63	1.020
44	Kromme Rijn	2015	68	1/18150	48	43	170
45	Gelderse Vallei	2015	55	1/28300	44	36	30
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	54	1/1650	44	48	50
48	Rijn en IJssel	2015	50	1/1150	37	45	310
49	IJsselland	2050	39	1/450	46	39	50
50	Zutphen	2015	82	1/4200	49	52	50
51	Gorssel	2054	35	1/350	45	35	30
52	Oost Veluwe	2022	39	1/1200	50	39	200
53	Salland	2015	74	1/3400	58	56	260
10	Mastenbroek	2065	48	1/1350	48	48	30
11	IJsseldelta	2061	52	1/650	49	52	70
	Benedenrivierengebied BER						
15	Lopiker- en Krimpenwaard	2015	54	1/2250	44	45	440
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	46	1/2100	45	43	920
22	Eiland van Dordrecht	2023	42	1/2950	50	42	290
23	Biesbosch (Noordwaard)	2066	44	1/50	39	44	10
24	Land van Altena	2017	53	1/800	36	53	250
35	Donge	2015	62	1/1200	36	51	270

Door de hogere ligging van het schade-interval kan het jaar van eerste investering naar achteren schuiven. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar bij dijkkring 43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden. Daar schuift het jaar van de eerste investering van 2015 naar 2027. Voorzover 2015 voor andere dijkkringen toch het eerste jaar van investeren blijft, is de achterstand ten opzichte van de bovengrens van het schade-interval kleiner en zal er dus minder geïnvesteerd hoeven worden. Zie bijvoorbeeld dijkkring 41 land van Maas en Waal, waar de hoogte van de eerste dijkverhoging terugloopt van 115 cm naar 87 cm. Om beide redenen gaan de totale kosten van

restschade en investeren omlaag. Het effect hiervan op de netto contante waarde van alle kosten wordt nog versterkt omdat alle toekomstige kosten minder zwaar tellen.

De omvang van het herhalingsinterval wordt duidelijk kleiner. Daar de disconteringsvoet op vier plaatsen direct voorkomt in de formule van dit interval en bovendien nog op vier plaatsen impliciet, is dat niet makkelijk uit te leggen (zie formule (A.64)).

5.7 Variant 5: Investeringskosten (I en I') +20%

Reden

Investeringskosten hebben eerder de neiging tegen te vallen dan om mee te vallen. Dat ligt overigens niet zozeer aan onzorgvuldig ramen, maar vaak meer aan het veranderen van het project om tegemoet te komen aan wensen uit de samenleving (TCI, 2004, paragraaf 2.2). Toch melden ook de ingenieurs een mogelijke foutenmarge van 40% (ARF, 2004a). Anderzijds is het zo dat in de hier gebruikte investeringscijfers een opslag zit verwerkt voor *extra* kosten van onderhoud en beheer van 1% per jaar. Dit is voor een dijkverhoging aan de zeer hoge kant. Het is zelfs goed mogelijk dat er in het geheel geen extra kosten van onderhoud zijn. In dat geval vallen de in hoofdstuk 4 gebruikte investeringscijfers 25% lager uit.

Uitkomsten

De variant met 20% hogere investeringskosten lijkt in sommige opzichten qua richting sterk op de vorige, maar is in omvang kleiner. Ook nu stijgen de investeringskosten op jaarbasis met alle gevolgen van dien voor de gemiddelde overstromingskansen, formule (5.1). Een belangrijk verschil is wel dat de omvang van het schade-interval niet verandert, omdat de verhouding tussen vaste en variabele kosten hetzelfde blijft, zie formule (5.2). Voor veel andere effecten kan worden verwezen naar de rentevariant. Wel ontbreekt het 'krimpen' van de (toekomstige) kosten, wat zo kenmerkend is voor een rentevariant.

Tabel 5.6 Variant 5: Investeringskosten + 20%

Nr.	Naam	Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromingskans	Totale kosten van schade en investeren
		jaartal	cm	1/jaar	mln euro
Bovenrivierengebied BOR					
38	Bommelerwaard	2015	73	1/1950	220
40	Heerewaarden	—	—	—	—
41	Land van Maas en Waal	2015	108	1/5100	420
42	Ooij en Millingen	2023	72	1/1600	110
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2016	73	1/1800	1.720
44	Kromme Rijn	2015	82	1/29250	270
45	Gelderse Vallei	2015	67	1/44750	40
47	Arnhemse- en Velperbroek	2015	72	1/2700	80
48	Rijn en IJssel	2015	65	1/1750	540
49	IJsselland	2040	46	1/750	100
50	Zutphen	2015	104	1/7350	70
51	Gorssel	2044	40	1/600	80
52	Oost Veluwe	2015	62	1/3100	260
53	Salland	2015	96	1/6550	360
10	Mastenbroek	2054	57	1/2350	60
11	IJsseldelta	2051	62	1/1100	150
Benedenrivierengebied BER					
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	67	1/3650	740
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	58	1/3500	1.530
22	Eiland van Dordrecht	2018	51	1/5300	480
23	Biesbosch (Noordwaard)	2062	53	1/100	40
24	Land van Altena	2015	67	1/1300	430
35	Donge	2015	76	1/1850	500

Interessant is wellicht nog wat er gebeurt als we variant 1: ‘schade bij overstroom 20% hoger’ zouden combineren met deze variant 5: ‘investeringskosten 20% hoger’. In het geval van een gelijke verandering van schade bij overstroom en investeringskosten verandert er helemaal niets aan alle fysieke uitkomsten in de tabellen van paragraaf 4.2. Het enige verschil is dat de totale kosten met hetzelfde percentage omhoog gaan. De makkelijkste manier om deze resultaten te begrijpen is om te realiseren dat het voor de fysieke uitkomsten niets uit mag maken of we nu consequent rekenen in euro’s of in guldens of in dollars. Net zomin als het voor de kosten niet uit mag maken of we de verhogingen consequent uitdrukken in centimeters of in meters.

Het feit dat de totale kosten 20% stijgen als beide varianten worden gecombineerd, maakt ook duidelijk dat de stijging van de totale kosten in beide varianten afzonderlijk duidelijk kleiner moet zijn dan 20%.

5.8 Variant 6: Verschuiving van vaste naar variabele kosten

Reden

Het is niet uitgesloten dat door een slimme keuze van maatregelen – tenminste lokaal – een goedkopere oplossing voor het probleem in de PKB kan worden gevonden dan door dijkverhoging. Dat moet dan vooral hieruit voortkomen dat de berekende optimale standaarddijkverhoging (ruim) 60 cm per keer bedraagt, terwijl voor het halen van de PKB doelstelling 30 cm meestal voldoende is. Andere maatregelen dan dijkverhoging zijn wellicht in een kleinere vorm meer rendabel. Als met zo'n kleine maatregel, bijvoorbeeld kribverlaging die ook om hydraulische redenen gewenst is, het PKB-doel kan worden gehaald, dan is er op dit moment geen reden om daar bovenop nu al andere, verdergaande maatregelen te nemen. Wellicht kunnen we dit zien als een knippen in de vaste kosten, maar deze interpretatie zal lang niet altijd de juiste zijn.⁴⁸ Niettemin zouden we om deze reden kunnen kijken wat het effect is van een pure verschuiving van vaste kosten naar variabele kosten.

Dit is niet zo eenvoudig, omdat het niet mogelijk is kosten te verschuiven zonder tegelijkertijd bijna overal de totale investeringskosten te veranderen, zie ook bijlage A.8.1. Bovendien zal in ieder geval de optimale omvang van de dijkverhoging dalen, zie formule (5.2). Om beide redenen gaan dan de gemiddelde investeringskosten veranderen en daardoor gaat ook de ligging van het schade-interval schuiven, zie formule (5.1). Een verandering in de gemiddelde verwachte schade willen we in deze variant echter zoveel mogelijk voorkomen, want daarover geeft de vorige variant al voldoende informatie. Waar het in deze variant om gaat, is de breedte van het schade-interval.

Een mogelijkheid is om het punt waar de verschuiving in de kostenstructuur neutraal uitpakt, vooraf zo te kiezen dat dit dicht in de buurt ligt van de standaard dijkverhoging in de hoofdvariant. Dat is rond de 60 cm dijkverhoging. Een stijging van de variabele kosten met 20% betekent in bijna alle gevallen (zie tabel C.1 en C.2) een verhoging van de variabele kosten (incl. opslag voor onderhoud) met 0,005 mln euro per cm per km dijkverhoging. Als we dan de vaste kosten verlagen met 0,3 mln euro per km dijkverhoging, blijft een verhoging met 60 cm in totaal evenveel kosten. Deze kostenverschuiving is bij alle dijkringen mogelijk zonder negatieve vaste kosten te krijgen. Deze twee aanpassingen (variabele kosten 0,005 mln euro per cm hoger en vaste kosten 0,3 mln euro lager) passen we toe bij alle dijkringen. Voor verhogingen kleiner dan 60 cm zijn de totale investeringskosten nu lager dan volgens de echte kostencurven en bij verhogingen van meer dan 60 cm pakken de totale kosten hoger uit. Dit zal per dijkkring dus anders kunnen uitwerken, afhankelijk van de uitgangssituatie.

⁴⁸ Eigenlijk gaat het dan om het gebruik van discontinue investeringskostenfuncties die zijn opgebouwd uit achtereenvolgende stapeling van kostenfuncties van steeds duurder wordende maatregelen. Voorbeelden zijn de door ARF aangeleverde investeringskosten per dijkkring, zie bijlage C. De overstap naar een nieuwe maatregel betekent dan tevens een sprong in de kosten door de toevoeging van de vaste kosten van de nieuwe maatregel. In Bijlage A, paragraaf 9.5 wordt hierop nader ingegaan.

Uitkomsten

Het eerste resultaat is natuurlijk dat de omvang van het schade-interval bij alle dijkkringen vermindert, zie formule (5.2). Dat geldt ook voor de eerste verhoging, die daardoor ook iets meer naar voren kan schuiven, zie 42 Ooij en Millingen. Daarnaast gebeurt er iets met de totale investeringskosten, maar niet veel. Bij 13 van de 21 dijkkringen zijn de totale kosten van restschade en investeren afgerond gelijk aan die in Tabel 4.3 en Tabel 4.4. Bij de overige 8 dijkkringen blijken de totale kosten soms wat hoger, soms wat lager uit te vallen.

Tabel 5.7 Variant 6: Verschuiving van vaste naar variabele kosten

1	2	3	4	5	6	7	8
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromings- kans	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten schade en investeren
	Bovenrivierengebied BOR	jaartal	cm	1/jaar	jaren	cm	mln euro
38	Bommelerwaard	2015	68	1/2100	40	48	200
40	Heerewaarden (Waalkant)				53	68	
41	Land van Maas en Waal	2015	106	1/5350	55	65	380
42	Ooij en Millingen	2016	60	1/1650	51	60	100
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	72	1/1950	58	66	1.540
44	Kromme Rijn	2015	78	1/32050	43	38	240
45	Gelderse Vallei	2015	69	1/51150	35	29	40
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	65	1/2750	36	39	70
48	Rijn en IJssel	2015	56	1/2050	29	34	480
49	IJsselland	2026	32	1/800	37	32	90
50	Zutphen	2015	97	1/6600	41	43	60
51	Gorssel	2029	28	1/650	36	28	70
52	Oost Veluwe	2015	44	1/1950	44	35	290
53	Salland	2015	94	1/6800	60	57	330
10	Mastenbroek	2045	48	1/2450	49	48	50
11	IJsseldelta	2043	56	1/1200	53	56	150
	Benedenrivierengebied BER						
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	66	1/4300	48	50	650
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	59	1/4100	51	49	1.320
22	Eiland van Dordrecht	2015	49	1/6050	57	48	410
23	Biesbosch (Noordwaard)	2057	45	1/100	39	45	30
24	Land van Altena	2015	64	1/1500	38	55	370
35	Donge	2015	74	1/2150	37	53	450

Daarbovenop komt de verkleining van het interval, die werkt in de richting van een verlaging van de totale kosten, omdat de kosten per investering kleiner worden. Niettemin pakken de resultaten per dijkkring anders uit. Het grootste deel van de veranderingen in uitkomsten komt door de kostenverschuiving zelf en slechts een klein, maar onbekend deel wordt veroorzaakt door de onvermijdelijke, impliciete wijziging van de totale kosten.

De vraag kan rijzen wat er theoretisch gebeurt als het (effect van) vaste kosten steeds kleiner zou worden en er alleen nog variabele kosten over blijven.⁴⁹ In dat geval naderen zowel de omvang van de standaardverhoging u als de lengte van het tijdsinterval D tussen de standaardverhogingen gelijktijdig naar nul. Op den duur zouden we de dijk dan precies in hetzelfde tempo verhogen als de verwachte schade dreigt te stijgen door de combinatie van economische groei en stijging van de overstromingskans door klimaatverandering. We doen dit echter alleen als de variabele kosten van investeren gelijk zijn aan of lager zijn dan de marginale schadekosten. Dit laatste kan in dit theoretische geval wel een probleem zijn (zie bijlage A, paragraaf 8). We gaan daar verder niet op in, omdat het ontbreken van vaste kosten in de praktijk niet voorkomt.

5.9 Variant 7: Combinatie van weinig of geen stijging water en weinig economische groei ($\gamma = 1\%$ per jaar)

Reden

Omdat er bij de disconteringsvoet geen risico-opslag wordt gehanteerd, wordt ter onderbouwing van die keuze hier een variant gepresenteerd waarin de verwachte baten weinig stijgen. Bij de bovenrivieren blijft stijging van de waterstand achterwege, evenals in paragraaf 4.5. Daarnaast wordt van de waterstandstijging in de benedenrivieren 35 cm per eeuw afgetrokken, waardoor de stijging daar ongeveer halveert. Daarenboven verlagen we de economische groei tot structureel 1% per jaar. In paragraaf 5.13 zullen we na gaan wat er gebeurt als we pas later ontdekken dat de verwachte schade zo weinig stijgt.

Uitkomsten

De sterke verkleining van de parameter voor de groei van de verwachte schade (β) heeft een fors effect op de uitkomsten. Het herhalingsinterval wordt langer en de standaardverhoging een stuk kleiner. Als er in de hoofdvariant een achterstand is in 2015, dan wordt die tot dat jaar echter nog niet veel kleiner en dus wordt er meestal toch nog steeds in 2015 geïnvesteerd. Maar als er in 2015 niet geïnvesteerd hoefde te worden, dan verschuift het jaar van eerste investering verder naar achteren. In dijkkring 10 Mastenbroek zelfs bijna 100 jaar. Dat komt omdat bij de bovenrivieren de groei van de verwachte schade (β) van 3% per jaar terugvalt tot 1% per jaar. In alle gevallen wordt de eerste verhoging kleiner. Vanzelfsprekend geldt datzelfde voor de totale

⁴⁹ Dit is precies wat Van Dantzig ten onrechte voor juist aanneemt in zijn afleiding van de beste strategie in het rapport van de Delta Commissie (Van Dantzig, 1960).

kosten van schade en investeren. In het Benedenrivierengebied is de groei van de verwachte schade (β) nog steeds tussen de 3 en 4% per jaar en zijn de verschillen met de hoofdvariant in paragraaf 4.2 dus minder groot.

Tabel 5.8 Variant 7: Weinig stijging verwachte schade (β is klein)

1	2	3	4	5	6	7	8
		Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromings- kans	Periode tussen twee standaard dijkverhogingen	Hoogte tweede en volgende dijkverhoging	Totale kosten schade en investeren
		jaartal	cm	1/jaar	Jaren	cm	mln euro
Bovenrivierengebied BOR							
38	Bommelerwaard	2015	58	1/2150	118	47	140
40	Heerewaarden (Waalkant)				142	59	
41	Land van Maas en Waal	2015	90	1/5450	145	56	276
42	Ooij en Millingen	2053	53	1/1700	143	53	65
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2021	55	1/2000	153	55	1083
44	Kromme Rijn	2015	72	1/31900	126	38	175
45	Gelderse Vallei	2015	58	1/50000	118	32	28
47	Arnhemse en Velperbroek	2015	58	1/2850	117	41	54
48	Rijn en IJssel	2015	54	1/2000	102	39	313
49	IJsselland	2091	34	1/800	121	34	53
50	Zutphen	2015	86	1/7100	130	45	47
51	Gorssel	2103	31	1/650	120	31	37
52	Oost Veluwe	2015	37	1/2100	134	34	202
53	Salland	2015	77	1/6150	158	50	266
10	Mastenbroek	2144	42	1/2350	128	42	26
11	IJsseldelta	2123	45	1/1050	129	45	75
Benedenrivierengebied BER							
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	56	1/3350	81	44	449
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	47	1/3100	83	42	925
22	Eiland van Dordrecht	2023	42	1/4200	87	42	313
23	Biesbosch (Noordwaard)	2091	45	1/100	63	45	15
24	Land van Altena	2015	57	1/1150	60	54	272
35	Donge	2015	68	1/1700	59	52	305

5.10 Variant 8: Verdubbeling overstromingskans in basisjaar ($2 * P_0$)

Reden

Aan de bijstelling van de MHW's in het Randvoorwaardenboek 2001, welke de reden zijn voor het project Ruimte voor de Rivier, ligt een herschatting van de werklijn in Lobith ten grondslag. De herschatting had tot gevolg dat de overstromingskansen ongeveer verdubbelden ten opzichte van hetgeen we daarvoor dachten. Nieuwe hoogwaters als in 1993 en 1995 kunnen weer hetzelfde effect op de schatting van de verdeling van extreme waterstanden hebben. Vandaar

dat een variant is uitgerekend wanneer bijvoorbeeld bij de herijking in 2011 opnieuw een verdubbeling van de overstromingskansen zou plaatsvinden en we nog de gelegenheid zouden hebben om de omvang van Ruimte voor de Rivier daarbij aan te passen. Zie voor de gevolgen van zo'n onwelkome verrassing op een later tijdstip de volgende paragraaf 5.11.

Uitkomsten

Deze variant is qua soort effecten vergelijkbaar met een verhoging van de schade bij overstromen in het basisjaar. Beide hebben geen invloed op de omvang van het schade-interval, maar in dit geval blijft ook de gemiddelde optimale overstromingskans ongewijzigd ten opzichte van die in tabel 4.1 en 4.2.

Tabel 5.9 Variant 8: Verdubbeling overstromingskansen in basisjaar (2 * P₀)

Nr.	Naam	Optimale jaar voor eerste investering	Hoogte eerste dijkverhoging	Gemiddelde overstromingskansen	Totale kosten van schade en investeren
	Bovenrivierengebied BOR	jaartal	cm	1/jaar	mln euro
38	Bommelerwaard	2015	102	1/2350	250
40	Heerewaarden				
41	Land van Maas en Waal	2015	140	1/6100	440
42	Ooij en Millingen	2015	94	1/1950	110
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	2015	101	1/2200	1.850
44	Kromme Rijn	2015	104	1/35100	290
45	Gelderse Vallei	2015	86	1/53700	50
47	Arnhemse- en Velperbroek	2015	104	1/3250	90
48	Rijn en IJssel	2015	90	1/2100	640
49	IJsselland	2015	49	1/900	130
50	Zutphen	2015	134	1/8800	70
51	Gorssel	2015	41	1/700	100
52	Oost Veluwe	2015	68	1/2350	340
53	Salland	2015	118	1/7100	400
10	Mastenbroek	2025	57	1/2800	80
11	IJsseldelta	2022	62	1/1350	210
	Benedenrivierengebied BER				
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	2015	80	1/4400	750
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	2015	71	1/4200	1.520
22	Eiland van Dordrecht	2015	60	1/6400	460
23	Biesbosch (Noordwaard)	2048	53	1/150	50
24	Land van Altena	2015	83	1/1600	430
35	Donges	2015	94	1/2200	540

Wat wel verandert, is hoe de huidige situatie zich verhoudt tot dat ongewijzigde schade-interval. Met een verdubbeling van de parameterwaarde is dit een grote variant ten opzichte van andere. Als er in 2015 nog niet geïnvesteerd werd, blijkt het optimale jaar van investering in

BOR zo'n 23 jaar naar voren te schuiven. Als het al optimaal was om in 2015 te investeren, is de achterstand in dat jaar groter en wordt er zo'n 15 tot 25 cm meer verhoogd. Ook de totale kosten nemen flink toe, maar nogal verschillend per dijkkring. Het varieert van zo'n 10% bij 42 Ooij en Millingen, via 1/3 bij 48 Rijn en IJssel tot wel 60% bij 10 Mastenbroek.

5.11 Wat als achteraf blijkt dat de overstromingskans het dubbele was?

Reden

De varianten in de vorige paragrafen geven wel antwoord op de vraag hoe de optimale strategie verandert als we meer weten. Maar deze varianten geven niet aan hoe groot de fout is die we maken als we er pas te laat achterkomen dat de situatie anders is dan we dachten. Kortom, stel we investeerden tot in 2015 volgens de basisstrategie als weergegeven in paragraaf 4.2, maar komen er bijvoorbeeld in 2016 achter dat de overstromingskans in 2015 eigenlijk dubbel zo groot ingeschat moet worden. Wat zijn dan de extra kosten ten opzichte van de situatie waarin we die kennis eerder hadden gehad en er toen ook naar hadden gehandeld?

Dan gaat het dus niet om de extra kosten door de verdubbeling van de kans zelf. De daaruit volgende extra kosten zijn onvermijdelijk en – zoals nog zal blijken – ook niet erg afhankelijk van het jaar van ontdekking achteraf. We bekijken in deze en de volgende drie paragrafen alleen de kosten van het niet vooraf op tijd hebben of gebruiken van deze informatie. Deze kosten zeggen dus iets over de optiewaarde van uitstel.

Als er volgens de optimale strategie uit paragraaf 4.2 direct in 2015 geïnvesteerd moet worden, dan is ook in deze variant de investering gelijk aan die in kolom 4 uit Tabel 4.3 en Tabel 4.4. Aan de investeringskosten in 2015 verandert dus niets ten opzichte van de hoofdvariant en datzelfde geldt ook voor de varianten in de volgende drie paragrafen. Het herhalingsinterval hangt niet af van de verwachte schade in het basisjaar en is bij deze variant daarom gelijk aan dat in de kolommen 5 en 6 van diezelfde tabellen over de hoofdvariant.

De enige mogelijkheid van aanpassing achteraf zit in deze variant bij de dijkringen met investering in 2015 in de keuze van het eerstvolgende moment van investeren, dus in de periode tot de tweede investering (D_2). Als er volgens tabel 4.3 en 4.4 niet al in 2015 geïnvesteerd is, is er de mogelijkheid om alsnog eerder te investeren dan was voorzien. Maar dat kan niet meer in 2015. Bij 42 Ooij en Millingen was de eerste investering voorzien in 2018, zodat de voorbereiding daarvan al in volle gang was. We handhaven dat investeringsjaar, maar nemen aan dat het dan alsnog mogelijk is om de verhoging uit Tabel 5.9 uit te voeren. Ook bij de dijkringen 49 IJsselland en 51 Gorssel nemen we de verhogingen uit Tabel 5.9, maar laten die pas plaatsvinden in 2020, omdat deze projecten volgens de strategie in paragraaf 4.2 nog niet in voorbereiding waren. Bij de overige dijkringen blijft het optimale tijdstip duidelijk verder liggen dan 2020 en is ingrijpen niet nodig. Voor deze dijkringen is er dus geen verschil met de uitkomsten in Tabel 5.9.

Uitkomsten

De lengte van de periode tot de tweede investering (D_2) staat tot nu toe nergens in de tabellen vermeld. De eerste kolom met deze lengte in tabel 5.10 spoort met de situatie beschreven in de vorige paragraaf en hoort dus bij de uitkomsten in Tabel 5.9.⁵⁰ Dat geldt ook voor de eerste kolom met kosten. De tweede kolom met cijfers over de tweede periode laat zien dat we wegens de nieuwe informatie de volgende investering in BOR zo'n 20 jaar naar voren moeten halen. Zo investeerden we in dijkkring 41 Land van Maas en Waal in 2015 slechts 115 cm, terwijl dat er volgens tabel 5.9 beter 140 hadden kunnen zijn. Door de sprong in actuele overstromingskans in 2016 zullen we nu al na 36 jaar opnieuw moeten investeren, in 2051.

Tabel 5.10 Overstromingskans blijkt achteraf tweemaal zo groot ($2 \cdot P_0$; X uit tabel 4.3 en 4.4)

	Tijd tot 2e investering		Totale kosten van schade en investeren		Toename totale kosten
	op tijd bekend	achteraf	op tijd bekend	achteraf	
Bovenrivierengebied BOR	jaren	jaren	mln euro	mln euro	%
38 Bommelerwaard	45	26	252	258	2,4
40 Heerewaarden (Waalkant)	62	62			–
41 Land van Maas en Waal	56	36	438	450	2,7
42 Ooij en Millingen	60	58	114	119	4,4
43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	61	42	1852	1909	3,1
44 Kromme Rijn	45	25	289	295	2,1
45 Gelderse Vallei	39	21	49	50	2,0
47 Arnhemse en Velperbroek	50	26	89	91	2,2
48 Rijn en IJssel	32	15	637	645	1,3
49 IJsselland	52	47	132	135	2,3
50 Zutphen	59	36	66	68	3,0
51 Gorssel	51	46	103	104	1,0
52 Oost Veluwe	54	34	344	354	2,9
53 Salland	64	43	395	407	3,0
10 Mastenbroek	57	57	80	80	–
11 IJsseldelta	59	59	211	211	–
Benedenrivierengebied BER					
15 Lopiker- en Krimpenerwaard	49	38	754	767	1,7
16 Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	52	42	1519	1542	1,5
22 Eiland van Dordrecht	59	49	458	464	1,3
23 Biesbosch (Noordwaard)	46	46	49	49	–
24 Land van Altena	41	32	429	435	1,4
35 Donge	36	27	539	546	1,3
Totaal			8799	8979	2,0

⁵⁰ De lengte van periode D_2 die behoort bij Tabel 5.9, is meestal korter dan de standaardperiode D in kolom 5 van Tabel 4.3 en Tabel 4.4, zie voor de reden de voetnoot bij die kolom 5 in paragraaf 4.2.3.

Gedurende de periode tot de volgende investering zijn de verwachte schadekosten gemiddeld hoger, omdat achteraf blijkt dat de jaren met zeer lage verwachte schadekosten niet voorkomen. Bovendien halen we de investeringskosten over alle toekomstige herhaalintervallen 20 jaar naar voren. Bij elkaar doet dat de netto contante waarde van alle kosten stijgen en wel bij deze dijkkring van 438 mln euro in Tabel 5.9 tot 450 mln euro in deze variant. Als de kennis over de dubbele overstromingskans zoveel eerder was gekomen dat we de verhoging in 2015 nog wel hadden kunnen aanpassen, dan hadden we bij deze dijkkring 12 mln euro of 2,7% bespaard.

Voor alle dijkeringen samen blijkt het te gaan om een verschil van 180 mln euro of 2,0%. De kans op het optreden van deze variant is echter niet groot. Immers, de kans op het optreden van een extreme waterstand die voldoende groot om te leiden tot een verdubbeling van de geschatte overstromingskansen, is klein en zeker niet groter dan bijvoorbeeld 1/200. De verwachte waarde van dit kostenverschil is dus slechts hoogstens 1 mln euro. Dit geeft een idee van de bruto waarde van de optie van uitstel besproken in paragraaf 5.1.3.

5.12 Wat als achteraf blijkt dat de waterstanden in BOR niet verder stijgen?

Reden

Het is maatschappelijk van belang dat er niet overbodig of te vroeg geïnvesteerd wordt. Eerder is al betoogd dat daarvoor bij het volgen van de optimale strategie niet al te veel zorg hoeft te bestaan. Toch onderzoeken we in deze paragraaf en in paragraaf 5.13 hoe fout we zitten met uitvoering van de nu optimaal lijkende strategie, terwijl achteraf blijkt dat alles erg meevalt. We beschouwen daartoe in deze paragraaf de situatie in paragraaf 4.5 zonder stijging MHW in BOR als de achteraf juist blijkende optimale strategie en gaan na wat het kost als voorlopig wel de strategie met stijging van de waterstand wordt gevolgd als beschreven in de hoofdvariant in paragraaf 4.2.

Als er volgens de hoofdstrategie direct in 2015 geïnvesteerd moet worden, dan is in deze variant de verhoging gelijk aan die in kolom 4 uit Tabel 4.3. Het herhalingsinterval wordt pas van belang op een tijdstip dat we de nieuwe kennis al hebben, en is daarom gelijk aan dat in de kolommen 5 en 6 in Tabel 4.9. De enige mogelijkheid van aanpassing zit in de keuze van het eerstvolgende moment van investeren, dus in de periode van 2015 tot de tweede investering. Ook deze variant zegt dus iets over de optiewaarde van uitstel. Er is echter weinig aanleiding om te verwachten dat we, bijvoorbeeld binnen een jaar, zoveel nieuwe informatie hebben dat de waterstijging in het midden klimaatscenario niet meer ter zake zou doen. Uit dit oogpunt is dit dus een extreme variant, omdat de kans van optreden verwaarloosbaar klein is.⁵¹ Realistischer is de mogelijkheid dat geen verdere stijging van de MHW's op de Rijn pas na enige tientallen jaren juist blijkt te zijn. Maar de beslissing tot verhoging zolang uitstellen, is zeker niet rationeel. Deze variant is niet relevant in BER, omdat stijging van de zeespiegel om een aantal redenen al veel meer vaststaat. Zie daarvoor ook paragraaf 5.13.

⁵¹ Tenzij bijvoorbeeld klimaatscenario's drastisch naar beneden worden bijgeteld of eventuele overstromingen in Duitsland nog omvangrijker worden dan nu uit onderzoek volgt, zonder dat er in Duitsland aanvullende maatregelen worden genomen.

Uitkomsten

Omdat het hier gaat over uitstel van investeren en niet over versnelling, zoals in de vorige en de volgende variant, wordt de investering in dijkringen waarin in 2015 nog niet geïnvesteerd hoefde te worden, alleen maar langer uitgesteld.⁵² Bij die dijkringen wijken de resultaten dus niet af van die in paragraaf 4.5. De verschillen in kosten blijken minimaal te zijn, vandaar dat de kosten onafgerond zijn vermeld. In totaal blijken we maximaal 0,9% te kunnen besparen als we deze informatie wel eerder hadden gehad.

Tabel 5.11 Achteraf blijken MHW's constant te zijn ($\eta = 0$; X uit tabel 4.3)

	Tijd tot 2e investering		Totale kosten van schade en investeren		Toename totale kosten
	op tijd bekend	achteraf	op tijd bekend	achteraf	
Bovenrivierengebied BOR	jaren	jaren	mln euro	mln euro	%
38 Bommelerwaard	67	79	167	168	0,6
40 Heerewaarden (Waalkant)					
41 Land van Maas en Waal	81	95	316	319	0,9
42 Ooij en Millingen	85	85	79	79	–
43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	89	106	1268	1285	1,3
44 Kromme Rijn	66	77	203	204	0,5
45 Gelderse Vallei	61	72	33	33	0,5
47 Arnhemse en Velperbroek	67	80	63	63	0,8
48 Rijn en IJssel	55	65	384	386	0,5
49 IJsselland	72	72	73	73	–
50 Zutphen	78	95	52	53	1,9
51 Gorssel	71	71	53	53	–
52 Oost Veluwe	78	93	237	240	1,3
53 Salland	89	106	299	302	1,0
10 Mastenbroek	77	77	39	39	–
11 IJsseldelta	78	78	109	109	–
Totaal			3375	3407	0,9

5.13 Wat als achteraf blijkt dat de stijging van de verwachte schade veel kleiner is? Of:

Waarom is er geen opslag voor het macro-economische risico?

Reden

Deze variant geeft de reden waarom in alle berekeningen is afgezien van het opnemen van een opslag op de risicovrije disconteringsvoet van 4% om rekening te houden met het niet-diversificeerbare, macro-economische risico. In paragraaf 5.6 is dit reeds toegelicht. Het is niet

⁵² Zie voor de reden dat D₂ in Tabel 5.11 meestal kleiner is dan D in Tabel 4.9, de voetnoot in de vorige paragraaf.

zo dat het niet-diversificeerbare, macro-economische risico in dit project afwezig is. Immers de baten in de vorm van de vermindering van de verwachte schade zijn rechtstreeks afhankelijk van de economische groei. Echter, door de combinatie van twee verschillende oorzaken voor groei is de kans dat de baten achteraf onvoldoende groot blijken voor een positieve rentabiliteit, uiterst gering. Ten eerste is een optimale investering al rendabel in het jaar van investeren. De contante waarde van de baten wordt dan alleen onvoldoende als daarna de verwachte schade daalt. Die ontwikkeling is echter niet alleen afhankelijk van de economische groei, maar ook van de ontwikkeling van de waterstanden. Het is nagenoeg onmogelijk dat die in werkelijkheid dalen en het is zeer waarschijnlijk dat ze stijgen. Alleen daarom is het al waarschijnlijk dat de verwachte schade blijft stijgen zolang er geen maatregelen worden genomen. In deze variant bekijken we wat er gebeurt als de stijging van de verwachte schade klein is. De werkelijke ontwikkeling is dus zoals beschreven in variant 7 in paragraaf 5.9, maar we hebben geïnvesteerd volgens de hoofdvariant beschreven in paragraaf 4.2.

Uitkomsten

De verschillen in strategie blijken groot. In niet minder dan 5 dijkringen zouden de eerstvolgende investeringen pas ongeveer 200 jaar na 2015 gedaan hoeven worden. Het ingrijpendst zijn de verschillen bij de twee dijkringen waarbij zonder de nieuwe informatie wel in 2015 wordt geïnvesteerd, maar met de nieuwe informatie uitstel mogelijk was geweest. Dat zijn 43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard en 22 Eiland van Dordrecht. In deze twee dijkringen is het verschil in netto contante waarde van alle kosten van schade en investeren het grootst, namelijk rond de 7%. Voor het overige zijn de kostenverschillen bij de dijkringen waar verschillen optreden, in de orde van 4 à 5% bij de bovenrivieren en 2 à 5% bij de benedenrivieren.

Conclusie is dat er ondanks de zeer grote verschillen in baten en dus grote verschillen in optimale strategie niet veel verschil is in totale kosten. De 4% verschil in totale kosten over een periode van meer dan 100 jaar lijkt onvoldoende reden voor een risico-opslag op de disconteringsvoet.

Tabel 5.12 Achteraf blijkt stijging verwachte schade klein

	Tijd tot 2e investering		Totale kosten van schade en investeren		Toename totale kosten
	op tijd bekend	Achteraf	op tijd bekend	achteraf	
Bovenrivierengebied BOR	jaren	jaren	mln euro	mln euro	%
38 Bommelerwaard	115	168	140	146	4,7
40 Heerewaarden (Waalkant)					–
41 Land van Maas en Waal	137	200	276	289	4,8
42 Ooij en Millingen	28	28	65	65	–
43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	5	222	1083	1156	6,7
44 Kromme Rijn	113	163	175	181	3,5
45 Gelderse Vallei	104	152	28	29	3,6
47 Arnhemse en Velperbroek	113	169	54	56	4,6
48 Rijn en IJssel	95	138	313	324	3,6
49 IJsselland	75	75	53	53	–
50 Zutphen	130	199	47	50	4,5
51 Gorssel	88	88	37	37	–
52 Oost Veluwe	133	196	202	214	5,8
53 Salland	152	221	266	279	5,0
10 Mastenbroek	119	119	26	26	–
11 IJsseldelta	107	107	75	75	–
Subtotaal BOR			2840	2980	4,9
Benedenrivierengebied BER					
15 Lopiker- en Krimpenerwaard	79	104	449	469	4,4
16 Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	82	109	925	974	5,3
22 Eiland van Dordrecht	8	114	313	336	7,2
23 Biesbosch (Noordwaard)	75	75	15	15	–
24 Land van Altena	60	75	272	279	2,5
35 Donge	56	70	305	311	1,8
Totaal			5119	5364	4,8

5.14 Wat als achteraf blijkt dat de stijging van de waterstand veel groter is?

Reden

Is weten dat de vorige variant juist is, op korte termijn uiterst onwaarschijnlijk, meer kans is er dat toevoeging van slechts een paar jaren waarnemingen wel voldoende is om te concluderen dat de waterstanden toch sneller stijgen dan eerder gedacht, zonder nu tot het dramatische resultaat van een onmiddellijke verdubbeling van de kansen te leiden zoals in paragraaf 5.11. Deze ex post variant houdt in dat achteraf het hoge klimaatscenario het meest relevant blijkt te zijn. De situatie beschreven in paragraaf 5.5 en Tabel 5.4 blijkt achteraf gezien dus de juiste. De investeringen in 2015 zijn in deze variant, evenals die in de vorige twee paragrafen en de volgende paragraaf, weer precies gelijk aan die in de hoofdvariant in paragraaf 4.2.

Uitkomsten

De uitkomsten lijken qua richting op de variant met verdubbeling van de overstromingskansen achteraf in Tabel 5.10, maar zijn minder fors. Het verschil in kosten is relatief iets kleiner dan bij de lagere toename van de waterstanden in Tabel 5.11 maar het scheelt niet veel. In de buurt van het optimum is de asymmetrie in het verloop van de totale kosten dus beperkt. Dit hoeft niet te gelden voor situaties die ver afliggen van het optimum.⁵³

Tabel 5.13 Stijging waterstand volgt achteraf hoge klimaatscenario (Hoge η ; X uit 4.3 en 4.4)

	Tijd tot 2e investering		Totale kosten van schade en investeren		Toename totale kosten
	op tijd bekend	achteraf	op tijd bekend	achteraf	
Bovenrivierengebied BOR	jaren	jaren	mln euro	mln euro	%
38 Bommelerwaard	38	33	237	238	0,4
40 Heerewarden (Waalkant)					
41 Land van Maas en Waal	47	40	419	421	0,5
42 Ooij en Millingen	50	48	110	111	0,9
43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	51	44	1790	1800	0,6
44 Kromme Rijn	38	33	272	273	0,4
45 Gelderse Vallei	34	29	46	46	0,2
47 Arnhemse en Velperbroek	39	34	84	84	0,3
48 Rijn en IJssel	28	24	600	601	0,2
49 IJsselland	43	43	120	120	–
50 Zutphen	48	41	64	64	0,4
51 Gorssel	41	41	93	93	–
52 Oost Veluwe	45	39	328	330	0,6
53 Salland	53	46	381	383	0,5
10 Mastenbroek	47	47	69	69	–
11 IJsseldelta	49	49	181	181	–
Subtotaal BOR			4794	4814	0,4
Benedenrivierengebied BER					
15 Lopiker- en Krimpenerwaard	37	28	901	917	1,8
16 Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	40	29	1850	1896	2,4
22 Eiland van Dordrecht	48	38	519	528	1,7
23 Biesbosch (Noordwaard)	33	33	70	70	–
24 Land van Altena	33	27	492	496	0,8
35 Donge	30	25	618	620	0,3
Totaal			9244	9341	1,0

⁵³ Een voorbeeld is dat zelfs bij grote ingrepen tijdens het Deltaplan Grote Rivieren, zoals dijkverleggingen niet verder is geïnvesteerd dan precies tot aan de toenmalige MHW-normen. Dit ondanks het feit dat natuurlijk bekend was dat de aanleiding voor dit plan (de extreme waterstanden in 1993 en 1995) ook zou leiden tot bijstelling van de MHW's. Het gevolg is dat die dijkvakken nu opnieuw aangepakt moeten worden.

5.15 Enkele methodologische opmerkingen over het veiligheidsonderzoek

5.15.1 Invloed kennis over herhalingsinterval op de huidige beslissing gering

De ex post varianten in de paragrafen 5.12, 5.13 en 5.14 over de toekomstige ontwikkeling van de waterstanden en de economische groei zijn samen ook om een heel andere reden interessant. Zij zijn een illustratie van het tweede deel van de stelling in hoofdstuk 2: dat rekening houden met herhalingsinvesteringen heel belangrijk is voor de goede keuze van de eerste investering, maar dat het veel minder ter zake doet welke veronderstelling over de verdere toekomst we daarbij maken. Bij het bekijken van deze varianten moeten we er dan niet van uitgaan dat de betere informatie over het stijgingstempo op korte termijn beschikbaar komt, zoals dat vooral in paragraaf 5.11 bij de verdubbeling van de overstromingskans in het zichtjaar voorop staat, maar dat er een geleidelijke aanpassing van inzicht is over een periode van enige tientallen jaren. Vanuit deze invalshoek blijkt dus achteraf dat de gebruikte informatie over het stijgingstempo wel juist was voor de wat kortere termijn, maar moest later een aanpassing plaatsvinden voor de lange termijn.

Omdat die verandering in ontwikkeling pas later relevant wordt dan in de berekening van Tabel 5.11 e.v. is aangenomen, waarin de verandering van groeivoeten al optreedt vanaf 2001, zijn de effecten op de kosten nog wat kleiner dan in die tabellen staat. Terugkijkend blijkt dan dat de huidige optimale beslissing – alleen rekening houdend met de op korte termijn geldige informatie – niet ver afzit van de beslissing die we nu hadden genomen als we nu al precies hadden geweten hoe de wereld er over ongeveer 50 jaar uitziet.

5.15.2 Overige methodologische conclusies

In hoofdstuk 4 zijn vele uitkomsten gedetailleerd weergegeven en besproken, mede om duidelijk te maken hoe de berekening van optimale veiligheid ten principale in elkaar steekt. Daarnaast zijn in dit hoofdstuk 5 uitkomsten gegeven uitgaande van andere veronderstellingen over de toekomst, zoals andere klimaatscenario's, of met andere gegevens, zoals een andere inschatting van investeringskosten. Beleidsmatige conclusies in het kader van het project Ruimte voor de Rivier staan bij elkaar in de Samenvatting en conclusies. Hieronder volgen enige opmerkingen die vooral betrekking hebben op het onderzoek zelf en de (toekomstige) uitvoering daarvan.

1. De in dit onderzoek ontwikkelde methode voor de bepaling van optimale veiligheidsniveaus en investeringsstrategie is nieuw. Het is de eerste keer dat voor eenvoudige versies van dit probleem een complete en correcte oplossing is gevonden. Bovendien is met meer aspecten rekening gehouden dan in eerdere pogingen daartoe, zoals de invloed van de dijkhoogte op de schade bij overstroming en de stijging van de investeringskosten met de hoogte van de dijk. De twee optimaliteitscriteria die simultaan het antwoord geven op de vragen: Wanneer? en Hoeveel?, zijn analytisch afgeleid en goed interpreteerbaar.

2. Dat wil niet zeggen dat daarmee alle optimaliteitsproblemen die rond de veiligheid van dijkringen geformuleerd kunnen worden, in principe zijn opgelost. Bijlage A, paragraaf 9 geeft een bespreking van enige van die resterende problemen, zie ook punt 3. Verdere studie is dus nodig, maar op basis van de nu bereikte resultaten ook veel makkelijker mogelijk. Voor een groot deel zullen moeilijker problemen niet meer analytisch kunnen worden opgelost, maar zal een numerieke zoekprocedure moeten worden gevolgd.
3. Nadere bestudering van twee gevallen lijkt van groot praktisch belang. De ene is de situatie met een vast eindpunt, bijvoorbeeld een fysiek maximum bij de rivierafvoer. De andere is het combineren van verschillende maatregelen met een verschillende kostenstructuur. Door het combineren zal de investeringskostencurve geen continu verloop meer hebben, maar sprongen gaan vertonen.
4. Een rentabiliteitsbeoordeling van een veiligheidsmaatregel op basis van de netto contante waarde van de veiligheidswinst is in het algemeen niet correct. Dat komt met name door de stijging van de verwachte schade door de combinatie van economische groei en waterstandstijging, onder andere door klimaatverandering. Het eerstejaarsrendement is wel een correcte rentabiliteitsmaatstaf om in dit soort gevallen te beoordelen of het rendabel is om de maatregel nu uit te voeren dan wel dat met uitvoering beter kan worden gewacht.
5. Om twee redenen is de toepasbaarheid van het tot nu toe ontwikkelde model voor dijkringen onder invloed van de zee groter dan langs de rivieren. De eerste is dat relatieve stijging van de zeespiegel voor de komende eeuw(en) meer vaststaat dan stijging van de rivierafvoeren. Daarom is het daarvoor geen probleem om te rekenen met een oneindige tijdshorizon. De tweede is dat er geen grens is aan de hoeveelheid zeewater, hetgeen systeemwerking veel minder of niet relevant maakt. Ook is dijkverhoging dan uiteindelijk de enig mogelijke maatregel. Toepassing op andere dijkringen dan de nu onderzochte is echter niet direct mogelijk door een gebrek aan voor deze berekening geschikte gegevens.
6. Voor de toepassing van dit model zijn drie soorten gegevens nodig:
 - Gegevens over de hydraulische aspecten: Deze worden al om andere redenen verzameld. Soms zal wel nog een vertaalslag nodig zijn om ze in de voor deze berekening geschikte vorm te gieten. Dat was in dit onderzoek bijvoorbeeld nodig voor de combinatie van de invloeden van wind en water bij de benedenrivieren. Vooral het bepalen van de overschrijdingskansen per dijkkring in het basisjaar blijkt een moeilijke zaak;
 - Gegevens over te beschermen waarden in alle dijkringen in Nederland: Deze zijn opgenomen in het Hoogwater Informatiesysteem bij DWW. Daaraan kunnen eenvoudig gegevens over inwoners en schade bij overstroming worden ontleend;

- Wat vooral ontbreekt, is een algemeen idee over het verloop van de investeringskosten per dijkvak en per dijkkring. Speciaal voor dit onderzoek is voor 6 dijkkringen wat meer in detail een schatting gemaakt. Naar analogie daarvan hebben de ingenieurs ook investeringscijfers samengesteld voor de andere 16 in dit rapport onderzochte dijkkringen, tenminste voorzover de dijken lagen in het onderzochte gebied. Voor andere (delen van) dijkkringen heeft dit onderzoek nog niet plaatsgevonden.⁵⁴ Daarom is het niet direct mogelijk de berekening ook voor de andere dijkkringen in Nederland uit te voeren.

⁵⁴ Inmiddels zijn dezelfde berekeningen ook uitgevoerd voor vier dijkkringen voor de dijken langs de Maas, en wel voor de dijkkringen 36, 38, 40 en 41. Zie bijlage C.

6 **Systeemwerking en maatregelen die bij overstroming schade beperken**

Systeemwerking kan grote invloed hebben op overstromingskansen. Als er een overstroming optreedt, dan lijkt onder de huidige omstandigheden in veel gevallen overstroming van dijkkring 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaarden niet te voorkomen. Een overstroming van deze dijkkring biedt alle andere dijkringen in het bovenrivierengebied dan wel voldoende veiligheid. Als er voor wordt gezorgd dat het bestaande uitlaatwerk van Rijnstrangen ook als regelbaar inlaatwerk kan functioneren, dan zou daarmee wel op korte termijn tegen relatief zeer lage kosten een extra veiligheidsvoorziening gerealiseerd kunnen worden.

6.1 **Systeemwerking**

6.1.1 **Wat is systeemwerking?**

In de hoofdstukken 4 en 5 is alleen rekening gehouden met het effect van de totale hoeveelheid Rijn- en Maaswater die ons land binnenkomt, op de overstromingskansen van iedere dijkkring afzonderlijk. Daarbij is dus aangenomen dat al dit water de onderzochte dijkkring ook zal bereiken. Impliciet veronderstellen we dan dat de overstromingskansen van alle bovenstrooms gelegen dijkringen *kleiner* zijn dan die van de onderzochte dijkkring. Deze veronderstelling ligt ook ten grondslag aan de systematiek van de vaststelling van overschrijdingskansen in de Wet op de Waterkering en is daarmee tevens een uitgangspunt in de PKB Ruimte voor de Rivier. Een tweede veronderstelling die we impliciet bij deze berekeningen hebben gemaakt, is dat water dat na een overstroming eventueel benedenstrooms de overstroomde dijkkring weer uitstroomt, daarbij geen nieuwe schade aanricht in andere dijkringen.

In dit hoofdstuk wordt geprobeerd om deze abstracties los te laten. Daarmee introduceren we systeemwerking. Systeemwerking is de invloed die een overstroming van een dijkkring heeft op de overstromingskansen van andere dijkringen.

De impliciet gehanteerde veronderstelling van kleinere overstromingskansen bovenstrooms is ook in tegenspraak met de uitkomsten van de voorafgaande berekeningen in dit rapport, hoewel die uitkomsten alle op deze veronderstelling berusten. Immers, de uitkomsten van de berekeningen per afzonderlijke dijkkring in de voorgaande hoofdstukken 4 en 5 laten zien dat de optimale overstromingskansen per dijkkring zeer verschillend zijn en stroomopwaarts niet systematisch steeds kleiner worden.

Zo blijkt uit al deze berekeningen dat de optimale overstromingskansen voor dijkkring 43 Betuwe TCW veel *groter* is dan de optimale overstromingskansen voor de benedenstroomse, daar tegenoverliggende dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei. Deze uitkomst is dus in tegenspraak met de bij de berekening van de optimale veiligheidsniveaus in de twee benedenstroomse dijkringen impliciet gemaakte veronderstelling, dat de overstromingskansen van dijkkring 43 Betuwe TCW *kleiner* is dan die van de dijkringen 45 Kromme Rijn en 44 Gelderse

Vallei. Volgens die berekening zouden daarom in de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei grote investeringen in dijkverhoging van 70 tot 90 cm moeten plaatsvinden om de gewenste kleine overstromingskansen te bereiken, zie bijvoorbeeld tabel 4.10.

Maar als het riviersysteem werkelijk wordt ingericht volgens de uitkomsten van de hoofdvariant in paragraaf 4.2, dan zou de veiligheid voor deze dijkringen er toch heel anders uit zien dan deze uitkomsten suggereren. Immers, lang voordat het stijgende water maar in de buurt is gekomen van de optimale kruinhoogte van de dijkringen 44 Kromme Rijn en 45 Gelderse Vallei, is het al dijkkring 43 Betuwe TCW ingestroomd. Volgens de hoofdvariant (tabel 4.1) zou dijkkring 43 Betuwe TCW namelijk een veel grotere gemiddelde overschrijdingskansen ($1/2200$) krijgen dan de twee dijkringen op de noordoever, namelijk $1/35100$ voor 44 Kromme Rijn en $1/53700$ voor 45 Gelderse Vallei.⁵⁵ Omdat de hoeveelheden Rijn- en Maaswater die ons land binnenkomen, vanwege de capaciteit van Rijn en de Maas in Duitsland, resp. België/Nederland, aan een maximum zijn gebonden, heeft zo'n overstroming, waardoor water aan het systeem wordt onttrokken, in het algemeen positieve gevolgen voor veiligheid van de stroomafwaarts gelegen dijkringen.

Een verhoging van de dijken van één dijkkring (bijv. 43 Betuwe TCW) beïnvloedt daarom niet alleen de veiligheid van de dijkkring zelf in gunstige zin, maar ook de veiligheid van andere dijkringen in ongunstige zin. Het gesommeerde effect van dijkverhoging in één dijkkring op de verwachte schade in alle dijkringen samen is daarom niet duidelijk. Een afzonderlijke dijkverhoging kan zowel positief als negatief uitwerken op de totale verwachte schade in het hele riviergebied. Dit geldt ook als systeemwerking op zichzelf beperkend werkt op de totale schade bij overstromen in vergelijking met een berekening zonder rekening te houden met systeemwerking.

6.1.2 Cascadewerking

Dat systeemwerking gunstig zou uitpakken op de totale kosten van schade en investeren – zoals boven gesuggereerd –, geldt zeker niet voor alle situaties in Nederland. Dit komt onder andere omdat er op diverse plaatsen parallel lopende waterwegen zijn met een verschillend hoogteniveau. De hoogtes van de aangrenzende dijken van de betreffende dijkringen zijn aangepast op de plaatselijke hoogteliggingen. Overstroming van een dijkkring vanuit de hoogst gelegen riviertak (i.c. Bovenrijn en Waal) kan dan betekenen dat via de ondergelopen dijkkring uitstroom gaat plaatsvinden naar de lager liggende, veel kleinere rivieren IJssel, Nederrijn of Maas. Dit zal door de relatief zeer grote hoeveelheid water in de Rijn/Waal ongetwijfeld leiden tot doorbraken bij de aan die rivieren grenzende dijkringen. Dit schade vergrotend effect van overstroming staat bekend als het cascade-effect.⁵⁶

⁵⁵ Let wel dat de gemiddelde optimale overstromingskansen van $1/2200$ voor 43 Betuwe TCW een stuk kleiner is dan de wettelijke norm van $1/1250$. Door het aanwezig zijn van hogere dijken op de noordoever bestaat het verschil in overstromingskansen, en daarmee systeemwerking, feitelijk al heel lang.

⁵⁶ Een gevolg van het cascade-effect kan zijn dat compartimentering op sommige plaatsen in Nederland tot meer schade kan leiden dan niet compartimenteren, zie ook paragraaf 6.4.

Een tweede vorm van een cascade-effect treedt op als een overstroming van een primaire dijkkring via de binnendijken doorslaat naar de volgende dijkkring. Bijvoorbeeld een overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW, die over de Diefdijk heen dijkkring 16 Alblasserwaard en Vijfheerenlanden binnenloopt.

In alle voorgaande berekeningen is ook geabstraheerd van cascade-effecten. Impliciet is dan aangenomen dat een eventuele uitstroom van water na overstroming van een dijkkring geen verdere schade meer aanricht in andere dijkkringen.

6.1.3 Overstromingskans versus overschrijdingskans

Een volgend punt waarop we bij bestudering van systeemwerking moeten letten, is het verschil tussen overschrijdingskans en overstromingskans, zie ook het kader overstromingskansen in hoofdstuk 1. In de voorafgaande hoofdstukken beperkten we ons tot slechts één oorzaak voor een overstroming, namelijk dat het water hoger komt te staan dan de als kerend bedoelde hoogte van de dijk. Daarvoor zijn met betrekking tot het berekenen van optimale veiligheidsniveaus ook goede redenen voor te geven.

Maar bij het bezien van systeemwerking wordt het verwaarlozen van dit verschil problematischer. Immers, systeemwerking treedt uitsluitend op als er *feitelijk* een overstroming plaatsvindt. Als echter het topstuk van de dijk (waakhoogte, bedoeld om de invloeden van wind en golven op te vangen) in een kritische situatie ook kerend werkt, dan wel als door noodmaatregelen (zandzakken op de dijk) overstroming van een dijkkring wordt uitgesteld of voorkomen, dan verandert het beeld voor de dijkkringen benedenstrooms drastisch ten opzichte van een beschrijving alleen gebaseerd op overschrijdingskansen. Hetzelfde, maar dan omgekeerd, zou het geval zijn als een bovenstroomse dijkkring al eerder bezwijkt dan bij de maatgevende waterstand waarop hij ontworpen is. Voorlopige resultaten in het project Rampenbeheersingsstrategie overstromingen Rijn en Maas (RBSO) geven aan dat het kerend vermogen van dijken over het algemeen groter is dan horend bij de maatgevende waterstand waarop ze zijn ontworpen. Met name zou het effect van de kerende werking van de waakhoogte het effect van andere, in VNK bestudeerde, overstromingsmechanismen overtreffen. Gevolg is dat het positieve effect van systeemwerking aanzienlijk kleiner kan zijn dan volgt uit een beschouwing uitsluitend gebaseerd op overschrijdingskansen.

Toch zullen wij ons ook in dit hoofdstuk bij het aangeven van de effecten van systeemwerking uitsluitend baseren op informatie over overschrijdingskansen. Ook in dit hoofdstuk zullen we dus verder alleen spreken over overstromingskansen, terwijl het correcter zou zijn om de term overschrijdingskansen te gebruiken.

6.1.4 Benedenrivieren

In het benedenrivierengebied speelt systeemwerking een minder grote rol. De invloed van de zee en de wind zijn hier veel belangrijker dan bij de bovenrivieren. De waterhoeveelheid die bij een overstroming wordt weggevangen door een dijkkring, heeft door de aanvoer vanuit zee en de

andere riviertakken geen grote invloed op de veiligheidsniveaus van andere dijkkringen. Daarom blijft de beschouwing en eventuele berekening van de optimale veiligheid met systeemwerking in dit rapport beperkt tot de dijkkringen in bovenrivierengebied.

6.1.5 Complicaties door systeemwerking

In berekeningen rekening houden met systeemwerking leidt tot twee complicaties.

- Ten eerste is er extra empirische informatie nodig om in allerlei situaties de juiste overstromingskansen voor de onderscheiden dijkkringen te berekenen. Deze informatie is vooral van hydraulische aard en heeft betrekking op de wijze waarop en de mate waarin overstromingen van dijkkringen de overstromingskansen van alle andere dijkkringen beïnvloeden.
- Ten tweede wordt het optimaliseringsprobleem, de minimalisering dus van de gediscoteerde som van verwachte overstromingsschade en investeringskosten, een stuk ingewikkelder. Vanwege de systeemwerking is sprake van één grote integrale optimalisering over alle betrokken dijkkringen.

6.2 Informatie over waterstandveranderingen door overstroming

Stel de waterstand stijgt bij een dijkkring tot boven de laagste kruinhoogte. Water stroomt dan de dijkkring in. Een gevolg is dat er (voorlopig) minder water in de richting van de benedenstrooms gelegen dijkkringen stroomt. De waterstand bij die dijkkringen daalt dan ten opzichte van een situatie waarin deze overstroming nog niet had plaatsgevonden. *Ceteris paribus* nemen door de eerste overstroming dus de overstromingskansen van de benedenstrooms gelegen dijkkringen af. Om achter de omvang van die afname van overstromingskansen te komen moeten we weten met hoeveel centimeter het waterpeil op de rivier bij een dijkkring daalt bij een overstroming van iedere andere dijkkring.

Met behulp van het zogeheten Sobek-model zijn de effecten van een overstroming van één dijkkring op de waterstanden bij alle andere dijkkringen berekend (Schropp, 2003-012 en -019). Daarbij is rekening gehouden met het feit dat een dijkkring als het ware een scheef staand bakje is. Zodat, als de dijkkring is volgelopen, het water er weer uit kan lopen op de plaats waar de kruinhoogte van de dijk het laagst is t.o.v. NAP. Ook is rekening gehouden met de gevolgen van deze uitstroming op de waterstanden. Zo zal bij een doorbraak van een dijkkring die tot het stroomgebied van de Rijn behoort, bijvoorbeeld dijkkring 48 Rijn en IJssel, de waterstand van de IJssel dramatisch kunnen toenemen. Daardoor zullen ook andere dijkkringen langs de IJssel bezwijken, die op hun beurt weer water wegnemen uit het systeem. Van deze mogelijke effecten van vervolgdorbraken zijn afzonderlijke schattingen gemaakt (Schropp, 2003-015). Toch kan ook het Sobek-model niet zonder een aantal geschematiseerde vereenvoudigingen van de werkelijkheid. Met de belangrijkste kenmerken van het watersysteem is evenwel rekening gehouden, tenminste voorzover het de bepaling van de overschrijdingskansen betreft.

Deze berekening gaat grofweg als volgt. De dijkhoogten worden eerst zo ingesteld dat alle dijkringen een waterstand behorend bij bijvoorbeeld 18 dzd m³/s in Lobith goed aan zouden kunnen. Dit steeds met uitzondering van de dijkkring waarvan we het overstromingseffect willen bekijken. Deze overstromende dijkkring is steeds ingesteld op de huidige overstromingskans als aangegeven in tabel 3.1. Meestal, maar niet altijd, kan deze dijkkring dan 15 dzd m³/s aan. We gaan nu na wat er gebeurt als er een golf van 18 dzd m³/s in Lobith arriveert. Deze golf kan dus worden gekeerd door alle dijkringen, op één na. Bij die dijkkring veroorzaakt het overstromende water een ongecontroleerde dijkdoorbraak. Aangenomen is dat deze doorbraak plaatsvindt zodra de maatgevende afvoer wordt bereikt op of dicht bij het meest stroomopwaarts gelegen punt van de dijkkring. En, dat de bresgroei bij de instroom van water niet gestopt kan worden. De overstroming veroorzaakt een waterstandverandering bij alle andere dijkringen. Daarbij gaat het zowel om de verlagende werking door het wegvangen van water, als – met een korte vertraging – om het waterstandverhogende effect bij uitstroming. De binnendijken van primaire dijkringen worden steeds zo hoog gedacht dat uitstroming altijd alleen plaatsvindt naar een rivier. Maar doorslag naar de Maas of terugstroming naar Duitsland zijn in de berekeningen uitgesloten. (Bij de concrete uitwerking komen we erop terug wat dit eventueel betekent.)

In bijlage D staan een aantal tabellen met informatie over de effecten die de overstroming van één dijkkring heeft op de waterstanden bij iedere andere dijkkring afzonderlijk.

6.3 Optimale overstromingsvolgorde bij systeemwerking

6.3.1 Alle dijkringen in BOR

In deze paragraaf proberen we uitsluitend op grond van de bovengenoemde informatie over de veranderingen in waterstanden door een overstroming al iets te zeggen over een optimale volgorde van overstroom van dijkringen, zonder daarbij echte berekeningen te maken. Dit doen we aan de hand van uittreksels uit de basistabellen in bijlage D. Om de gevolgen van systeemwerking in grote lijnen uit te leggen beperken we ons in deze paragraaf tot een rechttoe-rechtaan beschouwing over de 16 primaire dijkringen in het bovenrivierengebied, waarop ook alle informatie en berekeningen in de voorgaande hoofdstukken betrekking hebben. Pas in de volgende paragraaf 6.4 bekijken we of er voor de in deze paragraaf 6.3 blijkende problemen nog slimmere oplossingen mogelijk zijn.

Tabel 6.1 geeft de onderlinge effecten voor vier dijkringen bij en benedenstrooms vlak na de splitsingspunten.

Tabel 6.1 Waterstandverandering door overstroming van de dijkkring in de linkerkolom bij 18 dzd m³/s, met uitstroom

Nr	Naam	43 BTCW splittingspunten	38 BW Waal	44 KR Nederrijn	49 IJL IJssel
	Doorgebroken dijkkring	cm			
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	– 89	– 89	– 69	– 62
38	Bommelerwaard	– 5	– 86	– 4	– 3
44	Kromme Rijn	0	0	–16	0
49	IJsselland	0	0	– 2	– 60

Bron: RIZA, memo WSR 2003-012 en -019

De eerste regel geeft aan dat een overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW een groot waterstandverlagend effect heeft op alle drie riviertakken. Op de Waal is de waterstanddaling bij dijkkring 38 Bommelerwaard 89 cm. Daarmee komt de waterstand op die plek 4 cm lager te liggen dan hoort bij een waterhoeveelheid van 15 dzd m³/s in Lobith. Datzelfde geldt ook op de andere twee riviertakken, waar de toename bij Lobith minder waterstandstijging in cm te weeg brengt dan op de Waal. Conclusie op basis van deze cijfers is dus dat als de dijken van dijkkring 43 Betuwe TCW nu niet worden verhoogd boven het huidige peil, waarbij 15 dzd m³/s kan worden gekeerd, daardoor automatisch alle drie genoemde dijkkringen: 38 Bommelerwaard langs de Waal, 44 Kromme Rijn langs de Nederrijn/Lek en 49 IJsselland langs de IJssel, beschermd zijn tot een niveau van minstens 18 dzd m³/s, zonder dat we ook maar een cent hoeven te investeren. Uit de tabellen in bijlage D volgt dat dezelfde conclusie algemeen geldt voor alle andere dijkkringen die langs die drie riviertakken zijn gelegen. Wel is het zo dat het veiligheidsniveau in dijkkring 43 Betuwe TCW dan niet meer zou voldoen aan de wettelijke norm, zie tabel 3.1 of 4.1.

De waterstandverlagende effecten van een overstroming in één van de drie benedenstrooms van de splitsingspunten gelegen dijkkringen zien er heel anders uit. Afgerond beperken die effecten zich tot de eigen riviertak. In bijlage D is te zien dat hetzelfde geldt voor de andere, langs die riviertakken gelegen dijkkringen. Overstroming van deze dijkkringen zou dus vermoedelijk de totale schade in het bovenrivierengebied veel minder beperken, omdat een overstroming dan niet tot één dijkkring langs één riviertak beperkt blijft.

Tabel 6.1 levert ons dus de eerste belangrijke conclusie over systeemwerking.

1. Conclusie 1: Voor systeemwerking valt het gebied van de Bovenrivieren uiteen in vier gebieden: de 5 dijkkringen rond de splitsingspunten, de 2 dijkkringen langs de Waal, de 2 dijkkringen langs de Nederrijn/Lek en de 7 dijkkringen langs de IJssel. Overstroming van een dijkkring op één van de benedenstroomse riviertakken heeft (bijna) geen systeemwerking buiten die riviertak. We kunnen ons voor systeemwerking daarom in eerste instantie beperken tot de vijf dijkkringen rond de twee splitsingspunten.

6.3.2 Systeemwerking bij de splitsingspunten

Tabel 6.2 geeft een overzicht van de waterstandveranderingen bij doorbraak van een dijk van een van de 5 dijkkring bij de splitsingspunten. De dijkringen staan in de volgorde waarin een hoogwatergolf hen zou bereiken.

Tabel 6.2 Waterstandverandering door overstroming van de dijkkring in de linkerkolom bij 18 dzd m³/s, met uitstroom									
Nr	Naam	48 R&IJ	42 O&M	43 BTCW	47 A&VB	41LM&W	38 BW Waal	44 KR Nederrijn	49 IJL IJssel
	Doorgebroken dijkkring	cm							
48	Rijn en IJssel	– 96	– 87	– 91	– 56	– 99	– 93	– 51	+235
42	Ooij en Millingen	– 33	– 47	– 39	– 36	+27	+27	– 33	– 31
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	– 52	– 79	– 89	– 71	– 86	– 89	– 69	– 62
47	Arnhemse- en Velperbroek	– 9	– 13	– 15	– 73	– 14	– 15	– 75	+121
41	Land v Maas en Waal	– 18	– 25	– 34	– 24	– 85	– 90	– 23	– 20

Bron: RIZA, memo WSR 2003-012 en -019

Het eerste dat opvalt in vergelijking met de vorige tabel, is dat een overstroming bij de splitsingspunten altijd grote gevolgen heeft voor de waterstanden bij de andere vier nabijgelegen dijkringen en op alle drie de riviertakken. Dat geldt zelfs voor overstroming van een relatief kleine, en niet langs de Waal gelegen dijkkring als 47 Arnhemse- en Velperbroek. Overstroming daarvan heeft zelfs stroomopwaarts tot Lobith, het veronderstelde instroompunt van dijkkring 48 Rijn en IJssel, nog een waterstandverlagend effect van 9 cm. Langs de Nederrijn is de verlaging aanzienlijk groter, waardoor de hoeveelheid water langs de Nederrijn terugvalt tot ver onder hetgeen overeenkomt met 15 dzd m³/s. De laatste kolom van Tabel 6.2 maakt duidelijk hoe het fysisch mogelijk is dat overstroming van zo'n kleine dijkkring een dergelijk groot effect heeft. Al het instromende water gaat uitstromen langs de IJssel en verhoogt daar de waterstand met een extra 121 cm boven de 61 cm die al het verschil vormt tussen de waterstand bij 18 dzd m³/s en bij 15 dzd m³/s. Conclusie is dat overstroming van 47 Arnhemse- en Velperbroek vermoedelijk meer problemen zal veroorzaken dan oplossen.

Dat geldt a fortiori voor de eerst bereikte dijkkring: 48 Rijn en IJssel. Deze dijkkring is weliswaar groot en kan dus ook veel water bevatten, maar het verhang in deze dijkkring is ook groot en het uitstroompunt ligt dus relatief laag langs de IJssel. Overstroming van deze grote dijkkring voegt daarom aan de 61 cm die de IJssel dan al boven de 15 dzd m³/s moet verwerken, nog eens 235 cm toe. Op de IJssel zou de waterstandverhoging ten opzichte van het peil bij 15 dzd m³/s dan bijna 3 meter bedragen.

De tweede dijkkring die door een hoogwatergolf wordt bereikt, 42 Ooij en Millingen, is beperkt van omvang, aangenomen dat die ruimte in kritieke omstandigheden nog beschikbaar zou zijn.⁵⁷ De eventuele uitstroombplaats ligt dichtbij Nijmegen op de Waal, dat wil zeggen voorbij het splitsingspunt. Vandaar dat de waterstanden op alle riviertakken afnemen, behalve op de Waal. De daar resulterende verhoging van 27 cm is niet verwaarloosbaar en komt ter plaatse ongeveer overeen met een verschil van 1 dzd m³/s in Lobith, hetzelfde verschil in hoeveelheid als deze PKB moet overbruggen. Hoewel 42 Ooij en Millingen door de relatief beperkte schade en het kleine aantal inwoners op zichzelf bekeken een goede kandidaat lijkt om als eerste te overstromen, is het dus niet zeker dat dit langs de Waal niet al snel tot even erge problemen zou leiden vanaf het moment dat uitstroming gaat optreden. De informatie in Tabel 6.2 is daarover in zoverre niet geheel volledig omdat daarin voor dijkkring 43 Betuwe TCW alleen het effect op het instroompunt is gegeven. Dit instroompunt is verondersteld vlakbij de Pannerdensche Kop te liggen. Het is echter goed mogelijk dat de waterstandverhoging op de Waal recht tegenover de uitstroombopening, dus aan de noordzijde bij 43 Betuwe TCW, nog hoger is dan 27 cm. Voor dijkkring 43 Betuwe TCW ontstaat dus bij uitstroom van dijkkring 42 Ooij en Millingen het eerste en het grootste probleem en niet bij dijkkring 41 Land van Maas en Waal, zoals Tabel 6.2 suggereert.

Of overstroming van dijkkring 42 Ooij en Millingen een overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW kan voorkomen zal geheel afhangen van de omstandigheden. Is het niet zonder overstroming te verwerken stukje van de hoogwatergolf klein, dan kan overstroming van dijkkring 42 Ooij en Millingen het overstromingsgevaar bij alle andere dijkringen duidelijk verminderen. Is het teveel aan water echter zo groot dat uitstroming gaat plaatsvinden op de Waal, dan volgt bij het hanteren van ongeveer hetzelfde veiligheidsniveau voor beide dijkringen waarschijnlijk toch overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW. Of dit in een specifieke situatie gebeurt, hangt in tweede instantie af van de mate waarin de uitstroming nog samenvalt met de passage van de (top van de) hoogwatergolf.

Blijven over 41 Land van Maas en Waal en 43 Betuwe TCW. Overstroming van de centraal gelegen dijkkring 43 Betuwe TCW heeft, zoals al eerder bleek, op alle dijkringen en riviertakken een zeer groot effect, dat overeenkomt met meer dan 3 dzd m³/s in Lobith. Uitstroom zou pas na een vertraging van dagen plaatsvinden op de Waal.

Het waterstandverlagende effect van een overstroming van dijkkring 41 Land van Maas en Waal is veel beperkter. Daarbij moet wel worden bedacht dat in de berekeningen voor bijlage D is aangenomen dat de dijken langs de Maas hoog genoeg zijn om doorslag naar de Maas te voorkomen. In werkelijkheid is het tegendeel het geval. Langs de Maas liggen de dijken van dijkkring 41 Land van Maas en Waal veel lager dan langs de Waal. Zonder verhoging van de Maasdijken is het effect langs de Rijntakken veel groter dan aangegeven in Tabel 6.2, maar

⁵⁷ Onder de huidige omstandigheden zou deze dijkkring al lang achterlangs vanuit Duitsland zijn ondergelopen voordat overstroming van de dijk op Nederlands grondgebied plaatsvindt. In werkelijkheid zal er dus uitstroom op de Waal gaan plaatsvinden zonder dat er sprake is van retentie!

ontstaat er wel een vloedgolf op de Maas. Met verhoging van de Maasdijken zijn de kosten hoger. Daarbij komt dat het aantal inwoners van 41 Land van Maas en Waal niet veel kleiner is dan dat in dijkkring 43 Betuwe TCW, zie tabel 3.4. Wel is de materiële schade in dijkkring 41 Land van Maas en Waal beduidend minder groot dan in dijkkring 43 Betuwe TCW.

Alles bij elkaar lijkt de informatie in Tabel 6.2 voorlopig tot de volgende conclusies te leiden.

2. Conclusie 2: Als we uitgaan van de huidige verschillen in hoogteligging van de dijken langs verschillende riviertakken, moet overstroming van de dijkringen 48 Rijn en IJssel en 47 Arnhemse en Velperbroek worden voorkomen om doorslag met cascadowerking naar de IJssel te voorkomen. Hetzelfde geldt voor dijkkring 41 Land van Maas en Waal met betrekking tot doorslag naar de Maas.
3. Conclusie 3: Weliswaar lijkt dijkkring 42 Ooij en Millingen het eerst voor overstroming in aanmerking te komen wegens het geringe aantal inwoners en de geringe schade. Maar het is de vraag of de weggevangen hoeveelheid water groot genoeg is om overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW te voorkomen. Dat zal geheel afhangen van de specifieke omstandigheden.

Zoals gezegd, zijn deze conclusies gebaseerd op overstromingen van bestaande primaire dijkringen, zonder dat daarbij voorzieningen zoals inlaten zijn aangebracht. In de volgende paragraaf bekijken we wat dit soort voorzieningen of het splitsen van dijkringen in compartimenten kan betekenen voor de schade bij overstroming.

6.4 Maatregelen die bij overstroming schade beperken

6.4.1 Algemeen

Ons beperkend tot de huidige situatie en de bestaande dijkringen, leverde de informatie over systeemwerking als voorlopige conclusie dat ingeval een overstroming niet meer te vermijden is, overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW zowel vaak onvermijdelijk lijkt, als sterk veiligheidsverhogend werkt op alle andere dijkringen in het bovenrivierengebied. Bij een overstroming zal overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW dus de totale omvang van de schade in BOR vermoedelijk sterk beperken. Niettemin blijft die schade op zichzelf gezien groot en treft ook 300 dzd personen tegelijkertijd, zie tabel 3.4. In deze paragraaf gaan we daarom in op de vraag of er – ook na uitvoering van een optimale algemene investeringsstrategie – nog rendabele mogelijkheden zijn om bij een overstroming de schade verder te beperken, maar steeds gegeven het feit dat een overstroming onvermijdelijk is. We kijken dus ook niet naar noodmaatregelen om overstroming toch te vermijden, zoals het plaatsen van zandzakken e.d. Daarvoor verwijzen we naar het reeds genoemde RBSO-onderzoek. We beperken ons hier dus tot de meer structurele maatregelen.

Ingeval er een overstroming plaatsvindt, lijken er nog maar twee manieren om de schade te beperken: namelijk het gebied dat overstroomt, beperken en de overstroming bij voorkeur laten plaatsvinden in een gebied met weinig tegen overstroming te beschermen waarden.

6.4.2 Compartimentering

Onder compartimenteren verstaan we in dit rapport het splitsen van een bestaande, primaire dijkkring in twee of meer nieuwe primaire dijkkringen. De overstromingskansen van de nieuwe dijkkringen kunnen dan los van elkaar worden ingesteld. Compartimentering kan bij sommige dijkkringen een serieuze optie zijn om bij overstroming schade te beperken.

Vanzelfsprekend is dat overigens niet, tenminste niet als we bij een primaire dijkkring investeren volgens een optimale strategie. In dat geval is de dijkhoogte immers steeds optimaal ingesteld. Daarbij is compartimenteren altijd in zoverre kostenverhogend dat de aanleg- en onderhoudskosten van de delingsdijk worden toegevoegd. Compartimentering kan dus alleen voordelig werken als een overstroming zich zou beperken tot een van de compartimenten of als de compartimenten een sterk verschillend veiligheidsniveau krijgen toebedeeld. In het laatste geval wordt geprobeerd om deels compartimenten te construeren waarvoor een laag veiligheidsniveau voldoende is. In dit geval kunnen ook de investeringen voor dat compartiment worden beperkt. Om de kosten te beperken kan het in beide gevallen helpen om bestaande secundaire dijken te gebruiken als uitgangspunt voor een nieuwe primaire kering. Bij het onderzoeken van mogelijkheden van compartimentering sluiten we aan bij de resultaten in Tabel 6.2. Daarom is gekeken naar mogelijkheden in dijkkring 43 Betuwe TCW. Andere mogelijkheden zijn dat een deel van dijkkring 48 Rijn en IJssel, bijvoorbeeld het Rijnstrangengebied, als noodoverloopegebied of retentiegebied gaat fungeren.

6.4.2.1 Compartimentering van dijkkring 43 Betuwe en Tieler- en Culemborgerwaarden

De meest voor de hand liggende manier om dijkkring 43 Betuwe TCW in tweeën te splitsen is door verhoging van de dijk aan de westzijde van het Amsterdam-Rijnkanaal. Daardoor ontstaan een dijkkring 43B 'Betuwe' en een dijkkring 43TC 'Tieler- en Culemborgerwaard'. Reden van splitsing zou hier niet zozeer differentiatie in overstromingskansen zijn, maar veeleer het beperken van een overstroming tot een kleiner gebied. Dit bevordert ook een goed verloop van een evacuatie, ook als die, zoals in 1995, gelukkig niet wordt gevolgd door een overstroming. Jaren geleden heeft WL al uitgerekend dat een dergelijke splitsing een rendabele actie is. Er is geen reden om aan te nemen dat deze conclusie nu niet meer zou gelden, tenminste zolang we dijkkringen afzonderlijk bekijken. Betrekken we systeemwerking in de beschouwing, dan kan de conclusie door cascadowerking anders uitvallen, zie hieronder en paragraaf 6.4.2.3.

Een tweede mogelijkheid van een noord-zuidplitsing ligt voor de hand westelijk van het smalste punt van de Betuwe, waardoor de Betuwe wordt gesplitst in een oostelijke en een, wat kleinere, westelijke dijkkring.

Beide noord-zuidplitsingen hebben wel een duidelijk nadeel. Het uitstroompunt met de laagste kruinhoogte, dat zonder splitsing ligt op de zuidwestpunt van de Tieler- en

Culemborgerwaarden aan de Waal, verschuift voor de twee oostelijker gelegen afsplitsingen, Betuwe en Betuwe Oost, naar de noordzijde, dus langs de lager gelegen Nederrijn. Uit dit oogpunt zou een splitsing van de Betuwe in een oost-westrichting beter zijn. Dat geeft in de hele Betuwe ook snelle evacuatiemogelijkheden, zonder dat uitsluitend van enkele bruggen over de rivieren gebruik moet worden gemaakt. Een mogelijkheid voor een oost-westsplitsing was geweest om de Betuwelijn aan te leggen op een dijk, zoals aanvankelijk de bedoeling was. Maar er is bij de aanleg in het zogeheten hoog-laagpakket enige honderden miljoenen guldens extra uitgetrokken om deze spoorlijn op maaiveldniveau aan te leggen. In Duitsland is de veiligheidsstrategie sterk gericht op compartimentering. Daarbij wordt in eerste instantie juist sterk gezocht naar mogelijkheden om hoger gelegen (spoor)wegen systematisch te gaan benutten en aan te passen als delingsdijken.

6.4.2.2 Compartimentering van dijkkring 48 Rijn en IJssel

In dijkkring 48 Rijn en IJssel gaat het vooral om afsplitsing van een zuidwestelijk deel. Hierbij kan differentiatie van overstromingskansen wel een belangrijk motief zijn. Het duidelijkst speelt dit bij het gebruik van het eigenlijke Rijnstrangengebied als noodoverloopgebied of als retentiegebied. Technisch houden beide termen hetzelfde in. Het verschil is dat een retentiegebied een overstromingskans heeft die groter is dan de wettelijke norm. Een retentiegebied wordt dus gebruikt om voor andere dijkringen de norm te halen. Dit is een duidelijk voorbeeld van het rekening houden met systeemwerking. Bij een noodoverloopgebied geldt de wettelijke norm van maximaal 1/1250 per jaar wel. Maar als de nood aan de man komt, dan is een noodoverloopgebied een van de eerste gebieden die voor overstroming in aanmerking komt. Het Rijnstrangengebied is nog vrijwel onbewoond en zou daarom goed kunnen functioneren als retentiegebied. Aan de noordzijde heeft de bestaande, oude primaire kering nog vrijwel de hoogte die nodig zou zijn om deze, nu secundaire dijk weer als een primaire kering te laten functioneren.

In de volgende tabel zijn gegevens vermeld over een groter gebied, waarbij het Rijnstrangengebied in noodgevallen wordt uitgebreid met de Driedorpenpolder. Daardoor hoeft aanmerkelijk minder geïnvesteerd te worden in een delingsdijk aan de zuidzijde van het Rijnstrangengebied en is het bergend vermogen aanzienlijk groter.

Er zijn hier nog allerlei andere inrichtingen mogelijk, maar deze zijn in het kader van dit onderzoek niet onderzocht.

6.4.2.3 Effecten van compartimenten op waterstanden

Evenals voor de bestaande dijkringen is het ook voor de compartimenten mogelijk om aan te geven welk waterstandverlagend effect zij hebben bij overstroming. Tabel 6.3 geeft daarvan een indruk.

Tabel 6.3 Waterstandverandering door overstroming van de dijkkring in de linkerkolom bij 18 dzd m³/s, met uitstroom

Nr	Naam	48 R&IJ	42 O&M	43 BTCW	47 A&VB	41LM&W	38 BW Waal	44 KR Nederrijn	49 IJL IJssel
Doorgebroken dijkkring		cm							
48	Rijn en IJssel	– 96	– 87	– 91	– 56	– 99	– 93	– 51	+235
48RD	Rijnstrangen & Driedorpenpolder	– 83	– 56	– 53	+55	– 50	– 50	+49	+47
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	– 52	– 79	– 89	– 71	– 86	– 89	– 69	– 62
43B	Betuwe	– 52	– 79	– 89	– 71	– 86	– 89	+176	– 62
43BO	Betuwe Oost	– 52	– 79	– 89	– 67	– 86	– 89	+176	– 57
43BW	Betuwe West	– 8	– 11	– 14	– 7	– 47	– 88	+211	– 6
43TC	Tieler- en Culemborgerwaard	– 6	– 9	– 11	– 8	– 35	– 87	– 8	– 6

Bron: RIZA, memo WSR 2003-019

Het eerste dat opvalt in de onderkant van de tabel, is hetzelfde verschil in effect dat we al bij Tabel 6.1 hebben geconstateerd tussen dijkringen bij de splitsingspunten en dijkringen verder benedenstrooms langs de afzonderlijke riviertakken. Zowel overstroming van Betuwe West als van de Tieler- en Culemborgerwaarden heeft slechts hoofdzakelijk effect langs de Waal.

Het tweede opmerkelijke punt is toename van de waterstanden op de Nederrijn door de verplaatsing van het uitstroompunt van de Waal naar de lager gelegen Nederrijn bij de afsplitsing van de Betuwe dan wel de twee delen daarvan. Het realiseren van de veiligheidsopgave langs de Nederrijn binnen de PKB van minder dan 30 cm blijkt echter al een enorme opgave. Dit maakt het buitengewoon twijfelachtig of compartimentering van dijkkring 43 Betuwe TCW langs de voorgestelde lijnen nog enige bijdrage zou geven tot schadevermindering. Wel laat de tabel zien dat splitsing op zich heel effectief kan zijn voor schadebeperking. Immers, de waterstandverlagende effecten van alleen het oostelijk deel van de Betuwe zijn even groot als die van de hele dijkkring 43 Betuwe TCW. Dat betekent dat een groot deel van de schade in dijkkring 43 Betuwe TCW vermijdbaar moet zijn door het aanleggen van een van noordoost naar zuidwest lopende delingsdijk, die iets hoger is dan de primaire keringen, zodat de laagste kruinhoogte op de rivierdijk bij het meest westelijke punt langs de Waal komt te liggen. Omdat het veiligheidsprobleem voor inwoners van de Betuwe een duidelijk zichtbare zaak is, hoeft in dit gebied niet gevreesd te worden voor het op de lange duur niet instandhouden van een dergelijke veiligheidsvoorziening die ook voor een goed verloop van een eventuele evacuatie van honderdduizenden personen tegelijkertijd van eminent belang kan zijn.

Ook het waterbergend vermogen van de zuidwesthoek van dijkkring 48 Rijn en IJssel blijkt groot. Het waterstandverlagend effect komt overeen met een hoeveelheid van ong. 1,6 dzd m³/s in Lobith, dat is meer dan 1,5 maal de PKB-opgave.

Maar ook hier speelt het punt van de verplaatsing van de uitstroomplaats en wel van de IJssel terug naar het midden van het Pannerdensch Kanaal. Ook deze uitstroomeffecten zijn weer zo groot dat het twijfelachtig is of inschakeling van dit gebied zonder meer nuttig is. Verder moet op dit punt hetzelfde voorbehoud worden gemaakt als eerder nodig was bij de uitstroom van dijkkring 42 Ooij en Millingen op de Waal: het effect van de uitstroom van dijkkring 48RD op dijkkring 43 Betuwe TCW is vermoedelijk groter dan vermeld, omdat in Tabel 6.3 is gekeken naar het veronderstelde instroompunt van dijkkring 43 Betuwe TCW en niet naar het effect op het punt recht tegenover het uitstroompunt. Het waterstandverhogend effect recht tegenover de uitstroom zou wel eens 60 cm kunnen bedragen. We komen hier dus tot eenzelfde conclusie als aan het einde van paragraaf 6.3.2:

4. Conclusie 4: Weliswaar lijkt compartiment 48RD Rijnstrangen en Driedorpenpolder het eerst voor overstroming in aanmerking te komen wegens het geringe aantal inwoners en de geringe schade. Maar het is de vraag of de weggevangen hoeveelheid water groot genoeg is om overstroming van dijkkring 43 Betuwe TCW te voorkomen. Dat zal geheel afhangen van de specifieke omstandigheden.

Wel moeten we bij het overwegen van compartimenteringen steeds bedenken dat de gevolgen weliswaar niet erg wenselijk kunnen zijn, maar dat het alternatief bij niet compartimenteren nog veel slechter kan uitpakken. Dit vereist meer onderzoek.

6.4.3 Inlaten

Cascadewerking door uitstroom kan dus een groot probleem zijn. De enige manier om dit bij bovenstrooms overlopen (tijdelijk?) te voorkomen is de bouw van inlaatwerken, die weer gesloten kunnen worden op het moment dat de dijkkring is ondergelopen tot aan de kruinhoogte op het laagste punt. Inlaatwerken hebben bovendien als voordeel dat het moment van inzetten van een dijkkring veel beter afgestemd kan worden op de specifieke hoogwatergolf die in aantocht is. Verder is de plaats van overstroom dan bekend, zodat de inrichting van veiligheidsvoorzieningen (bijv hoger gelegen vluchtwegen) daarop afgestemd kan worden. Of het gebruik van inlaatwerken werkelijk de overstroming van een andere dijkkring voorkomt, is niet zeker. Dit hangt af van het feit of het bergend vermogen van de ondergelopen dijkkring groot genoeg is en voldoende effectief is ingezet om de hoogwatergolf voldoende af te toppen.

Inlaatwerken kosten in de orde van grootte van 5 tot 20 mln euro. Hoewel ze weinig gebruikt zullen worden, lijkt het bij deze kosten zeer waarschijnlijk dat inlaatwerken bij diverse bestaande dijkringen of compartimenten een rendabele investering zouden zijn. Aansluitend op de bovenstaande analyse bij systeemwerking zouden met name de bestaande dijkringen 42 Ooij en Millingen en 48 Rijn en IJssel in aanmerking komen voor plaatsing van inlaatwerken. Uit tabel 3.4 volgt dat ook dijkkring 48 Rijn en IJssel duidelijk minder inwoners heeft dan dijkkring 43 Betuwe TCW en er veel minder materiële schade ontstaat. Anderzijds is het effect van

systeemwerking in dijkkring 48 Rijn en IJssel zeer groot, zij het met inlaatwerk minder groot dan staat in Tabel 6.2.

In samenhang met compartimenteren kunnen inlaatwerken met name rendabel zijn bij de compartimenten 48RD Rijnstrangen en Driedorpenpolder en compartiment 43BO Betuwe oost.

6.4.4 Instroming situeren op de plaats van uitstroompunten

Hoge dijken zorgen, zolang ze niet doorbreken, op een goedkope manier voor veel veiligheid. Maar als ze wel doorbreken, is de ramp veel groter dan bij een langzame stijging van het water. Om deze reden gaat men tegenwoordig in Frankrijk zover dat men streeft naar het ‘open houden’ van dijkringen aan de benedenstroomse kant. Bij de meeste dijkringen langs de Loire zijn de dijken inmiddels op die manier aangepast en bij de overige dijkringen wordt daaraan gewerkt. Als het water in de Loire hoog komt te staan, dan stroomt het vanuit het meest benedenstroomse punt een dijkkring binnen. Deze instroom vlak boven de volgende dijkkring werkt effectief om de benedenstroomse dijkkring te beschermen.

Letterlijk hetzelfde doen als langs de Loire is in Nederland langs de Rijn takken meestal niet mogelijk. Maar het lijkt wel mogelijk om de inlaten te bouwen op de punten die nu gedacht zijn als uitstroompunten! Dit voorkomt op een zeer effectieve manier en zonder afhankelijk te zijn van menselijk ingrijpen de zeer schadelijke cascaderwerking van uitstroom.

Natuurlijk zouden inlaten van dijkkring 42 Ooij en Millingen op de Waal en van 48RD aan het Pannerdensch Kanaal iets minder effectief zijn dan inlaten langs de Bovenrijn. Maar de diverse waterstandverlagingen in de tabellen suggereren wel dat de verkleining van het waterstandverlagend effect niet groot hoeft te zijn, mits de inlaten niet al te ver van de Pannerdensch Kop liggen (zie bijvoorbeeld de effecten van de verder weg gelegen dijkkring 41 Land van Maas en Waal). En dat is in beide voorbeelden het geval. Wel zouden de rivierdijken dan tot de inlaten wat hoger moeten zijn dan bij bovenstroomse inlaten. Anderzijds voorkomt deze situering van inlaten de bouw van extra uitlaatwerken om de dijkringen weer leeg te laten stromen.

Kostenbesparend is dat het uitlaatwerk van Rijnstrangen al bestaat. Dit zou alleen ook andersom ingezet moeten (kunnen) worden. Voorzover bekend is inzet van dit uitlaatwerk in 1995 niet overwogen om waterstanddaling bij de in gevaar zijnde en geëvacueerde dijkkring 43 Betuwe TCW te verminderen. Als er voor wordt gezorgd dat dit uitlaatwerk ook als regelbaar inlaatwerk kan functioneren, dan zou daarmee op korte termijn tegen relatief zeer lage kosten een extra veiligheidsvoorziening gerealiseerd kunnen worden.

6.5 Berekening van de optimale veiligheid

Er is gewerkt aan een programma om op basis van de tabellen in bijlage D voor het bovenrivierengebied de optimale veiligheid en optimale investeringsstrategie met systeemwerking te berekenen, maar deze actie is nog niet afgerond.

7 KBA rentabiliteitscriterium veiligheid van pakketten

Ieder willekeurig maatregelpakket in het PKB-gebied ten oosten van de lijn Krimpen-Dordrecht dat de wettelijke veiligheidsnorm net haalt, is onmiddellijk rendabel zolang de investeringskosten daarvan niet hoger zijn dan ongeveer 2,75 mld euro, tenminste bij optelling van de schadewinst voor alle dijkkringen afzonderlijk. Het Basis-Voorkeursalternatief voldoet in zijn geheel aan deze norm. Wegens systeemwerking ligt de werkelijk kritische grens vermoedelijk duidelijk lager. In deze berekening is geen rekening gehouden met andere mogelijke baten dan veiligheid.

7.1 Inleiding

Het veiligheidsonderzoek heeft zich tot hier toe vooral gericht op het bepalen van de optimale veiligheid en beschermingsstrategie van dijkkringen met behulp van dijkverhoging. Dat levert nuttige informatie voor de PKB, zie de samenvatting en conclusies.

Dit beantwoordt echter nog niet direct vragen over de kosten-batenverhouding van voorgestelde maatregelpakketten in het project Ruimte voor de Rivier. Deze pakketten bestaan voornamelijk uit andere maatregelen dan dijkverhoging. Verder wordt niet zozeer gestreefd naar een optimale strategie, maar naar het bereiken van de wettelijke veiligheidsniveaus in 2015 volgens de randvoorwaarden van 2001, kort gezegd het kunnen verwerken van de welbekende 16 dzd m³/s in Lobith. De meeste dijkkringen zijn in 2000 in staat om (niet meer dan) 15 dzd m³/s te verwerken. De kosten-batenvraag laat zich bij Ruimte voor de Rivier dan losweg formuleren als:

Wegen de baten van de schadevermindering door een in de PKB voorgesteld pakket op tegen de daarbij behorende kosten?

Op deze vraag is een algemeen antwoord mogelijk zonder de inhoud van de pakketten precies te kennen, omdat het veiligheidsresultaat van alle mogelijke PKB-pakketten vooraf vaststaat, namelijk in 2015 minstens voldoen aan de wettelijke norm toegepast in de situatie van 2001. Omdat de veiligheidsbaten van ieder in de PKB voorgesteld pakket van tevoren vaststaat, is een algemene kritische grens aan te geven voor de daarvoor te maken investeringskosten. Als de investeringskosten van een voorgesteld pakket onder de kritische grens blijven, zijn de veiligheidsbaten van dat pakket in 2015 groter dan de kosten en is de investering alleen al gelet op veiligheid rendabel. In het andere geval zou in ieder geval een deel van de investeringen beter uitgesteld of anders ingericht kunnen worden, tenminste als we alleen letten op de veiligheidsbaten. Een andere reden voor overschrijding van de kritische investeringsgrens kan zijn dat een deel van de projectinvesteringen een ander doel dient. Daarvoor valt moeilijk een algemene maat te geven. In deel 2 van het onderzoek, de kosten-effectiviteitsanalyse van maatregelen en pakketten, wordt dieper ingegaan op de combinatie van effecten op het gebied

van veiligheid en ruimtelijke kwaliteit. In dit hoofdstuk beperken we ons tot de baten vanuit veiligheidsoogpunt.

Als een pakket onder de kritische kostengrens blijft – en dus een rendabele investering is –, dan hoeft dat nog niet te betekenen dat dit pakket ook het best denkbare, optimale investeringspakket is. Het is dus goed denkbaar dat er andere pakketten zijn die meer rendabel zijn. Dat kunnen pakketten zijn die ook voldoen aan de wettelijke norm, maar dat tegen lagere kosten bereiken. Dat is onderwerp van onderzoek in het tweede deel van de KBA Ruimte voor de Rivier, namelijk de kosten-effectiviteitsanalyse van maatregelen en pakketten. Maar het kunnen ook pakketten zijn die duurder zijn dan die voorgesteld in Ruimte voor de Rivier, maar een grotere veiligheidswinst teweeg brengen. Of pakketten die soms een lager veiligheidsniveau bereiken, maar tegen aanzienlijk lagere kosten. In de hoofdvariant in paragraaf 4.2 zijn ook van dit laatste voorbeelden te vinden.

7.2 KBA-criterium veiligheid

Een van de resultaten van het veiligheidsonderzoek is dat het inzicht heeft geboden in het juiste criterium om te beoordelen wanneer een actie rendabel is of wordt. Dit is het geval als het zogenaamde eerstejaarsrendement van die actie nul of positief is. In woorden betekent dit dat de schadevermindering in het 1^e jaar groter of gelijk moet zijn aan de jaarkosten van de investering die met de actie gepaard gaat. In formule vorm:⁵⁸

$$s^- - S^+(X) \geq (\delta + \varepsilon)I(X) \quad (7.1)$$

Waarin: s^-	verwachte overstromingsschade (kans maal schade bij overstromen) direct voorafgaand aan de actie
S^+	verwachte overstromingsschade direct na uitvoering project X
X	(omvang) project
δ	jaarlijkse rentekosten als perunage van de investeringskosten
ε	gemiddelde jaarlijkse onderhoudskosten als perunage van de investeringskosten
I	investeringskosten

Aan de linkerkant van de vergelijking staan de baten van het project in het eerste jaar na investering. Dat is het verschil in verwachte schade in dat jaar. Aan de rechterkant van de vergelijking staan de jaarlijkse kosten van het project. Bij de afleiding daarvan zijn we ervan uitgegaan dat de investeringen in de loop der tijd niet vervangen hoeven te worden, mits normaal onderhoud wordt gepleegd. De kosten zullen in de regel in de loop der tijd gemiddeld constant blijven. De verwachte schade stijgt echter wel in de loop der tijd door de geleidelijke

⁵⁸ Formule (7.1) is het wanneer-criterium bij optimalisatie, zie hoofdstuk 2 en bijlage A, onder andere paragraaf 8.3.

stijging van de overstromingskansen en de economische groei. Hetzelfde geldt voor het verschil tussen de schadeverwachtingen met en zonder uitvoering van het project Ruimte voor de Rivier. Voldoen aan het eerstejaarscriterium houdt daarom tevens in dat de netto contante waarde van de in de PKB voorgestelde investering over de hele levensduur aanzienlijk positief is.⁵⁹ Met behulp van deze formule is te bepalen welk investeringsbedrag per dijkkring in een jaar nog net rendeert, omdat de kosten gelijk zijn aan de baten. Dit grensinvesteringsbedrag I_g is gelijk aan het verschil in schade gedeeld door (het percentage van) de jaarkosten:

$$I(X) \leq I_g = \frac{s^- - S^+(X)}{(\delta + \varepsilon)} \quad (7.2)$$

Waarin: I_g Investeringsbedrag dat nog net aan criterium eerstejaarsrendement voldoet.

Het werkelijke investeringsbedrag moet kleiner zijn dan het grensbedrag, wil het voorgestelde pakket een rendabele investering zijn.

Nogmaals zij hier herhaald dat de voorgestelde pakketten en het daarmee te behalen veiligheidsniveau sterk kunnen afwijken van de optimale investering en het daarmee samenhangende veiligheidsniveau. Het is dus denkbaar dat enerzijds (een deel van) de pakketten bij Ruimte voor de Rivier volgens (7.2) als onrendabel zou worden gekwalificeerd, terwijl het anderzijds optimaal zou zijn om nu nog meer te investeren dan in de pakketten wordt voorgesteld. In het laatste geval wordt dan, bijvoorbeeld door differentiatie tussen dijkringen, een betere verhouding tussen kosten en baten bereikt dan in het voorgestelde pakket, mede gelet op de toekomstige ontwikkelingen.

7.3 Berekening kritische grens investeringen I_g

7.3.1 Splitsing van het projectgebied

Een pakket bestaat uit een verzameling maatregelen. Veel maatregelen zijn gericht op de verlaging van de maatgevende hoogwaterstand (MHW) en werken daarom aan beide zijden van de rivier en over enige afstand, soms over enige tientallen kilometers. De veiligheidsbaten van een maatregel slaan dus meestal in minimaal twee dijkringen neer. Anderzijds krijgt een dijkkring pas een hoger veiligheidsniveau als het waterpeil *overall* voldoende onder de dijkhoogte

⁵⁹ Omdat de schadevermindering betrekking heeft op een (snel) stijgende verwachte schade, zullen de baten in de loop der tijd snel toenemen. Daarom zal het voor zeer veel projecten niet moeilijk zijn om te voldoen aan het criterium van de netto contante waarde. Het is dan echter makkelijk mogelijk dat de periode direct na investeren wel onrendabel is. Het is dan beter de investering uit te stellen, waardoor een hogere netto contante waarde behaald kan worden.

Als de som van de groeivoeten van de verwachte schade als gevolg van waterstandsverslechtering en economische groei groter is dan de disconteringsvoet van 4%, dan is die netto contante waarde (bij een oneindige levensduur) zelfs oneindig groot. Dit is, zoals uit paragraaf 3.3 blijkt, bij BER zeker het geval. Iedere investering op ieder moment levert dan een oneindig grote netto contante waarde op. Hieruit blijkt dat netto contante waarde geen zinvol criterium is voor dit soort projecten. Uit de vorige hoofdstukken is namelijk gebleken dat een optimale investering zeker niet oneindig is. Zie ook bijlage A, paragraaf 8.2.

is gebracht. Dit kan voor een dijkkring op meer dan een riviertak betrekking hebben. Maatregelen kunnen dus niet los van elkaar worden bekeken en hetzelfde geldt voor dijkringen, zowel aan weerszijden van de rivier als naastliggend. Alleen in geval van dijkversterking is een eenduidige toerekening van kosten aan een dijkkring mogelijk.

Slechts op één plaats kan een eenduidige knip worden gemaakt en wel tussen dijkkring 48 Rijn en IJssel en 49 IJsselland. Dat komt omdat er op die plaats aan de overkant van de IJssel hoge gronden zijn. Daarbij komt dat er tussen Westervoort en Doesburg overhoogte aanwezig is, zodat er geen investeringen hoeven plaats te vinden gericht op dit laatste traject langs dijkkring 48 Rijn en IJssel.

Op alle andere plaatsen liggen de scheidingen tussen dijkringen aan de ene kant van de rivier op een andere plaats dan aan de overkant. Wel kan bij benadering een knip worden gemaakt bij de IJsseldelta (dijkringen 10 Mastenbroek en 11 IJsseldelta) en bij de scheiding tussen de dijkringen in het boven- en het benedenrivierengebied. Deze scheidingen in de toerekening van de kosten van maatregelen zijn natuurlijk alleen mogelijk als de maatregelen in een gebied niet al te veel grensoverschrijdende werking hebben. Is dat laatste wel het geval, dan kan de onderverdeling niet goed plaatsvinden.

De berekeningen voor BER zullen uitsluitend worden gepresenteerd met parameters zonder extra windopslag. De reden daarvoor is dat bij de beoordeling of de pakketten aan de veiligheidsdoelstelling voldoen, op dezelfde wijze wordt gerekend. Een tweede opmerking over dit gebied is dat de berekening zich hier beperkt tot de 6 onderzochte dijkringen, dus ruwweg het gebied oostelijk van de lijn Krimpen-Dordrecht. Het project Ruimte voor de Rivier kijkt echter ook verder westwaarts, bijvoorbeeld langs het Hollands Diep en het Haringvliet. Aan dit laatste stuk van het project kunnen hier geen baten worden toegerekend omdat de betreffende dijkringen niet in de KBA veiligheid zijn betrokken. In het voorkeursalternatief gaat het daarbij om een geplande investeringsuitgave van 85 mln euro.⁶⁰ Over de rentabiliteit van dit bedrag kan hier dus geen uitspraak worden gedaan.

7.3.2 Benodigde gegevens

7.3.2.1 Overstromingskansen voor en na actie

Voor alle dijkringen is aan de hand van door het RIZA verstrekte informatie de actuele overstromingskansen berekend voor het jaar 2001. Informatie daarover staat in paragraaf 3.2 en 3.3. Voor de bovenrivieren is voor deze berekening uitsluitend gebruik gemaakt van de recente informatie in tabel 3.3. Slechts drie dijkringen voldoen dan aan hun wettelijke norm, namelijk 44 Kromme Rijn, 45 Gelderse Vallei en 10 Mastenbroek. Het Basis-Voorkeursalternatief laat

⁶⁰ Berging Volkerak-Zoommeer (hierdoor is dijkversterking langs Hollands Diep en Haringvliet niet nodig) ad 78 mln euro en dijkversterking Oude Maas ad 7 mln euro.

voor de eerste twee dijkkringen geen verbetering van de veiligheid over de hele linie zien.⁶¹ Verder is dijkkring 23 Biesbosch (Noordwaard) buiten beschouwing gelaten omdat alle pakketten vermoedelijk gaan inhouden dat deze dijkkring ontpolderd wordt en de veiligheid dus afneemt.⁶² Voor alle andere dijkkringen is aangenomen dat een voorgesteld pakket zo is samengesteld dat deze dijkkringen na uitvoering van dat pakket in 2015 precies aan de wettelijke norm toegepast in de situatie van 2001 voldoen. Weliswaar zullen er lokaal dijkvakken zijn aan te wijzen waar de verbetering groter uitvalt en dus overhoogte ontstaat, maar er zullen zeer waarschijnlijk bij alle dijkkringen ook dijkvakken zijn waar de norm maar net wordt gehaald. Bovendien wordt om kosten te besparen waar mogelijk gebruik gemaakt van bestaande overhoogte, zodat daardoor toekomstige ruimte wordt beperkt.

7.3.2.2 Verwachte schade

De schade bij overstromen is ontleend aan het veiligheidsonderzoek en voor details wordt verwezen naar paragraaf 3.4. De verwachte schade per dijkkring is nu uit te rekenen door dit bedrag te vermenigvuldigen met een overstromingskans (die in 2001 dan wel de wettelijke). Een bedrag aan verwachte schade kan worden gesommeerd over alle dijkkringen in een gebied.

Het is zeer de vraag of het in het kader van de beoordeling van een pakket juist is om de verandering van dit totaal te beschouwen als de schadeverandering door het pakket. Er wordt dan namelijk geen rekening gehouden met systeemwerking. Zolang de berekeningen met systeemwerking nog niet zijn uitgevoerd, is over het effect van systeemwerking op de verwachte schade weinig met zekerheid te zeggen. Bij veel deskundigen bestaat de indruk dat systeemwerking de totale overstromingskans dempt. Zo heeft de Technische Adviescommissie Waterkeringen in haar reactie op het advies van de Commissie Noodoverloopgebieden gesteld dat 10 procent van de maximale schade (5,5 miljard euro, zijnde 10% van 55 miljard euro voor de Rijn en Maas gezamenlijk) een realistischer nulalternatief zou zijn dan het door de Commissie aangedragen nulalternatief (55 miljard euro). Ook in de beleidsanalyse naar rampenbeheersingsstrategieën en structurele maatregelen, die vorig jaar door HKV en WL is uitgevoerd, is verondersteld dat de verwachte schade met minimaal 50 en maximaal 90 procent daalt als gevolg van systeemwerking.

Wouter van de Wiel, die onlangs bij de TU Delft is afgestudeerd op het onderwerp systeemwerking, heeft echter de verwachting uitgesproken dat de positieve effecten van systeemwerking (= vermindering van het overstromingsrisico) wel eens kleiner zouden kunnen zijn dan de negatieve effecten van systeemwerking (cascadewerking = vergroting van het overstromingsrisico). Per saldo zou er dan van systeemwerking geen dempend effect uitgaan,

⁶¹ Dat geldt met name als op deze trajecten wordt gekozen voor dijkversterking langs dijkkring 43 Betuwe. Daardoor zou het bestaande verschil in veiligheid op beide oevers verminderen. Uit oogpunt van optimale veiligheid is het daarom juist op deze trajecten verstandig om te kiezen voor waterstandverlagende maatregelen.

⁶² Deze dijkkring is overigens zo klein dat wel meenemen afgerond niet tot andere cijfers leidt.

maar een versterkend effect. Dit lijkt overigens niet direct door werkelijk opgetreden overstromingen te worden gestaafd.

Overstroming in de ene richting kan door cascadowerking zeker tot een grotere overstromingsschade leiden dan wanneer de overstroming in een andere richting zou optreden. Maar in ieder geval zal voor een onbekend en wellicht van geval tot geval verschillend deel van het totaal van alle dijkringen gelden dat door systeemwerking de overstromingskansen in werkelijkheid lager zijn dan hier is aangenomen. Dan is ook het (absolute) verschil in overstromingskansen door uitvoering van het project kleiner. Systeemwerking heeft daarom een aanzienlijke invloed op de kritische grens van investeren en enig voorbehoud is daarom bij het gebruik van tabel 7.1 op zijn plaats.

Tegenover de grotere veiligheid door systeemwerking kan ook worden gewezen op de grotere, echte overstromingskansen wanneer met meer faalmechanismen rekening wordt gehouden dan alleen overschrijden van de dijkhoogte, zoals wordt onderzocht in VNK. In dat geval is het mogelijk dat een ander faalmechanisme een zodanig zwakke schakel in het geheel is, dat (een deel van) de maatregelen bij Ruimte voor de Rivier geen merkbare invloed zouden hebben op de werkelijke overstromingskansen. Het omgekeerde is echter ook mogelijk, in ieder geval lokaal. Een maatregel, bijvoorbeeld dijkversterking, kan een groter effect hebben op de verwachte schade als daardoor niet alleen de overschrijdingskansen, maar ook de kans op andere faalmechanismen wordt verkleind. Overigens zijn er niet alleen andere faalmechanismen in het spel, maar zijn er ook aanvullende beschermingselementen die in een structurele beschouwing niet aan bod komen, zoals de bij het ontwerpen ingebouwde sterktereserve van de dijk en het mogelijk kerend werken van de waakhoogte.

De onbekende invloeden van systeemwerking en andere faalmechanismen in combinatie met het onbekende effect van voorgestelde maatregelen op die fenomenen maken het moeilijk om een uitspraak te doen over de relevantie van de onderstaande berekening. De uitspraken in paragraaf 7.4 zijn dus alleen geldig binnen de in het project Ruimte voor de Rivier gehanteerde, beperkte visie op de werkelijkheid.

7.3.2.3 Jaarkosten investering

De rentevoet is gelijk gesteld aan de risicovrije disconteringsvoet van 4% reëel per jaar. Er is geen rekening gehouden met een risico-opslag voor het niet-diversificeerbare, macro-economische risico van samenhang van de baten met de algemene economische ontwikkeling in Nederland. Daar is in deze berekening ook geen aanleiding voor omdat bij de verwachte schade slechts wordt gelet op de verandering in 2015.⁶³ Daarnaast ligt ook het investeringsbedrag als grens in 2015 vast.

⁶³ Impliciet wordt dan wel de veronderstelling gemaakt dat de groei van de verwachte schade (β) trendmatig niet negatief wordt. Daar dit de som is van de groei door waterstandsverlaging ($\alpha\eta$) en van economische groei (γ) mag de mogelijkheid dat β trendmatig kleiner dan nul is, worden verwaarloosd.

Voor de onderhoudskosten is gerekend met verschillende varianten. Het gaat daarbij om de onderhoudskosten die door het project ontstaan. Niet alle maatregelen zullen gepaard gaan met *extra* onderhoudskosten. Denk bijvoorbeeld aan een dijkeruglegging die leidt tot een kortere dijk lengte met een op makkelijk beheer gerichte vormgeving. In dit geval is het niet correct om aan de nieuwe dijk, als *extra* uitgave, een standaard kostenpercentage van 1% voor dijken toe te rekenen. Het is op dit dijkvak zelfs denkbaar dat de nieuwe onderhoudskosten lager zijn dan de oude.

7.4 Resultaten

Tabel 7.1 geeft de uitkomsten van de berekening. Uitgangspunt bij de bovenrivieren is geweest de overstromingskansen in tabel 3.3. Zoals gezegd, hebben de cijfers per gebiedsdeel alleen betekenis voorzover de maatregelen in dat gebied niet al teveel uitstraling hebben daarbuiten, of omgekeerd.

Tabel 7.1	Grensinvesteringsbedragen op basis van veiligheidsbaten (oostelijk van Dordrecht) zonder systeemwerking bij verschillende onderhoudskosten (€% per jaar)			
	$\epsilon = 0\%$	$\epsilon = 0,5\%$	$\epsilon = 1\%$	$E = 2\%$
	mln euro, prijzen 2003			
IJsseldelta (10,11)	43	0	0	0
IJssel rivier (49-53)	1082	38	34	28
IJssel totaal	1125	38	34	28
Midden (38-48, min 39,44,45,46)	880	0	0,0	0
BER (15,16,22,24,35)	1130	782	704	587
Midden en BER	880	0	0,0	0
Totaal (oostelijk van Dordrecht)	2212	820	738	615
w.o. BOR	1082	38	34	28

Een pakket met een investering van 1,9 mld euro in 2015, dat slechts gericht zou zijn op het precies halen van de veiligheidsnorm, is al rendabel als de extra jaarlijkse onderhoudskosten door uitvoering van dit pakket iets meer zijn dan 2% van de investeringskosten. Bij de twee basisalternatieven van het MER worden de beheers- en onderhoudskosten op iets meer dan 0,5% geschat. Ook de voor het Basis-Voorkeursalternatief geschatte kosten van onderhoud en beheer liggen in de buurt van 0,5% per jaar. De grens voor een rendabel project ten oosten van de lijn Krimpen-Dordrecht zou daarvoor dan ongeveer 2,75 mld euro bedragen, tenminste bij optelling van de schadewinst voor alle dijkkringen afzonderlijk. Het investeringsbedrag van het totale voor dit gebied voorziene Basis-Voorkeursalternatief is 2,127 mld euro en blijft daarmee in zijn totaliteit binnen de rentabiliteitsnorm van 4% reëel.

Wegens systeemwerking ligt de werkelijk kritische grens echter vermoedelijk lager. Zouden alle overstromingskansen (en daarmee ook de overstromingskosten) in werkelijkheid gemiddeld

30% lager zijn dan die zonder rekening te houden met systeemwerking, dan moeten ook alle bedragen in tabel 7.1 met 30% verlaagd worden.^{64,65} Zou het echter zo zijn dat de huidige overstromingskansen groter zijn dan de overschrijdingskansen waarmee hier is gerekend, wat mogelijk is als met meer faalmechanismen rekening wordt gehouden zoals in VNK, dan moet een correctie de andere kant op worden toegepast.

Ten slotte, zoals eerder al opgemerkt, betekent het feit dat een pakket voldoet aan de wettelijke norm nog niet dat zo'n pakket uit veiligheidsoogpunt ook het meest rendabele is. Het is zelfs goed mogelijk dat het meest rendabele project duurder is dan de hier aangegeven grenzen, omdat daarmee dan een hoger veiligheidsniveau wordt bereikt. Ook daarbij moet natuurlijk rekening worden gehouden met systeemwerking.

Naast veiligheid kunnen er andere redenen zijn voor uitgaven, bijvoorbeeld voor verbetering van ruimtelijke kwaliteit. Zie daarvoor de kosten-effectiviteitsanalyse voor dit project in deel 2 van de KBA Ruimte voor de Rivier.

Dat ieder pakket van minder dan 2,7 mld euro dat de projectdoelstelling haalt, meer rendabel is dan 4%, betekent natuurlijk niet dat zo'n pakket ook efficiënt is. Of het in de PKB voorgestelde Basis-Voorkeursalternatief ook een efficiënt pakket is, is eveneens onderzocht in de kosten-effectiviteitsanalyse (KBA, deel 2). Daaruit blijkt dat meer kosteneffectieve pakketten tot de mogelijkheden behoren.

⁶⁴ Let op dat het hier niet gaat om een discussie of de normen wel goed gedefinieerd zijn. De aanpassing geldt ook als de wetgever welbewust systeemwerking buiten de definitie van de norm heeft gelaten in de wetenschap dat daardoor de echte situatie veiliger is dan deze volgens de norm lijkt te zijn (zij het onbekend hoeveel en bovendien verschillend per dijkkring). In dat geval zou er alleen beleidsmatig een uitzondering op de aanpassing van de investeringskosten grens gemaakt kunnen worden voor het allergeedkoopste pakket om de norm te halen. Dit is dan het best mogelijke resultaat van een kosteneffectiviteitsanalyse van alle mogelijke pakketten om de norm te halen.

⁶⁵ Zie voor nog grotere correctiefactoren de onderzoeken genoemd in paragraaf 7.3.2.2.

Literatuur

ARF, 2004a, Invloed waterstandsverhoging op kosten dijkversterking, Arcadis, Royal Haskoning en Fugro, mei 2004

ARF, 2004b, Invloed waterstandsverhoging op kosten dijkversterking - Maas, Arcadis, Royal Haskoning en Fugro, november 2004

Asselman, N.E.M. en S.N. Jonkman, 2003, Consequences of floods: the development of a method to estimate the loss of live. WL | Delft Hydraulics, Rijkswaterstaat en Road and Hydraulic Engineering Institute, Delft, juni 2003

Briene, M., Koppert, S., Koopman, A. en Verkennis A., 2002. Financiële onderbouwing kengetallen hoogwaterschade; NEI B.V.; Rotterdam 2002

Buiteveld, H. en M.H.I. Schropp, 2003, Klimaatscenario's voor de Maatgevende afvoer van Rijn en Maas; RIZA memo WSR 2003-002

Chbab, Houcine en Chris Geerse, 2004, Memo voor CPB; RIZA-memo, CPB/2004-1, 26 april 2004.

Commissie Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterking, 1993, Toetsing Uitgangspunten Rivierdijkversterking, Advies van de Commissie.

Dantzig, D. van, 1956, Economic decision problems for flood prevention; *Econometrica* Vol. 24, 1956, p 276-287.

Dantzig, D. van, 1960, Het economisch beslissingsprobleem inzake de beveiliging van Nederland tegen stormvloeden; in Deel 3, II.2 van het rapport van de Deltacommissie.

Diamond Peter A. and Jerry A. Hausman, Contingent Valuation: Is some number better than no number? in: *Journal of Economic Perspectives*, volume 8, Number 4, pp. 45-64.

Dienst Weg- en Waterbouw, 2003, Schade na een grootschalige overstroming. DWW-2003-056.

Ebregt, J., C.J.J. Eijgenraam en H.J.J. Stolwijk, 2005, Kosteneffectiviteitsanalyse van maatregelen en pakketten, Kosten-batenanalyse voor Ruimte voor de Rivier, deel 2; CPB Document 82, april 2005.

- Eijgenraam, C.J.J., C.C. Koopmans, P.J.G. Tang en A.C.P. Verster, 2000, *Evaluatie van infrastructuurprojecten, Leidraad voor kosten-batenanalyse*, CPB en NEI, Den Haag
- Feichtinger, Gustav en Richard F. Hartl, 1986, *Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse. Anwendungen des Maximumprinzips in den Wirtschaftswissenschaften*, de Gruyter Berlin New York, 1986
- Grinwis, M. en M. Duyck, 2001, Hoogwaterstanden en overstromingen in België: Een evaluatie van de niet-tastbare kosten, KINT, Verhandeling nr. 6, Brussel, april 2001.
- Kind, J., 2004, Veiligheidsnormen en het perspectief van houdbaarheid; RIZA werkdokument 2004.084x, Lelystad, maart 2004
- Jorissen, Ir. R.E., 2003, Kan het weer gebeuren? Bundel Waterbouwdag, 18 februari 2003
- Kort, P.M., 1988, Optimal Dynamic Investment Policies of a Value Maximizing Firm, Tilburg University, 1988
- Lodder Q, Bepaling van de decimeringshoogten in het Benedenrivierengebied en de IJsseldelta; RIZA, memo, 12 januari 2004.
- Luteijn, ir. D., 2002, Rapport van de Commissie Noodoverloopgebieden
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995, Deltaplan Grote Rivieren, Kamerstukken 1994-1995, 18 106, nrs. 54 en 57.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000, 3e Kustnota Traditie, Trends en Toekomst, dec. 2000.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Financiën, Centraal Planbureau en RebelGroup, 2004, Risicowaardering Aanvulling op de Leidraad OEI, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Ministerie van Economische Zaken, december 2004.
- Noortwijk, J.M. van, H.J. Kalk, M.T. Duits en E.H. Chhab, 2002, Bayesian Statistics for Flood Prevention, HKV Consultants en RIZA; Lelystad, januari 2002.
- Parment B.W.A.H. et al., Analyse van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen, Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001, RIZA rapport 2002.013, Arnhem, augustus 2001

Parmet B.W.A.H. et al., Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith, Onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001, RIZA rapport 2002.012, Arnhem, augustus 2001

Rapport Commissie Rivierdijken, 1977, Rapport Commissie Rivierdijken.

RIVM, MNP, 2004, Risico's in bedijkte termen. Een evaluatie van het beleid inzake de veiligheid tegen overstromen, Bilthoven, mei 2004

RIZA, 2004, Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Nederrijn, uitgegeven door de Duits-Nederlandse werkgroep Hoogwater (Provincie Gelderland, Ministerie V&W, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen), juli 2004.

Scarf, H., 1960, The Optimality of (S,s) Policies in the Dynamic Inventory Problem, In K.J. Arrow, S. Karlin & P. Suppes (Eds), *Mathematical Methods in the Social Science* (pp Chapter 13); Stanford University Press, California.

Schropp, M.H.I., 2003, Systeemwerking en cascade-effect dijkringen; RIZA memo WSR 2003-012, WSR 2003-015 en WSR 2003-019.

Seierstad, A. and K. Sydsaeter, 1987, *Optimal control theory with economic applications*, North Holland publishing company, Amsterdam, 1987

Snippen, E., 2001, Integrale Verkenning Benedenrivieren: Hydraulica en Morfologie, Rijkswaterstaat directie Zuid-Holland/RIZA, Rotterdam/Lelystad, RWS-DZH notanr. AP/3314610/2000/17.

Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, 1996, Wet op de waterkering.

Technische Adviescommissie voor de Waterkering, 2000, Van Overschrijdingskansen tot overstromingskansen.

Tijdelijke Commissie Infrastructuurprojecten, 2004, Grote projecten uitvergroot: een infrastructuur voor besluitvorming; Tweede Kamer, vergaderjaar 2004-2005, 29283, nrs. 5-6.

Vrijling, Prof. ir. drs. J.K. en ir. I.J.C.A. van Beurden, 1990, Sea level rise: A Probabilistic Design Problem; chapter 87 in *Coastal Engineering*, 1990.

WL Delft Hydraulics en HKV Lijn in Water, 2004, Overstromingsrisico dijkringen in Nederland, betooglijn en deskundigenoordeel, bijlage B: Logboek van het bepalen van de correctie op de schades van DWW, 2003, WL rapport, Delft, april 2004.

Bijlagen

A Afleiding model optimale veiligheid

A.1 Inleiding

In het kader van de KBA Ruimte voor de Rivier komt de vraag aan de orde wat een goede veiligheidsnorm voor dijkkringen is. We beantwoorden die vraag in deze bijlage voor één dijkkring door het ontwerpen van een optimale beschermingsstrategie.⁶⁶ Daarbij gebruiken we – afgezien van de belangrijke nuancerings in de volgende voetnoot – slechts één soort maatregel als instrument. Dit instrument duiden we aan met ‘dijkverhoging’, zonder daarmee te willen zeggen dat dijkverhoging in de praktijk altijd het beste middel zou zijn om de veiligheid te verhogen.⁶⁷ Sterker nog, bijna alle formules gelden ongewijzigd ook voor waterstandsverlagende maatregelen. Materieel is het uitsluitend een kwestie van invulling van de juiste investeringskosten of we de ene dan wel de andere maatregel in de beschouwing betrekken.

We bekijken een simpel systeem van één dijkkring, die (alleen) kan overstromen als de waterstand hoger komt dan de dijken.⁶⁸ De dijkhoogte was aanvankelijk zo vastgesteld dat de daarvoor gemaakte kosten maatschappelijk gezien opwogen tegen de verwachte voorkomen schade in het gebied. Bij aanleg resteerde een (kleine) kans op overstroming.

Dit systeem is echter aan wijziging onderhevig. Ieder jaar stijgt de schade bij overstromen als gevolg van stijging van het aantal inwoners en economische groei. Ook het watersysteem verandert door diverse oorzaken: ieder jaar stijgt de kans op een waterstand hoger dan de dijkhoogte een beetje. Om beide redenen hebben we een strategie nodig voor dijkverhoging om zodoende in de loop der tijd een efficiënt veiligheidsniveau te handhaven. Dit is het probleem waarvoor deze bijlage een oplossing wordt gezocht.

De echte, wiskundige oplossing van het probleem is niet zo eenvoudig. Een dijkverhoging heeft niet twee, maar drie soorten effecten op de totale kosten van schade en investeren van een dijkkring. De eerste twee zijn de bekende componenten van een rendementsberekening: namelijk de investeringskosten en het directe voordeel van schadevermindering. Het derde effect is dat

⁶⁶ We gaan in de hoofdstekst van deze bijlage dus niet in op systeemwerking, dat wil zeggen dat overstroming van de ene dijkkring de overstromingskans van een andere dijkkring verandert. Wel zeggen we daarover kwalitatief het een en ander in paragraaf A.10, met tentatieve conclusies over de dan te gebruiken formules.

⁶⁷ Het probleem van het samenstellen en kiezen van maatregelpakketten wordt in deze bijlage dus niet behandeld, afgezien van enige opmerkingen in paragraaf A.9. Wel mag de investeringskostenfunctie een combinatie zijn van de kostenfuncties van allerlei soorten maatregelen die achtereenvolgens bij stijgende dijkhoogte worden uitgevoerd. Zie daarover paragraaf A.6 en vooral bijlage C.

⁶⁸ Dit is materieel een belangrijke beperking. Door niet te kijken naar andere mogelijke oorzaken van overstroming dan overschrijding van een bepaalde waterhoogte is de overstromingskans van een dijkkring bijvoorbeeld niet afhankelijk van de lengte van de dijk. Analytisch maakt het voor de verdere afleiding vermoedelijk niet veel uit. Wel natuurlijk voor de interpretatie en het feitelijke gebruik van de in de formules voorkomende overstromingskansen. We sluiten met deze vereenvoudiging aan bij de huidige stand van zaken in het project Ruimte voor de Rivier. Het project Veiligheid Nederland in Kaart (VНК) beoogt de stap naar echte overstromingskansen wel te maken. Rekening houden met meer faalmechanismen vereist vermoedelijk Monte Carlo-simulaties van specifiek samengestelde situaties, zie daarvoor paragraaf A.9.

een dijkverhoging invloed heeft op het tijdstip en de omvang van de volgende investering, en daarmee op die van alle toekomstige investeringsbeslissingen. Vanwege dit derde effect moet voor de oplossing gebruik worden gemaakt van het maximum principe bij optimal control.⁶⁹

Een bijzonderheid bij de toepassing van deze wiskunde op dijken is dat de toestandsvariabele dijkhoogte sprongen maakt als gevolg van vaste kosten bij dijkverhoging, zodat een speciaal geval van deze aanpak van toepassing is. De voor dit geval relevante stellingen blijken in 1981 bewezen door Seierstad, vandaar dat we in het navolgende verwijzen naar Seierstad en Sydsaeter (1987), afgekort S&S.⁷⁰ De in hun par. 3.3 behandelde stellingen zijn meer algemeen dan hier wordt gebruikt. Dat geldt bijvoorbeeld voor de specificatie van de investeringskosten, die met name afhankelijk kan zijn van de tijd.

In eerste instantie is de oplossing van een eenvoudig geval afgeleid dat leidt tot een constant schade-interval in de loop der tijd. Dat laatste komt voort uit het veronderstelde gelijk blijven van de investeringskostenfunctie in de loop der tijd. In tweede instantie is een meer algemeen model afgeleid waarin de investeringskosten op een speciale manier afhankelijk zijn gemaakt van de dijkhoogte. Daardoor gaat ook het schade-interval in de loop der tijd stijgen.

Een makkelijk traceerbare oplossing vereist dat er vanaf een zeker moment vaste herhalingen optreden. Dat kan alleen als de berekening plaatsvindt over een oneindige horizon, zodat de tijdshorizon van een investering steeds dezelfde blijft. In paragraaf A.9 wordt ingegaan op situaties die niet direct zijn te passen binnen het hier ontwikkelde model, zoals systeemwerking.

Deze bijlage is zo geschreven dat bij lezing paragraaf A.3 (en A.6) met de toepassing van het maximum principe zonder bezwaar kan worden overgeslagen. Uitgaande van de resultaten in paragraaf A.3 over de vorm van de optimale strategie, die heel plausibel is, worden alle relevante formules in paragraaf A.4 opnieuw afgeleid door differentiëren.

⁶⁹ Met dank aan dr. P. van Gelder (TUD) en collega's op het CPB voor de suggestie om in deze richting de oplossing te gaan zoeken en aan Prof. dr. C. Withagen (VU) voor commentaar op eerdere versies van deze tekst.

⁷⁰ Suggesties voor het begin van de oplossing van het eenvoudige geval (I onafhankelijk van H) heb ik het eerst gevonden in het proefschrift van Kort, 1988, die zelf verwijst naar Feichtinger en Hartle, 1986. Die verwijzen op hun beurt weer naar de meer uitgebreide behandeling in S&S, zodat die referentie hier gehanteerd wordt. Een eerste oplossing van het sprongprobleem is van Vind uit 1967.

A.2 Formulering probleem

Vorbereiding

Overschrijdingskans

Er zijn twee vorbereidende vergelijkingen. De eerste geeft aan hoe de overschrijdingskans per jaar (P) afhangt van de tijd (t) en de dijkhoogte (H). De kans op een extreme waterhoogte (in cm) boven een bepaald niveau wordt beschreven door een exponentiële verdeling met parameter α . De kans op overstromen is dus de kans op een waterstand die hoger is dan die welke correspondeert met de hoogte van de dijken. De relatie tussen waterstand en bijbehorende overschrijdingskans staat onder rivierkundigen bekend als de werklijn.⁷¹

De overstromingskans stijgt in de loop der tijd doordat het water (relatief) met η cm per jaar stijgt. De parameter η geeft de niet-beïnvloedbare veranderingen weer door bijvoorbeeld bodemdaling, klimaatverandering en veranderingen in het watersysteem bovenstrooms. We nemen aan dat door deze veranderingen de vorm van de exponentiële verdeling van de extreme waarden niet verandert – de parameter α blijft dus dezelfde –, maar dat deze verdeling alleen opschuift.⁷² Door de eigenschap van de exponentiële verdeling dat de verdeling boven een bepaald punt (voorwaardelijke verdeling) er precies hetzelfde uitziet als de hele verdeling, blijft de werklijn er hetzelfde uitzien op een verschuivingfactor na. Met behulp van de oude werklijn is daarmee nog steeds de werkelijke overstromingskans P op tijdstip t uit te rekenen:

$$P_t = P_o e^{\alpha \eta t} e^{-\alpha(H_t - H_o)} \quad \text{voor } H_t \geq H_o \quad (\text{A.1})$$

waarin: P_t overstromingskans (= overschrijdingskans waterhoogte) in jaar t
 α werklijnparameter (exponentiële verdeling; 1/cm)
 η structurele stijging relatieve waterstand (cm/jaar)
 H hoogte van de dijk (cm)

⁷¹ Het gaat hier eigenlijk om de combinatie van de werklijn in Lobith (die het verband geeft tussen overschrijdingskans en een bepaalde waterhoeveelheid in m³) en de zgn. Q/H-relatie die per locatie het verband geeft tussen waterhoeveelheid en waterhoogte. Omdat de Q/H-relatie locatiegebonden is, is er eigenlijk per locatie een andere α . Bij de praktische uitwerking wordt daarmee rekening gehouden, zie bijv. bijlage B. Ook bij de berekeningen langs de kust wordt op basis van onderzoek uitgegaan van een exponentiële verdeling van extreme waterstanden, zie Van Dantzig (1956).

⁷² De veronderstelling over vormbehoud is eigenlijk alleen verantwoord als de processen die leiden tot de frequentieverdeling van de waterstand (bijv. storm op zee) andere zijn dan die waardoor de verandering wordt veroorzaakt (bijv. continue tektonische bodemdaling als restant van de ijstijd). Er ontstaat precies hetzelfde model als we de kansverdeling ongewijzigd houden, maar de dijk in een constant tempo relatief laten zakken, zie (A.1). Klimaatverandering kan echter tegelijkertijd zowel de vorm als de ligging van de frequentieverdeling veranderen. Voorlopig laten we deze complicatie buiten beschouwing. Dat is niet erg. Immers, de vergelijking geldt alleen voor kleine overschrijdingskansen (extreme waarden), bijvoorbeeld een promille of kleiner. Als deze overschrijdingskans in de loop der tijd verandert, vinden gelijktijdig in de onderliggende kansverdeling van de waterstanden zodanige wijzigingen plaats in het gebied van de lagere waterstanden dat de onderliggende kansverdeling voor de waterstanden een correcte verdeling blijft.

Het is geen probleem om de waarde van H_t zo in te stellen dat H_0 op nul gesteld kan worden. We meten dan de hoogte in de toekomst ten opzichte van het niveau in de uitgangssituatie. H_0 wordt gemeten ten opzichte van het relevante lokale waterpeil en is overal zo hoog dat er overal langs de dijkkring hetzelfde beschermingsniveau P_0 resulteert. Ook de parameters α en η gelden voor de hele dijkkring (zie echter ook bijlage B).

Schade bij overstromen

De tweede voorbereidende vergelijking geeft aan hoe de schade bij overstromen (potentiële schade, V) afhangt van de tijd (t) en de dijkhoogte (H). De schade bij overstromen (inclusief de kosten van herstel) op tijdstip nul is V_0 en omvat in principe zowel de materiële schade als een waardering voor immateriële schade. Het is niet onrealistisch te verwachten dat de schade bij de meeste overstromingen inderdaad dezelfde omvang zal hebben. Wel is deze schade langs de rivieren afhankelijk van de hoogte van de dijk. Dat komt omdat de bodem van die dijkringen meehelt met het verhang in de rivier. Als een dijkkring doorbreekt, komt het water in de dijkkring even hoog te staan als het laagste punt van de kruin van de dijk boven NAP. Het water staat dan niet op alle plaatsen even hoog boven de grond. Daarnaast is er schade langs het hellend vlak waarover het water naar de diepere delen loopt. Wordt de dijk verhoogd, dan wordt het gebied dat onderloopt groter en de waterstand daar dieper. Uit cijfers van DWW blijkt dat de schade ongeveer exponentieel met de dijkhoogte stijgt bij dijkverhogingen die voorlopig relevant zijn. De schade bij overstromen stijgt verder in de loop der tijd met γ (perunen) per jaar, onder andere door economische groei.⁷³ We wegen een grote schade ineens niet zwaarder dan hetzelfde bedrag maar dan als som van een aantal kleinere schades.⁷⁴ De schade bij overstromen op tijdstip t is dan:

$$V_t = V_0 e^{\gamma t} e^{\zeta(H_t - H_0)} \quad (\text{A.2})$$

waarin: V_t schade bij overstromen op tijdstip t (mln euro)
 γ tempo economische groei (perunen per jaar)
 ζ stijging schade per cm dijkhoogte (1/cm)

Ook bij deze vergelijking kiezen we de waarde van H_t zo dat H_0 op nul gesteld kan worden.

⁷³ Inclusief een eventuele verandering van onze opvattingen over de waardering van schade. Opvattingen doen ter zake onder andere omdat de schade niet alleen materieel is, maar ook immaterieel, maar ook omdat het een onvoorspelbare gebeurtenis betreft voor een grote groep personen tegelijkertijd. Voorbeelden zijn dodelijke slachtoffers, gewonden en de emotionele schade door evacuatie, verlies van persoonlijke bezittingen en verstoring van het leven, ook in de natuur. In de formules zit een eventuele (verwachte) stijging van de vraag naar veiligheid verwerkt in de parameter γ . Bij een herberekening in de toekomst gaat het om de dan actuele waardering van de schade V . Er is dus geen aanpassing nodig van de formules zelf om met waarderingsveranderingen rekening te houden.

⁷⁴ Deze evenredigheid wijkt af van de huidige indicatieve norm voor groepsrisico in Nederland. Daarin wordt het aantal dodelijke slachtoffers in een ongeluk kwadratisch gewaardeerd. Bijvoorbeeld: een groot aantal doden bij een ongeluk wordt 10 keer zo erg gevonden als hetzelfde aantal doden maar dan als gevolg van 10 kleine ongelukken met ieder 1/10e van het aantal doden. In het buitenland hanteert men vaak andere, meer lineaire normen. Zie ook hoofdstuk 5.

Model

Verwachte schade

De combinatie van vergelijkingen (A.1) en (A.2) (met $H_0 = 0$) geeft de verwachte schade per jaar (S):

$$S_t = P_t V_t = S_0 e^{\beta t} e^{-\theta H_t} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{met } \beta = \alpha\eta + \gamma$$

$$\theta = \alpha - \zeta$$

waarin: S verwachte schade op tijdstip t (mln euro)

Formule (A.3) is het uitgangspunt voor de berekening. Dat daaraan (A.1) en (A.2) ten grondslag liggen, doet voor de navolgende afleiding niet terzake.

Wellicht ten overvloede zij erop gewezen, dat er in bovenstaande schadevergelijking weliswaar slechts één soort maatregel als instrument kan dienen, namelijk een verandering van de dijkhoogte H, en bovendien dat we dit instrument aanduiden met ‘dijkverhoging’, maar dat dit instrument in de praktijk geen dijkverhoging hoeft te zijn. (Bijna) alle formules gelden ongewijzigd ook voor waterstandsverlagende maatregelen, op precies dezelfde wijze als de parameter η zowel kan staan voor waterstandsstijging t.o.v. NAP als voor bodemdaling.⁷⁵ Materieel is het dus uitsluitend een kwestie van invulling van de investeringskostenfunctie welke soort maatregel in de beschouwing wordt betrokken.

Stand en verloop toestandsvariabele dijkhoogte

In de loop der tijd wordt op de momenten T_i de dijk verhoogd met u centimeter. Voor de dijkhoogte geldt:⁷⁶

$$H_{T_1}^- = H_0 = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\dot{H}_t = 0 \quad \text{als } t \neq T_i \quad (\text{A.5})$$

$$= H_{T_i}^+ - H_{T_i}^- = u_i > 0 \quad \text{als } t = T_i \quad (\text{A.6})$$

$$H_z \text{ is vrij} \quad (\text{A.7})$$

⁷⁵ De enige uitzondering is het effect van de dijkverhoging op de schade binnen een dijkkring. Die schade is afhankelijk van de mogelijke overstromingshoogte boven het lokale maaiveld.

⁷⁶ Variabelen met een punt boven de letter zijn een afgeleide naar de tijd. Verder noteren we de tijdsindex T_i voor de leesbaarheid meestal als i, als dat geen verwarring geeft.

waarin	H^-	dijkhoogte direct voorafgaand aan dijkverhoging
	H^+	dijkhoogte direct na dijkverhoging
	T_i	tijdstip van de i-de investering
	u	dijkverhoging in cm

Vergelijking (A.5) betekent dat de werking van de dijk in de loop der tijd niet afneemt. Daar de dijkverhoging u_i niet continu is in de tijd, is H_t dat ook niet. H is dus niet differentieerbaar in $t = T_i$. Er is geen vast eindpunt H_z op tijdstip z in de verre toekomst.

Investeringskosten

Voor de investeringskosten I geldt (rekening houdend met (A.4)):

$$I(u_i, H_{T_i}^-) = F(u_i) e^{\lambda(H_{T_i}^- + u_i)} = I_1(u_i) e^{\lambda H_{T_i}^-} \quad \text{als } u_i > 0 \quad (\text{A.8})$$

$$= 0 \quad \text{als } u = 0$$

$$\lim_{u \downarrow 0} F(u) = I_F > 0$$

$$F_u^1 > 0 \quad \text{voor } u > 0$$

$I(u, H)$ is dus constant in de tijd, afhankelijk van H als $\lambda > 0$ en is bovendien continu differentieerbaar in u , voor alle positieve u . I is echter niet continu in $u = 0$, want de rechterlimiet van I (I_F) is groter dan nul, hetgeen betekent dat er vaste kosten zijn.

Definitievergelijkingen tussen variabelen

Uit het bovenstaande, en vooral (A.3), volgen per definitie een aantal verbanden. Het eerste betreft het verband tussen de verwachte schade direct voor en na dijkverhoging:

$$S(H_{T_i}^+) = S(H_{T_i}^-) e^{-\theta u_i} \quad (\text{A.9})$$

Uit (A.3) volgt eveneens per definitie:

$$S_{i+1}^- = S_i^+ e^{\beta(T_{i+1} - T_i)} = S_i^+ e^{\beta D_{i+1}} = S_i^- e^{\beta D_{i+1} - \theta u_i} \quad (\text{A.10})$$

$$\text{met } D_{i+1} = T_{i+1} - T_i \quad (\text{A.11})$$

Criteriumfunctie

Uitgaande van (A.3) en (A.8) is de volgende criteriumfunctie op te schrijven als de contante waarde (K) van alle toekomstige kosten van schade (S) en investeren (I):

$$\min_{U_t} K = \int_0^z S_t e^{-\delta t} dt + \sum_i I_i e^{-\delta T_i} + e^{-\delta z} S_z / \delta \quad (\text{A.12})$$

waarin K contante waarde van alle toekomstige overstromingsschade en investeringen, op tijdstip 0 (mln euro)
 δ discontovoet

De eerste term met de integraal geeft de contante waarde van de verwachte schade tot het tijdstip z . De som van de gediscoteerde investeringsbedragen tot dat moment staat in de tweede term. Aangenomen is dat er na tijdstip z niets meer in het systeem verandert, vandaar dat er dan ook niet meer wordt geïnvesteerd. De derde term geeft dan de verwachting van de schade over de periode van z tot ∞ . We zullen later controleren of vergelijking (A.12) in de oplossing wel leidt tot een eindige waarde voor K .

Samenvattend:

Het gaat in het model van (A.3) tot en met (A.12) om het minimaliseren van (A.12) onder de voorwaarde van de differentievergelijkingen (A.5) en (A.6);

Er is 1 toestandsvariabele: H_t (hoogte van de dijk) met vast begin nul;

Er is 1 instrumentvariabele: u_i (dijkverhoging), niet negatief;

Er zijn 2 functies met gegeven parameterwaarden:

- I_t (investeringskostenfunctie) onafhankelijk van t maar afhankelijk van H . Naast de eis dat I monotoon stijgend is in u , moet aan meer voorwaarden zijn voldaan, wil er een normaal minimum zijn. Voorlopig veronderstellen we dat F convex (of lineair) is in u voor $u > 0$, maar komen daar in paragraaf A.6 Voldoende voorwaarden op terug.

Gezien $I_F > 0$ is te verwachten dat u_i discontinu is.

- S_t (verwachte schade functie) met parameters S_0, β, θ

Er is een eindconditie die de verwachting geeft van de overstromingsschade aan het einde van de planperiode, ervan uitgaande dat er na het einde van de planperiode geen systeemwijzigingen meer optreden. Als dat het geval is, hoeft er ook niet meer geïnvesteerd te worden.

A.3 Noodzakelijke voorwaarden voor een optimum

Lezers met een beperkt tijdbudget of zonder kennis van het maximum principe kunnen deze paragraaf overslaan en doorgaan met paragraaf A.4. Daarin wordt alleen de hoofdkarakteristiek van de oplossing uit paragraaf A.3 gebruikt.

A.3.1 Toepassing Maximum Principe

Toepassen van het Maximum Principe houdt in dat het bovenstaande probleem (A.12) met de daarbij behorende specificaties wordt omgezet in een ander probleem.⁷⁷ Dat is het vinden van de verzameling van combinaties u_i en T_i die de twee onderstaande Hamiltonian functies minimaliseert terwijl tevens voldaan is aan de daarna volgende noodzakelijke voorwaarden.⁷⁸ Of de zo gevonden verzameling ook een minimum bevat, gaan we na in paragraaf A.6.

Hamiltonians

Uit het feit dat er geen gegeven eindpunt is, zie (A.7), volgt dat voor de eerste toegevoegde variabele geldt: $\psi_0 = 1$, zodat het een normaal probleem is. Daar er slechts één stuurvariabele is, is er slechts één resterende toegevoegde variabele ψ . Daardoor kunnen we de tijd of een sprong aangeven met een subscript.

Op niet-sprongpunten geldt:

$$Ham = S_t e^{-\delta t} \quad (A.13)$$

Op sprongpunten T_i geldt:

$$IHam = + I_i e^{-\delta T_i} + \psi_i^+ u_i \quad (A.14)$$

waarin: ψ toegevoegde variabele

ψ Kan worden geïnterpreteerd als de marginale opbrengst van een extra hoeveelheid dijk in de beginsituatie (dus een iets grotere H_0^-) op de totale kosten over de hele toekomst.

⁷⁷ Waar bij de afleiding wel op moet worden gelet, is dat (A.12) het minimum is van een functie, terwijl alle theorieboeken de formules geven voor een maximalisatie (van nut of vermogen). Ten opzichte daarvan moeten dus hier en daar tekens worden omgedraaid. Zodoende is een positief effect hier een nadeel en een negatief effect een voordeel omdat dit laatste de kosten vermindert. De toegevoegde variabele ψ wisselt vanzelf met S en I van teken. Op dit punt moet juist geen aanpassing plaatsvinden.

⁷⁸ De correspondentie tussen de genummerde vergelijkingen in S & S en de vergelijkingen hier is als volgt: (63) = (A.6); (64) = (A.5); (65) = (A.4); (66c) = (A.7); (68) = (A.12); (69) en (72) = tekst boven (A.13); (70) = (A.13); (71) = (A.15); (73c) = (A.17); (74) = (A.19); (75) = (A.20); (76) komt niet voor; (77) = (A.18).

Noodzakelijke voorwaarden

Toepassing van de lijst met noodzakelijke voorwaarden op het boven gedefinieerde model levert de volgende noodzakelijke voorwaarden:

Op niet-sprongpunten moet gelden:

$$\frac{\partial}{\partial H} S_t e^{-\delta t} = -\dot{\psi}_t \quad (\text{A.15})$$

$$\psi_z = \frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{1}{\delta} S_z e^{-\delta z} \right) \quad (\text{A.16})$$

$$\psi_z = 0 \quad (\text{A.17})$$

Op alle sprongpunten i moet gelden⁷⁹:

$$\begin{aligned} & \leq 0 \quad \text{als } T_i = 0 \\ \left(S(H_{T_i}^+) - S(H_{T_i}^-) \right) e^{-\delta T_i} + \delta I_i e^{-\delta T_i} & = 0 \quad \text{als } T_i \in (0, z) \\ & \geq 0 \quad \text{als } T_i = z \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

$$\psi_i^+ - \psi_i^- = -\lambda I_i e^{-\delta T_i} \quad (\text{A.19})$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial u} I_i e^{-\delta T_i} + \psi_i^+ \right\} (u - u_i) \leq 0 \quad \text{voor } u \geq 0 \quad (\text{A.20})$$

A.3.2 Uitwerking noodzakelijke voorwaarden

Ondergrens veiligheidsinterval

Uitwerking van (A.18) geeft de eerste grens van het veiligheidsinterval

$$\begin{aligned} & \leq 0 \quad \text{als } T_i = 0 \\ S(H_{T_i}^+) - S(H_{T_i}^-) + \delta I_i & = 0 \quad \text{als } T_i \in (0, z) \\ & \geq 0 \quad \text{als } T_i = z \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Hier staat het bekende rendementscriterium: First Year Rate of Return is nul. Dit bepaalt het tijdstip van opnieuw investeren. De opbrengst op het moment van investeren moet dan gelijk zijn aan de rentekosten van de investering (inclusief onderhoudskosten).

Invulling van (A.9) in (A.21) geeft voor $T_i > 0$:⁸⁰

$$S(H_{T_i}^-) = \frac{\delta I_i}{(1 - e^{-\theta u_i})} = \frac{\delta I_1(u_i) e^{\lambda H_{T_i}^-}}{(1 - e^{-\theta u_i})} \quad (\text{A.22})$$

⁷⁹ In (A.18) zijn de ongelijkheidstekens omgedraaid ten opzichte van de tekst in S&S, omdat het hier gaat om een minimalisatie.

⁸⁰ Zie voor $t = 0$ paragraaf 4.4.

Constante periodieke dijkverhoging voldoet aan de noodzakelijke voorwaarden

We laten nu zien dat de volgende oplossing voldoet aan de bovenstaande afgeleide noodzakelijke voorwaarde (A.22) en de later af te leiden noodzakelijke voorwaarde (A.33) en daarmee mogelijk de oplossing van het probleem is. De kern van de oplossing is:

$$u_i = u \quad \text{voor alle } i \text{ met } T_i > 0 \quad (\text{A.23})$$

Invulling van (A.23) in het rechterlid van (A.22) laat zien dat de ondergrens van het schade-interval evenredig is met de investeringskosten en via (A.9) geldt hetzelfde voor de andere grens voor alle i met $T_i > 0$.

$$S(H_{T_i}^-) = s^- e^{\lambda H_{T_i}^-} = S(H_{T_{i-1}}^-) e^{\lambda u} \quad (\text{A.24})$$

$$S(H_{T_i}^+) = s^+ e^{\lambda H_{T_i}^+} \quad (\text{A.25})$$

Invulling van deze variabelen in (A.10) geeft:

$$\lambda u = \beta D_{i+1} - \theta u$$

Daaruit volgt

$$\beta D = (\theta + \lambda) u \quad (\text{A.26})$$

Invullen van (A.23) in (A.22) is dus mogelijk en leidt dan tot een schade-interval $(s^- e^{\lambda H_{T_i}^-}, s^+ e^{\lambda H_{T_i}^+})$ met constante periodieke dijkverhoging u met constante tussenpozen D .

Bovengrens veiligheidsinterval

Door invulling van $u = 0$ en $u = 2u_i$ in (A.20) volgt:

$$+I_i^1 e^{-\delta T_i} + \psi_i^+ = 0 \quad (\text{A.27})$$

Uit (A.16) en (A.17) volgt:

$$\psi_z = \frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{1}{\delta} S_z e^{-\delta z} \right) = 0 \quad (\text{A.28})$$

Daar $\frac{\partial}{\partial H} S_z = -\theta S_z \neq 0$ kan (A.28) alleen gelden als $z \rightarrow \infty$ en geldt

$$\lim_{z \rightarrow \infty} S_z e^{-\delta z} = 0$$

Dit vereist dat S_z eindig is. Voorlopig nemen we dat laatste aan en gaan uit van $z = \infty$.

Integratie van (A.15) en gebruik van het resultaat van (A.28) geeft:

$$\psi_t (\text{continu}) = \int_t^\infty \frac{\partial}{\partial H} S_\tau e^{-\delta\tau} d\tau \quad (\text{A.29})$$

Uit sommatie van (A.19) volgt

$$\psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) = \sum_{j=1}^\infty \lambda I_{i+j} e^{-\delta T_{i+j}} \quad (\text{A.30})$$

Invulling van (A.29) en (A.30) in (A.27) geeft:

$$\begin{aligned} -I_i^1 e^{-\delta T_i} &= \int_{T_i}^\infty \frac{\partial}{\partial H} S_\tau e^{-\delta\tau} d\tau + \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) \\ I_i^1 &= \int_{T_i}^\infty -\frac{\partial}{\partial H} S_\tau e^{-\delta(\tau-T_i)} d\tau - \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) e^{\delta T_i} \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

Hier staat dat de marginale kosten van de verbetering gelijk moeten zijn aan de marginale opbrengsten van de verbetering over de gehele verdere toekomst verminderd met de door die verbetering veroorzaakte kostenstijging in de toekomst. Met andere woorden: de netto contante waarde van die verbetering moet dus nul zijn.

Met gebruik van (A.3) volgt:

$$\frac{\partial S_\tau}{\partial H} = -\theta S_\tau = -\theta S_{T_i}^+ e^{-\theta(H_\tau - H_{T_i}^+)} e^{\beta(\tau-T_i)} = -\theta S_{T_{i+j}}^+ e^{\beta(\tau-T_{i+j})} \quad (\text{A.32})$$

waarbij de rechterzijde geldt voor $T_{i+j} \leq \tau < T_{i+j+1}$

Tweemaal invulling van (A.32) in (A.31) geeft:

$$\begin{aligned} I_i^1 &= \int_{T_i}^\infty \theta S_{T_i}^+ e^{-\theta(H_\tau - H_{T_i}^+)} e^{(\beta-\delta)(\tau-T_i)} d\tau - \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) e^{\delta T_i} \\ &= \theta \sum_{j=0}^\infty e^{-\delta(T_{i+j}-T_i)} \int_{T_{i+j}}^{T_{i+j+1}} S_{T_{i+j}}^+ e^{(\beta-\delta)(\tau-T_{i+j})} d\tau - \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) e^{\delta T_i} \\ &= \theta \sum_{j=0}^\infty e^{-\delta(T_{i+j}-T_i)} S_{T_{i+j}}^+ \frac{1}{\beta-\delta} \left(e^{(\beta-\delta)(T_{i+j+1}-T_{i+j})} - 1 \right) - \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) e^{\delta T_i} \\ &= \frac{\theta}{\delta-\beta} \sum_{j=0}^\infty e^{-\delta(T_{i+j}-T_i)} S_{T_{i+j}}^+ \left(1 - e^{-(\delta-\beta)D_{i+j+1}} \right) - \psi_{T_i}^+ (\text{sprong}) e^{\delta T_i} \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

Tot zover de combinatie van (A.15), (A.16), (A.17), (A.19) en (A.20).

Invulling van (A.23) tot en met (A.26) in (A.33) en deling van beide zijden door $e^{\lambda H_{T_i}^-}$ geeft:

$$I_1^1(u) = \frac{\theta}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta)D}\right) S^+ \sum_{j=0}^{\infty} e^{-\delta jD} e^{\lambda ju} - \lambda e^{\lambda u - \delta D} \sum_{j=0}^{\infty} I_1 e^{\lambda ju} e^{-\delta jD} \quad (\text{A.34})$$

Bij een constante u is het linkerlid van (A.34), de afgeleide van de investeringskosten, constant en dus moet ook het rechterlid constant zijn. Dat is het geval omdat de sommatie tot ∞ loopt. In dat geval neemt de opbrengst van eenzelfde investering u iedere keer niet af omdat de resterende levensduur steeds hetzelfde blijft. Uit (A.34) volgt:

$$I_1^1(u) = \left\{ \frac{\theta}{\delta - \beta} S^+ \left(1 - e^{-(\delta - \beta)D}\right) - \lambda e^{\lambda u - \delta D} I_1 \right\} \left(1 - e^{\lambda u - \delta D}\right)^{-1} \quad (\text{A.35})$$

of:

$$S^+ = \frac{\delta - \beta}{\theta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta)D}\right)^{-1} \left\{ I_1^1 \left(1 - e^{\lambda u - \delta D}\right) + \lambda e^{\lambda u - \delta D} I_1 \right\} \quad (\text{A.36})$$

Dit kan alleen als geldt:

$$e^{\lambda u - \delta D} < 1 \quad \text{dus:} \quad \lambda u - \delta D < 0$$

Invulling van (A.26) geeft:

$$\lambda(\beta - \delta) - \delta\theta < 0$$

Dit is altijd het geval als $\lambda = 0$ of $\delta \geq \beta$. Als $\beta > \delta$ moet gelden:

$$\lambda < \frac{\delta\theta}{\beta - \delta} \quad \text{als } \beta > \delta \quad (\text{A.37})$$

A.3.3 Controle en conclusie

In (A.28) de tijdshorizon uitstreken tot oneindig mag niet zonder te controleren of het oorspronkelijke model (A.12) dan nog wel geldt.

Als $\lambda = 0$ is dat altijd het geval, daar na een aanloopperiode altijd geldt

$$S_t(H) \leq s^- \quad \text{voor } t > T_1$$

Door het investeren blijft de verwachte schade eindig en is voldaan aan (A.28). Voor de convergentie van de integraal in (A.12) is het dus *niet* nodig om te eisen $\delta > \beta$.⁸¹ Ook $I(u)$ is in dat geval constant en eindig, en daarmee is ook die som convergent.

Als $\lambda > 0$, is voldoen aan (A.37) nodig en voldoende om convergentie van (A.12) te verzekeren.

Concluderend zijn er vier variabelen: de twee grenzen van het schade-interval, de omvang van de dijkverhoging u en het tijdsverloop tussen twee investeringen D . Deze vier variabelen worden bepaald door twee definitievergelijkingen (A.9) en (A.26) en twee optimaliteitsvoorwaarden (A.22) en (A.36). Uit dit stelsel van vergelijkingen kunnen in het algemeen de vier variabelen worden opgelost. Daarmee is het probleem in principe opgelost, mits voldaan is aan (A.37).

A.4 Uitrekenen van de kostenfunctie

A.4.1 Hoofduitkomst paragraaf 3

De basisoplossing van paragraaf A.3 is dat het optimaal is om bij investeringskosten die toenemen met de hoogte van de dijk, – in ieder geval na enige tijd – over te gaan op een stijgend schade-interval $(s^- e^{\lambda H_{\bar{T}_i}}, s^+ e^{\lambda H_{\bar{T}_i}})$ met constante periodieke dijkverhoging u met constante tussenpozen D . Meer dan dit basisresultaat is niet nodig om de kostenfunctie (A.12) in te vullen en uit te rekenen. Daarna kunnen we door partieel differentiëren naar de twee beslissingen: “Wanneer voor het eerst investeren?” en: “Hoeveel investeren?” controleren of daaruit dezelfde twee noodzakelijke voorwaarden voor een optimum volgen als in paragraaf A.3 zijn gevonden, namelijk (A.21) en (A.35). Dit geeft in ieder geval een gedeeltelijke controle op de juistheid van die resultaten.

A.4.2 Totale kosten bij niet onmiddellijk investeren

Kosten tijdens herhaalperioden

We voeren de invulling en berekening van (A.12) in stappen uit en beginnen met de contante waarde van de verwachte schade tijdens een herhaalperiode, gerekend direct na het moment van investeren.

⁸¹ Ook $\beta = \delta$ geeft geen probleem, zie paragraaf A.4.

$$\begin{aligned}
W_{T_i} &= \int_0^D S_{T_i}^+ e^{\beta t} e^{-\delta t} dt \\
&= S_{T_i}^+ \int_0^D e^{(\beta-\delta)t} dt
\end{aligned} \tag{A.38}$$

$$\begin{aligned}
&= S_{T_i}^+ \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta-\beta)D} \right) = S_{T_i}^+ B \\
\text{met } B &= \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta-\beta)D} \right)
\end{aligned} \tag{A.39}$$

waarin: W contante waarde van de verwachte overstromingsschade S over periode D
aan het begin van die periode, mln euro

B is altijd positief, ongeacht of $\delta > \beta$ of omgekeerd. Dat komt omdat teller en noemer altijd hetzelfde teken hebben. Als β toevallig gelijk zou zijn aan δ , geldt $B = D$. W bestaat dus gewoon in dat punt en is differentieerbaar naar D in een omgeving van dat punt. We hoeven met het geval $\beta = \delta$ in het navolgende dus niet apart rekening te houden.

Formule (A.38) geldt op ieder begintijdstip T_i met de daarvoor geldende waarde van $S_{T_i}^+$. Direct na de eerste (herhaal)investering is dat S^+ .

Aan het begin van de eerste herhaalperiode is de standaardhoeveelheid u geïnvesteerd. De contante waarde van de totale kosten over de eerste herhaalperiode zijn aan het begin van die periode dan:

$$K_{periode} = S^+ B + I(u) \tag{A.40}$$

Bij iedere volgende periode zijn zowel de schadekosten als de investeringskosten (zie (A.8)) een factor $\exp(\lambda u)$ hoger dan in de vorige periode. Verder liggen deze kosten een periode D verder in de toekomst, zodat de contante waarde daarvan $\exp(\delta D)$ kleiner is dan die van de vorige periode. De contante waarde van de totale kosten over de herhaalperioden is dan de som van een oneindige meetkundige reeks. De uitkomst is aan het begin van de eerste herhaalperiode:

$$K_{hulp} = \left(S^+ B + I(u) \right) \left(1 - e^{\lambda u - \delta D} \right)^{-1} \tag{A.41}$$

Dit kan alleen als geldt:

$$e^{\lambda u - \delta D} < 1 \quad \text{dus:} \quad \lambda u - \delta D < 0$$

Invulling van (A.26) geeft:

$$\lambda(\beta - \delta) - \delta\theta < 0$$

Dit is altijd het geval als $\lambda = 0$ of $\delta \geq \beta$. Als $\beta > \delta$ moet gelden:

$$\lambda < \frac{\delta\theta}{\beta - \delta} \quad \text{als } \beta > \delta \quad (\text{A.42})$$

Hoe harder de verwachte schade gediscoteerd groeit, $(\beta - \delta)$ is groot, hoe meer de dijken verhoogd moeten worden en hoe problematischer het is als dan ook de investeringskosten in de loop der tijd (hard) groeien. Als dat laatste niet het geval is ($\lambda = 0$), is er bij (A.41) nooit een probleem, daar de reden van de meetkundige reeks dan altijd kleiner is dan 1.

Aanlooperperiode

In het hier onderzochte geval dat er niet onmiddellijk geïnvesteerd hoeft te worden, kan het tijdstip van eerste investering $T_1 > 0$ optimaal gekozen worden. De eerste investering is dan tevens het begin van de herhaalperioden. De contante waarde van de verwachte schade tot het moment van investeren is dan volgens (A.38):

$$W_o = S_o \frac{1}{\delta - \beta} (1 - e^{-(\delta - \beta)T_1}) \quad (\text{A.43})$$

De contante waarde van de totale kosten wordt dan:

$$K = S_o \frac{1}{\delta - \beta} (1 - e^{-(\delta - \beta)T_1}) + e^{-\delta T_1} Khulp \quad \text{voor } S_o < s^- \quad (\text{A.44})$$

Daarbij volgt T_1 uit de definities:

$$S_{T_1}^- = S_o e^{\beta T_1} = s^-$$

$$T_1 = \frac{1}{\beta} \ln(s^- / S_o) \quad \text{voor } S_o < s^- \quad (\text{A.45})$$

A.4.3 Controles

Op het moment dat we de veiligheidssituatie evalueren, kan blijken dat we ons in een slechte situatie bevinden met een verwachte schade S_o die groter is dan de maximaal verantwoord geachte schade s^- . In dat geval moeten we onmiddellijk investeren en is er dus geen keuze meer

ten aanzien van het (eerste) tijdstip van investeren. In de andere situatie, waarin geldt $S_0 < s^-$, is die keuzemogelijkheid er wel. Daarom is dat een meer algemeen geval.

De combinatie (A.44) en (A.45) beschrijft het algemene geval. Daarvoor kunnen we dus de controle uitvoeren. Uit het antwoord op de eerste vraag: “Wanneer voor het eerst investeren?”, dat wil zeggen het tijdstip T_1 , volgt tevens de omvang van s^- , zie (A.45). Uit het antwoord op de tweede vraag: “Hoeveel investeren?”, dat wil zeggen u , volgen tevens de omvang van S^+ en van D , zie (A.9) en (A.26).

Uit partiële differentiatie van (A.44) naar T_1 bij constante u en rekening houdend met (A.45) volgt zonder meer (A.21). Dit betekent dat deze relatie blijft gelden als we u om welke reden dan ook zouden prikken of begrenzen.

$$S(H_{T_1}^+) - S(H_{T_1}^-) + \delta I_1 = 0 \quad \text{voor } T_1 > 0$$

Hier staat het bekende rendementscriterium: First Year Rate of Return is nul. Dit bepaalt het tijdstip van opnieuw investeren. De opbrengst op het moment van investeren moet dan gelijk zijn aan de jaarkosten (rente) van de investering (inclusief onderhoudskosten).

Partiële differentiatie van (A.44) naar u bij constante T_1 en s^- komt neer op partiële differentiatie van (A.41) naar u . Het resultaat is (bij $\lambda = 0$):⁸²

$$I_u^1 = \frac{\theta}{\delta - \beta} S^+ + \frac{\theta}{\beta} \delta e^{-\delta D} \left(\frac{-1}{\delta - \beta} s^- + K_{hulp} \right) \quad (\text{A.46})$$

Dit resultaat is niet zonder meer hetzelfde als (A.35).⁸³ Maar als we in (A.46) de andere voorwaarde (A.21) invullen, dan volgt hetzelfde resultaat als (A.35). Deze laatste voorwaarde geldt dus alleen in het echte optimum. Hij geldt niet als we het tijdstip van investeren dan wel de omvang van s^- zouden prikken. We komen hierop terug in paragraaf A.5.

A.4.4 Totale kosten bij onmiddellijk investeren

Als $S_0 \geq s^-$, is er meestal een achterstand ontstaan die moet worden ingelopen. Omdat de marginale kosten van investeren volgens (A.8) niet constant zijn, is het dan niet meer zo dat met de eerste verhoging X het niveau S^+ wordt bereikt. Over het algemeen zal het optimale niveau de eerste keer iets lager liggen.⁸⁴ Dat betekent ook dat de tijdsperiode D_2 tot de tweede investering iets korter wordt dan de standaardperiode D .

⁸² Een equivalent van (A.46) met $\lambda > 0$ staat in (A.52).

⁸³ De rechterzijde van (A.46) toont de drie componenten van de baten van een hoeveelheidsverandering in figuur 2.1 in het rapport.

⁸⁴ Het omgekeerde geldt wanneer er direct geïnvesteerd moet worden als $s^- > S_0 > s_{norm,t}^-$. Zie daarvoor paragraaf A.5.

Door de dijkverhoging met X cm wordt het lage schadeniveau S_o^+ bereikt.⁸⁵ De omvang van X volgt uit (A.3):

$$S_o^+ = S_o e^{-\theta X}$$

$$X = \frac{1}{\theta} \ln \left(S_o / S_o^+ \right) = \frac{1}{\theta + \lambda} \ln \left(S_o / \left(S_o^+ e^{-\lambda X} \right) \right) \quad \text{voor } S_o \geq s^- \quad (\text{A.47})$$

De lengte van het volgende tijdsinterval D_2 volgt uit:

$$S_o^+ e^{\beta D_2} = s^- e^{\lambda X}$$

$$D_2 = \frac{1}{\beta} \ln \left(s^- / \left(S_o^+ e^{-\lambda X} \right) \right) \quad \text{voor } S_o \geq s^- \quad (\text{A.48})$$

Dit levert alleen het goede antwoord als geldt:

$$S_o^+ e^{-\lambda X} < s^- \quad (\text{A.49})$$

In het navolgende gaan we er vanuit dat dit het geval is.⁸⁶

De contante waarde van de schadekosten over de periode na de eerste investering wordt dan:

$$W_1 = S_o^+ \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta) D_2} \right) \quad (\text{A.50})$$

De totale kosten worden dan:

$$K = I(X) + S_o^+ \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta) D_2} \right) + e^{\lambda X - \delta D_2} K_{hulp} \quad \text{voor } S_o \geq s^- \quad (\text{A.51})$$

Uit partiële differentiatie van (A.51) naar X , rekening houdend met (A.47) en (A.48), volgt de waarde voor S_o^+ :

$$S_o^+ e^{-\lambda X} = \frac{(\delta - \beta)}{\theta} (F'(X) + \lambda F(X)) + \frac{\lambda(\delta - \beta) + \theta \delta}{\theta \beta} \left(s^- - (\delta - \beta) K_{hulp} \right) e^{-\delta D_2} \quad (\text{A.52})$$

Als in (A.52) $\lambda = 0$ wordt ingevuld, verschijnt een equivalent van (A.46).⁸⁷

⁸⁵ Merk op dat nog gecontroleerd moet worden of inderdaad de speciale versie van (A.21) geldt met $T_1 = 0$. Aangezien de schadeverwachting S strikt convex is in H , waardoor $X \geq u$, en het laatste stuk van X rendabel is, is altijd aan voorwaarde (A.21) voldaan.

⁸⁶ Als dat niet zo is, zijn er blijkbaar meer stappen nodig om met minimale kosten in het goede interval te komen. Er is dan extra informatie nodig, bijvoorbeeld over de minimale tijd tussen twee investeringen, om de goede oplossing te vinden.

A.4.5 Algemene formulering totale kosten

Het is voor sommige bewerkingen (o.a. gevallen behandeld in paragraaf A.5 en A.9) handig om beide kostenvergelijkingen samen te voegen. Dit geeft de volgende algemene formulering, die we kunnen vinden door (A.51) als het ware ‘in te vullen’ in (A.44):

$$K = S_o \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta)T_1} \right) + e^{-\delta T_1} \left(I(X) + S_o^+ \frac{1}{\delta - \beta} \left(1 - e^{-(\delta - \beta)D_2} \right) \right) + e^{\lambda X - \delta(T_1 + D_2)} K_{hulp} \quad (\text{A.53})$$

Als $S_o < s^-$, dan volgt T_1 uit (4.8) en geldt: $X = u$, $S_o^+ = S^+$ en $D_2 = D$.

In het andere geval geldt $T_1 = 0$ en volgen X , S_o^+ en D_2 uit (A.47), (A.48) en (A.52).

(A.53) is de formule die in het rapport is gebruikt bij systeemwerking, zij het dat daarbij de vereenvoudigingen $\lambda = 0$ en $S_o^+ = S^+$ zijn toegepast, zie de voetnoot bij (A.52).

In een dynamische berekening wordt steeds opnieuw gekeken naar de eerstvolgende investering. In zo'n geval is de dijkhoogte vlak voor de nieuwe beslissing niet meer gelijk aan nul (en voldoet dus niet meer aan (A.4)), maar is deze positief geworden. In dat geval moeten alle formules in paragraaf A.4.4 en A.4.5 worden bijgesteld met $\exp(\lambda H_{T_1}^-)$, zie paragraaf A.4.1.

A.5 Optimale strategie in combinatie met bijvoorwaarden

A.5.1 Bijvoorwaarden over het tijdstip: normen

In het voorgaande stuk is gezocht naar de optimale oplossing zonder dat daaraan beperkingen zijn opgelegd. Het is echter mogelijk dat dit wel moet gebeuren. Er staat namelijk voor iedere dijkkring een veiligheidsnorm in de Wet op de Waterkering in de vorm van een maximale overschrijdingskans. Deze norm leidt in combinatie met een in de loop der tijd stijgende schade bij overstromen (V_t) tot een stijgende ondergrens voor het schade-interval. De wettelijke norm is binnen het kader van de optimale oplossing alleen van belang zolang geldt dat de uit de wettelijke kans volgende normschade kleiner is dan de ondergrens van het optimale schade-interval dus als:

$$p_{norm}^- V_t = s_{norm,t}^- < s_t^- \quad (\text{A.54})$$

In het algemeen is het lastig om een dergelijke norm te combineren met het boven afgeleide model. Opleggen van een grens betekent wiskundig dat een van de optimaliteitsvoorwaarden wordt vervangen door de grens. In bovengenoemd geval is dat (A.21) of (A.22). Die vervallen voorwaarde mag dan nergens in de afleiding worden gebruikt. Een voorbeeld is het gebruik van

⁸⁷ Een bijzonder geval is als $F(u)$ een constante is. Dan geldt $D_2 = D$, terwijl X volgt uit (A.47). Een ander bijzonder geval is als $I(u, H) = F(u)$ en F lineair is. In dat geval geldt: $S_o^+ = S^+$, $D_2 = D$, terwijl X volgt uit (A.47).

In de praktijk blijkt (A.52) soms moeilijk oplosbaar. In dat geval is $D_2 = D$ soms een goede benadering.

(A.21) in de afleiding van (A.35) en daarmee in de kosten, zie de toelichting bij (A.46). Gezien de problemen om een niet in de tijd constante voorwaarde in het model te verwerken, gaan we daar hier niet verder op in. Dat hoeft ook niet, want in de praktijk ligt de situatie eenvoudiger.

Door de forse bijstelling van de toetspeilen (overschrijdingskansen) in 2001 zal er voor veel dijkringen een achterstand in veiligheid zijn ontstaan, of we nu uitgaan van de wettelijke norm dan wel uitgaan van de optimale strategie. Gegeven de noodzaak van onmiddellijk investeren is het dan optimaal om dat te doen volgens de strategie aangegeven onder (A.52). De stijging is dan zo groot dat aangenomen mag worden dat op het volgende optimale investeringsmoment de wettelijke norm niet meer relevant is wegens de groei van de verwachte schade. Dat laatste geldt vaak ook voor de dijkringen waar volgens de optimale strategie niet onmiddellijk geïnvesteerd moet worden, maar volgens de wettelijke norm wel. Conclusie is dat in alle normale gevallen de huidige wettelijke norm hoogstens de eerste keer relevant is, maar daarna nooit meer. Dit betekent dat we het model niet essentieel aan hoeven passen. We hoeven alleen het criterium voor het eerste moment van investeren aan te passen.

Het moment van investeren T_1 is dan het eerste waarvoor geldt:

$$S_t \geq \min(s_{norm,t}^-, s^-) \quad (A.55)$$

In dat punt kan (A.52) worden gebruikt. Het resultaat kan worden ingevuld in (A.53).

A.5.2 Bijvoorwaarden over de hoeveelheid

Het is mogelijk dat de dijkverhoging u (of X) wegens stabiliteitsredenen een maximum heeft dat lager is dan volgt uit de optimale strategie. In dat geval vervalt vergelijking (A.35), maar blijft voorwaarde (A.21) ongewijzigd.

Een meer voorkomend geval is dat – om welke reden dan ook – al van te voren vaststaat wat de inhoud van een mogelijke actie is. Een voorbeeld is het opheffen van een ‘zwak punt’ in de verdediging tegen het water dat tijdens het onderzoek ‘Veiligheid Nederland in Kaart’ naar voren komt. Dat kan bijvoorbeeld zijn: ‘het op orde brengen van het vulmateriaal voor een coupure’. Daarvan is de investeringsomvang en de veiligheidswinst gegeven. Een ander voorbeeld is het project Ruimte voor de Rivier, waarbij het te bereiken veiligheidsniveau is gegeven. In al deze gevallen blijft vergelijking (A.21) gelden. Dit betekent dat op het moment van investeren de opbrengst dan minstens zo groot moet zijn als de jaarkosten (rente) van de investering (inclusief onderhoudskosten). Deze formule wordt dan ook in hoofdstuk 7 van het rapport gebruikt om de grens aan te geven voor rendabele investeringen in het kader van het project Ruimte voor de Rivier (zie ook paragraaf A.8.3).

A.6 Voldoende voorwaarden

A.6.1 Theorie

Een oplossing die aan de noodzakelijke voorwaarden voldoet, is niet automatisch het minimum dat we zoeken. Om een maximum te zijn, is het volgens S&S hoofdstuk 3, stelling 8 (p 198) voldoende als beide Hamiltonians concaaf zijn. Daar dit probleem is geformuleerd als kostenminimalisatie, is het hier dus voldoende als beide convex zijn.

De eerste voldoende voorwaarde is dat de volgende Hamiltonian in het optimum voor iedere t convex is in H :

$$Ham = S_t e^{-\delta t} \quad (A.56)$$

Dit is zo, want S is volgens (A.3) een dalende exponentiële functie van H en dus strikt convex. Samen met convexiteit voor de Impulse-Hamiltonian garandeert dat ook dat het minimum uniek is.

De tweede voldoende voorwaarde is dat de onderstaande Hamiltonian voor iedere t convex is in H en u :

$$IHam = + I_i e^{-\delta T_i} + \psi_{T_i} u_i \quad (A.57)$$

Als $\lambda > 0$, is I een stijgende exponentiële functie van H en dus strikt convex. Als $\lambda = 0$ komt H in (A.57) niet voor en is automatisch aan deze voorwaarde voldaan.

Voor u is het ingewikkelder. Daar ψ in (A.57) beschouwd moet worden als een onafhankelijke variabele, is (A.57) dan en slechts dan convex in u , als I convex is in u . Convexiteit van I (waaronder ook lineariteit) is dus voldoende voorwaarde voor de conclusie dat de eerder gevonden oplossing een absoluut minimum is. Daarbij is het geen probleem dat I alleen convex kan zijn voor $u > 0$ wegens de combinatie

$$\begin{aligned} I_i = I(u_i) > I_F & \quad \text{als } u_i > 0 \\ & = 0 \quad \text{als } u = 0 \end{aligned} \quad (A.58)$$

Het is echter niet zo, dat uitsluitend als (A.8) convex is, de eerder gevonden oplossing een minimum is. Wel zijn er grenzen aan de vorm van de investeringsfunctie, wil er een duidelijk minimum zijn. Dit blijkt uit (A.35). Als zou gelden dat

$$\lim_{u \rightarrow \infty} I^1(u) = 0 \quad (A.59)$$

dan is duidelijk dat er in (A.35) geen eindige waarde voor u kan worden gevonden. Een minimumeis aan de investeringsfunctie voor het vinden van een minimum is dus dat

$$I^1(u) > c > 0 \quad \text{voor } u > 0 \quad (\text{A.60})$$

Dit sluit concaviteit van de investeringsfunctie niet uit, maar stelt daar wel grenzen aan.

A.6.2 Vorm van de investeringskostenfuncties bij Ruimte voor de Rivier

De in juni 2003 bekende investeringskostenfuncties voor de diverse dijkvakken langs de bovenrivieren hadden een sterk concaaf verloop. Er ontstaan dan bij de oplossing problemen omdat daarbij niet is voldaan aan voorwaarde (A.60). Praktisch komt dit omdat de toen bekende informatie te ver werd geëxtrapoleerd. Volgens deskundigen moet de investeringskostenfunctie echter over een groot traject lineair tot licht convex (stijgende variabele kosten) zijn. Het betekent simpel dat meer veiligheid ook altijd merkbaar meer moet kosten.

Eind november 2003 is daarom aan een combinatie van ingenieurbureaus gevraagd om voor drie dijkringen aan te geven wat de investeringskosten zijn als de toetspeilen steeds 25 cm hoger komen te liggen. De ingenieurs blijken voor iedere soort constructie te rekenen met een lineaire kostenfunctie, maar stappen bij grotere dijkhoogten over op moeilijker constructies. Deze constructies hebben zowel hogere vaste als hogere variabele kosten dan de eenvoudiger constructies.

Om aan te sluiten bij deze nieuwe empirische informatie is het model ontwikkeld met investeringskosten die toenemen naarmate de hoogte van de dijk toeneemt (zie (A.8)). We schatten de parameters van de investeringskostenfuncties daarom uit

$$I(u_1, H_{T_1}^-) = F(u) e^{\lambda u} \quad (\text{A.61})$$

waarbij we voor $F(u)$ een lineaire functie gebruiken, zie verder bijlage C.

Deze parameters vullen we in in de algemene specificatie van de investeringsfunctie (A.8). Daarmee is aan alle voldoende voorwaarden voldaan en is de te vinden oplossing altijd het gezochte minimum en bovendien is dit minimum uniek.

A.7 Berekening

De berekening start met de bepaling van het herhalingsinterval. Daarbij hoeven we gelet op paragraaf A.5 geen rekening te houden met grenzen. We kunnen dus zonder meer (A.21) en (A.36) combineren, met inachtneming van de definitorische relaties (A.24), (A.25) en (A.26). Voor de berekening is het handiger om (A.21) met behulp van (A.9) om te schrijven naar S^+ , waarbij teller en noemer worden gedeeld door $e^{\lambda H_{T_1}^-}$:

$$e^{\theta u} = 1 + \frac{\delta I_i}{S(H_i^+)}$$

$$u = \frac{1}{\theta} \ln \left(1 + \frac{\delta I_i}{S(H_i^+)} \right) = \frac{1}{\theta} \ln \left(1 + \frac{\delta I_1}{S^+} \right) > 0 \quad (\text{A.62})$$

Invulling van (A.8) en (A.39) in (A.36) geeft:

$$S^+ = \frac{e^{\lambda u}}{\theta B} \left\{ \left(F^1(u) + \lambda F(u) \right) \left(1 - e^{\lambda u - \delta D} \right) + \lambda e^{\lambda u - \delta D} F(u) \right\}$$

$$= \frac{e^{\lambda u}}{\theta B} \left\{ F^1(u) \left(1 - e^{\lambda u - \delta D} \right) + \lambda F(u) \right\} \quad (\text{A.63})$$

Invulling van (A.63) in (A.62) geeft:

$$u = \frac{1}{\theta} \ln \left(1 + \delta \theta B \frac{F(u)}{F^1(u) \left(1 - e^{\lambda u - \delta D} \right) + \lambda F(u)} \right) \quad (\text{A.64})$$

met volgens (A.26):

$$D = \frac{\theta + \lambda}{\beta} u \quad (\text{A.65})$$

Als $\lambda = 0$ wordt (A.64):

$$u = \frac{1}{\theta} \ln \left(1 + \delta \theta B \frac{F(u)}{F^1(u) \left(1 - e^{-\delta D} \right)} \right) \quad (\text{A.66})$$

Uit (A.66) blijkt nog duidelijker dan uit (A.64) dat de omvang van het interval vooral wordt bepaald door de verhouding $F(u)/F'(u)$ ofwel de verhouding tussen de vaste en de variabele kosten. De absolute omvang van de investeringen (bijvoorbeeld de lengte van de dijk in kilometers) heeft in het algemeen dus geen invloed op de omvang van u of D .

Achtereenvolgens kunnen met behulp van u ook I , s^- , S^+ en K_{hulp} worden uitgerekend. S_o kan worden berekend uit de actuele gegevens over (A.1) en (A.2). Als blijkt dat $S_o < s^-$, geldt (A.45). Daarmee wordt T_1 uitgerekend, waarna K als slot volgt. In het andere geval gelden (A.47), (A.48) en (A.52), waarna K eveneens kan worden uitgerekend.

De hoogst toelaatbare overschrijdingskans p_t^- volgt uit:

$$p_t^- = s_t^- / V_t \quad (\text{A.67})$$

A.8 Bijzonderheden

A.8.1 Gemiddelde niveaus

A.8.1.1 Restschade

In de optimale investeringsstrategie zijn de ligging van het schade-interval, dus het gemiddelde niveau van de verwachte schade, en de omvang van het interval, dus de variatie in de verwachte schade, nauw met elkaar verweven. Beide worden bepaald door de vorm van de investeringsfunctie. Uit (A.64) blijkt dat het quotiënt $I(u)/I'(u)$ een belangrijke rol speelt in de bepaling van de omvang van u en dus van het interval. Het is echter niet eenvoudig mogelijk om dit quotiënt te variëren – en daarmee de omvang van het interval - zonder dat daarbij de optimale waarde van $I(u)$ verandert. Door dit laatste verandert tegelijkertijd de ligging van het interval, zie (A.22).

Wat wel mogelijk is, is het gemiddelde niveau van verwachte schade uit te rekenen over een herhalingsperiode. Als $\lambda = 0$, is het schade-interval constant in de tijd en dan geldt vanzelfsprekend hetzelfde voor de gemiddelde schade. Als $\lambda > 0$, stijgt het schade-interval in de tijd en ontstaat een ingewikkelder formule.

In de berekening van het gemiddelde moeten we niet disconteren, zoals we tot nu toe steeds gedaan hebben (bijvoorbeeld in (A.38)). De gemiddelde verwachte schade tijdens een herhaalperiode is:

$$\begin{aligned}
 S_{T_i}^{gem} &= \frac{I}{D} \int_0^D S_{T_i}^+ e^{\beta t} dt \\
 &= \frac{I}{D} S_{T_i}^+ \frac{1}{\beta} (e^{\beta D} - 1) = \frac{s_{T_i}^- e^{\lambda u} - S_{T_i}^+}{\beta D} \\
 &= \frac{s_{T_i}^- (e^{\lambda u} - 1) + \delta I_i}{\beta D} = \frac{s_{T_i}^- (e^{\lambda u} - 1) + \delta I_i}{(\theta + \lambda)u}
 \end{aligned} \tag{A.68}$$

(A.68) is niet een direct inzichtelijke formule. Maar als $\lambda = 0$, ontstaat wel een aardig interpreteerbaar resultaat:

$$S^{gem} = \delta \frac{1}{\theta} \frac{I(u)}{u} \tag{A.69}$$

De laatste factor is de gemiddelde kosten per centimeter optimale dijkverhoging. $1/\theta$ is een aantal centimeters. De laatste twee factoren samen zijn dus een investeringsbedrag, dat met behulp van de discontovoet wordt omgezet in een equivalent bedrag per jaar. Even afgezien van de kleine correctie ζ voor de schadevergroting door dijkverhoging, is $1/\theta$ gelijk aan $1/\alpha$. Dat is het gemiddelde van het aantal centimeters waarmee bij een overstroming de waterhoogte de hoogte van de dijk overtreft.⁸⁸ Als gevolg van de eigenschap dat de voorwaardelijke verdeling van een exponentiële verdeling weer een exponentiële verdeling is, blijft dit gemiddelde constant ongeacht de hoogte van de dijk. De laatste twee factoren samen zijn dus de investeringskosten die nodig zouden zijn om de gemiddelde restschade te voorkomen.

In eerste instantie kan dan de vraag rijzen waarom we dit bedrag dan niet zouden investeren; het lijkt immers een rendabele investering. Dan zouden we dezelfde fout maken als in de redenering dat als we de dijk zo hoog maken dat precies de gemiddelde waterstand gekeerd kan worden, er nooit meer een overstroming kan plaatsvinden. Bij toepassing zouden we al snel merken dat we dan toch in ongeveer de helft van de gevallen een overstroming hebben. Dit laatste geldt op ieder ingesteld veiligheidsniveau. Omdat het, ongeacht de hoogte van de dijk, altijd mogelijk is dat er overstromingen optreden, is geheel voorkomen van restschade niet realiseerbaar. Meer investeren dan het optimum levert daardoor altijd te weinig schadevermindering op om die extra investering terug te verdienen.

Niettemin is het een aardig resultaat dat het gemiddelde jaarlijkse restrisico gelijk is aan de jaarkosten van de investering om de gemiddelde resterende overstroming te voorkomen.

Verder blijkt uit (A.69) welke variabelen en parameters van belang zijn voor de ligging van het interval. Ten eerste is dat θ , maar dit is een technische parameter waar niet veel aan te variëren valt. De tweede zijn de investeringskosten. Iedere verandering werkt dus evenredig door in de ligging van het schade-interval. De keuze van de discontovoet δ heeft hetzelfde effect. Opvallend is dat de groeivoet van de schade bij overstromen β geen directe invloed heeft op de ligging van het interval. Deze parameter werkt alleen via de optimale dijkhoogte u . Een niet al te grote wijziging in u zal echter een verwaarloosbaar effect hebben op de gemiddelde investeringskosten. Daarmee is de ligging van het interval bijna onafhankelijk van de groeivoet van de schade door veranderingen in het watersysteem of economische groei.

A.8.1.2 Overschrijdingskans

In presentaties is het niet handig om te spreken over schadebedragen omdat die moeilijk interpreteerbaar zijn. Makkelijker is het om te spreken over overstromingskansen, ook al is dat in het model niet de centrale variabele. Daarom rekenen we hieronder ook de gemiddelde overstromingskans uit gedurende een herhalingsperiode. De formule is het equivalent van (A.68):

⁸⁸ Hierop wijst ook Van Dantzig in de bijlage bij het rapport van de Deltacommissie.

$$P_{T_i}^{gem} = \frac{I}{D} \int_0^D P_{T_i}^+ e^{\alpha\eta t} dt$$

$$= \frac{I}{D} P_{T_i}^+ \frac{1}{\alpha\eta} (e^{\alpha\eta D} - 1) = P_{T_i}^+ \frac{(e^{\alpha\eta D} - 1)}{\alpha\eta D}$$
(A.70)

Als D klein zou zijn, is de exponent klein. Reeksontwikkeling van de teller leert dan dat de breuk dicht bij 1 ligt. Dit is zoals verwacht mag worden. Immers, als D klein is, moet het gemiddelde sterk lijken op de waarde aan het begin van het interval. Naarmate D groter wordt, gaan de hogere machten meer doortellen en gaat de breuk steeds meer afwijken van 1. De gemiddelde overstromingskans wordt dan steeds groter ten opzichte van de kans direct na investeren.

Ook voor de schade bij overstromen is over dezelfde periode een gemiddelde te berekenen. Dat ziet er qua vorm hetzelfde uit als (A.70), met P^+ vervangen door V en $\alpha\eta$ vervangen door γ . Als we daarna de gemiddelde P vermenigvuldigen met de gemiddelde V, vinden we echter niet de gemiddelde S uit (A.68). Dat komt omdat P en V tegelijkertijd groeien: de grootste schade bij overstromen in de periode wordt gecombineerd met de grootste overstromingskans en omgekeerd. De gemiddelde schade is dus groter dan het product van de gemiddelden van de twee factoren.

Dit maakt het mogelijk om een alternatieve definitie te bedenken voor of de gemiddelde overstromingskans of de gemiddelde schade bij overstromen, namelijk door in de berekening te wegen met de andere variabele. Dit is hetzelfde als de gemiddelde restschade volgens (A.68) te delen door de ongewogen gemiddelde P volgens (A.70), hetgeen het met de overstromingskans gewogen gemiddelde oplevert voor de schade bij overstromen; dan wel als alternatief de gemiddelde restschade volgens (A.68) te delen door de ongewogen gemiddelde V volgens het equivalent van (A.70), hetgeen het met de schade bij overstromen gewogen gemiddelde oplevert voor de overstromingskans.⁸⁹

Omdat consistentie tussen de drie aggregaten in de presentatie geen rol speelt, geven we voorlopig de voorkeur aan de eenvoudige definitie van de gemiddelde overstromingskans volgens (A.70).

A.8.2 Opbrengst van een eenmalige investering

Op dezelfde manier als voor een hele investeringsstrategie, kunnen we ook de netto contante waarde uitrekenen voor een eenmalige investering.

We beginnen met de contante waarde van het verschil in schade door de i^e investering, op het moment van investering met $T_i > 0$:

⁸⁹ Om bij gelijksoortige problemen in bijvoorbeeld de Nationale rekeningen toch de consistentie tussen waarde-, prijs- en hoeveelheidscijfers te garanderen worden daarin de hoeveelheidsindices meestal gedefinieerd als de waarde-index gedeeld door de prijsindex.

$$\begin{aligned}
W_i(\infty) &= \int_0^{\infty} (S_{i,t}^+ - S_{i,t}^-) e^{-\delta t} dt \\
&= (S_i^+ - S_i^-) \int_0^{\infty} e^{(\beta-\delta)t} dt \\
&= (S_i^+ - S_i^-) \frac{1}{\delta - \beta} \quad \text{als } \delta > \beta
\end{aligned} \tag{A.71}$$

In tegenstelling tot de integraal over een eindige periode, zoals in (A.38), moet nu de laatste voorwaarde er wel bij staan, want anders wordt de integraal oneindig.

Met gebruikmaking van (A.21) is (A.71) ook te schrijven als:

$$W_i(\infty) = \frac{-\delta}{\delta - \beta} I_i \tag{A.72}$$

De netto contante waarde van een project i is dus

$$Y_i = I_i - \frac{\delta}{\delta - \beta} I_i = \frac{-\beta}{\delta - \beta} I_i \tag{A.73}$$

Merk op dat in deze berekening de netto contante waarde van de projecten alleen negatief lijkt omdat het gaat om een kostenbesparing. Volgens (A.12) zijn we immers bezig de totale kosten te minimaliseren en de projecten i dragen daar volgens (A.73) toe bij.

De netto contante waarde van een project is:

- Of oneindig groot (als $\beta \geq \delta$) zoals in BER met $0,06 < \beta < 0,075$;
- Of weliswaar eindig (als $\beta < \delta$) maar wel veel groter dan de investeringskosten. Stel dat $\beta=0,03$ en $\delta=0,04$, zoals ongeveer in BOR, dan is de netto contante waarde van een optimaal project volgens (A.73) drie keer zo groot als de investeringskosten.

De netto contante waarde van zo'n project kan dus geen uitsluitsel geven over de investeringsbeslissingen 'wanneer?' en 'hoeveel?'. De optimale strategie geeft daar wel een helder antwoord op volgens de criteria (A.21) en (A.35). In hoofdstuk 7 van het hoofdrapport wordt (A.21) dan ook gebruikt bij de beoordeling van de voorgestelde uitgaven. Daarbij moet ook rekening worden gehouden met de onderhoudskosten.

A.8.3 Onderhoudskosten

In de theoretische afleiding is impliciet aangenomen dat de contante waarde van de onderhoudskosten is begrepen in de investeringskosten. In het Project Ruimte voor de Rivier is dat bij het investeringsbedrag niet het geval. Bij het bepalen van het investeringsbedrag dat nog

net rendabel is, moet daarom bij de toepassing van (A.21) expliciet met de onderhoudskosten rekening worden gehouden. Splitsing geeft:

$$\delta I_T = \delta \left(I_I + \frac{\varepsilon I_I}{\delta} \right) = (\delta + \varepsilon) I_I \quad (\text{A.74})$$

waarbij I_T investeringskosten, inclusief onderhoudskosten
 I_I investeringskosten, exclusief onderhoudskosten
 ε jaarlijkse onderhoudskosten als perunage van I_I

(A.74) wordt in hoofdstuk 7 gebruikt voor de berekening van het grensbedrag voor rendabel investeren.

Voor de onderhoudskosten van dijken wordt in de praktijk grofweg gerekend met 1% per jaar. Dat betekent bij een discontovoet van 4% een opslag op de investeringskosten van 25%. Deze factor wordt gezet op de in bijlage C geschatte investeringsfuncties.

A.9 Meer ingewikkelde problemen

A.9.1 Inleiding

Het veiligheidsprobleem waarvoor in de paragrafen A.3 en A.4 voor het eerst de goede oplossing is gegeven, is op twee punten uitgebreider dan het oorspronkelijke probleem waarvoor Van Dantzig (1956 en 1960) een oplossing zocht. Van het begin af aan is rekening gehouden met de invloed van dijkverhoging op de schade bij overstroming (zie (A.2)). Daarna is op grond van de ontvangen informatie over de investeringskosten (zie paragraaf A.6) het model uitgebreid door rekening te houden met stijgende investeringskosten naarmate de dijk hoger wordt (zie (A.8)).

Er zijn echter een aantal aspecten van de veiligheid van dijkringen die (nog) niet goed passen binnen dit model en de daarvoor afgeleide oplossing. Deze problemen zijn wel oplosbaar met behulp van het maximum principe, maar hun oplossing is veelal geen voor de handliggende uitbreiding van het hier gepresenteerde model. In deze gevallen zullen de oplossingen vermoedelijk slechts gedeeltelijk of niet analytisch traceerbaar zijn. Er moeten dan algoritmen worden gebruikt die deels analytisch en deels numeriek van aard zijn. In die algoritmen worden door middel van het toepassen van noodzakelijke voorwaarden – maar in die gevallen ingewikkelder dan beschreven in paragraaf A.3.1 - strategieën opgespoord die mogelijke kandidaten zijn voor het minimum. Door de uitkomsten van deze strategieën onderling te vergelijken kan het minimum worden vastgesteld. Voorbeelden van dergelijke algoritmen bij het toepassen van het maximum principe zijn te vinden in de proefschriften van Van Loon en Kort.

Hieronder zullen we drie, voor dit onderzoek relevante aspecten behandelen en aangeven hoe we daar in het kader van dit onderzoek mee zijn omgegaan. Daarna behandelen we nog een aantal andere kwesties die mogelijk relevant zijn bij het project VNK. Een aantal daarvan is vermoedelijk wel eenvoudig oplosbaar binnen de hier gegeven context.

A.9.2 Meer dan één dijkvak per dijkkring

Bij de formulering van het model is er in (A.8) vanuit gegaan dat er slechts één investeringsfunctie is per dijkkring en verder in (A.3) tot en met (A.7) dat er ook maar één relevante dijkhoogte is. Dat laatste houdt niet in dat de dijk overal even hoog boven NAP ligt. Het betekent wel dat het actuele veiligheidsniveau overal langs de dijkkring ongeveer even hoog is, dat bij een investering een overal gelijk veiligheidsniveau wordt bereikt, en dat de daarvoor benodigde investeringskosten per km dijk op elkaar lijken.

Omdat de investeringskosten niet op iedere locatie precies gelijk zijn, is de per dijkkring gebruikte investeringsfunctie een som van de investeringskosten per locatie, of beter gezegd per dijkvak. Bij de formulering van het model is er nu vanuit gegaan dat zowel de veiligheid als de investeringskosten per dijkvak in een dijkkring zodanig uniform zijn dat de dijkkring kan worden opgevat als bestaande uit één dijkvak.

Er kunnen twee oorzaken zijn waarom er per dijkkring permanent meer dan één dijkvak onderscheiden moet worden;

- De ontwikkeling van de overstromingskans is per dijkvak sterk verschillend;
- De investeringskosten per dijkvak verschillen aanzienlijk.

Verskil in ontwikkeling per dijkvak kan bij de bovenrivieren niet van wezenlijke betekenis zijn, want daarbij speelt de rivierafvoer de dominante rol, maar kan wel optreden bij de benedenrivieren.

De tweede oorzaak doet zich voor bij grote kunstwerken of passages van steden. Kleine kunstwerken vormen geen echt probleem. Als we de dijkvakken niet te klein kiezen, zal blijken dat daarop altijd wel een paar wat bijzondere punten aanwezig zijn. Kosten voor het oplossen van dit soort punten kunnen worden meegenomen in de gemiddelde kostenfuncties. Het gaat ten slotte om een indruk te krijgen van optimale veiligheidsniveaus per dijkkring, niet om het maken van een uitvoerbaar bestek voor iedere afzonderlijke kilometer waterkering. Bij zeer grote kunstwerken kan worden gedacht aan vaste kosten van 250 mln euro voor de vervanging van een niet meer verhoogbaar sluizencomplex van 0,5 km tegenover vaste kosten van 2,5 mln euro per km in het geval van weinig gecompliceerde dijken (ARF, 2004). Dat is een factor 200 verschil.

Bovengenoemde verschillen in investeringskosten kunnen aanleiding geven voor een verschillend optimaal investeringspatroon per dijkvak. In dat geval is steeds het laagste dijkvak

bepalend voor de overstromingskans. Complicatie is dan dat een investering op een dijkvak niet meer automatisch is gekoppeld aan de daarmee volgens (A.1) overeenkomende verbetering van de overstromingskans, omdat er dan de mogelijkheid is dat een ander dijkvak kritiek wordt. Daardoor kan het rendement van de investering op het eerste dijkvak sterk worden beperkt. Ook zonder het probleem met het maximum principe op te lossen kan toch het een en ander over de karakteristiek van de oplossing worden gezegd. Economische groei speelt bij het dijkvakprobleem geen rol, omdat die is gekoppeld aan de dijkkring en niet verschilt per dijkvak.

Verschillende ontwikkeling veiligheidsniveaus

Het probleem van de verschillende ontwikkeling van het veiligheidsniveau (zie bijlage B) is daarin als volgt opgelost. Als het veiligheidsniveau van alle dijkvakken na een investeringsronde op hetzelfde niveau is gebracht, is er een locatie aan te wijzen waar de stijging van de overstromingskansen het hardst gaat. In de berekening worden dan de parameters gebruikt die behoren bij deze kritieke locatie. Als na verloop van tijd alleen bij deze locatie een investering zou plaatsvinden, wordt slechts een geringe verbetering van het veiligheidsniveau van de dijkkring bereikt in verhouding tot de investeringskosten, ook al hebben die slechts betrekking op een dijkvak. Andere dijkvakken zouden niet veel later moeten volgen. Hoe meer dijkvakken na enige tijd zijn verhoogd, hoe rendabeler het wordt ook de overige direct mee te nemen. Het zal dus optimaal zijn om alle dijkvakken kort achter elkaar, zoniet gelijktijdig te verhogen. Dat laatste wordt nog bevorderd als blijkt dat de investeringskosten per dijkvak bij zo'n sprong niet erg verschillen.

In de praktische situatie in BER, beschreven in bijlage B, blijkt dat de meest kritische locaties meestal zeer gevoelige locaties zijn. Dat wil zeggen locaties waar een paar centimeters verschil al een grote invloed heeft op de overstromingskansen. Die gevoeligheid werkt naar twee kanten. Enerzijds is een paar centimeter waterstandstijging voldoende voor een grote toename van de overstromingskans, anderzijds is een paar centimeter dijkverhoging al voldoende om die kans weer duidelijk te doen dalen. De kritieke locaties blijken niet overeen te komen met de locaties die – gelijktijdig met de kritieke locaties – de grootste dijkverhoging nodig hebben. Daar de verschillen in ontwikkeling wel duidelijk zijn, maar niet al te groot zijn en deze verschillen bij de investeringskosten zelfs overgecompenseerd worden door de noodzaak van een grotere verhoging, is ervan uitgegaan dat we voor de oplossing van het veiligheidsprobleem in BER uit mogen gaan van gelijktijdige investering. Zoals gezegd worden in de berekening de parameters gebruikt op het kritieke punt in combinatie met de investeringskosten om op het investeringsmoment op alle dijkvakken weer hetzelfde veiligheidsniveau te bereiken. Dat ook dit laatste optimaal zou zijn, is minder duidelijk. De verschillen in parameters zijn echter niet zo groot, dat de resultaten van een ander hoeveelheidpatroon duidelijk zouden kunnen afwijken van die volgens de meest eenvoudige rekenprocedure.

Oplossing bij grote verschillen in investeringskosten

Een beroep doen op niet al te grote verschillen tussen dijkvakken als een argument waarom in de optimale oplossing alles toch tegelijk gebeurt en daarbij tevens terugkeer naar hetzelfde veiligheidsniveau plaatsvindt, is bij grote verschillen in investeringskosten niet meer mogelijk. Maar het andere argument, namelijk een groot verlies in opbrengst als gevolg van niet gelijktijdig investeren, blijft gelden. Het is duidelijk optimaal om op het moment van investeren in het kostbare dijkvak tegelijkertijd ook te investeren in het goedkope dijkvak. Het is echter niet direct duidelijk of die laatste investering in dezelfde omvang zou moeten plaatsvinden. Als dat niet het geval is en daar minder verhogen optimaal is, dan is er tussentijds nog minstens een extra investering nodig in het goedkope dijkvak. Maar duidelijk is wel dat het kostbare dijkvak bepalend is voor het optimale investeringspatroon. Een systematisch uit de pas lopen kan nooit de optimale oplossing zijn.

Voordat we nu de conclusie trekken dat we de berekening moeten gaan baseren op de duurste locatie, moeten we ons wel afvragen of die situatie ook praktisch waarschijnlijk is. Het is mogelijk dat de locale oplossing zo kostbaar is, dat het zeer waarschijnlijk is dat andere oplossingen, bijvoorbeeld ruimtelijke oplossingen, veel goedkoper zijn. Een ander, technisch voorbeeld van een andere oplossing is de aanleg van de Maaslandkering in de Nieuwe Waterweg ter voorkoming van dijkverhoging in Rotterdam en Dordrecht. Een derde mogelijkheid bij de Rijntakken is het wijzigen van de afvoerverdeling. Dit is met name relevant voor de Nederrijn/Lek wegens de hoge kosten die nodig zouden zijn om bij afvoeren boven de 16 dzd m³/s eenzelfde deel van de afvoer te blijven afwikkelen. Het lijkt daarmee waarschijnlijk dat bij een afvoer van 16 dzd m³/s voor deze riviertak een maximum voor de Maatgevende Hoogwaterstand wordt bereikt. In dat geval is ook verhoging van de twee grote sluiscomplexen in dijkkring 44 Kromme Rijn niet meer aan de orde. De kosten voor deze complexen, die nu voldoende overhoogte hebben, zijn daarom in de schatting van de investeringskostenfuncties buiten beschouwing gelaten (zie bijlage C).

A.9.3 Vast eindpunt of maximum

Met het noemen van een maximum voor de Maatgevende Hoogwaterstand voor de Nederrijn is tevens het volgende meer ingewikkelde probleem genoemd, namelijk een niet gelijkmatige ontwikkeling van de groei van de verwachte schade in de toekomst. De berekening in het model loopt nu in principe door tot oneindig en wel met een vast tempo voor de stijging van de verwachte schade. Dat is makkelijk, want daardoor is de tijdshorizon van de opbrengsten van investeringen op verschillende tijdstippen toch hetzelfde. Voor het benedenrivierengebied is dit een redelijke benadering omdat er voorlopig nog geen einde lijkt te komen aan de klimaatverandering en de daarop met grote vertraging volgende stijging van de zeespiegel. Voor de bovenrivieren kan dit anders liggen door de mogelijkheid van een fysiek maximum bij de aanvoer uit het buitenland of door een ingreep in de afvoerverdeling.

Complicatie van een vast eindpunt in de (verre) toekomst is dat er dan geen vast herhalingsinterval meer is. Iedere investeringsperiode kent dan zijn eigen verhoudingen. Naarmate het aantal stappen om het vaste fysieke eindpunt te bereiken, bijvoorbeeld een afvoer van 18 dzd m³/s bij Lobith, kleiner wordt, legt dit meer dwingend het investeringspatroon vast. Het minimum kan dan het beste worden bepaald door een zoekprocedure, waarbij de uit het maximum principe volgende noodzakelijke voorwaarden kunnen helpen om kandidaten voor een investering te vinden. De zoekprocedure wordt dan gestart vanuit de gewenste situatie in het vaste eindpunt.

Het Maasdal in België heeft een vorm die geen relevante beperkingen oplegt aan de afvoer. Maar langs de Grensmaas in Nederland kan dat anders worden als er grote overstromingen plaatsvinden in België. Bij de Rijn in Duitsland kunnen ook grote overstromingen optreden. Daarbij is het niet aannemelijk dat de Duitsers alles lijdzaam over zich heen zullen laten komen.⁹⁰ Verder worden dijken in Duitsland door het hanteren van andere civieltechnische normen robuuster gebouwd dan in Nederland. Een dijk in Duitsland kan daardoor onder extreme omstandigheden hogere waterstanden keren dan een dijk in Nederland die formeel dezelfde kerende werking heeft. Het is dus de vraag in hoeverre de veel genoemde 18 dzd m³/s bij Lobith op lange termijn werkelijk het fysieke maximum is.

In paragraaf 4.5 van het hoofdrapport is een variant uitgewerkt die enerzijds recht doet aan de hier beschreven verschijnselen, maar anderzijds past in de huidige berekeningsmethode. Dat is een variant waarbij er weliswaar geen fysiek maximum is (hetgeen letterlijk genomen ook niet waarschijnlijk lijkt), maar er wel een einde komt aan de stijging van de Maatgevende Hoogwaterstand boven de 16 dzd m³/s. Dit kan dus ook voor een deel van het bovenrivierengebied gelden bij aanpassing van de afvoerverdeling onder maatgevende omstandigheden.

A.9.4 Meer dan één faalmechanisme

Dijken en andere constructies worden in principe zo robuust ontworpen dat andere faalmechanismen dan overschrijden een kans van voorkomen mogen hebben die minstens een factor 10 kleiner is dan falen door onvoldoende hoogte. Vandaar dat in het hier afgeleide model alleen aandacht wordt besteed aan overschrijden. Uit VNK blijkt echter dat ook andere faalmechanismen een grote kans van voorkomen hebben.⁹¹

Als we er van uitgaan dat na toetsing alles goed op orde is en er dus geen in het oog lopende zwakke plekken meer zijn, dan zijn ook andere faalmechanismen zeldzaam optredende gebeurtenissen. Ook daarvoor geldt dan een extreme-waardenverdeling, die weer goed benaderd

⁹⁰ Zie voor een goed onderzoek naar de hoogte van en kans op zeer hoge afvoeren bij Lobith de recente Nederlands-Duitse Hoogwaterstudie (RIZA, 2004).

⁹¹ Uit nieuwere studies binnen het project Rampenbeheersing strategie overstroom (RBSO) blijkt overigens dat per saldo de overstromingskansen kleiner zijn dan de overschrijdingskansen. Dit komt door extra ontwerpsterkte van de dijken.

kan worden met een exponentiële verdeling. Het kan zijn dat met een ander faalmechanisme ook andere soorten investeringen zijn verbonden dan dijken. Als ook de kansen onafhankelijk zijn, kan het probleem (bij zeer goede benadering wegens de kleine kansen) worden opgeschreven als de som van twee problemen als (A.3). Daar die geen onderlinge relatie hebben, kunnen ze dus ieder afzonderlijk worden opgelost. Het is dan dus heel goed mogelijk dat het veiligheidsniveau als gevolg van het ene faalmechanisme sterk afwijkt van die van het andere faalmechanisme als gevolg van het sterk uiteenlopen van de kosten. Voorbeeld: De kans op het op het kritieke moment ontbreken van een sleutel om een mechaniek te sluiten moet natuurlijk veel kleiner zijn dan de overschrijdingskans van de complete dijkkring. Voor veel praktijkvoorbeelden bij VNK zal dit gelden, terwijl ook vaak de omvang van de actie al van tevoren gegeven is (zie paragraaf A.5.2 voor het dan geldende rentabiliteitscriterium).

Als de extra investeringen zijn gekoppeld aan dijken, bijvoorbeeld de breedte of sterkte van de dijk, of als de faalmechanismen niet onafhankelijk zijn, wordt het ingewikkelder. Ook dan is het probleem vermoedelijk nog wel op te lossen als een uitbreiding van het hier ontwikkelde model.

A.9.5 Meer dan één soort maatregel mogelijk

Het zal sterk van het probleem afhangen of het hier echt een moeilijkheid betreft, of dat het simpel gaat om het goed formuleren van de kostenfunctie. De kostenfunctie moet natuurlijk een goede weergave zijn van de goedkoopste maatregelen die achtereenvolgens kunnen worden toegepast. In paragraaf A.6.2 is aangegeven dat bij het stijgen van de water- en dijkhoogte de keuzemogelijkheden bij de in te zetten maatregelen beperkter worden, zodat de kosten van de goedkoopste maatregel toenemen. Dat is nu opgelost in de meer algemene formulering van de kosten volgens formule (A.8). Het is geen probleem als in die kostenfuncties op een zeker moment van dijkverhoging wordt overgestapt op ruimtelijke maatregelen.

In de gebruikte formulering zijn de sprongen die er bij overgang op een nieuwe maatregel in het kostenverloop ontstaan, glad gestreken. Bijlage C is voor een belangrijk deel gericht op dit glad strijken. Dit is mede gebeurd omdat de sprongen in de aangeleverde informatie deels komen door de wijze van opstelling van die informatie en daardoor een meer discontinu verloop geven rond de sprongen van 25 cm dan in werkelijkheid het geval zal zijn. Deels is dit ook gebeurd om de berekeningen te vereenvoudigen. Als we dichterbij de werkelijkheid aansluitende investeringskostencurven met goed onderbouwde sprongen gaan gebruiken, zal de oplossing gaan in de richting van het investeren tot precies voor zo'n sprong. Immers, dan wordt steeds opnieuw optimaal gebruik gemaakt van de vaste kosten. Dit verder goed bekijken lijkt eerder de taak van degenen die in een concreet geval het beste uitvoeringspakket moeten samenstellen, dan dat het uiteindelijk veel zegt over optimale veiligheidsniveaus. Daarvoor lijken continue benaderingen meer geschikt.

A.9.6 Maatregel heeft invloed op meer dan één dijkkring

Ingewikkelder gevallen ontstaan als maatregelen uitwerken op meer dan één dijkkring, zoals bij grote ruimtelijke maatregelen, of als maatregelen slechts werken voor bepaalde dijkvakken. Problemen en oplossingen gaan dan lijken op die bij systeemwerking of bij meer dan één dijkvak.

A.10 Systeemwerking, waaronder noodoverloopgebieden

Systeemwerking is het fenomeen dat overstroming van een dijkkring de kans op overstroom van een andere dijkkring beïnvloedt. De kans op een volgende overstroming kan kleiner worden en in dat geval werkt de eerst overstroomde dijkkring als een retentiegebied of een noodoverloopgebied (NOG). Bijna overal in het omringende buitenland is vooral deze situatie relevant. In Nederland zijn daarvan voorbeelden te vinden langs de Maas en de IJssel. De kans op een volgende overstroming kan ook worden vergroot (cascadewerking), met name als daarbij doorslag plaatsvindt naar een andere riviertak die lager ligt. De dijkkring Heerewaarden ontleent zelfs zijn betekenis aan het voorkomen van doorslag van de Waal naar de Maas.

Omdat de hoeveelheid water die uit het buitenland via de rivieren wordt aangevoerd, hoe dan ook beperkt is, wordt de invloed van systeemwerking op de overstromingskansen in het gebied van de bovenrivieren aanzienlijk geacht. Anders heeft ook de discussie over NOG's geen zin. De kennis over systeemwerking is echter nog uiterst gering. Desondanks is het probleem zo belangrijk en urgent (NOG's instellen of niet?), dat we het niet buiten dit onderzoek wilden laten. Dat kan ook niet omdat de verschillen in berekende optimale veiligheidsniveaus per afzonderlijke dijkkring zo groot zijn, dat streven naar het bereiken van die oplossing automatisch systeemwerking zou inhouden. De overstromingskansen na het bereiken van die zogenaamde optimale oplossing zouden er dan in werkelijkheid drastisch anders uitzien dan in de uitkomsten van de berekening per afzonderlijke dijkkring wordt gesuggereerd. Bij de benedenrivieren zijn de invloeden van wind en zee zo groot dat systeemwerking daar vermoedelijk van minder groot belang is.

Formuleringsprobleem

Het veiligheidsprobleem met systeemwerking is voor de bovenrivieren in principe op te lossen met behulp van het maximum principe door voor alle 16 dijkringen een model op te schrijven als (A.3) en (A.8) en daarna de criteriumfunctie te schrijven als de som van de 16 versies van criteriumfunctie (A.12) per dijkkring. Het eerste probleem is dat de overschrijdingskansen in vergelijking (A.1) dan niet meer eenvoudig is op te schrijven. Dit wordt per dijkkring een ingewikkeld algoritme dat voor allerlei waterstanden en overstromingssituaties moet aangeven hoe in al die gevallen de kans op overstroom er uitziet. In het rapport is in paragraaf 6.2 aangegeven hoe we dit hebben gedaan.

De volgende vraag is dan hoe de vorm van de oplossing er uitziet. Hiervoor is niet het formele model opgelost maar is een heuristische redenering gevolgd in de geest van de

oplossing per dijkkring. Daarbij hebben we ons beperkt tot het geval dat de investeringskosten niet afhankelijk zijn van de tijd of de dijkhoogte ($\lambda=0$) en tevens de economische groei (γ) voor iedere dijkkring dezelfde is. Deze twee vereenvoudigingen zijn nodig om ons te kunnen beperken tot een eenvoudig geval.

Vorm van de oplossing in herhalingsperioden

De combinatie van de constantheid van de investeringskostenfunctie en de constantheid van de groeivoeten in de tijd heeft tot gevolg dat de optimale schade-intervallen per dijkkring constant zijn. Stel nu dat na een of meer initiële investeringsronden de op dat moment ideale onderlinge veiligheidssituatie is bereikt. In deze situatie zijn de veiligheidsniveaus van de 16 dijkkringen zo op elkaar afgestemd dat de contante waarde van de som van de resterende overstromingsschade in het hele gebied en de investeringskosten daarvoor minimaal is. Bij het bereiken van dit minimum speelt systeemwerking naar verwachting een belangrijke rol. Het beperkt enerzijds de investeringskosten bij dijkkringen die al extra beschermd worden door het eerder vollopen van andere dijkkringen. Anderzijds beperkt het de grote schades door cascadowerking door op die kritieke punten extra te investeren. Het op ieder moment zoveel mogelijk bereiken van het op dat moment ideale patroon is dus vermoedelijk een zeer belangrijke eigenschap van de optimale oplossing.

In de werkelijkheid kunnen allerlei ontwikkelingen verschillen per dijkkring of daarvoor anders uitwerken. Het is echter te gecompliceerd om met allerlei mogelijke wijzigingen in overstromingspatroon in de verre toekomst rekening te gaan houden. Vandaar dat we het model zo opzetten dat als eenmaal het op dat moment optimale overstromingspatroon is bereikt, er in het model geen directe aanleiding is om dit te veranderen. Vandaar in ieder geval de keuze voor een economische groei die voor alle dijkkringen gelijk is aan de economische groei van het hele gebied en voor constante investeringsfuncties.

Gezien de gelijke ontwikkeling van de veranderingen door economische groei kan het dan niet anders dan optimaal zijn om het eenmaal bereikte optimale veiligheidspatroon in de loop der tijd zoveel mogelijk te handhaven. Helemaal exact is dat tijdens een herhaalperiode niet mogelijk, daar de invloed van de stijgende waterstanden op de overstromingskansen (α) niet voor iedere dijkkring gelijk is door verschillen in plaatselijke Q/h-relaties. Als we de stijging van de verwachte schade na enige tijd zouden willen corrigeren door bij de dijkkring met de grootste verslechtering de dijk te verhogen, dan betekent dat volgens het criterium voor een optimale hoeveelheid volgens (A.35) of (A.52) een zodanig grote stap dat daarmee – uitzonderingen daargelaten – het optimale veiligheidspatroon ernstig verstoord zou worden. Op grond van deze redenering betekent verhoging van één dijkkring verhoging van alle dijkkringen. Kortom, de tijdstippen van optimale investeringen zijn voor alle dijkkringen dezelfde en daarmee geldt hetzelfde voor de periode D tussen de investeringen.

De ene, optimale D bij systeemwerking zal een compromis zijn tussen de optimale D's per dijkkring als die afzonderlijk worden gezien. Die D's liggen afzonderlijk berekend al zo dicht bij elkaar, dat het niet goed voorstelbaar is dat er bij onderlinge afstemming van de

veiligheidsniveaus niet makkelijk een eenvormig patroon van investeringsmomenten zou zijn te vinden.

De dijkverhoging per dijkkring wordt dan zo bepaald dat de overstromingskansen na een herhaalinvestering terugkeren naar het oorspronkelijke ideale patroon. Dat lukt niet door zonder meer (A.26) toe te passen. (A.26) luidt bij constante investeringskosten voor een dijkkring i:

$$\beta D = \theta N \quad (\text{A.75})$$

waarin N optimale dijkverhoging bij herhaling bij systeemwerking

In dit geval geeft dat bij een gelijke D , maar overigens verschillende parameters per dijkkring:

$$N_i = \frac{\beta_i}{\theta_i} D = \frac{\alpha_i \eta_i + \gamma_i}{\alpha_i - \zeta_i} D \quad (\text{A.76})$$

Deze formule voor N_i geeft niet zonder meer instandhouding van het overstromingspatroon. Dit blijkt uit invulling in (A.1).

$$P_{i,t} = P_{i,o} e^{\alpha_i (\eta_i D - N_{i,t})} \quad (\text{A.77})$$

We krijgen een voor alle dijkringen gelijke verandering van overstromingskans als we formule (A.76) voor N_i vervangen door (A.78):

$$N_i = \left(\eta_i + \frac{\nu}{\alpha_i} \right) D \quad (\text{A.78})$$

Er zijn verschillende benaderingen van (A.76) mogelijk om (A.78) te bereiken. De eerste loopt via een aanpassing van de parameters. Als we in (A.76) even ζ op nul zouden stellen, dan is aan (A.78) voldaan als we voor ν (Griekse letter *nu*) een voor alle dijkringen gelijke parameter γ voor de economische groei hanteren. We houden dus alleen voor het gebied als geheel rekening met economische groei, maar niet meer afzonderlijk per dijkkring.

Duidelijk is dat we niet meer rekening kunnen houden met een per dijkkring verschillende waarde voor ζ . Wat wel kan, is een grove correctie daarvoor maken. De correctie moet zodanig zijn dat (A.78) in de buurt komt van (A.76). Dan zou in theorie moeten gelden:

$$\frac{\alpha_i \eta_i + \gamma}{\alpha_i - \zeta_i} = \frac{\beta_i}{\alpha_i - \zeta_i} = \frac{\beta_i + \nu}{\alpha_i} \quad (\text{A.79})$$

Daaruit volgt:

$$\nu = \frac{\zeta_i \beta_i}{\theta_i} = \frac{\zeta_i \alpha_i \eta_i}{\theta_i} + \frac{\zeta_i}{\theta_i} \gamma \approx 0,1152\gamma + 0,0012 \quad (\text{A.80})$$

Vanzelfsprekend is het niet mogelijk om de gelijkheid in (A.79) exact te bereiken, maar met de in (A.80) gekozen getallen lijkt het rechterlid een goede benadering om in BOR gemiddeld te corrigeren voor de hogere schade door dijkverhoging.⁹² De resulterende vergelijking wordt dus:

$$N_i = \frac{\beta_i + 0,1152\gamma + 0,0012}{\alpha_i} D \quad (\text{A.81})$$

met een voor alle dijkringen gelijke γ .

Een tweede mogelijkheid om (A.78) te bereiken is om de berekening exact uit te voeren voor één dijkkring en de N van de andere dijkringen daar op een eenvoudige wijze aan te relateren. Dit is alleen dan een zinvolle procedure als er slechts één gemeenschappelijke oorzaak van waterstandsverandering is met één kansverdeling. Bij de onderzochte dijkringen langs de bovenrivieren is dat de hoeveelheid water in Lobith. Voor de hand liggend is dan de eerste en bovendien grote dijkkring 48 Rijn en IJssel, waarin Lobith ligt, als standaard te nemen. Eerst bepalen we de alleen bij D behorende verandering van overstromingskans in (A.77) in Lobith. Deze verandering van overstromingskans geldt voor alle dijkringen. Verder rekenen we de compenserende dijkverhoging N_{48} uit met behulp van de standaardformule (A.76) en de bij dijkkring 48 behorende parameters. Daar hoort voor de overige dijkringen een passende waarde van N bij. De N_{48} correspondeert met een hoeveelheid extra water in Lobith. Die hoeveelheid correspondeert weer met lokale hoeveelheden extra water en lokaal benodigde dijkverhogingen N_i . Deze N_i kunnen we dus via de parameter α , die een combinatie is van de werklijn in Lobith en lokale Q/h-relaties, als volgt benaderen:

$$N_i = \frac{\alpha_{48} N_{48}}{\alpha_i} \quad (\text{A.82})$$

Ook in dit geval hebben we voor alle dijkringen slechts één waarde gebruikt voor γ en ζ , namelijk die van dijkkring 48. In het rekeninstrument is de tweede methode geprogrammeerd.

Met de bepaling van D liggen via (A.82) (of (A.81)) dus ook alle waarden van N per dijkkring vast. De kosten over de herhaalperioden (K_{hulp}) zijn dus slechts afhankelijk van één variabele. Desondanks is K_{hulp} niet eenvoudig oplosbaar, omdat de onderlinge afhankelijkheid van de overstromingskansen niet is gegoten in algemene vergelijkingen. Bij iedere combinatie $\{T_1, X_i$ ($i=1, \dots, 16$), D} moet het overstromingspatroon op de van belang zijnde tijdstippen opnieuw worden bepaald.

⁹² De getallen zijn berekend als het ongewogen gemiddelde voor de 15 dijkringen in BOR (d.w.z. zonder de kleine dijkkring 40).

Aanlooperperiode

Blijft over de aanlooperperiode. Uit de uitkomsten van hoofdstuk 4 van het rapport is duidelijk dat afzonderlijk bekeken in de meeste dijkringen onmiddellijk geïnvesteerd moet worden. Bij systeemwerking komt daar nog een argument bij. Immers, er zijn onderling nauwkeurig afgestemde dijkverhogingen nodig om het optimale overstromingspatroon in te stellen. De winst door het bereiken van deze situatie zal zo groot zijn, dat het optimaal is dat snel te doen. De investeringskosten per dijkkring om vanuit de huidige actuele situaties de ideale situatie te bereiken zullen zeer verschillend van omvang zijn. Hoewel wegens deze verschillen de argumentatie wat minder sterk is dan voor het gelijkstellen van D voor alle dijkringen, is het gelet op de bestaande veiligheidsachterstanden toch waarschijnlijk dat het optimale patroon in één keer wordt ingesteld en vermoedelijk onmiddellijk, tenminste als we 2015 als zichtjaar hanteren. Dit betekent dat het eerste investeringstijdstip T_1 voor alle dijkringen gelijk is en vermoedelijk nul, dwz 2015, is.

De enige overblijvende keuze per dijkkring betreft dan het patroon van eerste dijkverhogingen X in alle 16 dijkringen om zo snel mogelijk de goede onderlinge veiligheidssituatie tot stand te brengen. Hierbij zijn grote verschillen mogelijk met de oplossingen per dijkkring. Hoewel het wegens de kromlijngheid van de in de berekening gebruikte investeringskostenfuncties theoretisch niet is uit te sluiten dat na de eerste verhoging een andere situatie wordt bereikt dan bij de daaropvolgende eerste herhaalinvestering (zie paragraaf A.4.4), is deze complicatie – die praktisch geen betekenis blijkt te hebben – in de berekening niet toegelaten. In de berekening wordt ervan uitgegaan dat met de verhogingen X altijd de echte bovenkant van het veiligheidsinterval wordt bereikt. Dit is zonder meer het geval als de investeringskostenfuncties lineair zijn.

De oplossing wordt nu gevonden door de totale kosten K (volgens (A.53)) uit te rekenen voor allerlei combinaties van T_1 , D en 16 X 'en en uit die resultaten de laagste K te kiezen. Het lastigste probleem daarbij is het steeds voor iedere situatie opnieuw bepalen van de bij dat patroon behorende overstromingskansen per dijkkring.

A.11 Optiewaarde van uitstel

Naarmate we opschuiven in de tijd, komen we over ontwikkelingen tot dan toe steeds meer te weten en daarmee ook over het toekomstige verloop van verschijnselen. Op basis van deze nieuwe informatie zouden we betere berekeningen kunnen maken en mogelijk betere beslissingen kunnen nemen.

Het instandhouden van de mogelijkheid om een investeringsbeslissing nog aan te kunnen passen, heeft daarom een zekere waarde die de 'optiewaarde van uitstel' heet. Omdat kennis altijd toeneemt, is de 'optiewaarde van uitstel' bruto een positief bedrag. Dit bedrag verdwijnt op het moment dat het besluit tot investeren onherroepelijk is genomen en verhoogt daardoor

als het ware de investeringskosten. Het verlies van de optiewaarde is niet in de bovenstaande berekeningen meegenomen.

Tegenover de bruto waarde van de optie staat de te betalen optiepremie. De optiepremie is hier het verschil tussen de toename van de verwachte schade door niet te investeren en het rentevoordeel van niet investeren, beide gedurende de periode van uitstel. Omdat het alleen gaat om uitstel na het optimale moment van investeren volgens de rechttoe-rechtaan berekening, is de optiepremie per definitie altijd een positief bedrag en stijgt deze bovendien snel naarmate het verschil met het optimale tijdstip groter wordt. De maatschappij heeft alleen voordeel bij uitstel ten opzichte van het optimale tijdstip uit de rechttoe-rechtaan berekening, als de 'optiewaarde van uitstel' groter is dan de optiepremie. Onmiddellijk na het optimale tijdstip is dat het geval. Meenemen van het verlies aan de positieve 'optiewaarde van uitstel' bij investeren betekent theoretisch per saldo dat het investeringsmoment iets naar de toekomst wordt geschoven.

De vraag is of we nog iets kunnen zeggen over de praktische betekenis van de 'optiewaarde van uitstel'. Hoewel een echte berekening de strekking van dit onderzoek ver te buiten gaat, laat een tentatieve benadering zien dat het om niet veel meer kan gaan dan een uitstel van enkele weken, als het al zoveel is.

Het bepalen van de optiewaarde is allerm minst een eenvoudige zaak. Immers het gaat om de waarde die we kunnen ontleen aan meer informatie over toekomstige processen. Daarbij kan het uitstel vermoedelijk nooit gaan om lange perioden, dus laten we eens denken aan maximaal een jaar. De meeste informatie heeft dan nauwelijks invloed op het maken van nieuwe schattingen over de toekomst. Alleen in extreme situaties, zoals de extreem hoge afvoer in 1993 en 1995, is nieuwe informatie direct relevant. In dat geval weten we zeker dat herschatten van de extreme waarden verdeling van waterstanden (de zgn. 'werklijn') met deze extra waarneming een duidelijke verschuiving van de lijn oplevert, zodat het verstandiger is om meer en eerder te investeren dan we dachten.⁹³ De kans op zulke informatie is – uitgaande van de huidige inzichten over de werklijn – gering, dwz hoogstens in de orde van grootte van 1/200. Het is zeer onwaarschijnlijk dat andersoortige informatie gedurende een jaar zo zwaar zou wegen dat er tot minder grote maatregelen geconcludeerd zou worden.

De in de hoofdtekst berekende verhogingen zijn zo groot dat er bij optimaal investeren altijd een zeer aanzienlijke verbetering van het beschermingsniveau wordt bereikt.⁹⁴ In de hoofdtekst staat in paragraaf 5.10 een variant beschreven met eerst investeren volgens de strategie die bij de huidige kennis optimaal is, terwijl direct daarna blijkt dat de echte overstromingskans het dubbele was. Uit tabel 5.9 blijkt dat het verschil tussen niet meer direct kunnen reageren en nog

⁹³ In de praktijk gebeurt zelfs dat niet. Het Deltaplan Grote Rivieren ging uit van het op korte termijn bereiken van de oude doelstelling van 15 dzd m³/s. De aanpassing van het doel is het project Ruimte voor de Rivier, dat de aanpassing gereed beoogd te hebben in 2015, dus ongeveer 20 jaar na de zeer hoge waterstanden. Zie ook de volgende voetnoot.

⁹⁴ Dat geldt dus beslist niet voor beslissingen waarin niet is gelet op robuust investeren. Zo moeten in het kader van Ruimte voor de Rivier dijken worden verhoogd die in het kader van Deltaplan Grote Rivieren zelfs bij verlegging nieuw zijn gedimensioneerd op 15 dzd m³/s. Dit terwijl ook het Deltaplan Grote Rivieren al een reactie was op de extreme afvoeren in 1993 en 1995 en de nieuwe informatie dus al aanwezig was!

wel voor 2015 kunnen reageren, een contante waarde heeft van 180 mln euro of 2% van alle kosten. Rekening houdend met de kans van optreden is de werkelijke informatiewaarde van een optie tot uitstel van bijvoorbeeld een jaar dus uiterst gering en zeker niet meer dan een miljoen euro voor alle onderzochte dijkringen samen, als het al zoveel is.

Maar, zoals gezegd, hiervan moet nog de waarde van de optiepremie worden afgetrokken. Die premie is niet gering. Immers, uitstel is pas echt actueel aan de onderkant van het veiligheidsinterval als de kans op overstromen rond zijn maximaal toegelaten waarde zit. Uitstel kan dus ook betekenen dat we net die overstroming wel krijgen, die we niet gehad zouden hebben als we toch vorig jaar geïnvesteerd hadden. Op het moment van de optimale investering valt het rentevoordeel van uitstel weg tegen de stijging van de verwachte schadekosten. (dit is de vergelijking voor het eerstejaarsrendement). Na een jaar zijn de verwachte maximale schadekosten van in totaal ruwweg 190 mln euro echter verder gestegen en wel, afhankelijk van de dijkkring, met 3 à 7%, zeg gemiddeld met 5% of 9,5 mln euro in het eerste jaar van uitstel. Dit is dus een minimumschatting van de optiepremie voor 1 jaar.⁹⁵

Conclusie is dat de bruto optiewaarde in het eerste jaar veel kleiner is dan de optiepremie over dat jaar. Dat wil zeggen dat de bruto optiewaarde slechts over een fractie van een jaar groter kan zijn dan de optiepremie.

⁹⁵ Het is nog een onderschatting van de kosten want deze zijn uitgerekend op basis van de gemiddelde trend en niet als een gemiddelde van de uitkomsten van afzonderlijke berekeningen per mogelijke toekomstige ontwikkeling (ongelijkheid van Tchebychef).

B Berekening van de parameters voor BER

B.1 Achtergrond en doel

In het gebied van de Benedenrivieren (BER) speelt niet alleen de rivierafvoer, gerepresenteerd door de werklijn in Lobith, een rol bij de kansverdeling van de waterstanden. Ook de wind en de waterstand op zee of het IJsselmeer hebben invloed op de overschrijdingskansen. De verdeling van de overschrijdingskansen wordt in BER vastgelegd door middel van de decimeringshoogte. De decimeringshoogte geeft het verschil in centimeters tussen de kruinhoogten die horen bij de overschrijdingskansen 1/1000 en 1/10000. Op de rand met BOR speelt wind nog geen belangrijke rol en valt de decimeringshoogte dus samen met de combinatie van de werklijn in Lobith en de plaatselijke Q/h-relatie. Meer naar zee toe neemt de gecombineerde decimeringshoogte af, ondanks de toenemende invloed van de wind. Decimeringshoogten zijn dus locatiespecifiek en niet uniform per dijkvak, laat staan per dijkkring.

Het RIZA heeft ten behoeve van dit onderzoek de gecombineerde decimeringshoogten uitgerekend langs de relevante dijktrajecten (Lodder, 2004). De voor dit onderzoek relevante variabelen zijn de gecombineerde decimeringshoogte D_g en de windfactor D_g/D_w . Daarnaast zijn in dit RIZA-memo voor een aantal locaties de verwachte veranderingen van de waterstanden in de toekomst aangegeven voor enige klimaatscenario's. Daarna is een RIZA-memo ontvangen waarin staat dat niet kan worden aangegeven welk type decimeringshoogte relevant is bij veranderingen in waterstanden (Chbab en Geerse, 2004). Hieronder wordt uiteengezet hoe al deze informatie is gebruikt in het rekeninstrument.

B.2 Omrekening van decimeringshoogte naar overschrijdingskansen

De overschrijdingskans P op tijdstip t is uit te rekenen met de volgende formule:

$$P_t = P_o e^{\alpha \eta t} e^{-\alpha(H_t - H_o)} \quad \text{voor } H_t \geq H_o \quad (\text{B.1})$$

waarin: P_t overstromingskansen (= overschrijdingskansen waterhoogte) in jaar t
 α decimeringparameter (exponentiële verdeling; 1/cm)
 η structurele stijging relatieve waterstand (cm/jaar)
 H hoogte van de dijk (cm)

Door de decimeringshoogte D_g zijn van deze functie op een moment twee punten bekend.

$$P_D = 1/1000$$

$$P_T = P_D e^{-\alpha D_g} = 1/10000$$

Daaruit volgt:

$$e^{-\alpha Dg} = 0,1 \quad \text{of} \quad \alpha = (\ln 10) / Dg \quad (\text{B.2})$$

Een lage Dg op een dijkvak betekent dus een hoge waarde voor α . Enerzijds houdt dit in dat er op een dergelijk dijkvak met weinig dijkverhoging een grote verbetering in overschrijdingskans kan worden bereikt (zie de rechter factor in (B.1)). Anderzijds betekent het ook dat een relatief gering aantal centimeters extra water al tot een grote verslechtering van overschrijdingskans leidt (zie de middelste factor in (B.1)).

Met behulp van de decimeringshoogten Dg uit het RIZA-memo (omgerekend in centimeters) kan zo voor ieder dijkvak de parameter α berekend worden.

B.3 Welke decimeringshoogte is relevant voor veranderingen in waterstanden?

Nu bekend is hoe waterstand en benodigde kruinhoogte met elkaar samenhangen, rijst de vraag hoe het zit bij veranderingen in waterstanden. Op het eerste gezicht lijken er twee redeneringen mogelijk:

1. Indien alle waterstanden hoger worden, schuiven alle belastingniveaus met min of meer diezelfde afstand op;
2. Een verandering in waterstand geeft niets anders dan een ander niveau en daarom moet ook op de verandering de windfactor gezet worden.

Uit berekeningen op het RIZA blijkt dat het in werkelijkheid nog ingewikkelder is. Voor drie locaties met elk drie verschillende dijkprofielen (waaronder profielen met bermen en werkelijk aanwezige profielen) blijkt 0,11 m verschil in toetspeilen een vermenigvuldigingsfactor bij de kruinhoogte op te leveren die ligt tussen 0,6 en 1,9.

We kunnen dus schrijven:

$$\eta_g = a \eta_w \quad (\text{B.3})$$

waarin	η_g	in de formules te gebruiken waterstandsverandering
	η_w	gerapporteerde waterstandsverandering (toetspeil, klimaat)
	a	windfactor

In geval 1 is a ongeveer gelijk aan 1. De factor a zal echter verschillen van 1 als:

- Golven dieptebeperkt zijn (bij hogere waterstanden voelen de golven de bodem minder, waardoor ze hoger kunnen worden en tot een hogere belasting op de dijk leiden.) Deze situatie doet zich o.a. voor bij hoge voorlanden.
- De dijk één of meer flinke bermen heeft (indien de bermafmetingen groot zijn t.o.v. de significante golfhoogte, zal deze afhankelijk van de waterstand een verschillende invloed hebben op de belasting.⁹⁶)
- De strijklengtes in de loop van de tijd aanzienlijk toenemen. (Bijvoorbeeld bij rivierverbreding.)

Voor de eerste twee punten zijn van belang voor het Hollandsch Diep. Daar kan a , zoals eerder vermeld, groter maar ook kleiner zijn dan 1. Een keuze voor een waarde van a die voor alle locaties geldt, valt dus niet te maken.

In het kader van dit project lijkt, als een soort middenweg tussen de mogelijke situaties, de keuze $a = 1$ plausibel: Die keuze sluit ook aan bij de rekenwijze bij RvdR. *Ergens langs de dijkkring* zal de veiligheid dan echter wel worden onderschat, maar niet overal langs de ring.

De keuze $a = 1$ is misschien wat aan de optimistische kant. Indien $\eta_w > 0$, wat in alle toepassingen zal gelden, is een iets veiliger keuze mogelijk door $a > 1$ te kiezen. Een praktische, maar zonder meer *pragmatische* keuze, is:

$$a = \frac{D_g}{D_w} \quad (\text{B.4})$$

Zoals gezegd zal, behalve in heel uitzonderlijke gevallen (waarin a net iets kleiner dan 1 is), dan gelden $a > 1$.

Voor keuze 2 volgt, vanwege (A.2) en het analogon daarvan voor alleen water,

$$\alpha_g \eta_g = \alpha_g \frac{D_g}{D_w} \eta_w = \alpha_g \frac{\ln(10) / \alpha_g}{\ln(10) / \alpha_w} \eta_w = \alpha_w \eta_w \quad (\text{B.5})$$

De producten $\alpha_w \eta_w$ en $\alpha_g \eta_g$ stemmen nu dus overeen, zodat bij keuze 2 het tijdseffect voor waterstanden en voor belastingen inclusief golven hetzelfde wordt

In het hoofdrapport zullen we normaliter steeds de parameters en uitkomsten geven met $a = 1$. De veiliger berekening met de windfactor (B.4) staat apart in paragraaf 4.4.

⁹⁶ De invloed van een berm is het grootst indien deze op het niveau van de stilwaterlijn ligt.

B.4 Berekening van de actuele overschrijdingskans in 2001

Naast kennis van de invloed van veranderingen (α) is het voor het uitrekenen van de actuele schadeverwachting ook nodig om een absoluut kansniveau te weten voor het jaar 2001. De echte kansen zijn echter niet bekend, ook niet voor het jaar 2000. Wel is bekend dat alle dijkkringen – mede door uitvoering van het Deltaplan Grote Rivieren – toen zodanig beveiligd waren dat zij aan de toenmalige normen (toetspeil 1996) voldeden. Daarom nemen we voorlopig aan dat de overschrijdingskans in 2000 in BER overal 1/2000 was. Met behulp van (B.1) is nu een berekening te maken voor de situatie in 2001.

$$P_1 = P_0 e^{\alpha \eta} \quad \text{met } t = 1 \text{ en } H_1 = H_0 \quad (\text{B.6})$$

Het niveau P_0 is de actuele kans in 2000, die hier verondersteld is 1/2000 te zijn. De parameter η is hier het verschil in toetspeil tussen 2001 en 1996, al dan niet opgehoogd met de windfactor Dg/Dw , zie paragraaf B.3.

Per door Lodder onderscheiden dijkvak is eerst het maximale verschil in toetspeil opgezocht.⁹⁷ Dit maximum is vermenigvuldigd met de lokale windfactor. Invulling van (B.6) per dijkvak geeft dan de actuele overschrijdingskans in 2001 per dijkvak, gegeven de veronderstelde overschrijdingskans in 2000. De hoogste kans per dijkkring geeft dan de actuele overschrijdingskans van die dijkkring.

Dit hoeft echter niet de echte overschrijdingskans te zijn, daar het mogelijk is dat er ter plekke in 2000 overhoogte aanwezig was. Daarom is voor het dijkvak met de grootste overschrijdingskans opgezocht wat de overhoogten op dat dijkvak waren in 2000.⁹⁸ Daarna is de berekening van (B.6) overgedaan met een voor overhoogte gecorrigeerd verschil in toetspeil. Bleef dit dijkvak het dijkvak met de grootste overschrijdingskans, dan was daarmee de berekening voor de dijkkring voltooid. Immers, eventuele overhoogte op niet-kritische locaties doet voor de overschrijdingskans van de dijkkring niet ter zake.

Als door rekening te houden met overschrijdingskans de overschrijdingskans bij het dijkvak niet meer de hoogste was van de dijkkring, is de berekening met de overhoogte herhaald voor het

⁹⁷ Voor dit doel ontvangen van het RIZA (J. Kind en H. Berger): Verschillen HR2001 HR1996 1.A.xls. Hieraan is per door Lodder aangegeven dijkvak het maximale onafgeronde verschil in toetspeil ontleend. De verschillen worden uitsluitend veroorzaakt door wijzigingen in ideeën over de waterstanden, niet door veranderingen in de ideeën over de invloed van wind. Het constant houden van de windfactor is volgens mail Lodder (RIZA) d.d. 26 maart 2004 geen bezwaar, omdat er geen verandering in de ideeën over wind is geweest.

⁹⁸ Voor dit doel ontvangen van het RIZA (J. Kind) een werkblad van WL dat door WL is gebruikt voor de Blokkendoos: Totaal_dijkoverhoogte (auteur: Van Schijndel). Hierin staan per halve kilometer de dijkoverhoogten links en rechts van de rivier. Eerst is gekeken naar de overhoogte op het kilometerpunt met het maximale verschil in toetspeil. Daarna is gecontroleerd of de combinatie van dit verschil en de overhoogte op andere locaties in het betreffende dijkvak niet tot grotere uitkomsten zou leiden. In dat geval is voor dat dijkvak de hoogste combinatie in centimeters genomen. Voor een dijkvak (Wantij) geeft het voornoemde bestand geen informatie. Voor het Wantij is de overhoogte ontleend aan het van het RIZA (J. Kind en Q. Lodder) ontvangen bestand van DWW: Grafiekdijkhoogten.xls. (auteur: R. Maat). Overhoogte is daarbij gedefinieerd als het verschil tussen de laagst aanwezige kruinhoogte en de dijktafelhoogte behorend bij het toetspeil 1996.

dijkvak met de dan grootste overschrijdingskans. In de praktijk ging dit meestal net zo lang door tot een dijkvak zonder overhoogte er als hoogste uitkwam.

Resultaat is een goede benadering van de werkelijke actuele overschrijdingskans per dijkkring voor 2001. Immers, door achteraf rekening te houden met overhoogte in 2000 is de berekende actuele kans voor 2001 niet meer afhankelijk van de in het begin gemaakte veronderstelling over de overstromingskans in 2000.

B.5 Vaststelling van η en α

Voor een aantal dijkvakken staat in Lodder (2004) de verwachte stijging van het toetspeil vanaf 2000 voor de klimaatscenario's laag, midden en hoog (in combinatie met de effecten van de verwachte morfologische veranderingen) voor 2015 en 2050 (dus over een periode van 15 en 50 jaar). Daarnaast zijn cijfers tot 2100 (100 jaar) vermeld voor het midden klimaatscenario, ontleend aan de Spankrachtstudie.⁹⁹ De daaruit volgende gemiddelde stijging in centimeters per jaar (eventueel vermenigvuldigd met de windfactor D_g/D_w , zie paragraaf B.3) is in principe de voor de berekening benodigde parameter η in de diverse scenario's. Als de windfactor van toepassing is, kunnen deze trends duidelijk uit elkaar gaan lopen.

Bij de omzetting van de parameters per locatie naar die per dijkkring doet zich nog het extra probleem voor, dat niet voor alle door Lodder onderscheiden dijkvakken een schatting van de trend is gemaakt. Door vergelijking van locaties zijn aan alle andere locaties de waarden toegevoegd van de dichtst bij gelegen locatie waarvoor wel gegevens aanwezig waren. In veel gevallen ontbrak informatie over locaties stroomopwaarts. Daarvoor is het geen probleem de trendwaarden te hanteren op het hoogst bekende punt. Die komen goed overeen met die welke voor BOR worden gebruikt. Aan de zeekant zijn hier en daar locaties waarvoor het vinden van een benadering meer problematisch is. Voor locatie 45 op het Eiland van Dordrecht aan het Haringvliet zijn van Lodder nog aanvullende gegevens ontvangen ontleend aan de schatting van de trends voor Moerdijk.

Eenzelfde aantal centimeters stijging heeft per locatie een verschillend effect op de verandering in de kans. Daarom is per locatie het product bepaald van de parameters α en η (voor het middenscenario tot 2050). De locatie met het grootste product is bepalend voor de toekomstige overschrijdingskans van de hele dijkkring. In de berekening worden daarom de bij deze locatie behorende parameters α en η gebruikt, verder de dijkkringparameters genoemd. Het blijkt dat dit voor vier dijkkringen op een locatie is waarvoor een echte schatting van de trend is gemaakt.¹⁰⁰ Voor de andere twee is een goede schatting mogelijk omdat er een bekend punt dichtbij ligt.

⁹⁹ Voor meer informatie zij verwezen naar Lodder (2004) en de oorspronkelijke bron Snippen, 2001.

¹⁰⁰ Het betreft voor dijkkring 15 locatie 3, dat is Lek km 980; voor dijkkring 16 locatie 20 benedenstrooms aan de Beneden Merwede, hiervoor is km 968 gebruikt; voor dijkkring 24 en 35 de tegenover elkaar liggende locaties 30 en 35, dat is Maas km 247. Voor dijkkring 23 is het locatie 36 (tegenover 28 op dijkkring 24), dat is Steurgat km 965. Voor dijkkring 22 is voor locatie 41 Wantij de tegenover liggende locatie Beneden Merwede km 968 gebruikt.

Doordat de lokale parameters α en η over het algemeen verschillen van de dijkkringparameters α en η , zijn er elders in het model aanpassingen nodig om ervoor te zorgen dat de dijkkringparameters overal goed uitwerken.¹⁰¹

B.6 Aanpassing van de schadeparameter ζ

Door het verschil in trendmatige stijging per locatie is er een aanpassing nodig bij de berekening van de parameter ζ , die de verandering van de schade bij overstroming weergeeft als gevolg van het verhogen van de dijken. Deze parameter wordt berekend uit het verschil in schade bij overstroming bij de huidige laagste kruinhoogte en bij een die 150 cm hoger ligt. Die berekening behoeft op zichzelf geen aanpassing. Wel moet een relatie worden gelegd tussen de verandering in dijkhoogte op het daarvoor relevante punt (namelijk het punt met de laagste kruinhoogte boven NAP) en de berekende dijkverhoging. De bovenstaande keuze voor de dijkkringparameters impliceert dat de berekende dijkverhoging in centimeters ook hoort bij de gekozen ‘reken’locatie. De aanpassingsparameter χ is:

$$\chi = u(\text{laagste dijkhoogte}) / u(\text{berekend}) \quad (\text{B.7})$$

Deze parameter wordt als volgt gebruikt:

$$\theta = \alpha - \chi\zeta \quad (\text{B.8})$$

Zie voor een toelichting op (B.7) en de berekening van χ hieronder bij de toelichting op κ . Met deze aanpassing kan verder worden gerekend met de dijkverhoging u die is gebaseerd op de dijkkringparameters.

In de praktijk blijkt dat bij drie van de zes dijkkringen de locatie die bepalend is voor de vaststelling van de dijkkringparameters α en η , tevens de locatie is met het laagste toetspeil (inclusief windopslag) boven NAP. Voor deze dijkkringen is de correctiefactor χ dus identiek aan 1. In de drie andere gevallen speelt de wind op de kritieke locatie een belangrijke rol. Daardoor wijkt de correctiefactor χ nogal van 1 af, namelijk 0,4 tot 0,8. Hoewel ζ slechts 5 à 10% bedraagt van α , heeft een dergelijke correctiefactor dus toch nog enige betekenis voor de waarde van θ .

¹⁰¹ Dit is in wezen niet anders dan bij BOR. Weliswaar gelden de werklijn en de trend voor alle locaties, maar de Q/H-relaties gelden plaatselijk. Daarmee wordt in principe rekening gehouden bij de berekening van de investeringskosten per dijkvak.

B.7 Dijkverhoging is verschillend per locatie maar de investeringsfunctie is per dijkkring dezelfde

De dijkverhoging die per dijkvak nodig is om op alle dijkvakken weer op eenzelfde (niveau van) overschrijdingskans te komen, is niet even groot. Er kan dus bij de bepaling van de investeringskosten niet zonder meer met één berekende dijkverhoging worden gewerkt. Als de variabele kosten op ieder dijkvak bijna even hoog zijn, kost iedere extra centimeter verhoging bij een zekere lengte evenveel. Het maakt dan niet uit waar de locatie van die extra centimeter is. We kunnen nu de investeringskosten berekenen met het gewogen gemiddelde van de benodigde dijkverhogingen per dijkvak. Deze gemiddelde dijkverhoging correspondeert dan met de correcte kansberekening op de kritieke locatie. De investeringskosten die bij het variëren van het gemiddelde behoren, komen dan precies overeen met de som van de verschillende investeringen op het hele traject.

De benodigde verhoging per dijkvak u_i om dezelfde overschrijdingskans te krijgen als op de rekenlocatie volgt uit de bekende omrekening van de omvang van het herhalingsinterval in centimeters en in tijd, namelijk:

$$u_i = \frac{\beta_i}{\theta_i + \lambda_i} D \quad (\text{B.9})$$

$$\text{met } \beta = \alpha\eta + \gamma \\ \theta = \alpha - \zeta$$

waarin u_i dijkverhoging op dijkvak i die correspondeert met dijkverhoging u
 D periode tussen twee dijkverhogingen

In bijlage A.9.2 is betoogd dat het tijdstip van investeren en daarmee de periode tussen de investeringen op alle plaatsen van een dijkkring gelijk is. De dijkverhoging op een dijkvak hangt dan af van de parameterwaarden op dat dijkvak.¹⁰² De verhouding tussen de dijkverhogingen is dan:

$$\kappa_i = \frac{u_i}{u} = \frac{\beta_i (\theta + \lambda)}{(\theta_i + \lambda_i) \beta} \quad (\text{B.10})$$

Als we even de parameters γ , λ en $\chi\zeta$ zouden verwaarlozen, dan versimpelt de formule tot de verhouding van de trends in de waterstandsstijging:

¹⁰² Let wel dat de rekenlocatie zo is gekozen dat het product $\alpha\eta$ en daarmee β op die locatie het grootste is. De rekenlocatie is dus de locatie met de grootste stijging in verwachte schade gedurende de periode waarin niet geïnvesteerd wordt.

$$\kappa_i \approx \frac{\eta_i}{\eta} \quad (\text{B.11})$$

en dat is precies wat we in hydraulisch opzicht zouden verwachten.

Echter, in ieder geval is de waarde van γ niet verwaarloosbaar ten opzichte van het product $\alpha\eta$. Daardoor gaat ook de waarde van α een rol spelen in de breuk. De waarde van de lokale θ (d.w.z. α) kan zoveel kleiner zijn dan die waarmee wordt gerekend, dat κ ook groter kan zijn dan 1. De dijkverhoging u_i per dijkvak is dan in centimeters groter dan de berekende dijkverhoging u , ook al is de daarmee plaatselijk samenhangende verandering van de kans kleiner.

De κ_i kunnen per dijkring worden samengewogen met de lengte van het dijkvak:

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{L} \sum_i l_i \kappa_i \quad (\text{B.12})$$

met $L = \sum_i l_i$

waarin l_i	lengte dijkvak
L	lengte dijkring
$\bar{\kappa}$	gemiddelde correctiefactor dijkverhoging

Dit is de in de investeringsfunctie te gebruiken correctiefactor κ . Bij de berekening van de investeringskosten moet nu worden gerekend met $I(\kappa u)$ of $I(\kappa X)$ in plaats van met $I(u)$ of $I(X)$. De afgeleide wordt dan $\kappa I'(\kappa u)$ of $\kappa I'(\kappa X)$ in plaats van $I'(u)$ of $I'(X)$. De vermenigvuldigingsfactor slaat dus niet op de kosten, maar op de daarin te gebruiken dijkverhoging. Immers, de vaste kosten blijven dezelfde. Zoals gezegd mag deze werkwijze alleen als in de investeringsfunctie de variabele kosten overal ongeveer gelijk zijn. Anders moet de procedure uit de volgende paragraaf worden gebruikt.

B.8 Investeringsfunctie verschilt per dijkvak

De dijkringen in BER liggen soms aan verschillende riviertakken en ook de intensiteit van de bebouwing kan heel verschillend zijn. Dit impliceert verschillende kostenfuncties per dijkvak. Daarom is het ook goed te kijken naar de combinatie van verschillende parameters en verschillende investeringsfuncties.

Zoals boven gezegd, zijn alle dijkverhogingen u_i in een dijkring rechtevenredig met elkaar en dus met een vaste factor in elkaar om te schrijven. Anders gezegd, wanneer we op een plaats weten wat er aan de dijkhoogte moet veranderen, dan weten we dat via deze vaste factoren κ_i ook voor alle andere plaatsen. Bij de investeringen kunnen de totale kosten per dijkring worden uitgerekend als de som van de investeringskosten per dijkvak. In formule:

$$I(u_b) = \sum_i I_i(u_i) \quad (\text{B.13})$$

waarin $I_i(u_i)$ investeringskostenfunctie op dijkvak i met dijkverhoging u_i
 u_i dijkverhoging op dijkvak i die correspondeert met dijkverhoging u_b

Daarnaast moet ook de afgeleide van $I(u_b)$ worden berekend voor de variatie op het gekozen dijkvak. In het algemeen kan dit alleen numeriek worden uitgerekend.¹⁰³ In het bijzondere geval van lineaire investeringsfuncties kunnen zowel de vaste als de variabele kosten afzonderlijk met (B.13) worden berekend. Als bovendien de variabele kosten op alle dijkvakken gelijk zijn, levert (B.12) hetzelfde resultaat als (B.13).

Vermoedelijk komt er niet tijdig voor veel dijkringen voldoende informatie beschikbaar om deze berekening uit te voeren. Als standaard voor BER nemen we de gewogen gemiddelde κ uit (B.12). Daarmee vermenigvuldigen we de parameters λ en b in de investeringsvergelijking, zie verder bijlage C.5.

B.9 IJsseldelta

Wat geldt voor BER, geldt in principe ook voor de twee dijkringen in de IJsseldelta: 10 Mastenbroek en 11 IJsseldelta. Voor dit gebied is echter nog geen geschikt gecombineerd wind/watermodel aanwezig. Daarom is in Lodder (2004) gekeken naar locaties in BER met een vergelijkbare strijklengte als langs de IJssel in de IJsseldelta. De vergelijkbare locaties blijken in BER hoog op de rivieren te liggen in de buurt van BOR. Daar wijkt Dg niet merkbaar af van Dw. Daarom is er geen reden om voor de IJsseldelta een correctie aan te brengen langs de IJssel. De gedeelten van deze dijkringen die aan andere wateren grenzen dan aan de IJssel, zijn niet in het onderzoek voor Ruimte voor de Rivier betrokken.

Er wordt bij deze twee dijkringen, net zoals bij de andere dijkringen in BOR, dus gerekend met de parameters van het meest bovenstroomse punt. Daar is de verandering in waterstanden en de daarvoor benodigde verandering in dijkhoogte het grootst. Mogelijk worden daardoor de investeringskosten licht overschat. Maar de verschillen tussen Dg op diverse punten vermeld bij Lodder (2004) zijn zo gering dat dit verder nauwelijks materiële betekenis kan hebben voor de uiteindelijke resultaten.

¹⁰³ De in deze paragraaf beschreven procedure is ingebouwd in het rekeninstrument van HKV voor BOR.

C Verwerking investeringsinformatie

C.1 Basisinformatie

Werkwijze op hoofdlijn

Op verzoek van het CPB hebben de Bouwdienst en DWW aan de combinatie ARF van de drie ingenieurbureaus Arcadis, Royal Haskoning en Fugro gevraagd om investeringsgegevens op te stellen per dijkkring. Dit is per dijkvak uitgevoerd door, startend vanuit de huidige situatie, te benaderen hoeveel investeringskosten zijn gemoeid met steeds verdergaande verhogingen van de dijken of andere waterkeringen tot 1,5 m. De keuze voor 1,5 m als eindpunt is gemaakt omdat dit voor het gebied van de bovenrivieren ver ligt boven hetgeen is vereist om 18 dzd m³/s bij Lobith te kunnen verwerken. Daarmee is het ongeveer de grens van hetgeen nu nog redelijkerwijs beoordeelbaar en inschatbaar is. Bij de dijkverhogingen is in het begin rekening gehouden met aanwezige overhoogte ten opzichte van het toetspeil van 1996 (afvoer van 15 dzd m³/s, situatie in 2000). Kunstwerken zijn meegenomen als een apart dijkvak. Per dijkvak is nu bekeken welk type verhoging bij iedere verdere stap van 25 cm opportuun is. Per type verhoging worden lineaire kostenfuncties gebruikt.

Na de vaststelling van de bedragen per dijkvak worden deze gesommeerd tot die van de dijkkring. Daarbij zijn alleen de dijkvakken meegeteld die direct grenzen aan de Rijn(takken) dan wel aan het benedenstroomse deel van de Maas, voorzover daarvan dijkkringen in het onderzoek zijn betrokken. Dat zijn de BER dijkkringen 22 Biesbosch (Noordwaard), 24 Land van Heusden en Altena en 35 Donge. Wel meegeteld zijn de dijken langs de zijwateren, zoals de Donge, voorzover die in open verbinding staan met de hoofdrijver en door de waterstanden aldaar worden beïnvloed.

Voor zes dijkkringen is gedetailleerde informatie per dijkvak verzameld:

- 10 Mastenbroek;
- 22 Eiland van Dordrecht;
- 43 Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden (deel van de dijkkring);
- 44 Kromme Rijn (uitsluitend het deel langs de rivier);
- 47 Arnhemse en Velperbroek.
- 50 Zutphen

Voor de overige 16 dijkkringen is dit globaler gebeurd op basis van gelijkenis van de daarin onderscheiden dijkvakken met wel bekeken dijkvakken in de zes onderzochte dijkkringen. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de werkwijze zij verwezen naar het rapport van ARF. In het algemeen is het onderzoek gericht geweest op het geven van globale indicaties van de orde van grootte van de kosten en het verloop daarvan. Daarbij zijn voor de onderzochte dijkkringen globale schematisaties gebruikt en is bij de niet-onderzochte dijkkringen alleen

gekeken naar de gelijkenis van dijkvakken, zonder daarbij na te gaan of de voor het onderzochte dijkvak aangegeven constructies ook goed passen bij de niet-onderzochte dijkvakken. ARF wijst er verder op dat niet is gekeken naar de invloed van zettingen en dat voorliggende waterkeringen niet in de studie zijn betrokken.

Invloeden op de investeringskosten

Stijging van de investeringskosten samenhangend met de stapsgewijze verhoging komt dus niet alleen voort uit het feit dat het om steeds meer centimeters gaat, maar kan dus mede zijn veroorzaakt door:

- Verder ontbreken van overhoogte op een dijkvak zodat vanaf dat moment daar geïnvesteerd moet worden;
- Het overstappen op een ander, meestal duurder type constructie;
- Het nodig zijn van een zeer grote ingreep, bijvoorbeeld de complete vervanging van een sluizencomplex;
- Het laatste geval kan gezien worden als een combinatie van de eerste twee gevallen, maar het lijkt praktisch handig dit afzonderlijk te onderscheiden.

C.2 Investeringskostenfunctie in model

In het gebruikte model gaat het om de kostencurve van een investeringsactie die na enige tijd herhaald kan worden. Overhoogte speelt in die kostencurve dus geen rol.¹⁰⁴ Verder is bij de theoretische afleiding expliciet aangenomen dat de investeringskosten niet veranderen in de tijd.¹⁰⁵ Mede op basis van de ontvangen investeringsinformatie over de eerste drie dijkringen is het theoretische model uitgebreid. De investeringskosten mogen nu wel afhankelijk zijn van de hoogte van de dijk, zie A.8. Daarmee kunnen het tweede en derde bovengenoemde punt waarom investeringskosten extra kunnen stijgen, worden benaderd. Tot slot is impliciet aangenomen dat per dijkring met één investeringsfunctie kan worden volstaan.

Voor de investeringsfunctie is wegens de kromlijngheid van de ontvangen investeringsinformatie een combinatie van een lineaire en een exponentiele curve geschat, zie ook bijlage A.6.2. In algemene termen geldt:

$$I(u) = (c + bu) e^{\lambda u} \quad (C.1)$$

¹⁰⁴ Daar in het model het begrip toetspeil niet voorkomt, heeft ook het begrip overhoogte daarin geen plaats. Wel telt natuurlijk de gehele hoogte van de dijk mee om de actuele overschrijdingskans te bepalen.

¹⁰⁵ Ook deskundigen gaan ervan uit dat investeringskosten reëel constant blijven in de tijd. De diverse benaderingen van de investeringskosten aan de zuidzijde van Centraal Holland in Kind(2004) bevestigen die indruk.

waarin: I totale kosten van de dijkverhoging in de betreffende dijkkring in mln euro's.
 u aantal centimeters waarmee de dijk wordt verhoogd.
 λ, b, c constanten.

Vergelijking (C.1) geeft een meer dan lineaire toename van de kosten indien zowel het lineaire gedeelte als λ positief zijn. Dus zowel:

$$c + bu > 0 \quad (C.2)$$

en

$$\lambda > 0 \quad (C.3)$$

Aan deze ongelijkheden wordt voldaan indien alle constanten positief zijn. Daarbij geldt dat de curve meer gekromd is naarmate λ groter is.

C.3 Verwerking informatie

De geleverde informatie sluit niet direct aan bij het type investeringsinformatie dat in de berekening is vereist. Aan de stijging door de overhoogte is niet veel te doen zonder diep in de materie te duiken. Daarvoor ontbrak de tijd.¹⁰⁶ Gevolg is dat in de schatting de kromming van de functies wordt overschat en het lineaire effect onderschat. Daarom moest bij bijna alle schattingen worden ingegrepen om minimaal de laagste lineaire stijging in de schattingen te behouden. De resterende kromming is dan groot genoeg om meestal duidelijk uit te komen boven de laagste vaste kosten.

Explosieve stijging van de investeringsbedragen doet zich over het algemeen pas voor bij stijgingen boven de 1,5 m. Daar de cijfers echter niet verder lopen dan 1,5 m, blijven dit soort constructies meestal buiten beeld. Bij eventuele vervanging van dergelijke constructies uit veiligheidsoverwegingen moet er ook op worden gelet dat zij na verloop van tijd vaak ook om technische redenen al vervangen moeten worden. Verder kan worden aangenomen dat extreem dure constructies vermeden zullen worden door op dat moment over te schakelen op een andere oplossing dan dijkverhoging.

Niettemin ontbreken dergelijke gevallen ook bij verhogingen tot 1,5m niet geheel in de gedetailleerd bekeken dijkkringen. Daardoor spelen deze verhogingen ook een rol in de afgeleide dijkkringen. Dit uit zich als een sprong in de kosten bij 1,5 m. Dit is vooral merkbaar bij de

¹⁰⁶ De laatste cijfermatige investeringsinformatie is ontvangen op 30 juni 2004.

dijkringen 45, 47, 48, 49 en 51, maar komt ook bij andere dijkringen voor. Deze sprong heeft een forse invloed op de schattingsresultaten.

C.4 Schattingsresultaten investeringskostenvergelijking

Vergelijking (C.1) is voor iedere dijkkring geschat met behulp van de expertgegevens over de kosten van dijkverhogingen. De cijfers gelden voor het jaar 2003. De resultaten staan in de tabellen C.1 en C.2.

Tabel C.1 Coëfficiënten van de investeringsvergelijkingen per dijkkring, per kilometer dijk, en de dijklengthe in het bovenrivierengebied

Nr.	Naam dijkkring	Lengte dijk	λ	b	C
		km	1/cm	mln euro/cm	mln euro
38	Bommelerwaard	28	0,0040	0,0200	0,6954
40	Heerewaarden (Waalkant)	4	0,0026	0,0200	1,1720
41	Land van Maas en Waal	37	0,0033	0,0200	1,2716
42	Ooij en Millingen	18,5	0,0019	0,0200	0,9438
43	Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaard	172	0,0043	0,0200	1,5847
44	Kromme Rijn	29	0,0054	0,0200	0,6602
45	Gelderse Vallei	5,5	0,0069	0,0200	0,5000
47	Arnhemse en Velperbroek	14	0,0026	0,0200	0,5000
48	Rijn en IJssel	57	0,0063	0,0200	0,5000
49	IJsselland	32	0,0046	0,0200	0,5000
50	Zutphen	13	0,0000	0,0200	0,5000
51	Gorssel	24	0,0071	0,0200	0,5000
52	Oost Veluwe	64,5	0,0047	0,0200	0,6124
53	Salland	46,5	0,0028	0,0200	1,1950
10	Mastenbroek	14,5	0,0014	0,0345	0,9210
11	IJsseldelta	25	0,0000	0,0546	1,3638

Tabel C.2 Coëfficiënten van de investeringsvergelijkingen per dijkkring, per kilometer dijk, en de dijklengthe in het benedenrivierengebied

Nr.	Naam dijkkring	Lengte dijk	λ	b	c
		km	1/cm	mln euro/cm	mln euro
15	Lopiker- en Krimpenerwaard	45	0,0098	0,0200	2,2302
16	Alblasserwaard en Vijfheerenlanden	85	0,0100	0,0200	3,0476
22	Eiland van Dordrecht	37,5	0,0066	0,0200	3,3124
23	Biesbosch (Noordwaard)	21	0,0034	0,0200	1,0082
24	Land van Altena	43	0,0059	0,0200	1,3338
35	Donge	27,5	0,0088	0,0200	1,4443

In veel gevallen kwam de coëfficiënt b in de schatting negatief uit. Gevolg is dat de stijging meer dan geheel in het kromlijnnige gedeelte van de functie tot uitdrukking kwam. Dit wordt mede veroorzaakt doordat er in het begin ook nog extra – en dus kromlijnnig werkende – stijging

in de gegevens zit door het langzaam wegvallen van overhoogte. In de gevallen dat b lager uitkwam dan 0,02, is de schatting overgedaan met deze coëfficiënt geprikt op 0,02. Dit is de laagste lineaire stijging in de door de experts gebruikte kostenfuncties.

Bij de eerder genoemde dijkringen met een relatief grote sprong in de kosten tussen 1,25 m en 1,5 m heeft de schatting juist de neiging om te weinig rekening te houden met kromming en teveel te gaan in een lineaire richting. Dan kwamen de vaste kosten soms zeer laag of negatief uit. In die gevallen zijn ook de vaste kosten gezet op het minimum van 0,5 mln euro per km en is de vergelijking daarmee overgeschat. Uiteindelijke schattingsresultaten staan in tabel C.1 en C.2.

Schattingen voor de dijken langs de Maas

Parallel aan het onderzoek Ruimte voor de Rivier loopt het onderzoek naar de rampenstrategie, RBSO, waaronder de discussie over de noodoverloopgebieden. Ook daarover zal in het kader van de PKB iets worden meegedeeld. In het RBSO-onderzoek is het bovengenoemde onderzoek van ARF uitgebreid met een onderzoek naar de in tabel C.3 vermelde dijkringen (ARF, 2004b). Voor de volledigheid vermelden we ook die resultaten hier, hoewel ze binnen het kader van deze veiligheidsstudie geen rol spelen.

Tabel C.3 Coëfficiënten van de investeringsvergelijkingen per dijkkring, per kilometer dijk, en de dijk lengte langs de Maas

Nr.	Naam dijkkring	Lengte dijk	λ	b	c
		km	1/cm	mln euro/cm	mln euro
36	Maaskant	100	0,0022	0,0270	0,9994
38	Bommelerwaard (Maas)	20	0,0002	0,0359	0,8677
40	Heerewaarden (Maas)	3	0,0061	0,0200	0,5548
41	Land van Maas en Waal (Maas)	47	0,0002	0,0359	0,8677

Alleen bij dijkkring 40 bleek de geschatte coëfficiënt voor b te laag en is deze opgehoogd naar 0,02. Bij de dijkringen 38 en 41 zijn de kostenfuncties langs de Maas nagenoeg lineair.

C.5 Cijfers gebruikt in berekening

De geschatte coëfficiënten zijn opgehoogd met de contante waarde van de onderhoudskosten. De jaarlijkse onderhoudskosten van dijken worden ruw geschat op 1% van de investeringskosten. Dit komt contant gemaakt met een discontovoet van 4% overeen met een opslag van 25%. Die opslag is toegepast op de coëfficiënten c en b.

Verder zijn deze twee coëfficiënten vermenigvuldigd met de lengte van de dijk. Deze cijfers zijn afkomstig van ARF en sporen geheel met de door hen onderscheiden dijkvakken die grenzen aan de rivier.

Tot slot wordt bij BER in de berekening nog een correctie toegepast om rekening te houden met verschillende waterhoogten langs de dijkkring. Daartoe worden de parameters λ en b vermenigvuldigd met κ , zie daarvoor bijlage B, paragraaf 7 en 8.

De cijfers in tabel 3.6 van het rapport geven de kosten van dijkverhoging per kilometer dijk bij verhogingen van 50, 75 en 100 cm, zoals die kosten volgen uit de geschatte vergelijkingen.

D Veranderingen in de waterstand

Tabel D1 Veranderingen in waterstand voor 18000 m³/s ten opzichte van 15000 m³/s.

		Belaste dijkring	Ooij en Millingen	Rijn en IJssel	Land van Maas en Waal	Betuwe, Tieler- en Culemborger Waarden	Heerewaarden	Bommelerwaard	Arnhemse- en Velpsebroek	Gelderse Vallei	Kromme Rijn	IJsselland	Zutphen	Gorssel	Oost Veluwe	Salland	Mastenbroek	IJsseldelta
		km	866	858	887	869	921	929	880	903	927	902	922	931	913	942	981	978
Doorgebroken dijkring	km	nr	42	48	41	43	40	38	47	45	44	49	50	51	52	53	10	11
Geen (referentie 18000)			0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.64	0.59	0.60	0.69	0.65	0.66
Ooij en Millingen	866	42	0.39	0.63	1.12	0.50	1.13	1.12	0.36	0.32	0.33	0.30	0.31	0.28	0.29	0.35	0.32	0.33
Land van Maas en Waal	887	41	0.61	0.78	0.00	0.55	-0.04	-0.05	0.48	0.44	0.43	0.41	0.43	0.39	0.40	0.47	0.44	0.45
Heerewaarden	921	40	0.81	0.93	0.67	0.83	0.16	0.14	0.68	0.62	0.62	0.58	0.60	0.56	0.56	0.65	0.62	0.63
Bommelerwaard	929	38	0.82	0.93	0.69	0.84	0.05	0.01	0.68	0.62	0.62	0.58	0.61	0.56	0.57	0.66	0.62	0.63
Arnhemse- en Velpsebroek	880	47	0.73	0.87	0.71	0.74	0.71	0.70	-0.01	-0.05	-0.09	1.82	1.91	1.79	1.80	2.00	1.93	1.96
Gelderse Vallei	903	45	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.64	0.59	0.60	0.69	0.65	0.66
Kromme Rijn	927	44	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.62	0.50	0.61	0.64	0.59	0.60	0.69	0.65	0.66
IJsselland	902	49	0.85	0.95	0.85	0.89	0.86	0.85	0.70	0.64	0.64	0.01	0.54	0.49	0.11	0.58	0.54	0.55
Zutphen	922	50	0.86	0.95	0.85	0.89	0.86	0.85	0.71	0.65	0.65	0.43	0.01	0.58	0.28	0.68	0.63	0.65
Gorssel	931	51	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.65	0.58	0.54	0.38	0.54	0.65	0.61	0.63
Oost Veluwe	913	52	0.85	0.95	0.85	0.89	0.86	0.85	0.70	0.64	0.64	0.04	0.00	-0.03	0.01	-0.08	0.33	0.33
Salland	942	53	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.65	0.56	0.46	0.13	0.51	0.02	-0.05	-0.04
Mastenbroek	981	10	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.64	0.58	0.60	0.67	0.43	0.45
IJsseldelta	978	11	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.62	0.54	0.59	0.60	0.12	0.13

Tabel D2 **Veranderingen in waterstand voor 18000 m³/s ten opzichte van 15000 m³/s.**

		Belaste dijkkring	Ooij en Millingen	Rijn en IJssel	Land van Maas en Waal	Betuwe, Tieler- en Culemborger Waarden	Heerewaarden	Bommelerwaard	Arnhemse- en Velpsebroek	Gelderse Vallei	Kromme Rijn	IJsselland	Zutphen	Gorssel	Oost Veluwe	Salland	Masterbroek	IJsseldelta
		km	866	858	887	869	921	929	880	903	927	902	922	931	913	942	981	978
Doorgebroken dijkkring	Km	nr	42	48	41	43	40	38	47	45	44	49	50	51	52	53	10	11
Geen (referentie 18000)			0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.64	0.59	0.60	0.69	0.65	0.66
Rijn en IJssel	858	48	-0.01	0.00	-0.04	-0.02	-0.07	-0.08	0.16	0.15	0.15	2.96	3.11	2.94	2.94	3.24	3.15	3.20
Rijnstrangen incl. 3-dorpenpolder	858	48RS	0.30	0.13	0.35	0.36	0.35	0.35	1.27	1.15	1.15	1.08	1.12	1.04	1.05	1.18	1.12	1.14
Rijn en IJssel excl. Rijnstr. / 3-dorpenpolder	874	48EX	0.86	0.96	0.85	0.89	0.86	0.85	0.72	0.65	0.66	0.61	0.64	0.59	0.60	0.69	0.65	0.66
Betuwe, Tieler- en Culemborger Waarden	868	43	0.07	0.44	-0.01	0.00	-0.04	-0.04	0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
Betuwe	868	43B	0.07	0.44	-0.01	0.00	-0.04	-0.04	0.01	0.52	2.42	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01
Betuwe Oost	868	43BO	0.07	0.44	-0.01	0.00	-0.04	-0.04	0.05	1.81	2.42	0.04	0.05	0.05	0.04	0.07	0.07	0.07
Betuwe West	906	43BW	0.75	0.88	0.38	0.75	-0.02	-0.03	0.65	1.16	2.77	0.55	0.58	0.53	0.54	0.63	0.59	0.60
Tieler- en Culemborger Waarden	913	43TC	0.77	0.90	0.50	0.78	-0.01	-0.02	0.64	0.58	0.58	0.55	0.57	0.53	0.53	0.62	0.58	0.59