

De werking van het waterkeringsysteem: de dijkring voorbij?



Naar een doelmatiger inrichting op basis van
risicobenadering en systeemanalyse

De werking van het waterkeringsysteem: de dijkkring voorbij?

**Naar een doelmatiger inrichting op basis van risicobenadering
en systeemanalyse**

Herman van der Most & Frans Klijn

1206262-015

Titel

De werking van het waterkeringsysteem: de dijkkring voorbij?

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1206262-015

Kenmerk

1206262-015-VEB-0001

Pagina's

53

Trefwoorden

Hoogwaterbescherming, waterveiligheid, waterkering, dijk, dijkkring, systeemwerking

Voorwoord

In het huidig waterkeringsysteem staan individuele dijkkringen centraal. En er gelden uniforme eisen voor alle dijkvakken / kunstwerken binnen één dijkkring. Met het hanteren van deze uitgangspunten wordt ingeboet op doelmatigheid van investeringen in hoogwaterbescherming, terwijl tevens ongewenste systeemwerking (cascade-effecten) tussen dijkkringen kan optreden, die afbreuk kan doen aan de robuustheid van het systeem. In verscheidene recente studies is aan deze beperkingen aandacht gegeven en zijn gedachten ontwikkeld om de inrichting van het waterkeringsysteem verder te optimaliseren.

Inzichten uit deze studies worden in deze verkenning benut om de contouren te schetsen van een meer doelmatige en robuuste inrichting van het waterkeringsysteem. Kern daarvan is het versterken van de *samenhang* in de eisen aan de verschillende onderdelen van het waterkeringsysteem op basis van een risicobenadering. De contouren voor zo'n doelmatiger en robuustere inrichting worden in deze verkenning uitgewerkt langs een viertal lijnen:

- Herwaardering van compartimentering en heroverweging van de formele positie van c-keringen.
- Meer differentiatie in beschermingsniveau (tussen dijkkringen en tussen dijkkringdelen).
- Eisen aan b-keringen beter afstemmen op het achterliggende gebied.
- Systeemdijken op meest kwetsbare delen van het systeem.

Deze lijnen zijn niet nieuw; de meerwaarde van de onderhavige verkenning zit in de bundeling van deze lijnen. De lijnen worden in deze verkenning afgeleid uit een analyse van de werking van waterkeringsysteem. Daarbij volgen we de loop van het water bij het ontstaan en het verloop van een overstroming. De achterliggende vraag daarbij is steeds of ten opzichte van de huidige inrichting van het waterkeringsysteem andere keuzen kunnen worden gemaakt die leiden tot een doelmatiger en robuustere inrichting van het waterkering systeem?

Deze verkenning is uitgevoerd door Deltares in opdracht van de Waterdienst (thans Dienst Water Verkeer en Leefomgeving).

Referenties

1206262.015/ 1207834.012

Versie	Datum	Auteurs	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
12	juni. 2013	Van der Most, Klijn				Van de Guchte	

Status

definitief

Samenvatting

Huidige inrichting van het waterkeringsysteem kent beperkingen

Deze verkenning van de *inrichting* van het waterkeringsysteem richt zich op de situering van waterkeringen en de aan de keringen te stellen eisen. Onder het waterkeringsysteem wordt daarbij verstaan het geheel van waterkeringen en andere waterbouwkundige werken, dat erop is gericht om gebieden langs de kust, rivieren en grote meren te beschermen tegen overstromingen.

Het huidige waterkeringsysteem is ontwikkeld na de stormvloedramp van 1953. Het gaat hoofdzakelijk uit van (individuele) *dijkringen*. Voor de dijkvakken en kunstwerken binnen een dijkkring gelden uniforme eisen. Hoewel de huidige werkwijze, met een periodieke toetsing, in de kern heel krachtig is, kent het huidige systeem ook aan aantal beperkingen. Zo kunnen vanuit een perspectief van doelmatigheid ongewenst lage dan wel onnodig hoge eisen worden gesteld. Met het (meer) volwaardig toepassen van een risicobenadering zijn naar verwachting belangrijke besparingen mogelijk bij de verbetering van b- en c-keringen alsook bij de normstelling van a-keringen (differentiatie van eisen binnen een dijkkring). Een goed gekozen inrichting van het waterkeringsysteem kan tevens bijdragen aan een grotere robuustheid van het overstromingsrisicosysteem als geheel. Een systeem dat blijft functioneren als het allemaal toch wat anders uitpakt dan voorzien.

Analyse van de werking van het waterkeringsysteem

De verkenning beoogt allereerst inzicht te bieden in de werking van het huidige waterkeringstelsel. De risicobenadering en systeemanalyse bieden daarvoor het kader. De *risicobenadering* kijkt naar kansen op en gevolgen van overstromingen in samenhang. De *systeemanalyse* richt zich op interacties tussen dijkringen en verschillende stadia in het overstromingsverloop: het water stopt immers niet na een doorbraak. De analyse kijkt naar de kenmerken van het 'buitenwater', de kenmerken van de waterkeringen en de fysisch-geografische kenmerken van het beschermde gebied. Deze factoren zijn ook potentiële aangrijpingspunten voor een meer doelmatige en/of robuuste inrichting van het waterkeringsysteem.

Dynamiek van het hoogwater

De dynamiek van de hoogwatersituatie bepaalt in hoeverre de standzekerheid van de waterkering wordt bedreigd en welke faalmechanismen de meeste aandacht vergen. Een storm op zee duurt meestal minder dan 2 dagen, maar de waterkering moet het gedurende die periode helemaal zelf doen, want de mens kan er dan niet bij. Erosiebestendigheid van buiten- en binnentalud is dan cruciaal.

Een hoogwatergolf op de grote *rivieren* kan dagenlang tot zelfs weken aanhouden en in die periode de dijk geleidelijk verzadigen. De langdurige belasting leidt tot dominantie van andere faalmechanismen (verweking, afschuiving en piping).

De dynamiek van het hoogwater beïnvloedt eveneens het overstromingsverloop in geval er een bres in de waterkering ontstaat. Hoe langer een hoogwater duurt, des te meer water er door een bres naar binnen kan stromen.

Ontstaan en ontwikkeling van een bres in de kering

Een bres ontstaat op een zwakke plek in de kering waar de sterkte onvoldoende is om de belasting te weerstaan. Gedurende het instromen kan de bres groeien in breedte en/of diepte.

De bresontwikkeling hangt af van een groot aantal factoren: het tijdstip van ontstaan ten opzichte van het verloop van het hoogwater, de duur van het hoogwater, de hoogteligging van het achterland, de aanwezigheid van een voorland, etc. De gevoeligheid van dijkringen voor snelle of vergaande bresgroei kan sterk verschillen: van weinig gevoelig voor kleine of sterk gecompartmenteerde dijkringen tot zeer gevoelig voor grote dijkringen waar het water gemakkelijk bij de breslocatie kan wegstromen (zoals bij hellende dijkringen in het rivierengebied).

De breslocatie is van grote invloed op het overstromingspatroon. Zo maakt het voor het overstromingspatroon een groot verschil of de locatie grenst aan een hoog achterland, of juist aan een diepe polder. Bij dijkringen langs de kust maakt het een groot verschil of de bres ontstaat in een klein of in een groot compartiment. En de aankomsttijd van het eerste water is natuurlijk sterk afhankelijk van de afstand tot de bres en daarmee van de breslocatie.

Overstromingsverloop na een doorbraak

Het overstromingsverloop wordt grotendeels bepaald door het natuurlijk reliëf en door infrastructuur die door de mens is aangelegd. Bij dat laatste gaat het om waterkeringen, maar ook om lijnvormige infrastructuur die weliswaar niet bedoeld is om water te keren of te vertragen – maar dat wel doet. Om beter grip te krijgen op het overstromingsverloop wordt veel gebruik gemaakt van overstromingssimulaties. Die simulaties laten zien dat ook de grootte van een dijkkringgebied belangrijk is. De grootte bepaalt hoe snel het gebied helemaal vol is en of er tegendruk ontstaat ter plaatse van de bres.

In hellende dijkringen blijft in het bovenstroomse deel de waterdiepte vaak beperkt, omdat het water doorstroomt naar het laagste punt. Indien de dijkbreuk meer benedenstrooms optreedt, blijft het stroomopwaarts gelegen deel van een hellende dijkkring vaak volledig droog. In dijkringen met een vlak maaiveld is sprake van een volstrekt ander overstromingsverloop. Water heeft veel meer moeite om z'n weg te zoeken op een vrijwel vlakke ondergrond. Het kan bij vlakke gebieden gaan om een 'badkuip' die snel volloopt door een groot verschil tussen buitenwaterstand en maaiveld zoals bij de IJsselmeerpolders, maar het kan ook gaan om langzame instroom in dijkringen met relatief hoog maaiveld (Friesland, grote delen van Noord-Holland, Walcheren).

De bestaande gecompartmenteerdheid van een gebied (veel tussendijken en/of andere obstakels) beïnvloedt het overstromingsverloop doordat het water niet – of minder snel – kan doorstromen. Dat kan voordelig uitpakken voor verder van de bres gelegen gebied, maar nadelig voor het buitenste compartiment zelf. De stijgsnelheid is daar immers groter, hoewel tegelijkertijd de bresgroei door de snel toenemende tegendruk wordt beperkt.

Gericht beïnvloeden van de werking van het waterkeringsysteem

In Nederland zijn verschillende principes toegepast om de hydraulische belasting van waterkeringen te beïnvloeden (te verlagen of anders te verdelen). De meest toegepaste principes zijn kustlijnverkorting met het afsluiten van zeearmen en rivierverruiming om de hoogwaterstanden bij de maatgevende rivierafvoer te verlagen. Daarnaast is en wordt gestudeerd op het wijzigen van de afvoerverdeling van de Rijn en rivierdijkverkorting door het aanleggen van keringen en/of het verleggen van waterlopen. Het beïnvloeden van hoogte en duur van het hoogwater is doorgaans gericht op het verkleinen van de belastingen op de waterkeringen, maar heeft eveneens een effect op het overstromingsverloop in geval van een doorbraak.

Als aan alle dijkvakken binnen een dijkkring dezelfde eisen worden gesteld dan is het toeval waar een bres ontstaat. Indien we het ontstaan van een bres niet (helemaal) aan het toeval willen overlaten zijn er verschillende mogelijkheden: (i) bevorderen dat water instroomt op een bepaalde plaats of over een bepaald traject (de *minst* kwetsbare delen) door de dijk plaatselijk lager of minder sterk te maken, of (ii) vermijden dat een bres ontstaat op de *meest* kwetsbare delen van de dijkkring door waterkeringen op die trajecten (hoger en) sterker te maken dan de dijken in de rest van de dijkkring.

Naast beïnvloeding van de hoogwaterstand en maatregelen die beogen bresvorming zo veel mogelijk te voorkomen zijn er ook nog maatregelen mogelijk specifiek gericht op het beïnvloeden van het overstromingsverloop. Daarbij gaat het om waterkeringen die het water uit bepaalde kwetsbare gebied(s)del(en) weghouden, het erlangs geleiden, de waterstand juist sneller laten dalen, of het water lozen alvorens een domino-effect kan optreden. Het gaat daarbij om de volgende typen maatregelen: compartimentering, de-compartimentering (het omgekeerde) en suatie.

Meer aandacht voor schaalniveau en systeemwerking bij de inrichting

In het vigerend waterkeringstelsel staan individuele dijkkringen centraal. En er gelden uniforme eisen voor alle dijkvakken / kunstwerken binnen één dijkkring. Bij de eisen aan die waterkeringen wordt slechts op een grofstoffelijke manier rekening gehouden met de gevolgen van overstromingen, namelijk als grondslag voor de beschermingsnormen per dijkkring. Met de interactie tussen dijkkring(gebied)en wordt weinig tot geen rekening gehouden. In plaats daarvan is gestreefd naar een gelijk beschermingsniveau binnen delen van het land (bovenrivieren, zuidwestelijke delta, etc.). Met dit uniforme gelijkheidsprincipe binnen en tussen dijkkringen wordt ingeboet op doelmatigheid (minder efficiënt vanuit kosten-batenoogpunt) en op robuustheid. Ongewenste systeemwerking tussen dijkkringen (cascade- of domino-effecten, falen van juist die dijkkringen waarin de gevolgen heel groot zijn) kan afbreuk doen aan de robuustheid van het systeem op een schaalniveau boven dat van individuele dijkkringen.

Naar contouren voor een doelmatiger inrichting

In verscheidene recente studies is aan de hiervoor geschetste beperkingen al aandacht gegeven. De inzichten uit deze studies zijn in deze verkenning benut om de contouren te schetsen van een meer doelmatige en robuuste inrichting van het waterkeringsysteem. Kern daarvan is het versterken van de *samenhang* in de eisen aan de verschillende onderdelen van het waterkeringsysteem op basis van een risicobenadering. Daarbij gaat het om (i) de samenhang in eisen aan de verschillende typen primaire keringen, om (ii) meer samenhang tussen gevolgen en toelaatbare overstromingskansen per dijkstrekking (ringdeel, traject, vak, etc.), en om (iii) samenhangende eisen tussen dijkkringen op hetzelfde schaalniveau, die aan elkaar of aan hetzelfde buitenwater grenzen.

De contouren voor een doelmatiger inrichting van het waterkeringsysteem zijn langs een viertal lijnen uitgewerkt:

1. *Herwaardering van compartimentering en heroverweging van de formele positie van c-keringen*: wanneer als uitvloeisel van een risicobenadering niet langer uniforme eisen gelden voor alle dijkvakken van een 'dijkkring', dan komt ook de positie van de c-keringen in een ander daglicht te staan en kunnen de eisen die we eraan stellen worden heroverwogen. Dat biedt perspectief op besparingen bij verbetermaatregelen in het kader van het nHWBP.

2. *Meer differentiatie in beschermingsniveau (tussen dijkringen en tussen dijkringdelen):* het geboden beschermingsniveau beter afstemmen op verschillen in de gevolgen van overstromingen.
3. *Eisen aan b-keringen beter afstemmen op het achterliggende gebied:* bij het stellen van eisen aan de voorliggende keringen beter rekening houden met de bufferende werking van het tussengelegen water alsmede met het feitelijk overstromingsrisico in de achterliggende gebieden.
4. *Gericht extra versterken van de belangrijkste delen van het systeem:* een aanpassing van de inrichting met als doel het voorkomen van maatschappelijke ontwrichting door aan waterkeringen op bepaalde trajecten extra hoge eisen te stellen.

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Begripsbepaling en afbakening	2
1.3 Doel(en) van het overstromingsrisicobeleid	2
1.4 Vraag- en doelstelling van deze verkenning	3
1.5 Aanpak en uitgangspunten	4
1.6 Opzet van dit rapport	5
2 Opbouw van het huidige waterkeringsstelsel	7
2.1 Primaire keringen en dijkgebieden	7
2.2 Eisen aan verschillende typen primaire keringen	8
2.3 Regionale keringen en overige relevante lijninfrastructuur	10
3 Functioneren waterkeringsstelsel bij overstromingen	13
3.1 Schakels in het verloop van een overstroming	13
3.2 Hoogte en duur van het hoogwater	14
3.2.1 De relevantie van hoogwaterstanden en golven in het algemeen	14
3.2.2 Hoogwater langs de kust	15
3.2.3 Hoogwater langs de rivieren	16
3.2.4 Hoogwater langs grote wateren/ meren	17
3.3 Ontstaan en ontwikkeling van bressen	18
3.3.1 Bresontwikkeling – algemeen	18
3.3.2 Bresontwikkeling langs de kust en estuaria	22
3.3.3 Bresontwikkeling langs de rivieren	22
3.3.4 Bresontwikkeling langs afgesloten grote wateren/meren	23
3.4 Verloop van een overstroming	24
3.4.1 Overstromingsverloop – algemeen	24
3.4.2 Overstromingsverloop langs de kust en estuaria	27
3.4.3 Overstromingsverloop langs de rivieren	29
3.4.4 Overstromingsverloop langs grote wateren/meren	35
4 Beïnvloeden van functioneren van waterkeringsstelsels	37
4.1 Beïnvloeding van hoogwatersituatie en golfbelasting	37
4.2 Beïnvloeding van locatie en ontwikkeling van bressen	38
4.3 Beïnvloeden van het overstromingsverloop na doorbraak	39
5 Meer samenhang in eisen aan het waterkeringsstelsel	43
5.1 Meer aandacht voor schaalniveau en systeemwerking	43
5.2 Herwaardering van compartimentering en heroverweging van positie van c-keringen?	45
5.3 Differentiatie in beschermingsniveaus	46
5.4 Eisen aan b-keringen beter afstemmen op achterland	49
5.5 Gericht extra versterken van belangrijkste delen van het systeem	49
6 Bevindingen en reflectie	51
6.1 Ten geleide	51
6.2 Bevindingen	51
6.3 Reflectie	53

7 Referenties

55

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ons huidige waterkeringsstelsysteem is ontwikkeld na de stormvloedramp van 1953. Er is een stelsysteem ontwikkeld van primaire waterkeringen (a-, b- en c-keringen) en dat is wettelijk vastgelegd in de Wet op de Waterkering van 1996 (inmiddels in de Waterwet). Voor deze keringen zijn per dijkkring beschermingsnormen vastgelegd in termen van overschrijdingskansen van hydraulische randvoorwaarden: extreme waterstanden en golven. De norm geldt gelijkelijk voor alle dijkvakken en kunstwerken binnen een dijkkring, die alle deze maatgevende omstandigheden 'veilig moeten kunnen keren'.

Het huidige stelsysteem is ontwikkeld in een periode waarin de waterkering en de daaraan te stellen eisen centraal stonden. Anders gezegd: het stelsysteem is sterk gericht op het beperken van de kans op een overstroming van een dijkkringgebied. De gevolgen werden daarbij slechts indirect in beschouwing genomen; de gevolgen bepaalden mede de hoogte van de norm.

Inmiddels hanteren we steeds meer een volwaardige risicobenadering waarbij kansen en gevolgen in samenhang worden beschouwd. Vraag is hoe doelmatig de huidige inrichting van het waterkeringsstelsysteem is, gezien vanuit een risicobenadering? Er zijn aanwijzingen dat op het punt van **doelmatigheid** nog winst te boeken valt. Enkele voorbeelden:

- Bij de derde toetsing zijn de c-keringen voor het eerst getoetst en veel c-keringen zijn daarbij afgekeurd. Dit betekent een forse opgave voor het nHWBP: complete verbetering volgens de huidige voorschriften vergt mogelijk een investering van meer dan 2 miljard Euro. Vraag is hoe dit type keringen past binnen een economisch optimale inrichting van het waterkeringsstelsysteem. Studies naar de systeemwerking Centraal Holland (dijkkringen 14, 15 en 44) geven aanleiding om anders om te gaan met de bestaande c-keringen alsook met de normen voor de aangrenzende dijkkringen.
- Voor b-keringen, zoals de Afsluitdijk, is de gangbare praktijk dat de eisen aan de voorliggende kering worden afgestemd op het beschermingsniveau van de achterliggende keringen. De achterliggende kering met het hoogste beschermingsniveau wordt daarbij maatgevend gesteld. Falen van de voorliggende kering hoeft echter niet onmiddellijk tot falen van de achterliggende keringen te leiden. Het tussenliggende buitenwater vormt een buffer en bovendien valt de dynamiek in hoogwater voor b- en c-keringen niet volledig samen.
- Verkenningen in het kader van Waterveiligheid 21^e Eeuw resp. het deelprogramma Veiligheid van het Deltaprogramma laten zien dat het schaalniveau waarop eisen aan a-keringen worden gesteld een duidelijke invloed heeft op de omvang van benodigde investeringen. In principe geldt hoe gedetailleerder het schaalniveau, hoe beter rekening kan worden gehouden met significante verschillen in dreiging en gevolgen, en daarmee hoe doelmatiger geïnvesteerd kan worden.

Het (meer) volwaardig toepassen van een risicobenadering kan naar verwachting dan ook belangrijke besparingen opleveren bij de verbetering en normstelling van primaire keringen.

Het huidige waterkeringsstelsysteem is erop gericht bescherming te bieden tot het niveau van de maatgevende omstandigheden. Aan het functioneren van het stelsysteem onder bovenmaatgevende omstandigheden stellen we tot op heden geen eisen.

Er is wel geopperd om een **robuuster** overstromingsrisicosysteem te creëren, waarmee voor 'elk denkbaar hoogwater' een onbeheersbare (reeks van) gebeurtenis(sen) zoveel mogelijk wordt voorkomen. Een andere inrichting van het waterkeringsstelsel c.q. andere eisen aan specifieke keringen kan mogelijk een bijdrage leveren aan zo'n robuuster overstromingsrisicosysteem.

1.2 Begripsbepaling en afbakening

Deze verkenning van de *inrichting* van het waterkeringsstelsel richt zich op de situering van waterkeringen en de aan de keringen te stellen eisen. Onder het waterkeringsstelsel wordt daarbij verstaan het geheel van waterkeringen en andere waterbouwkundige werken, dat erop is gericht om gebieden langs de kust, rivieren en grote meren te beschermen tegen overstromingen. Tot het waterkeringsstelsel worden ook gerekend regionale keringen (boezemkaden, compartimenteringsdijken, e.d.), die van invloed (kunnen) zijn op het verloop en de omvang van een overstroming.

De verkenning betreft het overstroombare deel van Nederland, voor zover dat wordt beschermd door primaire waterkeringen. Het buitendijks gebied langs de kust en de grote rivieren valt buiten deze verkenning. Bij de analyse van overstromingen vanuit buitenwater gaat het om de keten van het optreden van (extreme) hoogwatersituaties, die (kunnen) leiden tot een bres in de waterkering en vervolgens tot overstroming van het achterliggende gebied.

1.3 Doel(en) van het overstromingsrisicobeleid

De hoofddoelstelling van het overstromingsrisicobeleid kan worden omschreven als: 'Het reduceren van het overstromingsrisico tot een maatschappelijk aanvaardbaar niveau tegen maatschappelijk aanvaardbare kosten'. Bij overstromingsrisico's gaat het om economische schaderisico's, slachtofferrisico's, immateriële risico's voor mensen (psychische schade, sociale gevolgen), en risico's voor natuur- en cultuurwaarden. Bij kosten gaat het om alle maatschappelijke kosten en negatieve effecten, ook niet monetaire, die samenhangen met maatregelen om deze risico's te reduceren. De gebruikelijke wijze om deze kosten tegen de baten af te wegen is door middel van een kosten-effectiviteitsanalyse of een (maatschappelijke) kosten-batenanalyse ((M)KBA). Uiteindelijk gaat het immers om de doelmatigheid van investeringen.

Zowel het economisch schaderisico als het slachtofferrisico kan worden berekend door in een volwaardige risicoanalyse alle kansen op overstromingen met de bijbehorende gevolgen te bepalen en te integreren. Dat levert eenduidige, kwantitatieve en goed vergelijkbare risicomaten op.

Tegenover de risicoreductie staan kosten die moeten worden gemaakt om die risico's te verkleinen, bijvoorbeeld voor evacuatie of anders bouwen, maar vooral voor het in stand houden dan wel versterken van het waterkeringsstelsel. Waterkeringen zijn de belangrijkste maatregel om overstromingsrisico's te reduceren en zullen dat ook in de toekomst zijn; dat is onlangs nog eens benadrukt door de minister van Infrastructuur en Milieu in haar brief aan de Tweede Kamer.

Doelmatigheid van investeringen vormt ook de grondslag van de huidige hoogwaterbeschermingsnormen.

De Deltacommissie onderzocht indertijd het economisch optimale beschermingsniveau voor het gebied van Centraal Holland; het beschermingsniveau waarbij de baten van verdere verkleining van het overstromingsrisico niet meer opwegen tegen de kosten die daarvoor moeten worden gemaakt.

Het perspectief van doelmatigheid van investeringen pleit ervoor de eisen aan waterkeringen zoveel mogelijk te baseren op de uitkomsten van een kosten-batenanalyse. Een kosten-batenanalyse richt zich echter vooral op het maximaliseren van het maatschappelijk nut en houdt weinig rekening met de verdeling van kosten en baten over regio's of groepen. Om beter rekening te houden met die verdeling is wel geopperd een concept als basisveiligheid te hanteren. In de normstelling wordt dan een bepaalde mate van economische inefficiëntie geaccepteerd ten gunste van een herverdeling van het beschermingsniveau. Daarmee wordt invulling gegeven aan solidariteit tussen regio's en groepen.

Risico's zijn opgebouwd uit gebeurtenissen met kleine kansen en grote gevolgen en frequentere gebeurtenissen met geringe gevolgen. De opbouw van het risico kan een groot verschil maken in de perceptie van het risico door burgers (Baan & Klijn, 2004) en beleidsmakers. In dat verband is wel gesuggereerd om het zo veel mogelijk voorkomen van rampen door grootschalige overstromingen tot expliciet neven doel van het beleid te maken (Klijn & De Grave, 2008). Het waterkeringsysteem is er dus tevens op gericht maatschappelijke ontwrichting door grootschalige overstromingen zoveel mogelijk tegen te gaan.

Deze denklijn is verder geëvolueerd; in dat verband is de term (systeem)robuustheid¹ geopperd (De Bruijn et al., 2008; FLOODsite, 2009; Mens et al., 2011; 2013). Robuustheid als additionele doelstelling voor het overstromingsrisicobeleid kan worden begrepen als het tot stand brengen van een robuust overstromingsrisicosysteem, waarin onvoorziene gebeurtenissen niet ontaarden in onbeheersbare crises of rampen. Een robuust systeem blijft functioneren als het allemaal toch wat anders uitpakt dan voorzien.

De beoordeling van de inrichting van het waterkeringsysteem kan zich dus op verschillende doelen richten, aansluitend bij de drie grondslagen zoals gehanteerd bij de actualisering van de normen:

- *Solidariteit* tussen regio's en groepen door het bieden van basisveiligheid aan elke burger door middel van het stellen van een grens aan het individuele risico.
- *Doelmatigheid* van investeringen om zoveel mogelijk rendement te krijgen van elke geïnvesteerde Euro in de beheersing van het overstromingsrisico.
- *Robuustheid* van het (overstromingsrisico)systeem om maatschappelijke ontwrichting door grootschalige overstromingen zoveel mogelijk tegen te gaan.

1.4 Vraag- en doelstelling van deze verkenning

Het huidige systeem voor toetsen en ontwerpen van waterkeringen is gericht op het niveau van individuele dijkkringen. Voor de dijkvakken en kunstwerken binnen de dijkkring gelden uniforme eisen. Hoewel de huidige werkwijze, met een periodieke toetsing, in de kern heel krachtig is, kent het huidige systeem ook een aantal beperkingen.

¹ De term *robustheid*, zoals hier gebruikt, verschilt dus wezenlijk van het gebruik van die term bij het ontwerp van waterkeringen, als daar over 'robustheidstoetsing' wordt gesproken.

Zo kunnen vanuit een perspectief van doelmatigheid te lage dan wel onnodig hoge eisen worden gesteld, omdat bijvoorbeeld:

- te weinig rekening wordt gehouden met verschillen in gevolgen binnen een dijkkring(gebied);
- te weinig rekening wordt gehouden met de inbedding van keringen binnen het totale waterkeringsysteem (aspect van systeemwerking); en
- te weinig rekening wordt gehouden met het verloop van een overstroming als de primaire waterkering het toch begeeft, onder *boven- of benedenmaatgevende* omstandigheden.

De bovengenoemde beperkingen geven voldoende aanleiding om eens kritisch te kijken naar de huidige inrichting van ons waterkeringsysteem en te verkennen welke opties er zijn om die inrichting verder te optimaliseren c.q. bepaalde keuzes te heroverwegen. De huidige indeling in categorieën keringen bepaalt mede welke eisen we er aan (zouden moeten) stellen. Stel je alleen eisen aan de voordeur of ook aan tussendeuren? Is de standzekerheid van b-keringen een doel op zich of kunnen b-keringen – gezien de bufferende werking van tussengelegen wateren – worden opgevat als een kraan / demper voor de hydraulische randvoorwaarden voor de a-keringen? Heeft het onderscheid in a-, b- en c-keringen nog betekenis bij een volwaardig hanteren van een risicobenadering?

De hoofdvraag van de verkenning is daarmee of met een (meer) volwaardige invulling van de risicobenadering andere keuzen kunnen worden gemaakt die leiden tot een doelmatiger inrichting van het waterkeringsysteem en een robuuster overstromings-risicosysteem als geheel?

De verkenning is allereerst gericht op het verkrijgen van inzicht in de werking van het huidige waterkeringstelsel, en in tweede instantie op het in beeld brengen van mogelijkheden voor een meer doelmatige en robuuste inrichting van het waterkeringsysteem. Daarbij gaat het om het verkennen van principeoplossingen en het op waarde schatten van deze oplossingen.

1.5 Aanpak en uitgangspunten

De verkenning vertrekt vanuit het functioneren van het huidige waterkeringsysteem in alle dimensies, uitgaande van de huidige inrichting. De verkenning omvat daarnaast een kritische analyse en evaluatie van uitgangspunten en aannamen die ten grondslag liggen aan de huidige inrichting van het waterkeringsysteem. De beoordeling van de inrichting richt zich op de doelen van het waterkeringsysteem (zie par 1.3) en dan met name op de doelmatigheid en robuustheid. Om het functioneren van het waterkeringsysteem te beschrijven en te analyseren op verschillende schaalniveaus en onder verschillende omstandigheden bieden een *risicobenadering* en een *systeemanalyse* samen een nuttig kader.

De *risicobenadering* kijkt naar kansen op en gevolgen van overstromingen in samenhang. Bij de kansen is er daarbij aandacht voor alle faalmechanismen. Bij de gevolgen gaat het niet alleen om economische schade maar ook om slachtofferrisico's. Het gebruik van een risicobenadering bevordert de *doelmatigheid* van investeringen in de beheersing van risico's.

Een *systeemanalyse* richt zich op het functioneren van het waterkeringsstelsel onder uiteenlopende omstandigheden. Het stelsel wordt daarbij niet alleen beoordeeld op de beoogde werking onder maatgevende omstandigheden, maar ook op wat er gebeurt in het geval onderdelen falen, hetzij al voordat maatgevende omstandigheden worden bereikt, hetzij onder bovenmaatgevende omstandigheden. Bij de systeemanalyse wordt de loop van het water gevolgd; het water stopt immers niet na een doorbraak. Het gaat om de vraag of een ‘falen van de waterkering’ onbeheersbaar kan worden. En dat is het geval als een bres ontstaat die sterk groeit en niet gedicht kan worden, als de overstroming een heel groot gebied diep inundeert en veel schade en/of slachtoffers veroorzaakt, en als een domino-effect optreedt en de overstroming niet tot één dijkkring beperkt blijft, maar ook andere dijkringen treft of bijvoorbeeld het hele IJsseldal (onbedoeld) onder water zet. De systeemanalyse overstijgt daarmee het niveau van individuele dijkringen. De robuustheid van individuele elementen is daarbij wel belangrijk maar niet doorslaggevend; de verkenning kijkt vooral naar de robuustheid van het overstromingsrisicosysteem als geheel.

Een *risicoanalyse* vormt de basis bij uitstek om te komen tot een efficiënt of *doelmatig* overstromingsrisicobeleid, terwijl een *systeemanalyse* aanvullende inzichten oplevert die kunnen bijdragen aan het realiseren van een *robuust* systeem, waarin extreme of gewoon onvoorziene omstandigheden zo min mogelijk tot onbeheersbare situaties leiden. Daarbij merken we op dat als robuustheid een (neen)doel wordt, de doelmatigheidsvraag blijft gelden.

1.6 Opzet van dit rapport

De vraagstelling, de opzet en enkele belangrijke uitgangspunten van deze verkenning zijn besproken in dit inleidende hoofdstuk 1. De opbouw van het huidige waterkeringsstelsel komt vervolgens aan de orde in hoofdstuk 2: de verschillende typen keringen die kunnen worden onderscheiden en de eisen die we eraan stellen.

Het functioneren van het waterkeringsstelsel bij overstromingen is het onderwerp van hoofdstuk 3. Dit hoofdstuk vormt de kern van het rapport en beschrijft voor uiteenlopende typen watersystemen de verschillende schakels in het verloop van een overstroming. Tegen die achtergrond verkent hoofdstuk 4 de mogelijkheden om het overstromingsverloop te beïnvloeden.

Hoofdstuk 5 gaat aansluitend in op de mogelijkheden om meer samenhang te brengen in de eisen aan het waterkeringsstelsel. Dat betekent niet alleen meer aandacht voor het schaalniveau waarop eisen worden gesteld, maar ook voor systeemwerking. Vervolgens worden langs een viertal lijnen de contouren geschetst voor een doelmatiger inrichting van het waterkeringsstelsel.

Hoofdstuk 6 geeft tenslotte de belangrijkste bevindingen en kan worden gelezen als een soort samenvatting.

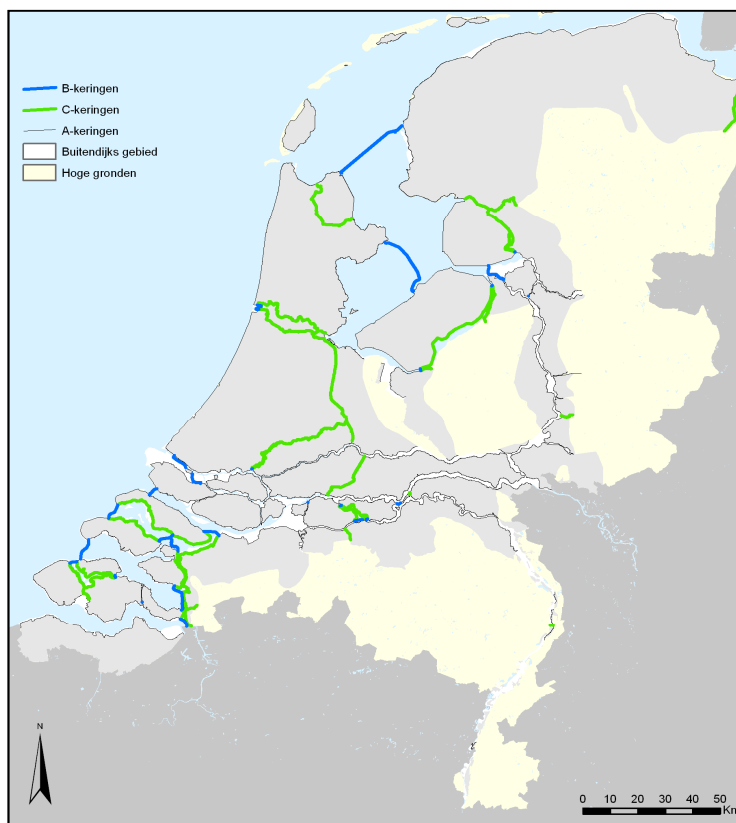
2 Opbouw van het huidige waterkeringsysteem

2.1 Primaire keringen en dijkkringgebieden

Het overstroombare deel van Nederland is opgedeeld in dijkkringgebieden. Een dijkkringgebied is een gebied dat wordt beschermd tegen 'buitenwater' door een gesloten stelsel van waterkeringen en hoge gronden. Tot buitenwater rekende de Wet op de Waterkering de belangrijkste gevarenbronnen: de zee, de grote rivieren (de Rijn, de Maas en hun takken) en het IJsselmeer. Later is daar het Markermeer aan toegevoegd.

Waterkeringen die direct of indirect bescherming bieden tegen 'buitenwater' worden primaire waterkeringen genoemd. Er worden drie categorieën primaire waterkeringen onderscheiden (zie Figuur 2.1):

- Waterkeringen die direct buitenwater keren en onderdeel uitmaken van een 'dijkkring';
- Waterkeringen die tussen een gevarenbron en ander buitenwater liggen. Dit zijn de afsluitdijken, dammen en beweegbare stormvloedkeringen. Deze keringen zijn van belang voor meerdere dijkkringgebieden.
- Waterkeringen die onderdeel uitmaken van een dijkkring, maar die slechts indirect 'buitenwater' keren. Dit zijn waterkeringen die de scheiding vormen tussen aangrenzende dijkkringgebieden of keringen die gelegen zijn tussen een dijkkringgebied en een 'binnenwater'.



Figuur 2.1 Ligging van a-, b- en c-keringen

De toekenning van waterkeringen aan een bepaalde categorie is niet altijd volledig eenduidig. Zo hebben de waterkeringen grenzend aan het Markermeer pas de status van a-keringen gekregen op het moment dat het Markermeer formeel als 'buitenwater' werd aangemerkt. En de waterkeringen langs het Volkerak-Zoommeer gelden nu nog als c-keringen, maar kunnen de status van a-keringen krijgen zodra het Volkerak-Zoommeer een rol gaat spelen in het opvangen van extreme Rijnaftoeren. Deze voorbeelden laten zien dat de inrichting van het waterkeringsysteem geen vast gegeven is, maar een 'onderlinge afspraak' die kan worden gewijzigd wanneer nieuwe inzichten of veranderende omstandigheden daar aanleiding toe geven.

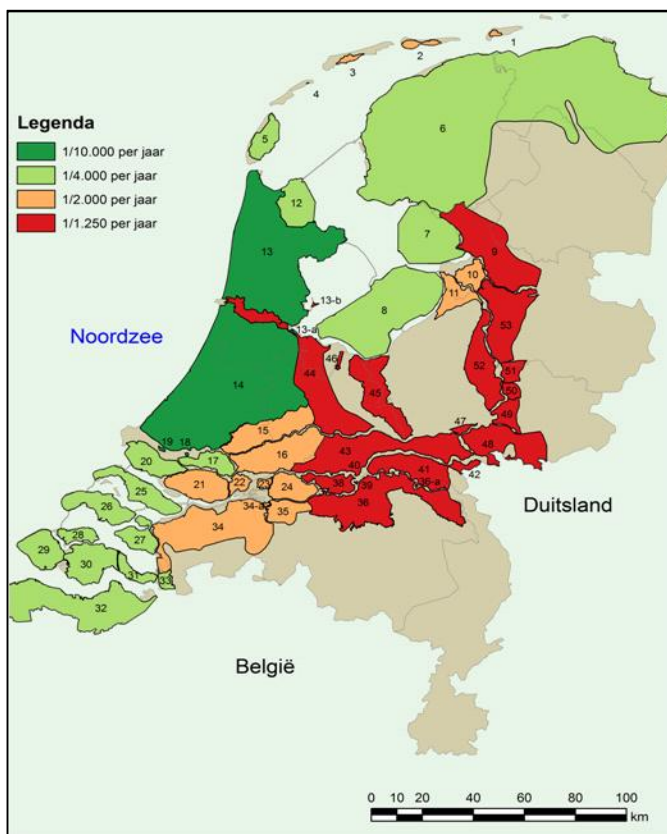
2.2 Eisen aan verschillende typen primaire keringen

Eisen aan a-keringen

De norm voor de a-keringen is in de Waterwet als volgt gedefinieerd:

"... de veiligheidsnorm aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans – per jaar – van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren."

Voor de bescherming van het gehele dijkkringgebied geldt één zelfde beschermingsnorm (zie Figuur 2.2). De Maaskaden ontbreken in deze figuur; voor de kades geldt een norm van 1/250 per jaar.



Figuur 2.2 Beschermingsnorm geldend voor de waterkeringen per dijkkringgebied

De Waterwet schrijft voor dat waterstanden (en golven) met een bepaalde overschrijdingskans veilig gekeerd moeten worden. Om dat te waarborgen zijn voor de *a-keringen* ontwerpleidraden, hydraulische randvoorwaarden en toetsvoorschriften ontwikkeld die er voor moeten zorgen dat waterkeringen voldoende hoog en standzeker zijn (en blijven).

Eisen aan b-keringen

B-keringen, ook wel verbindende of voorliggende waterkeringen genoemd, zijn keringen die in het water voor een a- of c-kering liggen en buitenwater keren. De b-keringen hebben een dempende invloed op de hydraulische randvoorwaarden vóór de erachter gelegen a- en c-keringen. Voor de eisen aan een b-kering geldt volgens de huidige regelgeving de strengste norm van alle aanliggende of achterliggende a-keringen.

Eisen aan c-keringen

Voor de waterkeringen die dijkkringgebieden scheiden werd in de Waterwet oorspronkelijk vastgelegd dat hun huidige sterkte moest worden gehandhaafd. Inmiddels zijn er hydraulische randvoorwaarden opgesteld, waarin is verondersteld dat de bovenstrooms gelegen a- of b-kering heeft gefaald. Waar een c-kering zorgt voor een scheiding tussen twee dijkringen met een verschillende norm, geldt de strengste norm van de door de c-kering gescheiden dijkringen (veelal de norm van de meest benedenstroomse gelegen dijkkring). Bij de derde toetsing zijn de c-keringen voor het eerst getoetst aan de aldus opgestelde hydraulische randvoorwaarden; en voor een belangrijk deel afgekeurd.

Samenhang in eisen aan keringen van dijkkringgebieden

Het huidige normenstelsel is gericht op het niveau van individuele, maar gehele dijkringen. Op een aantal manieren wordt al wel rekening gehouden met interactie tussen dijkkring(gebied)en:

- Voor dijkringen die grenzen aan hetzelfde watersysteem (clusters van dijkringen) gelden dezelfde beschermingsnormen.
- In enkele gevallen wordt rekening gehouden met systeemwerking (bijv. Maaskaden).
- Voor b- en c-keringen geldt dat rekening wordt gehouden met meerdere aangrenzende of achterliggende dijkringen.

Er wordt dus enigermate rekening gehouden met interacties tussen dijkringen bij de eisen die aan keringen worden gesteld. Het is echter de vraag in hoeverre de huidige inrichting vanuit het oogpunt van doelmatigheid en robuustheid optimaal is.

Daarnaast gelden binnen de huidige wet- en regelgeving *uniforme* eisen voor alle dijkvakken en kunstwerken binnen één dijkkring. Daarbij is de vraag of differentiatie van eisen binnen een dijkkring geen doelmatiger inrichting kan opleveren.



Figuur 2.3 Genormeerde compartimenteringskeringen in zuidelijk deel van de provincie Zuid Holland

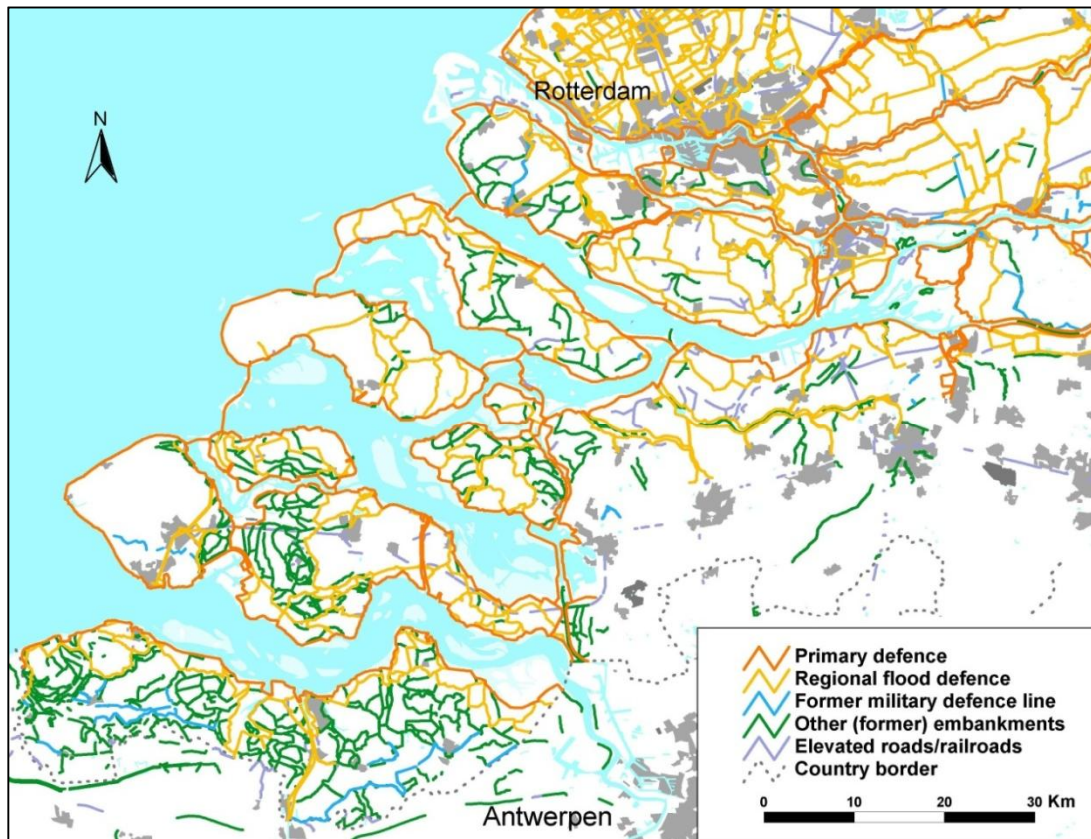
2.3 Regionale keringen en overige relevante lijninfrastructuur

Naast de primaire waterkeringen bestaat er in Nederland een uitgebreid stelsel van regionale waterkeringen evenals een omvangrijk netwerk van wegen en spoorwegen. Deze keringen en lijnvormige infrastructuur zijn van invloed op het verloop van een overstroming. De regionale keringen en verhoogde lijnelementen worden veelal 'meegenomen' in overstromings-simulaties. Regionale keringen zijn soms door lagere overheden genormeerd met het oog op het beïnvloeden van het overstromingsverloop voor het geval de primaire kering het begeeft. Figuur 3.3 geeft een voorbeeld van genormeerde compartimenteringskeringen in het zuidelijk deel van de provincie Zuid-Holland.

Daarnaast zijn er vooral in West-Nederland veel boezemkaden die polders beschermen tegen overstroming vanuit de boezem. Aan boezemkaden worden hogere eisen gesteld als de potentiële schade in de aangrenzende polder hoger is. Die eisen betreffen de belasting van de kade vanaf het boezemwater.

In analyses van het overstromingspatroon wordt veelal aangenomen dat regionale keringen standzeker zijn. In geval van een doorbraak van een primaire kering zal een boezemkade vanaf de andere kant worden belast. Het is de vraag of de kaden in die belastingsituatie voldoende standzeker zijn. In bepaalde gevallen zijn ze in het verleden standzeker gebleken; bij overstroming van dijkkring 13 vanuit de Zuiderzee bleven de Beemster en Purmer droog, dankzij de regionale keringen rond deze polders.

Het voorkomen van (grotere) lijninfrastructuur is landsdekkend in beeld gebracht in het kader van de Compartimenteringstudie (Asselman et al., 2008; zie Figuur 3.4). Met de grotere lijninfrastructuur wordt in overstromingssimulaties veelal rekening gehouden. De standzekerheid van weglichamen en spoordijken is overigens nog veel ongewisser dan die van regionale waterkeringen. Het gaat immers om grondlichamen die er niet op zijn ontworpen om water te keren. Ervaringen met overstromingen in het buitenland wijzen erop dat spoordijken veelal wegspoelen.



Figuur 2.4 Waterkerende/-vertragende lijnelementen in zuidwest Nederland (uit Klijn et al., 2009).

3 Functioneren waterkeringsysteem bij overstromingen

3.1 Schakels in het verloop van een overstroming

Een overstroming treedt op als tijdens hoogwater een bres in de waterkering ontstaat. Bij de beschrijving van het overstromingsverloop kunnen enkele schakels worden onderscheiden in de keten van dreiging tot gevolgen:

- hoogte en duur van hoogwater;
- ontstaan en ontwikkeling van een bres;
- verloop van de overstroming; en
- gevolgen van de overstroming

Op de eerste 3 van deze schakels grijpt het waterkeringsysteem in. Dat zijn dus ook potentiële aangrijpingspunten om eisen te stellen aan c.q. keuzes te maken voor een meer doelmatige en/of robuuste inrichting van het waterkeringsysteem. De laatste schakel vormt een aangrijpingspunt voor gevolgbeperking door bijv. ruimtelijk beleid, bouwvoorschriften of crisisbeheersing. Deze schakel valt buiten de reikwijdte van dit rapport.

Het huidige waterkeringsysteem vormt het vertrekpunt voor de beschrijving van het ontstaan en het verloop van overstromingen. De kenmerken van het 'buitenwater', de kenmerken van de waterkeringen en de fysisch-geografische kenmerken van het beschermde gebied zijn bepalend voor het overstromingsverloop. Omdat deze kenmerken wezenlijk verschillen tussen verschillende delen van Nederland, wordt het overstromingsverloop – behalve in algemene zin – ook beschreven voor een drietal typen watersysteem: langs de kust, langs de grote rivieren en langs de meren/grote wateren van afgesloten zeearmen. De kust omvat daarbij ook de estuaria waar het getij zich 'ongehinderd' kan voortplanten.

De aard van de omstandigheden bepaalt of sprake zal zijn van een overstroming van één enkele dijkkring of dat het zal gaan om een overstroming die meer dijkringen tegelijk treft. De omvang van een overstroming wordt in belangrijke mate bepaald door het waterstandsverloop van het 'buitenwater'. De beschrijving van het overstromingsverloop in deze verkenning richt zich op de situatie van het ontstaan van een bres onder maatgevende omstandigheden; dat zijn de omstandigheden waarop de waterkering is ontworpen en die veilig gekeerd zouden moeten kunnen worden. Voor deze maatgevende situatie wordt een vrij complete beschrijving gegeven van het overstromingsverloop. De beschrijving van het overstromingsverloop onder bovenmaatgevende omstandigheden blijft beperkt tot de belangrijkste verschillen met het verloop onder maatgevende omstandigheden.

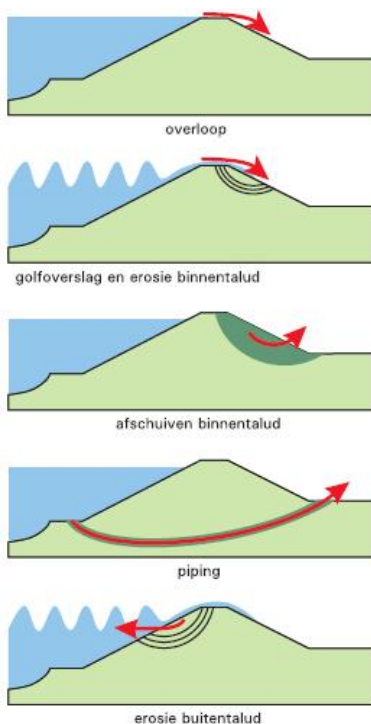
De beschrijving en analyse in dit hoofdstuk leunt sterk op een rapport van Asselman *et al.* (2010), dat is opgesteld in het kader van de implementatie van de ROR (Richtlijn Overstromingsrisico) en de vele simulaties die voor VNK zijn gemaakt (VNK, 2011, 2012).

3.2 Hoogte en duur van het hoogwater

3.2.1 De relevantie van hoogwaterstanden en golven in het algemeen

(Extreme) hoogwaterstanden en golven bepalen gezamenlijk de hydraulische belasting van waterkeringen. In combinatie met de hoogte en sterkte van de waterkering bepalen ze de kans op overslag, overloop en/of het bezwijken van de kering. Daarbij worden verschillende faalmechanismen onderscheiden (waarvan de meest bekende zijn weergegeven in Figuur 3.1). De faalmechanismen hoeven niet alle altijd tot het volledig bezwijken, c.q. doorbreken, van de waterkering te leiden. De mechanismen kunnen elkaar ook beïnvloeden. Zo kunnen overslag en overloop tot waterverzadiging van de dijk leiden en het afschuiven van het binnentalud veroorzaken, maar ze kunnen ook tot erosie van dat binnentalud leiden als er maar voldoende water over de dijk loopt en de grasmat onvoldoende resistent is.

De dynamiek van de hoogwatersituatie en golfbelasting bepaalt in hoeverre de integriteit van de waterkering wordt bedreigd en welke faalmechanismen de meeste aandacht vergen. Zo duurt een storm op zee meestal minder dan 2 etmalen, maar moet de waterkering het gedurende die periode helemaal zelf doen; de mens kan er op dat moment (bij storm) niet bij. Erosiebestendigheid van buiten- en binnentalud is dan cruciaal. Maar voor piping duurt het hoogwater meestal te kort.



Figuur 3.1 Faalmechanismen die kunnen leiden tot het bezwijken van dijken

Een hoogwatergolf op de grote *rivieren* kan daarentegen dagenlang tot zelfs weken aanhouden en in die periode de dijk geleidelijk verzadigen, met verweking en afschuivingen tot gevolg. De volstrekt andere belasting leidt tot dominantie van andere faalmechanismen dan het gebeuk van hoge golven aan de kust. Zo is ook piping (onderloopsheid) een faalmechanisme, waarbij langdurige belasting een rol speelt. En tenslotte geldt bij rivieren (en

estuaria) dat als het water aan het einde van de hoogwatergolf 'valt' soms afschuiving optreedt van het doorweekte buitentalud, omdat de tegendruk van het water wegvalt.

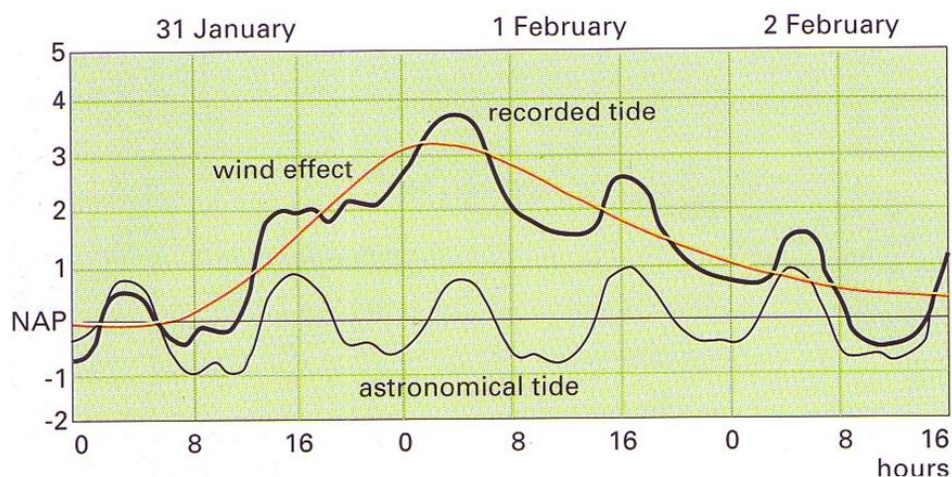
De dynamiek van de hydraulische randvoorwaarden (hoogte en duur van de hoogwaterstanden en golven) is tevens van invloed op het overstromingsverloop in geval er een bres in de waterkering ontstaat. Hoe langer een hoogwater duurt, des te meer water er door een bres naar binnen kan stromen.

De duur van verhoogde buitenwaterstanden kan aanzienlijk verschillen voor verschillende typen buitenwater: zee, meer of rivier. Omdat die verschillen doorwerken op de kans dat een waterkering bezwijkt en op het overstromingsverloop is er alle reden daar bij stil te staan. Langs de kust wordt de buitenwaterstand in hoofdzaak bepaald door stormopzet met daarbovenop het gewone getijverloop. In een meer gaat het om het meerpeil met enige kanteling door opwaaiing bij storm. In het bovenrivierengebied wordt de buitenwaterstand bepaald door de afvoer op de rivier. En in het overgangsgebied gaat het om een combinatie van rivierafvoeren en getij met storm. In aparte paragrafen wordt hier achtereenvolgens ingegaan op deze verschillende typen watersystemen.

Bovenop de waterstanden kunnen ook golven een rol spelen. Die zijn bij de Noordzee zeer belangrijk (vele meters hoog en oplopend tegen de waterkering), bij de grote meren tot enkele meters hoog en op de rivieren (tijdens de zeldzame hoogwaters) relatief laag. Bij de bovenrivieren wordt er zelfs nauwelijks apart rekening mee gehouden, anders dan in een hoogtetoeslag voor golfoploop bij dijk aanleg.

3.2.2 Hoogwater langs de kust

Langs de kust wordt de buitenwaterstand bepaald door het getijverloop en de stormopzet. De stormduur bepaalt de duur van het hoogwater. De stormduur en het faseverschil tussen storm en getij bepalen samen het exacte verloop van het hoogwater, waarbij vooral de hoogtes van de eb- en vloedperiodes volgend op het eerste hoogwater van belang zijn. In 1953 (zie Figuur 3.2) werd het grootste overstroomde oppervlak bereikt tijdens het hoogwater volgend op de hoogste piek van de stormvloed.



Figuur 3.2 De stormvloed van 1953, met in rood het windeffect en in blauw het astronomisch getij.

De stormduur heeft een groot effect op het overstroomd oppervlak en de waterdieptes in kustdijkingen. Dit komt doordat de instroming langer doorgaat en het aantal vloedperiodes gedurende de stormopzet toeneemt, waarbij water over binnendijs gelegen regionale keringen heen kan stromen.

In het benedenrivierengebied spelen behalve de stormopzet ook hoge rivierafvoeren een rol. De duur van het hoogwater bij een stormopzet is beduidend korter (uren tot dagen) dan bij een hoge rivierafvoer (dagen tot weken). Verschillen in duur van het hoogwater als gevolg van stormdominantie of rivierdominantie leiden in het overgangsgebied (tussen boven- en benedenrivierengebied) tot grote verschillen in overstroomd oppervlak en waterdieptes.

3.2.3 Hoogwater langs de rivieren

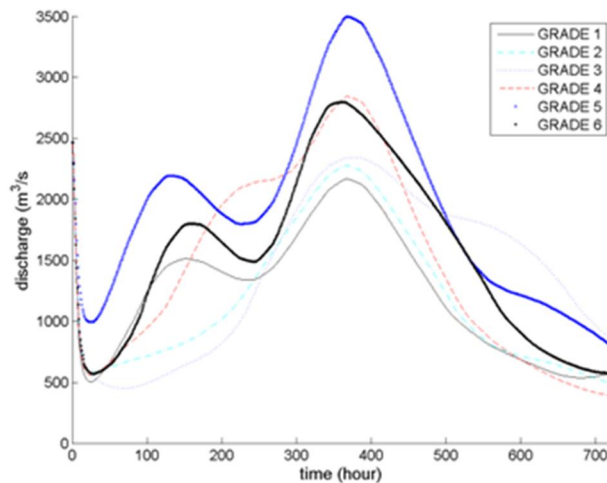
In het bovenrivierengebied wordt de buitenwaterstand bepaald door de afvoer op de rivier. De duur van het hoogwater (de afvoergolf) bepaalt de periode waarbinnen water uit de rivier de dijkkring in kan stromen. Hoe langer de duur, hoe groter het instroomvolume en des te groter het overstroomd oppervlak en/of de waterdieptes.

In overstromingssimulaties wordt met verschillende afvoergolven gewerkt; die onderling verschillen in de breedte van de afvoergolf. Tabel 3.1 toont voor enkele in simulaties gebruikte afvoergolven het aantal dagen dat een afvoer van 10.000 m³/s bij Lobith wordt overschreden. Figuur 3.3 laat zien hoe de duur van verschillende door GRADE gegenereerde afvoergolven verschilt.

Tabel 3.1 Duur van een hoogwater op de Rijn, zoals aangenomen/berekend in verschillende modellen

Naam	aantal dagen waarbij een afvoer van 10.000 m ³ /s te Lobith wordt overschreden
HR	14
TMR	12
GRADE	7

Het effect van verschillende duur van hoogwaterafvoergolven op het overstromingsverloop is afhankelijk van hoe makkelijk het water bij de bres vandaan kan stromen. Hoe groter het volume water dat geborgen kan worden in de dijkkring of polder, des te groter zijn de verschillen in overstroomd oppervlak en waterdiepte. Wanneer een dijkkring of polder niet volledig volloopt, leidt een toename van de maximumafvoer of een langere instroomduur tot een toename van het overstroomd oppervlak. Wanneer een dijkkring of polder volledig is overstroomd, maar de bergingscapaciteit nog niet volledig is benut, leidt een hogere afvoer 'slechts' tot een grotere waterdiepte.



Figuur 3.3 Enkele door GRADE gegenereerde afvoergolven voor de IJssel van verschillende tijdsduur (Mens, 2012)

3.2.4 Hoogwater langs grote wateren/ meren

Bij het watersysteem grote wateren/meren gaat het om afgesloten zeearmen zoals in het IJsselmeergebied en de zuidwestelijke delta. Voor de dijkringen langs de grote meren kunnen twee belastingsituaties worden onderscheiden: (1) een situatie waarbij de kerende functie van de voorliggende kering volledig intact is en (2) een situatie waarbij een bres is ontstaan in de voorliggende kering en de waterstand op het erachter gelegen meer langzaam stijgt.

Een verhoogde meerstand kan ontstaan door spuibeperkingen of een hoge toevoer / rivierafvoer. Opwaaiing en kanteling binnen het meer kunnen voor een deel van de dijkringen langs het meer tot een extra belasting leiden. De golfhoogte op het meer is doorgaans beperkt door een geringe strijklengte en/of diepte. Wanneer er een bres in de b-kering ontstaat kan de waterstand nog verder oplopen. De b-kering fungeert als een soort demper op de verhoogde waterstanden op zee.

Verhoogde meerstanden door spuibeperkingen zullen nauw samenhangen met verhoogde zeestanden. Voor verhoogde meerstanden door hoge rivierafvoer en/of door opwaaiing en kanteling van het meer geldt dat deze betrekkelijk los staan van de storm die verantwoordelijk is voor de verhoogde waterstanden op zee.



3.3 Ontstaan en ontwikkeling van bressen

3.3.1 Bresontwikkeling – algemeen

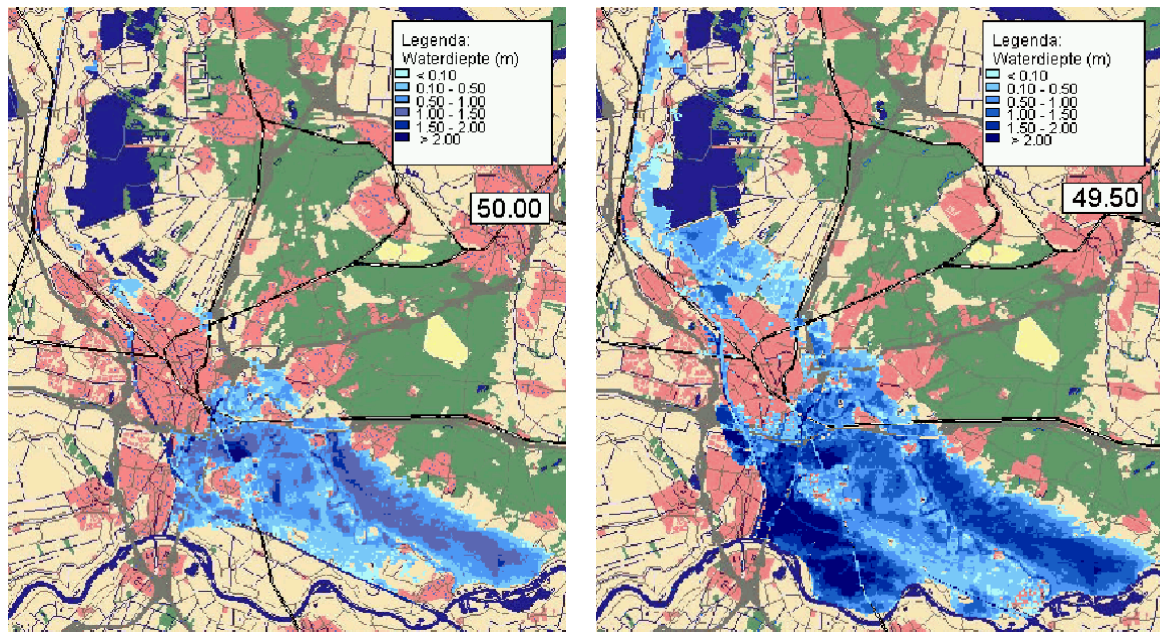
Een bres ontstaat op een zwakke plek in de dijkkring waar de sterkte / weerstand onvoldoende is om de belasting te weerstaan. Gedurende het instromen kan de bres groeien in breedte en/of diepte. De bresontwikkeling hangt af van een groot aantal factoren: het tijdstip van ontstaan ten opzichte van het verloop van het hoogwater, de duur van het hoogwater, de hoogteligging van het achterland, de aanwezigheid van een voorland, etc. Deze paragraaf schetst een aantal dimensies van bresontwikkeling in algemene zin. Het belang van deze dimensies verschilt per type watersysteem.

Begintijdstip van bresgroei in relatie tot het hoogwater

In overstromingssimulaties wordt er veelal vanuit gegaan, dat bresvorming ontstaat op het moment dat de hoogste waterstand wordt bereikt op de top van een maatgevend hoogwater. Het is echter mogelijk dat waterkeringen al bij lagere waterstanden bezwijken, of dat deze pas bezwijken nadat de hoogste waterstand is gepasseerd. Het moment van bresvorming bepaalt vooral hoe lang water door de bres kan binnenstromen en is daarmee van invloed op het overstroomd oppervlak en de bereikte waterdiepten. Bij kustdijkeringen kan het eerder of later bezwijken van de dijk tot grote verschillen in waterdiepte en overstroomd gebied leiden, met name wanneer deze dijkeringen een sterke compartimentering kennen. Voor dijkeringen in het rivierengebied en langs de meren is de gevoeligheid minder groot.

Breedte en diepte van een bres

De breedte van een bres ontwikkelt zich gedurende de overstroming van een initiële breedte van een tiental meters tot mogelijk enkele honderden meters. De snelheid van de bresgroei en de uiteindelijk bereikte bresbreedte zijn van veel factoren afhankelijk, zoals het verval over de kering en de erosiebestendigheid van het dijklichaam. De gevoeligheid van dijkeringen voor bresontwikkeling kan sterk verschillen: van weinig gevoelig voor kleine of sterk gecompartmenteerde dijkeringen tot sterk gevoelig voor grote dijkeringen waar het water gemakkelijk bij de bres vandaan kan wegstromen (zoals bij hellende dijkeringen in het rivierengebied). Figuur 3.4 toont een voorbeeld van de invloed van de bresgrootte op het overstroomde gebied rond Utrecht na circa 50 uur bij een bres van 50 m breed respectievelijk 200 m breed te Amerongen.



Figuur 3.4 Invloed van de bresgrootte op overstroomd gebied en waterdiepte (Asselman, 2002)

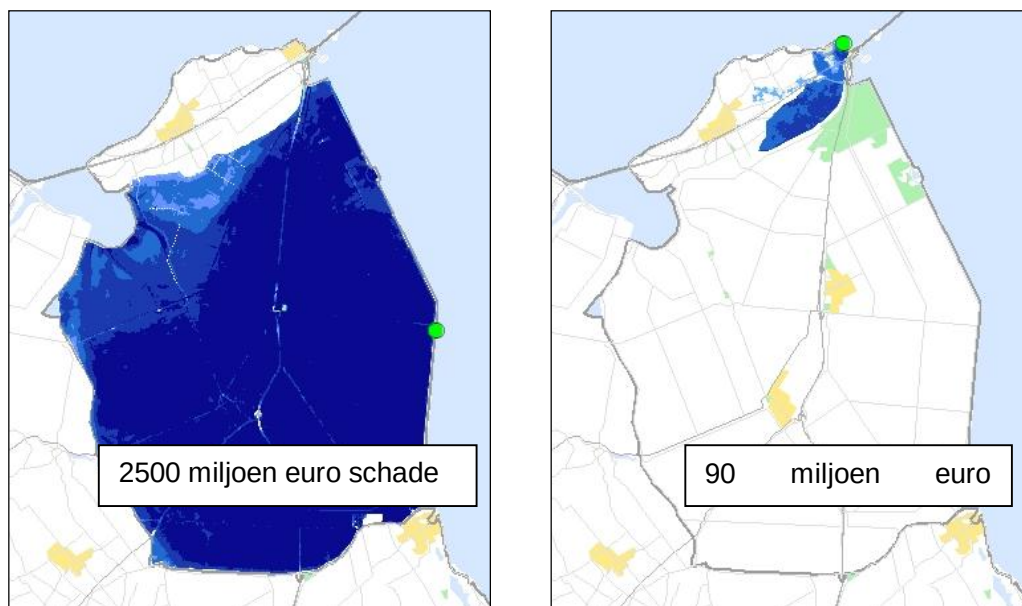
In overstromingssimulaties wordt er meestal vanuit gegaan dat de bres uitschuurt tot het niveau van het achterliggende maaiveld. Het is echter mogelijk dat een bres dieper uitschuurt, zoals op veel plaatsen in Zeeland en Zuid-Holland het geval was tijdens de overstromingen van 1953, maar ook langs de rivieren, waar door dijkbreuk diepe wielen zijn ontstaan. Een diepere bres kan leiden tot een langduriger instroom, en daarmee tot een groter overstroomd oppervlak. De aanwezigheid van een hoog voorland kan daarentegen de bresdiepte beperken.

Breslocatie

De breslocatie is van grote invloed op het overstromingsverloop. Zo maakt het voor het overstromingsverloop een groot verschil of de locatie grenst aan een hoog achterland, of juist aan een diepe polder. Bij dijkringen langs de kust maakt het een groot verschil of de bres ontstaat in een klein of in een groot compartiment. En tenslotte is de aankomsttijd van het eerste water natuurlijk sterk afhankelijk van de afstand tot de bres en dus van de breslocatie.

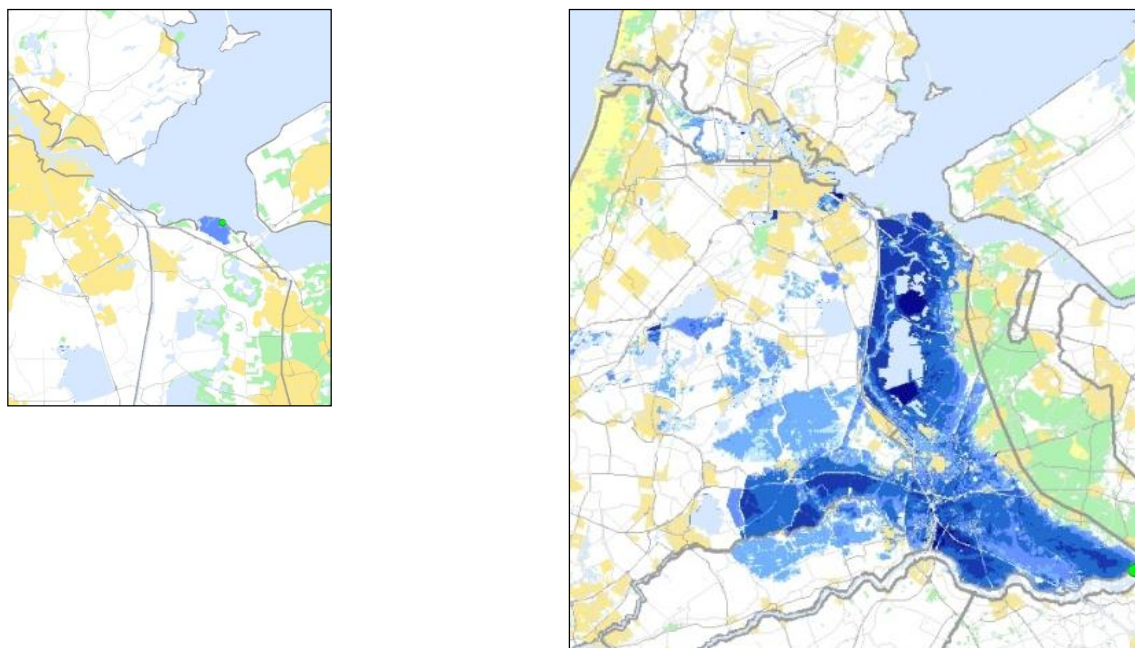
Een voorbeeld met zulke grote verschillen is de Wieringermeer (dijkring 12; zie Figuur 3.5). Bij een doorbraak langs het noordelijke deel van het dijkringgebied (het oude eiland Wieringen), zijn de gevolgen veel kleiner dan bij een doorbraak langs het oostelijke deel (een ingepolderd stuk Zuiderzee). Toch gelden voor de keringen van beide delen dezelfde eisen.

In hellende en langgerekte dijkringen in het rivierengebied kan de breslocatie ook tot grote verschillen leiden in overstroomd gebied en waterdiepte. Bij een bovenstrooms gelegen doorbraaklocatie overstroomt vrijwel de gehele dijkring, terwijl bij een benedenstrooms gelegen bres het bovenstroomse deel droog blijft. Daarbij maakt het ook nog veel uit of het gaat om een overstroming vanuit de Nederrijn, de Waal of de Maas; in die rivieren zitten immers verschillende hoeveelheden water.



Figuur 3.5 WaterdiepteKaarten voor doorbraken langs het IJsselmeer (links) en de Waddenzee (rechts). (VNK, 2011)

Een voorbeeld van zo'n hellende dijkkring is dijkkring 44 (Kromme Rijn), die zowel vanuit de Nederrijn / Lek als vanuit de randmeren wordt bedreigd. In dat geval is de locatie van de bres zeer bepalend voor de gevolgen. Zie bijvoorbeeld Figuur 3.6. Een bres bij Muiden leidt tot een beperkte overstroming, terwijl een bres aan de 'hoge kant' bij Amerongen er toe kan leiden dat zelfs de compartimenteringskeringen met de dijkringen 14 en 15 overlopen.

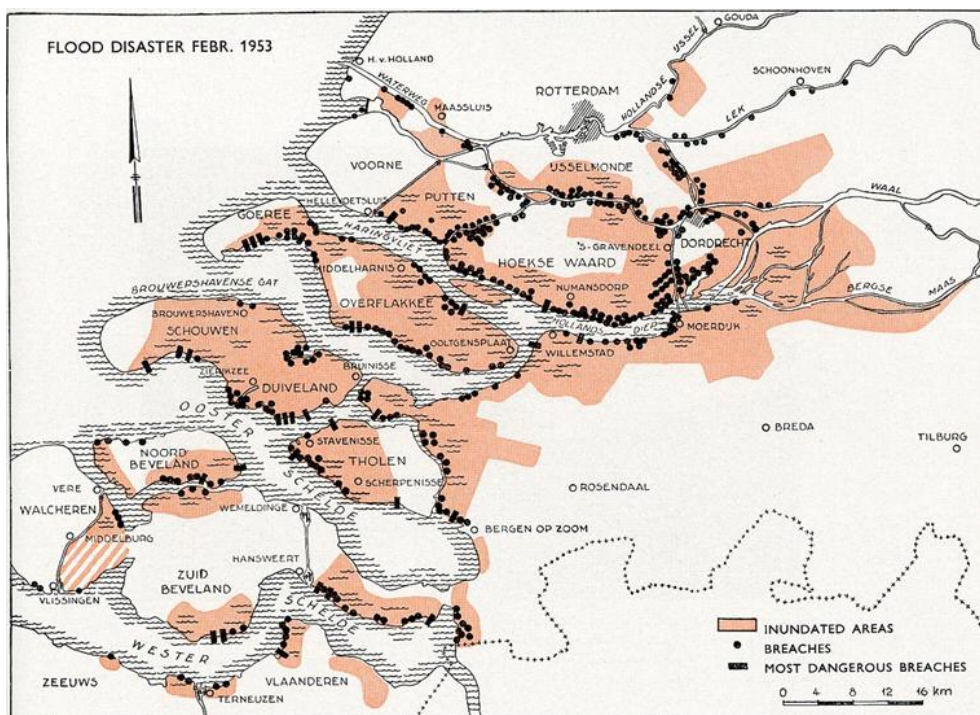


Figuur 3.6 Overstromingspatronen bij dijkkring 44 Kromme Rijn bij bres aan noord- resp. zuidkant van dijkkring (VNK, 2011)

Aantal bressen per dijkkring

Bij veel overstromingssimulaties wordt uitgegaan van één bres per ringdeel. In het verleden is echter sprake geweest van overstromingen met meerdere breslocaties (mogelijk ten gevolge van meerdere zwakke plekken). Zo traden in 1926 meerdere doorbraken op langs de Maas.

Bij de ramp van 1953 was sprake van een groot aantal bressen. Het aantal bressen per kilometer dijk varieerde sterk (zie ook Figuur 3.7). Gemiddeld was er in 1953 ongeveer één bres per 3 km, maar bij sommige dijkkringen wel 1 per km en bij andere eerder 1 per 10-20 km. De ligging (noord- of zuidkant van de eilanden) speelde een rol. Voor sommige delen van het gebied waren de omstandigheden een stuk extremer dan de dijken aankonden. Een goed beeld van de relatie tussen de 'kwaliteit' van de keringen, de lokale hydraulische omstandigheden en het aantal bressen ontbreekt echter.



Figuur 3.7 Locatie van bressen bij de ramp van 1953

De invloed van het aantal bressen zal verschillen per type dijkkring. In het rivierengebied en het IJsselmeergebied zal een extra bres betrekkelijk weinig toevoegen wanneer tenminste bij de enkelvoudige bres wordt uitgegaan van de locatie met de grootste gevolgen (bovenstrooms, groot verhang, instroom niet belemmerd door een secundaire kering). In kustdijkkringen daarentegen zal een toename van het aantal bressen veelal een groot effect hebben op het overstromd oppervlak en de waterdieptes. Kustdijkkringen zijn veelal sterk gecompartmenteerd en meerdere bressen leiden dan tot overstroming van meerdere/verschillende delen van de dijkkring. Bovendien is de duur waarover instrooming plaatsvindt bij een kustdoorbraak relatief kort, zodat de totale instrooming bij meerdere bressen fors kan toenemen.

3.3.2 Bresontwikkeling langs de kust en estuaria

Voor de grote dijkeringen langs de kust geldt dat ze gekenmerkt worden door een grote mate van gecompartmenteerdheid als gevolg van het aanwezige boezemstelsel. De breslocatie heeft dan ook een grote invloed op de omvang van het overstroomd gebied en de overstromingsdiepten.

Het begintijdstip van bresgroei, de bresbreedte en het aantal bressen beïnvloeden het totale volume water dat de dijkkring instroomt en hebben een vergelijkbaar effect op de waterdiepte en het overstroomd oppervlak als het verloop van de stormvloed. In het geval dat door de grotere instroom een aantal boezemkaden of andere hogere gelegen lijnelementen (extra) overstroomt kan ook het overstroomd gebied er anders uit komen te zien. Vooral bij dijkeringen in zuidwest Nederland hangt het overstroomd oppervlak af van de duur dat water over secundaire keringen stroomt.

Het westelijke deel van dijkeringen 13 en 14 kent een relatief hoge ligging. Op plaatsen waar de duinen en strandwallen relatief smal zijn (bijvoorbeeld bij Ter Heijde) kan zich door uitschuring een geul vormen met een lengte van enkele honderden meters. Hierdoor kan de instroming aanzienlijk langer doorgaan, en nemen de waterdiepte en het overstroomd oppervlak toe. Eenmaal ontstane bressen zijn door getijstromen moeilijk af te sluiten, zo is in 1953 gebleken.

Anders dan in het rivierengebied of het merengebied, heeft een doorbraak langs kust geen invloed op de omvang of duur van het hoogwater; er is geen sprake van ontlasting. Het is dan ook aannemelijk dat er bij bovenmaatgevende omstandigheden sprake zal kunnen zijn van meerdere bressen (vergelijk de ervaringen van 1953).

3.3.3 Bresontwikkeling langs de rivieren

Bij dijkeringen langs de rivieren is de breslocatie nog bepalender. In het bovenrivierengebied is vaak sprake van hellende dijkeringen, waar het water bij vandaan stroomt, en van een groot hoogteverschil tussen waterstand op de rivier en maaiveldhoogte achter de dijk. In het overgangsgebied is daarentegen meestal sprake van vlakke dijkeringen en een kleiner waterstandsverschil tussen rivier en land.

Sommige dijkeringen worden bedreigd vanuit verschillende rivieren. Doordat de waterstanden en de afvoeren per rivier verschillen, zijn ook de gevolgen van een dijkdoorbraak dan zeer verschillend. Dijkkring 43 overstroomt bijvoorbeeld vrijwel geheel wanneer de bres ontstaat in het bovenstroomse deel van de Waaldijk. Doordat de waterstand op de Nederrijn-Lek bij dezelfde hoogte veel lager is dan op de Waal, en ook de afvoer van die riviertak kleiner is, zijn de gevolgen van een bres langs die rivier minder ernstig. En langs de IJssel is sprake van een natuurlijk rivierdal, waarin de rivier relatief laag ligt in vergelijking met de boven het land uitrijzende Waal.

Een groot hoogteverschil, zoals bij de Waal, en het makkelijk wegstromen van het water in hellende dijkeringen leidt gemakkelijk tot snelle bresgroei, waarbij het over een 'drempel' stortende water in het verleden heeft geleid tot de vorming van diepe wielen. Daarbij speelt ook een rol dat hoogwaters op de rivieren lang duren en dus langdurig instromen, waarbij de bres verder kan groeien.

Voor kleine dijkringen in het rivierengebied geldt dat de duur van het hoogwater en de bresgroei (breedte, diepte, tijdstip en aantal) weinig tot geen effect hebben op de waterdiepte. In alle gevallen zal er voldoende water de dijkkring in kunnen stromen om deze volledig te laten overstromen.

De dijkringen in het overgangsgebied worden bedreigd door hoge afvoeren op de Rijn en/of de Maas bij een storm(vloed). De duur van een hoogwater als gevolg van hoge afvoeren op de rivier is veel langer dan die als gevolg van een storm die tot dezelfde buitenwaterstand leidt. Bij een doorbraak als gevolg van hoge rivierafvoeren zal daarom meer water het gebied instromen; dit geldt zeker voor langgerekte hellende dijkringen, zoals dijkkring 15 en 16. Een doorbraak als gevolg van hoogwater op de rivier zal zich vooral voordoen in het bovenstroomse deel van de dijkkring. In dit geval loopt de hele dijkkring onder en kan de waterdiepte meerdere meters bedragen. Bij een doorbraak als gevolg van een stormvloed bevindt de breslocatie zich meer in het benedenstroomse deel van de dijkkring. Het bovenstroomse deel van de dijkkring blijft in dat geval vaak droog en de waterdieptes zijn kleiner.

3.3.4 Bresontwikkeling langs afgesloten grote wateren/meren

Voor de bresontwikkeling langs grote meren is het hoogteverschil tussen buitenwaterstand en maaiveld in de dijkkring van groot belang voor de ontwikkeling van bressen. De IJsselmeerpolders liggen, door hun ontstaansgeschiedenis, veel lager dan het waterpeil, zodat water zich bij een dijkbreuk de polder in zal storten. Dat betekent een snelle bresgroei. Waar het land rond of net boven NAP ligt, zal water uit de grote wateren/meren veel minder snel instromen, omdat dat bij storm hooguit tot enkele meters boven NAP wordt opgestuwd. Bressen groeien dan langzamer, zowel in de breedte als in de diepte.

Voor de dijkringen in het IJsselmeergebied geldt dat de waterdiepte binnendijs en het overstroomde oppervlak vrijwel alleen afhankelijk zijn van het meerpeil. Onzekerheden in bresgroei en verloop van de stormopzet spelen nauwelijks een rol. Het overstromingspatroon wordt nog wel beïnvloed door de aanwezigheid van een compartimenteringsdijk, en dat maakt de breslocatie van belang.

Dijkringen in het zuidwesten van Nederland worden bedreigd vanuit de Noordzee en de aangrenzende afgesloten estuaria. Deze dijkringen kennen een grote mate van gecompartmenteerdheid. Vele voormalige primaire waterkeringen zijn nog aanwezig in het binnendijkse gebied. De aanwezige keringen hebben een groot effect op het overstromingsverloop. Dit bleek ook uit de overstromingen die zijn opgetreden in 1953. Geen enkele dijkkring is volledig overstroomd, omdat voormalige waterkeringen het water tegen hielden.

De standzekerheid van de tussendijken vormt in dit gebied een belangrijke onzekerheid. Indien aangenomen wordt dat de voormalige waterkeringen niet bezwijken, blijft het overstroomd gebied veelal beperkt tot één of enkele polders. Echter, wanneer de tussendijken wel bezwijken kan een veel groter gebied overstromen.

3.4 Verloop van een overstroming

3.4.1 Overstromingsverloop – algemeen

Bij het overstromingsverloop gaat het om hoe het water loopt als het eenmaal een gebied instroomt: *waar* het heen stroomt, *hoe snel* het stroomt, *hoever* het zich verspreidt, *hoe snel* het stijgt op iedere plek binnen een dijkkringgebied, *hoe diep* het daar maximaal wordt, wat de *einddiepte* is als er geen water meer instroomt, en eventueel *hoe snel* een gebied uiteindelijk weer leegloopt. Of dat het moet worden leeggepompt.

Om een goed beeld te krijgen van het overstromingsverloop worden overstromingssimulaties gedaan. De resultaten daarvan kunnen als ‘filmpje’ worden vertoond, of er kunnen illustraties worden gemaakt van enkele bepalende kenmerken. In dit rapport maken we noodgedwongen vooral gebruik van kaartjes die laten zien welke delen van een gebied onder water kunnen lopen en hoe diep het daar wordt. Die plaatjes zijn afgeleid uit de vele honderden simulaties die nu beschikbaar zijn. We gebruiken ze vooral om de vele verschillen tussen en binnen gebieden te illustreren.

Voor de mogelijke gevolgen van een overstroming in termen van aantallen slachtoffers, aantallen getroffen en economische schade zijn vooral de factoren aankomsttijd eerste water, stijgsnelheid, overstroomd oppervlak en maximale waterdiepte relevant. Die ‘blootstellingskenmerken’ (Van de Pas *et al.*, 2012) zijn namelijk doorslaggevend voor het slachtoffer risico en de te verwachten economische schade. Daar gaan de meeste kaartjes dus over.

Bepalende gebiedskenmerken

Het overstromingsverloop wordt grotendeels bepaald door het natuurlijk reliëf en door infrastructuur die door de mens is aangelegd. Bij dat laatste gaat het niet alleen om waterkeringen, maar ook om lijnvormige infrastructuur die niet bedoeld is om water te keren of te vertragen – maar dat wel doet –, en om watergangen die niet bedoeld zijn om overstromingswater te geleiden – maar dat wel doen. Tenslotte is de grootte van een dijkkringgebied (of een deel daarvan) belangrijk, want dat bepaalt hoe snel het gebied helemaal vol is en of er tegendruk ontstaat ter plaatse van de bres.

Bij de gebiedskenmerken gaat het om de volgende vragen:

- Helt het (dijkring)gebied, is het vlak, een badkuip of variabel in hoogte?
- Loopt het gebied helemaal onder of is er sprake van een zekere gecompartmenteerdheid (veel tussendijken en/of andere obstakels)?
- Hoe groot is het (dijkring)gebied of het compartiment (kan het water een beetje weg)?

Hellend of vlak?

Een eerste belangrijke gebiedseigenschap is de helling van het maaiveld. In een natuurlijk rivierdal, zoals langs de Limburgse Maas, helt het maaiveld meestal naar de rivier toe – al dan niet met terrassen – en minder steil ook naar zee toe. Maastricht ligt nog circa 45 m boven zeeniveau. In bedijkte natuurlijke rivierdalen is dat ook nog het geval. In bedijkte komgebieden, zoals de Betuwe, helt het terrein vaak van de rivier af, maar nog wel naar zee. De Overbetuwe ligt nog 9 m boven zeeniveau, maar Gorkum-Oost op -0,1 m. Dat bepaalt het verloop van een overstroming.

In hellende dijkringen blijft in het stroomopwaartse deel de waterdiepte vaak beperkt, omdat het water doorstroomt naar het laagste punt.

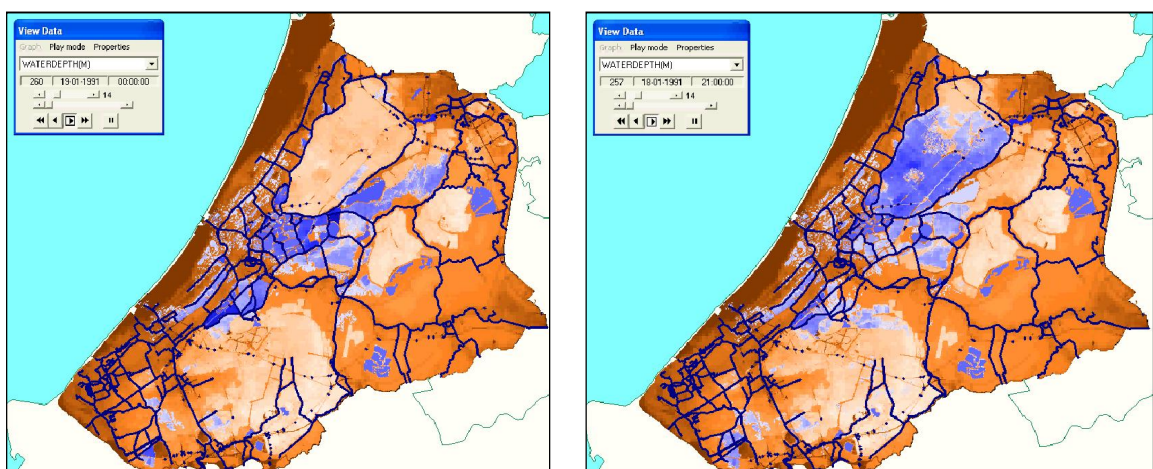
Indien de dijkbreuk meer benedenstrooms optreedt, blijft het stroomopwaarts gelegen deel van een hellende dijkkring vaak volledig droog.

In dijkringen met een vlak maaiveld is sprake van een volstrekt ander overstromingsverloop. Water heeft veel meer moeite om z'n weg te zoeken op een vrijwel vlakke ondergrond. De ruwheid van die ondergrond wordt dan heel belangrijk, evenals de aanwezigheid van sloten: die 'verworden' vaak tot preferente stroombanen waarlangs het water het gebied 'infiltrert'. Het kan bij vlakke gebieden gaan om een 'badkuip' die snel volloopt door een groot verschil tussen buitenwaterstand en maaiveld (IJsselmeerpolders), maar het kan ook gaan om langzame instroom in dijkringen met relatief hoog maaiveld (Friesland, grote delen van Noord-Holland, Walcheren).

Veel obstakels of één bak zonder belemmeringen?

Het verloop van een overstroming wordt in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid van lijnvormige elementen binnen een (dijkkring)gebied. Ten eerste liggen er in veel gebieden obstakels die het water tegenhouden of geleiden, zoals: oude dijken, regionale waterkeringen, boezemkaden, hoger gelegen wegen en spoorwegen. Voor de compartimenteringsstudie zijn al die lijnvormige obstakels op kaart gezet (WL | Delft Hydraulics & Robbert de Koning landschapsarchitect BNT, 2007; zie Figuur 2.4). Ze kunnen het water volledig tegenhouden, tijdelijk tegenhouden ('vertragen'), of alleen een andere richting opsturen. Met elkaar kunnen ze worden aangeduid als 'bestaande gecompartmenteerdheid'. Daar moet overigens worden aangetekend dat die vaak behoorlijk lek is. In en onder (spoor)wegen zitten immers bruggen, viaducten en duikers.

Ook is de standzekerheid van deze lijnvormige elementen – die vaak niet bedoeld zijn als waterkering – veelal een grote onbekende. Van boezemkades mag nog wel enig waterkerend vermogen worden verwacht, maar van spoordijken en wegen veel minder. Daarom worden bij overstromingssimulaties wel verschillende aannames gedaan over de standzekerheid en doorlatendheid van lijnvormige obstakels. Het voorbeeld van Figuur 3.8 voor de Haarlemmermeer met Schiphol laat zien dat dit veel kan uitmaken. De figuur betreft het overstromingsbeeld enkele dagen na het ontstaan van een bres bij Katwijk bij kerende regionale kades (links) en met bezweken regionale kades (rechts).



Figuur 3.8 Invloed van regionale kades op overstromingsbeeld na bres bij Katwijk (VNK, 2009).

Er zijn ook (dijkkring)gebieden waarin nauwelijks lijnvormige obstakels voorkomen. Die worden wel aangeduid als 'bakjesdijkringen' of badkuipen. Men denke dan vooral aan de

Flevopolders, Noordoostpolder en Wieringermeer. Maar ook de Krimpenerwaard en Alblasserwaard gedragen zich heel vergelijkbaar, omdat de aanwezige obstakels relatief laag zijn ten opzichte van de instroomhoogte van het water.

In vlakke dijkringen is het netwerk van waterlopen van belang. Hier werd oorspronkelijk weinig rekening mee gehouden, tot uit simulaties bleek dat water vaak preferent via bestaande watergangen stroomt: die zijn namelijk dieper en 'hydraulisch gladder'. Vooral bij het vaststellen van de aankomsttijd van het overstromingswater is het belangrijk dit mechanisme in simulaties mee te nemen.

Groot gebied of klein gebied/compartiment?

In een groot dijkringgebied kan het water over het algemeen makkelijk doorstromen waardoor het vlak achter de bres niet snel diep wordt. Daardoor blijft de kans op verdrinking beperkt, want die wordt vooral bepaald door de stijgsnelheid. Als het water snel stijgt, is er nauwelijks kans om weg te komen. Daar staat tegenover dat het verhang tussen buitenwater en water in de polder groot blijft en er geen tegendruk ontstaat, zodat het water makkelijk, met grote snelheid en langdurig kan blijven instromen. De totale hoeveelheid water die naar binnen stroomt, is dan groot. En door de grote instroomsnelheid kan de bres uitschuren en snel groeien – of zelfs een wiel, waai of kolkgat vormen – , waardoor het water nog sneller instroomt. Gevolg: nog meer water binnen.

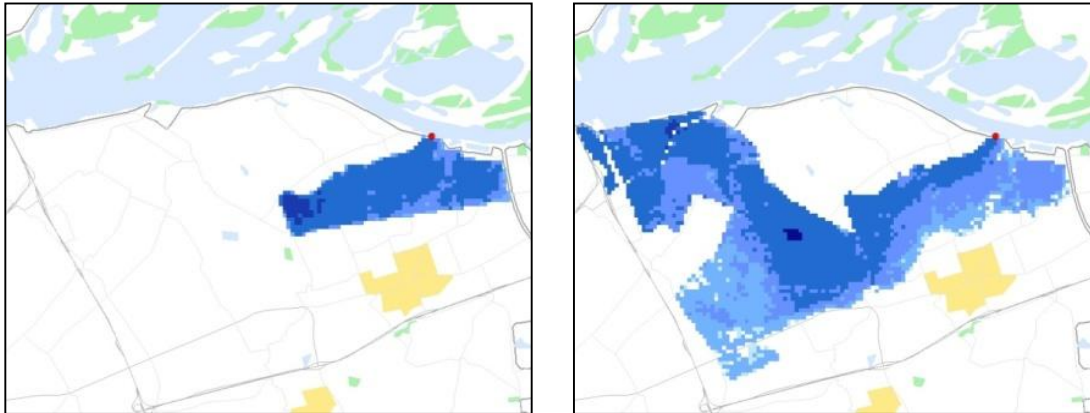
Is de dijkkring heel klein of ligt er achter de primaire waterkering nog een oude of regionale kering, dan stijgt het water snel. Als dat gebeurt in een bewoond gebied, dan kan dat tot slachtoffers leiden. Voor kleine dijkringen als Keent en de gebieden achter een 'Maaskade' is tijdige preventieve evacuatie essentieel, want die kunnen snel vollopen. Andere kleine dijkringgebieden zijn Rozenburg en Pernis langs de Nieuwe Waterweg/Nieuwe Maas.

Als een klein compartiment onbevolkt of dun bevolkt is, dan leidt zo'n 'tweede linie' waterkeringen vooral tot vertraging van de instroom, beperking van de verspreiding van water en extra tijd voor de mensen in achterliggende compartimenten. Zo'n situatie doet zich voor langs grote delen van de Waddenkust van Friesland en Groningen, maar ook plaatselijk op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden.

Een snel vollopend compartiment betekent ook tegendruk bij de bres waardoor de instroom vertraagt en de bres minder snel groeit. Een kleinere bres is makkelijker weer te dichten, zo is in 1953 gebleken; toen heeft men op Schouwen een 'delingsdijk' aangebracht om een bres die door de enorme eb- en vloeddebieten eerst niet te sluiten bleek, alsnog te kunnen sluiten.

Kort samengevat: de bestaande gecompartmenteerdheid (veel tussendijken en/of andere obstakels) beïnvloedt het overstromingsverloop doordat het water niet – of minder snel – kan doorstromen. Dat kan voordelig uitpakken voor verder van het water gelegen gebied (bijv. het geval in Friesland), en nadelig voor het buitenste compartiment zelf (bijv. in Rotterdam ten noorden van de Nieuw Maas). De stijgsnelheid is daar immers groter, hoewel de bresgroei door de snel toenemende tegendruk zal worden beperkt.

De invloed van compartimenteringskeringen en spoordijken op het overstromingsbeeld van dijkkring 34 West-Brabant is getoond in Figuur 3.9. Het betreft simulaties van een doorbraak bij Drimmelen-Oost waarbij compartimenteringdijken het water nog tegenhouden of waarbij deze keringen zijn verwijderd; beide simulaties bij toetspeil.



Figuur 3.9 Invloed van compartimenteringskeringen op overstromingsbeeld bij dijkkring 34 (VNK, 2011).

3.4.2 Overstromingsverloop langs de kust en estuaria

Dijkkringgebieden langs de kust zijn allemaal vlak, in de zin dat ze niet hellen (ze kennen wel forse hoogteverschillen, waarover later meer). Ze zijn vaak sterk gecompartmenteerd door de ontstaansgeschiedenis en de aanwezigheid van boezemwateren. En de meeste zijn groot, zoals Friesland-Groningen (DR6), Noord-Holland (DR13) en Centraal-Holland (DR14) tot middelgroot, zoals de Hollandse en Zeeuwse (schier)eilanden.

De kustgebieden die door achtereenvolgende **landaanwinningen** tot stand zijn gekomen bestaan vaak uit achter elkaar gelegen polders, gescheiden door oude zeedijken. Dat is het geval langs de Waddenkust van Friesland en Groningen (DR6), in noordelijk Noord-Holland, in Zeeuws Vlaanderen en op de Zuid-Hollandse en Zeeuwse schiereilanden. Doordat de buitenste polders het laatst zijn ingedijkt hebben die langer blootgestaan aan opslibbing. Die liggen meestal het hoogst, vaak tussen 0 en 1 m boven zeeniveau. Vooral in Friesland en Groningen is duidelijk sprake van: hoe verder landinwaarts, hoe lager het wordt doordat het land minder is opgeslibd en langduriger is ingeklonken. Ook de Zeeuwse en Hollandse eilanden kennen soms een lager gelegen kern en hogere buitenste polders. In het algemeen geldt dus: hoe jonger, hoe hoger.

Door het relatief hoge maaiveld in de buitenste polders en door de vele oude dijken die tegenhouden of vertragen kan water in zulke dijkkringgebieden niet makkelijk instromen en het komt meestal ook niet zo ver het land in. Dat heeft ook alles te maken met de aard van de bedreiging (zie paragraaf 4.2.2), die nu eenmaal inhoudt dat de zeewaterstand al weer snel normaal wordt. Het algemene beeld voor kustdijkkringgebieden is dan ook: relatief langzaam vollopend en slechts gedeeltelijk. Figuur 3.10 geeft een voorbeeld voor Zuid-Beveland (DR31). De vele oude dijken van de landaanwinningspolders werken compartimenterend en beperken de verspreiding van het water. Ze veroorzaken echter wel grote stijgsnelheden in de buitenste compartimenten.

Maar waar het overstromingswater niet wordt tegengehouden door oude dijken en/of boezemkades kan het door het enigszins 'landinwaarts hellen' uiteindelijk toch ver landinwaarts komen, bijv. wel tot in Groningen of Leeuwarden. En men dient te bedenken dat een dijkdoorbraak altijd gepaard zal gaan met een heel zware storm, die het water als het ware voort kan blazen over het maaiveld.



Figuur 3.10 Invloed landaanwinningspolders op overstroomingspatroon dijkkring 31 (VNK, 2011).

Morfologisch gezien lijkt ook het Noord-Hollandse (DR13) West-Friesland sterk op Friesland (DR6), maar het grenst tegenwoordig niet meer aan zee. Het ligt relatief hoog en is omsloten door de Westfriese omringdijk. Maar het kent net als de westkust van Friesland geen aandijkingen want het is nooit helemaal verloren gegaan en daarna weer geleidelijk herwonnen op de zee. Een overstroming verloopt in deze gebieden ook traag door de hoogteligging, maar er zijn geen compartimenteringen.

Ook voor Walcheren geldt zoiets: het ligt rond zeeniveau (tussen -1 en +1 m), maar is niet/nauwelijks gecompartmenteerd door een afwijkende ontstaansgeschiedenis. Het loopt relatief langzaam maar wel helemaal onder bij een dijkbreuk.

Een tweede type kustdijkringen is dat van de **droogmakerijen tussen bovenlanden** van het oude veenlandschap. Dat komt voor in beide Hollanden achter de duinen. Het gaat om Noord-Holland (13) ten zuiden van Alkmaar en om Centraal-Holland (14).

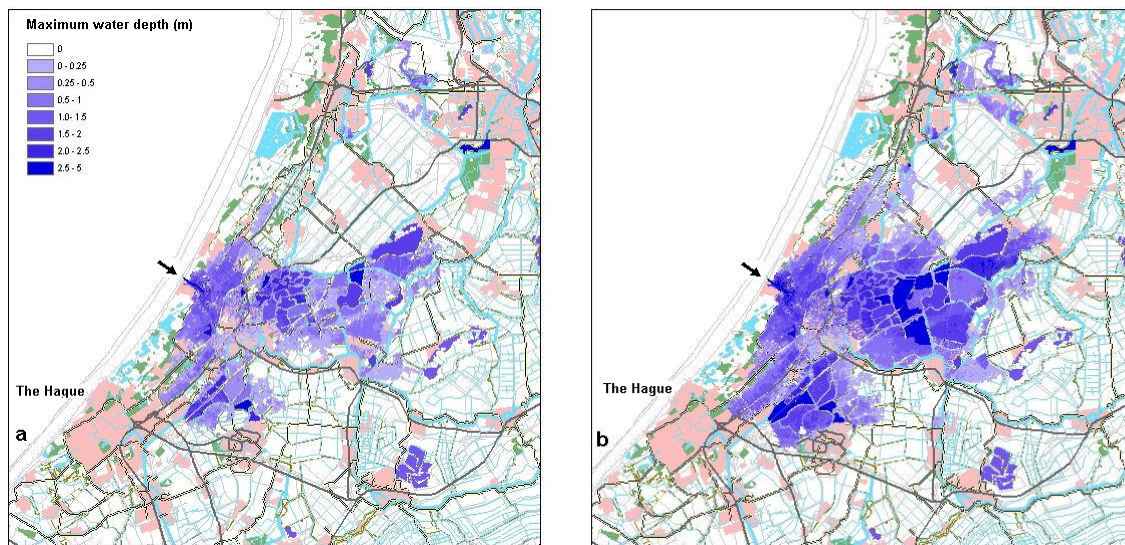
De droogmakerijen liggen zeer laag, tot ruim 6 m beneden zeeniveau, tussen boezemwateren zonder of met restanten veen (bovenlanden). Die boezemwateren en bovenlanden zorgen ook voor een sterke gecompartmenteerdheid, maar op een veel lagere hoogte dan oude dijken doen. De kadehoogtes worden immers bepaald aan de hand van het boezempeil. Daardoor zijn de kades zelden hoger dan 1 m boven NAP. Ze vertragen het water dat een polder/droogmakerij instroomt wel, want die moet eerst helemaal gevuld worden voor de volgende kade weer overloopt. Het overstroomingsverloop wordt dus sterk beïnvloed door de vele serie- en parallel geschakelde bakjes.

Haaks op die vertraging staat het feit dat het dichte netwerk van vaak brede boezemwateren een overstroming goed geleidt. Water kan daardoor snel ver het land in stromen en op grote afstand van de bres het overlopen van een boezemkade veroorzaken. In Figuur 3.8 hebben we al laten zien hoeveel het uitmaakt of boezemkades worden geacht standzeker te zijn of niet. Die figuur laat heel goed zien hoe zelfs in het lage Holland de bestaande compartimentering door boezemkades van invloed is op het areaal dat uiteindelijk onderloopt. En het laat ook goed zien hoe de hoogteverschillen tussen droogmakerijen en andere polders de waterdiepte bepalen. De relatief hoge strandwallen (tussen Den Haag en Leiden) en de oeverwallen langs de Oude Rijn blijven relatief droog of overstroom slechts ondiep.

Het algemene beeld is: het water komt hier veel verder dan in kustdijkringen die door landaanwinning tot stand zijn gekomen, maar ook hier wordt het areaal effectief beperkt door de bestaande gecompartmenteerdheid en de vele 'diepe bakjes', en doordat de instroom langs de kust nu eenmaal niet zo langdurig is.

Figuur 3.8 en ook Figuur 3.11 hieronder tonen de betekenis van de boezemkades voor het overstroomingsverloop, maar ook het belang van hun hoogte.

Bij een doorbraak bij Katwijk bij huidig zeepil houden de boezemkaden het overstromde areaal beperkt, maar als de zee zo'n 1,3 meter hoger komt te staan door klimaatverandering lopen ze haast allemaal over, ook bij de dan gemiddelde middenstand. De compartimenterende werking van boezemkades en overige lijnvormige infrastructuur is dan minder effectief (want te laag). Dan komt het water veel verder het land in, ook op plekken die nu droog blijven.



Figuur 3.11 Invloed van hogere zeespiegel op omvang van overstroming (Klijn et al., 2010; 2012).

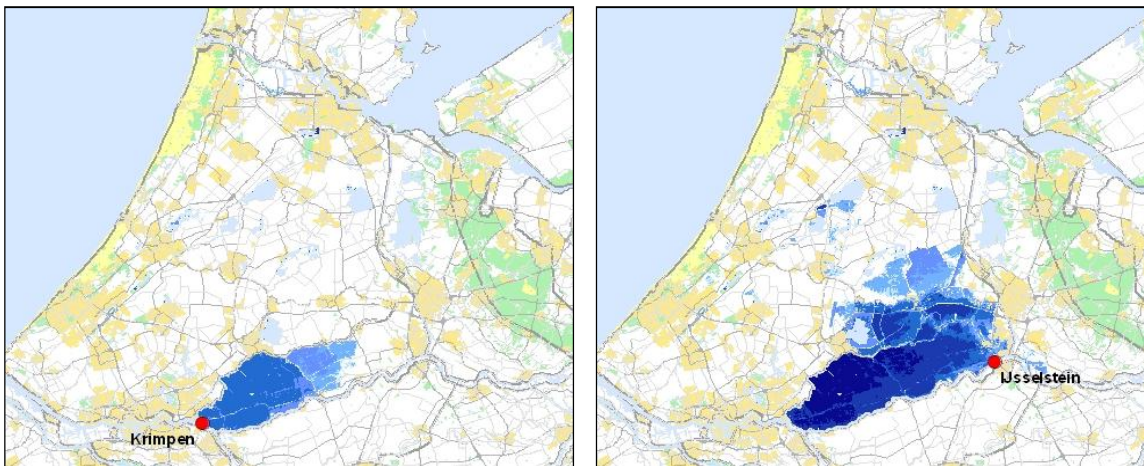
3.4.3 Overstromingsverloop langs de rivieren

Langs de rivieren moeten we ten eerste onderscheid maken tussen onbedijkte rivierdalen, zoals de onbedijkte Maas en dijkkringgebieden langs rivieren. Onbedijkte rivierdalen lopen geleidelijk onder en vanzelf weer leeg als het water zakt. Daar hebben we het hier verder niet over.

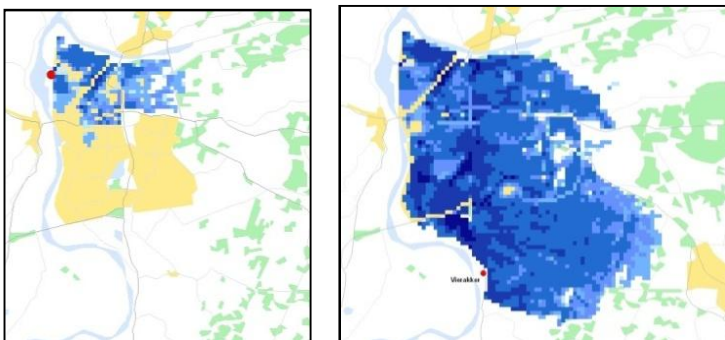
Bij dijkkringgebieden kan weer onderscheid gemaakt worden tussen sterk hellende dijkkringgebieden langs de bovenrivieren en nauwelijks meer hellende dijkkringgebieden in het benedenrivierengebied en/of het 'overgangsgebied'. Tot die laatste behoren in ieder geval de Alblasserwaard (DR16) en de Krimpenerwaard (DR15), maar ook polder Mastenbroek (DR10), het Land van Altena, Eiland van Dordrecht, delen van West-Brabant, IJsseldelta (DR11). De Alblasserwaard, Krimpenerwaard en IJsseldelta hellen nog wel iets maar liggen vooral heel laag door de opgetreden bodemdaling in deze laagveengebieden. Mastenbroek is een droogmakerij. De andere genoemde voorbeelden lijken meer of minder op de kustdijkingen die door aandijkingen zijn ontstaan: ze bestaan uit achtereenvolgens ingedijkte polders.

Door die vele verschillen is het lastig heel algemene uitspraken te doen. We beperken ons hier tot een aantal opvallende zaken, voor zover die samenhangen met de specifieke kenmerken van rivierdijkring gebieden: hellen, overig reliëf binnen de dijkkring, mate van gecompartmenteerdheid, en verschil in grootte.

Het feit dat dijkkringgebieden langs de rivieren **hellen**, betekent dat locaties aan het benedenstroomse eind van de dijkkring bij dijkbreuk altijd getroffen worden, of de breuk nu aan het benedenstroomse of bovenstroomse eind plaatsvindt. Dat is bijvoorbeeld te zien in Figuur 3.12 voor de Krimpenerwaard (DR15). Figuur 3.13 laat zien dat ook in een kleine stedelijke dijkkring als dijkkring 50 (Zutphen) het verschil maakt of de overstroming stroomopwaarts of stroomafwaarts plaatsvindt, temeer als ook nog een spoordijk het overstromingsverloop beïnvloedt



Figuur 3.12 Invloed breslocatie op overstromingspatroon bij dijkkring 15 (VNK2011)



Figuur 3.13 Invloed breslocatie op overstromingspatroon bij dijkkring Zutphen (DR50) (VNK2011)

Voor bovenstroomse locaties geldt het omgekeerde: bij een dijkbreuk aan het eind blijven ze soms droog of wordt het in ieder geval niet diep, bij een dijkbreuk aan het bovenstroomse eind stroomt het water soms snel door naar het 'laagste eind' zodat het niet snel diep wordt. Het water kan immers weg.

Voor langgerekte dijkkringen betekent dit dat je aan het ene eind 'relatief goed' zit (het water kan weg naar lagere veraf gelegen delen), aan het andere eind 'relatief slecht' (alle dijkbreuken bovenstrooms van dat punt leiden tot overstroming, en vaak ook nog erg diep). Dat is bijvoorbeeld het geval in langgerekte dijkkringen zoals de Betuwe(43) met Lent aan het 'droge end' en Gorkum in het 'putje', en in mindere mate voor Land van Maas en Waal, en de Bommelerwaard.

Maar het geldt vooral als er ook nog eens geen obstakels zijn zoals in bijvoorbeeld Land van Heusden/ De Maaskant (36) met Den Bosch op een ongunstige plek; of Salland (53), waar water door alle denkbare bressen uiteindelijk naar Zwolle stroomt.

Ook in hellende dijkeringen waar geen hele lange dijkstrekkings voorkomen maakt het veel uit of het water weg kan of juist tegen een obstakel vastloopt. Men denke aan de Gelderse vallei (45) waarin Wageningen relatief gunstig ligt, maar Veenendaal slecht.

Overig natuurlijk reliëf

Veel dijkringgebieden langs de rivieren liggen in een natuurlijk rivierdal of grenzen op ander wijze aan hogere gronden. Dat is bijvoorbeeld het geval langs de IJssel, maar het geldt ook voor de zuidkant van de bedijkte Maas. Het zijn daarmee eigenlijk geen 'echte' dijkeringen, want niet rondom door dijken begrensd. Voor het overstromingsverloop betekent dit dat het water wel stroomafwaarts evenwijdig aan de rivier stroomt, maar nauwelijks haaks op de rivier stroomt, omdat het dan als het ware heuvelop moet. Het wordt dan ook vaak niet erg diep en bovendien steeds ondieper naarmate men verder van de rivier af komt. Dat maakt evacuatie en vluchten voor het water mogelijk.

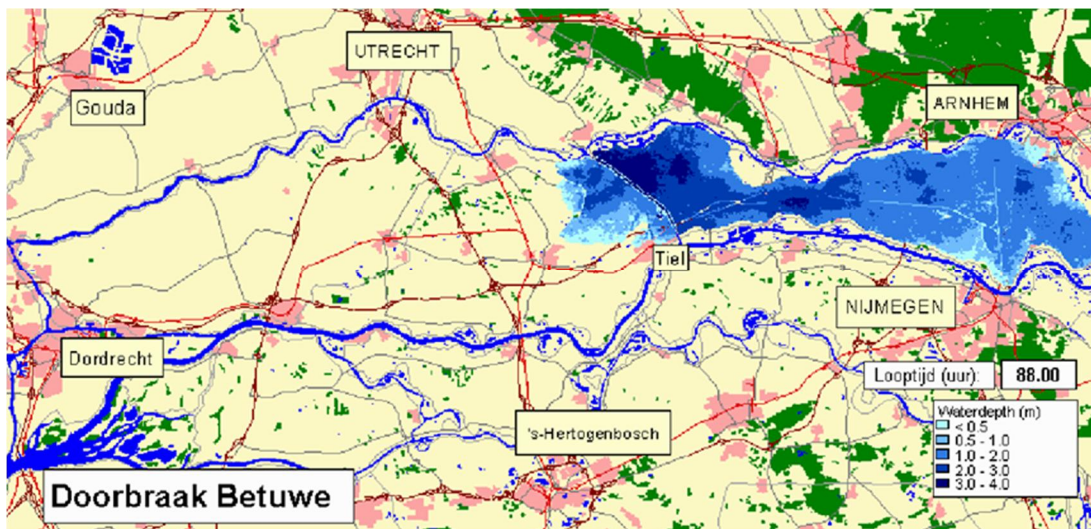
De dijkringgebieden tussen Maas, Waal en Nederrijn/Lek bestaan daarentegen uit komgebieden tussen stroomruggen en oeverwallen. Het gaat om de Betuwe, Land van Maas en Waal, Bommelerwaard, Alblasserwaard. Daar stroomt het water vaak eerst de kom in en pas dan evenwijdig aan de rivier richting zee. Die gebieden vullen zich dan ook vanuit het midden naar de zijanten². Het wordt in het midden het diepst en de diepte blijft aan de zijanten op de oeverwallen juist beperkt.

Dat fenomeen is geïllustreerd aan de hand van de Betuwe, hieronder in Figuur 3.14, waar de diep kommen duidelijk aftekenen tegen ondiepere randen. Deze figuur is er één in een reeks van drie, die nog twee zaken illustreren. Dat is ten eerste de invloed van dwarse obstakels, ofwel gecompartmenteerdheid, zij het slechts een partiële. En ten tweede gaat het om het fenomeen domino-effect, ofwel negatieve systeemwerking.

Dwarse obstakels/ gecompartmenteerdheid

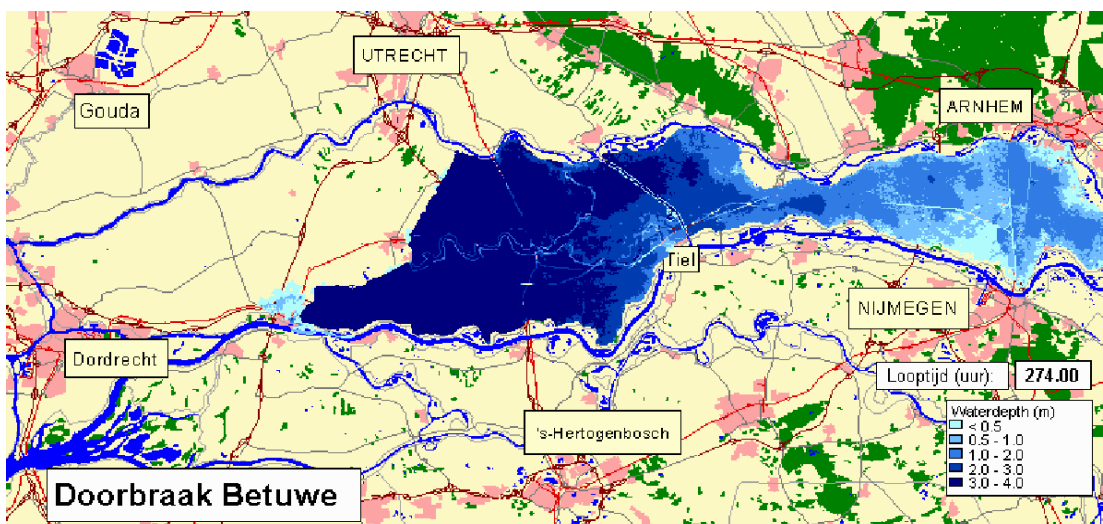
Figuur 3.14 laat de situatie zien bijna 90 uur na het ontstaan van een bres helemaal aan het bovenstroomse uiteinde van de Betuwe. Tot dit moment hebben de dijken langs het Amsterdam-Rijnkanaal het water tegengehouden. Daardoor wordt het dieper en dieper. Pas als de waterstand in het overstroomde gebied hoger wordt dan het obstakel loopt het water over de dijken heen. Dat gebeurt hier net, waardoor een groter gebied onder water begint te lopen. Deze vertraging is een 'bijkomstigheid', want nooit zo bedoeld. De dijken zijn immers uitsluitend kanaaldijken, geen opzettelijke compartimentering in de zin van een scheiding tussen twee dijkeringen.

² Daar lopen helaas vaak de belangrijkste wegen doorheen, hetzij in de lengte (A15) of er dwars op (A2). Maar voor evacuatie kan men beter naar de oeverwal of de dijk.



Figuur 3.14 Overstromingsbeeld van Betuwe na ca. 90 uur bij bovenstroomse doorbraak (Vis et al., 2001)

Op een volgend beeld (Figuur 3.15), na ruim 11 dagen, is de diepte in het westelijk deel van de Betuwe maximaal geworden. Daar loopt het water tegen de Diefdijk en de Zuiderlingedijk, hetgeen de bedoeling is, want dat zijn echte compartimenteringsdijken (c-kering cf. de Waterwet). Ook tegen deze 'obstakels' loopt het water vast en begint het te stijgen tot het over de laagste dijken gaat lopen nabij het meest benedenstroomse punt. In een groot deel van het westen van de Betuwe is het dan meer dan 3 m diep, en in Gorkum-Oost veel dieper.

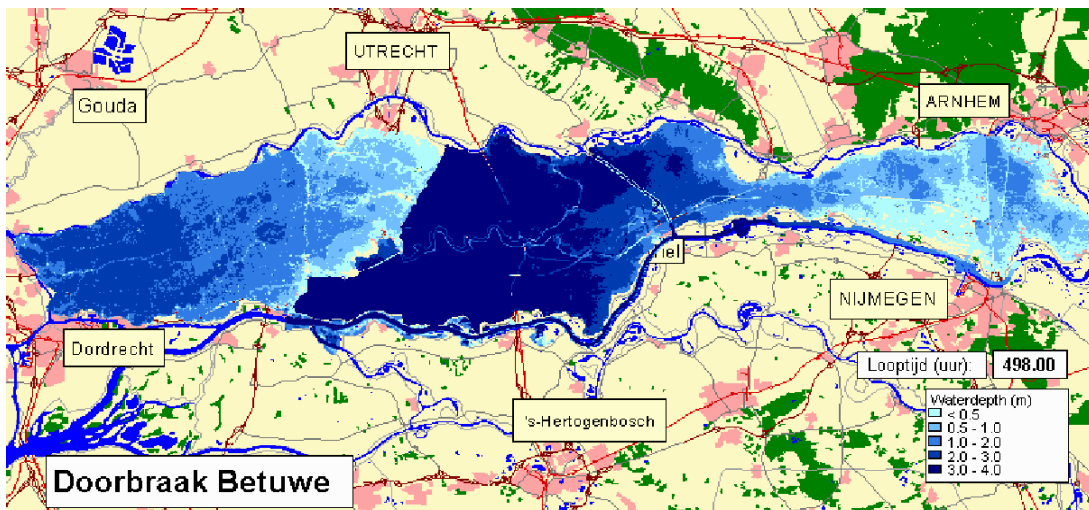


Figuur 3.15 Overstromingsbeeld van Betuwe na ca. 11 dagen bij een bovenstroomse doorbraak (Vis et al., 2001)

Domino-effect/ negatieve systeemwerking

Als op het moment dat het water tegen de Diefdijk staat de 'Dalemse overlaten' (een uitlaatwerk) niet worden ingezet, loopt het bij Gorinchem toch nog de Alblasserwaard in. Dat is het domino-effect dat eerder is besproken.

Dat overlopen begint op deze prent net. Het is te voorkomen met een uitlaatwerk, en dat zijn de Dalemse overlaten (Provincie Zuid-Holland, 1990). Als de compartimenteringsdijk en uitlaatwerken niet goed functioneren loopt ook de Alblasserwaard deels vol, terwijl in het oosten de Betuwe intussen al weer aan het droogvallen is (zie Figuur 3.16).



Figuur 3.16 Eindbeeld van overstroming van Betuwe bij bovenstroomse doorbraak (Vis et al., 2001)

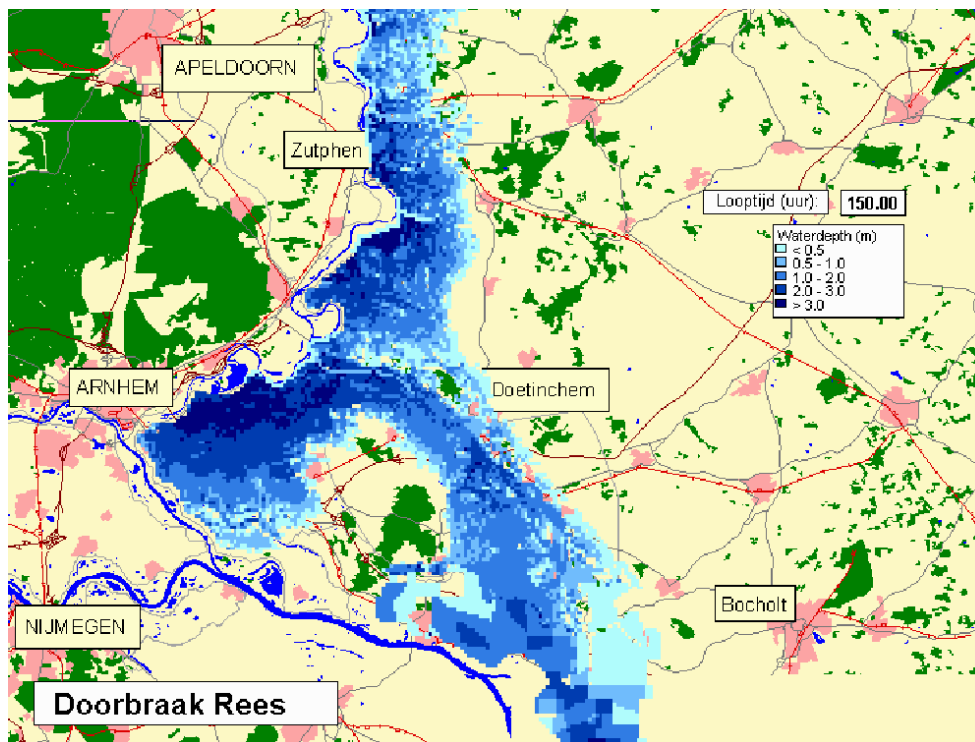
Een domino-effect – ook wel negatieve systeemwerking of cascade-effect genoemd – vraagt vooral bij rivieren aandacht, omdat daar heel vaak sprake is van hellend terrein en de dijkkringgebieden dus allemaal kunnen worden voorgesteld als ‘scheef hangende’ of ‘hellende bakjes’, waarvan de meest benedenstrooms gelegen dijk (veel) lager ligt dan de meest bovenstrooms gelegen dijk. Als het water maar lang genoeg inloopt – en dat kan bij rivieren met hun lange afvoergolven heel lang zijn – loopt het daar na enige tijd altijd over.

Zo’n situatie kan zich – behalve bij de Betuwe en Alblasserwaard (Diefdijk) – op meer plaatsen voordoen. De meest pregnante voorbeelden zijn:

- Kromme Rijn (44) en Krimpenerwaard (15), van waaruit de bestaande c-keringen aan de oost- en zuidoostzijde van Zuid-Holland (Amsterdam-Rijnkanaal en Hollandse IJssel) overlopen;
- Land van Maas en Waal (waar een Waalhoogwater veel hoger staat dan een Maashoogwater terwijl de Maas veel minder water aankan);
- Rijn en IJssel (water uit Niederrhein/Bovenrijn kan naar het IJsseldal stromen, waarbij de afvoerverdeling onbeheersbaar wordt).

Naar aanleiding van dat laatste voorbeeld geven we hier nog een plaatje van een overstroming die al in Duitsland begint, maar vervolgens ‘via de achterdeur’ het hele IJsseldal onder water kan zetten (zie Figuur 3.17). Een doorbraak in Duitsland bij Rees kan het hele IJsseldal blank zetten omdat het water achter het Montferland langs kan lopen. Dat is een voorbeeld van een domino-effect op internationale schaal. Het illustreert dat voor Nederland belangrijke dijken soms buiten onze landsgrenzen liggen.

De negatieve vorm van systeemwerking die met dit overstromingsverloop is geïllustreerd, heeft ingrijpende consequenties. Het kan worden aangeduid als een 'onbeheersbare situatie', met doorslag naar andere dijkringen of andere riviertakken. Deze vorm van systeemwerking vraagt wel veel water (in beide getoonde voorbeelden is een Rijnafvoer van $> 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ gesimuleerd). Zo'n situatie zal zich kunnen voordoen bij bovenmaatgevende omstandigheden.



Figuur 3.17 Internationaal domino-effect van een doorbraak in Duitsland bij Rees (Vis et al., 2001)

Positieve systeemwerking: ontlasting

Een andere vorm van systeemwerking moet in dit verband dan ook worden behandeld, namelijk de positieve systeemwerking (ook wel ontlasting genoemd). Dit houdt in dat als er een dijk breekt, dat er dan zoveel water door de bres kan stromen dat de waterstanden benedenstrooms van de doorbraak – en een klein stukje bovenstrooms ervan – iets kunnen dalen. Er blijft immers minder water in de rivier over.

Dat kan invloed hebben op de kans op doorbraak aan de overzijde van de rivier en meer stroomafwaarts. Dat is van belang voor maatgevende en benedenmaatgevende omstandigheden.

Tegen deze achtergrond is er ook een maximale hoogte afgesproken voor de Maaskaden. Die moeten bij een bepaalde waterstand overstroombaar zijn, omdat anders hogere waterstanden stroomafwaarts optreden. In dit geval wordt dus bewust gebruik gemaakt van positieve systeemwerking: Om de maatgevende waterstanden voor stroomafwaarts gelegen dijkringen te beperken, worden eisen gesteld aan de hoogte van de stroomopwaarts gelegen Maaskaden.

Voor het verloop van de overstroming als er eenmaal een bres is ontstaan maakt de mate van ontlasting niet veel uit. Deze beïnvloedt vooral de waterstand en daarmee de doorbraakkans; reden om er hier niet verder op in te gaan.

3.4.4 Overstromingsverloop langs grote wateren/meren

Dijkringgebieden langs meren en grote wateren liggen meestal vlak. Het gaat dan om gebieden die door aandijking zijn ontstaan en die rond gemiddeld buitenwaterpeil liggen, zoals de Zuid-Hollandse en Zeeuwse eilanden in het benedenrivierengebied en langs de Grevelingen en het Veerse Meer, en om dijkringen rond het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren.

Het karakter van deze wateren bepaalt het gevaar: storm met opwaaiing en golven, en als lang niet kan worden gespuid oplopende waterstanden doordat de rivieren deze gebieden vullen. De waterhoogten blijven echter beperkt en ook de totale hoeveelheid water is gelimiteerd.

De meeste dijkringen rond meren en grote wateren hebben een karakter zoals dat al is behandeld bij kust (paragraaf 3.4.2): vlak en enigszins gecompartmenteerd door oude dijken. Uitzondering vormen de IJsselmeerpolders. Dat zijn aaneengesloten diepe bakken, enkele meters beneden het buitenwaterpeil en nagenoeg zonder obstakels.

De dijkringen die rond gemiddeld waterpeil liggen en gecompartmenteerd zijn lopen zelden geheel onder. Daarvoor zijn de oude dijken te hoog en duren de maatgevende omstandigheden te kort.

Alleen de diepe polders rond het IJsselmeer wijken af van dat beeld. Omdat het diepe aaneengesloten bakken zijn, lopen ze geheel vol tot de waterstand in de polder en die in het buitenwater gelijk zijn geworden. Een bres maakt van de polder en het meer als het ware weer de communicerende vaten die het van oorsprong waren. Het betekent dat de IJsselmeerpolders bij een overstroming door een bres geheel vol lopen tot een diepte van enkele meters. Omdat het IJsselmeer circa tweemaal zo groot is als het Markermeer, is de eindstand bij een bres vanuit het IJsselmeer vaak enkele decimeters hoger. De omvang van de vollopende polder bepaalt natuurlijk ook wat de eindstand wordt. Zo wordt de eindstand bij een vollopende Wieringermeer circa 0,5 m lager dan de normale IJsselmeerstand, en bij het vollopen van de Noordoostpolder wordt het 1,0 m lager (Klijn et al., 2010).

Dit betekent dat het proces van ontlasting, zoals dat hiervoor is besproken bij de rivieren, ook bij meren optreedt, in de zin dat de buitenwaterstand enigszins daalt. Ook hier geldt dat dit vooral effect heeft op de overstromingskansen elders, maar nauwelijks op het overstromingsverloop. Daarvoor is de hoeveelheid buitenwater meestal te groot ten opzichte van het volume dat de polder instroomt.

De diepe IJsselmeerpolders lopen dus geheel vol, maar de ruimtelijke verspreiding volgt heel sterk de aanwezige watergangen. Deze zijn diep en breed en leiden tot preferente stroming. Daardoor vindt de feitelijke inundatie van het maaiveld vaak plaats vanuit een punt ver weg van de bres.

4 Beïnvloeden van functioneren van waterkeringsystemen

4.1 Beïnvloeding van hoogwatersituatie en golfbelasting

Het beïnvloeden van hoogte en duur van het hoogwater is doorgaans gericht op het verkleinen van de belastingen op de waterkeringen, maar heeft eveneens een effect op het overstromingsverloop in geval van een doorbraak.

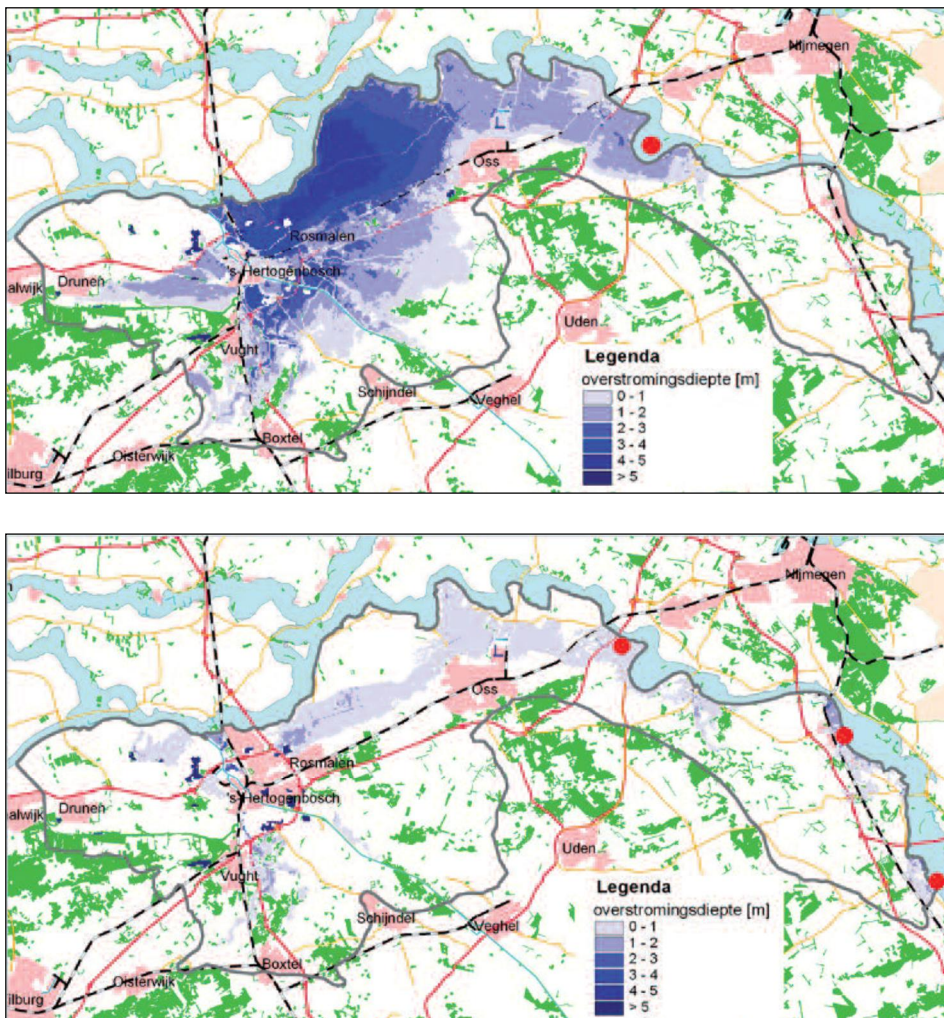
In Nederland zijn verschillende principes toegepast om de hydraulische belasting van waterkeringen te beïnvloeden (te verlagen of anders te verdelen):

- Kustlijnverkorting: door het afsluiten van zeearmen kan de kustlijn worden verkort en worden de hoogwaterstanden langs de voormalige zeearmen een stuk lager. De afsluiting van het IJsselmeer en de afsluiting van diverse zeearmen en estuaria in zuidwest Nederland zijn hiervan goede voorbeelden.
- Rivierverruiming: verschillende typen maatregelen gericht op het vergroten van de afvoercapaciteit van de rivier om daarmee de hoogwaterstanden bij de maatgevende rivierafvoer – maar ook lagere en hogere rivierafvoeren – te verlagen ('Ruimte-voor-de-Rivier'- programma).

Recent worden ook andere voorstellen onderzocht om de hydraulische belasting van waterkeringen door hoge waterstanden te verkleinen, waaronder:

- Afvoerdeling wijzigen: het anders verdelen van de Rijnafvoer over de verschillende Rijntakken, bijv. teneinde de Nederrijn-Lek zoveel mogelijk te ontzien. Met een andere afvoerdeling veranderen ook de hydraulische belastingen langs de riviertakken: de ene neemt af, maar de andere neemt toe. De afvoerdeling kan overigens ook onbedoeld wijzigen, wanneer onder extreme omstandigheden 'kortsluiting' optreedt tussen riviertakken.
- Rivierdijkverkorting: door het aanleggen van keringen en/of het verleggen van waterlopen kan de lengte aan dijken die extreme rivierwaterstanden moeten keren worden ingekort. Het idee 'Afsluitbaar-open Rijnmond', dat de Commissie Veerman heeft overgenomen van Ties Rijken, is een voorbeeld van zo'n rivierdijkverkorting.

Ten slotte zijn er voorstellen om de golfbelasting op waterkeringen te verkleinen, zoals uitbreiding van voorlanden / vooroevers of beplanting van die voorlanden met griend om de golfhoogte voor de waterkering te dempen en daarmee golfoploop en -overslag te beperken. Dit wordt concreet toegepast bij Fort Werkendam in de Noordwaard (Ruimte-voor-de-Rivierproject), het wordt overwogen bij het Markermeer, en er lopen studies naar uitbreiding van kwelderareaal op de Waddenzee. Op het verkleinen van de golfbelasting wordt hier niet verder ingegaan.



Figuur 4.1 Overstromingspatroon van een dijkbreuk (bres; boven) respectievelijk een overlopende dijk (onder).

4.2 Beïnvloeding van locatie en ontwikkeling van bressen

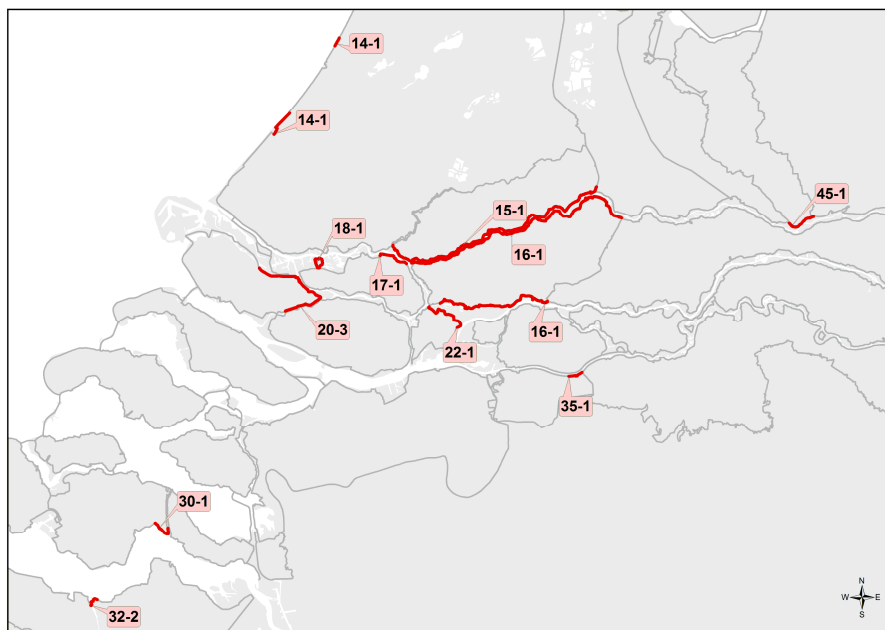
Als aan alle dijkvakken binnen een dijkkring dezelfde eisen worden gesteld dan is het toeval waar een bres ontstaat. Indien we het ontstaan van een bres niet (helemaal) aan het toeval willen overlaten zijn er verschillende mogelijkheden:

- Bevorderen dat water instroomt op een bepaalde plaats of over een bepaald traject (de *minst* kwetsbare delen). Dit kan door de dijk plaatselijk lager of minder sterk te maken. Er is dan sprake van een overlaat waardoor water op een gecontroleerde wijze de dijkkring binnen stroomt. Dit principe wordt in Frankrijk, bijv. langs de Loire, veelvuldig toegepast. Figuur 4.1 geeft een indruk van de verschillen in overstromingspatroon tussen een doorbraak en een situatie met overloop/overslag.
- Vermijden dat een bres ontstaat op de *meest* kwetsbare delen van de dijkkring. Dit kan door de waterkeringen op die trajecten relatief hoger en sterker te maken dan de dijken in de rest van de dijkkring.

Het bevorderen dat water instroomt op de minst kwetsbare trajecten heeft in het rivierengebied als voordeel dat de belasting op andere dijken benedenstrooms afneemt.

In die zin kan zo'n inrichting bijdragen aan een robuuster overstromingsrisicosysteem. Het mechanisme is zo'n 10 jaar terug onderzocht in het kader van de studie naar noodoverloopgebieden (Dijkman et al., 2003). Uit studies is gebleken dat de effectiviteit van noodoverloopgebieden sterk afhankelijk is van de optimale timing van de inzet (niet te vroeg, niet te laat). Protesten vanuit de potentiële noodoverloopgebieden hebben ervoor gezorgd dat het, los van een tijdelijke reservering in de Nota Ruimte, bij een studie is gebleven.

De andere optie zal naar verwachting op minder maatschappelijke bezwaren of protesten stuiten. Die optie sluit immers aan op de gedachte dat, wanneer er meer te beschermen valt er ook hogere of andere eisen aan de waterkeringen kunnen worden gesteld. Dat is ook de gedachte die ten grondslag ligt aan de huidige beschermingsnormen. Een voorbeeld van het stellen van lokaal andere eisen komt uit De Bruijn & Klijn (2011). In die studie is in beeld gebracht welke trajecten aandacht verdienen als men het slachtofferisico substantieel terug zou willen brengen. Met het 'praktisch doorbraakvrij' maken van minder dan 200 km waterkering op de meest risicovolle trajecten wordt het slachtofferisico meer dan gehalveerd. Figuur 4.2 laat zien binnen welke dijkringen en op welke trajecten het voorkomen van bresvorming dan nodig is.



Figuur 4.2 Trajecten waar het voorkomen van bressen ('praktisch doorbraakvrije' dijken) veel kan bijdragen aan reductie van het slachtofferisico (De Bruijn & Klijn, 2011)

4.3 Beïnvloeden van het overstromingsverloop na doorbraak

Hierboven zijn maatregelen benoemd die de hoogwaterstand beïnvloeden en maatregelen die bresvorming beogen te voorkomen. Beide mogelijkheden beïnvloeden *ook het verloop* van een overstroming als het toch fout gaat. Want ruimte-voor-de-rivier leidt tot lagere buitenwaterstanden, waardoor er bij dijkbreuk minder water door de bres naar binnen stroomt. Dat betekent een kleiner areaal en/of geringere overstromingsdiepten. En dijken die blijven staan betekenen dat de instroom al stopt als de waterstand lager wordt dan de kruin van de dijk (of de overlaat), met eveneens als gevolg een kleiner overstromd areaal en/of geringere overstromingsdiepten.

Aanvullend zijn er nog specifiek op het overstromingsverloop gerichte maatregelen mogelijk. Daarbij gaat het om waterkeringen die het water uit bepaalde kwetsbare gebied(sde)len weghouden, het erlangs geleiden, de waterstand juist sneller laten dalen, of het water lozen alvorens een domino-effect kan optreden. We vatten dit samen met de termen:

- Compartimentering
- De-compartimentering (het omgekeerde)
- Suatie

Compartimenteren van dijkringen

Compartimentering betekent letterlijk het opdelen van dijkringen in kleinere compartimenten. Het principe van compartimentering wordt toegepast in veel andere risicodomeinen, zoals brandpreventie (zowel in gebouwen als bossen om uitbreiding van de brand te voorkomen en de vluchtijd te verlengen) en scheepvaart (zowel om zinken te voorkomen als lekken van olie uit tanks te beperken). Compartimentering kan vele vormen aannemen: van volledig kerende dijken die dijkkringgebieden opsplitsen, via ringdijken om kwetsbare plekken (beter te beschermen steden), geleidedijken die het water in een bepaalde richting sturen, tot vertragende dwarsdijken die vooral tijdswinst opleveren voor evacuatie en bijvoorbeeld cruciale infrastructuur nog enige tijd droog houden.

In de enige jaren geleden uitgevoerde Compartimenteringsstudie (Asselman et al., 2008) is onderzocht of het verder compartimenteren van dijkringen voor Nederland nuttig en/of zinvol is. Daarbij is de aandacht vooral uitgegaan naar volledig kerende waterkeringen die leiden tot opsplitsing van het huidige dijkkringenstelsel. De belangrijkste conclusies van de studie kunnen als volgt worden samengevat:

- Compartimentering kan de gevolgen van overstromingen – in termen van aantallen getroffen en economische schade – effectief verkleinen.
- Het opsplitsen van dijkkringgebieden is vooral interessant als ze 'gevaarlijk groot' zijn en makkelijk op te delen (bijvoorbeeld omdat ze langgerekt en smal zijn (Betuwe); of slechts van één kant worden bedreigd (Friesland-Groningen).
- Vanuit een zuiver economisch oogpunt is compartimentering slechts in enkele gevallen efficiënt (kosten-effectief), indien wordt uitgegaan van overstromingskansen die gelijk of kleiner zijn dan de beschermingsnormen.
- De case-studies wezen uit dat de uitkomsten van een kosten-batenanalyse zeer gevoelig zijn voor de overstromingskansen, omdat die één op één gerelateerd is aan de gerealiseerde risicoreductie.

Inmiddels zijn er enkele nieuwe inzichten ontstaan die de conclusies van de compartimenteringsstudie nuanceren (Klijn et al., 2012). Ten eerste is duidelijk geworden (in het VNK-project) dat de werkelijke kansen dat een waterkering bezwijkt (soms vele malen) groter zijn dan de kansen waarmee is gerekend. Dat werkt direct door in de kosten-effectiviteit van compartimentering en dus in de 'economische aantrekkelijkheid'. Dat effect geldt natuurlijk evenzeer voor de doelmatigheid van versterking van de primaire keringen.

Ten tweede geldt dat het oordeel of compartimentering aantrekkelijk is, afhankelijk is van het gekozen perspectief. Indien risicoreductie centraal wordt gesteld, wordt een beoordeling op grond van een kosten-batenanalyse al snel maatgevend.

In de praktijk gaat het dan om 'gemiddeld gevolg per jaar' versus jaarlijkse kosten. Dan is compartimentering meestal minder aantrekkelijk dan versterking van de primaire waterkering. Indien daarentegen meer gewicht wordt toegekend aan de absolute gevolgen van een overstroming, en het voorkomen van maatschappelijke ontwrichting een belangrijke rol speelt bij de afweging, dan kan een oordeel over compartimentering positiever uitvallen. Ofwel: vanuit een systeembenadering zou kunnen worden gesteld dat compartimentering een robuuster overstromingsrisicosysteem oplevert, omdat de beheersbaarheid van de overstroming groter is en minder snel maatschappelijke ontwrichting optreedt.

Ten derde: eerder in dit rapport is vastgesteld dat in veel dijkringen de gevolgen van overstroming nu nog beperkt blijven dankzij de bestaande – onbedoelde – gecompartmenteerdheid. Dat is bijvoorbeeld het geval in Centraal-Holland. Ook dat werkt direct door in de kosten-effectiviteit van de maatregel. Bij een hogere zeespiegel werkt die bestaande gecompartmenteerdheid niet meer zo sterk en kan er reden zijn om daaraan verbeteringen door te voeren in het kader van het klimaatbestendiger maken van het waterkeringsstelsel (Klijn et al., 2012). Bijvoorbeeld door bij het reguliere onderhoud of bij verbetering de bestaande boezemkades extra te verhogen.

De-compartimenteren van dijkringen?

In kleine dijkringen of in kleine compartimenten grenzend aan buitenwater kan in geval van een bres de stijgsnelheid heel groot zijn, met een groot slachtofferrisico als gevolg. Tegen die achtergrond wordt weleens gepleit voor de-compartimentering: het opheffen van bestaande gecompartmenteerdheid. In een beperkt aantal gevallen/gebieden is het verwijderen van compartimenterende dijken concreet overwogen, onder meer bij: De Maasdijk (dijkring 14: Centraal-Holland), Capelle en Krimpen aan de IJssel, (dijkring 14: Centraal-Holland), Zeeuws-Vlaanderen (dijkring 32) en de Slaperdijk bij Veenendaal (dijkring 45: Gelderse Vallei).

De voor deze gevallen uitgevoerde verkenningen laten zien dat het verwijderen van een compartimenteringsdijk leidt tot geringere waterdieptes en een lagere stijgsnelheid vóór de secundaire kering. En daarmee tot een kleinere kans op slachtoffers en een geringere schade vóór de secundaire waterkering. Het overstroomd areaal áchter de secundaire waterkering wordt evenwel groter, evenals de waterdieptes aldaar. Het netto-effect op de schade in de dijkring als geheel kan een iets kleinere totaalschade zijn (voorbeeld Veenendaal), maar ook een grotere (voorbeeld Maasdijk, Capelle). Vanuit een kosten-batenoogpunt wegen de kosten van verwijderen van een dijk zelden op tegen de (geringe) baat.

Meer recent is er weer aandacht voor de-compartimentering bij onder meer de provincie Zuid-Holland. Aanleiding zijn relatief hoge slachtofferrisico's in kleine compartimenten langs de Nieuwe Maas bij verschillende dijkringen binnen de provincie. Daarbij wordt aangetekend dat het voorkomen van slachtoffers in deze specifieke situaties mogelijk goedkoper en effectiever kan worden gerealiseerd door 1) deze kleine compartimenten tijdig te evacueren (het gaat om een overzichtelijk aantal mensen en een korte afstand), en/of 2) bresvorming in de primaire kering zo veel mogelijk te voorkomen door deze keringen 'praktisch doorbraakvrij' te maken.

Suatie: beperken van overstromingsduur en -diepte door lozing

In situaties waar dwarsdijken het domino-effect tussen hellende dijkkringgebieden moeten voorkomen, zoals bij de Diefdijk die de Alblasserwaard van de Betuwe scheidt, kunnen uitlaatwerken helpen om de hoogte van de waterstand tegen de c-kering te beperken. Daartoe zijn in het verleden bijvoorbeeld de Lingewerken en de Dalemse overlaten aangelegd (Provincie Zuid-Holland, 1990; Van Heezik, 2008). Bij Dalem bevindt zich ook nog een suatiesluis. Dat is een sluis die overstromingswater uit de Betuwe moet lozen op de Boven-Merwede vanaf het moment dat de Dalemse overlaten zijn drooggevalen en het water dus niet meer weg kan. Door deze constructies die de lozing van overstromingswater verzorgen, wordt de binnenwaterstand voor de c-kering minder hoog. De lozing kan ook de duur van een overstroming bekorten (Wagenaar, 2012).

Lozing is vooral belangrijk bij aan elkaar grenzende dijkkringgebieden in hellend terrein, dus in het rivierengebied. In Frankrijk wordt – langs de Loire – mede daarom consequent gekozen voor het weglaten van dijken aan de stroomafwaartse zijde van dijkkringgebieden (die daarmee *de facto* geen ringen meer zijn, maar meer geleidedijken). Voor het Nederlandse rivierengebied zijn lozingswerken overwogen en/of bestudeerd in het kader van de compartimenteringsstudie (Ter Maat et al., 2008) en bij onderzoek naar het beheersen van de systeemwerking tussen dijkringen 44, 15 en 14 (Asselman & De Wit, 2009). Uit de laatste studie citeren we een enkele passage:

“De maatregelen die betrekking hebben op het aanbrengen van een uitlaatwerk scoren op vrijwel alle criteria beter dan ophoging van de c-kering: ze zijn goedkoper, leiden niet tot afwenteling (de waterstand in dijkkring 15 neemt met ongeveer 1 m af), hebben een positiever effect op de te verwachten economische schade en slachtoffers. Bovendien zijn ze makkelijker inpasbaar in het landschap. ... Deze oplossingsrichting is daarmee zeker de moeite waard om verder te worden verkend.” (Asselman & De Wit, 2009).

5 Meer samenhang in eisen aan het waterkeringsstelsel

5.1 Meer aandacht voor schaalniveau en systeemwerking

In hoofdstuk 3 is voor verschillende typen watersystemen de werking beschreven van het huidige waterkeringsstelsel en van het overstromingsverloop dat daar mee samenhangt. Die beschrijving ging uit van de factoren die deze werking en het overstromingsverloop bepalen. Voor een deel zijn die factoren een vast gegeven, deels zijn ze echter te beïnvloeden door andere keuzes te maken ten aanzien van situering of vereiste eigenschappen van de waterkeringen.

In hoofdstuk 4 zijn globaal de aangrijpingspunten verkend voor het beïnvloeden van de werking van het waterkeringsstelsel, gericht op beïnvloeding van 1) de hydraulische belasting ('buitenwaterstand en golven'), 2) de locatie en ontwikkeling van bressen ('eigenschappen waterkering') en 3) het verloop van de overstroming daarna ('gebied'). Deze drie aangrijpingspunten bieden tevens perspectief om een meer doelmatige en robuuste inrichting van het waterkeringsstelsel tot stand te brengen. Daarbij is sprake van een zekere – maar niet eenduidige – relatie met de huidige indeling in typen waterkeringen van respectievelijk de categorieën b (werkt vooral op 'buitenwaterstand'), a (vooral gerelateerd aan 'eigenschappen waterkering' op dijkkringniveau) en c (alle compartimenterend werkende lijnelementen binnen een dijkkring).

Tegen deze achtergrond wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de gewenste samenhang in te stellen eisen aan waterkeringen, vanuit twee invalshoeken:

- vanuit ketens van *achter elkaar* liggende keringen, gerelateerd aan schaalniveaus (top-down $b \rightarrow a \rightarrow c$ of bottom-up $c \leftarrow a \leftarrow b$);
- vanuit systeemwerking binnen hetzelfde schaalniveau, waarbij ook drukontlasting, ligging aan hetzelfde buitenwatersysteem en domino-effecten worden beschouwd.

Alvorens daar op in te gaan, herhalen we hier nog even waar ruimte is voor verbetering van het huidige waterkeringsstelsel.

Individuele dijkkring centraal?

In het vigerend stelsel staan individuele dijkkringen centraal. En er gelden uniforme eisen voor alle dijkvakken / kunstwerken binnen één dijkkring. Bij de eisen aan die waterkeringen wordt slechts op een grofstoffelijke manier rekening gehouden met de gevolgen van overstromingen, namelijk als grondslag voor de beschermingsnormen per dijkkring. Alleen bij de Maaskaden wordt bewust en expliciet rekening gehouden met systeemwerking, maar overigens wordt met de interactie tussen dijkkring(gebied)en geen rekening gehouden. In plaats daarvan is gestreefd naar een gelijk beschermingsniveau binnen delen van het land (bovenrivieren, zuidwestelijk estuariumgebied, etc.).

In de hoofdstukken 3 en 4 is geïllustreerd hoe dit uniforme gelijksprincipe binnen en tussen dijkringen betekent dat wordt ingeboet op doelmatigheid (minder efficiënt vanuit kosten-batenoogpunt), terwijl ook ongewenste systeemwerking tussen dijkringen kan optreden (cascade- of domino-effecten), die afbreuk doet aan de robuustheid van het systeem op een schaalniveau boven dat van individuele dijkringen.

Beperkingen al onderkend

In verscheidene recente studies is aan deze beperkingen al aandacht gegeven. Zo is in de MKBA van WV21 (Kind, 2011) al een veel dominantere rol weggelegd voor de gevolgen van overstromingen in de zoektocht naar nieuwe normen voor waterkeringen. Daarbij stond in de meeste gevallen nog steeds de individuele dijkkring centraal, hoewel voor enkele grote dijkkringgebieden al dijkkringdelen zijn onderscheiden.

In latere verkenningen voor het deelprogramma Veiligheid is – op basis van inzichten vanuit WV21 en VNK2 – onderzocht welke doelmatigheidswinst behaald kan worden door het schaalniveau voor eisen aan waterkeringen beter af te stemmen op verschillen in gevolgen van overstromingen. Die verkenning laat zien dat meer differentiatie doelmatiger kan zijn.

Ook aan systeemwerking is in WV21 enige aandacht gegeven, maar alleen waar cascadowerking (negatieve systeemwerking) leidt tot grotere gevolgen doordat de overstroming niet tot één dijkkring beperkt blijft. Dat heeft consequenties voor het economisch optimale beschermingsniveau van 'bovenstrooms' gelegen dijkkringdelen (Kind, 2011). Positieve systeemwerking door ontlasting is echter niet beschouwd. Voor enkele dijkringen langs de Nederrijn (met name dijkringen 44 en 45) volgen uit de analyse daardoor 'onnodig' hoge eisen aan het beschermingsniveau.

Voorts is in de verschillende studies voor Centraal Holland onderzoek gedaan naar systeemwerking (Asselman & De Wit, 2009; Van der Vat *et al.*, 2011, VNK, 2012b), vooral naar domino-effecten van dijkkring 15 (Krimpenerwaard) naar 14 (Centraal Holland), omdat de c-kering tussen die dijkringen bij de laatste toetsing veel te laag en te zwak bleek.

Naar contouren voor een doelmatiger en robuustere inrichting

Inzichten uit de genoemde studies en verkenningen worden hier benut om de contouren te schetsen van een meer doelmatige en robuuste inrichting van het waterkeringsysteem. Kern daarvan is het versterken van de *samenhang* in de eisen aan de verschillende onderdelen van het waterkeringsysteem op basis van een risicobenadering, aangevuld met een systeemanalyse. Daarbij gaat het om 1) de samenhang tussen eisen aan c-, a- en b-keringen (achter- en voorliggende keringen in relatie tot land-waterkeringen), om 2) meer samenhang tussen gevolgen en toelaatbare overstromingskansen per dijkstrekking (ringdeel, traject, vak, etc.), en om 3) samenhangende eisen tussen dijkringen op hetzelfde schaalniveau, die aan elkaar of aan hetzelfde buitenwater grenzen.

De contouren voor een doelmatiger en robuustere inrichting van het waterkeringssysteem worden in de rest van dit hoofdstuk langs een viertal lijnen uitgewerkt, waarbij een bottom-up volgorde van behandeling wordt aangehouden (van c via a naar b), zodat 1) ze de contramal vormen van hoofdstukken 3 en 4 die bij het buitenwater begonnen, en 2) indachtig een risicobenadering zoveel mogelijk wordt uitgegaan van de door de feitelijke situatie bepaalde gevolgen. Het gaat om de volgende vier lijnen:

1. *Herwaardering van compartimentering en heroverweging van de formele positie van c-keringen*: wanneer als uitvloeisel van een risicobenadering niet langer uniforme eisen gelden voor alle dijkvakken van een 'dijkring', dan komt de positie van de c-keringen ook in een ander daglicht te staan en kunnen ook de eisen die we eraan stellen worden heroverwogen. Dat biedt perspectief op besparingen op verbetermaatregelen in het kader van het nHWBP.
2. *Meer differentiatie in beschermingsniveau (tussen dijkringen en tussen dijkkringdelen)*: het geboden beschermingsniveau en het schaalniveau waarop normen betrekking hebben beter afstemmen op verschillen in de gevolgen van overstromingen.
3. *Eisen aan b-keringen beter afstemmen op het achterliggende gebied*: bij het stellen van eisen aan de voorliggende keringen beter rekening houden met de bufferende werking van het tussengelegen water alsmede met het feitelijk overstromingsrisico in de achterliggende gebieden.
4. *Gericht extra versterken van de belangrijkste delen van het systeem*: een aanpassing van de inrichting gericht op het zo klein mogelijk maken van de kans op maatschappelijke ontwrichting door aan waterkeringen op bepaalde trajecten extra hoge eisen te stellen (hoger dan volgend uit alleen doelmatigheidsoverwegingen).

5.2 Herwaardering van compartimentering en heroverweging van positie van c-keringen?

De analyse van de werking van het waterkeringsysteem heeft uitgewezen dat compartimentering bijdraagt aan kleinere gevolgen van overstroming. Dat betekent dat daar in principe veel voor te zeggen is, vooral vanuit het oogpunt van robuustheid. Maar als veel moet worden geïnvesteerd om die compartimenterende werking te kunnen waarborgen, wordt zo'n conclusie minder vanzelfsprekend. Zeker als daarbij niet vanuit een risicobenadering wordt gedacht, maar vanuit een 'standaardnorm' voor ieder stuk waterkering dat onderdeel uitmaakt van een dijkkring.

Veel c-keringen zijn bij de derde toetsing afgekeurd, onder meer doordat de toegepaste beschermingsnorm niet berust op een risico-analyse (de norm is immers gelijk aan die van de best beschermde aanliggende dijkkring). De afkeuringen betekenen een forse opgave voor het nHWBP. Besparingen zijn mogelijk door anders om te gaan met c-keringen, bijvoorbeeld door de formele juridische positie van de c-keringen te heroverwegen of de er aan te stellen eisen een andere grondslag te geven.

Op het moment dat de *risicobenadering volwaardig* wordt toegepast, ontstaat de vrijheid om het dijkkringniveau los te laten en aan verschillende dijktrajecten verschillende eisen te stellen. Er is dan meer vrijheid om de eisen aan c-keringen te baseren op een realistischer belasting, realistische kansen daarop en daarmee samenhangende gevolgen. Een c-kering wordt dan net zo behandeld als een 'gewone' regionale kering. En een eventuele verbetering van zo'n kering kan dan worden afgewogen op basis van de kosten en de baten (het verminderd schaderisico) van zo'n verbetering. De noodzaak tot verbetering vervalt als zo'n verbetering economisch gezien niet doelmatig is.

De ‘administratieve’ noodzaak om c-keringen te verbeteren omdat ze onderdeel zijn van een dijkkring met één alom geldende norm vervalt dan dus.

Ook wanneer wel aan het concept van uniforme eisen per dijkkring wordt vastgehouden zijn er mogelijkheden voor een doelmatiger inrichting van het waterkeringsysteem, namelijk door de begrenzing van de dijkringen aan te passen; bijvoorbeeld door dijkringen samen te voegen. Zo is wel voorgesteld de dijkringen 15 (Krimpenerwaard) en 44 (Kromme Rijn) een zelfde beschermingsniveau te geven als dijkkring 14 (Centraal Holland). Dan ontstaat als het ware één grote buitenring. En, indien dat zou worden geformaliseerd bij wet, zou de noodzaak om de c-keringen langs de Hollandse IJssel en het Amsterdam-Rijnkanaal te verbeteren kunnen vervallen.

Een dergelijke handhaving van het dijkkringconcept levert vanuit economisch perspectief een mogelijk aantrekkelijker oplossing op dan de kostbare verbetering van de c-keringen. vanuit datzelfde economisch perspectief is het een verre van optimale oplossing in vergelijking met het loslaten van het dijkkringconcept. De economisch optimale doorbraakkans van de verschillende dijkkringdelen van de ‘superdijkring’ 14-15-44 zal immers van plek tot plek sterk verschillen. Wanneer conform de huidige regelgeving overal langs de (vergrote) dijkkring dezelfde eisen moeten gelden, dan doet dat afbreuk aan de economische doelmatigheid: voor delen van de vergrote dijkkring gelden dan onnodig strenge (‘te duur’) of juist ongewenst soepele eisen (‘te groot risico’) vanuit het oogpunt van economische doelmatigheid.

5.3 Differentiatie in beschermingsniveaus

Meer differentiatie van eisen binnen een dijkkring vanuit doelmatigheid

Bij de huidige inrichting is sprake van uniforme eisen binnen een dijkkring. Er wordt niet/nauwelijks rekening gehouden met het feit dat de gevolgen sterk afhankelijk zijn van de locatie van een bres. Verkenningen in het kader van Waterveiligheid 21^e Eeuw resp. het deelprogramma Veiligheid van het Deltaprogramma hebben laten zien dat het schaalniveau waarop eisen aan a-keringen worden gesteld een duidelijke invloed heeft op de benodigde investeringen. Voor een doelmatige inrichting van het waterkeringssysteem is het belangrijk dat de toelaatbare doorbraakkans is afgestemd op de verwachte gevolgen. Dus een kleine kans bij grote gevolgen, en bij beperkte gevolgen een wat grotere toelaatbare kans. Er geldt: hoe gedetailleerder het schaalniveau, des te beter kan rekening worden gehouden met verschillen in de gevolgen. Dan kan doelmatiger worden geïnvesteerd.

In de analyses voor WV21 is gewerkt met dijkkringdelen; met het oog op verschillen in bedreiging zijn sommige dijkringen onderverdeeld in 2 tot maximaal 4 dijkkringdelen. Met dit onderscheid in dijkkringdelen is een eerste stap gezet naar een doelmatiger normdifferentiatie. Ook binnen WV21-ringdelen kunnen de gevolgen van doorbraken echter nog sterk verschillen, afhankelijk van eigenschappen van het achterland (zoals we in hoofdstuk 3 en 4 hebben gezien). Met normen voor hele dijkringen of WV21-dijkkringdelen zullen aan sommige dijkstrekingen nog onnodig strenge eisen worden gesteld.

Een kleiner ruimtelijk schaalniveau voor normering maakt dus een efficiëntere hoogwaterbescherming mogelijk. Het schaalniveau moet ook weer niet te klein zijn, want dan wordt het onpraktisch.

Het meest geschikte schaalniveau wordt bepaald door: 1) grote verschillen in de gevolgen van doorbraken en in de versterkingskosten, 2) de lengte van de ringdelen (i.v.m. het lengte-effect: de verhouding tussen eisen aan een dijkvak en een dijkringdeel), 3) het praktisch werkbaar aantal normklassen en 4) de uitlegbaarheid. *Grosso modo* geldt dat het economisch optimaal is om een nieuw ringdeel te onderscheiden als de gevolgen van een dijkdoorbraak sterk gaan verschillen.

Meer rekening houden met samenhang tussen dijkringen aan één watersysteem

De MKBA-WV21 (Kind, 2011) betrof een analyse op het niveau van individuele dijkring(del)en. Het daarbij gebruikte perspectief leidt tot een gedifferentieerd beeld van toelaatbare overstromingskansen per dijkring(deel). Zo laten de analyses van WV21 bijvoorbeeld zien dat langs de IJssel het economisch optimale beschermingsniveau tussen de dijkringen vrij grote verschillen vertoont (zie ook Figuur 5.1).



Figuur 5.1 Economisch optimale overstromingskans volgens de MKBA-WV21 (Kind, 2011).

Bij de interpretatie van de uitkomsten moet echter rekening worden gehouden met de positie van de dijkeringen ten opzichte van elkaar en binnen een groter gebied. Dat betekent dat de uitkomsten van de WV21-MKBA niet zonder meer benut kunnen worden. Weliswaar is rekening gehouden met cascadowerking bij het afleiden van economisch optimale normen, maar met het omgekeerde – ontlasting en andere vormen van systeemwerking – is geen rekening gehouden. Zo is het bijvoorbeeld niet zinvol aan de hoogte van het dijkkringdeel 45-1 (Gelderse Vallei aan de kant van de Nederrijn/Lek) hele hoge eisen te stellen omdat die extreem hoge waterstanden niet kunnen optreden, doordat al eerder bovenstrooms overstromingen zullen optreden die de hoogte van de waterstanden meer benedenstrooms beperken.

Daarom moeten naast het concept van ‘differentiatie naar gevolgen in het achterland’ enkele ordeningsprincipes worden geplaatst aan de ‘voorzijde’ van de keringen. Die principes moeten ervoor zorgen dat voldoende rekening wordt gehouden met de eigenschappen en respons van het watersysteem waar de keringen bescherming tegen bieden. Kortom: met systeemwerking.

Voor het stellen van eisen aan waterkeringen in het rivierengebied is wel voorgesteld drie leidende principes te onderscheiden: efficiëntie, robuustheid en niet-afwentelen (Alberts, intern memo DP-V). Het *efficiëntie*principe is hiervoor al behandeld en leidt vooral tot meer differentiatie van normen tussen en binnen dijkeringen. Het *robuustheid*principe beoogt vooral onbeheersbare situaties te voorkomen door de gevoeligheid voor onzekerheden rond de hoogte van de afvoer, rond de verdeling van de afvoer over verschillende riviertakken, rond de waterhoogte bij een gegeven afvoer, rond de plaats en grootte van een bres, etc. etc. te verkleinen. Dat vraagt onder andere aandacht voor het cascade- of domino-effect. Daar wordt hierna (paragraaf 5.5) nog nader op ingegaan. Het derde ordeningsprincipe van *niet-afwentelen* kent twee dimensies:

1. niet afwentelen op benedenstrooms (bijvoorbeeld door de dijken zo te versterken dat er meer water kan passeren (geadresseerd in de Richtlijn Overstromingsrisico's die dat tussen landen regelt), en
2. niet afwentelen op de overkant (door dijken veel hoger en sterker te maken dan aan de overkant).

Niet-afwentelen naar benedenstrooms betekent voor het rivierengebied dat beschermingsnormen in stroomafwaartse richting steeds strenger zouden moeten worden. Dat is op stroomgebiedsniveau ook al het geval, met 1:50 in Zuid-Duitsland, via 1: 200 langs de Oberrhein tot ongeveer Frankfurt en 1: 500 langs de Nederhein in Nordrhein-Westfalen, en dan via 1: 1250 in het Nederlandse bovenrivierengebied naar 1: 2000 in het benedenrivierengebied. In grote lijnen weerspiegelt dat de in stroomafwaartse richting toenemende gevolgen. Maar verdere praktische uitwerking van dit principe kan problemen opleveren: voor grote dijkeringen zoals 42, 48, 43 en 36 vergt het mogelijk onderverdeling van de dijkeringen om het principe handen en voeten te geven.

Niet afwentelen op de overkant betekent niet ‘overdijken’ zodat de overstroming aan de overkant van de rivier plaatsvindt. In de huidige situatie zijn de normen aan weerszijden van de rivier vrijwel overal gelijk³, maar deze huidige normen hebben nog betrekking op de hoogte. Een overstap op efficiëntere, op risicoanalyse gebaseerde normen kan doorbreking van dit principe betekenen, zoals geïllustreerd door de economisch optimale normen langs de

³ Dat geldt overigens niet voor de regio Rijnmond-Drechtsteden.

Lek, Waal en IJssel in Figuur 5.1, die aan weerszijden verschillen. Dit verschil kan mogelijk de nodige discussie oproepen. Deze discussie kan wellicht enigszins worden ondervangen door expliciet onderscheid te maken tussen eisen aan de hoogte en eisen aan de sterkte; het enige wat in het nieuwe voorgenomen normenkader uiteindelijk immers telt is de overstromingskans. Dan kan voor de hoogte het niet-afwentelenprincipe gelden, terwijl het efficiëntieprincipe tot uitdrukking kan komen in de eisen aan de sterkte.

Samengevat: Waterkeringen bieden bescherming tegen buitenwater (kustwateren, grote meren en grote rivieren). Vooral bij rivieren (Rijn en Maas) moet daarbij rekening worden gehouden met samenhang tussen dijkringen en dus met systeemwerking. Met dergelijke interacties moet bij het vaststellen van beschermingsnormen rekening worden gehouden.

5.4 Eisen aan b-keringen beter afstemmen op achterland

Momenteel wordt als norm voor voorliggende keringen die van de a-kering met het hoogste beschermingsniveau aangehouden, ook al maakt die minder dan 10% uit van de achterliggende keringen. Het falen van de voorliggende kering hoeft echter niet tot het eveneens falen van de achterliggende a-keringen te leiden. Het tussenliggende water vormt immers een buffer, en dan maakt het verschil of die buffer relatief klein of juist relatief groot is, zoals het IJsselmeer. Daarbij is een relevante vraag of de oorzaak van hoogwater voor de a-kering wel dezelfde is als die van hoogwater voor de voorliggende b-kering; bij het IJsselmeer is dat niet (helemaal) het geval, want de Waddenzee staat hoog door stormvloed als gevolg van een diep lagedruksysteem dat boven Schotland langs de Noordzee in komt, terwijl windopzet en kanteling op het IJsselmeer vooral ontstaat door het passeren van een front.

In de studie van het Centraal Planbureau is geanalyseerd wat een bres in de Afsluitdijk betekent voor de waterstanden op het IJsselmeer.

Zo'n benadering kan realistische(r) waarden voor een risicoschatting opleveren voor alle aan het IJsselmeer grenzende dijkringen, omdat daar realistische(r) doorbraakkansen en hydraulische randvoorwaarden uit kunnen worden afgeleid.

Naar verwachting is er efficiencywinst te boeken door eisen aan b-keringen te baseren op een volledige risicoanalyse, onder meer door:

- Een dynamische benadering van de hydraulische randvoorwaarden, rekening houdend met het bufferend vermogen van het tussengelegen water in geval van een doorbraak van een b-kering.
- Het uitgaan van het werkelijk overstromingsrisico van *alle* achterliggende gebieden.
- Expliciet rekening te houden met het niet (volledig) samenvallen van de bedreiging van de b-kering en de bedreiging van de achterliggende keringen.
- Het gelijktijdig optimaliseren van de eisen aan b- en a-keringen.

5.5 Gericht extra versterken van belangrijkste delen van het systeem

In hoofdstuk 3 zijn we ingegaan op 'negatieve systeemwerking' ofwel het domino-effect (sneeuwbal effect, cascade-effect). Dat treedt op als een dijkkringgebied aan de benedenstroomse zijde overloopt in een volgend dijkkringgebied of in een rivier met te weinig afvoercapaciteit die daarna weer overstromingen veroorzaakt. Een domino-effect, dat kan leiden tot onaanvaardbare gevolgen en maatschappelijke ontwrichting.

Bij het opstellen van de huidige eisen aan waterkeringen is geen rekening gehouden met dergelijke negatieve systeemwerking. Bij de MKBA- WV21 (Kind, 2011) is voor de bepaling van de economisch optimale beschermingsniveaus al wel rekening gehouden met gevolgen in 'stroomafwaarts' gelegen dijkringen. Dit leidt tot hogere economisch optimale beschermingsniveaus voor dijkkring(del)en die niet alleen bescherming bieden aan de aangrenzende dijkkring maar ook aan verderop gelegen dijkringen. Dit is bijvoorbeeld het geval voor dijken langs de Lek (Kromme Rijn 44 → Centraal Holland 14; Krimpenerwaard 15 → Centraal Holland 14), de Waal (Heerwaarden 40 en Land van Maas en Waal 41 → Maas) en de Bovenrijn (Rijn en IJssel 48 → gehele IJsseldal).

Om het cascade-effect te voorkomen of te beperken kan een geleidedijk of compartimenteringdijk worden toegepast of de primaire kering worden versterkt. Bij grote dijkringen kan beperking van gevolgen worden bereikt door compartimentering (Asselman et al., 2009). In de meeste gevallen zal lokaal forse versterking van de waterkering meer perspectief bieden.

Zoals de bankensector een aantal systeembanken onderscheidt die niet mogen 'omvallen', zouden binnen het waterkeringssysteem een aantal 'systeemdijken' kunnen worden onderscheiden. Systeemdijken zijn dan waterkeringen waaraan extra hoge eisen worden gesteld om maatschappelijke ontwrichting (onder *benedenmaatgevende* én *bovenmaatgevende* omstandigheden) te voorkomen. Om afwenteling te voorkomen kan men dan denken aan extra strenge eisen aan de standzekerheid: systeemdijken mogen het écht niet begeven. In de praktijk betekent het dat men daar eisen zal stellen zoals die voor 'praktisch doorbraakvrije' dijken zijn gesuggereerd: kerend tot de kruin en mogelijk wel overlopend, maar zelfs dan geen bresvorming.

Juist in het gebied van de splitsingspunten van de Rijntakken kunnen ongewenste domino-effecten optreden. Daar moet het – gezien de mogelijke gevolgen – niet als eerste mis kunnen gaan. Om een robuust splitsingspuntengebied tot stand te brengen kan worden overwogen juist daar heel sterke dijken te realiseren. Voor de hand liggende locaties nabij de splitsingspunten zijn de dijken langs de Bovenrijn en het Pannerdens Kanaal (dijkkring 48), maar ook enkele dijktrajecten die hierboven al zijn genoemd: dijken langs de zuidkant van de Waal (41-40) en langs de noordkant van de Lek (45, 44 en 15).

6 Bevindingen en reflectie

6.1 Ten geleide

In dit hoofdstuk geven we puntsgewijs de belangrijkste bevindingen weer uit de achtereenvolgende hoofdstukken. Dat betekent dat dit hoofdstuk deels 'leest' als een samenvatting. De puntsgewijze weergave volgt de hoofdstukindeling en wordt gevolgd door een korte reflectie.

6.2 Bevindingen

Inzake beperkingen van de huidige inrichting van het waterkeringsstelsel (H1 en 2)

- Het waterkeringsstelsel bestaat uit waterkeringen die in de Waterwet zijn opgenomen, maar ook regionale keringen, boezemkades en andere lijnvormige infrastructuur bepalen het verloop van een overstroming als dijken bezwijken.
- Vanuit het water gezien is er geen wezenlijk verschil tussen al deze onderdelen en is er sprake van één waterkeringsstelsel, met hogere en lagere, sterke en zwakke elementen.
- De huidige inrichting van het door het rijk genormeerde deel gaat uit van een stelsel van dijkringen dat wordt gevormd door a- (direct buitenwaterkerend) en c-keringen (achterliggende), en voorliggende b-keringen.
- Bij de eisen die aan deze keringen worden gesteld wordt op dit moment slechts in beperkte mate rekening gehouden met interacties tussen dijkring(gebied)en.

Inzake de werking van het waterkeringsstelsel bij een overstroming (H3)

- Hoogwater op de rivieren is over het algemeen van lange duur, waardoor er bij dijkbreuk veel water kan instromen. Stormvloed langs de kust duurt veel korter, waardoor er minder water instroomt. En stormopzet door kanteling op grote meren duurt nog korter. Dit is bepalend voor het verloop van overstromingen en daarom van belang voor het stellen van eisen aan de waterkeringen.
- Bij een groot 'verval over de waterkering' stroomt er veel water in en kan een bres snel groeien in breedte en diepte. Door een brede en diepe bres stroomt weer meer water, zodat er sprake is van een zichzelf versterkend proces.
- De locatie en omvang van de bres(sen) bepalen – in interactie met de fysiografische eigenschappen van de dijkring – voor een belangrijk deel de omvang van de overstroming en de bereikte waterdiepten. Die kunnen zeer sterk verschillen, vooral in hellende dijkringen of dijkringen die sterk zijn gecompartmenteerd. De plaats van de bres vormt de meest bepalende factor. Het voorkomen van bresvorming op de ene plaats is daarom belangrijker dan op een andere.
- De ligging van dijkringen ten opzichte van elkaar kan leiden tot een domino- of sneeuwbal effect (ook wel positieve terugkoppeling of negatieve systeemwerking genoemd): sommige dijkstrekkings beschermen meer dan één dijkringgebied. Voorbeelden zijn de Lekdijk van het Kromme Rijngebied (44), de noordelijke Lekdijk langs de Krimpenerwaard (15), de Waaldijk van het Land van Maas en Waal (41), en de noordelijke Rijndijk van Rijn & IJssel (48).

Inzake aanknopingspunten voor een doelmatiger inrichting (H4)

- Een doelmatiger waterkeringsstelsel impliceert dat wordt gestreefd naar reductie van overstromingsrisico's tot een maatschappelijk aanvaardbaar niveau tegen maatschappelijk aanvaardbare kosten. Om die doelmatigheid te bereiken liggen een (M)KBA (of eventueel een KEA) voor de hand.
- De rationaliteit van doelmatigheid sluit niet volledig aan op de perceptie van burgers en beleidsmakers. Naast doelmatigheid van investeringen wordt ook veel gewicht toegekend aan het zoveel mogelijk voorkómen van crises of rampen. Het streven naar een robuuster overstromingsrisicosysteem vormt mogelijk een relevante tweede beleidsdoelstelling.
- Een robuuster systeem blijft functioneren als het allemaal wat anders uitpakt dan verwacht (onzekerheden) en ook bij bovenmaatgevende omstandigheden.
- Een doelmatiger inrichting kan worden bereikt door een betere beheersing van de hoogwatersituatie (par. 4.2), van de locatie en ontwikkeling van bressen (4.3) en het overstromingsverloop na doorbraak (par. 4.4).
- De hoogwatersituatie kan ter plaatse van sommige waterkeringen worden beïnvloed door 'afkoppelen'. Door middel van kustverkorting of rivierdijkverkorting ('Afsluiten Rijnmond') wordt hoogwater langs een deel van de bestaande a-keringen voorkomen. De hoogwatersituatie kan ook worden beïnvloed door rivierverruiming, of door wijziging van de afvoerverdeling.
- De locatie van een bres kan worden beïnvloed door te bevorderen dat water gecontroleerd instroomt op de *minst* kwetsbare plaatsen of trajecten. Door de waterkeringen op de *meest* kwetsbare locaties relatief (hoger en) sterker te maken, wordt zoveel mogelijk vermeden dat daar een bres ontstaat.
- De groei van een bres kan worden beïnvloed door de keuze van materialen voor dijklichaam en fundament, vooral door erosiebestendige grondsoorten (klei in plaats van zand) te gebruiken of door constructies.
- Lagere buitenwaterstanden betekenen ook dat er bij dijkbreuk minder water door de bres naar binnen stroomt en dijken die niet bezwijken betekenen dat de instroom al stopt als de waterstand lager wordt dan de kruin van de dijk (of de overlaat). Beide betekenen een kleiner overstroomd areaal en/of geringere overstromingsdiepten.
- Het overstromingsverloop kan verder worden beïnvloed met 'binnendijken' of 'tussendijken', die het water uit bepaalde kwetsbare gebied(s)den weghouden of het erlangs geleiden, en met maatregelen die de waterstand juist sneller laten dalen door het water te lozen alvorens een domino-effect kan optreden: compartimentering, de-compartimentering en suatie.

Inzake het versterken van de samenhang in eisen aan keringen (H5)

- Een doelmatiger en robuustere inrichting kan dus worden bereikt door meer samenhang aan te brengen in de eisen aan de verschillende delen van het waterkeringsstelsel, waaronder herwaardering van compartimentering en heroverweging van de positie van c-keringen (par. 5.2), meer differentiatie in beschermingsniveau tussen en binnen dijkkring(en) (5.3), eisen aan b-keringen die beter zijn afgestemd op de achterliggende gebieden (5.4) en het gericht extra versterken van keringen op de meest kwetsbare delen van het systeem ('systeemdijken'; (5.5).
- Veel c-keringen zijn bij de derde toetsing afgekeurd, mede omdat de eisen niet berusten op een risico-analyse maar gelijk zijn aan die van de best beschermde aanliggende dijkkring. Op het moment dat een volwaardige risicobenadering wordt toegepast, ontstaat de vrijheid om de eisen aan c-keringen – of compartimenteringskeringen in het algemeen – te baseren op een realistischer belasting, realistische kansen daarop en daarmee samenhangende gevolgen.

- In principe geldt dat het stellen van eisen voor een kleiner *ruimtelijk schaalniveau* een efficiëntere hoogwaterbescherming mogelijk maakt, maar een te gedetailleerd schaalniveau wordt onpraktisch. *Grosso modo* geldt dat het waarschijnlijk doelmatig is om een nieuw ringdeel (of dijktraject/-vak) te definiëren als de gevolgen van een dijkdoorbraak sterk afwijken.
- Bij meer differentiatie van eisen aan dijkringdelen/-trajecten of -vakken moet in sommige gebieden rekening worden gehouden met systeemwerking. Dit is met name het geval langs de grote rivieren, waar ontlasting kan optreden doordat dijken bovenstrooms overlopen.
- Voor sommige *voorliggende keringen* – b-keringen – geldt dat deze in veel gevallen eerder een dempende werking hebben op de (hoog)waterstand, dan dat ze direct mensen of economische waarden beschermen. Er lijkt doelmatigheidswinst te boeken door eisen aan b-keringen te baseren op een volledige risicoanalyse, met i) dynamische hydraulische randvoorwaarden, door ii) uit te gaan van het werkelijk overstromingsrisico van *alle* achterliggende gebieden, en door iii) rekening te houden met het niet (volledig) samenvallen van de bedreiging van de b-kering en de bedreiging van de achterliggende keringen.
- Een systematische identificatie van waterkeringen die meer beschermen dan uitsluitend de direct-achterliggende dijkring biedt de mogelijkheid tot het stellen van extra strenge eisen aan de standzekerheid van deze dijken. Vanuit een oogmerk van 'het zoveel mogelijk voorkomen van onbeheersbare situaties en maatschappelijke ontwrichting' kan dat een doeltreffende maatregel zijn.

6.3 Reflectie

Deze verkenning van de werking van het waterkeringssysteem heeft geen volkomen nieuwe inzichten opgeleverd. Dat was ook niet de bedoeling of verwachting. We hebben getracht de vele bestaande – zowel haast vergeten als zeer recent ontstane – inzichten bij elkaar te zetten en met elkaar in verband te brengen door systematisch in beeld te brengen wat er gebeurt bij een overstroming. We hopen daarmee bij te dragen aan overzicht over de vele bestaande inzichten, en met dat overzicht wellicht nieuw inzicht te hebben opgeleverd.

Aan de hand van voorbeelden hebben we geprobeerd te laten zien dat een doelmatiger inrichting van het waterkeringsstelsel in het verschiet ligt, als wordt uitgegaan van een risicobenadering die de werking van het waterkeringsstelsel in volle omvang in beschouwing neemt. In de praktijk van onderzoek en beleidsontwikkeling zijn en worden verschillende onderwerpen al opgepakt. Dan gaat het onder meer om een zoektocht naar een praktische schaal en indeling van dijkringdelen/-trajecten/-vakken op basis van 'vergelijkbaar gevolg' ten behoeve van nieuwe beschermingsnormen, een heroverweging van te stellen eisen aan c-keringen, en een heroverweging van te stellen eisen aan b-keringen op basis van risicoanalyse en hydraulische werking. Binnen afzienbare termijn zullen de nog sterk kwalitatieve beschouwingen in dit rapport kunnen worden gespiegeld aan de resultaten van kwantitatieve analyses.

7 Referenties

- Asselman, N.E.M., 2002. *Overstromingsmodellering dijkkring 44*. WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Asselman, N.E.M., F. Klijn, H. van der Most, 2008. *Verkenning van nadere compartimentering van dijkkringgebieden*. Deltares-rapport T2513.00, Delft.
- Asselman, N.E.M. & A de Wit, 2009. *Nadere verkenning waterveiligheid Centraal Holland. Waterveiligheidsproblematiek dijkkring 14 in relatie tot dijkkring 15 en 44*. Deltares-rapport 1200052, Delft.
- Asselman, N., C. Wesselijs, J. Leenders & M. Groot Zwaartink, 2010. *Onzekerheden in overstromingsmodellering. Hoe uiten onzekerheden in modelschematisatie en scenariokeuze zich in berekende overstromingskenmerken?* Deltares-rapport 1200650, Delft.
- Baan, P.J.A. & F. Klijn, 2004. Flood risk perception and implications for flood risk management in the Netherlands. *Journal for River Basin Management* 2(2004)/1: 1-10
- De Bruijn, K.M., F. Klijn, C. McGahey, M. Mens & H. Wolfert, 2008. *Long-term strategies for flood risk management: scenario definition and strategic alternative design*. FLOODsite report T14-08-01, FLOODsite consortium (www.floodsite.net).
- De Bruijn, K.M. & F. Klijn, 2011. *Deltadijken: locaties waar deze het meest effectief slachtofferisico's reduceren*. Deltares-rapport 1202628-000, Delft. 38 pp.
- Dijkman, J.P.M., H.J.M. Ogink, F. Klijn & H. van der Most, 2003. *Aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden*. WL-rapport Q3570a en b, Delft.
- FLOODsite, 2009. *Flood risk assessment and flood risk management. An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite (an EU-funded Integrated Project)*. Deltares | Delft Hydraulics, Delft, the Netherlands, ISBN 978 90 814067 1 0. E-publication www.floodsite.net, 140 pp.
- Klijn, F., J. Kwadijk, K.M. de Bruijn & J. Hunink, 2010. *Overstromingsrisico's en droogterisico's in een veranderend klimaat; verkenning van wegen naar een klimaatveranderingsbestendig Nederland*. Deltares-rapport 1002565, Delft.
- Klijn, F., M. Kok & H. de Moel (eds.) (2012). *Towards climate-change proof flood risk management. Exploration of innovative measures for the Netherlands' adaptation policy inspired by experiences from abroad*. Interim report theme 1. Report KfC 57/2012, Knowledge for Climate, Utrecht. 192 pp.
- Kind, J., 2011. *Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e eeuw*. Deltares-rapport 1204144.006, Utrecht.
- Klijn, F. & P. de Grave (2008). *Grenzen aan de gevolgen van een overstroming? Discussiestuk voor 'Waterveiligheid 21e eeuw'*. Deltares-rapport Q4348.50, Delft.
- Mens, M.J.P., F. Klijn, K.M. de Bruijn & E. van Beek (2011). The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science & Policy* 14(2011)/ 8: 1121-1131
- Mens, M.J.P., F. Klijn & R. Schielen (2013). Enhancing flood risk system robustness in practice. Pages 1109-1116 in: Klijn, F. & T. Schweckendiek (eds). (2013). *Comprehensive flood risk management. Research for policy and practice*. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam, the Netherlands, 19-23 November. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK. ISBN 978-0-415-62144-1.
- Provincie Zuid-Holland, 1990. *De Lingewerken een waterstaatkundige 'noodzaak'*. Hoofdrapport en kaartbijlage. Den Haag.
- Ter Maat, J., F. Klijn, R. de Koning, & A. Wijbenga, 2008. *Compartimenteringstudie. Casestudie Betuwe, Tieler- en Culemborgerwaarden*. Deltaresrapport T2513.35, Delft.
- Van der Most, H., P. Baan & F. Klijn (2006). *Differentiatie in bescherming tegen overstroming? Discussiestuk voor 'Waterveiligheid 21e eeuw'*. WL-rapport Q4044/Q4143, Delft.

- Van der Vat, M., R. van Buren, P. de Grave & I. van der Zwan, 2011. *Gebiedspilot Centraal Holland. Eindrapport*. Deltaresrapport 1203964, Delft.
- Van Heezik, A., 2008. *Het voordeel eener dubbel defensie. De discussies rond het compartimenteren van dijkringen in het verleden*. Deltares-rapport T2513.20, Delft.
- Vis, M., F. Klijn, S.A.M. van Rooij & M. van Buuren (eds.) (2001). *Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin. Final report*. WL-report R3470, Delft.
- VNK2 (Projectbureau VNK), 2011. *Overstromingsrisico Dijkkring X (diverse dijkringen)*, Utrecht.
- VNK2 (Projectbureau VNK), 2012. *Overstromingsrisico Dijkkring Y (diverse dijkringen)*, Utrecht.
- VNK2 (Projectbureau VNK), 2012a. *Prioriteren met VNK2*. Document HB 1729120, Utrecht.
- VNK2 (Projectbureau VNK), 2012b. *Overstromingsrisico van dijkkringgebieden 14, 15 en 44*. Document HB 1828484, Utrecht.
- Wagenaar, D.J., 2012. *The significance of flood duration for flood damage assessment*. MSc Thesis, TU Delft/Deltares.
- WL | Delft Hydraulics & Robbert de Koning Landschapsarchitect BNT (2007). *Nederlandse traditie: het landschap van waterkeringen (Dutch tradition: the landscape of levees)*. Posterkaart voor startconferentie "Gevolgbepierking Overstromingen: Compartimenteren en andere ruimtelijke ingrepen" in het kader van Waterveiligheid 21e eeuw (5 april 2007).



Deltares