



Doorbraakvrije dijken: een nadere verkenning



Copyright © 2014

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

Aansprakelijkheid

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



Doorbraakvrije dijken: een nadere verkenning

Frans Klijn
Marcel van der Doef
Nathalie Asselman

Met medewerking van:
André Hendriks
Simon den Hengst
Marjolein Mens



KvK 124/2014
ISBN/EAN 978-94-90070-89-2

Dit onderzoeksproject (projectnummer WCT1 – Doorbraakvrije dijken) werd uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoeksprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.



Samenvatting

Tijdens een studiedag over 'Dijken voor de toekomst', die KvK-Thema 1 in november 2011 samen met STOWA had georganiseerd, werd duidelijk dat veel discussie over 'praktisch doorbraakvrije' dijken het gevolg is van verschillende percepties, mede veroorzaakt doordat op onderdelen nog kennis ontbreekt. KvK heeft gevraagd enkele van die openstaande kennisvragen te beantwoorden; in het bijzonder die vragen die relevant zijn voor een '*evidence-informed*' maatschappelijk debat.

De eerste onderzoeksvraag die is opgepakt, is technisch-wetenschappelijk en economisch van aard. Deze gaat over de doelmatigheid van 'doorbraakvrije' dijken: in welk opzicht zijn 'doorbraakvrije' dijken effectiever in het reduceren van de overstromingsrisico's dan conventionele dijken en (wat) kost dat extra? 'Doorbraakvrije dijken' worden immers niet voorgesteld omdat ze goedkoper zijn, maar omdat er andere maatschappelijke voordelen aan verbonden zouden zijn die hogere kosten zouden kunnen rechtvaardigen. Daardoor kan het economisch optimum van hoogte en sterkte anders liggen dan bij gewone dijken. Dit is voor twee concrete casussen kwantitatief uitgewerkt.

De tweede onderzoeksvraag heeft betrekking op de mogelijkheid om dijken tegelijkertijd doorbraakvrij te maken en een locatie zo te ontwikkelen dat de ruimtelijke kwaliteit wordt vergroot, hetzij door efficiënter ruimtegebruik door multifunctionaliteit, hetzij doordat het landschap aantrekkelijker wordt om te zien, of door beide. Op deze vraag wordt in dit rapport minder uitgebreid ingegaan, omdat over de ruimtelijke implicaties van deltadijken enkele jaren geleden uitgebreid is gerapporteerd. De tweede onderzoeksvraag is daarom ingeperkt tot de vraag: welke technische oplossingen zijn er om dijken doorbraakvrij te maken en hoe kunnen die ruimtelijk worden vormgegeven?

In het KvK project WTC-1 is nog een derde vraag geadresseerd, namelijk: welke aanpassingen in financieringswijze (aanleg), wettelijk toets- en ontwerpinstrumentarium (aanleg en onderhoud), en zeggenschapsarrangementen zijn essentieel om een transitie naar een beleid gericht op 'doorbraakvrije' dijken tot stand te brengen? Over deze vraag is afzonderlijk gerapporteerd (Tettero, 2013; Tettero et al., 2014), om welke reden er in dit rapport niet meer op in wordt gegaan.

Voor een snelle indruk van wat het onderzoek aan nieuwe inzichten heeft opgeleverd, maar ook voor een eerste beeldvorming van wat 'doorbraakvrije dijken' zijn en kunnen betekenen, wordt verwezen naar hoofdstuk 8. Daarin zijn de belangrijkste bevindingen puntsgewijze opgesomd in een zodanige volgorde, dat deze als een logisch vervolg op deze 'inleidende samenvatting' kan worden gelezen.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
1.1	Waarom deze nadere verkenning?	9
1.2	Wat zijn 'doorbraakvrije dijken'?	9
1.3	Onderzoeksvragen en opbouw van het rapport	10
2	Verschillen tussen doorbraakvrije dijken en 'gewone' dijken	13
2.1	Effect op overstromingsverloop en gevolgen van overstromingen: principes	13
2.2	Wat wisten we hierover al uit eerder onderzoek?	13
2.3	Meer risicoreductie, maar ook (veel?) duurder	14
2.3.1	Kostenschattingen uit eerder onderzoek	15
2.3.2	Kostenschattingen en ramingen: kentallen en uitgangspunten	16
2.4	De verschillen in samenhang: een ander optimum?	17
3	Een kwantificering voor casus 'dijkkring Kromme-Rijngebied'	19
3.1	Wat is onderzocht en waarom?	19
3.1.1	Gebruikte modellen en aannames	19
3.1.2	De overstromingsmodellering	20
3.2	Resultaten: verschillend overstromingsverloop	21
3.2.1	Stijgsnelheid en maximumwaterdiepte	29
3.3	Risicoanalyse	31
3.4	Een indicatieve kosten-batenbeschouwing	33
4	Een tweede casus: dijkkring Rijn en IJssel	35
4.1	Wat is onderzocht en waarom?	35
4.2	Gebruikte modellen en aannames	36
4.3	Overstromingsverloop en gevolgen	36
4.4	Risicoanalyse	39
4.5	Kostenschattingen	39

4.6	Bevindingen	40
5	Kun je dijken wel 'doorbraakvrij' maken en hoe dan?	41
5.1	Over faalmechanismen en faalgedrag	41
5.2	Aanpak van individuele faalmechanismen	43
5.3	Grond of constructies vanuit kosten en landschap bezien.....	45
5.4	Multifunctionele 'doorbraakvrije' dijken?	46
6	Over de toepasbaarheid en mogelijke betekenis van 'doorbraakvrije dijken' voor Nederland.....	47
6.1	Waar beginnen en waarom?	47
6.2	Wat levert het op en wat kost het?	48
6.3	Implicaties voor crisisbeheersing en ruimtelijk beleid	48
7	Nog iets over inpasbaarheid en ruimtelijke kwaliteit	51
7.1	Dijken zijn meer dan waterkeringen	51
7.2	Implicaties van doorbraakvrije dijken in grond	51
7.3	Dijken als ontwerpopgave	53
8	De bevindingen op een rijtje en enkele aanbevelingen	57
8.1	Begrippen en algemene principes	57
8.2	Concrete resultaten uit de casussen.....	58
8.3	Generieke bevindingen over het perspectief	59
9	Literatuur	61



1 Inleiding

1.1 Waarom deze nadere verkenning?

Er is de afgelopen tijd veel discussie geweest over ‘praktisch doorbraakvrije’ dijken – ook wel deltadijken genoemd. Die discussie is in veel gevallen het gevolg van verschillende percepties, mede veroorzaakt doordat op onderdelen nog kennis ontbreekt. Dat werd in het bijzonder duidelijk in een workshop over ‘Dijken voor de toekomst’, die KvK-Thema 1 samen met STOWA had georganiseerd in november 2011.

Gedurende die bijeenkomst werden enkele belangrijke kennislacunes geïdentificeerd en onderzoeksvragen geformuleerd. Deels zijn die in ander kader – onder andere in het Deltaprogramma – geadresseerd, deels zijn de vragen nog blijven liggen of is het antwoord nog onvoldoende. Tegen die achtergrond heeft KvK gevraagd enkele openstaande kennisvragen te beantwoorden die relevant zijn voor een *evidence-informed* maatschappelijk debat.

1.2 Wat zijn ‘doorbraakvrije dijken’?

‘Doorbraakvrije’ of ‘praktisch doorbraakvrije’ dijken zijn dijken die *functioneel* kunnen worden gedefinieerd als: ‘dijken die keren tot de kruin en ook bij grote hoeveelheden overslag en/of overloop niet bezwijken’ (Klijn et al., 2013). Zulke dijken hoeven niet zo hoog te zijn – omdat het overslagdebiet niet kritisch is – maar ze moeten wel heel sterk zijn, want er mag geen bres in ontstaan als er water overheen loopt, of pas na heel lange tijd. En ze mogen zeker niet plotseling en onverwacht bezwijken.

Behalve over een ‘doorbraakvrije dijk’ wordt ook gesproken van ‘doorbraakbestendige dijk’ (Silva & Van Velzen, 2008) en komen we de termen deltadijk, klimaatdijk en superdijk tegen. Aan alle termen kleven wel bezwaren (zie Klijn & Bos, 2010). Hier houden we het vanuit functioneel oogpunt op ‘doorbraakvrij’. Met functioneel oogpunt bedoelen we dat het ons hier gaat om de functie van de dijk als waterkering, en we gebruiken de aanhalingstekens omdat nooit vol-

ledig kan worden gegarandeerd dat een dijk nooit doorbreekt¹. Daar gaan we verderop nog uitgebreider op in.

In pleidooien voor deltadijken, klimaatdijken of superdijken wordt vaak vooral gewezen op de mogelijke 'multifunctionaliteit' van dergelijke waterkeringen, waarbij de functionaliteit vanzelfsprekend wordt verondersteld of simpelweg wordt 'opgelost' door forse overdimensionering en het wensdenken dat de gebiedsontwikkelaars de meerkosten daarvan wel voor hun rekening nemen. In dit rapport stellen we juist de functionaliteit (doelmatigheid) in een strategie voor overstromingsrisicobeheersing centraal, waarna multifunctionaliteit een welkome bijkomstigheid kan zijn.

1.3 Onderzoeksvragen en opbouw van het rapport

De eerste onderzoeksvraag die is opgepakt, is technisch-wetenschappelijk en economisch van aard. Deze gaat over de doelmatigheid van 'doorbraakvrije' dijken:

1. in welk opzicht zijn 'doorbraakvrije' dijken effectiever in het reduceren van de overstromingsrisico's en (wat) kost dat extra?

Deltadijken worden immers niet voorgesteld omdat ze goedkoper zijn, maar omdat er andere maatschappelijke voordelen aan verbonden zouden zijn die hogere kosten zouden kunnen rechtvaardigen. Daarbij worden twee groepen voordelen genoemd, namelijk a) die met risicoreductie te maken hebben en b) die met meekoppelingskansen te maken hebben, zoals multifunctionele ontwikkeling en/of een grotere bijdrage aan de ruimtelijke kwaliteit. Voordelen uit de eerste groep betekenen dat de kosten en de baten in termen van bereikte risicoreductie kunnen verschillen van die van conventionele dijken. En dat dus ook het economisch optimum van hoogte en sterkte anders kan liggen dan bij gewone dijken. Dit is weliswaar onderkend in het Deltaprogramma (zie Kind, 2013), maar het is slechts sporadisch kwantitatief uitgewerkt. In dit rapport gaan we in op enkele concrete casussen.

De tweede onderzoeksvraag heeft betrekking op de tweede groep genoemde voordelen, namelijk de mogelijkheid om tegelijkertijd dijken doorbraakvrij te maken en een locatie te ontwikkelen op een wijze die de ruimtelijke kwaliteit vergroot, hetzij door efficiënter ruimtegebruik door multifunctionaliteit, hetzij doordat het landschap aantrekkelijker wordt om te zien, of door beide.

¹ Maar doorbraakbestendig betekent dat ie tegen doorbreken kan (?)



De beantwoording van de tweede onderzoeksvraag berust dus niet op rekenen, maar op tekenen en een (landschaps-) architectonische aanpak:

2. Welke technische oplossingen zijn er om dijken doorbraakvrij te maken en hoe kunnen die ruimtelijk worden vormgegeven?

Op deze tweede vraag wordt in dit rapport veel minder uitgebreid ingegaan, omdat over de ruimtelijke implicaties van deltadijken enkele jaren geleden uitgebreid is gerapporteerd (Klijn & Bos, 2010) in opdracht van het Deltaprogramma Nieuwbouw en Herstructurering. Wel wordt aandacht besteed aan de technische kant van de zaak.

In het KvK project WTC-1 is nog een *derde* vraag geadresseerd, namelijk:

3. Welke aanpassingen in financieringswijze (aanleg), wettelijk toets- en ontwerp-instrumentarium (aanleg en onderhoud), en zeggenschapsarrangementen zijn essentieel om een transitie naar een beleid gericht op (meer) doorbraakvrije dijken tot stand te brengen?

Deze vraag, die meer bestuurskundig ('*governance*') van aard is, is opgepakt door een *master*studente van de Vrije Universiteit Amsterdam, die daarover afzonderlijk heeft gerapporteerd (Tettero, 2013; Tettero et al., 2014). Omdat dat rapport via de website van KvK beschikbaar is, wordt op deze vraag in dit rapport *niet* meer ingegaan.



2 Verschillen tussen doorbraakvrije dijken en 'gewone' dijken

2.1 Effect op overstromingsverloop en gevolgen van overstromingen: principes

'Praktisch doorbraakvrije dijken' verkleinen niet alleen de kans op een overstroming; ze verkleinen ook de gevolgen, althans zolang er werkelijk geen bres ontstaat. En dat is precies de achterliggende gedachte achter doorbraakvrije dijken'. Deze moeten zo sterk zijn dat er geen bres in ontstaat, of alleen na heel langdurige overloop (taaie breuk in plaats van brossie breuk).

Als de dijk niet doorbreekt, maar alleen overloopt, loopt het water gedurende een kortere tijd in, namelijk alleen gedurende de tijd dat het water hoger staat dan de dijk. Bij een bres langs de rivieren blijft het water vaak inlopen tot de uiterwaard droogvalt, en bij een diepe polder aan een meer tot het water in de polder even hoog staat als dat in het meer (Klijn et al., 2010). Door de kortere inloopduur komt er minder water in het gebied, zodat er een kleiner areaal overstromt of het minder diep wordt. Althans, als het gebied relatief groot is. Dat betekent dat de schade van overstroming kleiner zal zijn.

Als het water langzaam inloopt, in plaats van met veel geweld, betekent dat dat er meer tijd is om het gebied uit te vluchten. Het betekent ook dat het water minder snel stijgt, zodat het gemakkelijker is om een veilig heenkomen te zoeken in een hoog gebouw. De extra vluchttijd betekent een geringere 'mortaliteit', en hetzelfde geldt voor de langzamere stijgsnelheid. Dat betekent dat de kans op verdrinking kleiner is en er minder slachtoffers te verwachten zijn.

2.2 Wat wisten we hierover al uit eerder onderzoek?

Eerder onderzoek naar het overstromingsverloop en de gevolgen van overstromingen aan doorbraakvrije dijken (Silva & Van Velzen, 2008; Stijnen, 2008) wees op significante reductie van de economische schade en heel grote reductie van het aantal slachtoffers (met 94 – 100%).

Deze resultaten waren aanleiding om in een verkenning van alternatieve strategieën voor overstromingsrisicobeheersing voor het PBL een reductie van 90 % van het aantal slachtoffers als redelijke schatting van het effect aan te nemen indien gehele dijkringen van doorbraakvrije dijken werden voorzien (Klijn et al., 2010). Als het slechts plaatselijk was, werd met 50% gerekend. Op basis van vergelijkbare aannames kwamen De Bruijn & Klijn (2010) tot de conclusie dat het groepsrisico in Nederland zou kunnen worden gehalveerd door circa

200 km dijk (van in totaal ongeveer 3000 km) doorbraakvrij te maken, en wel door ze daar aan te leggen waar grote aantallen mensen op gevaarlijke plekken wonen: vlak achter een dijk en op een plek waar het bij doorbraak snel diep wordt.

In een recentere studie met het PBL en HKV (Klijn et al., 2013) is weer wat gedetailleerder gekeken naar slachtofferaantallen per breslocatie, in aansluiting op onderzoek van Deltaprogramma Veiligheid (2013). In die studie is 80 % reductie als conservatieve aanname gebruikt. Maar ook is met behulp van een recent ontwikkeld 'risicotool' (De Bruijn et al., 2013b) op geavanceerdere wijze gerekend met situatie-afhankelijke evacuatiepercentages en conditionele kansen per breslocatie. In het onderzoek van De Bruijn et al. (2013) is vastgesteld dat het groepsrisico (kans op grote aantallen slachtoffers in één keer) waarschijnlijk kleiner is dan tot nu toe gedacht. Interessanter is dat met hetzelfde instrument is doorgerekend wat het effect zou kunnen zijn van het doorbraakvrij maken van de meest gevaarlijke dijktrajecten. Dat lijkt aanzienlijk; we komen er op terug in een later hoofdstuk.

2.3 Meer risicoreductie, maar ook (veel?) duurder

Vaak wordt gesteld dat het doorbraakvrij maken van dijken heel veel extra kost, maar de opvattingen daarover verschillen sterk. Dat hangt samen met het beeld (de perceptie) van hoe men zich een doorbraakvrije dijk voorstelt. Dat kan immers variëren van een hele brede zware en hoge dijk, waar ook eigenlijk nooit water overheen slaat of loopt ('100 keer veiliger'), tot een dijk die weliswaar niet hoger is dan de bestaande (soms zelfs lager kan, omdat 'overhoogte' niet meer relevant is), maar die wel veel sterker is. Ofwel: er bestaan zeer verschillende 'beelden' bij de benodigde hoogte en bij de benodigde breedte. Daar hangen de (meer)kosten natuurlijk mee samen.

De kosten om dijken 'praktisch doorbraakvrij' te maken zijn lastig te schatten, ten eerste omdat deze verschillen van plek tot plek (net als bij conventionele dijken). Wat vooral van plek tot plek verschilt is welk(e) doorslaggevend(e) faalmechanisme(n) precies onder controle moet(en) worden gebracht. Gaat het vooral om macrostabiliteit? Of om *piping* (onderloopsheid)? Of is erosie door overslag/overloop de grote boosdoener? Bij oplossingen in grond betekent dat namelijk steeds andere dimensioneringen: bij macrostabiliteit gaat het om een *flauwe* hellingshoek en/of een 'zware' berm, bij *piping* om een *lange* ondoorlatende berm (binnenzijde) of een lang kleidek (buitenzijde) en bij overslag/overloop gaat het om hetzij extra *hoogte* (en dus een grotere voetafdruk) hetzij een *flauwer* erosiebestendig binnentalud of flauwere knikken aan top en voet van de binnenzijde van de dijk (zie Klijn et al., 2013).



Om deze faalmechanismen met constructies te beperken zijn weer andere oplossingen mogelijk. De stabiliteit kan worden verkregen met 'vernageling', 'dijkdeuvels' of een damwand. *Piping* kan worden beperkt met geotextiel, een diepe damwand, of 'waterontspanners'². Erosie kan worden beperkt met een dik(ke)r kleidek of kunstomatten op enige diepte onder de grasmat op het binnentalud.

Welke oplossing op welke plek de voorkeur verdient, hangt ook af van de dimensionering die nodig is, de ruimte die beschikbaar is (bij bebouwing langs de dijk vaak weinig), en uiteindelijk de kosten van de 'totaaloplossing'. Soms is synergie mogelijk, namelijk door een kistdam (gekoppelde damwanden) die voldoende diep gaat en waarmee tegelijkertijd grote stabiliteit, geringe piping-gevoeligheid en grotere erosiebestendigheid van de kern van de dijk bij overlopen kan worden bereikt.

2.3.1 Kostenschattingen uit eerder onderzoek

Klijn et al. (2013) hebben de meerkosten van 'doorbraakvrije' dijken geprobeerd af te leiden uit eerder onderzoek. Zij baseren zich op drie eerdere schattingen en ramingen in de literatuur. Allereerst is dat Silva & Van Velzen (2008), die – zonder verhoging – meerkosten van 2- 4 M€/km opgeven voor het veel sterker maken van dijken indien uitgevoerd in grond, en van 7 M€/km als een damwand wordt toegepast.

Knoeff & Ellen (2011) noemen voor 'deltadijken' veel hogere meerkosten, namelijk gemiddeld 8 M€/km, met een spreiding van 6 M€/km bij IJssel, Maas en IJsselmeer tot 12 M€/km langs de kust indien uitgevoerd in grond. En nog eens ongeveer 75% duurder indien constructief. Daarbij maakt het volgens hen voor de meerkosten niet uit of *de gewenste situatie* wordt bereikt door het overslagvolume te verkleinen (extra hoogte) of door extra sterkte (overslagbestendig maken), maar ze maken dus eigenlijk een raming voor dijken die een 100 x kleinere faalkans hebben en een eveneens 100x kleinere kans op een 'kritisch' overslagvolume. Of dat nu werkelijk de gewenste situatie is? Zeker niet vanuit een kosten-batenoogpunt.

Tenslotte geven Hoogvliet et al. (2013) kostenramingen voor eveneens een 'deltadijk' op een specifieke locatie, namelijk de westzijde van de Krimpenerwaard. Indien uitgevoerd in grond komen ze op meerkosten voor een deltdijk van 70%, die vooral voortkomen uit de aankoop en sloop van panden. Een

² Met goed geplaatste putten aan de binnenzijde van de dijk wordt de druk van het grondwater verlaagd, zodat de opwaartse kwelstroom zwakker wordt en geen zand meer kan meenemen.

grondoplossing kost hier dus 1,7 keer zoveel als een conventionele dijk; dat betekent bij een 'basisprijs' van 8- 10 M€/km al gauw 14- 17 M€/km, ofwel 5,6- 7 M€/km meer. Voor constructieve oplossingen geven ze de volgende getallen voor totale investeringskosten (afgerond, cf. Klijn et al., 2013):

- Verankerde damwand: 9 M€/km
- Diepwand: 16 M€/km
- Kistdam: 19 M€/km
- L-vormige keermuur: 28 M€/km

Ook Hoogvliet et al. maken de dijk echter niet alleen sterker maar tevens fors hoger. En tevens dient men zich te realiseren dat recente conventionele dijkversterkingen in de tegenoverliggende Alblasserwaard ook al gemiddeld zo'n 15 – 20 M€/km kosten (mondelinge mededeling ir. Frans van den Berg, Waterschap Rivierenland). Dat betekent dat een kistdam (2 verankerde stalen damwanden) – waarvan we aannemen dat die in ieder geval praktisch doorbraakvrij is – qua kosten slechts 4 M€/km duurder is dan een grotendeels conventionele oplossing in een 'moeilijk gebied'.

2.3.2 Kostenschattingen en ramingen: kentallen en uitgangspunten

In de studie met PBL en HKV zijn Klijn et al. (2013) uiteindelijk uitgegaan van de volgende uitgangspunten en kentallen:

- We maken de dijk alleen veel sterker; niet hoger: overslagbestendig en kerend tot de kruin;
- Als er ruimte is voor een echt brede dijk wordt uitgegaan van grond; anders van een kistdam;
- Omdat bij een kostenschatting met behulp van KOSWAT (zoals gebruikt voor DP-Veiligheid) ook standaard wordt uitgegaan van constructies op lastige locaties, hoeft voor het bepalen van meerkosten niet te worden uitgegaan van de hoogste schatting van Silva & Van Velzen (2008) voor 'constructieve oplossingen' in plaats van grond, omdat de relatief goedkope grondoplossingen in de praktijk dus ook niet altijd worden toegepast;
- Dan zijn de gemiddelde meerkosten van doorbraakvrij ten opzichte van conventioneel: 2- 4 M€/km. Dat komt qua bandbreedte overeen met de laagste schatting van Silva & Van Velzen (2008) respectievelijk het



verschil tussen een kistdam en de laagste ervaringskosten in een moeilijk gebied als de Alblasserwaard.

Deze kentallen zijn bedoeld voor globale verkenningen. Waar in een casus de dimensionering of oplossing van te voren goed kan worden vastgesteld wordt natuurlijk bij voorkeur gebruik gemaakt van het instrumentarium dat standaard in het Deltaprogramma wordt gebruikt, namelijk DAM dat is ontwikkeld voor dijkontwerp en KOSWAT dat is ontwikkeld voor kostenschattingen.

2.4 De verschillen in samenhang: een ander optimum?

Het risico bij gewone dijken wordt over het algemeen berekend als de doorbraakkans maal het bijbehorend gevolg³. De nieuwe normen voor de primaire waterkeringen (Deltaprogramma Veiligheid, 2013) zijn gebaseerd op die relatie: kans * gevolg. Daartegenover staan de kosten van versterking van conventionele dijken om die normkans te bereiken.

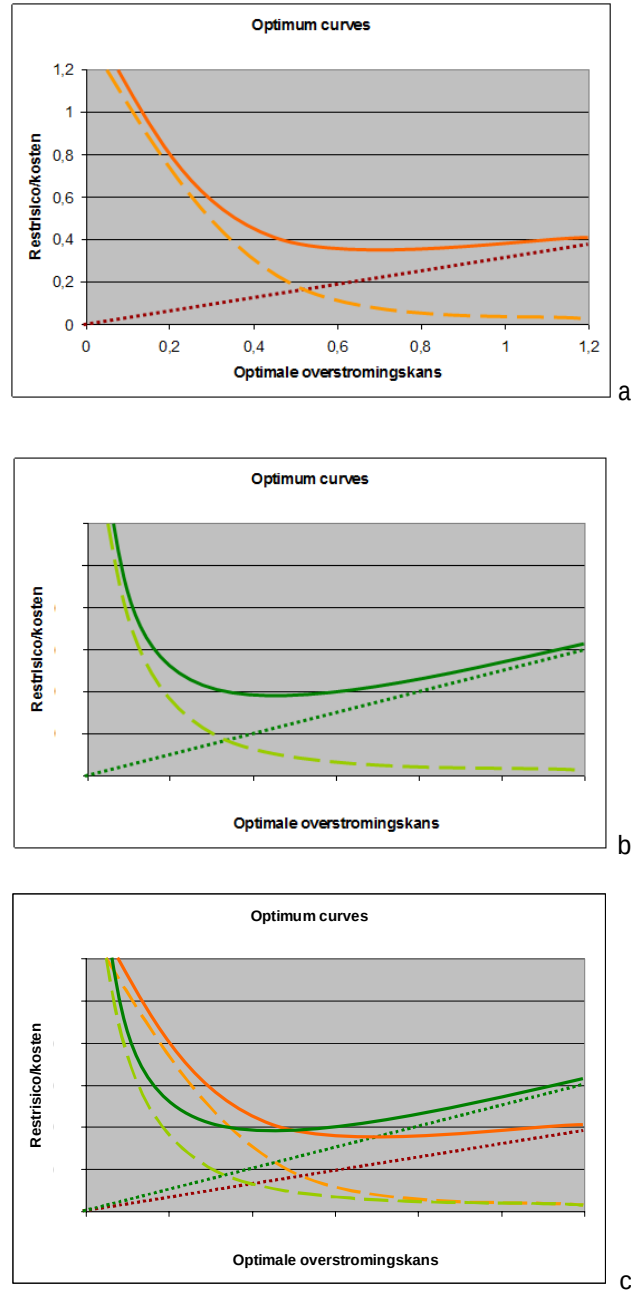
Het risico bij 'doorbraakvrije dijken' is daarentegen opgebouwd uit twee componenten: de kans op overloop met een relatief 'klein' gevolg plus de veel kleinere (bijv. 100 keer) kans op doorbraak met hetzelfde (grote) gevolg als bij doorbraak van een conventionele dijk. Daar tegenover staan hogere kosten voor het doorbraakvrij maken.

Dit impliceert dat de verhouding tussen kosten en resterend risico bij de verschillende soorten dijken ook kan verschillen. Dat is in onderstaande figuren geïllustreerd. Het betekent dat een kosten-batenanalyse (KBA) weleens zou kunnen uitwijzen dat de 'economisch optimale overstromingskans' (cf. Kind, 2011; 2013) in het rivierengebied bijvoorbeeld een factor 5-10 groter zou kunnen uitvallen dan bij conventionele dijken. Dat blijkt uit het vooralsnog hypothetische voorbeeldje in Figuur 1a t/m c.

We zien in deze figuur dat de hogere kosten voor deltdijken en de grotere risicoreductie die ermee bereikt wordt, in theorie kunnen leiden tot een andere ligging van het optimum, waarbij 'overstromingskans' (op de x-as) moet worden gelezen als 'overloopkans', of als een indicatie van waterhoogte/dijktafelhoogte. Met andere woorden: de dijk kan lager, omdat de bezwijkkans veel kleiner is; en zou vanuit economisch perspectief ook lager moeten, omdat deze nu eenmaal duurder is.

³ In werkelijkheid gaat het om een integraal, die vaak wordt benaderd via berekening voor enkele 'blokken'. Omwille van het begrip vereenvoudigen we de gedachte hier tot een vermenigvuldiging.

Deze theoretische beschouwing moet in concrete situaties worden getest, omdat de optimumcurves in de praktijk van plek tot plek sterk verschillen.



Figuur 1 Hypothetische optimumcurves als functie van (rechte) kosten-curves en risicocurves voor bescherming via conventionele dijken (a, oranje), 'doorbraakvrije' dijken (b, groen), en beide (c). Overstromingskans dient voor de conventionele dijk gelezen te worden als bezwijkkans en voor de 'doorbraakvrije' als overloopkans (bezwijkkans = $0,01 \cdot$ overloopkans).



3 Een kwantificering voor casus 'dijkring Kromme-Rijngebied'

3.1 Wat is onderzocht en waarom?

Bij 'doorbraakvrije dijken' wordt het totale overstromingsrisico bepaald door twee componenten: de kans en gevolgen van overloop en de kans en gevolgen van doorbraak. De kans op doorbraak wordt uiterst klein verondersteld, en de gevolgen zijn dan gelijk aan die van een 'gewone' dijkdoorbraak, waar in risicoberekeningen gewoonlijk vanuit wordt gegaan (zie VNK2, 2011; WV21, of Deltaprogramma Veiligheid, 2014). De kans op overloop is afhankelijk van de hoogte van de dijk. Hoe groot de gevolgen van overloop zijn wordt meestal bepaald aan de hand van vereenvoudigde overstromingssimulaties, gevolgd door standaard schade- en slachtofferberekeningen. Dat kan tot forse overschattingen leiden, zoals we hier zullen laten zien.

3.1.1 Gebruikte modellen en aannames

Omdat onzeker is hoeveel water er over een 'doorbraakvrije dijk' heen stroomt, zijn in het verleden sommen gemaakt met debieten die variëren van 1 l/s/m tot 100 l/s/m. Ook de tijdsduur van overloop werd gevarieerd, meestal van circa 8 tot zo'n 12 uur. Doordat het Kromme-Rijngebied (dijkring 44) aan de zuidkant een lange kering kent (32,5 km), kan bij zulke debieten per m lengte het totale instroomdebiet heel groot worden. We hebben vastgesteld dat bij een aanname van 10 l/s/m over de hele lengte de instroom $325 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Bij 30 l/s/m bedraagt deze bijna $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (dat is evenveel als er maximaal door een bres stroomt). En bij een aanname van 100 l/s/m zou vrijwel het hele debiet van de Neder-Rijn over de dijk heen stromen! Dat kan natuurlijk niet.

Vanwege de onzekerheid in overloopdebiet, is er daarom voor gekozen om de 'doorbraakvrije dijk' op andere wijze te schematiseren, namelijk met behulp van 13 takjes met stuwen, waarbij de hoogte van de stuw de kruinhoogte van de dijk voorstelt. Om deze hoogte vast te stellen is eerst een som gemaakt zonder doorbraak of overloop. De op deze manier verkregen 'maatgevende' waterstanden vormen de basis voor de kruinhoogtes. Op basis hiervan zijn drie varianten ontwikkeld:

1. 13 stuwtjes van 250m breedte met kruinhoogte 10 cm lager dan de 'maatgevende' waterstand;
2. 13 stuwtjes van 250m breedte met kruinhoogte 20 cm lager dan de 'maatgevende' waterstand;

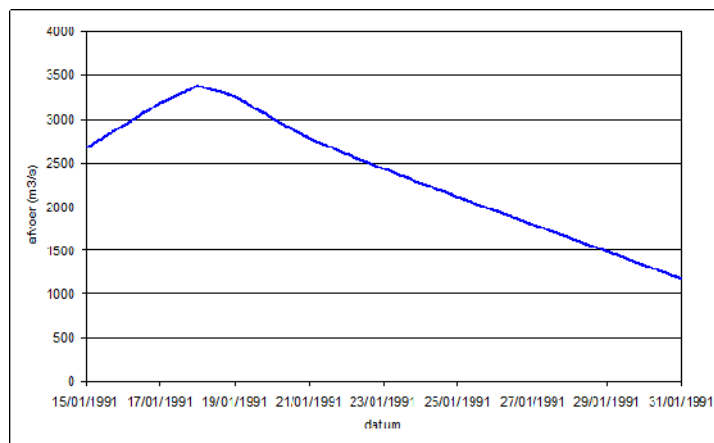
3. 13 stuwtjes van 500m breedte met kruinhoogte 20 cm lager dan de 'maatgevende' waterstand.

3.1.2 De overstromingsmodellering

Om de gevolgen van een dijkdoorbraak in beeld te brengen is gebruik gemaakt van het zogenaamde Randstad II model (P362_RM2.lit). Dit is een overstromingsmodel voor dijkkring 14 (Centraal Holland), 15 (Schieland en de Krimpenerwaard) en 44 (Kromme Rijn), dat in 2012 door de provincies Zuid Holland, Noord Holland en Utrecht is ontwikkeld. Dit model bestaat uit een 100 x 100 m hoogtegrid. Het model bevat tevens de belangrijkste regionale rivieren, kanalen en watergangen (als 1D-takken); in het onderzochte gebied zijn dat onder meer het Amsterdam-Rijnkanaal, de Kromme Rijn, de Langbroeker Wetering, en de grachten en singels in Utrecht.

In het bestaande model was een bres geschematiseerd met behulp van een 1D takje met daarin een stuw. Dit takje is zo aangepast dat een bres van 150 m breedte ontstaat op het moment dat de maximale waterstand nabij Amerongen wordt bereikt. Het ontstaan van de bres gaat op deze manier wat sneller dan wanneer een bresgroeiformule wordt gebruikt, en leidt tot een iets grotere instroming.

Wat de randvoorwaarden betreft is uitgegaan van een maatgevend hoogwater op de Neder-Rijn en een standaard golfvorm. De maximumafvoer bedraagt $3376 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie Figuur 2).



Figuur 2 Gebruikte afvoergolf op de Neder-Rijn

Na de simulatie met een bres bij Amerongen bleek er al in een vroeg stadium water door te stromen naar dijkringen 14 (Centraal Holland) en 15 (Lopiker- en Krimpenerwaard). De overstromingen in dijkkring 15 bleken deels samen te



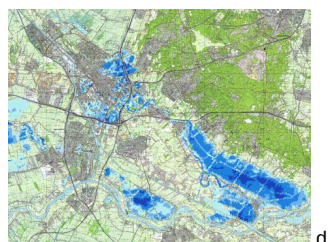
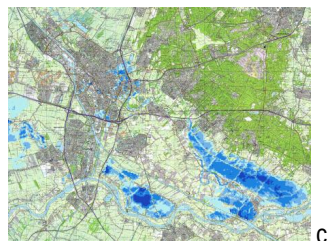
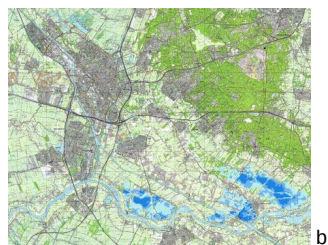
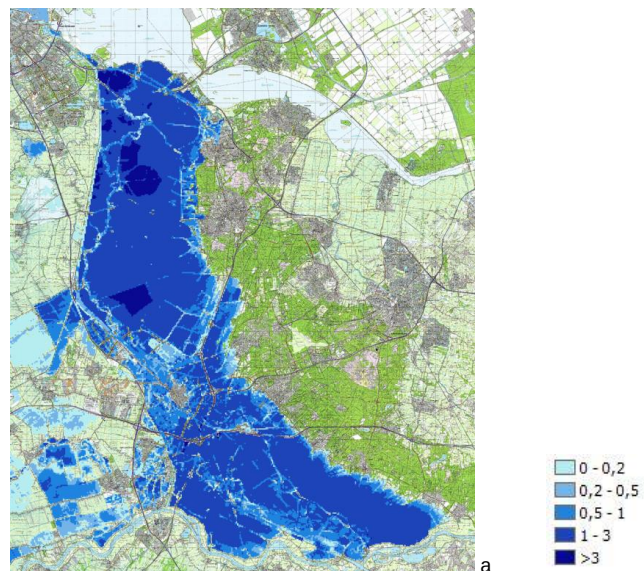
hangen met een sifon onder het Amsterdam-Rijnkanaal door die open staat. Deze is bij alle berekeningen open gelaten. De overstromingen in het noorden van dijkkring 14 bleken het gevolg van 'lekkage' langs een gemaal langs de Spaarndammerdijk (bijna bij Haarlem). De simulatie met de bres is niet opnieuw gedaan, maar bij de simulaties met de doorbraakvrije dijk is het gemaal verplaatst naar 'op de dijk', zodat er geen water meer (onterecht) langs kan stromen.

3.2 Resultaten: verschillend overstromingsverloop

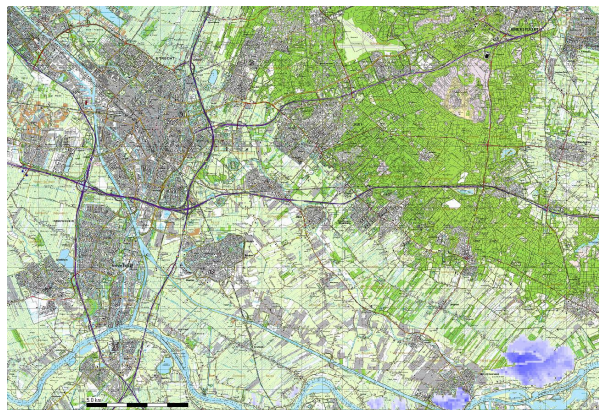
De maximale waterdieptes en het overstromd oppervlak zoals berekend bij de vier simulaties zijn te zien in Figuur 3. Het verschil in overstromd oppervlak in het geval van een bres en bij een overstroombare dijk is erg groot. Bij de gesimuleerde bres overstroomt vrijwel de gehele dijkkring. Ook overstroomden delen van de aangrenzende dijkkringen.

Bij een overstroombare standzekere dijk blijft de overstroming beperkt tot de lagere delen in het zuiden van de dijkkring. Lokaal is er ook sprake van wateroverlast in dijkkring 15. Dit komt doordat het water zich via de regionale waterlopen verspreidt. Via een sifon onder het Amsterdam-Rijnkanaal door komt ook water in dijkkring 15. Lage delen langs de Hollandse IJssel kunnen daardoor overstroomen.

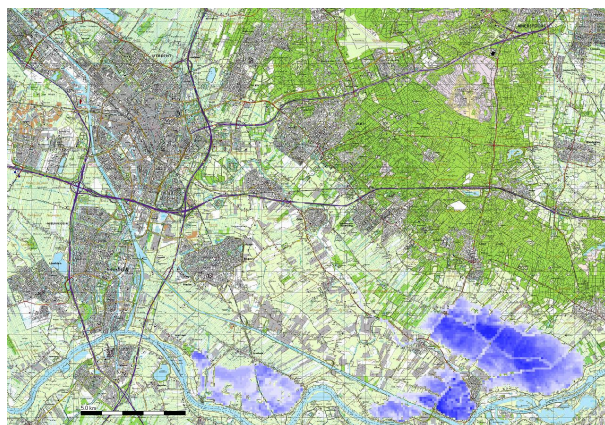
De betekenis van de regionale waterlopen voor de verspreiding van het water is duidelijk herkenbaar in de simulatie met een doorbraakvrije dijk die over ongeveer 7 km overstroombaar is en waarvan de kruin hier 20 cm lager ligt dan de maatgevende waterstand. Dit wordt geïllustreerd in de momentopnamen die in Figuur 3 zijn weergegeven. Deze momentopnamen zijn steeds midden op de dag genomen en betreffen achtereenvolgende dagen. Ze laten zien hoe (langzaam) het water zich door het gebied beweegt als de waterdieptes beperkt blijven.



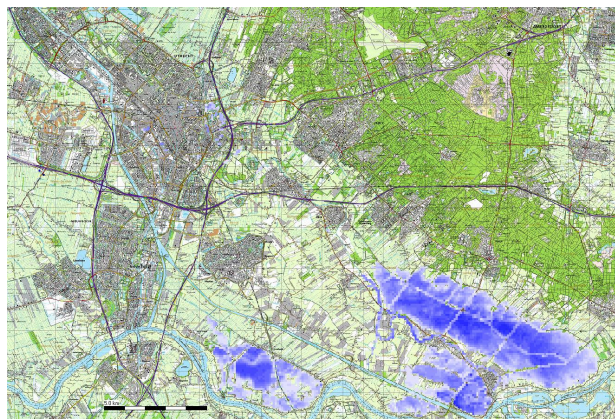
Figuur 3 Overstroomd oppervlak en maximum waterdiepte (in meters) zoals berekend bij de vier simulaties. a) 150 m brede bres bij Amerongen, b) doorbraakvrije dijk overstroombaar over ongeveer 3,5 km, kruinhoogte 10cm lager dan MHW, c) idem, kruinhoogte 20cm lager dan MHW d) doorbraakvrije dijk overstroombaar over ongeveer 7 km, kruinhoogte 20cm lager dan MHW.



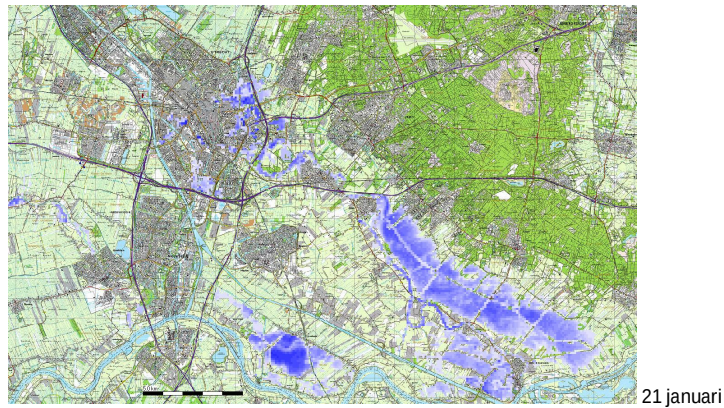
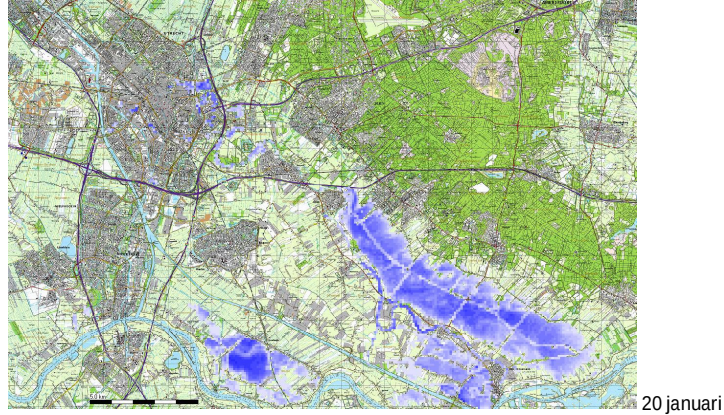
17 januari



18 januari



19 januari



Figuur 4 Het verloop van de overstroming in de tijd bij een deltadijk waarvan 7 km overstroombaar is (kruinhoogte 20cm lager dan maatgevende waterstand)

In het eerste plaatje van Figuur 4 is het overstroomd oppervlak te zien op 17 januari. Ongeveer 12 uur voor deze opname heeft de eerste overloop plaatsgevonden in het bovenstroomse deel van het 'overstroombare' traject. Omdat de waterstand op de rivier dan nog maar net hoger is dan de kruin van het overstroombare – en 'doorbraakvrije' – deel van de dijk, is de instroming beperkt; qua debiet en qua lengte waarover deze plaatsvindt. Dit resulteert in geringe waterdieptes en een klein overstroomd oppervlak.

Op 18 januari is ook verder benedenstrooms sprake van overloop. Echter, omdat de overloop van water in het bovenstroomse deel er voor zorgt dat de waterstanden op de rivier worden afgetopt, is de instroming hier veel minder groot. Dit blijkt ook uit de gevolgen. Overloop van het bovenstrooms gelegen dijktraject (Amerongen – Wijk bij Duurstede) zorgt voor overstromingen in het gebied tussen de Kromme Rijn en de Heuvelrug (het gebied van de Langbroeker Wetering). In het westelijke deel (ten zuiden van Houten) lopen wel gebieden onder water, maar het overstroomd oppervlak is veel kleiner en de waterdieptes zijn geringer.



De opname van 19 januari toont een vergelijkbare verdeling van het water als op 18 januari. Wel zijn de waterdieptes iets verder toegenomen en heeft het water zich ook in noordelijke richting verspreid.

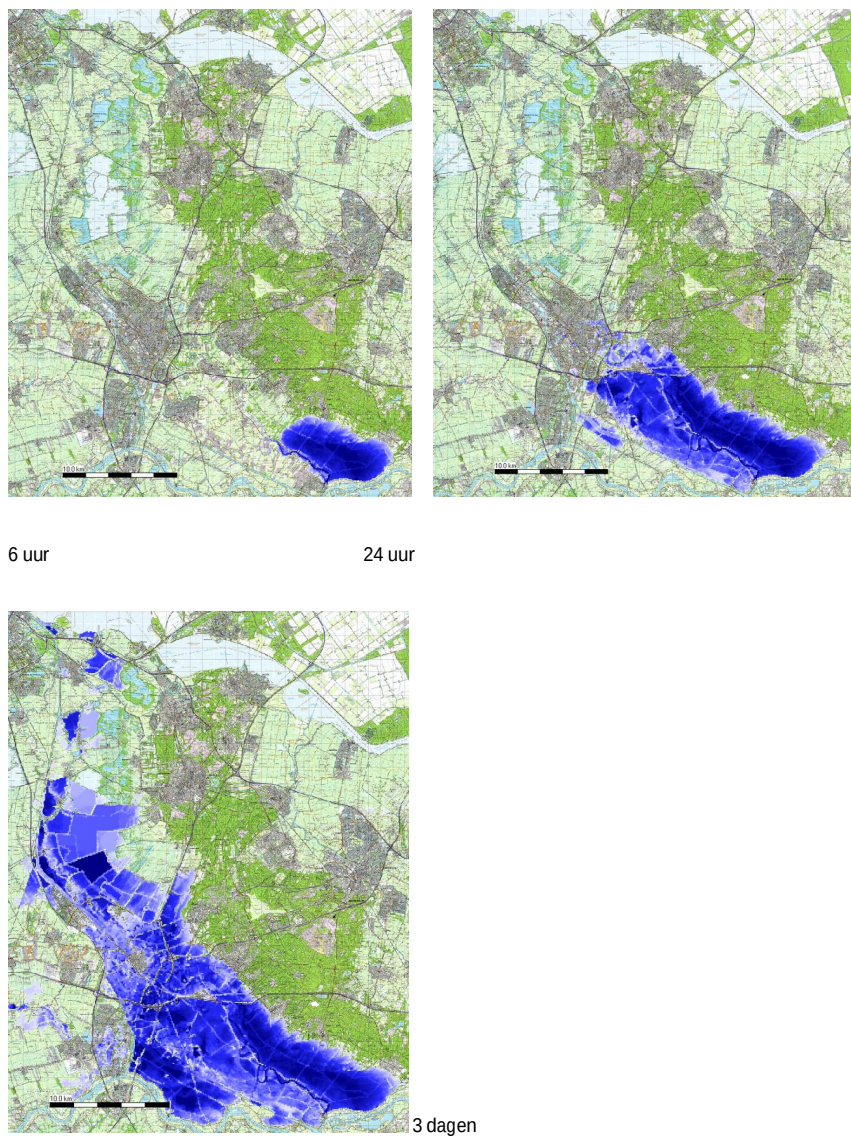
Hoewel de waterstand op de rivier op 20 januari al weer zo ver is gedaald dat geen overloop meer plaatsvindt, verspreidt het water zich wel nog steeds verder in noordelijke richting. In deze momentopname is te zien hoe het water via de Kromme Rijn naar het noorden stroomt en tot overstromingen leidt in het noordoosten van Utrecht.

Dit beeld is nog duidelijker op de momentopname van 21 januari. Via de Kromme Rijn zijn gebieden aan de noordoostzijde van Utrecht ondergelopen. Het water heeft zich inmiddels echter ook via andere waterlopen verspreid naar de westkant van Utrecht en zelfs via de sifon onder het Amsterdam-Rijnkanaal door naar dijkkring 15. Hier is te zien dat ook langs de Hollandse IJssel ten westen van Nieuwegein sprake is van wateroverlast.

Wanneer sprake is van een dijkdoorbraak, stroomt veel meer water het gebied in. Het overstroomd oppervlak wordt snel groter en het water wordt snel dieper en bereikt uiteindelijk forse dieptes (zie Figuur 4). Het grote verschil in overstroomd oppervlak en berekende waterdieptes is het gevolg van de grote verschillen in het instroomvolume. Omdat in de simulatie met de dijkdoorbraak is aangenomen dat in korte tijd een relatief brede bres ontstaat (150 m breed) die tot het maaiveld toe uitschuurt, stroomt een enorme hoeveelheid water naar binnen. Het totale instroomvolume door de bres bedraagt meer dan 1 miljard m^3 (Tabel 1). Dit volume stroomt gedurende meerdere weken naar binnen (aangenomen is dat de bres niet wordt gedicht).

Bij een 'doorbraakvrije' dijk die overstroombaar is over 7 km en waarvan de kruin 20 cm lager ligt dan de maatgevende waterstand, is de instroming beperkt tot 30 miljoen m^3 . Dan gaat er per m lengte maximaal 80 l/s overheen. Wanneer de lengte van het overstroombare deel wordt gehalveerd, resulteert dit niet in een halvering van het instroomvolume. Het instroomvolume is dan 23 miljoen m^3 (en geen 15 miljoen m^3 , zoals bij een halvering te verwachten zou zijn). Tijdens de passage van de golfpiek stroomt er op het meest stroomopwaartse stuk gedurende korte tijd maximaal bijna 100 l/m/s over de dijk. Dit leert ons dat een nog langer overstroombaar traject niet zal resulteren in een onevenredige toename van de instroming, omdat de hoeveelheid water in de golftop beperkt is.

Een verhoging van de kruin van het overstroombare deel resulteert wel in een grote afname van de instroming. Bij een overstroombaar traject van 3,5 km en een kruinhoogte van MHW -10cm, bedraagt de instroming nog maar 7 miljoen m^3 . Dit is het gevolg van het feit dat het maximum overloopdebiet kleiner is omdat de waterstand op de rivier nauwelijks hoger komt dan de kruin van de dijk en omdat de duur van overlopen korter is. Hierdoor start de instroming later en stopt deze ook weer eerder.



Figuur 5 Het verloop van de overstroming in de tijd bij een doorbraak tussen Amerongen en Wijk bij Duurstede, 6 uur, 24 uur en 3 dagen na het moment van doorbraak.

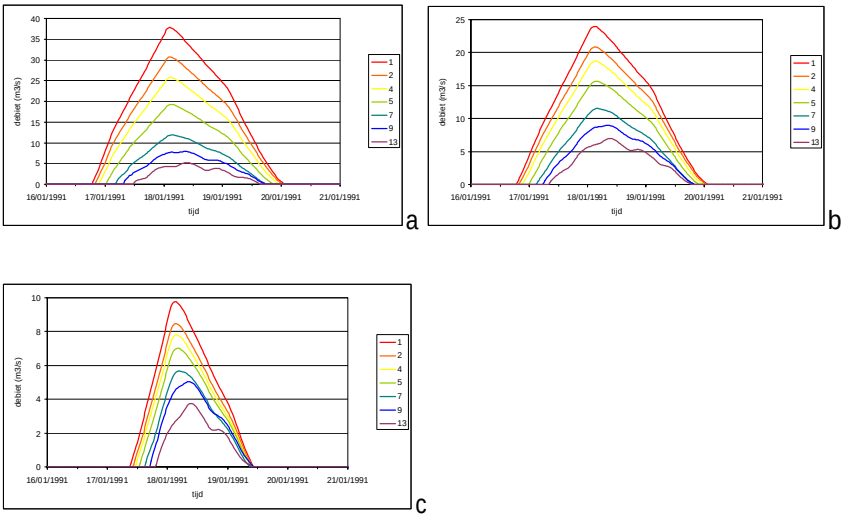
Het verschil in overloopdebiet en -duur is ook te zien in Figuur 5 en Figuur 6. Figuur 5 toont de overloopdebieten in de tijd voor verschillende dijktrajecten. Bij de simulaties waarbij 3,5 km dijk overstroombaar is, is uitgegaan van 13 trajecten van ieder ongeveer 250 m lengte. Bij de simulatie waarbij ongeveer 7 km overstroombaar is, is uitgegaan van dezelfde trajectlocaties, maar is de lengte



van ieder traject verdubbeld. De nummering van de dijktrajecten loopt van boven- naar benedenstrooms. Traject 1 is dus het meest bovenstrooms gelegen traject.

Tabel 1 **Instroomvolumes bij de verschillende modelsimulaties**

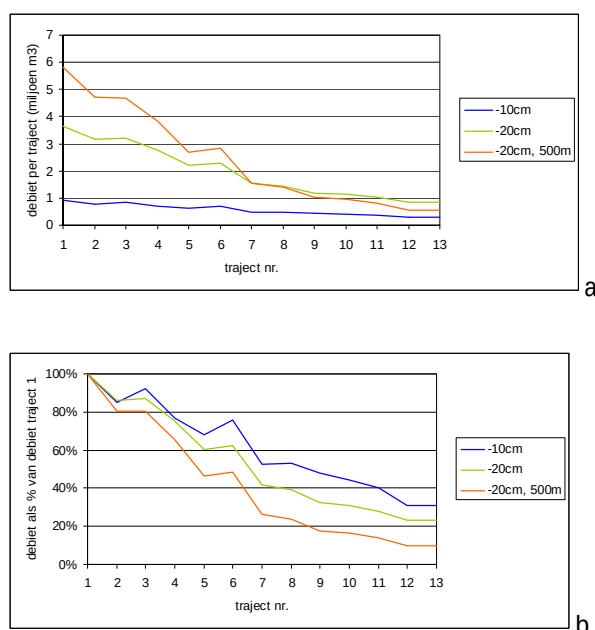
Simulatie	Instroomvolume (miljoen m ³)
Deltadijk overstroombaar over 3,5 km, hoogte MHW -10cm	7
Deltadijk overstroombaar over 3,5 km, hoogte MHW -20cm	23
Deltadijk overstroombaar over 7 km, hoogte MHW -20cm	30
Bres	1250



Figuur 6 **Overloopdebieten in de tijd: a) dijktrajecten van ieder ruim 500 m lengte, hoogte MHW -20 cm, b) dijktrajecten van ongeveer 250 m lengte, hoogte MHW -20 cm, c) dijktrajecten van 250 m lengte met hoogte MHW -10 cm.**

Het valt op dat het overloopdebiet in stroomafwaartse richting (hogere nummers) afneemt. De instroom start later omdat de hoogwatergolf op de rivier zich moet verplaatsen, maar vooral doordat de overloop over de bovenstrooms gelegen trajecten voor een waterstandsval zorgt. Het duurt daardoor langer voordat het water in de rivier zo ver is gestegen dat ook de benedenstroomse trajecten overlopen. Ook het maximale overloopdebiet blijft lager. Deze afname van het overloopdebiet is ook te zien in Figuur 6.

Figuur 7a toont het instroomvolume per dijktraject in miljoen m³. Hoe langer het dijktraject en hoe lager de kruin van de dijk, hoe groter het instroomvolume, maar ook hoe sneller de afname van het instroomdebiet in stroomafwaartse richting. Er wordt dan in het bovenstroomse deel zo veel water “afgetopt” dat de waterstanden sneller dalen. Deze sterke afname is ook te zien in Figuur 6, waar het instroomvolume per traject is weer gegeven als percentage van het eerste dijktraject. Bij de deltadijk met het langste overstroombare traject is de instroming bij het laatste traject minder dan 10% van de instroming bij het eerste traject (waar deze circa 80 l/m/s is). Bij de deltadijk met een korter overstroombaar traject en een hogere kruin is dat nog ruim 30% (van circa 40 l/m/s ‘aan het begin’).



Figuur 7 Instroomvolume per dijktraject a) in miljoen m3 b) als percentage van het eerste traject



3.2.1 Stijgsnelheid en maximumwaterdiepte

Voor het slachtoffer risico is het belangrijk hoe snel het water aankomt, hoe snel het stijgt en hoe diep het uiteindelijk wordt. Hiervoor is al ingegaan op de aankomsttijd, geïllustreerd aan de overstromingskaartjes. Hier wordt nog nauwkeuriger gekeken naar de stijgsnelheid en het diepteverloop in de tijd.

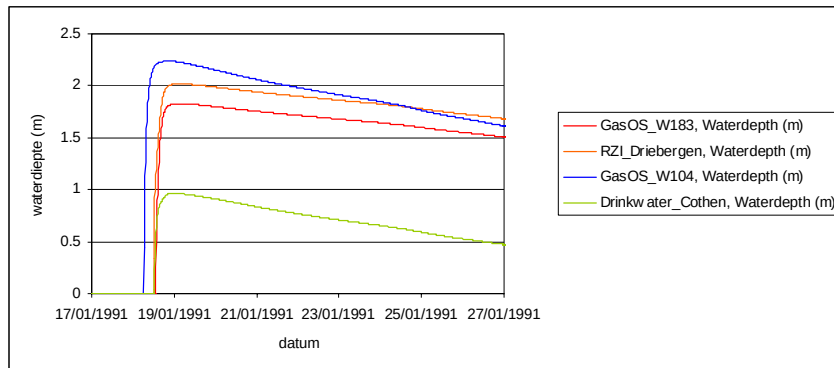
Het model bevat een aantal locaties waarvoor modelresultaten in detail beschikbaar zijn (Figuur 8). Bij de simulaties voor de 'doorbraakvrije dijk' overstromen er slechts enkele, namelijk:

- GasOS_W183
- GasOS_W104
- RZI_Driebergen
- Drinkwater Cothen

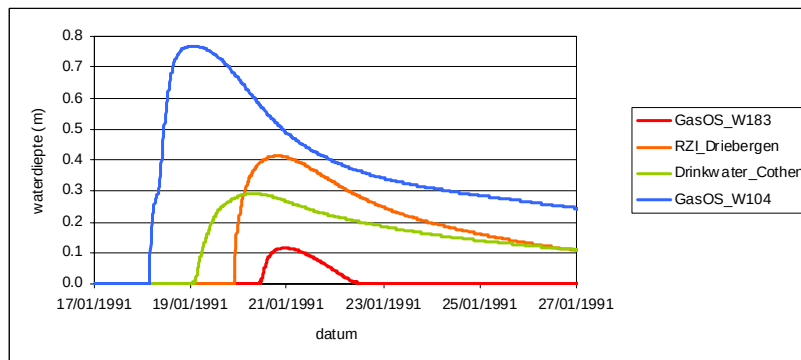


Figuur 8 Locaties met modeluitvoer

Voor deze locaties is de berekende waterdiepte uitgezet tegen de tijd in Figuur 9 en Figuur 10. Figuur 9 toont het verloop van de waterdiepte in de tijd bij een 150 m brede bres die ontstaat op 18 januari om 3 uur 's nachts (het moment waarop de hoogste waterstand in de rivier wordt bereikt) tussen Amerongen en Wijk bij Duurstede. Wat opvalt, is dat het water snel de geselecteerde locaties bereikt en dat de waterdieptes snel oplopen tot circa 2 m (ten noorden van Utrecht treden lokaal nog grotere waterdieptes op, maar deze zijn niet in de figuur opgenomen omdat deze gebieden bij een doorbraakvrije dijk niet overstromen).



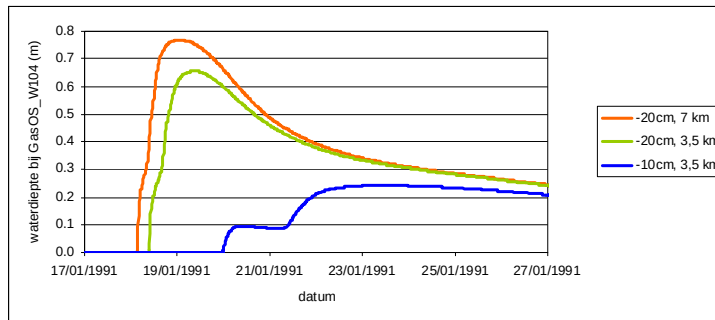
Figuur 9 Het verloop van de waterdiepte voor 4 locaties in het zuiden van dijkkring 44 bij een bres tussen Amerongen en Wijk bij Duurstede



Figuur 10 Het verloop van de waterdiepte voor 4 locaties in het zuiden van dijkkring 44 bij een deltadijk die overstroombaar is over 7 km en daar een kruinhoogte heeft van 20cm beneden MHW

Bij de doorbraakvrije dijk (Figuur 10) duurt het lang voordat het water zich door het gebied verspreidt. De locatie GasOS_W104 overstroomt pas bijna 24 uur nadat het eerste water over de dijk heen stroomt. Bij de andere locaties is dit tijdsverschil nog groter. De grootste waterdieptes zien we nu in het gebied langs de Langbroeker Wetering (GasOS_W104). Elders wordt het minder diep of blijft het helemaal droog.

Voor de locatie Langbroeker Wetering (GasOS_W104) is nog een vergelijking gemaakt tussen de 'doorbraakvrije dijken' met verschillende hoogte en lengte van het overstroombare traject (Figuur 11). Er is duidelijk te zien dat de waterdiepte kleiner blijft als het overstroombare dijktraject korter is (verschil oranje en groene lijn) en als de kruin hoger is (verschil groene en blauwe lijn).



Figuur 11 Het verloop van de waterdiepte voor modeluitvoerlocatie GasOS_W104 bij verschillende deltadijsimulaties

3.3 Risicoanalyse

De resultaten van de overstromingssimulaties zijn gebruikt om met behulp van HIS-SSM (versie 2.5) de economische schade en aantallen slachtoffers te berekenen. De resultaten zijn te zien in Tabel 2. De schade is berekend voor het referentiejaar 2000 (dit is standaard binnen het HIS), en niet gecorrigeerd voor indirecte effecten noch naar huidige economie (dat zou voor alle getalswaarden een factor van 2,24 schelen, maar is voor onderlinge vergelijking niet relevant).

In de simulatie met een bres bij Amerongen bedraagt de economische schade 15,9 miljard euro. Bijna 600.000 personen worden getroffen door de overstroming. Het verwachte aantal slachtoffers bedraagt ruim 1300.

Bij de simulaties met een doorbraakvrije dijk is de schade veel lager. Deze varieert van 0,2 tot 1,4 miljard. Daarbij wordt nog opgemerkt dat veel van deze schade relatief eenvoudig voorkomen had kunnen worden. Met name uit de simulatie met een 7 km lang overstroombaar traject op een hoogte van 20cm onder Maatgevend Hoogwater bleek dat het water zich via de Kromme Rijn en andere waterlopen naar Utrecht verplaatst en daar tot veel schade leidt. Deze schade had vermeden kunnen worden door de Kromme Rijn tijdelijk af te sluiten, bijvoorbeeld waar deze de snelweg kruist. Afsluiting van de Kromme Rijn zorgt er ook voor dat het aantal getroffen personen minder blijft dan nu is berekend. Ook is bij het 'ontwerp' van de 'doorbraakvrije' dijk geen rekening gehouden met de ligging van dorpen en steden. In dit geval is de dijk ook ter hoogte van Wijk bij Duurstede overstroombaar. Door dit traject juist net iets hoger aan te leggen had ook hier schade voorkomen kunnen worden.

Op het aantal slachtoffers dat door HIS-SSM wordt berekend valt ook wel wat af te dingen. Het model houdt namelijk geen rekening met aankomsttijd, alhoewel onderkend wordt dat een relevante factor is (zie Van de Pas et al., 2012). Eerste verkenningen van De Bruijn & Slager (2014) wijzen uit dat de

aankomsttijd in langgerekte dijkringen fors kan uitmaken in het aantal slachtoffers van een dijkdoorbraak. Evenmin is bij de hier gepresenteerde uitkomsten rekening gehouden met preventieve evacuatie. Vooral bij een deltadijk, waarbij het moment van inlopen heel voorspelbaar is, mag daarvan worden uitgegaan⁴. Al met al valt moeilijk in te zien dat er nog 20 tot 90 verdrinkingsgevallen zullen zijn als het water zo langzaam instroomt dat het pas na 3 dagen in Utrecht tot overstroming komt (via de Kromme Rijn) en Bunnik pas na 4 dagen wordt bereikt.

Tabel 2 Economische schade, aantal getroffen en aantal slachtoffers volgens HIS-SSM (peiljaar 2000)

simulatie	economische schade (miljard euro)	getroffenen (aantal)	slachtoffers (aantal)
bres	15,9	589300	1310
deltadijk, 3,5 km overstroombaar, hoogte MHW -10cm	0,2	17100	20
deltadijk, 3,5 km overstroombaar, hoogte MHW -20cm	0,6	39600	40
deltadijk, 7 km overstroombaar, hoogte MHW -20cm	1,4	103300	90

⁴ Bij een plotselinge doorbraak bij beneden-maatgevende waterstanden is de kans op tijdige succesvolle evacuatie weliswaar kleiner, maar ook dan relevant om rekening mee te houden.



3.4 Een indicatieve kosten-batenbeschouwing

Als we deze resultaten gebruiken om met een rekenvoorbeeld een eerste indruk te krijgen van hoe *hoog* de dijk nu moet worden, kan dat als volgt:

- Kosten gewone dijken 10x betrouwbaarder: $33 \text{ km} * 10\text{-}15 \text{ Meuro/km} = 330\text{-}495 \text{ Meuro}$
- Kosten dijken 'doorbraakvrij' maken: $33 \text{ km} * 12\text{--}19 \text{ Meuro/km} = 396\text{-}627 \text{ Meuro}$.
- Risicoreductie conventioneel door doorbraakkans van 1: 1000 naar 1: 10.000 (factor 10): $15,9 \text{ Meuro/jaar} - 1,59 \text{ Meuro/jaar} = 14,3 \text{ Meuro/jr}$
- Risicoreductie 'doorbraakvrij' van 1: 1.000 conventioneel naar 1: 1.000 overstroombaar: $15,9 - (1,4 + 0,2 \text{ (kans op bezwijken 1\% van overlooptkans, resulterend in risicobijdrage van 10\%)}) = 14,3 \text{ Meuro/jaar}$
- Verantwoorde investering bij conventioneel (heel grof): $14,3 * 35 = 500 \text{ Meuro}$; dat is $> 495 \text{ Meuro}$. Dus factor 10 kansverkleining is verantwoord.
- Verantwoorde investering bij 'doorbraakvrij' maken (heel grof): de bereikte risicoreductie is precies gelijk, maar wordt op andere wijze behaald. Deze 'baat' ligt binnen de bandbreedte voor kosten (396 en 627 Meuro). Dat betekent dat het optimum voor overlooptkans ligt rond de 1: 1000, met 1% kans op doorbraak (= 1: 100.000). Dat betekent dat een 99% standzekere dijk niet hoger hoeft dan de huidige, ja zelfs lager kan met de kruin op ongeveer de huidige maatgevende waterstand.
- Als we daarentegen uit zouden gaan van een wat minder betrouwbare dijk, ongeveer zoals we dachten dat ze voorheen werden geconstrueerd, met een kans op doorbraak van 10% van de 'normhoogte', dan krijgen we een risicoreductie van: $15,9 - (1,4 + 1,6) = 12,9 \text{ Meuro/jaar}$. Ook in dat geval is een investering van ongeveer 35* dat bedrag economisch verantwoord, dus van ongeveer 450 Miljoen euro. Voor dat bedrag lijken zowel hogere conventionele dijken als nauwelijks hogere⁵ '90% standzekere' dijken te maken.

⁵ Men bedenke dat de huidige rivierdijken over het algemeen 0,5 tot 1,0 m hoger zijn dan de maatgevende waterstand in verband met golfoploop, zetting, etc.

Dit rekenvoorbeeld leert ons dat lagere 'doorbraakvrije' dijken op deze plek (dijkkring 44) ongeveer net zo 'rendabel' zijn als hogere conventionele. De kosten lopen niet ver uiteen (maximaal 20%) en de gerealiseerde risicoreductie ook niet. Het hoogte-optimum ligt echter wel anders.

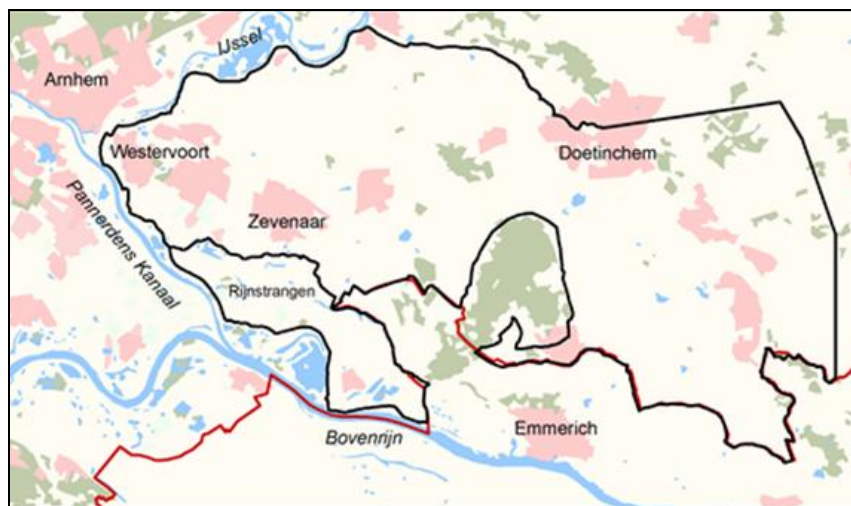
Omdat de voorspelbaarheid van falen en het faalgedrag (niet plotseling en onverwacht bezwijken) echter sterk verschillen, is het vooral een kwestie van welk maatschappelijk doel wordt nagestreefd (staat slachtoffer risico's reduceren centraal of '*highest return on investment*'?) en natuurlijk tevens van de vraag welk type dijk inpasbaar is in de ruimtelijke context (lage sterke dijken of hogere iets minder sterke).



4 Een tweede casus: dijkkring Rijn en IJssel

4.1 Wat is onderzocht en waarom?

De tweede casus heeft betrekking op dijkkringgebied Rijn en IJssel (dijkkring 48;). Deze dijkkring bestaat uit dijken langs de Bovenrijn, het Pannerdens Kanaal, de IJssel en de Oude IJssel (Figuur 12), maar omvat in de praktijk ook dijken langs de Duitse Niederrhein. Als namelijk in Duitsland de noordelijke Rijndijk zou bezwijken zou dijkkringgebied Rijn en IJssel onderlopen (Lammersen, 2004). En als de dijk langs de Nederlandse Bovenrijn zou bezwijken, zou zoveel water door dijkkring 48 naar het IJsseldal stromen dat stroomafwaarts gelegen dijkkringen ook overstroomd raken. Daarom worden de dijken langs Bovenrijn en Pannerdens Kanaal wel als 'systeemdijken' beschouwd (Van der Most & Klijn, 2013): ze zijn van bovenregionaal belang en moeten een domino-effect voorkomen.



Figuur 12 Het Nederlandse deel van dijkkringgebied Rijn en IJssel

In deze tweede casus is een 'doorbraakvrije dijk' verkend langs de Nederlandse Bovenrijn. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen een conventionele dijk en een 'doorbraakvrije' voor het dijktraject tussen Spijk (op de landsgrens) en het splitsingspunt bij Pannerden. Daartoe worden weer achtereenvolgens de bezwijkkans en de kans op overloop/ overslag bepaald, de overstromingspatronen gesimuleerd en beschreven, en de gevolgen voor de maatschappij gekwantificeerd.

Daarna wordt een 'economisch optimale overstromingskans' berekend, waarbij zoveel mogelijk is aangesloten bij de methode die is gebruikt in het 'Deltaprogramma Veiligheid'. De 'optimale kans' berust dus op de kosten en risico's van de verschillende dijkontwerpen: conventioneel versus 'doorbraakvrij'.

4.2 Gebruikte modellen en aannames

Voor de bepaling van de gevolgen van een dijkdoorbraak is gebruik gemaakt van de overstromingssimulatie die voor de locatie Spijk beschikbaar is vanuit VNK2, en die ook is gebruikt voor het Deltaprogramma Veiligheid (2013, 2014).

De doorbraakvrije dijk is net als in de eerste casus geschematiseerd met behulp van een groot aantal 'takjes' met een 'kruinhoogte' 20 cm lager dan de maatgevende waterstand. De dijk tussen de Spijk en IJsselkop is ongeveer 25 km lang (dit is het normtraject DPV 48-1), waarvan 10 km langs de Bovenrijn ligt. Van deze 10 km is de helft (5 km) als 'doorbraakvrije dijk' gemodelleerd. De tijdsduur van de overloop wordt door de hoogte en vorm van de afvoergolf op de Bovenrijn bepaald.

Bij de bepaling van de schade door het overlopen van de 'doorbraakvrije dijk' is in deze casus uitgegaan van een maximum debiet van 100 l/s/m dijk. Dit is de waarde die in overslagproeven als een veilige grens is gevonden voor een goed ontwikkelde grasmat op het binnentalud van de dijk. Hogere overloopdebieten vereisen een harde binnenbekleding (bijvoorbeeld steen, asfalt of kunststofmatten).

Schades, aantallen slachtoffers en aantallen getroffen en geëvacueerden zijn berekend met het HIS-SSM. Bij het berekenen van de aantallen slachtoffers is daarbij (nog) geen rekening gehouden met mogelijke evacuatie. De effectiviteit van evacuatie is afhankelijk van de waarschuwingstijd. Nu is een hoogwater in het rivierengebied enkele dagen vooruit te voorspellen, maar als (conventionele) dijken onverwacht en plotseling bezwijken bij niet maatgevende condities, is tijdige waarschuwing niet mogelijk. Daarom is in het Deltaprogramma Veiligheid voor dijkkring 48 met een zeer conservatieve 56 % evacuatie gerekend.

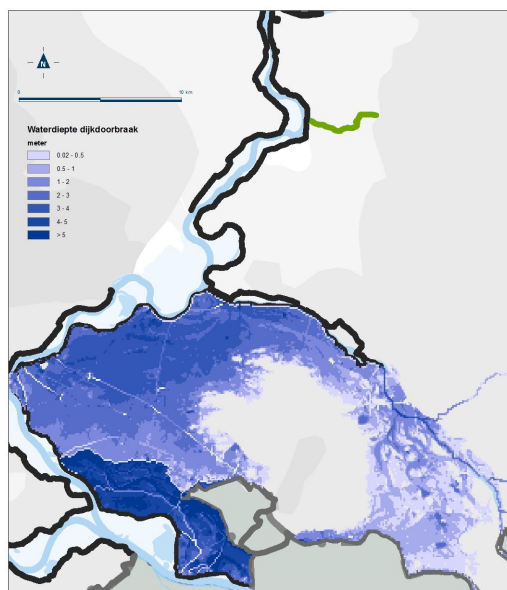
4.3 Overstromingsverloop en gevolgen

Bij een *doorbraak* van de dijk te Spijk zullen eerst het Rijnstrangengebied en de 3-Dorpenpolder vollopen, waarna het water 'onderlangs' loopt naar het gebied ten oosten van het Montferland. Vervolgens loopt het water over de noordelijke (oude) Rijnstrangendijk heen en krijgt ook het gebied tussen het Rijnstrangengebied en de IJssel te maken met de overstroming. Ook loopt er water terug de IJssel in, die deze hoeveelheden niet aankan; en er kan water over de dijken langs de Oude IJssel stromen. Daardoor overstromen ook dijkkringen 49, 50 en 52 (zie Figuur 13). Indien de Rijnstrangendijk zou bezwijken, zou het water makkelijker en sneller naar het noordelijke deel van het dijkkringgebied stromen en vandaar weer naar de IJssel of naar aangrenzende dijkkringen (naar: De Bruijn, 2009).



Het totale instroomvolume bij een dijkdoorbraak bij Spijk bij een afvoergolf met een maximaal debiet bij Lobith van ca. 16000 m³/s (maatgevende omstandigheden) is ca. 800 miljoen m³.

De schade⁶ die dit veroorzaakt (in basisjaar VNK2 = 2007), is met HIS-SSM berekend als zijnde 5,5 miljard euro in dijkkring 48 zelf, en zijnde 10 miljard euro in totaal met inbegrip van de schades in stroomafwaarts gelegen dijkkringen die ook getroffen worden.



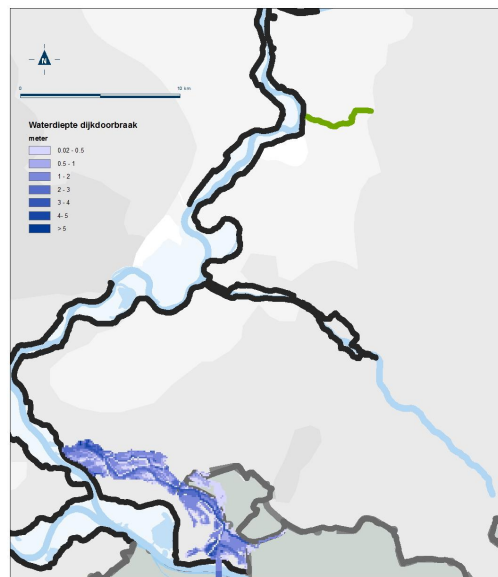
Figuur 13 Maximale waterdiepte als gevolg van een dijkdoorbraak te Spijk bij maatgevende omstandigheden (aannemende dat secundaire keringen en IJsseldijken niet breken).

Bij een 'doorbraakvrije dijk' kan maximaal 100 liter/s/m water over de dijk lopen over een lengte van ca. 5 km. Het maximale instroomdebiet komt daarmee op 500 m³/s over het hele traject. Deze 'onttrekking' heeft geen grote invloed op de waterstanden in de rivier, omdat dit debiet relatief gering is ten opzichte van het totale debiet van de Bovenrijn (circa 16.000 m³/s). Bij de gebruikte af-

⁶ De hier genoemde schade is de directe schade, zonder de 'WV21- factor', een correctiefactor op de schade voor ontbrekende schadeposten en prijspeil, en zonder gemonetariseerde slachtoffers (a 6,7 miljoen p.p.) en compensatie voor psychische schade bij getroffenen. Daarom zijn de gepresenteerde getallen niet direct vergelijkbaar met uitkomsten uit Deltaprogramma Veiligheid.

voergolf en aangenomen kruinhoogte is de duur van overlopen circa 36 uur. Het totale instroomvolume komt hierdoor op circa 30 miljoen m³ (tegenover 800 miljoen m³ bij een dijkdoorbraak) en de overstroming blijft ruimtelijk beperkt tot het Rijnstrangebied (Figuur 14).

De schade (in basisjaar VNK2 2007) die hier het gevolg van is, is circa 100 miljoen euro in de dijkkring zelf. Er worden geen andere dijkringen getroffen.



Figuur 14 Maximale waterdiepte als gevolg van het over 5 km lengte overlopen van een doorbraakvrije dijk langs de Bovenrijn.

Tabel 3 Overzicht resultaten: economische schade (prijspeil 2007), aantal getroffen en aantal slachtoffers volgens HIS-SSM

simulatie	schade (G euro)	getroffenen (aantal)	slachtoffers (aantal)
Doorbraak Spijk	5,5- 10	120.000	975
'Doorbraakvrije dijk', 5,1 km overstroombaar	0,1	1000	geen



4.4 Risicoanalyse

De risico's van een *conventionele dijk* zijn berekend voor de kansen op bezwijken in de huidige situatie en bij aangescherpte normen zoals voorgesteld door het Deltaprogramma Veiligheid (2014). De huidige kans op doorbraak van dit traject is geschat op ongeveer 1/1000 jaar (referentiesituatie DP-V). De economisch optimale bezwijkkans is bepaald op 1/16.000 per jaar.

Het huidige economische risico is dan 5,5 miljoen euro per jaar (in dijkkring Rijn en IJssel zelf, zonder toeslagen, prijspeil 2007, zonder monetarisering van slachtoffers, en zonder domino-effecten ingecalculeerd). De netto contante waarde hiervan is 110 miljoen euro (op basis van een discontovoet van 5,5 %). Indien de dijk op conventionele wijze versterkt wordt (tot de economisch optimale kans van 1/16.000 jaar) wordt het risico verkleind tot minder dan 0,5 miljoen euro per jaar (0,35). De netto contante waarde hiervan is ongeveer 7 miljoen euro: ruim 100 miljoen euro lager dan het huidig risico⁷.

De risico's bij een '*doorbraakvrije dijk*' zijn berekend uitgaande van een kans op overlopen die gelijk is aan de doorbraakkans in de referentiesituatie (1/1000 jaar). Voor de kans op bezwijken is aangenomen dat deze minder dan 1% is van de kans op overlopen; dat wil zeggen 1/100.000 jaar.

Het schaderisico als gevolg van overlopen is dan 0,1 miljoen euro per jaar (100 miljoen * 1/1000 jaar), en het risico als gevolg van een doorbraak wordt ongeveer 0,05 miljoen euro per jaar (5,5 miljard * 1/100.000 jaar). De netto contante waarde van deze twee risico's samen is ongeveer 3 miljoen euro: net als van de conventioneel versterkte dijk ruim 100 miljoen euro lager dan het huidig risico⁷.

4.5 Kostenschattingen

Voor de kostenschatting is uitgegaan van specifieke kosteninformatie op trajectniveau, zoals die voor de Verkenning Deltadijken is verzameld (Knoeff & Ellen, 2011). De kosten voor het conventioneel versterken tot een 10 keer kleinere bezwijkkans zijn toen geraamd op circa 4,1 miljoen euro per kilometer; en die voor 'doorbraakvrij' maken op circa 5,2 miljoen euro per kilometer. Dat de-

⁷ Indien het risico berekend zou worden inclusief gemonetariseerde slachtoffers (6,7 miljoen euro per slachtoffer) zou de netto contante waarde van het huidige risico 166 miljoen euro bedragen. Dat wordt 10 miljoen in het geval van een conventioneel 16 x sterkere dijk, respectievelijk 3,6 miljoen in het geval van een 'doorbraakvrije dijk'. In beide gevallen is de reductie dan ruim 150 miljoen euro.

ze kostenschattingen relatief laag uitvallen wordt ten eerste veroorzaakt doordat de dijken grotendeels vrij liggen, zodat weinig constructieve maatregelen nodig zijn om bebouwing te sparen. Ten tweede is weinig extra hoogte nodig, door de aftopping van de hoogwaterstanden door overstromingen in Duitsland. De kosten voor het 'doorbraakvrij' maken van de dijk liggen daarmee ongeveer 25 % hoger dan voor een conventionele dijkversterking en -verhoging.

De kosten voor het hele traject van Spijk tot IJsselkop (25 km) komen hiermee op circa 100 miljoen euro voor de conventionele dijk tegenover 125 miljoen euro voor een 'doorbraakvrije dijk'. Eventueel zou slechts de 5 km langs de Boivenrijn als 'doorbraakvrije dijk' kunnen worden uitgevoerd om kosten te besparen. Maar of de mindere hydraulische belasting op het deel langs het Pannerdensch kanaal door de 'onttrekking' dan voldoende groot is om een doorbraak alhier te voorkomen is dan de vraag; dit is verder niet onderzocht, mede omdat de kostenbesparing ook maar gering is.

4.6 Bevindingen

Op grond van onze berekeningen is een aanscherping van het beschermingsniveau met conventionele dijkversterking met een factor 10 (tot circa 1: 10.000 per jaar) rendabel. Dat strookt met de uitkomsten van Deltaprogramma Veiligheid (2014), waar een beduidend hoger beschermingsniveau (1: 16.000 per jaar) is afgeleid op grond van getallen waaraan 'onderschatte posten' zijn toegevoegd, die zijn aangevuld met effecten in stroomafwaarde dijkkringgebieden, die vervolgens zijn gecorrigeerd naar huidig prijspeil en daarna geëxtrapoleerd naar 2050, een ook nog eens aangevuld met gemonetariseerde slachtoffers. Deze bevinding is dus niet nieuw – en ook nog eens gebaseerd op een veel grovere berekeningswijze.

Voor het onderhavige onderzoek is de centrale vraag echter hoe een 'doorbraakvrije dijk' zich verhoudt tot een conventionele. Zonder correcties naar huidig prijspeil en domino-effecten lijkt een doorbraakvrije dijk economisch niet verantwoord: deze kost 125 miljoen en levert 100 miljoen risicoreductie (netto contante waarde). Na correcties zal een 'doorbraakvrije dijk' waarschijnlijk wel rendabel zijn, zeker als het domino-effect wordt meegeteld. Dat scheelt immers bijna factor 2 in het risico (schade bij doorbraak 10 miljard euro in plaats van 5,5). Ook als het slachtofferrisico wordt ingecalculeerd door slachtoffers te monetariseren wordt de doorbraakvrije dijk met de dijktafel op 1: 1000 per jaar zeker rendabel. De baat wordt dan ruim 150 miljoen euro in plaats van 100, in vergelijking met kosten van 125 miljoen.

Kortom: doordat de 'doorbraakvrije dijk' het aantal slachtoffers tot vrijwel nul reduceert komt deze er maatschappelijk en economisch gunstiger uit dan de 10 keer sterkere conventionele dijk. En een doorbraakvrije dijk verkleint de kans op een mogelijk maatschappelijk ontwrichtend domino-effect langs de IJssel veel sterker.



5 Kun je dijken wel 'doorbraakvrij' maken en hoe dan?

5.1 Over faalmechanismen en faalgedrag

Als dijken niet doen wat ze geacht worden te doen, spreekt men van 'falen'. Dat is de meest gebruikte term. Daarnaast wordt wel gesproken van bezwijken, zoals we in de voorafgaande tekst veelvuldig hebben gedaan. Deze verschillende woorden hebben niet dezelfde lading, maar worden door verschillende onderzoekers verschillend gebruikt; en vaak door elkaar. Bij falen wordt vaak bedoeld op een formele definitie van wanneer een dijk of onderdeel daarvan faalt: als de grasmat door golven stukgaat, 'faalt' deze grasmat. Als er steenbekleding van de dijk wordt geslagen, 'faalt' deze bekleding. Als er meer dan een bepaalde hoeveelheid water over de dijk slaat, 'faalt' deze op hoogte. Maar faalt de dijk als totaliteit dan ook? En: betekent het ook dat deze werkelijk bezwijkt?

Over het algemeen worden de volgende faalmechanismen onderscheiden (maar een verdere onderverdeling is mogelijk):

- Overslag en overloop
- Erosie buitentalud
- Afschuiven binnentalud (*slumping* en *sliding*)
- Onderloopsheid (*piping*)
- Verschuiven of 'omvallen'

Bij berekeningen van 'overstromingskansen', zoals uitgevoerd in het kader van VNK (2011 tot 2014) wordt meestal verondersteld dat de dijk in z'n totaliteit faalt, als deze op een van de genoemde faalmechanismen faalt. Dat is *formeel* juist, want de dijk (of een onderdeel daarvan) doet niet wat deze geacht wordt te doen: ongeschonden blijven bijvoorbeeld, of alle water buitenhouden met uitzondering van 1 l/m/sec maximaal.

Maar falen in deze betekenis wil echter niet zeggen dat de dijk dan ook bezwijkt. Dijken hebben immers ook nog enige reststerkte, die weer kan verschillen per faalmechanisme. Dat laatste maakt het lastig deze reststerkte te kwantificeren, omdat het dus afhangt van het mechanisme in kwestie. Enkele voorbeelden kunnen dat illustreren. Als de steenbekleding van een Waddendijk na enkele uren storm deels wordt losgeslagen, maar de golfaanval na nog eens enkele uren weer afneemt (stormvloed hebben een relatief korte duur, van naar wordt aangenomen maximaal 29-32 uur), zal de dijk mogelijk niet zijn be-

zweken, maar wel moeten worden hersteld. Dan is wel sprake van falen (beter: 'normfalen'), maar niet van een overstroming. Dat komt door *reststerkte* ten aanzien van golferosie. Als over een rivierdijk plaatselijk gedurende enige tijd meer dan 30 liter water stroomt, maar het binnentalud ongeschonden blijft, is sprake van falen, maar niet van bezwijken. Ook in dat geval is er dus reststerkte, maar nu ten aanzien van terugschrijdende erosie door '*overland flow*' op het binnentalud. Recente overslagproeven wijzen erop dat overslagvolumina tot 100 l/m/sec gedurende enkele uren maar zelden leiden tot structurele schade. Het is aldus heel lastig de *overall reststerkte* vast te stellen; daarom wordt er bij berekeningen tot nu toe zelden rekening mee gehouden.

Gerelateerd aan het begrip reststerkte wordt ook nog onderscheid gemaakt naar de wijze van falen: is er sprake van een *brosse* breuk (plotseling), of een *taaie* (zich langzaam ontwikkelend). Bij het ontstaan van bressen in waterkeringen is dat een relevant onderscheid. Zo kan een sluisdeur die het begeeft onder grote waterdruk ineens breken, kan een zanddijk door erosie heel snel worden weggespoeld, waarbij in korte tijd een grote bres ontstaat (zie foto onder), maar zal een kleidijk veel langzamer eroderen en de bres uiteindelijk ook kleiner blijven.

Voor de vraag of dijken doorbraakvrij kunnen worden gemaakt en hoe dan, is het dan ook van belang van te voren functionele eisen te stellen. Die zouden in ieder geval moeten inhouden dat:

- Falen van onderdelen (hoogte bijvoorbeeld) toelaatbaar is, maar bezwijken van het dijklichaam niet. Dat vraagt om het inbouwen van reststerkte;
- Het faalgedrag zo taai mogelijk zou moeten zijn.

Alvorens nu op individuele faalmechanismen in te gaan, merken we nog op dat te stellen functionele eisen natuurlijk niet alleen het dijklichaam zelf betreffen, maar ook de ondergrond: een sterk 'gebouw' op een beroerde 'fundering' is immers niets waard.





5.2 Aanpak van individuele faalmechanismen

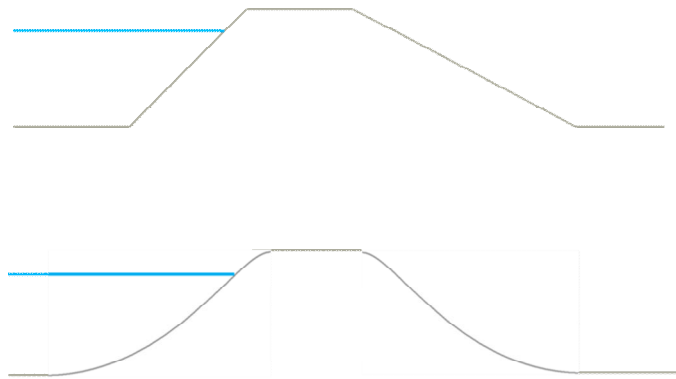
Vanuit de genoemde functionele eisen is het dus zaak dijken te maken die niet bezwijken door 'geotechnisch falen', die ten aanzien van overslag en overloop veel reststerkte hebben, en als er uiteindelijk 'massief water' overheen loopt taai bezwijkgedrag vertonen. Om zulke dijken te maken zijn er twee oplossingsrichtingen, namelijk:

- een oplossingsrichting in grond, die uitgaat van het vergroten van het grondvolume van het bestaande dijklichaam;
- een oplossingsrichting met constructies, waarbij het dijklichaam zelf en/of de verbinding met de ondergrond wordt versterkt met andere materialen: wier, houten palen en koeiehuizen (in het verleden), bentoniet, beton ('mixed-in-place' of gewapend beton), staal, geotextiel, andere kunststofconstructies (in het heden).

Om een dijk praktisch doorbraakvrij te maken moeten de faalmechanismen die tot bezwijken en bresvorming kunnen leiden onder controle gebracht worden. Dan gaat het dus om terugschrijdende erosie op het binnentalud als er water over de dijk slaat of loopt, om bezwijken door afschuiven of wegschuiven, of om bezwijken door onderloopsheid. We grijpen hier terug op een beschrijving van de belangrijkste faalmechanismen en wat daar tegen te doen valt uit Klijn et al. (2013).

Erosie door overloop/overslag kan worden voorkomen door de hellingshoek van het binnentalud te verkleinen. In Duitsland worden plaatselijk wel hellingshoeken van 1:8 aangehouden. Welke taludhelling voldoende flauw is om de kans op bezwijken door erosie voldoende klein te maken, hangt af van het verval over de dijk, de bekleding en het materiaal waar de dijk van is gemaakt (korrelgrootte, soort kleimineralen en mate van verkitting (organische verbindingen)).

Flauwe hellingen vragen natuurlijk veel ruimte. In plaats daarvan kan ook veel worden bereikt door het voorkomen van scherpe overgangen van vlak naar steil naar vlak. Uit recente overslagproeven met rivierdijken is gebleken dat erosie vaak het eerste (eigenlijk alleen) optreedt bij de knik aan de dijkteen. En we weten dat ook de knik aan de bovenzijde tot beginnende erosie kan leiden. Door de overgangen van kruin naar binnentalud en van talud naar maaiveld af te ronden kan mogelijk een steilere dijk worden gerealiseerd, die een slankere indruk geeft door de smallere taille. Zie Figuur 15.



Figuur 15 Overslagbestendigheid vraagt flauwere binnentaluds en/of geleidelijker overgangen (uit Klijn et al., 2013)

Waar de genoemde profielaanpassingen de eroderende werking van het water beperken, kan natuurlijk ook de erosiebestendigheid van de dijk zelf worden beïnvloed. Bijvoorbeeld door een dikkere kleilaag toe te passen, of door het binnentalud te bekleden en deze bekleding weer met grond af te dekken om toch een groene dijk te krijgen. Er zijn kunststof rasters waar gras doorheen kan groeien en die dan vrijwel onzichtbaar zijn. Maar ook kan op enige diepte een steenbekleding worden aangebracht. Uit overslagproeven blijkt dat zeedijken met kunststof rasters probleemloos een overslagdebiet van 100 l/m/s doorstaan. Dergelijke 'constructieve oplossingen' zijn vaak wel iets duurder dan een dikkere kleilaag.

De macrostabiliteit van de dijk wordt bepaald door de eigen sterkte en de verbinding met de ondergrond. In dijken van grond wordt de eigen sterkte vooral bepaald door de cohesie tussen de gronddeeltjes, die afhangt van de eigenschappen van de grond, maar ook van de waterdruk in de dijk. Met een brede dijk met flauwe taluds is de interne sterkte vaak voldoende groot te krijgen, maar vormt de waterdruk (bij verzadiging) soms een probleem. Vaak wordt ook gekozen voor stabilisatie met behulp van een zware berm om tegendruk te geven en afschuiving te voorkomen.

De hechting van de dijk aan de fundering kan ook met grond worden gewaarborgd, maar daarvoor zijn ook diverse innovatieve technieken in ontwikkeling (dijkdeuvels e.d.). De ondergrond moet zelf natuurlijk ook voldoende sterk zijn, hetgeen vooral in 'slappe' veengebieden soms niet het geval is. Daar kan de ondergrond zo zwak zijn dat de dijk in z'n geheel verschuift. Dat kan worden voorkomen door zo'n slappe ondergrond deels te vervangen door iets zwaarder: zand en/of klei; of door er een zware berm tegenaan te leggen.



Tenslotte kan verschuiving van een dijk natuurlijk ook worden voorkomen met een damwand die in een stevige ondergrond is getrild. En afschuiving langs een gekromd glijvlak (*'slumping'*) kan soms al worden voorkomen met een relatief korte damwand aan de voet van de dijk.

Onderloopsheid door grondwaterstroming en het ontstaan van zandmeevoerende wellen vraagt ingrijpen in deze stroming en/of ondergrond. De stroming kan worden beïnvloed door de intreeweerstand te vergroten aan de buitendijkse kant, bijv. door een kleidek aan te brengen op het voorland, of door het inbrengen van een zogenaamde GCL-mat: een sandwich van een bentoniet tussen twee lagen geotextiel (Dorst, 2013). Ook kan de uittreelocatie aan de binnendijkse kant worden opgeschoven door een brede slecht doorlatende berm. Die laatste oplossing wordt in de praktijk vaak toegepast, maar nieuwe inzichten resulteren in plaatselijk zeer brede bermen.

In plaats van met bermen kan verplaatsing van zand ook worden voorkomen door verticaal geotextiel in de grond aan te brengen. Daarmee wordt momenteel geëxperimenteerd door Waterschap Rivierenland. Ook kan een kwel scherm worden gemaakt van bentoniet of met een damwand. Daarmee wordt zowel de stroming vertraagd (door 'kwelwegverlenging') als de verplaatsing van zand voorkomen.

Een derde maatregel tegen *piping* is de zogenaamde 'waterontspanner', die de grondwaterstroming concentreert in 'putten' en zo de opwaartse waterbeweging verkleint, en tegelijkertijd zandtransport voorkomt. Ook deze oplossing wordt al plaatselijk toegepast.

Onderloopsheid kan ook worden voorkomen door een damwand aan de voet van de dijk te plaatsen; een oplossing die ook al problemen met macro-instabiliteit ondervangt. Zou men er ook de erosie bij overloop mee willen voorkomen, dan zou de damwand tot de dijk kruin moeten worden verlengd en in de dijk in plaats van aan de teen moeten worden geplaatst. Om het grondmateriaal in de dijk afdoende 'op te sluiten', zou een kistdam (twee gekoppelde damwanden) de voorkeur hebben. Dat is een dure oplossing, die in één keer alle faalmechanismen onder controle brengt en tevens de kleinste voetafdruk oplevert.

5.3 Grond of constructies vanuit kosten en landschap bezien

Allereerst kan worden gesteld: met geld is alles te maken. Vervolgens kan worden gesteld: oplossingen in grond zijn technisch het goedkoopst. En: meer volume is waarschijnlijk goedkoper, want dat stelt minder hoge eisen aan de kwaliteit van de gebruikte materialen. Maar oplossingen in grond vragen de meeste ruimte en als die ruimte er niet is, wordt een oplossing in grond alsnog heel duur (bijvoorbeeld doordat bestaande bebouwing moet worden opgekocht).

De smalste en duurste 'verborgen' oplossing is de dubbele damwand (kistdam), die alle faalmechanismen in een keer onder controle kan brengen, en tevens een heel smalle en steile dijk mogelijk maakt. Hoogvliet et al. (2013) schatten hiervoor een bedrag van circa 19 M€ per km voor Krimpenerwaard-West. Voor een stedelijke omgeving is ook een L-vormige keermuur denkbaar; die is dan wel beeldbepalend, en komt volgens Hoogvliet et al. (2013) gemiddeld op bijna 28 M€/km.

Brede bermen vragen om veel ruimte, en worden op veel plaatsen als minder fraai beoordeeld. Als de macrostabiliteit moet worden vergroot kunnen damwanden of dijkdeuvels worden overwogen: onzichtbaar en effectief. Als piping moet worden voorkomen zijn er ook 'onzichtbare' alternatieven, zoals geotextiel, ingegraven kleidekken in voorland en/of achterland, kwelschermen, of – wederom – een damwand. Een eenzijdig verankerde damwand voor Krimpenerwaard-West wordt door Hoogvliet et al. (2013) geraamd op circa 9 M€/km.

Een overslagbestendige dijk vraagt heroverweging van ontwerpprincipes zoals die door landschapsarchitecten tot nu toe werden gebezigd, zoals: een steile bovenkant (getailleerde dijk, cf. Yttje Feddes) en scherpe knikken. In plaats daarvan zou misschien eens ontworpen moeten worden aan geleidelijke overgangen (vooral onderaan). Dan zijn misschien steile middengedeeltes nog mogelijk om de voetafdruk klein te houden. En dat is zeker het geval als grond en constructies worden gecombineerd. Een samenwerking van kundige civielingenieurs met landschapsarchitecten biedt hier mogelijk perspectief.

5.4 Multifunctionele 'doorbraakvrije' dijken?

Hoe conventionele dijken doorbraakvrij gemaakt kunnen worden, hangt niet alleen af van de technische eisen, maar ook van eventuele aanvullende eisen voortvloeiend uit gewenst medegebruik. Het kan gaan om aanvullende eisen voor bijvoorbeeld wegen (breedte en overhoogte in relatie tot verwachte verkeersintensiteit en -zwaarte), bebouwing (uitzicht over water, parkeren in een droge garage onder dijkniveau), beplanting (wortelkluit buiten het technisch profiel houden in verband met mogelijk omwaaien), etc.

De technische ontwerp-eisen worden steeds aangepast aan het groeiend inzicht in de vele tegenwoordig onderscheiden faalmechanismen. Daar ziet het ENW (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid) op toe. De technische ontwerp-eisen leveren als het ware een minimum-dwarsprofiel: het technisch profiel. Aanvullende eisen vanuit andere gebruiksfuncties kunnen leiden tot de wens van de dijkbeheerder het dwarsprofiel (veel) ruimer te dimensioneren. Dat kan leiden tot dijken die (nog) veel breder zijn, met nog veel flauwere profielen of met veel bredere bermen binnen- of buitendijks. Hier is volgens Klijn & Bos (2010) een belangrijke taak weggelegd voor landschapsarchitecten om tot aantrekkelijke oplossingen te komen. We gaan er in hoofdstuk 7 nog wat nader op in.



6 Over de toepasbaarheid en mogelijke betekenis van 'doorbraakvrije dijken' voor Nederland

6.1 Waar beginnen en waarom?

Over deze vraag is recentelijk al het nodige geschreven. In het onderhavige onderzoek is aan die vraag dan ook geen verdere aandacht besteed. Daarom refereren we hier, omwille van de volledigheid, alleen kort aan dat eerdere onderzoek.

Klijn & Bos (2010) stellen dat het voor de hand ligt doorbraakvrije dijken in twee situaties toe te passen:

1. Waar ze een significante meerwaarde hebben bij het verkleinen van overstromingsrisico's, ofwel vanuit *nutsoverwegingen*;
2. Waar een gewenste ontwikkeling vanuit ander perspectief op, aan of nabij een dijk *aanleiding* is om tot integrale gebiedsontwikkeling te komen, om zo een mogelijk (toekomstig) conflict met de waterkering-beheerder te voorkomen of om een grotere ruimtelijke kwaliteit te realiseren.

Van de tweede categorie geven Klijn & Bos verscheidene voorbeelden. We verwijzen daarvoor naar het betreffende rapport.

De Bruijn & Klijn (2011) hebben het eerste argument verder verkend, en komen tot de conclusie dat doorbraakvrije dijken vooral effectief kunnen bijdragen aan het voorkomen van dodelijke slachtoffers. Weliswaar is de schade van overstromingen bij overlopende dijken ook minder dan bij doorbrekende, maar omdat overstromingsschade ook al optreedt bij ondiepe overstromingen, is de meerwaarde beperkt. Slachtofferisico's zijn echter ook sterk afhankelijk van de plotsheid van het gebeuren, de snelheid waarmee water zich door het gebied verspreidt, en de stijgsnelheid van het water. Deze auteurs schatten dat met circa 200 km doorbraakvrije dijk nabij risicovolle plekken het slachtofferisico in Nederland kan worden gehalveerd. Daar zou men dus bij voorkeur moeten beginnen als slachtofferisicoreductie het te bereiken maatschappelijk doel is.

Op deze gedachtenlijn is voortgebouwd in een studie met het Planbureau voor de Leefomgeving (Klijn et al., 2013; PBL, 2014). In die studie is maatschappelijke ontwrichting centraal gesteld, en is aannemelijk gemaakt dat een groot aantal slachtoffers tegelijkertijd algemeen als ontwrichtend wordt beschouwd. In de verkenning hoe een groot aantal slachtoffers kan worden voorkomen is er wederom ruim aandacht geweest voor 'doorbraakvrije' dijken. Er is geconcludeerd dat geleidelijk toewerken naar een situatie met enkele honderden kilometers

doorbraakvrije dijk (PBL, 2014), beginnend met de dijktrajecten waarachter de meeste slachtoffers te verwachten zijn, een belangrijke bijdrage kan leveren aan het voorkomen van toekomstige maatschappelijke ontwrichting. In dat verband geeft het rapport van Klijn et al. (2013) ook een lijst met dijktrajecten waar veel slachtoffers te verwachten zijn. Die biedt een aanknopingspunt voor prioritering.

Op 'de lijst' van meest voor de hand liggende trajecten om 'doorbraakvrij' te maken, staat ook het traject van dijkkring 44 dat in hoofdstuk 3 als casus is behandeld. Behalve vanuit het voorkomen van grote aantallen slachtoffers kan er echter ook reden zijn een dijk 'doorbraakvrij' te willen maken als deze een bovenregionale functie vervult. Van der Most & Klijn (2013) spreken in dat verband van 'systeemdijken', dijken die 'negatieve systeemwerking' (meer in het bijzonder: een domino-effect) moeten voorkomen. Een voorbeeld van zo'n dijk is de dijk langs de Boven-Rijn van dijkkring 48: casus nummer twee.

6.2 Wat levert het op en wat kost het?

Wat 'doorbraakvrije dijken' aan risicoreductie kunnen opleveren is in het voorafgaande al grotendeels beantwoord: een significant kleiner schaderisico en een veel kleiner slachtofferrisico. Daarnaast kunnen 'doorbraakvrije' dijken lager blijven dan conventionele, en bij toepassing van constructies kunnen ze ook relatief slank worden uitgevoerd; vanuit dat oogpunt kunnen ze beter worden ingepast in bestaande landschappen en/of stedelijke contexten en kan hun toepassing bijdragen aan een grotere ruimtelijke kwaliteit. Over dit laatste punt gaat het volgende hoofdstuk, daarom wordt hier alleen het *nut*sperspectief verder uitgewerkt.

In de studie met het PBL (Klijn et al., 2013) is vastgesteld dat een strategie met 'doorbraakvrije dijken' op trajecten met veel slachtoffers het groepsrisico in Nederland ruim kunnen halveren tegen ongeveer 2 miljard euro meerkosten ten opzichte van het eerste (1.0) voorstel van het Deltaprogramma Veiligheid (dat op circa 9 miljard euro werd geschat). Die strategie gaat uit van circa 565 km doorbraakvrij te maken dijken, op een totaal van circa 3000 km primaire waterkeringen in heel Nederland. De kosten van die strategie werden ruim 20% hoger geschat; het doelbereik ('bedoelde effect') is begroot op een ruim de helft kleiner slachtofferrisico en een bijna 20% kleiner schaderisico.

6.3 Implicaties voor crisisbeheersing en ruimtelijk beleid

Doordat doorbraakvrije dijken de instroomsnelheid beperken en tot een kleiner overstroomd oppervlak leiden met geringere waterdiepte, bieden ze perspectief voor een effectiever ruimtelijk beleid en doeltreffender crisisbeheersing.



Als water langzamer binnenstroomt is er meer tijd beschikbaar om mensen te evacueren. Ze kunnen ook zelf gedurende langere tijd het gebied verlaten, en omdat de waterdiepte niet snel toeneemt, is het langer mogelijk wegen te blijven gebruiken met daarvoor geschikte voertuigen (militaire bijvoorbeeld), omdat bij geringe waterdiepten goede oriëntatie langere tijd mogelijk is.

Het is bij langzame instroom voor de veiligheidsregio's en hulpdiensten mogelijk de evacuatie zo te plannen dat diegenen die het dichtst bij de dijk wonen en/of in een relatief laaggelegen deel van het dijkringgebied, het eerst worden geëvacueerd. Er is immers minder haast en geen reden voor paniek. De figuren in paragraaf 3.2 illustreren goed hoe dat in de tijd uitwerkt. En uit dezelfde figuren blijkt ook dat een groot deel van het gebied helemaal niet meer hoeft te worden geëvacueerd. Hoe minder mensen hoeven te worden geëvacueerd, des te effectiever zal de evacuatie zijn, omdat er geen/minder verkeersopstoppen zullen ontstaan.

Omdat het moment van instromen ook goed te voorspellen valt (er is immers geen sprake van een onverwachte plotselinge dijkbreuk, maar van een voorzienbare overloopsituatie), kunnen de meeste mensen tijdig het gebied hebben verlaten, zeker langs de grote rivieren waar hoogwaters zelden met zware storm gepaard gaan.

Voor het ruimtelijk beleid is relevant dat geringere waterdieptes perspectief bieden voor aangepast bouwen. Waar dat bij grote waterdieptes op praktische en economische bezwaren stuit, kan het bij geringe waterdieptes wel interessant zijn. Omdat het water zich bovendien minder wijd verspreidt, is er op een kleiner oppervlak aanleiding tot planologische beperkingen. Al met al betekent het dat de urgentie van planologische beperkingen kleiner is dan bij conventionele dijken het geval zou zijn.



Figuur 16 Een ‘doorbraakvrije’ dijk in de VS (New Orleans), waar bij het ontwerpen ruimtelijke kwaliteit geen issue is geweest



Figuur 17 En een archetypische dijk met relatief flauwe taluds in de zuidwesthoek van Friesland



7 Nog iets over inpasbaarheid en ruimtelijke kwaliteit

7.1 Dijken zijn meer dan waterkeringen

Het Nederlandse landschap is zeer divers en wordt door zowel buitenlandse toeristen als de eigen bewoners vaak hoog gewaardeerd. Met name de landschappen in het westen en noorden van het land ontleen hun karakter deels aan de dijken (zie Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, 2014). Dijken kunnen dan ook worden beschouwd als beeldbepalend en van cruciaal belang voor de grote waardering die sommige van onze landschappen ten deel valt door zowel buitenlandse toeristen als de eigen bewoners. De Beemster met z'n ringvaart en strakke verkaveling, het voormalig eiland Schokland in de Noordoostpolder, de Waterlinie Amsterdam (Stelling van Amsterdam) en de molens bij Kinderdijk die onlosmakelijk horen bij het stelsel van weteringen in de Alblasserwaard staan op de UNESCO-werelderfgoedlijst. Maar ook andere 'dijkenlandschappen' worden hooggewaardeerd: de Afsluitdijk, de Deltawerken, de IJsselmeerpolders, de Westfriese omringdijk en het landschap van de grote rivieren.

Omdat dijken dus mede het karakter van een aantal typische landschappen bepalen, is het essentieel die betekenis als landschapsvormend element te koesteren en waar mogelijk te versterken. De aanleg van nieuwe dijken en/of dijkverzwaring moet vanuit dat oogpunt als cultuurdaad worden beschouwd (Sijmons, 2012). Dat vraagt een zorgvuldige afweging en doorwrochte ontwerpen.

7.2 Implicaties van doorbraakvrije dijken in grond

Oplossingen in grond hebben meestal de voorkeur van de dijkbeheerder, omdat daarmee de grootste ervaring bestaat. Damwanden zouden in de loop der jaren buiten zicht kunnen roesten, maar grond wordt meestal alleen maar dichter gepakt en dus stabiel.

Om een dijk met grond doorbraakvrij te maken moet voor alle relevante faalmechanismen iets worden bedacht. Zoals in paragraaf 5.2 al is aangegeven gaat het daarbij om overslagbestendigheid, macrostabiliteit en het voorkomen van onderloopsheid. Het eerste vraagt een (zeer) flauw binnentalud, het tweede een zware berm en het derde een brede ondoorlatende berm. In alle gevallen leidt het tot het aanbrengen van veel grond en fors grotere voetafdrukken van de dijk. Dat heeft twee soorten gevolgen:

1. Een grotere voetafdruk/ ruimtebeslag
2. Een ander karakter van de dijk/ karakterverlies van het landschap

Afhankelijk van de ondergrond kunnen (steun)bermen nodig zijn van enkele meters tot wel 20 m breed. Volgens Silva & Van Velzen (2008) zou met gemiddeld 15 m brede steunbermen de kans op doorbraak door instabiliteit effectief kunnen worden verkleind. Om *piping* tegen te gaan zijn soms veel bredere bermen nodig, vooral waar zandbanen in de ondergrond aanwezig zijn. Daarvoor achtte het ENW (2010) bermbreedtes tot wel 40 m nodig, maar recentelijk worden nog veel grotere bermbreedtes genoemd. Het ligt voor de hand dan andersoortige maatregelen te nemen om *piping* te voorkomen.

Klijn & Bos (2010) hebben geprobeerd een indruk te krijgen van het ruimtebeslag van maatregelen om dijken doorbraakvrij te maken op basis van schattingen van Silva & Van Velzen (2008), die vervolgens werden vermenigvuldigd met de dijk lengtes per gebiedstype en de voetafdruk van elke maatregel. Zij kwamen tot een ruimtebeslag van circa 140 ha bij zee-, meer- en estuariumdijken, en op een ruimtebeslag van ruim 3000 ha bij rivierdijken. Met de recente schattingen van benodigde bermbreedtes tegen *piping* kunnen deze getalswaarden als lage schatting worden beschouwd⁸. In hoeverre dit ruimtebeslag overigens 'behaalbaar' is, hangt natuurlijk af van het ruimtetekort in een bepaald deel van het land, maar ook van de vraag of de ruimte exclusief voor de waterkering is bedoeld, of dat medegebruik mogelijk is.

De mogelijke *karakterverandering* van de dijk en het dijklandschap wordt door Klijn & Bos (2010) als een belangrijker implicatie van doorbraakvrije dijken genoemd. Deze kan vooral worden verwacht in landelijk gebied, en veel minder in stedelijk gebied. Zee-, meer- en estuariumdijken in landelijk gebied zijn vaak al zwaar gedimensioneerd en hebben flauwe taluds. Daar zullen beloop ('planvorm') en profiel nauwelijks van karakter veranderen. Wel kan verandering van de bekleding het bestaande karakter aantasten. Maar er zijn ook smalle en steile meer- en estuariumdijken in landelijk gebied, waarvan het karakter wel kan worden aangetast. Dat is bijvoorbeeld het geval langs de Noord-Hollandse IJsselmeer- en Markermeerkust, en langs de afgesloten deltawateren. In het rivierengebied zijn dijken vaak beeldbepalend en is aantasting van het karakter van het landschap verre van denkbeeldig. Eerdere dijkverzwaringen hebben grote invloed gehad op het landschap door aanpassingen van het beloop (bochtafsnijdingen, soms met aantasting van wielen; verdubbelingen) en het profiel (verflauwing, trappen, bermen, e.d.).

Klijn & Bos (2011) concluderen dan ook dat het doorbraakvrij maken van dijken met grond vooral in landelijk gebied kan leiden tot *nivellering* van de bestaande landschapsdiversiteit. In stedelijk gebied wordt het karakter van het stadslandschap slechts zelden door de dijken bepaald. Wel is daar ruimtetekort, en dat is des te klemmender in bestaande – behoudenswaardige – situaties.

⁸ Dat maakt de vraag of *piping* niet beter met constructieve oplossingen kan worden bestreden des te urgenter.



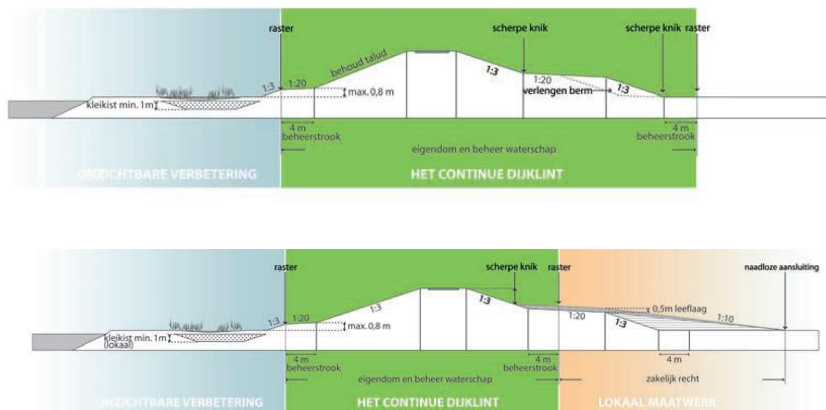
7.3 Dijken als ontwerpogave

Voor de studie van Klijn & Bos (2010) zijn ook ontwerpessies met landschapsarchitectenbureaus georganiseerd. De idee daarachter was dat daaruit mogelijk concrete richtlijnen voor goed dijkontwerp zouden kunnen worden afgeleid. Dat bleek lastiger dan gedacht, vooral door de grote diversiteit aan dijktypen en de vele verschillende contexten waarin deze een rol spelen. Het rapport 'Dankzij de dijken' (Robbert de Koning, 2002) schetst die diversiteit voor het benedenrivierengebied. Tegen die achtergrond pleitten Klijn & Bos er vooral voor de versterking van dijken of de aanleg van nieuwe dijken als landschapsontwerpopgave te beschouwen.

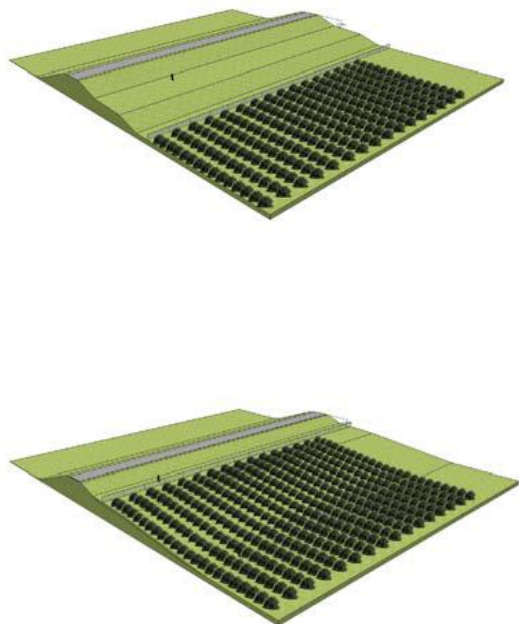
Met de betrokken landschapsarchitecten concludeerden Klijn & Bos (2010) dat het maken van een (dijk)ontwerp gebiedspecifiek maatwerk is. En dat dat inherent strijdig is met het streven naar generieke – algemeen geldende – ontwerpprincipes. In plaats van op algemeen geldige ontwerpprincipes zou het ontwerp moeten worden gebaseerd op een gedegen onderzoek naar de ontstaansgeschiedenis en het huidige karakter van het landschap, identificatie van de kernkwaliteiten daarvan, en eventueel daarvan afgeleide gebiedspecifieke ontwerpprincipes. Klijn & Bos (2010) beperken zich dan ook tot slechts enkele inhoudelijke aanbevelingen. We parafraseren de belangrijkste:

- Om het landschap leesbaar te houden is continuïteit in ruimte en tijd belangrijk. Bij het ontwerpen vraagt de spanning tussen incident en de continue lijn terdege aandacht.
- Vanuit landschappelijk oogpunt is het dwarsprofiel van een dijk heel belangrijk.
 - steunbermen vormen vaak een vreemd aanhangsel aan een dijk. Bij steunbermen is continuïteit een belangrijk aandachtspunt.
 - door flauwere taluds kunnen dijken verworden tot non-descripte 'ribbels' in het landschap. Vanuit cultuurhistorisch perspectief is dat niet wenselijk, maar vanuit functioneel oogpunt is het niet onlogisch.
- Waar dijken karakterbepalend zijn voor het landschapsbeeld is het belangrijk de dijk als beeldbepalend element herkenbaar te houden en aldus de leesbaarheid van het landschap te handhaven.
- Gecamoufleerde dijken zijn alleen acceptabel waar dijken niet beeldbepalend zijn, zoals de 'dijk in duin' bij Noordwijk. Ook waterkeringen in stedelijk gebied zijn zelden beeldbepalend. In alle andere gevallen zou naar een herkenbare en functioneel logische vorm gestreefd moeten worden.

Terugkomend op de algemene aanbeveling van Klijn & Bos om dijken toch vooral als ontwerpogave te beschouwen en het ontwerp te baseren op een gedegen landschapsonderzoek, noemen we het '*Handboek ruimtelijke kwaliteit dijkverbetering Hagestein – Opheusden*' van H+N+S (2013) als een schoolvoorbeeld van zo'n aanpak. Dat fundeert namelijk een visie, een beeldkwaliteitsplan en een landschapsplan op een gedegen onderzoek naar de ontstaansgeschiedenis en huidige landschapskwaliteiten van het dijkenlandschap langs de Nederrijn en Lek. Het mondt concreet uit in bijvoorbeeld twee basisprofielen voor dijken in twee verschillende landschappelijke contexten (Figuur 18) en in een voorstel de dijk langs de Lek nadrukkelijk als los landschapselement vorm te geven, maar deze in het oeverwallenlandschap bovenstrooms van Fort Everdingen geleidelijk in het landschap te laten overgaan (Figuur 19). Dat laatste lijkt een breuk met het adagium de dijk als zelfstandig object te benadrukken, maar het sluit daarentegen naadloos aan bij de specifieke landschappelijke context ter plekke.



Figuur 18 Basisprofielen dijkverbeteringstrajecten Hagestein - Fort Everdingen (boven), respectievelijk Fort Everdingen – Opheusden (onder) (H+N+S, 2013)



Figuur 19 Impressie van een dijk met steunberm zonder leeflaag (boven: de dijk oogt zeer breed), respectievelijk van een dijk met steunberm met een leeflaag (onder: het aangrenzende landgebruik (hier een boomgaard) wordt voortgezet op de berm en de dijk behoudt zijn kwaliteit als smal lint door het landschap) (H+N+S, 2013).



8 De bevindingen op een rijtje en enkele aanbevelingen

8.1 Begrippen en algemene principes

- Praktisch 'doorbraakvrije' dijken zijn dijken die keren tot de kruin en ook bij grote hoeveelheden overslag en/of overloop niet bezwijken. Zulke dijken hoeven niet zo hoog te zijn, maar ze moeten wel heel sterk zijn, want er mag geen bres in ontstaan als er water overheen loopt, of pas na heel lange tijd.
- Als de dijk niet doorbreekt, maar alleen overloopt, loopt er alleen water het gebied in gedurende de tijd dat het buitenwater hoger staat dan de dijk.
- Door de kortere instroomduur komt er minder water in het gebied, zodat er een kleiner areaal overstroomt en/of het minder diep wordt.
- Vaak wordt verondersteld dat het 'doorbraakvrij' maken van dijken heel veel extra geld kost, maar dat beeld komt voort uit de veronderstelling dat een 'doorbraakvrije' dijk een hele brede zware en hoge dijk is, waar ook eigenlijk nooit water overheen slaat of loopt. Maar een dijk die overloopt kan ook 'doorbraakvrij' zijn. Een 'doorbraakvrije dijk' hoeft dus niet altijd hoger te zijn dan de bestaande dijk, en kan soms zelfs lager.
- Voor de vraag hoe dijken doorbraakvrij kunnen worden gemaakt, is het van belang van te voren functionele eisen te stellen. Die zouden in ieder geval moeten inhouden dat falen van onderdelen toelaatbaar is, maar bezwijken van het dijklichaam niet; en dat het faalgedrag zo taai mogelijk zou moeten zijn.
- De kosten van het 'doorbraakvrij' maken van een dijk hangen ten eerste af van de vraag welke faalmechanismen precies onder controle moeten worden gebracht, en ten tweede van de vraag of met grond of constructies wordt gewerkt.
- Om aan de vooraf gestelde functionele eisen te voldoen is het doorbraakvrij maken met grond in theorie het goedkoopst. Maar oplossingen in grond vragen de meeste ruimte en als die ruimte er niet is (bijvoorbeeld door bebouwing), wordt een oplossing in grond alsnog heel duur.
- De smalste en duurste 'verborgen' oplossing is constructief: de dubbele damwand (kistdam), die alle faalmechanismen in een keer onder

controle kan brengen, en tevens een heel smalle en steile dijk mogelijk maakt.

- Waar de kosten van 'doorbraakvrije' dijken groter zijn, zijn de baten dat ook: een significant lager schaderisico en een veel kleiner slachtofferisico. Daardoor ligt de 'economisch optimale overstromingskans' (in termen van dijkhoogte) ook bij een lagere waterstand dan bij een conventionele dijk (Figuur 1), tot naar schatting een decimeringshoogte lager.
- Met andere woorden: een 'doorbraakvrije' dijk kan lager, omdat de bezwijkkans veel kleiner is; en zou vanuit economisch perspectief ook lager moeten, omdat deze nu eenmaal duurder is.

8.2 Concrete resultaten uit de casussen

- In de casus Kromme-Rijngebied is vastgesteld dat de veelvuldig gebruikte methode om de instroomhoeveelheid af te leiden uit een 'overloopdebiet per m dijklengthe' tot onaanvaardbare overschattingen kan leiden: er stroomt dan meer water het gebied in dan er door de rivier gaat. Daarom is in deze casus met 'takjes en stuwtjes' gerekend.
- Bij simulatie van een dijkdoorbraak bij Amerongen stroomt vrijwel het gehele dijkkringgebied onder, en komt er ook een aanzienlijke hoeveelheid water in aangrenzende dijkkringen (Centraal Holland en Lopiker- en Krimpenerwaard) terecht. In totaal stroomt bij een dijkdoorbraak meer dan 1 miljard m^3 water het gebied in.
- Bij een 'doorbraakvrije' dijk langs de Nederrijn-Lek die over 7 km lengte 20 cm lager is dan de hoogste waterstand op de rivier (zonder 'overlaat') stroomt 30 miljoen m^3 water het gebied in. De maximale instroom per m dijklengthe is 80 l/s, aan het begin van het verlaagde traject.
- Het verschil in overstroimd oppervlak in het geval van een bres en bij een overstroombare dijk is erg groot, evenals de bereikte waterdieptes. Bij een overstroombare standzekere dijk blijft de overstroming beperkt tot de lagere delen in het zuiden van de dijkkring (Figuur 3).
- Bij de doorbraakvrije dijk duurt het lang voordat het water zich door het gebied verspreidt (Figuur 4). Het komt pas na 3 dagen tot overstroming in Utrecht, waar het water via de Kromme Rijn preferent heen kan stromen, en Bunnik wordt (over land) pas na 4 dagen bereikt.



- Het is onwaarschijnlijk dat er bij zulke langzame instroom nog 20- 90 verdrinkingsgevallen te verwachten zijn, zoals het standaard schade- en slachtoffermodel berekent. Dat model schiet hier tekort, doordat het onvoldoende rekening houdt met de aankomsttijd van het water.
- Een indicatieve kosten-batenbeschouwing voor beide casussen (Kromme-Rijngebied en Rijn en IJssel) wijst uit dat met een conventionele dijk een 10 keer hoger beschermingsniveau dan het huidige economisch verantwoord is⁹.
- Zo'n zelfde beschouwing voor een doorbraakvrije dijk wijst uit dat die a) rendabel is als ie niet hoger wordt gemaakt dan de huidige maatgevende waterstand, dan b) dezelfde economische risicoreductie oplevert als '10 keer veiliger', en c) tevens het slachtoffer risico tot vrijwel 0 reduceert.
- De rekenvoorbeelden voor zowel het Kromme-Rijngebied als Rijn en IJssel leren ons dat lagere 'doorbraakvrije' dijken hier ongeveer net zo rendabel zijn als hogere conventionele. De kosten lopen niet ver uiteen (maximaal 25%) en de gerealiseerde risicoreductie ook niet. Omdat de voorspelbaarheid van falen en het faalgedrag echter sterk verschillen, is de kernvraag welk maatschappelijk doel wordt nagestreefd: staat slachtoffer risico's reduceren en domino-effecten voorkomen centraal of '*highest return on investment*'?

8.3 Generieke bevindingen over het perspectief

- Doorbraakvrije dijken zouden *moeten* worden toegepast waar ze een significante meerwaarde hebben bij het verkleinen van overstromingsrisico's (nutsoverwegingen), en zouden *kunnen* worden toegepast waar een gewenste ontwikkeling vanuit ander perspectief op, aan of nabij een dijk aanleiding is om tot integrale gebiedsontwikkeling te komen (voorkomen mogelijk conflict met de waterkeringbeheerder).
- Met het Planbureau voor de Leefomgeving is aannemelijk gemaakt dat geleidelijk toewerken naar een situatie met enkele honderden kilometers 'doorbraakvrije dijk' een belangrijke bijdrage kan leveren aan het

⁹ Deze grove analyse is niet vergelijkbaar met die in het Deltaprogramma Veiligheid, waarin een veel geavanceerdere kosten-batenanalyse is uitgevoerd en correcties voor economische groei in het afgelopen decennium en voor de jaren tot 2050 zijn toegepast.

voorkomen van maatschappelijke ontwrichting door grote aantallen slachtoffers. Een lijst met dijktrajecten waar bij doorbraak veel slachtoffers te verwachten zijn biedt in deze een aanknopingspunt voor prioritering.

- Behalve vanuit het voorkomen van grote aantallen slachtoffers kan er ook reden zijn een dijk 'doorbraakvrij' te willen maken als deze een bovenregionale functie vervult, of meer in het bijzonder: een domino-effect moeten voorkomen. Een voorbeeld van zo'n 'systeemdijk' is de dijk langs de Boven-Rijn van dijkkring 48.
- Doordat 'doorbraakvrije' dijken de instroomsnelheid beperken en tot een kleiner overstroomd oppervlak leiden met geringere waterdiepte, bieden ze perspectief voor een effectiever ruimtelijk beleid en doeltreffender crisisbeheersing.
- Omdat er minder onderloopt, kunnen planologische beperkingen beperkt blijven tot een kleiner oppervlak. En omdat het minder diep wordt is aangepast bouwen makkelijker en mogelijk kosten-effectiever.
- Voor de crisisbeheersing geldt dat er geen reden voor paniek is en minder haast. Een groot deel van het gebied hoeft helemaal niet meer te worden geëvacueerd.
- Als dijken met grond 'doorbraakvrij' worden gemaakt, zijn vaak een flauw binnentalud, en een zware en/of een brede ondoorlatende berm nodig. Dit levert fors grotere voetafdrukken van de dijk op, en dus een groot ruimtebeslag en mogelijk karakterverlies van het landschap.
- Daarom moet de versterking van dijken worden beschouwd als landschapsonteropgave, waarbij het ontwerp moeten worden gebaseerd op een gedegen onderzoek naar de ontstaansgeschiedenis en het huidige karakter van het landschap, identificatie van de kernkwaliteiten daarvan, en daarvan afgeleide ontwerpprincipes.
- Op zo'n landschapsonderzoek kunnen een visie, een beeldkwaliteitsplan en een landschapsplan worden gefundeerd.
- Bij het ontwerpen van 'doorbraakvrije dijken' is een belangrijke taak weggelegd voor landschapsarchitecten om in samenwerking met kundige civiel-ingenieurs tot aantrekkelijke oplossingen te komen. Zo kan een overslagbestendige dijk nopen tot heroverweging van ontwerpprincipes zoals die door landschapsarchitecten tot nu toe werden gebezigd, zoals een steile bovenkant en scherpe knikken. In plaats daarvan zou misschien eens ontworpen moeten worden aan geleidelijke overgangen (vooral onderaan).



9 Literatuur

De Bruijn, K.M. (2009). Verkenning schade, slachtoffers en slachtofferrisico's voor dijkkring 48.

De Bruijn, K.M. & F. Klijn (2011). *Deltadijken: locaties waar deze het meest effectief slachtofferrisico's reduceren*. Deltares-rapport 1202628, Delft.

De Bruijn, K.M., F. Diermanse & H. van der Most (2013). *Groepsrisico's door overstromingen in Nederland. Samenvatting methode, resultaten en betekenis voor de normeringsdiscussie van de waterkeringen*. Deltares-rapport 1207830-003, Delft.

De Bruijn, K.M., F. Klijn & J.G. Knoeff (2013a). Unbreachable embankments? In pursuit of the most effective stretches for reducing fatality risk. Pages 901-908 in: Klijn, F. & T. Schweckendiek (eds). (2013). *Comprehensive flood risk management. Research for policy and practice*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK. ISBN 978-0-415-62144-1.

De Bruijn, K.M. et al. (2013b). *Combined probabilistic and physical tool to assess societal flood risks*. Deltares, Delft.

De Bruin, K.M. & K. Slager (2014). *Mortality functions in the flood impact module. Sensitivity analysis and discussion*. Deltares-rapport 1207814-005, Delft.

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

De Koning (Robbert) (2002). *Dankzij de Dijken. Fase 1: en waarnemingsstudie over dijken in het benedenrivierengebied*. Robbert de Koning landschapsarchitect BNT/Rijkswaterstaat RIZA, Oosterbeek/ Lelystad.

Deltaprogramma Veiligheid (2013). *Op weg naar nieuwe normen: een technisch inhoudelijke uitwerking. Hoofdrapport (versie 1.0 van 6 september 2013) en addendum over analyse van consequenties (versie 1.0 van 30 september 2013)*. Werkdocument Deelprogramma Veiligheid.

Deltaprogramma Veiligheid (2014). *Technisch inhoudelijke uitwerking van eisen aan primaire keringen (DPV 2.2). Hoofdrapport*. Werkdocument Deelprogramma Veiligheid.

Ellen, G. J., M. Boers, H. Knoeff, H. Schelfhout, E. Tromp, F. van den Berg, H. Borgers & J. Rengers (2011). *Multifunctioneel medegebruik van de waterkering*;

beantwoording signaleringsvraag #5 van de Deltacommissaris. Deltares-rapport 1204871-000

H+N+S (2013). *Handboek ruimtelijke kwaliteit dijkverbetering Hagestein – Opheusden. Visie, Beeldkwaliteitsplan, Landschapsplan, Borging*. H+N+S landschapsarchitecten (i.s.m. Abe Veenstra en Geert de Vries, Infram), Amersfoort.

Klijn, F. & M. Bos (2010). *Deltadijken: ruimtelijke implicaties. Effecten en kansen van het doorbraakvrij maken van primaire waterkeringen*. Deltares-rapport 1201353, Utrecht.

Klijn, F., B. Kolen, J. Knoop, D. Wagenaar, K. de Bruijn, L. Bouwer (2013). *Maatschappelijke ontwrichting door overstromingen voorkomen? Verkenning van groepsrisico als normatieve grondslag en beïnvloedingsmogelijkheden*. Deltares-rapport 1208052, Delft.

Knoeff, J. & G. J. Ellen (2011). *Verkenning deltadijken*. Deltares-rapport 1205259-000

Lammersen, R. (2004). Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Nederrijn. Eindrapport, Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater ISBN 9036956390.

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

PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2014). *Kleine kansen – grote gevolgen. Slachtoffers en maatschappelijke ontwrichting als focus voor het waterveiligheidsbeleid*. PBL-publicatie 1031, Bilthoven.

Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (2014). *Een toekomst voor dijken*. Brochure.

Silva, W. & E. van Velzen (red., 2008). *De dijk van de toekomst? Quick-scan doorbraakvrije dijken*. Rapport RWS-Waterdienst 2008.052/ Deltares-rapport Q4558.32

Sijmons, D. (2012). *Kwaliteit is geen luxe. Een essay in vijftien oude en nieuwe spreekwoorden*. In: Jaarverslag Q-team Ruimte voor de Rivier 2009-2011, Utrecht.

Tettero, M. (2013). *A breakthrough with multifunctional unbreachable dykes. A case study analysis to enable implementation of multifunctional unbreachable dykes to increase cost-effectiveness of Dutch flood protection*. MSc-thesis, Vrije Universiteit Amsterdam.



Tettero, M., G.J. Ellen & F. Klijn (2014). Multifunctionele doorbraakvrije dijken: een kwestie van willen of van kunnen? *H₂O*, in druk.

Tromp, E., H. van den Berg, J. Rengers & E. Pelders (2012). *Multifunctionele Waterkeringen: onderzoek naar de mogelijkheden voor flexibel gebruik van de waterkering*. Deltares-rapport 1205973-007

Van de Pas, B., K. Slager, K.M. de Bruijn & F. Klijn (2012). *Overstromingsrisicozonering. Fase 1 en 2: Het identificeren van overstromingsgevaarzones*. Deltares-rapport 1205160, Delft.

Van der Most, H. & F. Klijn (2013). *De werking van het waterkeringsysteem: de dijkkring voorbij? Naar een doelmatiger inrichting op basis van risicobenadering en systeemanalyse*. Deltares-rapport 1206262-015, Delft. 56 pp.





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

Contactinformatie

Programmabureau Kennis voor Klimaat

Secretariaat:

p/a Universiteit Utrecht

Postbus 85337

3508 AH Utrecht

T +31 88 335 7881

E office@kennisvoorklimaat.nl

Communicatie:

p/a Alterra, Wageningen UR

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T +31 317 48 6540

E info@kennisvoorklimaat.nl

www.kennisvoorklimaat.nl

