

Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat**

Effectiviteit Rijnstrangen

eindrapport



Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat**

Effectiviteit Rijnstrangen

eindrapport



Auteurs

Joost Pol
Hermjan Barneveld
Roy Daggenvoorde
Geerten Horn
Andries Paarlberg

Samenvatting

Inleiding

In het Deltaprogramma is de maatregel Rijnstrangen gefaseerd voor de periode 2050-2100, en wordt ingezet vanaf een afvoer van 17.500 m³/s. Dit inzetniveau is gericht op het reduceren van waterstanden bij de maatgevende afvoer. De vraag is of dit nog een effectieve strategie is in het licht van de nieuwe overstromingskansnormen. Dit rapport beschrijft de effectiviteit van verschillende inzetstrategieën van Rijnstrangen, in termen van overstromingsrisicoreductie en kostenbesparing op dijkversterkingen, waarbij rekening is gehouden met bovenstaande aspecten van de nieuwe normering en het bijbehorende Ontwerpinstrumentarium. In de aanpak is zoveel mogelijk aangesloten op de MKBA Lange Termijn Ambitie Rivieren.

Varianten

De inzetstrategieën verschillen met betrekking tot: (a) wel of geen actieve sturing, (b) de afvoer waarbij Rijnstrangen instroomt, (c) het jaar van realisatie en daaraan gekoppeld het inzetten ten behoeve van de verkleining van de huidige dijkversterkingsopgave of voor levensduurverlenging en dus uitstel van de volgende ronde dijkversterkingen.

Resultaten

Uit de analyses blijkt dat een actief gestuurde inlaat waarbij gebruik wordt gemaakt van hoogwatervoorspellingen een factor 5-10 effectiever is dan een variant met een vaste instroomdrempel (zie Tabel 1). In de berekeningen zonder onzekerheden zijn de contante baten (op dijkversterkingskosten en overstromingsrisico samen) van deze actief gestuurde variant in het meest gunstige geval ruim twee keer zo groot als de contante investeringskosten. Ook wanneer alleen de kostenreductie op dijken als baat wordt beschouwd, zijn de baten van deze variant hoger dan de contante kosten. De baten van de variant met vaste inlaat bedragen maximaal 30% van de kosten, als de drempel instroomt vanaf een afvoer van 12.000 m³/s. De vaste drempel blijkt veel minder effectief te zijn dan een gestuurde inlaat.

Bij welk inzetjaar de baten groter zijn dan de kosten, hangt er sterk vanaf of de risicobaten in de baten/kostenratio worden meegerekend. Als de risicobaten *wel* worden meegerekend, heeft zowel inzet van de gestuurde variant op korte termijn (2030) als op lange termijn (2070) een baten/kostenratio groter dan 1. Als de risicobaten *niet* worden meegerekend, heeft alleen inzet van de gestuurde variant op lange termijn (2070) een baten/kostenratio groter dan 1. Daarmee wordt een tweede dijkversterkingsronde uitgesteld. De sterkteopgave die de eerste versterkingsronde domineert is dan bij gelijkblijvende norm veel kleiner, zodat rivierverruiming in het algemeen effectiever wordt.

Uit de gevoeligheidsanalyses blijkt verder dat het effectief kan zijn om ook een gestuurde variant pas in te zetten bij hogere afvoeren, vanaf bijvoorbeeld 13.000 m³/s, zodat er minder frequent schade optreedt in het gebied.

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]	CW Kosten [mln euro]	Baten/ kosten ratio
Gestuurd, inzet in 2030	183	431	614	570	1,1
Gestuurd, inzet in	174	-182	-7	200	0,0

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]	CW Kosten [mln euro]	Baten/ kosten ratio
2050					
Gestuurd, inzet in 2070	148	42	189	80	2,4
Vast vanaf 12000, inzet in 2030	31	52	84	570	0,15
Vast vanaf 12000, inzet in 2050	28	-10	19	200	0,09
Vast vanaf 12000, inzet in 2070	18	8	26	80	0,32

Tabel 1 Samenvatting resultaten optimalisaties. Kosten en baten in contante waarde (CW) over de periode 2025-2125.

Onzekerheden

Deze inschatting van de baten moet worden beschouwd als een optimistische inschatting, omdat onzekerheden nog niet zijn gekwantificeerd. Eerdere studies wijzen uit, dat het effect van retentie altijd kleiner wordt als wel wordt gerekend met onzekerheden. Het is niet ondenkbaar dat de effectiviteit daardoor halveert. Als men Rijnstrangen wil inzetten voor het beperken van de waterveiligheidsopgave, is het essentieel om die onzekerheden te kwantificeren.

Aanbevelingen

Indien het gewenst is om Rijnstrangen als waterveiligheidsmaatregel te blijven beschouwen, adviseren we de volgende stappen: (1) onderzoeken hoe de kostenraming van Rijnstrangen aangescherpt kan worden op basis van nieuwe inzichten, (2) verder onderzoeken van de mogelijkheden van sturing op basis van voorspellingen, (3) onzekerheden rond de inzet van Rijnstrangen kwantitatief uitwerken en de baten daarmee bijstellen, (4) aanvullende gevoeligheidsanalyses uitvoeren.

Inhoud

Samenvatting	i
Lijst van tabellen	v
Lijst van figuren	vii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding tot het project	1
1.2 Doelstelling	2
1.3 Uitgangspunten	2
2 Methode	5
2.1 Aanpak op hoofdlijnen	5
2.2 Methode dijkversterkingskosten	5
2.3 Methode overstromingsrisico	8
3 Optimalisatie variant gestuurde inlaat	11
3.1 Methode	11
3.2 Resultaten optimalisatie: waterstandseffect	12
3.3 Resultaten optimalisatie: kostenreductie en risicoreductie	13
4 Optimalisatie variant vaste inlaat	19
4.1 Methode	19
4.2 Resultaten optimalisatie: waterstandseffect	20
4.3 Resultaten optimalisatie: kostenreductie en risicoreductie	21
5 Gevoeligheidsanalyses	25
5.1 Effect bij ander pakket rivierverruiming	25
5.2 Halveren opgave piping en macrostabiliteit	26
5.3 Gestuurde inlaat pas inzetten bij hoge afvoeren	26
5.4 Halveren waterstandseffect	27
5.5 Inzetten t.b.v. verlenging levensduur dijken	27
6 Onzekerheden en aandachtspunten	29
6.1 Onzekerheden in het hydraulisch effect	29
6.1.1 Waterstanden (o.a. door ruwheid, bodemligging)	29
6.1.2 Golfvorm	30
6.1.3 Type inlaat	30
6.1.4 Invloed op afvoercapaciteit Duitsland	31
6.1.5 Uitwerking onzekerheden	32
6.2 Sturing op basis van voorspellingen	33
6.2.1 Aanzet voor uitwerking gestuurde variant	33
6.2.2 Leegloopduur	34
6.3 Onzekerheid in berekende kostenreductie en risicoreductie	35
6.4 Kosten van maatregel Rijnstrangen	35
7 Conclusies en aanbevelingen	39
7.1 Conclusies	39

7.2	Aanbevelingen	41
8	Referenties	43
	Bijlage A: Correctie van faalkansen RivierenTool.....	47
	Bijlage B: Resultaten referentie RivierenTool	51
	Bijlage C: Toelichting waterstandseffect gestuurde variant.....	55

Lijst van tabellen

Tabel 1	Samenvatting resultaten optimalisaties. Kosten en baten in contante waarde (CW) over de periode 2025-2125.	ii
Tabel 2	Optimale inzetniveaus per afvoer	12
Tabel 3	Contante waarde kostenreductie en risicoreductie bij optimale gestuurde inlaat. Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.	13
Tabel 4	Optimalisatie inzetniveau variant met vaste drempel	20
Tabel 5	Resultaten optimalisatie inzetniveau variant met vaste drempel. Bedragen in mln euro, gesommeerde contante waarde over de gehele rekenperiode.	22
Tabel 6	Contante waarde kostenreductie en risicoreductie bij optimale vaste inlaat (vanaf 14.000 m ³ /s). Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.	22
Tabel 7	Kenmerken trajecten 43-4 en 52-2	25
Tabel 8	Resultaten gevoeligheidsanalyse referentiepakket rivierverruiming (contante waarde)	26
Tabel 9	Resultaten gevoeligheidsanalyse piping en macrostabiliteit (contante waarde)	26
Tabel 10	Resultaten gevoeligheidsanalyse inzetniveau gestuurde variant (contante waarde)	27
Tabel 11	Resultaten gevoeligheidsanalyse onzekerheid in waterstandseffect	27
Tabel 12	Resultaten gevoeligheidsanalyse levensduurverlenging	28
Tabel 13	Samenvatting resultaten optimalisaties. Kosten en baten in contante waarde (CW) over de periode 2025-2125.	39
Tabel 14	Voorbeeld faalkanscorrectie piping bij dijkvak 38001029	49
Tabel 15	Contante waarde dijkversterkingskosten en overstromingsrisico in referentie. Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.	53

Lijst van figuren

Figuur 1	Ligging van Rijnstrangen: inlaat bij Spijk, uitlaat bij Kandia.....	1
Figuur 2	Effect van het wel (paars) of niet (blauw) rekening houden met de inzet van een rivierverruimende maatregel in 2060 bij het versterken van een dijk. In het eerste geval (paarse lijn) wordt de dijk minder versterkt en na 50 jaar afgekeurd. In het tweede geval (blauwe lijn) wordt de afkeuring uitgesteld door de tussentijdse aanleg van de rivierverruiming in combinatie met een initieel grotere dijkversterking, en voldoet de dijk dus langer dan 50 jaar aan de norm.	7
Figuur 3	Fictief voorbeeld van de verandering van de faalkansen van een dijkvak bij inzet van Rijnstrangen op verschillende momenten.	10
Figuur 4	Voorbeeld van te laag inzetniveau (rood) en optimaal inzetniveau (blauw). Zwarte lijn is de 18.000 m ³ /s afvoergolf zonder inzet van Rijnstrangen.....	11
Figuur 5	Waterstandseffect bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.....	12
Figuur 6	Indeling van dijktrajecten bij drie riviertakken (stippellijn)	14
Figuur 7	Fictief voorbeeld van de verandering van de faalkansen bij inzet op verschillende momenten.	15
Figuur 8	Ruimtelijke verdeling reductie hoogteopgave bij inzet gestuurde variant in 2070	16
Figuur 9	Ruimtelijke verdeling contante kostenreductie bij inzet gestuurde variant in 2070.....	16
Figuur 10	Histogram van uitstel 2e versterkingsronde door gestuurde variant 207.....	17
Figuur 11	Optimale werking vaste variant, instroom vanaf 14.000 m ³ /s. De waterstand in Rijnstrangen (linker figuur) gaat naar 15 m+NAP bij een 18.000 m ³ /s afvoergolf. De afvoer net na de inlaat (rechter figuur) wordt gelijkmatig gereduceerd.	19
Figuur 12	Waterstandseffect riviertakken bij vaste variant, instroom vanaf 14.000 m ³ /s.	21
Figuur 13	Waterstandseffect Waal per inzetniveau van de vaste variant.	21
Figuur 14	Ruimtelijke verdeling reductie hoogteopgave bij inzet variant met vaste inlaat vanaf 12.000 m ³ /s in 2070	23
Figuur 15	Ruimtelijke verdeling kostenreductie bij inzet variant vaste inlaat vanaf 12.000 m ³ /s in 2070	24
Figuur 16	Fictief voorbeeld van de invloed van onzekerheid in de waterstand op het effect van retentie.....	29
Figuur 17	Fictief voorbeeld van de invloed van onzekerheid in de golfvorm op het effect van retentie.....	30
Figuur 18	Effect verschillende typen inlaten op afvoergolf.....	31
Figuur 19	Effect verschillende typen inlaten op afvoergolf, bij lagere (links) of hogere (rechts) afvoeren dan waar op is geoptimaliseerd.	31
Figuur 20	Onzekerheid in afvoervoorspelling, gebaseerd op ensemble voorspellingen van verschillende modellen en parameters (Reggiani et al., 2009).	33
Figuur 21	Afvoeren en waterstanden op verschillende punten in het Pannerdensch Kanaal en Rijnstrangen tijdens het openen van het uitlaatwerk.	35
Figuur 22	Correctie van pipingopgave in Kostenreductie Studie (Rivierentool) en correctie pipingfaalkansen in dit project	47
Figuur 23	Faalkansverloop van dijkvak 38001029, inclusief correctie van faalkansen.	50
Figuur 24	Faalkansverloop van dijkvak 38001029, inclusief correctie van faalkansen, met inzet van rivierverruiming.	50
Figuur 25	Opgave hoogte tot 2075, Referentie incl. Dijken+	51
Figuur 26	Opgave piping tot 2075, Referentie incl. Dijken+	51
Figuur 27	Opgave macrostabiliteit tot 2075, Referentie incl. Dijken+	52
Figuur 28	Dijkversterkingskosten per km, Referentie incl. Dijken+	52
Figuur 29	Jaar eerste versterking, Referentie incl. Dijken+ (planning waterschappen, behalve op de Nederrijn-Lek).....	53

Figuur 30	Waterstandseffect (QdH relaties) bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.	56
Figuur 31	Reductie in piekafvoer op verschillende takken bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.	56
Figuur 32	Toppen van verschillende afvoergolven, waarbij de piekafvoer op 18.000 is gelegd.	57
Figuur 33	Helling van de QH relatie op het begin van de Waal.	57
Figuur 34	QH relatie Nederrijn bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).	58
Figuur 35	QH relatie IJssel bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).	58
Figuur 36	QH relatie Waal en Pannerdensch Kanaal bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).	59

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het project

Rijkswaterstaat heeft HKV gevraagd een nader onderzoek uit te voeren naar de effectiviteit van retentiegebied Rijnstrangen. In het Deltaprogramma is de maatregel Rijnstrangen gefaseerd voor de periode 2050-2100, en wordt ingezet vanaf een afvoer van 17.500 m³/s. Dit inzetniveau is gebaseerd op de oude overschrijdingskansnormen, en gericht op het reduceren van waterstanden bij de maatgevende afvoer.

De vraag is of dit nog een effectieve strategie is in het licht van de nieuwe overstromingskansnormen en nieuwe inzichten in bijvoorbeeld de opgave met betrekking tot geotechnische faalmechanismen of nieuwe afvoerstatistiek uit GRADE. De nieuwe normen brengen namelijk verschillen in beschermingsniveau met zich mee, waardoor er geen maatgevende afvoer meer is waarop de maatregel kan worden ontworpen. Falen door geotechnische faalmechanismen treedt al bij lagere afvoeren op, waardoor inzet bij lagere afvoeren effectiever zou kunnen zijn dan inzet enkel bij extreme afvoeren.

Daarnaast blijkt uit recente MKBA-analyses van rivierverruimende maatregelen dat de fasering van maatregelen grote invloed heeft op de kosten/batenverhouding.

Dit rapport beschrijft de effectiviteit van verschillende inzetstrategieën van Rijnstrangen, in termen van overstromingsrisicoreductie en kostenbesparing op dijkversterkingen, waarbij rekening is gehouden met bovenstaande aspecten van de nieuwe normering en het bijbehorende Ontwerpinstrumentarium.



Figuur 1 Ligging van Rijnstrangen: inlaat bij Spijk, uitlaat bij Kandia.

1.2 Doelstelling

De vraag naar de effectiviteit van Rijnstrangen kan worden weergegeven in drie hoofdvragen:

1. Voor welke norm/afvoer kan Rijnstrangen het meest effectief worden ingezet?
2. Wat is het meest effectief: Rijnstrangen inzetten op korte termijn (voor 2050) om de huidige versterkingsopgave te beperken, of inzetten op lange termijn (na 2050) om de tweede versterkingsronde uit te stellen?
3. Wat levert inzet op in termen van risicoreductie en kostenbesparing op dijkversterking?
4. Wat is het verschil in kosten en baten tussen een variant met vaste inlaat en een variant met sturing op voorspellingen?

Het doel van dit onderzoek is om een antwoord te formuleren op deze vragen, waarmee een keuze om Rijnstrangen eventueel verder te onderzoeken, in bijvoorbeeld de Lange Termijn Ambitie Rivieren, kan worden onderbouwd.

1.3 Uitgangspunten

Varianten

Er zijn twee hoofdvarianten onderzocht:

1. een variant uitgaande van sturing op basis van voorspellingen;
2. een variant met een vaste instroomdrempel (waarbij drie drempelhoogtes zijn beschouwd).

Per hoofdvariant is ook gevarieerd naar het moment waarop de maatregel wordt ingezet of gerealiseerd (2030, 2050, 2070). Daarbij wordt het effect van Rijnstrangen bij de inzetjaren 2030 en 2050 in mindering gebracht op de omvang van de dijkversterkingsopgave van de 1^e dijkversterkingsronde, ook als de dijkversterking al eerder wordt uitgevoerd dan Rijnstrangen. Bij het inzetjaar 2070 wordt het effect juist ingezet voor uitstel van de 2^e versterkingsronde. Tijdens de 1^e versterkingsronde wordt dan versterkt uitgaande van de belastingen zonder Rijnstrangen, maar doordat Rijnstrangen tijdens de ontwerplevensduur wordt gerealiseerd, blijft de dijk langer aan de norm voldoen en wordt de levensduur verlengd. Er is dus een verschil in methode tussen de inzetjaren 2030/2050 enerzijds en 2070 anderzijds.

Hydraulische berekeningen

- WAQUA model referentie: gebaseerd op het dmref12_5-v1 model zonder actualisatie van Bypass Kampen. CSO (2013) heeft het gebied Rijnstrangen daarin toegevoegd met een gestuurde inlaat. Verdere aanpassingen aan het model van CSO staan beschreven in HKV (2015).
- Inlaat van Rijnstrangen is in het model opgenomen als barriër. Bij de variant met vaste inlaat is de barriër vastgezet. In de gestuurde variant wordt een sturingsprogramma gebruikt om de maximale afvoer in de rivier zo lang mogelijk vast te houden.
- Pannerdensche Overlaat met vaste drempel van 13,75 m+NAP zonder Rijnstrangen en 13,59 m+NAP met Rijnstrangen (HKV, 2015). Hondsbroekse Pleij conform dmref12_5_v1.
- Uitgangspunt: maximale waterstand in Rijnstrangen is 15m+NAP (geen verhoging dijken gewenst).
- WAQUA berekeningen met standaardafvoergolven.

Berekeningen dijkversterkingskosten

De dijkversterkingskosten langs de Rijntakken zijn berekend met de Rivierentool (De Grave et al, 2017), versie 1.2 (juli 2017). De default instellingen uit die versie zijn gebruikt, behalve:

- Rekenperiode 2025-2125 (conform MKBA LT Ambitie Rivieren).
- Planning dijkversterkingen Waal en IJssel aanhouden zoals door waterschappen aangegeven (conform MKBA LT Ambitie Rivieren, zie Figuur 29).
- Dijkversterkingen Nederrijn-Lek zodra faalkans groter is dan de norm.
- Databases uitgebreid met de Nederrijn-Lek (let op: hiervoor is een *conceptversie* van de fragility curves gebruikt).
- Stapgrootte dijkverhoging (*dH_stap*) is verkleind naar 1 cm.
- Discretisatiestap afvoeren (*Qdisc_stap*) is verkleind naar 100 m³/s.
- Bij het scenario 'inzet in 2070' brengen we de effecten van Rijnstrangen niet in mindering op de eerste ronde dijkversterkingen, maar zorgt inzet voor uitstel van de tweede ronde versterkingen. Dit wordt bereikt met de parameter *winst_rvm='tijd'*.
- De QH relaties van de referentiesituatie zijn gebaseerd op Deltamodel database S10 (conform MKBA).
- De QH relaties van de varianten zijn gelijk aan die van de referentiesituatie verminderd met het waterstandsverschil zoals berekend met het onder "Hydraulische berekeningen" genoemde WAQUA model.
- Aanpassingen aan de code om instabiliteiten die optreden bij retentie te verminderen.

Voor meer toelichting over de methode Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming en de toepassing op de Rijn, wordt verwezen naar De Grave et al (2017) en Van Vuren et al (2017).

Berekeningen overstromingsrisico

De overstromingsrisico's langs de Rijntakken zijn berekend op basis van:

- Faalkansen per normtraject uit de Rivierentool, waarin de pipingkans is gecorrigeerd op basis van VNK kansen.
- Schades per normtraject uit factsheets nieuwe normering (Min. I&M, 2016).
- Jaarlijkse groei schade: 1,5 %.
- Discontovoet 4,5% (cf. MKBA), basisjaar 2025.
- Rekenperiode 2025-2125 (cf. MKBA).

2 Methode

2.1 Aanpak op hoofdlijnen

De werkwijze in dit project is samengevat in de volgende stappen:

1. Voorbereiden WAQUA model;
2. Optimalisatie van de variant "sturing op voorspellingen";
3. Optimalisatie van de variant " vaste inlaat";
4. Berekenen kostenreductie op dijkversterkingen en risicoreductie;
5. Uitvoeren gevoeligheidsanalyses;
6. Discussie van aandachtspunten.

2.2 Methode dijkversterkingskosten

De dijkversterkingskosten worden bepaald door het moment en de grootte van de benodigde dijkversterkingen om aan de waterveiligheidsnorm te (blijven) voldoen. Onderstaande beschrijving van de methode dijkversterkingskosten is een bewerking van het conceptmemo 'Gebruik van OKADER¹ instrument' (RWS, 2017).

De faalkans van een waterkering kan worden verkleind door dijkversterkingen, rivierverruimende maatregelen of een combinatie van beide. Door het uitvoeren van een dijkversterking neemt de faalkans van de waterkering bij een gegeven waterstand af. Wanneer een rivierverruimende maatregel wordt uitgevoerd heeft dit invloed op de belasting. De waterstand bij een bepaalde overschrijdingsfrequentie, wordt lager en daarmee wordt de faalkans van de waterkering ook kleiner.

De methodiek biedt de mogelijkheid om:

- de opgave voor 3 individuele faalmechanisme (hoogte, piping en macrostabiliteit) nu en in de toekomst te bepalen.
- verschillende ontwerpvarianten te verkennen om de opgaven (voor hoogte en/of sterkte opgave) op te lossen: dijkversterking, dijkversterking en rivierverruiming, rivierverruiming.
- Voor ontwerpvarianten te variëren met onder andere:
 - de ontwerplevensduur;
 - fasering in de tijd van maatregelen;
 - verschillende uitgangspunten zoals overslagdebiet, faalkansverdeling, etc.

Dijktrajecten en faalmechanismen

In de methodiek van de tool worden dijktrajecten in dijkvakken opgedeeld en wordt voor deze vakken eerst de huidige faalkans berekend. Dit gebeurt door de kans op voorkomen van verschillende belastingniveaus (buitenwaterstanden) te combineren met de kans dat de dijk bij dit belastingniveau (buitenwaterstand) bezwijkt. Dit gebeurt voor de drie belangrijkste faalmechanismen voor de rivierdijken: (1) overslag en overloop, (2) piping en (3) macrostabiliteit. De methodiek maakt hierbij gebruik van zogenaamde "fragility curves", welke voor elk faalmechanisme de relatie weergeeft tussen de lokale waterstand en de faalkans bij deze waterstand. De fragility curve geeft dus aan hoe groot de kans is dat de dijk bij een

¹ OKADER en Rivierentool zijn beide werknamen voor de Tool Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming.

bepaalde waterstand bezwijkt. Het detailniveau waarop de fragility curves zijn berekend, verschilt per faalmechanisme.

Bepalen opgave

Vanuit de nieuwe waterveiligheidsnormen wordt op dijkvakniveau een faalkanseis afgeleid. Bij het vaststellen van de omvang van de opgave wordt in eerste instantie gekeken naar het verschil tussen de huidige faalkans en de faalkanseis. Dit levert dus een beeld op van de opgaven die er zijn voor de 3 faalmechanismen apart. Berekend wordt hoe de dijk moet worden versterkt, gegeven (de toename van) de belasting (o.a. klimaatverandering) en de wettelijk vereiste faalkans. Dit betekent dat de dijk ofwel in de hoogte ofwel in de breedte ofwel in beide richtingen aangepast wordt. Deze extra hoogtes en breedtes zijn dus de benodigde dijkversterkingen om aan de norm te voldoen. Bij het uitvoeren van de dijkversterking wordt een levensduur van 50 jaar gehanteerd. De klimaatverandering en bodemdaling die in deze 50 jaar worden verwacht, worden in het dijkontwerp meegenomen.

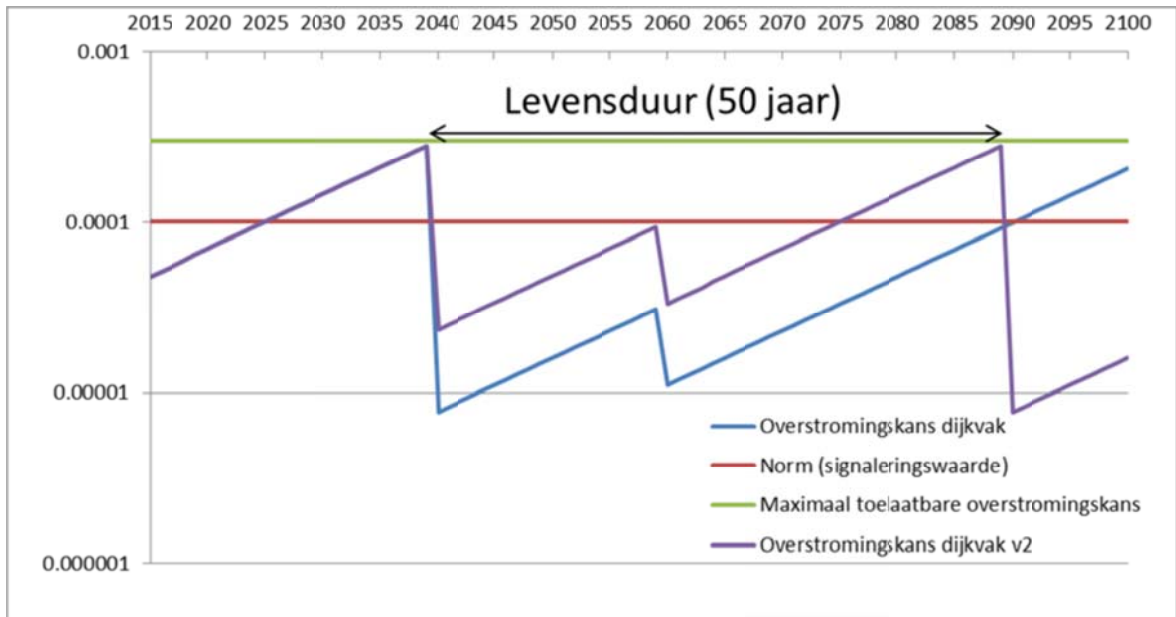
Dijkversterkingscyclus

De faalkans is in meer of mindere mate tijdsafhankelijk. De faalkans van een waterkering neemt over het algemeen toe in de tijd door bodemdaling en klimaatverandering. Dit zorgt ervoor dat een dijk die nu misschien nog voldoet, over 20 jaar niet meer voldoet. Op dat moment zal de dijk versterkt moeten worden om voor een gegeven periode (levensduur 50 jaar) weer aan de norm te voldoen. Dijkversterking is daarmee een cyclisch proces en de vorm van deze cyclus is afhankelijk van het type maatregel, zoals rivierverruiming of versterking, en de timing van maatregelen. Door rivierverruiming wordt het ontwerp of het benodigde moment van een dijkversterking beïnvloed. Dit is geïllustreerd in onderstaande Figuur 2.

Kosten maatregelen waterveiligheid

Om de (indicatieve) kosten van de dijkversterkingsmaatregelen te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van het KOSWAT-instrumentarium (KOSTen voor versterken WATERkeringen). Om de kosten te kunnen bepalen die gemaakt worden bij het versterken van een dijk, zijn in KOSWAT, naast de dimensies van de dijk in de uitgangssituatie, drie versterkingsparameters nodig: de toename van de kruinhoogte, de toename van de dijkbasis ten behoeve van macrostabiliteit en de toename van dijkbasis ten behoeve van piping. Bij het ramen van de kosten voor de aanleg van een dijk wordt in KOSWAT rekening gehouden met alle gemaakte kosten, inclusief grondverwerving en het verwijderen van obstakels en bekleding. Hiermee worden op uniforme wijze voor het gehele land ramingen gemaakt voor dijkversterkingsprojecten.

De inzet van rivierverruimende maatregelen kan er voor zorgen dat versterkingen later in de tijd nodig zijn. Het uitstellen van deze investeringskosten levert een kostenreductie op in een contante waarde berekening.



Figuur 2 Effect van het wel (paars) of niet (blauw) rekening houden met de inzet van een rivierverruimende maatregel in 2060 bij het versterken van een dijk. In het eerste geval (paarse lijn) wordt de dijk minder versterkt en na 50 jaar afgekeurd. In het tweede geval (blauwe lijn) wordt de afkeuring uitgesteld door de tussentijdse aanleg van de rivierverruiming in combinatie met een initieel grotere dijkversterking, en voldoet de dijk dus langer dan 50 jaar aan de norm.

Stappen in de methode

In de methode worden de onderstaande stappen gevolgd.

1. Berekenen hydraulische belastingen (indien van toepassing incl. effect rivierverruiming);
2. Berekenen faalkansen overslag, piping en macrostabiliteit door het combineren van de hydraulische belastingen met fragility curves;
3. Faalkansen vergelijken met de norm (faalkanseisen per mechanisme);
4. Als de faalkans groter dan de faalkanseis is: berekenen van de versterkingsopgave. Deze opgave wordt uitgedrukt in dijkverhoging, vergroten kwelweglengte t.b.v. piping en verbreding t.b.v. macrostabiliteit;
5. Als versterkt wordt: berekenen van de bijbehorende dijkversterkingskosten;
6. Als versterkt wordt: sterkte van de dijk aanpassen aan de versterking.

Dit levert een beeld van zowel de versterkingsopgave als versterkingskosten in de tijd. De kosten per jaar worden contant gemaakt en vervolgens gesommeerd over de gehele periode.

Uitgangspunten

De methodiek sluit zoveel mogelijk aan bij inzichten uit het WBI2017 en OI2014 (Ontwerp Instrumentarium). Er is gebruik gemaakt van GRADE W+ afvoerstatistiek met aftoppen en waterstanden uit het Deltamodel voor 9 afvoeren tussen 6000 en 20.000 m³/s. Voor de dijkhoogte en dijksterkte is gebruik gemaakt van VNK-data, aangevuld met extra informatie van de waterschappen. Hoewel zoveel mogelijk is aangesloten bij het WBI2017 en OI2014 (Ontwerp Instrumentarium), is de methodiek niet geschikt voor een dijkontwerp of toetsing, maar alleen voor een afweging van rivierverruiming vs. dijkversterking op een schaalniveau van meerdere kilometers.

2.3 Methode overstromingsrisico

Het overstromingsrisico wordt gekwantificeerd als 'Risico = kans x gevolg'. Risicoreductie door rivierverruimende maatregelen bestaat uit drie componenten:

1. Risicoreductie binnendijks door verlaging van de overstromingskans;
2. Risicoreductie binnendijks door verlaging van de gevolgen bij een overstroming;
3. Risicoreductie buitendijks.

Conform het rapport van Asselman (2014) laten we het buitendijkse risico buiten beschouwing langs de Rijntakken. Uit het Deltares rapport 'Risicoreductie door rivierverruiming' van Asselman & Wagenaar (2016) blijkt verder dat langs de Rijntakken de risicoreductie door kansafname dominant is ten opzichte van risicoreductie door gevolgfafname. Daarom berekenen wij alleen de reductie door kansafname². Deze keuze wijkt af van de aanpak in MKBA LTAR, waar de drie componenten zijn berekend.

Kansen

De overstromingskansen in de tijd met en zonder inzet van Rijnstrangen zijn berekend met de in paragraaf 2.2 beschreven kostenreductie methodiek die in de software "Rivierentool³" is omgezet (De Grave et al., 2017). In het algemeen nemen deze kansen toe in de tijd door klimaatverandering, en nemen af door het uitvoeren van een dijkversterking of rivierverruiming.

De berekende pipingfaalkansen uit de Rivierentool zijn dermate groot dat dit op veel trajecten leidt tot trajectfaalkansen tot wel 1/10 per jaar. Gezien de bewezen sterkte van die keringen wordt dit beschouwd als een te conservatieve inschatting om in een risicoberekening te gebruiken. Daarom is er voor gekozen om de pipingfaalkansen per vak zodanig te corrigeren dat deze de pipingfaalkansen uit VNK benaderen. Zie Bijlage A voor een uitgebreidere toelichting op deze faalkanscorrectie.

In de MKBA LTAR is onlangs besloten om deze faalkanscorrectie *niet* toe te passen omdat onvoldoende duidelijk is of de VNK kansen realistischer zijn dan de kansen uit de Rivierentool. In plaats daarvan is gekozen om de trajectfaalkansen in 2015 te maximaliseren op 1/100. De aanpak van de MKBA leidt in het algemeen tot een grotere risicoreductie dan de aanpak in deze studie. Bij inzet in 2030, ver voor de dijkversterking, is dit verschil aanzienlijk, maar bij latere inzet is het verschil verwaarloosbaar.

Gevolgen

Voor de gevolgen maken we gebruik van de totale schade in 2011 uit de factsheets normering primaire waterkeringen (Min. I&M, 2016). In deze schade zijn slachtoffers en getroffen en gemonetariseerd. Deze schade is bekend op normtrajectniveau en kan daardoor worden vermenigvuldigd met de gecorrigeerde trajectkansen. De schade is onafhankelijk van veranderingen in de waterstand zoals het effect van Rijnstrangen.

Combinatie kansen en gevolgen

Het risico per normtraject in de tijd wordt berekend door de gecorrigeerde trajectkans in de tijd te vermenigvuldigen met de gewogen schade in de tijd.

$$R(t) = Pf_{corr}(t) * \bar{S}(t) \quad (1)$$

² Uit de studie van Asselman blijkt overigens dat de reductie door gevolgfafname bij VKS Rijntakken gelijk is aan ca. 15% van de reductie door kansafname.

³ OKADER en Rivierentool zijn beide werknamen voor de Tool Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming.

De gewogen schade neemt in de tijd (t in jaren) toe met een groeipercentage van 1,5%:

$$\bar{S}(t) = \bar{S}_{2011} * 1,015^{t-2011} \quad (2)$$

Het jaarlijks risico maken we contant met een discontovoet van 4,5% en basisjaar 2025. Vervolgens is dit contante risico gesommeerd over de periode 2025-2125

$$R_{\text{totaal}} = \int \frac{R(t)}{1,045^{t-2025}} dt \quad (3)$$

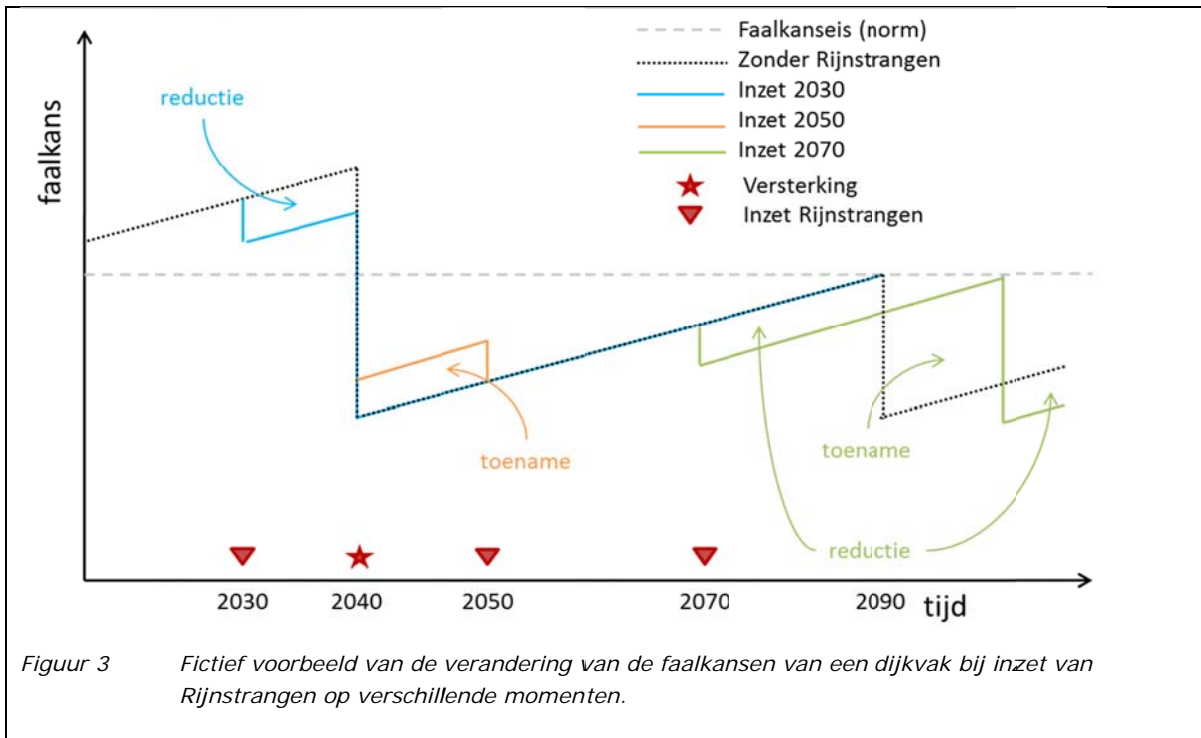
Risicoreductie: effect van timing bij inzet van Rijnstrangen

Het overstromingsrisico wordt gekwantificeerd als 'Risico = kans x gevolg'. De kans op een overstroming vermenigvuldigd met het gevolg van een overstroming. De maatregel Rijnstrangen kan het risico veranderen door waterstandsverlaging, en beïnvloed daarmee zowel de kans als het gevolg. In dit rapport is alleen de risicoreductie door verandering van de kans beschouwd.

De kans kan op twee manieren veranderen door inzet van Rijnstrangen:

1. De kans wordt (tijdelijk) kleiner als Rijnstrangen *eerder* dan de dijkversterking wordt ingezet. Zie blauwe lijn in Figuur 3.
2. De kans wordt (tijdelijk) groter als Rijnstrangen *later* dan de dijkversterking wordt ingezet *en* bij de dijkversterking in het ontwerp vooruitlopend al rekening wordt gehouden met de toekomstige waterstandsvaling door Rijnstrangen. De dijk wordt immers minder zwaar versterkt. Zie oranje lijn in Figuur 3.
3. De derde mogelijkheid is als Rijnstrangen *later* dan de dijkversterking wordt ingezet *en* bij de dijkversterking in het ontwerp geen rekening wordt gehouden met de toekomstige waterstandsvaling door Rijnstrangen. Zie groene lijn in Figuur 3. Dan wordt de kans (tijdelijk) kleiner en verschuift het faalkansverloop in de tijd door uitstel van de tweede versterkingsronde.

Op deze manier kan het totale risico over de hele rekenperiode zowel toenemen als afnemen door het inzetten van Rijnstrangen. Hierin is de onderlinge timing van dijkversterking en rivierverruiming doorslaggevend.



Figuur 3 Fictief voorbeeld van de verandering van de faalkansen van een dijkvak bij inzet van Rijnstrangen op verschillende momenten.

3 Optimalisatie variant gestuurde inlaat

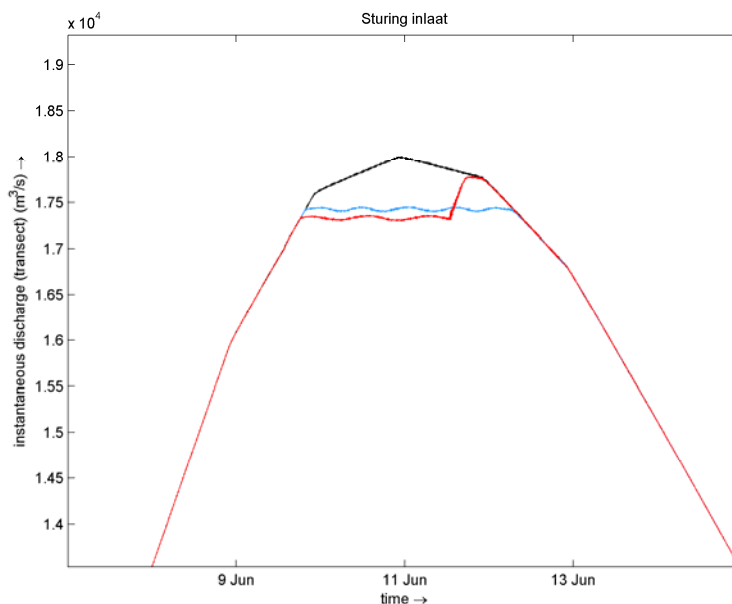
De gestuurde variant is gebaseerd op het uitgangspunt dat iedere afvoergolf optimaal kan worden afgetopt door gebruikt te maken van afvoervoorstellingen en een real-time sturing van de inlaat. Dit impliceert dat precies bekend is welke afvoergolf er aan komt, en is gezien de onzekerheden in die voorspelling een bovengrens van het effect. Het retentiegebied wordt ingezet bij afvoeren vanaf 8.000 m³/s en hoger, waarbij in alle gevallen het gehele retentievolume gebruikt wordt om de top van de afvoergolf af te halen. Hiervoor moet per afvoergolf een inzetniveau worden bepaald, zodanig dat het maximale retentievolume tijdens de afvoergolf niet wordt overschreden.

3.1 Methode

De optimalisatie heeft als doel het minimaliseren van dijkversterkingskosten en overstromingsrisico's op de schaal van het hele Rijntakkenstelsel. Omdat deze variant ingezet wordt bij een range aan afvoeren (8.000-20.000 m³/s), wordt dat optimum automatisch bereikt wanneer bij ieder afvoerniveau de waterstandsval wordt gemaximaliseerd.

Voor ieder afvoerniveau is eerst een initiële inschatting van het inzetniveau gemaakt. Dit is de afvoer waarboven het volume van de opgelegde afvoergolf gelijk is aan het maximale retentievolume. Het maximale retentievolume is ca. 80 Mm³ bij een maximale waterstand van 15m+NAP in het Rijnstrangengebied.

Deze initiële schatting van het inzetniveau is doorgerekend met WAQUA. Als de maximale waterstand van 15m+NAP in die berekening niet wordt bereikt, is het inzetniveau naar beneden bijgesteld. Als het juist te vroeg wordt bereikt, en de afvoer in de rivier doorstijgt, is het inzetniveau naar boven bijgesteld. Door dit proces is per afvoergolf iteratief het inzetniveau bepaald waarbij het retentievolume maximaal wordt benut.



Figuur 4 Voorbeeld van te laag inzetniveau (rood) en optimaal inzetniveau (blauw). Zwarte lijn is de 18.000 m³/s afvoergolf zonder inzet van Rijnstrangen.

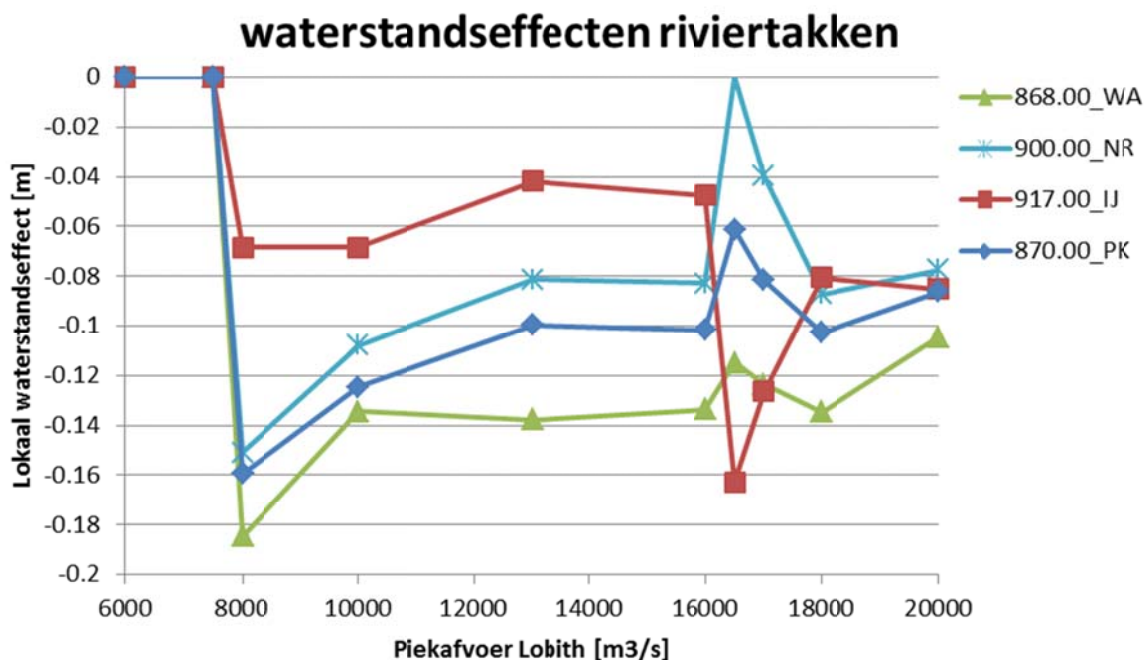
3.2 Resultaten optimalisatie: waterstandseffect

Bovenstaande procedure leidt tot de optimale inzetniveaus in Tabel 2. Het afvoerniveau 6.000 m³/s is niet geoptimaliseerd omdat het gebied pas vanaf 8.000 m³/s wordt ingezet. De reductie in piekafvoer neemt toe met de hoogte van de piekafvoer, en is 575 m³/s bij een afvoergolf van 18.000 m³/s. Daarmee komt de afvoerreductie goed overeen met de 500 m³/s afvoerreductie waar in de VKS vanuit is gegaan.

Figuur 5 toont het waterstandseffect bij de optimale inzetniveaus aan het begin van de vier riviertakken. Globaal is het effect op de Waal ongeveer 14 cm, 10 cm op het Pannerdensch Kanaal, 8 cm op de Nederrijn en 5 cm op de IJssel. Het effect neemt licht af bij hogere afvoeren door het afvlakken van de QH-relatie bij hogere afvoeren. Het gedrag tussen 16.000 en 18.000 m³/s wordt veroorzaakt door de strategie 'Lek ontzien' in de modellen. Hierdoor blijft de afvoer naar de Nederrijn constant tussen de Bovenrijnafvoeren van 16.000 en 17.000 m³/s, waardoor de afvoerreductie op het Pannerdensch Kanaal volledig doorwerkt naar de IJssel. Deze resultaten zijn uitgebreid toegelicht in Bijlage C.

Afvoerniveau [m ³ /s]	Optimaal inzetniveau [m ³ /s]
6.000	n.v.t.
8.000	7.560
10.000	9.530
13.000	12.485
16.000	15.450
16.500	15.940
17.000	16.435
18.000	17.425
20.000	19.450

Tabel 2 Optimale inzetniveaus per afvoer



Figuur 5 Waterstandseffect bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.

3.3 Resultaten optimalisatie: kostenreductie en risicoreductie

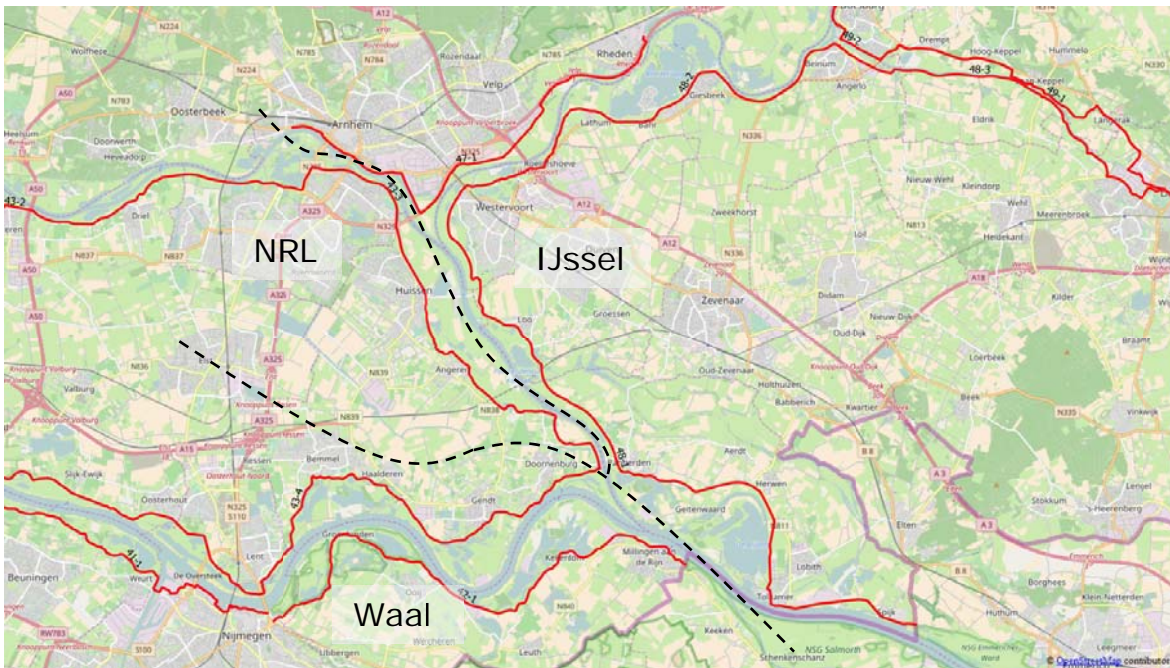
De berekende totale contante dijkversterkingskosten langs de Rijntakken, over de periode 2025-2125, zijn voor de *referentie* gelijk aan 6.595 mln euro. Het totale contante risico langs de Rijntakken, over de periode 2025-2125, is voor de *referentie* gelijk aan 9.136 mln euro. De kosten en risico's per riviertak in de referentie zijn opgenomen in Bijlage B.

Tabel 3 bevat de reductie in dijkversterkingskosten en overstromingsrisico door inzet van Rijnstrangen, voor drie inzetjaren. Deze reducties zijn ook uitgesplitst per riviertak (volgens de indeling in Figuur 6):

- Waal: inclusief hele traject 42-1 en 43-4;
- IJssel: inclusief hele traject 47-1 en 48-1;
- Nederrijn-Lek: inclusief hele traject 43-3.

	CW Dijkenbaten			CW Risicobaten			CW Totale baten		
	Inzetjaar			Inzetjaar			Inzetjaar		
	2030	2050	2070	2030	2050	2070	2030	2050	2070
Totaal	183	174	148	431	-182	42	614	-8	190
IJssel	31	31	28	193	-20	14	224	11	42
Nederrijn-Lek	75	67	48	23	-128	18	98	-61	66
Waal	76	76	72	216	-34	10	292	42	82
Kosten Rijnstrangen	570	200	80	570	200	80	570	200	80
Baten/kosten ratio	0,3	0,9	1,8	0,8	-0,9	0,5	1,1	0,0	2,4

Tabel 3 Contante waarde kostenreductie en risicoreductie bij optimale gestuurde inlaat. Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.



Figuur 6 Indeling van dijktrajecten bij drie riviertakken (stippellijn)

De contante kostenreductie varieert van 148 tot 183 mln euro. Het valt op dat hoe eerder wordt ingezet, hoe hoger de kostenreductie. Bij inzet 2030 en inzet 2050 wordt de winst van rivierverruiming bereikt bij de 1^e versterkingsronde. Bij inzet in 2070 wordt de 2^e ronde uitgesteld en ligt de winst verder in de toekomst. In de contante waarde berekening zorgt dit voor kleinere baten. Dat de kostenreductie bij inzet 2030 nog iets hoger is dan bij inzet 2050, kan worden verklaard doordat sommige versterkingen die na 2030 zijn gefaseerd, kunnen worden uitgesteld.

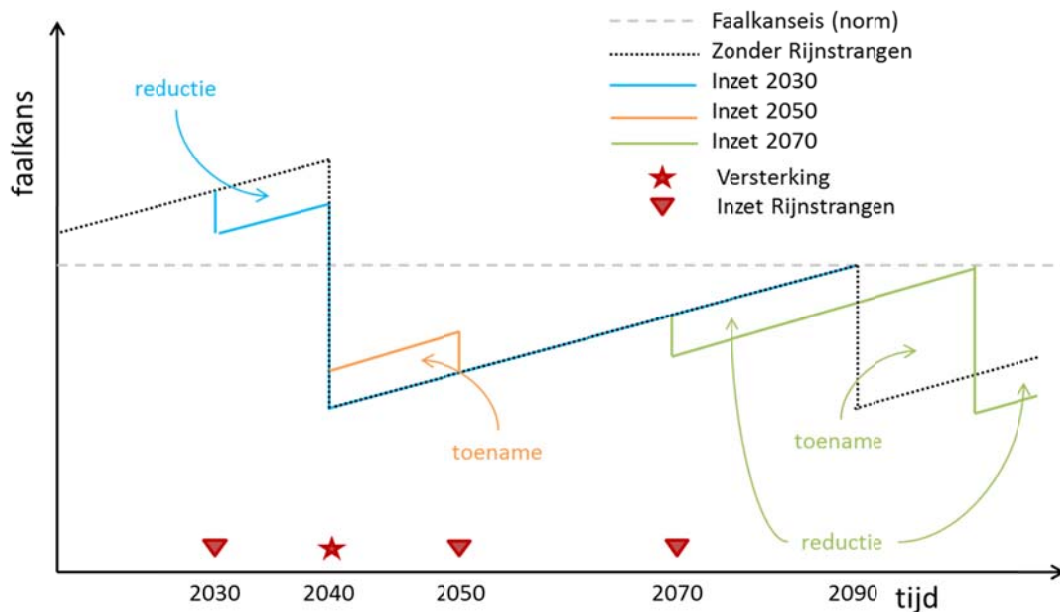
Daarnaast is in Tabel 3 de baten/kostenratio opgenomen. Doordat de contante kosten van de maatregel Rijnstrangen afnemen bij latere inzet, kan inzet in 2070 wel degelijk kosteneffectiever zijn, ook al is de kostenreductie in 2030 hoger. De contante kosten van Rijnstrangen zijn bij inzet in 2030 gelijk aan 570 mln euro, 200 mln euro bij inzet in 2050 en 80 mln euro bij inzet in 2070.

De risicoreductie varieert van 431 mln euro tot -182 mln euro⁴. Het valt op dat de reductie sterk verschilt met de inzetjaren. De verklaring hiervoor is geïllustreerd in Figuur 7:

- Bij inzet in 2050 is er op veel trajecten een toename in het risico. Dit komt omdat er bij dijkversterkingen rekening gehouden wordt met toekomstige inzet van Rijnstrangen en daardoor de 1^e versterkingsronde minder wordt versterkt. Dit levert een grotere faalkans op (ook al voldoet die nog aan de norm) en dus een tijdelijke toename in risico tot Rijnstrangen daadwerkelijk wordt ingezet.
- Inzet in 2030 levert de grootste risicoreductie op. De bovengenoemde tijdelijke risicotename treedt hier veel korter op, voor zover dijken al voor 2030 versterkt worden. Daarnaast vindt een deel van de 1^e versterkingsronde pas plaats na 2030. Doordat het risico in de tussenliggende periode groot is, is ook de potentiële risicoreductie groot.
- Bij inzet in 2070 is ten eerste het risico op dat moment veel kleiner omdat de faalkans al is gereduceerd tot de norm tijdens de 1^e dijkversterkingsronde, en ten tweede ligt de winst

⁴ Zowel met als zonder inzet van de maatregel is de overstromingskans kleiner dan de norm. Een negatieve waarde kan geïnterpreteerd worden als risicotename ten opzichte van de referentie, of als minder 'oververzekering' dan in de referentie.

ver in de toekomst. In de contante waarde berekening zorgt dit voor een kleinere risicoreductie. Bij een ongunstige fasering van dijkversterking, als de 2^e versterking net na 2070 valt, kan zelfs een negatieve risicobaat ontstaan, vergelijkbaar met de negatieve risicobaat bij inzet in 2050 (zie groene lijnen in Figuur 7).



Figuur 7 Fictief voorbeeld van de verandering van de faalkansen bij inzet op verschillende momenten.

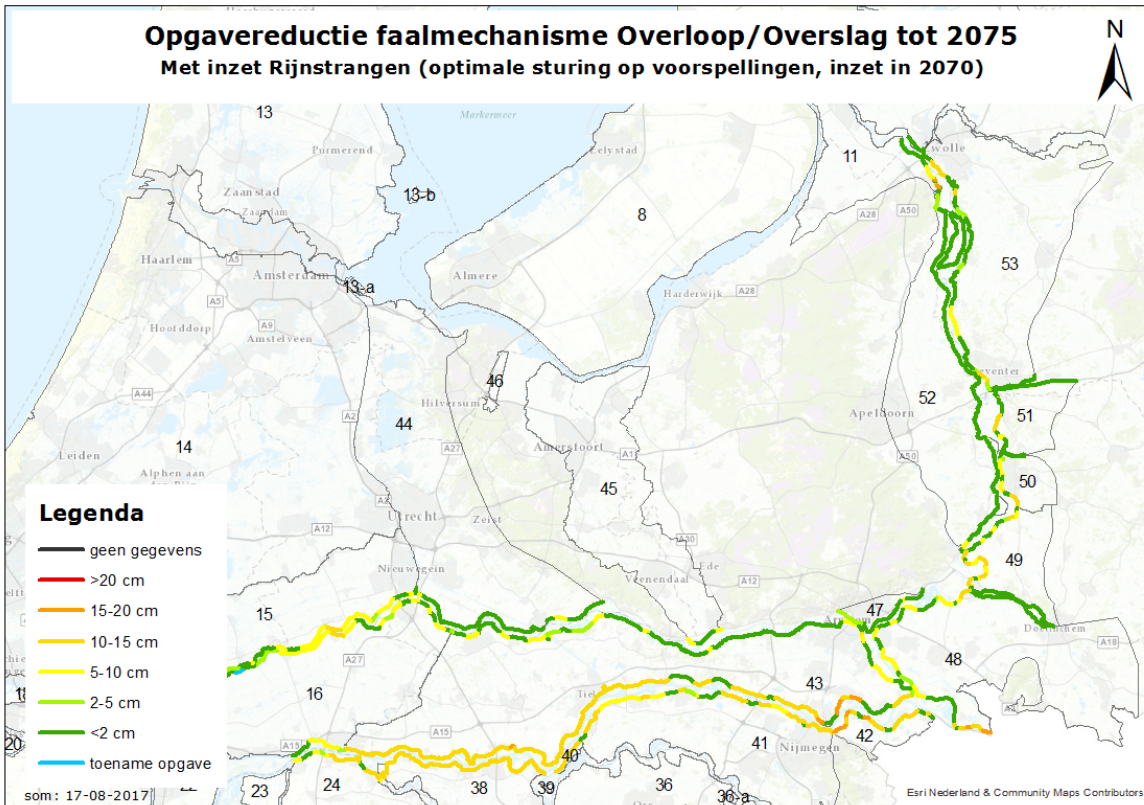
Ruimtelijke verdeling

In Figuur 8 en Figuur 9 is in kaartvorm inzichtelijk gemaakt waar de meeste opgavereductie en kostenreductie wordt bereikt bij inzet van de gestuurde variant in 2070. Deze variant is hiervoor gekozen omdat deze de grootste baten/kostenverhouding heeft. Inzet van de gestuurde variant in 2030 of 2050 geeft een vergelijkbare ruimtelijke verdeling.

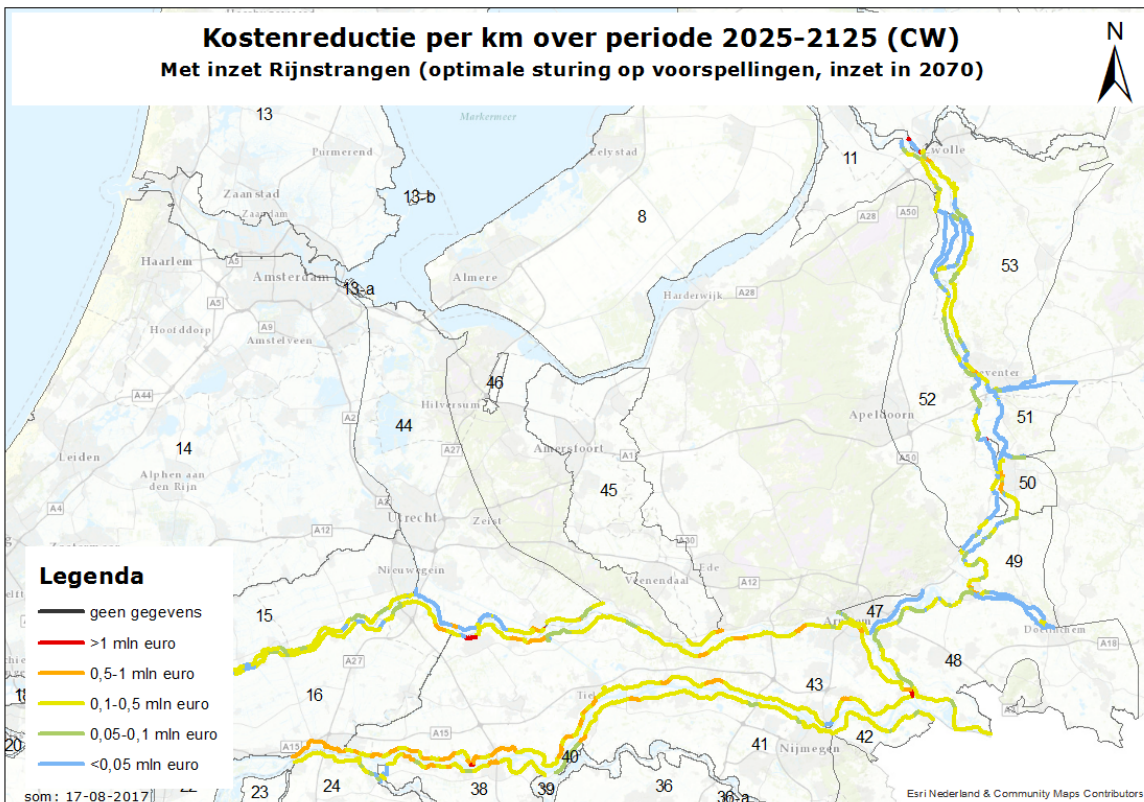
De opgavereductie is bij de meeste dijken langs de Waal of ongeveer 15 cm, langs de Nederrijn vrijwel overall 0 cm, langs de Lek 5 tot 10 cm en langs de IJssel varieert het van 0 tot 15 cm. Het ontbreken van een opgavereductie kan verklaard worden door het ontbreken van een opgave in de referentie (zie Figuur 25), of doordat het waterstandseffect nihil is bij de afvoeren die maatgevend zijn voor de betreffende dijk.

De kostenreductie langs de Waal is gemiddeld 0,1-0,5 mln euro per km (Figuur 9), op de versterkingskosten van 10-20 mln euro per km (zie Figuur 28) die worden gedomineerd door de opgave voor piping en macrostabiliteit. Langs de Nederrijn-Lek ligt de kostenreductie in dezelfde orde grootte, langs de IJssel zijn er ook trajecten waar geen significante kostenreductie wordt bereikt.

Van de 148 mln euro kostenreductie bij inzet in 2070 wordt 0,1 mln behaald op trajecten met een opgavereductie kleiner dan 2 cm (afrondmarge), en 4 mln euro op trajecten met een opgavereductie kleiner dan 5 cm. De invloed van de afronding is dus verwaarloosbaar.



Figuur 8 Ruimtelijke verdeling reductie hoogteopgave bij inzet gestuurde variant in 2070



Figuur 9 Ruimtelijke verdeling contante kostenreductie bij inzet gestuurde variant in 2070

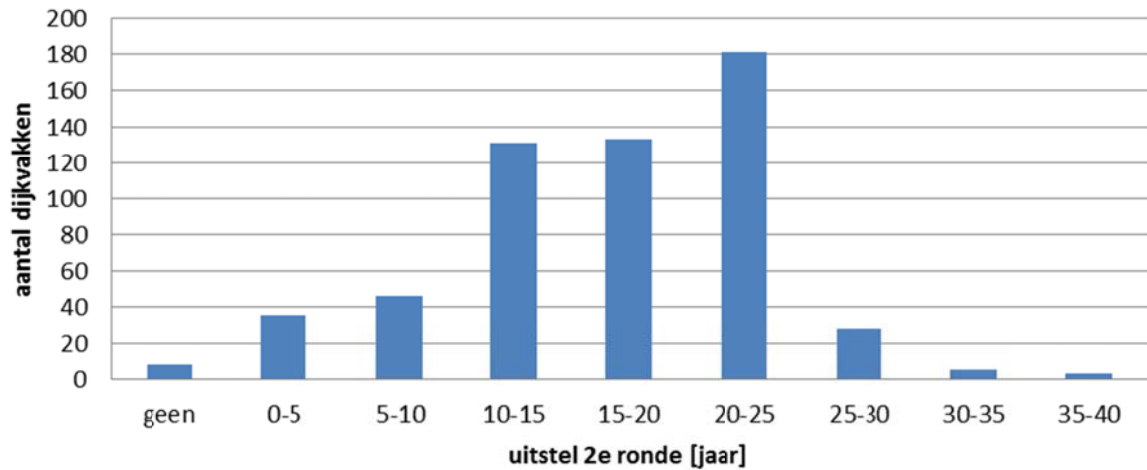
Uitstel van 2^e versterking

De meeste winst in de variant 'gestuurde variant, inzet in 2070' wordt behaald door de tweede versterkingsronde uit te stellen. Dit laten we hieronder zien met een grove inschatting.

De niet-contante kosten van de tweede versterkingsronde bedragen ca. 4 mrd euro in de referentie (de kosten in de periode 2075-2100). De tweede ronde wordt door de gestuurde variant gemiddeld 15-20 jaar uitgesteld (Figuur 10). Stel dat we er vanuit gaan dat die investering van 4 mrd euro verschuift van 2085 in de referentie naar het jaar 2100 bij inzet van Rijnstrangen. De winst in contante waarde bij een discontovoet van 4,5% en basisjaar 2025 is dan:

$$\text{Contante dijkenbaten} = \frac{4000}{1,045^{2085-2025}} - \frac{4000}{1,045^{2100-2025}} = 285 - 148 = 138$$

Deze grove inschatting komt goed overeen met de berekende 148 mln euro dijkenbaten (Tabel 3).



Figuur 10 Histogram van uitstel 2e versterkingsronde door gestuurde variant 207

4 Optimalisatie variant vaste inlaat

De variant met vaste inlaat is gebaseerd op het uitgangspunt dat de dimensies van de inlaat vast liggen, en dus tijdens hoogwater geen beslissing nodig is om het gebied wel of niet in te zetten. De inlaat moet echter zodanig gedimensioneerd zijn dat het maximale retentievolume niet wordt overschreden, er is immers in principe geen sturing meer mogelijk bij deze variant.

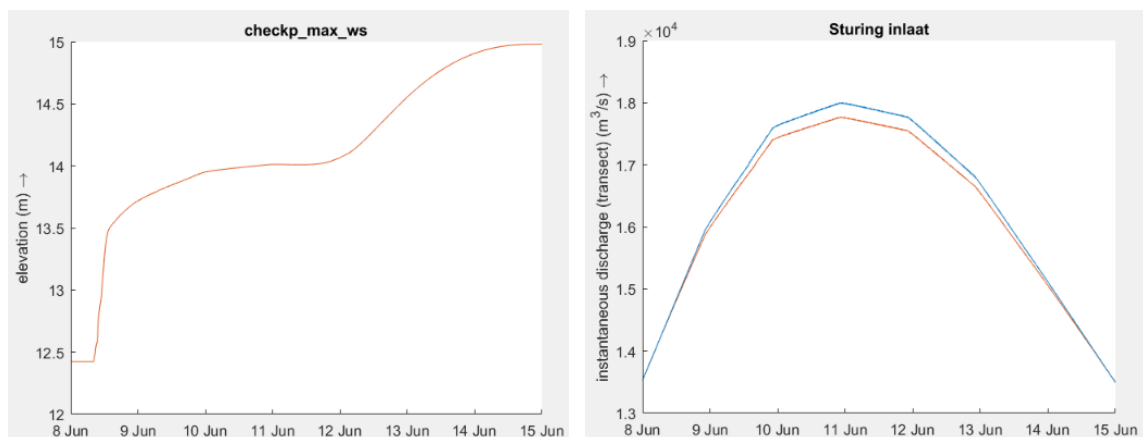
4.1 Methode

De optimalisatie heeft ook bij deze variant als doel het minimaliseren van dijkversterkingskosten en overstromingsrisico's op de schaal van het hele Rijntakkenstelsel. Bij deze variant is het inzetniveau echter een variabele, waardoor het waterstandseffect bij hogere of lagere afvoeren kan optreden. De variant met het maximale waterstandseffect is dan niet automatisch optimaal. Daarom moet ieder inzetniveau worden doorgerekend op dijkversterkingskosten en overstromingsrisico's, voor het optimum bepaald kan worden.

In alle gevallen dient de waterstand in Rijnstrangen lager te blijven dan 15m+NAP. Als maximale afvoer is 18.000 m³/s aangenomen. Het doorstroomoppervlak van de inlaat dient zo klein te zijn, dat het retentiegebied bij de 18.000 m³/s afvoer net niet vol raakt. Voor de analyses is een doorstroomhoogte van 1 m gekozen, zodat de breedte van de inlaat de vrije variabele is bij een bepaald inzetniveau. De breedte is dus gekoppeld aan het inzetniveau. Hoe hoger het inzetniveau, hoe groter de breedte kan zijn, omdat het debiet groter mag zijn als het gebied pas laat instroomt.

Voor ieder inzetniveau is eerst de drempelhoogte bepaald op basis van de waterstand voor de inlaat bij een afvoer gelijk aan het inzetniveau.

Vervolgens is per inzetniveau de breedte van de inlaat stapsgewijs verkleind, door een percentage van de barrier-breedte op te geven in WAQUA, totdat de capaciteit van het retentiegebied niet meer wordt overschreden bij een 18.000 m³/s afvoergolf (zie Figuur 11). De volledige barrier-breedte (100%) is ongeveer 600 m.



Figuur 11 Optimalisatie van de vaste variant, instroom vanaf 14.000 m³/s. De waterstand in Rijnstrangen (linker figuur) gaat naar 15 m+NAP bij een 18.000 m³/s afvoergolf. De afvoer net na de inlaat (rechter figuur) wordt gelijkmatig gereduceerd.

Met die breedte en drempelhoogte zijn vervolgens WAQUA-berekeningen gemaakt met de standaardafvoergolven die boven de drempel uitkomen. Het (afvoerafhankelijke) waterstandseffect dat daaruit volgt, is gebruikt in de kostenberekening en risicoberekening voor de inzetjaren 2030, 2050 en 2070.

Deze exercitie is herhaald voor meerdere inzetniveaus (12.000, 14.000, 16.000 m³/s), wat per inzetniveau de dijkversterkingskosten en overstromingsrisico's oplevert. Hieruit kan worden afgeleid wat het meest kosteneffectieve inzetniveau is.

4.2 Resultaten optimalisatie: waterstandseffect

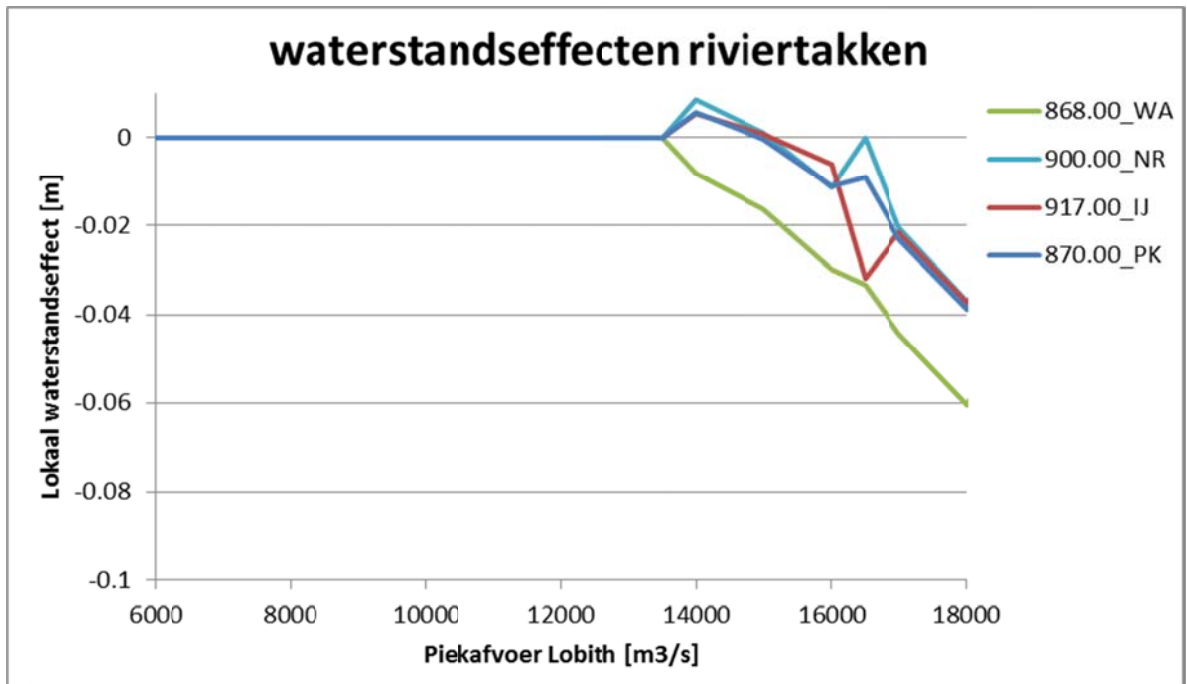
Bovenstaande procedure is uitgevoerd voor instroomdrempels van 12.000, 14.000 en 16.000 m³/s. De bijbehorende breedte van de inlaat om het gebied te vullen zonder de waterstand van 15 m+NAP te overschrijden, is opgenomen in Tabel 4 **Error! Reference source not found.**

Inzetniveau [m ³ /s]	Drempelhoogte [m+NAP]	Breedte inlaat [%]	Reductie 18.000-golf [m ³ /s]
12.000	16,38	2,8	140
14.000	17,60	13	230
16.000	18,19	56	320

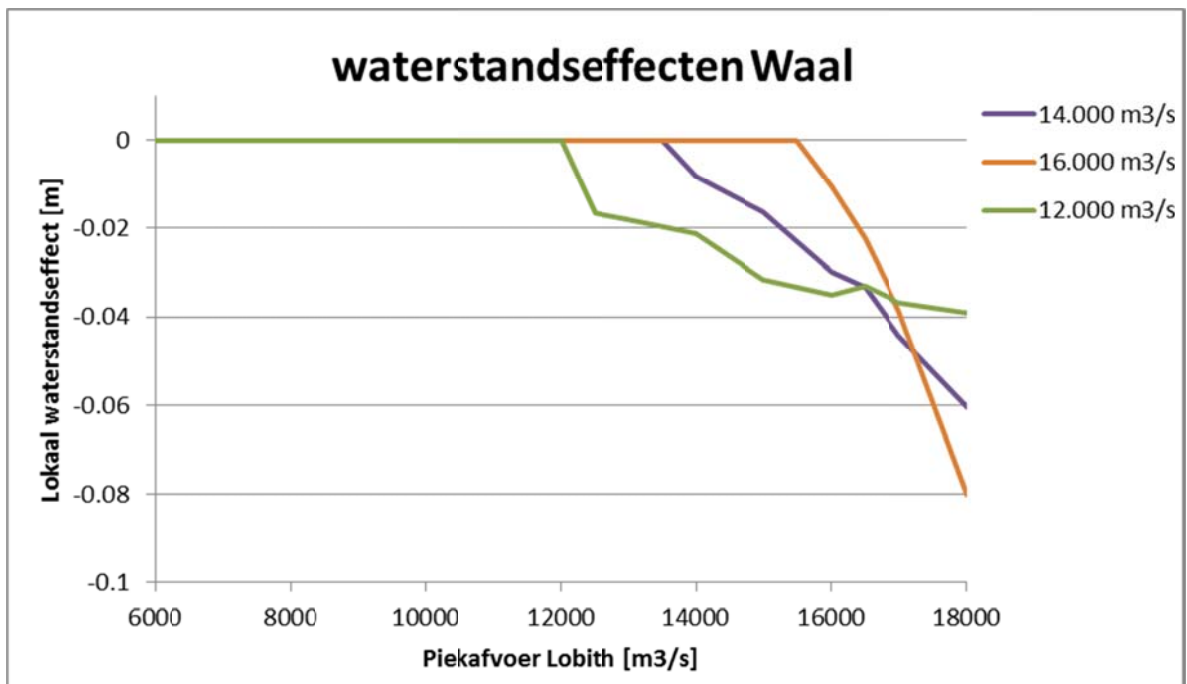
Tabel 4 Optimalisatie inzetniveau variant met vaste drempel

Het waterstandseffect van de 14.000 m³/s variant op enkele voorbeeldlocaties per riviertak is weergegeven in Figuur 12. Het effect neemt min of meer lineair toe tussen het inzetniveau en 18.000 m³/s. Hier treedt bij 16.500 m³/s hetzelfde effect op als bij de gestuurde variant, door de strategie 'Lek ontzien'. Het waterstandseffect van de drie inzetniveaus op de Waal is weergegeven in Figuur 13.

Bij 14.000 en 15.000 m³/s ontstaat een kleine waterstandsverhoging op het Pannerdensch Kanaal (en daardoor ook op de Nederrijn en IJssel). Dit kan worden verklaard doordat de beleidsmatige afvoerverdeling bij 16.000 m³/s in het model wordt gerealiseerd door de hoogte van de Pannerdensche Overlaat in te stellen. Deze hoogte is namelijk verschillend voor de referentie (13,75 m+NAP) en bij inzet van Rijnstrangen (13,59 m+NAP), omdat in beide gevallen de beleidsmatige verdeling moet worden gerealiseerd, maar bij inzet van Rijnstrangen minder afvoer bij het splitsingspunt aankomt. Voor de hoogte *met* inzet van Rijnstrangen is uitgegaan van een afvoerreductie van 450 m³/s bij 16.000 m³/s (HKV, 2016) wat leidt tot de hoogte van 13,59 m+NAP. Door die lagere overlaat, gaat ook bij afvoeren lager dan 16.000 m³/s relatief meer water naar het Pannerdensch Kanaal. Dit is onvermijdelijk doordat de afvoerreductie van retentie sterk afhangt van de afvoer bij Lobith, maar de afvoerverdeling alleen op een afvoer van 16.000 m³/s wordt geregeld. Daarnaast is er nog een andere oorzaak van de waterstandstoename. De afvoerreductie van de vaste variant bij een afvoer van 16.000 m³/s is minder dan de afvoerreductie die is aangenomen (94 m³/s bij vaste inzet vanaf 14.000, tegen de aanname van 450 m³/s). Dat betekent dat de Pannerdensche Overlaat strikt genomen iets hoger dan 13,59 m+NAP zou moeten zijn om de beleidsmatige verdeling te realiseren in de variant met Rijnstrangen, en er dus minder afvoer naar het Pannerdensch Kanaal zou stromen. Dit zou echter per variant van Rijnstrangen een nieuwe afregeling van de overlaat vereisen.



Figuur 12 Waterstandseffect riviertakken bij vaste variant, instroom vanaf 14.000 m³/s.



Figuur 13 Waterstandseffect Waal per inzetniveau van de vaste variant.

4.3 Resultaten optimalisatie: kostenreductie en risicoreductie

De berekende totale contante dijkversterkingskosten langs de Rijntakken, over de periode 2025-2125, zijn voor de referentie gelijk aan 6.595 mln euro. Het berekende totale risico langs de Rijntakken, over de periode 2025-2125, is voor de referentie gelijk aan 9.136 mln euro.

Tabel 5 bevat de reductie in dijkversterkingskosten en overstromingsrisico door inzet van Rijnstrangen, voor de drie inzetniveaus en voor drie inzetjaren. Voor de verklaring van de negatieve risicobaten verwijzen we naar paragraaf 3.3, waar hetzelfde mechanisme van toepassing is.

Inzetten vanaf 12.000 m³/s blijkt de meeste baten op te leveren, maar de baten zijn in alle gevallen veel lager dan bij de variant met sturing op voorspellingen. Het valt op dat de dijkenbaten niet sterk afhangen van het inzetniveau (een kleiner waterstandseffect over een bredere reeks van afvoeren levert ongeveer evenveel op als een wat groter waterstandseffect over een smallere reeks), maar met name de risicobaten nemen sterk toe bij een lager inzetniveau.

Daarnaast is in Tabel 6 de baten/kostenratio opgenomen. Ook bij deze variant is de baten/kostenverhouding het meest gunstig bij inzet in 2070. Maar ook in dat meest gunstige geval is de baten/kostenverhouding slechts 0,3 (26/80).

Variant	CW Dijkenbaten			CW Risicobaten			CW Totale baten		
	Inzetjaar			Inzetjaar			Inzetjaar		
	2030	2050	2070	2030	2050	2070	2030	2050	2070
Inzet vanaf 12.000 m ³ /s	31	28	18	52	-10	8	84	19	26
Inzet vanaf 14.000 m ³ /s	30	30	14	29	-14	9	58	16	23
Inzet vanaf 16.000 m ³ /s	29	31	10	9	-21	10	37	10	21

Tabel 5 Resultaten optimalisatie inzetniveau variant met vaste drempel. Bedragen in mln euro, gesommeerde contante waarde over de gehele rekenperiode.

Variant	CW Dijkenbaten			CW Risicobaten			CW Totale baten		
	Inzetjaar			Inzetjaar			Inzetjaar		
	2030	2050	2070	2030	2050	2070	2030	2050	2070
Kosten Rijnstrangen	570	200	80	570	200	80	570	200	80
Inzet vanaf 12.000 m ³ /s	0,05	0,14	0,22	0,09	-0,05	0,10	0,15	0,09	0,32
Inzet vanaf 14.000 m ³ /s	0,05	0,15	0,17	0,05	-0,07	0,11	0,10	0,08	0,28
Inzet vanaf 16.000 m ³ /s	0,05	0,15	0,13	0,02	-0,11	0,13	0,07	0,05	0,26

Tabel 6 Contante waarde kostenreductie en risicoreductie bij optimale vaste inlaat (vanaf 14.000 m³/s). Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.

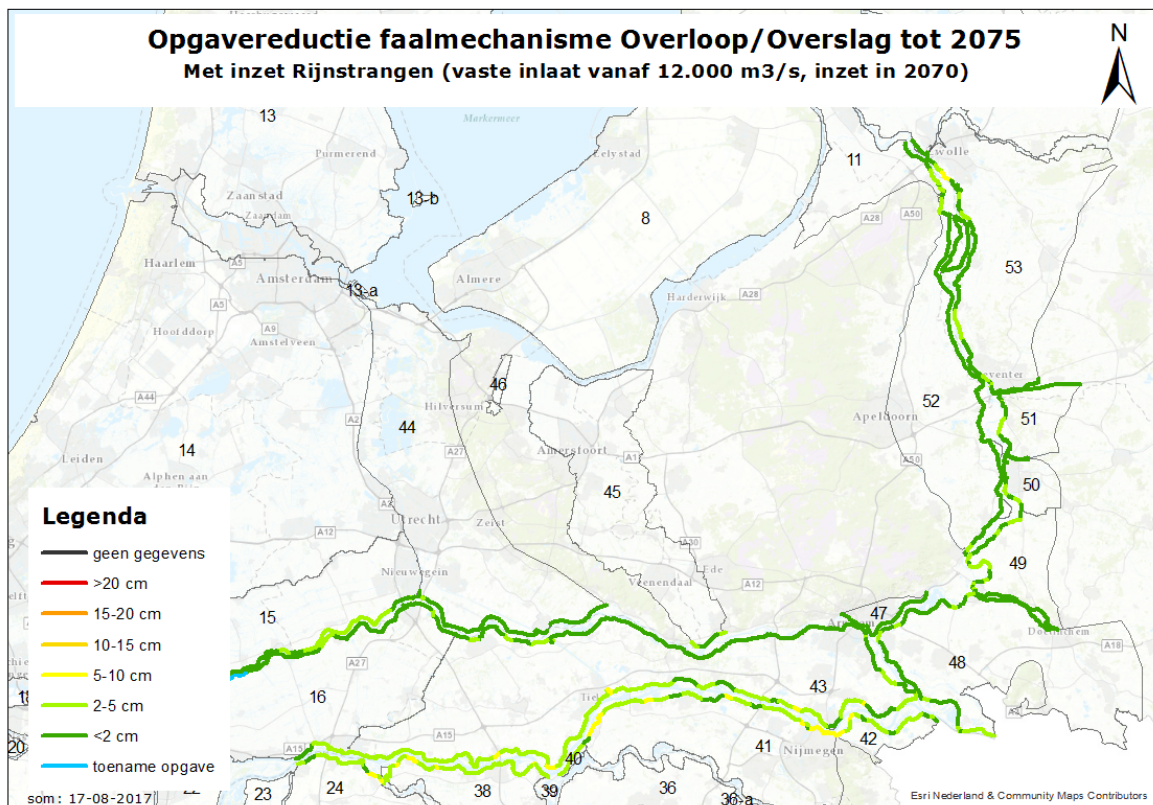
Ruimtelijke verdeling

In Figuur 14 en Figuur 13 is in kaartvorm inzichtelijk gemaakt waar de meeste opgavereductie en kostenreductie wordt bereikt bij inzet van de variant met een vaste inlaat vanaf 12.000 m³/s in 2070. Deze variant is hiervoor gekozen omdat deze de grootste baten/kostenverhouding heeft.

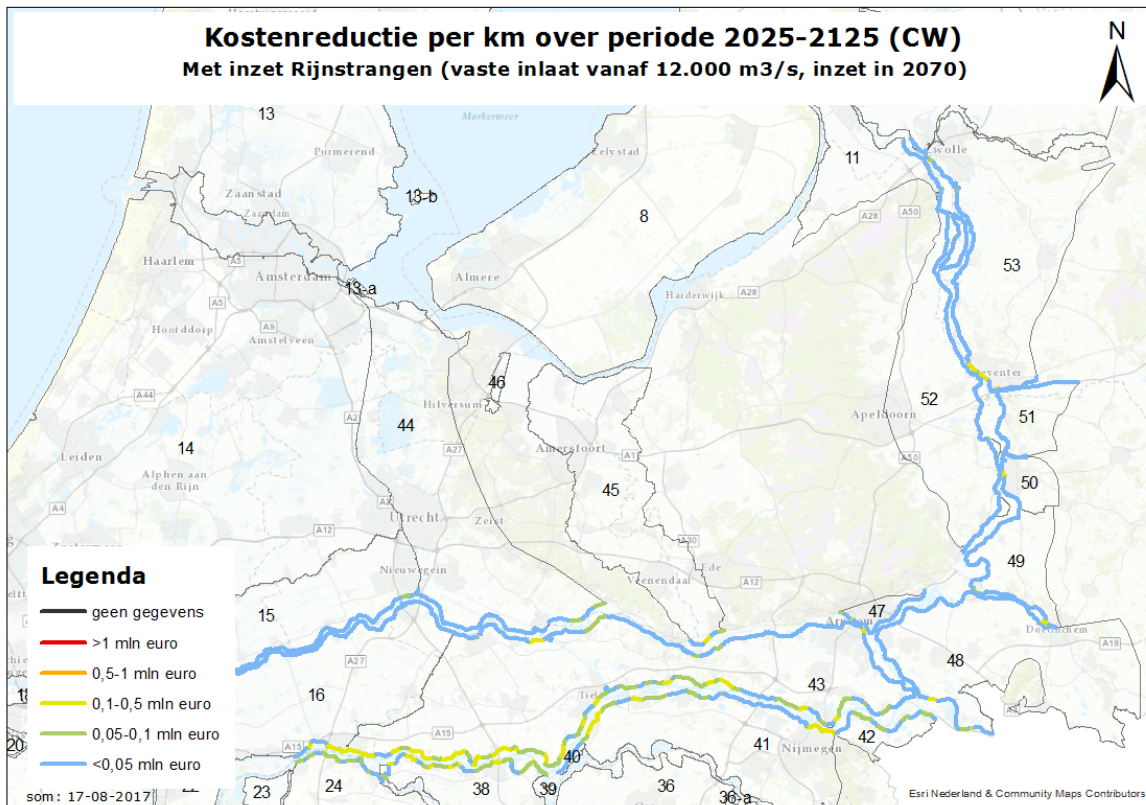
De opgavereductie is bij de meeste dijken langs de Waal 2-5 cm, langs de Nederrijn- Lek en IJssel vrijwel overal kleiner dan 2 cm. Het ontbreken van een opgavereductie kan verklaard worden door het ontbreken van een opgave in de referentie (zie Figuur 25), maar bij deze variant vooral doordat het waterstandseffect klein is bij de afvoeren die maatgevend zijn voor de betreffende dijk.

De kostenreductie langs de Waal is gemiddeld 0,05 mln euro per km (Figuur 13), op de versterkingskosten van 10-20 mln euro per km (zie Figuur 28) die worden gedomineerd door de opgave voor piping en macrostabiliteit. Langs de Nederrijn- Lek en IJssel is de kostenreductie op de meeste dijken kleiner dan 0,05 mln euro per km.

Van de 18 mln euro kostenreductie bij inzet vanaf 12.000 m³/s in 2070 wordt 0,4 mln euro behaald op trajecten met een opgavereductie kleiner dan 2 cm (binnen afrondmarge). De invloed van de afronding is dus verwaarloosbaar.



Figuur 14 Ruimtelijke verdeling reductie hoogteopgave bij inzet variant met vaste inlaat vanaf 12.000 m³/s in 2070



Figuur 15 Ruimtelijke verdeling kostenreductie bij inzet variant vaste inlaat vanaf 12.000 m³/s in 2070

5 Gevoeligheidsanalyses

Bij de kosten- en risicoberekeningen zijn diverse aannames gemaakt, zoals:

- Effect ten opzichte van situatie met uitvoering Referentiepakket Dijken+;
- Opgaves voor piping en macrostabiliteit;
- Inzetsfrequentie gestuurde variant;
- Inzetten voor verkleining dijkversterkingsopgave of voor uitstel 2^e ronde versterkingen;
- Rekenen zonder onzekerheden in effect.

In deze gevoeligheidsanalyse is ingeschat hoe sterk de uitkomsten veranderen als deze uitgangspunten wijzigen. Dit is in verband met de rekentijden van de kostenreductieberekeningen voorlopig alleen gedaan voor de dijktrajecten 43-4 (noordzijde Waal) en 52-2 (westzijde IJssel). Deze trajecten hebben relatief gemiddelde dijkversterkingskosten en risico's, maar de resultaten kunnen anders uitvallen als alle normtrajecten worden meegenomen. Daarom moeten deze uitkomsten worden beschouwd als eerste indicatie.

		Traject 43-4	Traject 52-2	Totaal
Riviertak		Waal (noord)	IJssel (west)	Bovenrijn, Waal, Pan. Kan., IJssel, Nederrijn, Lek
Norm (ondergrens)	1/jaar	1/10.000	1/1.000	n.v.t.
Lengte	km	26	24	1000
CW versterkingskosten referentie	mln euro	620	250	6595
CW risico referentie	mln euro	360	31	9135

Tabel 7 Kenmerken trajecten 43-4 en 52-2

5.1 Effect bij ander pakket rivierverruiming

In de analyses is het effect van Rijnstrangen onderzocht ten opzichte van de referentiesituatie Dijken+ (maatregelen Varik-Heesselt, IJsselpoort half, Reevediep fase 2). Het effect van losse maatregelen kan veranderen als dit berekend wordt ten opzichte van een referentiesituatie met veel meer rivierverruiming, omdat de opgave dan kleiner is. Dit kan zowel leiden tot een groter als kleiner effect van de losse maatregel. Omdat het voorkeurspakket van de Lange Termijn Ambitie Rivieren nog niet bekend is, is er voor gekozen om een integrale waterstandsaling van 20 cm toe te voegen aan de referentie Dijken+. Basisvariant is inzet van de gestuurde variant in 2070.

Uit de resultaten in Tabel 8 blijkt dat, in ieder geval voor de normtrajecten 43-4 en 52-2, geldt dat de baten niet sterk afhangen van het referentiepakket (10% verschil).

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]
Basisvariant, Referentie = dijken+	9,1	1,3	10,4
Basisvariant Referentie = dijken+ en 20 cm integraal	8,9	0,5	9,4

Tabel 8 Resultaten gevoeligheidsanalyse referentiepakket rivierverruiming (contante waarde)

5.2 Halveren opgave piping en macrostabiliteit

In de analyses is gebruik gemaakt van de gegevens over piping en macrostabiliteit zoals deze beschikbaar zijn uit de Beleidsstudie Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming. Deze opgaves worden echter als groot ervaren door de waterschappen. Daarom is de piping- en macrostabiliteitopgave in deze gevoeligheidsanalyse gehalveerd. Basisvariant is inzet van de gestuurde variant in 2070.

Uit de resultaten in Tabel 9 blijkt dat, in ieder geval voor de normtrajecten 43-4 en 52-2, geldt dat de baten licht afhangen van de omvang van de piping- en macrostabiliteitopgave (15-20% verschil). De risicobaten blijven gelijk omdat het halveren van de pipingopgave een nabewerking is in de Tool, en geen invloed heeft op de berekende faalkansen.

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]
Basisvariant, volledige opgave	9,1	1,3	10,4
Basisvariant, Halveren opgave piping en macrostabiliteit	7,4	1,3	8,7

Tabel 9 Resultaten gevoeligheidsanalyse piping en macrostabiliteit (contante waarde)

5.3 Gestuurde inlaat pas inzetten bij hoge afvoeren

In de analyses is het effect van de gestuurde variant van Rijnstrangen onderzocht met de aanname dat het gebied ingezet wordt bij afvoeren van 8.000 m³/s en hoger. Het kan echter effectiever zijn om pas later in te zetten, als de bijdrage aan waterveiligheid bij afvoeren net boven de 8000 m³/s gering is. De schade in het gebied die bij het inzetten ontstaat, treedt dan minder frequent op. In deze gevoeligheidsanalyse is er voor gekozen om twee extra inzetniveaus door te rekenen: 13.000 en 16.000 m³/s. Basisvariant is inzet van de gestuurde variant in 2070.

Ook is een indicatie van de verwachte inzetfrequentie gemaakt. De inzetfrequentie neemt toe in de tijd door toename van de afvoeren. Daarom is onderscheid gemaakt tussen de zichtjaren 2015, 2050 en 2100. De frequenties zijn gebaseerd op de GRADE W+ afvoerstatistiek.

Uit de resultaten in Tabel 10 blijkt dat, in ieder geval voor de normtrajecten 43-4 en 52-2, geldt dat de baten sterk afhangen van de inzetfrequentie: 10% verschil bij inzet vanaf 13.000 m³/s

en 55% verschil bij inzet vanaf 16.000 m³/s.. Vooral de dijkversterkingsbaten zijn hier erg gevoelig voor, en vooral de stap van 13.000 naar 16.000 m³/s maakt veel verschil. Anderzijds is de stap in baten van 8.000 naar 13.000 m³/s niet zo groot, terwijl de inzetfrequentie in 2070 wel van ca. eens per 3 jaar naar eens per 30 jaar gaat.

Variant	CW	CW	CW	Inzetfrequentie [1/jaar]		
	Dijkenbaten [mln euro]	Risicobaten [mln euro]	Totale baten [mln euro]	2015	2050	2100
Basisvariant	9,1	1,3	10,4	1/5	1/3	1/2
Inzet vanaf 13.000 m ³ /s	7,8	1,1	9,0	1/121	1/41	1/17
Inzet vanaf 16.000 m ³ /s	3,3	1,2	4,6	1/6474	1/1356	1/286

Tabel 10 Resultaten gevoeligheidsanalyse inzetniveau gestuurde variant (contante waarde)

5.4 Halveren waterstandseffect

In de analyses is gerekend zonder onzekerheden in het waterstandseffect van Rijnstrangen. Door het meenemen van onzekerheden kan het waterstandseffect echter lager uitvallen dan nu berekend, maar het is niet gekwantificeerd hoeveel. In deze gevoeligheidsanalyse is in beeld gebracht hoe de kosteneffectiviteit verandert als de waterstands daling halveert. Uitgangspunt is inzet van de gestuurde variant in 2070.

Uit de resultaten in Tabel 11 blijkt dat, in ieder geval voor de normtrajecten 43-4 en 52-2, geldt dat de baten ongeveer lineair afnemen met het waterstandseffect (50% verschil bij halveren effect).

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]
Basisvariant	9,1	1,3	10,4
Halveren waterstands- effect	5,0	0,2	5,2

Tabel 11 Resultaten gevoeligheidsanalyse onzekerheid in waterstandseffect

5.5 Inzetten t.b.v. verlenging levensduur dijken

In de analyses is het effect van Rijnstrangen bij de inzetjaren 2030 en 2050 in mindering gebracht op de dijkversterking, ook als de dijkversterking wordt uitgevoerd voordat Rijnstrangen wordt ingezet. Bij inzetjaar 2070 is het effect ingezet voor levensduurverlenging, oftewel uitstel van de 2^e versterkingsronde. De waterstands daling kan ook in 2030 en 2050 worden ingezet voor levensduurverlenging, zoals is gedaan bij inzet in 2070, bijvoorbeeld omdat het ongewenst is om al rekening te houden met een maatregel die nog niet is uitgevoerd. In deze gevoeligheidsanalyse is in beeld gebracht hoe de kosteneffectiviteit van de

inzetjaren 2030 en 2050 verandert als de waterstandsdaling wordt gebruikt voor levensduurverlenging oftewel uitstel van de 2^e versterkingsronde.

Uit de resultaten in Tabel 12 blijkt dat, in ieder geval voor de normtrajecten 43-4 en 52-2, geldt dat de totale baten groter worden als Rijnstrangen wordt ingezet ten behoeve van levensduurverlenging. Dit komt doordat de risicotoename op trajecten die eerder worden versterkt dan de inzet van Rijnstrangen, wordt omgezet in een risicoreductie, terwijl de kostenreductie op dijken slechts 10% afneemt. Als Rijnstrangen wordt ingezet voor levensduurverlenging is het inzetjaar vooral van belang voor de risicoreductie, die afneemt naarmate later wordt ingezet. Doordat de contante kosten echter ook afnemen met de tijd, is het niet kosteneffectiever om Rijnstrangen vroeg in te zetten voor risicoreductie; de kostenbatenratio is in 2070 nog steeds gunstiger dan in 2030.

De risicobaten bij 'Minder versterking, inzet 2030' zijn relatief laag voor deze twee normtrajecten; deze zijn veel kleiner dan de Basisvariant, terwijl dit niet zo is voor alle Rijntakken samen (Tabel 3). Dit komt doordat traject 43-4 bij inzet in 2030 een negatieve risicobaat heeft die de positieve risicobaat van 52-2 compenseert. Over de totale Rijntakken gezien zijn de positieve risicobaten bij inzet in 2030 veel groter dan de negatieve.

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]
Minder versterking, inzet 2030	9,6	0,2	9,8
Minder versterking, inzet 2050	9,6	-8,8	0,8
Levensduurverlenging, inzet 2030	8,6	9,5	18,1
Levensduurverlenging, inzet 2050	9,1	6,2	15,3
Basisvariant (levensduur- verlenging, inzet 2070)	9,1	1,3	10,4

Tabel 12 Resultaten gevoeligheidsanalyse levensduurverlenging

6 Onzekerheden en aandachtspunten

Retentie is een maatregel die op veel aspecten afwijkt van andere ruimtelijke maatregelen voor hoogwaterbescherming, met name dat de werking veel gevoeliger is voor onzekerheden. Dit vraagt om een aangepaste aanpak, met name wat betreft de omgang met onzekerheden. In dit project was er onvoldoende tijd en budget voor een grondige onzekerheidsanalyse. Daarom is er voor gekozen om de diverse onzekerheden en aandachtspunten die een rol spelen, wel te benoemen en waar mogelijk een inschatting van de grootte te geven, maar niet volledig uit te werken.

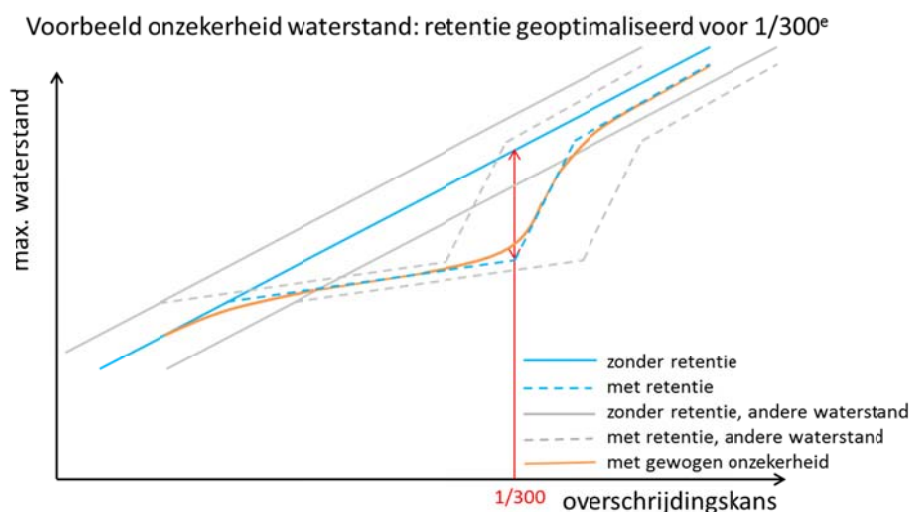
6.1 Onzekerheden in het hydraulisch effect

Het hydraulisch effect van retentie wordt vaak berekend op basis van een deterministische berekening, waarbij een verwachte waarde wordt aangenomen voor onzekere parameters zoals afvoergolfvorm, bodemruwheid en waterstand. Doordat retentie met een vast instroomniveau slechts over een beperkt bereik aan waterstanden of afvoeren effectief is en niet meer werkt als het maximale volume is bereikt, is deze maatregel veel gevoeliger voor onzekerheden dan andere rivierverruimende maatregelen zoals een nevengeul. Deze paragraaf behandelt (de invloed van) de belangrijkste onzekerheden in kwalitatieve zin.

6.1.1 Waterstanden (o.a. door ruwheid, bodemligging)

De waterstand die optreedt bij de inlaat van het retentiegebied gegeven een bepaalde afvoer, is onzeker vanwege onzekerheid in de bodemruwheid, bodemligging en eventuele effecten van andere ingrepen.

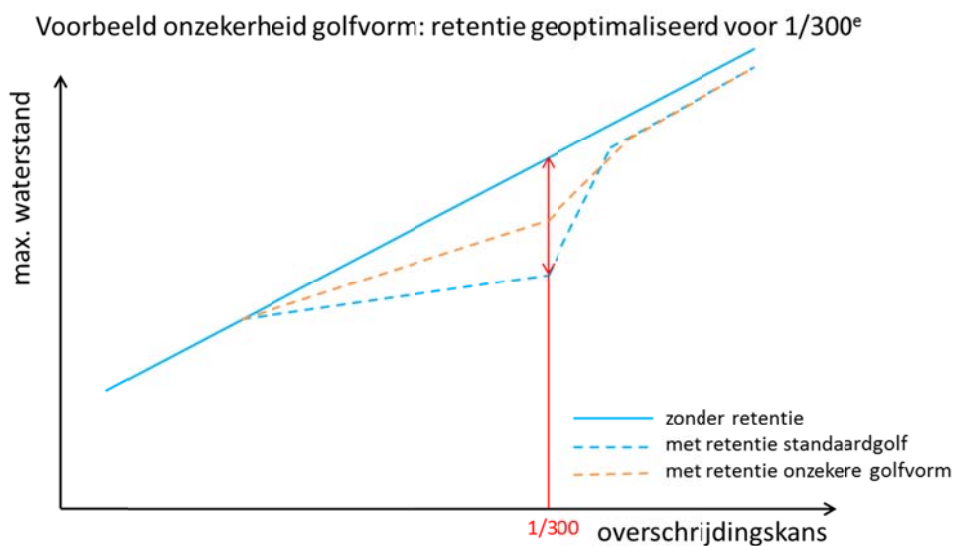
Variaties in de *waterstand* bij een vaste inlaat zorgen voor *verschuivingen* van het maximale effect naar een andere frequentie van voorkomen (zie Figuur 16). Het effect bij de frequentie waarop is geoptimaliseerd wordt daardoor altijd kleiner, maar bij een andere frequentie kan het effect groter worden. De onzekerheden zorgen voor het uitsmeren van het effect over de hogere en lagere afvoeren. In hoeverre onzekerheid in de waterstand leidt tot vermindering van het waterstandseffect door retentie is niet gekwantificeerd.



Figuur 16 Fictief voorbeeld van de invloed van onzekerheid in de waterstand op het effect van retentie

6.1.2 Golfvorm

Variaties in de *golfvorm* zorgen altijd voor een *vermindering* van het maximale effect bij retentie met een vast inzetniveau (zie Figuur 17). In de vigerende werkwijze wordt gerekend met standaardafvoergolven, met een gemiddelde duur. Hierop worden retentiegebieden geoptimaliseerd. Als een hoogwatergolf breder is, is het effect echter kleiner omdat een retentiegebied dan (te snel) vol is. Door rekening te houden met deze kleinere effecten, gewogen naar de kans van voorkomen, wordt het gewogen effect kleiner. Studies naar dit effect voor de Lob van Gennep (Maas) en de Rijnstrangen laten zien dat het effect van retentie op de waterstanden ca. 30-60% kleiner wordt als rekening wordt gehouden met de golfvorm (HKV, 2015; HKV, 2016). Bij sturing op basis van betrouwbare voorspellingen kan een deel van deze onzekerheid worden voorkomen, omdat hierbij expliciet rekening kan worden gehouden met andere golfvormen.



Figuur 17 Fictief voorbeeld van de invloed van onzekerheid in de golfvorm op het effect van retentie

6.1.3 Type inlaat

Retentie kan worden uitgevoerd met verschillende typen inlaten, zoals een vaste drempel, kleppen die bij een vaste afvoer opengaan en niet meer kunnen worden bijgestuurd, actieve sturing op een vooraf bepaald afvoer- of waterstandsniveau of sturing op basis van hoogwatervoorspellingen. De verschillende typen hebben ieder hun eigen aandachtspunten.

Waterstandseffect

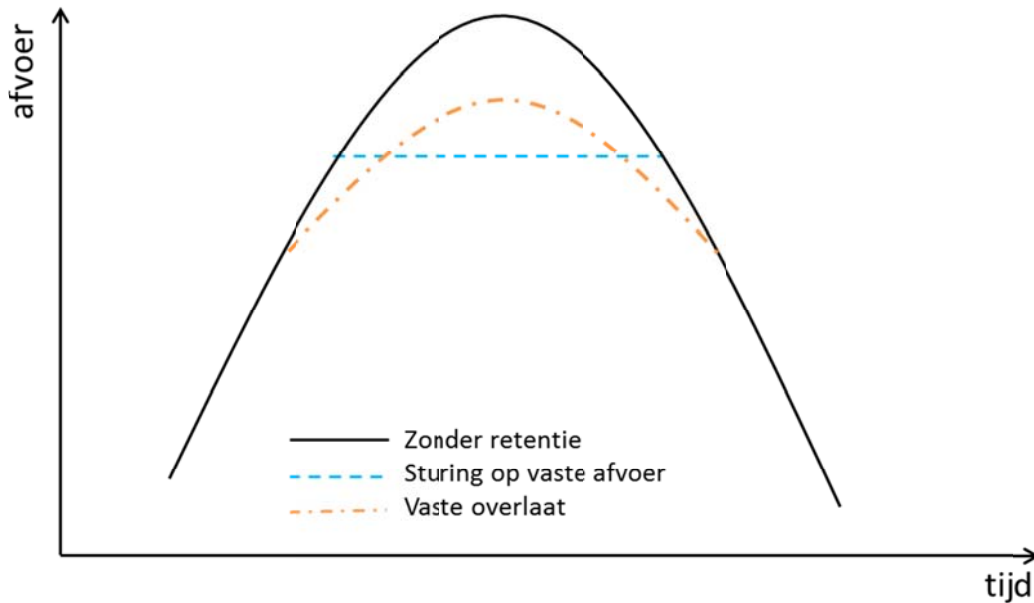
Een vaste overlaat, of constructie met kleppen die bij een vaste afvoer opengaan, topt een 'zekere' standaardafvoergolf minder goed af dan een sturing op een vooraf bepaald afvoerniveau (zie Figuur 18). Daarentegen heeft een vaste overlaat bij meer afvoerniveaus en golfvormen nog een effect, en is dus robuuster onder onzekerheid dan actieve sturing op een vooraf bepaald afvoer- of waterstandsniveau (zie Figuur 19). Dit blijkt o.a. uit de resultaten van HKV (2015).

Wanneer gebruik kan worden gemaakt van goede afvoervoorspellingen, kan een relatief groot effect worden bereikt bij diverse piekafvoeren en golfvormen (zie ook paragraaf 6.2). De onzekerheid uit natuurlijke variabiliteit wordt dan deels opgeheven door gebruik te maken van

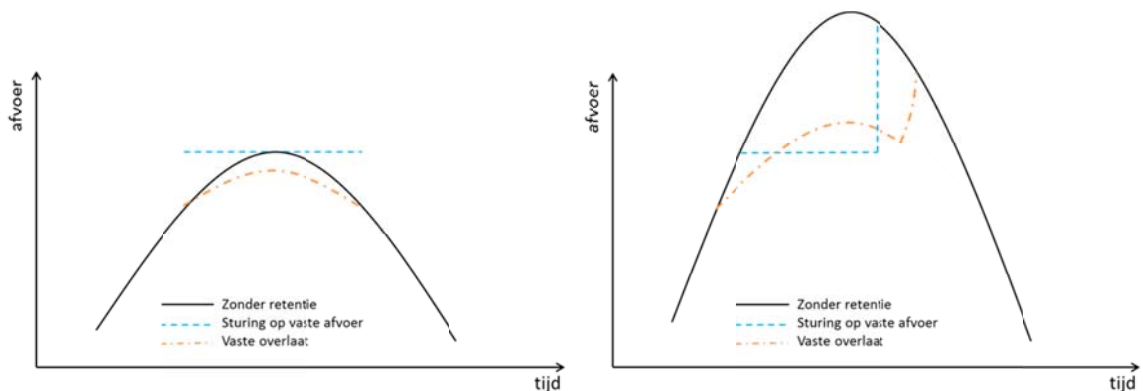
de voorspellingen. Omdat de voorspelling onzeker is, blijft echter ook het waterstandseffect bij sturing op basis van voorspellingen onzeker.

Menselijke beslissing

Als retentie een onderdeel is van de hoogwaterbescherming, waar dus rekening mee wordt gehouden bij de dimensionering van dijken, is het belangrijk dat er geen menselijke keuze meer nodig is ten tijde van een hoogwater. Daarom is bij een gestuurde inlaat een vast (eventueel risicogestuurd) inzetprotocol wenselijk, dat is gebaseerd op een real-time hoogwatervoorspelling, zoals dat bijvoorbeeld wordt toegepast bij de Maeslantkering.



Figuur 18 Effect verschillende typen inlaten op afvoergolf



Figuur 19 Effect verschillende typen inlaten op afvoergolf, bij lagere (links) of hogere (rechts) afvoeren dan waar op is geoptimaliseerd.

6.1.4 Invloed op afvoercapaciteit Duitsland

Rivierverruiming zoals Rijnstrangen die invloed hebben tot aan de Duitse grens, hebben een nadelig neveneffect, namelijk dat ze afvoeren beïnvloeden die Nederland bereiken. Zo kunnen in bepaalde gevallen de afvoeren en waterstanden juist toenemen langs alle Rijn takken.

De waterstandsval door Rijnstrangen werkt via de stuwkromme door tot aan Emmerich (ca. 10 km bovenstrooms van de inlaat van Rijnstrangen). Door die waterstandsval neemt de afvoercapaciteit (de afvoer waarbij de waterstand gelijk is aan de dijkhoogte) bij Emmerich toe. Deze afvoercapaciteit is nu circa 18.000 m³/s (ENW, 2016). Hogere afvoeren bij Lobith treden niet op door overstromingen in het Duitse deel van de Rijn, met name bij Emmerich. Door Rijnstrangen kan de maximale afvoer toenemen, bijvoorbeeld naar 18.100 m³/s. Dijken waarvan de benodigde hoogte nu nog begrensd wordt door het aftopniveau, zullen daardoor hoger moeten worden. Dit betreft vooral dijken met een relatief strenge norm.

Deze negatieve systeemeffecten kunnen voorkomen worden door Rijnstrangen zodanig in te zetten dat het effect bij afvoeren van 18.000 m³/s en hoger, klein is. Bijvoorbeeld door de inlaat bij dergelijke hoge afvoeren dicht te zetten in geval van een gestuurde inlaat. Dit zijn echter juist kritieke afvoeren voor bepaalde dijken. Rijnstrangen kan dan wel worden ingezet, maar de waterstandsverlaging bij 18.000 m³/s zal kleiner zijn dan uit de huidige berekeningen volgt.

Om de effecten van dit mechanisme te kwantificeren is een hydrodynamisch model nodig van de Duits-Nederlandse Rijn waarin ook de dijken en het overstroombare gebied zijn opgenomen. Een dergelijk model is echter (nog) niet beschikbaar.

6.1.5 Uitwerking onzekerheden

Deze paragraaf schetst hoe de invloed van onzekerheden op het effect van Rijnstrangen onderzocht kan worden. De belangrijkste onzekerheidsbronnen bij een vaste inlaat zijn de lokale waterstand (door ruwheid, morfologie) en de vorm of duur van de afvoergolf. Voor de variant met sturing op voorspelling komt daar kennisonzekerheid in de voorspelling van de afvoergolf bij.

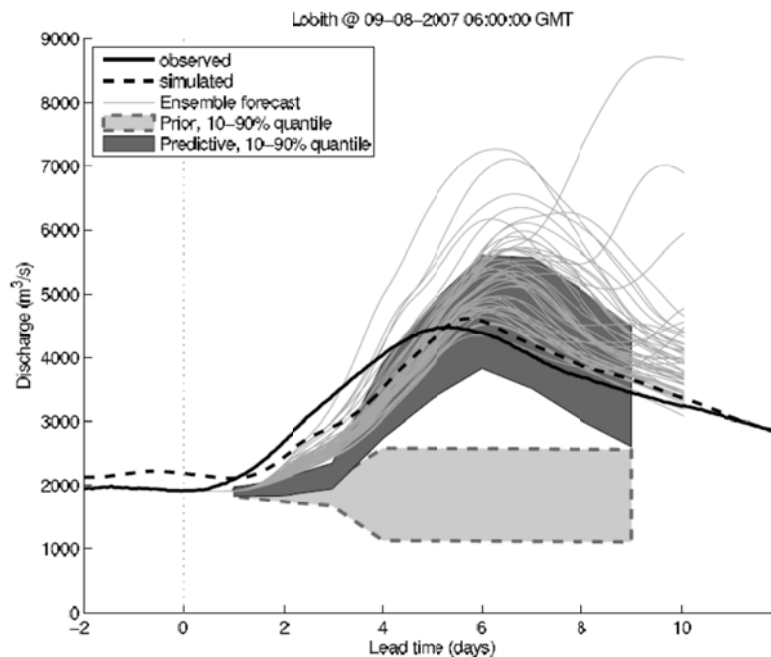
De onzekerheid in het waterstandseffect van de vaste inlaat kan bepaald worden door per afvoerniveau het waterstandseffect met WAQUA te berekenen bij verschillende realisaties van de stochastische lokale waterstand en golfvorm (bijvoorbeeld uit GRADE). Bijvoorbeeld 5 realisaties van waterstanden, 5 realisaties van golfvormen, en 1 standaardgolf ($5 * (5 + 1) = 30$ berekeningen per afvoerniveau). Vervolgens is het verwachte waterstandseffect per afvoerniveau het gewogen gemiddelde van de effecten, gewogen naar de kans op de stochastische. Tenslotte kan men die QdH-relatie met gewogen waterstandseffecten doorrekenen op kostenreductie.

De onzekerheid in het waterstandseffect van de gestuurde inlaat bestaat vooral uit de mogelijkheid dat de afvoergolf afwijkt van de voorspellingen, en dat daar niet meer op geanticipeerd kan worden met de sturing (zie ook paragraaf 6.2). Het gevolg is dat het retentiegebied of te vroeg vol zit, of niet volledig wordt gebruikt. Deze onzekerheid kan worden gekwantificeerd door gebruik te maken van historische hoogwaters met ensemble-voorspellingen, en deze te simuleren met een simpel (niet hydrodynamisch) model in combinatie met een sturingsalgoritme gebaseerd op de voorspellingen. Per hoogwater kan daarmee berekend worden hoe groot de behaalde afvoerreductie is met onzekerheden en zonder onzekerheden (deterministische voorspelling).

6.2 Sturing op basis van voorspellingen

Een gestuurde inlaat heeft de meeste potentie wanneer gebruik gemaakt kan worden van hoogwatervoorspellingen. Dan kan namelijk het hele retentievolume worden ingezet bij verschillende afvoerniveaus en golfvormen. Bij een (verwachte) piekafvoer van 12.000 m³/s wordt het gebied bij een lagere afvoer ingezet dan bij een (verwachte) piekafvoer van 16.000 m³/s. En wanneer een langdurig hoogwater wordt verwacht wordt pas bij een hogere afvoer ingezet, dan wanneer een kort hoogwater wordt voorspeld. Op die manier kan retentie een positief effect hebben op trajecten met zowel een strengere als minder strenge norm. De afvoervoorspelling bevat echter een grote onzekerheid, die toeneemt met de voorspeltijd (zie bijvoorbeeld de 'predictive' onzekerheidsband in Figuur 20). Daardoor is het mogelijk dat het gebied op een bepaald moment wordt ingezet, terwijl na inzet onverwacht nog een hogere hoogwaterpiek optreedt. Het effect van het gebied is dan nihil. Dit introduceert dus een extra onzekerheidsbron.

In paragraaf 3 is een inschatting gemaakt hoe effectief een variant met sturing op voorspellingen kan zijn, uitgaande van een volledig zekere hoogwatervoorspelling.



Figuur 20 Onzekerheid in afvoervoorspelling, gebaseerd op ensemble voorspellingen van verschillende modellen en parameters (Reggiani et al., 2009).

6.2.1 Aanzet voor uitwerking gestuurde variant

Het beslisprobleem bij een gestuurde inlaat is wanneer (vanaf welk afvoerniveau) de inlaat geopend dient te worden gegeven een (ensemble⁵)voorspelling van de afvoergolf. Deze beslissing kan gebaseerd worden op twee denklijnen:

1. Een maximalisatie van de verwachte piekafvoerdaling tijdens de top van het hoogwater;
2. Een minimalisatie van het verwachte overstromingsrisico.

⁵ Een ensemble bestaat uit meerdere deterministische voorspellingen uit een model. Elke voorspelling in ensemble wordt met andere initiële condities gemaakt.

Bij optie 1 wordt voor een aantal inzetniveaus i de piekafvoerdaling dQ ingeschat van iedere trekking j uit de ensemble voorspellingen⁶. Vervolgens wordt per inzetniveau het gewogen gemiddelde (verwachtingswaarde) genomen van de piekafvoerdalingen van alle trekkingen. Het inzetniveau met de hoogste gewogen gemiddelde piekafvoerdaling door het inzetten van de retentiemaatregel wordt gekozen. Na een zekere tijd is er een nieuwe voorspelling beschikbaar, en wordt het inzetniveau geüpdatet door dezelfde procedure te herhalen met de nieuwe ensemblevoorspelling. Het kan zijn dat na verloop van tijd blijkt dat het gebied te vroeg is ingezet; het effect van het gebied is dan kleiner dan verwacht. Deze 1^e optie is naar verwachting relatief eenvoudig en snel toe te passen, omdat het optimalisatiealgoritme alleen gebruik maakt van de afvoer bij Lobith, en niet van hydraulische berekeningen of risicoberekeningen. Het optimale inzetniveau is gelijk aan:

$$\arg \max_{i \in [6000, 20000]} E(dQ_{i,j})$$

Bij optie 2 wordt voor een aantal inzetniveaus i het *overstromingsrisico* R ingeschat van iedere trekking j uit de ensemble voorspellingen. Vervolgens wordt per inzetniveau het gewogen gemiddelde genomen van de risico's van alle trekkingen. Het inzetniveau met het laagste gewogen risico wordt gekozen. In deze optie kunnen de kosten van het inzetten van de maatregel expliciet worden meegenomen door deze af te wegen tegen het vermeden risico door overstromingen. Het optimale inzetniveau is gelijk aan:

$$\arg \min_{i \in [6000, 20000]} E(R_{i,j})$$

Het risico kan berekend worden door het combineren van de kansverdeling van de afvoer (uit ensemble), QH-relaties, fragility curves en potentiële schades.

$$R = f(P_f, S)$$

$$P_f = f(Q, QH, FC)$$

Aandachtspunt bij deze optie is de benodigde rekentijd om het risico in te schatten. Hiervoor is een veel uitgebreidere analyse nodig dan voor optie 1.

De berekeningen in optie 1 en 2 moeten herhaald worden als er een nieuwe voorspelling beschikbaar komt.

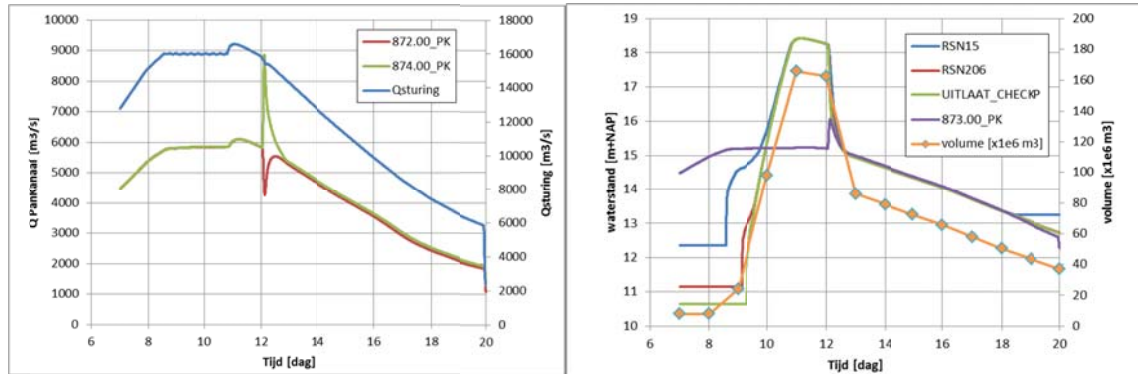
Het voordeel van optie 1 is de eenvoud, rekentijd en uitlegbaarheid. Het voordeel van optie 2 is dat gebieden met een groot risico sterker meegewogen worden in het algoritme, en dat de schade in Rijnstrangen expliciet kan worden meegewogen.

6.2.2 Leegloopduur

Om in beeld te brengen hoe snel het gebied leeggemaakt kan worden, is aan de benedenstroomse zijde bij het Pannerdensch Kanaal een uitlaatconstructie toegevoegd in het model nabij rivierkilometer 873 waar het water onder vrij verval uit het gebied kan stromen. Er is dus niet gewerkt met pompen. Met deze modelaanpassing is een berekening gemaakt met een instroom vanaf 16.000 m³/s bij een afvoergolf van 17.000 m³/s. Wanneer de afvoer zakt onder de 16.000 m³/s, wordt de uitlaat geopend. In ongeveer 10 uur is de waterstand in

⁶ Hierbij wordt aangenomen dat elke trekking van de ensemble voorspellingen de kans van voorkomen gelijk aan $1/N$ heeft, N = aantal trekkingen in de ensemble.

Rijnstrangen gezakt tot het peil in het Pannerdensch Kanaal. Daarna is het leeglopen van het gebied afhankelijk van hoe snel het hoogwater zakt. Bij deze standaardafvoergolf duurt het nog minstens 10 dagen voordat 90% van het retentievolume weer beschikbaar is. De leegloopduur van het gebied is naast de schade voor het gebied ook van belang als gebruik wordt gemaakt van actieve sturing.



Figuur 21 Afvoeren en waterstanden op verschillende punten in het Pannerdensch Kanaal en Rijnstrangen tijdens het openen van het uitlaatwerk.

6.3 Onzekerheid in berekende kostenreductie en risicoreductie

De berekende kostenreductie bevat een aantal onzekerheidsbronnen. De belangrijkste zijn:

1. De lokale kostenreductie is afhankelijk van het referentiepakket (maar op riviertakniveau wel redelijk lineair). Het gebruikte referentiepakket Dijken+ is een klein pakket, in vergelijking met bijvoorbeeld de VKS. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dit effect beperkt te zijn.
2. Waterschappen geven aan dat de berekende dijkversterkingskosten hoog zijn vergeleken met hun ervaring. Daardoor zijn de kostenreducties mogelijk ook hoog in vergelijking met ervaringsgetallen.
3. De gebruikte piping- en macrostabiliteitsgegevens van de Nederrijn-Lek zijn nog niet geverifieerd door de waterschappen. De opgaves voor piping zijn mogelijk te conservatief vanwege tussentijds uitgevoerde dijkversterkingen.

De belangrijkste onzekerheidsbronnen in de berekende risicoreductie zijn:

1. Het initiële risico wordt gedomineerd door de huidige grote faalkansen. Kleine verschillen in de faalkansberekening geven ook verschillen in de risicoreductie.
2. De pipingfaalkansen zijn gecorrigeerd op basis van VNK kansen. Wanneer de kansen in werkelijkheid groter zijn dan in VNK berekend, is de risicoreductie op korte termijn ook groter.
3. De afname van het risico door vermindering van de gevolgen (waterdiepte in geval van een overstroming) is niet meegenomen.

6.4 Kosten van maatregel Rijnstrangen

De berekeningen van de kosten/baten verhouding zijn gebaseerd op investeringskosten van 632 mln euro, die horen bij de DPR variant Rijnstrangen klein (9001k_hl). Deze raming betreft de meest waarschijnlijke kosten, prijspeil 2013. Als bandbreedte op de kosten is +/-60%

aangegeven. Deze paragraaf beschrijft hoe die kosten zijn opgebouwd, en hoe de belangrijke kostenposten kunnen wijzigen door andere uitgangspunten/varianten.

Opbouw kostenraming

De kosten van 632 mln zijn ongeveer als volgt opgebouwd:

- Investeringskosten: 473 mln
 - Bouwkosten: 300 mln
 - Benoemde directe kosten: 217 mln
 - Inlaat/uitlaatconstructies: 165 mln
 - Nieuwe dijken: 51 mln
 - Verhogen en versterken dijken: 0
 - Indirect+onbenoemd
 - Vastgoed: 125 mln
 - Schadevergoeding landbouw: 109 mln
 - Engineering: 41 mln
 - Bijkomend: 6 mln
- Objectoverstijgende risico's: 71 mln
- BTW: 88 mln

De grootste kostenposten zijn de inlaat, nieuwe dijken en schadevergoeding landbouw.

Inlaat- en uitlaatconstructies

Voor de inlaat- en uitlaatconstructies is in deze kostenraming gerekend met een gestuurde inlaat van 1560 m breed en een gestuurde uitlaat van 300 m breed. De dimensies van de inlaat zijn veel groter dan in de modelberekeningen gebruikt. In het model functioneert de gestuurde inlaat over een breedte van maximaal 750 m. Bij een inlaat van 750 m in plaats van 1560 m zouden de kosten mogelijk 75 mln euro lager uit kunnen vallen. Bij een vaste inlaat kunnen de kosten van de inlaat wellicht nog verder omlaag.

Nieuwe dijken

Voor de nieuwe dijken is in deze raming gerekend met 12,7 km nieuwe keringen, met name om Spijk en op de Duitse grens, maar niet met het versterken van de ca. 25 km bestaande dijken om het gebied. Wanneer deze dijken primaire keringen worden, zullen deze naar verwachting niet voldoen aan de sterkte-eisen vanuit de waterveiligheidsnormen. Deze kostenpost zal hierdoor wellicht nog stijgen (inschatting orde 75 mln bij vuistregel 3 mln/km).

Schadevergoeding landbouw

Voor de schadevergoeding landbouw is gerekend met 2.900 ha (=29km²) landbouwgrond á 3,77 euro/m². Het is niet bekend waar dit bedrag op is gebaseerd, en of hierin rekening is gehouden met de instroomfrequentie⁷. In deze raming is niet uitgegaan van de aankoop van gronden en opstallen. Als het gebied frequent ingezet zal worden, ligt het voor de hand om dat wel mee te nemen in de raming, waardoor de kosten zullen toenemen. Anderzijds kan indien voor een schadevergoeding wordt gekozen, deze afhankelijk worden gemaakt van de inzetfrequentie.

De kosten zouden toe moeten nemen met de inzetfrequentie van de variant. Bij frequente inzet moet dan worden uitgegaan van aankoop van gronden en opstallen, met de hoogste kosten. Bij laagfrequente inzet kan worden gewerkt met een compensatie in geval van daadwerkelijk

⁷ Merk op dat de aankoop van landbouwgrond 2x zo duur is (7,5 euro/m²).

inzetten. De jaarlijks verwachte waarde van de die kosten is gelijk aan de inzetfrequentie x schade bij instromen.

Conclusie

De verwachte hogere kosten van de dijkversterkingen worden gecompenseerd door de verwachte lagere kosten van de inlaatconstructie. Daardoor wordt de verandering in kosten met name bepaald door de inzetfrequentie. Bij frequente inzet (elke paar jaar) verwachten we hogere kosten dan de geraamde 630 mln. Bij zeer infrequente inzet (eens per 1000 jaar) kunnen de kosten lager worden dan de geraamde 630 mln.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Deze studie geeft een eerste inzicht in de potentiële kostenbesparingen op dijkversterkingen en de overstromingsrisicoreductie door het inzetten van Rijnstrangen. Hiervoor zijn twee hoofdvarianten onderzocht:

1. een variant uitgaande van sturing op basis van voorspellingen;
2. een variant met een vaste instroomdrempel.

Per hoofdvariant is ook gevarieerd naar het moment waarop de maatregel wordt ingezet of gerealiseerd (2030, 2050, 2070). Daarbij wordt het effect van Rijnstrangen bij de inzetjaren 2030 en 2050 in mindering gebracht op de omvang van de dijkversterkingsopgave van de 1^e dijkversterkingsronde, en bij het inzetjaar 2070 wordt het effect ingezet voor *uitstel* van de 2^e versterkingsronde.

Baten van verschillende varianten

Tabel 13 geeft een samenvatting van de berekende contante baten en baten/kosten verhoudingen zonder onzekerheden (zie onder voor toelichting op de onzekerheden). De gepresenteerde baten/kostenratio is bepaald op basis van de totale baten, maar voor de kosteneffectiviteit hangt het er sterk vanaf of de risicobaten in de baten/kostenratio mogen worden meegerekend. Hierover is nog discussie in het kader van de MKBA Lange Termijn Ambitie Rivieren (LTAR), met name omdat de onderlinge timing van dijkversterking en rivierverruiming bepalend is voor de risicobaar, terwijl de timing van dijkversterking als uitgangspunt is gehanteerd. Het is dus belangrijk om ook de verhouding van kosten en dijkenbaten in Tabel 13 te beschouwen.

Variant	CW Dijkenbaten [mln euro]	CW Risicobaten [mln euro]	CW Totale baten [mln euro]	CW Kosten [mln euro]	Baten/ kosten ratio
Gestuurd, inzet in 2030	183	431	614	570	1,1
Gestuurd, inzet in 2050	174	-182	-7	200	0,0
Gestuurd, inzet in 2070	148	42	189	80	2,4
Vast vanaf 12000, inzet in 2030	31	52	84	570	0,15
Vast vanaf 12000, inzet in 2050	28	-10	19	200	0,09
Vast vanaf 12000, inzet in 2070	18	8	26	80	0,32

Tabel 13 Samenvatting resultaten optimalisaties. Kosten en baten in contante waarde (CW) over de periode 2025-2125.

De baten/kosten verhouding zonder onzekerheden is in een aantal gevallen groter dan 1:

- Variant met sturing op afvoersvoorspellingen. Inzet in 2030 ten behoeve van het verkleinen van de dijkversterkingsopgave. De hoge baten/kostenratio komt grotendeels door de grote risicobaten vanwege het reduceren van de overstromingskans vóór de 1^e dijkversterking. Zonder risicobaten is de baten/kostenratio 0,3 (zie Tabel 3).

- Variant met sturing op afvoervoorspellingen. Inzet in 2070 ten behoeve van het verlengen van de levensduur van de dijken. De gunstige baten/kostenratio komt grotendeels door de dijkenbaten. Zonder risicobaten is de baten/kostenratio 1,8 (zie Tabel 3).

Op basis van de gevoeligheidsanalyse (paragraaf 5.5) verwachten we ook een baten/kosten verhouding groter dan 1 bij inzet van de gestuurde variant in 2050 waarbij wordt ingezet voor levensduurverlenging.

Voor wat betreft het inzetjaar, ontstaat de meest gunstige baten/kosten verhouding als Rijnstrangen in 2070 wordt ingezet, om een tweede dijkversterkingsronde uit te stellen. De sterkteopgave die de eerste versterkingsronde domineert is dan veel kleiner als de norm gelijk blijft, zodat rivierverruiming in het algemeen effectiever wordt. Inzet voor de lange termijn (2070) is het meest gunstig ongeacht het uitgangspunt om de risicobaten wel of niet mee te nemen.

De variant met vaste inlaat is het meest effectief als deze wordt ingezet in 2070 ten behoeve van het verlengen van de levensduur van de dijken en het gebied instroomt vanaf een afvoer van 12.000 m³/s. Deze variant is een factor 5-10 minder effectief dan de gestuurde variant, en heeft een baten/kostenratio die veel kleiner is dan 1. Dat dit effect veel kleiner is dan bij de gestuurde inlaat, komt onder andere doordat er geen mogelijkheid is om de inlaat te sluiten als de waterstand in Rijnstrangen te hoog wordt. In plaats daarvan moet het instroomdebiet zo zijn geknepen dat de waterstand niet te hoog wordt. Maar daardoor wordt het waterstandseffect ook kleiner dan dat van de gestuurde variant.

Nieuwe normen

Bij het vormgeven van de VKS was de overschrijdingskansbenadering nog van toepassing. In de VKS is daarom ingezet op een retentiemaatregel die bij een bepaalde maatgevende afvoer (18.000 m³/s) een afvoerreductie van 500 m³/s bereikt. Dit is ook mogelijk met een vaste inlaat. Met de nieuwe normering is er door normdifferentiatie niet meer één maatgevende afvoer. Daardoor is een retentiemaatregel die alleen bij een bepaalde afvoer werkt, nooit voor alle normtrajecten effectief. Om voor alle normtrajecten effectief te zijn, moet de maatregel bij meerdere afvoeren effect hebben. Uit deze studie blijkt dat dit met een vaste inlaat niet kosteneffectief te realiseren is, waardoor met de nieuwe normering waarschijnlijk meer potentie zit in sturing op voorspellingen. Voorwaarde is uiteraard dat de voorspellingen voldoende betrouwbaar zijn.

Gevoeligheidsanalyses

De gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd op de gestuurde variant in 2070 (omdat deze de gunstigste kosten/batenratio heeft) en zijn alleen uitgevoerd voor de dijktrajecten 43-4 (noordzijde Waal) en 52-2 (westzijde IJssel). De resultaten kunnen anders uitvallen als alle normtrajecten worden meegenomen, dus deze uitkomsten moeten worden beschouwd als eerste indicatie.

De gevoeligheid van de baten voor het uit te voeren pakket rivierverruiming is beperkt (10%). De gevoeligheid voor de grootte van de piping- en macrostabiliteitsopgave is iets groter (15-20%). De baten nemen beperkt af (10%) als de gestuurde variant pas bij 13.000 m³/s wordt ingezet, maar hierdoor neemt de inzetfrequentie en bijbehorende schade wel met een factor 10 af. Bij inzet vanaf 16.000 m³/s nemen de baten sterker af (50%). Halveren van het waterstandseffect geeft ongeveer een halvering van de baten. Inzetten van Rijnstrangen voor

levensduurverlenging voorkomt een risicoverhoging, en zorgt daardoor voor meer baten, maar het is kosteneffectiever om dat pas in 2070 te doen.

Onzekerheden en aandachtspunten

Deze inschatting moet worden beschouwd als een optimistische inschatting, zeker voor de gestuurde variant, omdat de effecten van onzekerheden nog niet zijn gekwantificeerd. Daarnaast is voor de gestuurde varianten het onrealistische uitgangspunt gekozen dat iedere afvoergolf optimaal kan worden afgetopt door gebruikt te maken van afvoervoorspellingen en een real-time sturing van de inlaat. Dit impliceert dat precies bekend is welke afvoergolf er aan komt. Deze benadering vormt hiermee een 'best-case' scenario. Eerdere studies wijzen uit, dat het effect van retentie altijd kleiner wordt als wel wordt gerekend met onzekerheden. Belangrijke onzekerheidsbronnen zijn de vorm of duur van de afvoergolf, de waterstand ter plaatse van de inlaat, de onzekerheid in de hoogwatervoorspellingen en de invloed van Rijnstrangen op de afvoeren die Nederland binnenkomen. Daarnaast introduceert een gestuurde inlaat een faalkans van het kunstwerk. Als men Rijnstrangen wil inzetten voor het beperken van de waterveiligheidsopgave, is het essentieel om die onzekerheden te kwantificeren.

Daarnaast hangt de baten/kosten verhouding sterk af van de investeringskosten. Een belangrijke post in de raming is schadevergoeding landbouw. Het is onduidelijk of hierbij rekening is gehouden met de inzetfrequentie, en zo ja welke. Bij regelmatig inzetten zullen deze kosten hoger zijn dan bij laagfrequente inzet. Dit bepaalt in sterke mate hoe vaak het gebied mag instromen.

7.2 Aanbevelingen

Indien het gewenst is om de baten van Rijnstrangen op waterveiligheid beter in beeld te krijgen, zijn de belangrijkste benodigde stappen:

1. Onderzoeken of er aanleiding is om de kostenraming van Rijnstrangen aan te passen. Denk bijvoorbeeld aan de inzetfrequentie in relatie tot schadevergoeding/opkopen van gronden, een kleinere inlaatconstructie of de benodigde investeringen in dijken vanwege de nieuwe normering.
2. Verder onderzoeken van de mogelijkheden van sturing op basis van voorspellingen. Denk bijvoorbeeld aan de betrouwbaarheid van de voorspellingen, wel of niet risicogebaseerd sturen en hoe vaak het gebied ingezet moet worden.
3. De genoemde onzekerheden rond de inzet van Rijnstrangen kwantitatief uitwerken en de inschatting van kostenreductie en risicoreductie daarop aanpassen.
4. Aanvullende gevoeligheidsanalyses uitvoeren, bijvoorbeeld van andere discontovoet, innovatieve dijkversterkingsmaatregelen, of een andere fasering van de dijkversterkingen. Maar ook de gevoeligheidsanalyses uit dit rapport aanvullen voor de complete Rijntakken.

8 Referenties

- Asselman, N. (2014) Strategieën DPR doorgerekend op doelbereik (risicoreductie). Deltares rapport 1209392-000-VEB-0030
- Asselman, N. en D. Wagenaar (2016). Risicoreductie door rivierverruiming. Deltares rapport 1230044-000-ZVVS-0027.
- CSO (2013). Technische evaluatie Rijnstrangen. Document 13M2036 RAP, augustus 2013
- ENW (2016). Heeft de Rijnafvoer bij Lobith een maximum? ENW publicatie, februari 2016
- Grave, P. de, O. Levelt, J. Pol, G. Pleijter (2017). Gebruikershandleiding Rivierentool. Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016). Factsheets normering primaire waterkeringen. Getalsinformatie per normtraject. 28 juni 2016.
- HKV (2015). Retentiewerking Maas - Werking in het licht van de nieuwe normering, Rapport PR2962.10, maart 2015
- HKV (2016). Invloed van afvoergolfvorm Rijn op waterstanden en overstromingskansen. Case Retentiegebied Rijnstrangen. Rapport PR3192.10, juli 2016.
- Reggiani, P., M. Renner, A.H. Weerts & P.A.H.J.M. van Gelder (2009). Uncertainty assessment via Bayesian revision of ensemble streamflow predictions in the operational river Rhine forecasting system. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, doi:10.1029/2007WR006758
- Rijkswaterstaat (2017). Gebruik van OKADER instrument. Conceptmemo.
- van Vuren, Saskia, Otto Levelt, Joost Pol, Raymond van der Meij, Peter de Grave, David Nugroho, Wouter ter Horst, Rimmer Koopmans, Peter van der Scheer, Nathalie Asselman, Arno de Kruif (2017). Beleidsstudie Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming. Toepassing op Rijntakken.
- Stijnen, J. (2007). Bergen met onzekerheden. STROMINGEN 13 (2007), NUMMER 2.

Bijlagen

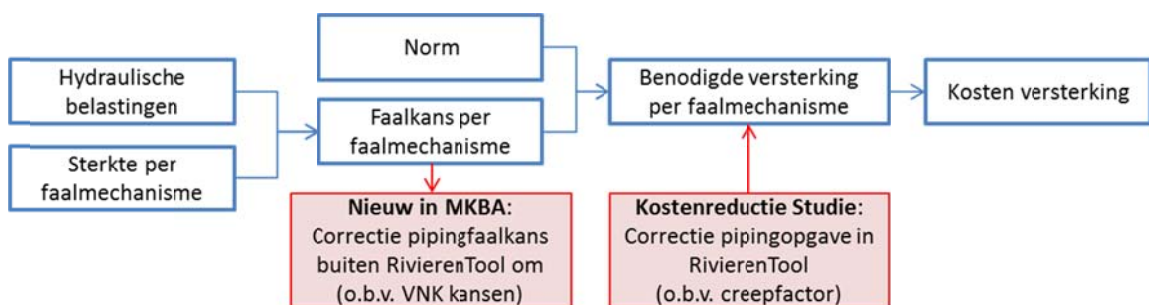
Bijlage A: Correctie van faalkansen RivierenTool

Achtergrond

Het overstromingsrisico van de varianten wordt berekend door de overstromingskansen te combineren met de gevolgen (schade, slachtoffers). De overstromingskansen met en zonder inzet van rivierverruimingen worden berekend met de RivierenTool die is ontwikkeld op basis van de studie Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming (Van Vuren et al., 2017). De RivierenTool berekent per dijkvak het verloop van de faalkans in de tijd, en daaruit volgen de benodigde dijkversterkingen om aan de norm te blijven voldoen en bijbehorende kosten om die dijkversterking te realiseren (zie Figuur 22). De faalkans is dus een tussenproduct in de kostenberekening, en wordt gebruikt als input in de risicoberekening.

De berekende gecombineerde overstromingskansen per normtraject vóór de eerste dijkversterking zijn relatief groot, wat met name wordt veroorzaakt door zeer grote faalkansen voor piping. In de berekening is dus een grote pipingberm nodig om aan de faalkanseis te voldoen. In de Kostenreductie Studie (Van Vuren et al., 2017) is daarom een maximum opgelegd aan de benodigde pipingberm op basis van een creepfactor per riviertak, maar de onderliggende faalkansen zijn nog steeds groot. Na dijkversterking hebben de dijken overigens wel een realistischer faalkansverloop.

De overschatting van de faalkans heeft grote invloed op het berekende overstromingsrisico vóór de eerste dijkversterking en daarmee op de risicoreductie door rivierverruimingen die in die periode worden uitgevoerd. Daarom streven we naar zo realistisch mogelijke faalkansen, waarbij het van belang is dat het effect van rivierverruiming daarin terug te zien is. We hebben gekozen voor het schalen van het faalkansverloop uit de RivierenTool met een factor die is gebaseerd op de pipingfaalkansen uit VNK⁸. Deze faalkanscorrectie wordt in dit memo toegelicht.



Figuur 22 Correctie van pipingopgave in Kostenreductie Studie (Rivierentool) en correctie pipingfaalkansen in dit project

Er is voldoende vertrouwen in de berekende faalkansen (en opgaves) voor overslag en macrostabiliteit. Deze zullen we dus niet corrigeren, mede omdat hierin ook wijzigingen in de hydraulische belasting sinds VNK zijn meegenomen.

Doordat de faalkanscorrectie een nabewerking is buiten de RivierenTool om, heeft deze correctie geen invloed op de berekening van de dijkversterkingsopgave en –kosten. In de RivierenTool

⁸ Na VNK zijn de inzichten rond piping veranderd, o.a. met de nieuwe regel van Sellmeijer, waardoor het de vraag is of VNK wel de juiste bron is om op te ijken.

wordt de dijkversterkingsopgave en –kosten al op een andere manier gecorrigeerd (zie Figuur 22).

Methodes

De faalkansen van piping worden gecorrigeerd aan de hand van de verhouding tussen de kansen uit VNK en de kansen uit RivierenTool in het jaar 2015. Deze verhouding (F) wordt vervolgens toegepast op alle kansen vóór de eerste versterking, zodat de invloed van rivierverruiming in deze periode zichtbaar blijft in de faalkans:

$$Pf_{corr}(t) = Pf_{tool}(t) * F \quad \text{voor } t < t_{1e \text{ versterking}} \quad (4)$$

$$Pf_{corr}(t) = Pf_{tool}(t) \quad \text{voor } t \geq t_{1e \text{ versterking}} \quad (5)$$

Omdat de VNK kansen bekend zijn op vakniveau, worden de doorsnedekansen uit de RivierenTool eerst omgerekend naar vakkansen vanwege het lengte-effect, conform OI2014.

Onderstaande formules beschrijven de correctiefactoren die worden toegepast op de vakkansen. De gecombineerde correctiefactor F is opgebouwd uit een aantal deelfactoren F1 tot F4, om bijvoorbeeld rekening te houden met de verandering in waterstanden sinds VNK.

Deelfactor F1

De factor F1 is de verhouding tussen de pipingfaalkansen uit VNK en RivierenTool:

$$F1 = \frac{Pf_{PIP,VNK2}}{Pf_{PIP,Tool}} \quad (6)$$

Deelfactor F2

Een deel van de verschillen tussen de VNK kansen en kansen uit de RivierenTool kan verklaard worden door verschillen in hydraulische belastingen. Daarom gebruiken we de factor F2; de verhouding tussen overslagfaalkansen uit VNK en RivierenTool:

$$F2 = \frac{Pf_{HT,VNK2}}{Pf_{HT,Tool}} \quad (7)$$

Deze factor kan worden gezien als een maat voor de verandering in hydraulisch belastingen omdat we er vanuit gaan dat de faalkans voor overslag goed wordt berekend in de RivierenTool. Alleen bij dijkvakken waar de dijk is verhoogd na VNK, loopt hier ook het effect van de verhoging doorheen.

Deelfactor F3

De pipingfaalkans reageert minder snel op een verandering in hydraulisch belastingen dan de overslagfaalkans. Uit de berekeningen blijkt dit grofweg een factor 0,5 te zijn op een logaritmische schaal. De factor F3 is de verhouding tussen de pipingfaalkansen uit VNK en RivierenTool, gecorrigeerd voor de invloed van een verandering in hydraulisch belastingen op de pipingfaalkans:

$$F3 = F1 * 10^{0,5 * \log(F2)} \quad (8)$$

Deelfactor F4

Het kan voorkomen dat de faalkans door factor F3 zo ver afneemt, dat deze kleiner wordt dan de faalkanseis, of kleiner dan de ongecorrigeerde faalkans na versterken. Dit is ongewenst omdat dit zou leiden tot een toename van de faalkans door de versterking. Daarom wordt

voorkomen dat de faalkansen zo ver worden gecorrigeerd dat deze kleiner wordt dan de faalkansen voor piping. Dit wordt gedaan met de factor F4; de factor tussen pipingfaalkans uit de RivierenTool en de faalkansen voor piping:

$$F4 = \frac{P_{feis,pip}}{P_{fPIP,Tool}} \quad (9)$$

F3 moet minimaal gelijk zijn aan F4.

Combinatie van deelfactoren

Tenslotte nemen we aan dat de gecorrigeerde faalkans niet groter wordt dan de faalkans berekend met RivierenTool, dus F is maximaal gelijk aan 1. De gecombineerde factor F is dan gelijk aan:

$$F = \min(1, \max(F4, F3)) \quad (10)$$

Deze pipingkansen per vak worden vervolgens weer opgerold naar een gecombineerde trajectfaalkans op dezelfde manier als in RivierenTool, conform OI2014.

Ontbreken VNK-gegevens

Niet voor alle vakken zijn pipingberekeningen gemaakt in VNK. Als de pipingkans voor een vak niet aanwezig is, baseren we de correctie op de *kleinste* VNK pipingkansen in het normtraject c.q. ringdeel. Deze keuze voor correctie met de kleinste VNK kans in het traject is er op gebaseerd dat in VNK vakken niet zijn doorgerekend als een verwaarloosbaar kleine faalkans werd verwacht. Deze keuze geeft een kleinere risicoreductie en is dus conservatief.

Voorbeeld

Hieronder geven we een voorbeeld van de faalkanscorrectie voor een dijkvak in dijkkring 38 langs de Waal. Tabel 14 geeft de faalkansen per faalmechanisme uit VNK2 en de faalkansen per faalmechanisme op vakniveau uit de RivierenTool. Bij dit dijkvak zijn de volgende deelfactoren berekend volgens bovenstaande formules:

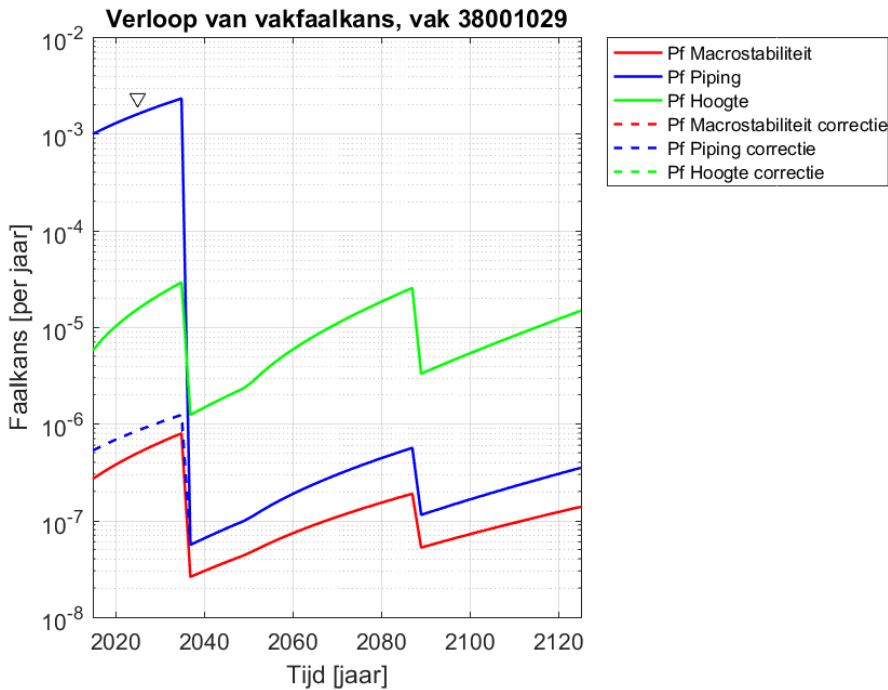
$$\begin{aligned} F1 &= 5,25e-07 / 9,93e-04 = 5,28e-04 \\ F2 &= 8,06e-06 / 5,71e-06 = 1,41 \\ F3 &= 5,28e-04 * 10^{0,5 * \log(1,41)} = 6,27e-04 \\ F4 &= 5,28e-07 / 9,93e-04 = 5,32e-04 \\ F &= 6,27e-04 (1/1600) \end{aligned}$$

Faal-mechanisme	Faalkans VNK2	Faalkans Tool 2015	Faalkans Tool 2015 na correctie
Overslag	8.06E-06	5.71e-06	5.71e-06 (ongewijzigd)
Stabiliteit	3.35E-06	2.68e-07	2.68e-07 (ongewijzigd)
Piping	5.25E-07	9.93e-04	6.23e-07
Bekleding	2.26E-06	-	-
Combinatie	1.19E-05	9.99e-04	6.35e-06

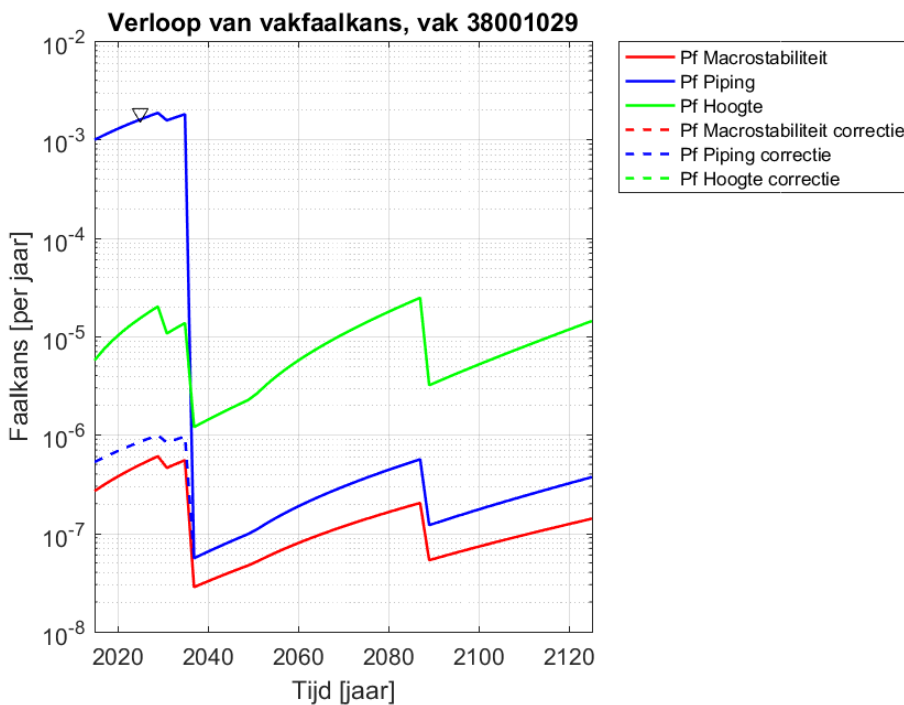
Tabel 14 Voorbeeld faalkanscorrectie piping bij dijkvak 38001029

Figuur 23 toont het berekende faalkansverloop in de tijd. De eerste dijkversterking is in 2035, dus de pipingfaalkansen tot 2035 worden vermenigvuldigd met een factor 6,27e-04. Dit leidt tot

het gecorrigeerde pipingfaalkansverloop van de blauwe stippellijn. In Figuur 24 is dezelfde faalkanscorrectie toegepast op een berekening waarbij een aantal jaar voor de dijkversterking een rivierverruiming wordt uitgevoerd. In het gecorrigeerde verloop blijft de rivierverruiming zichtbaar.

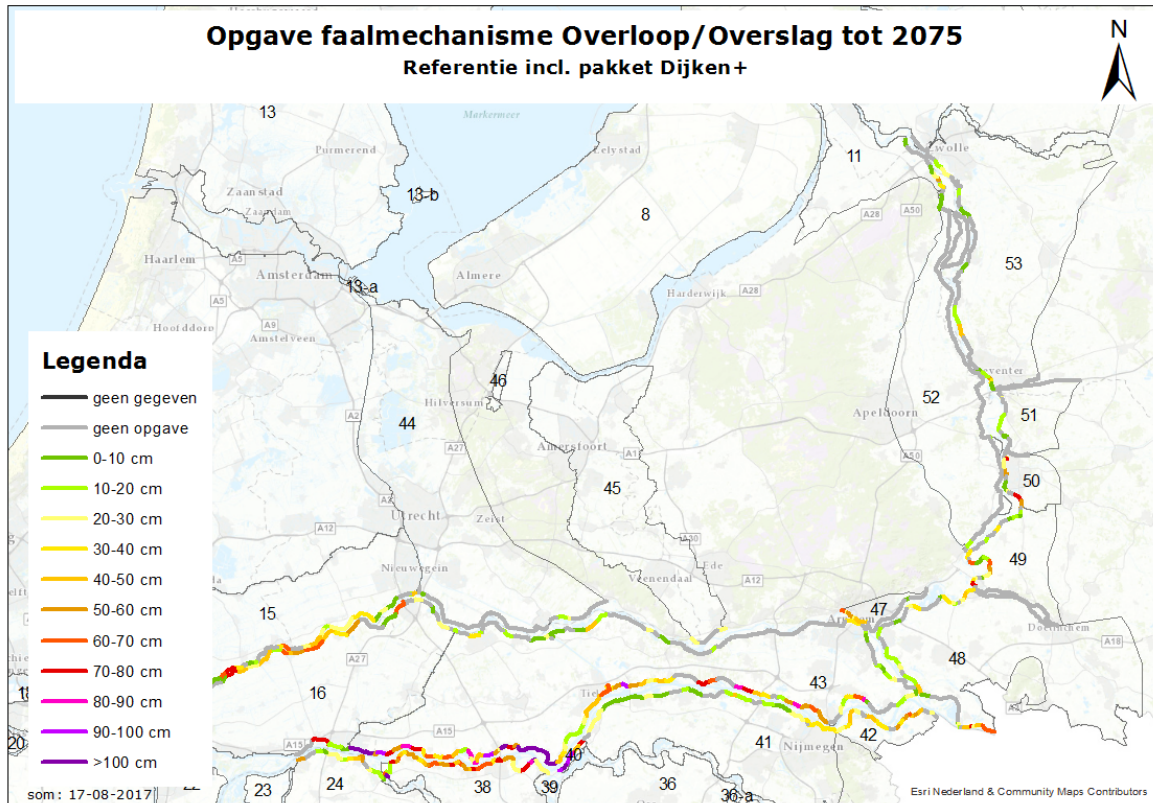


Figuur 23 Faalkansverloop van dijkvak 38001029, inclusief correctie van faalkansen.

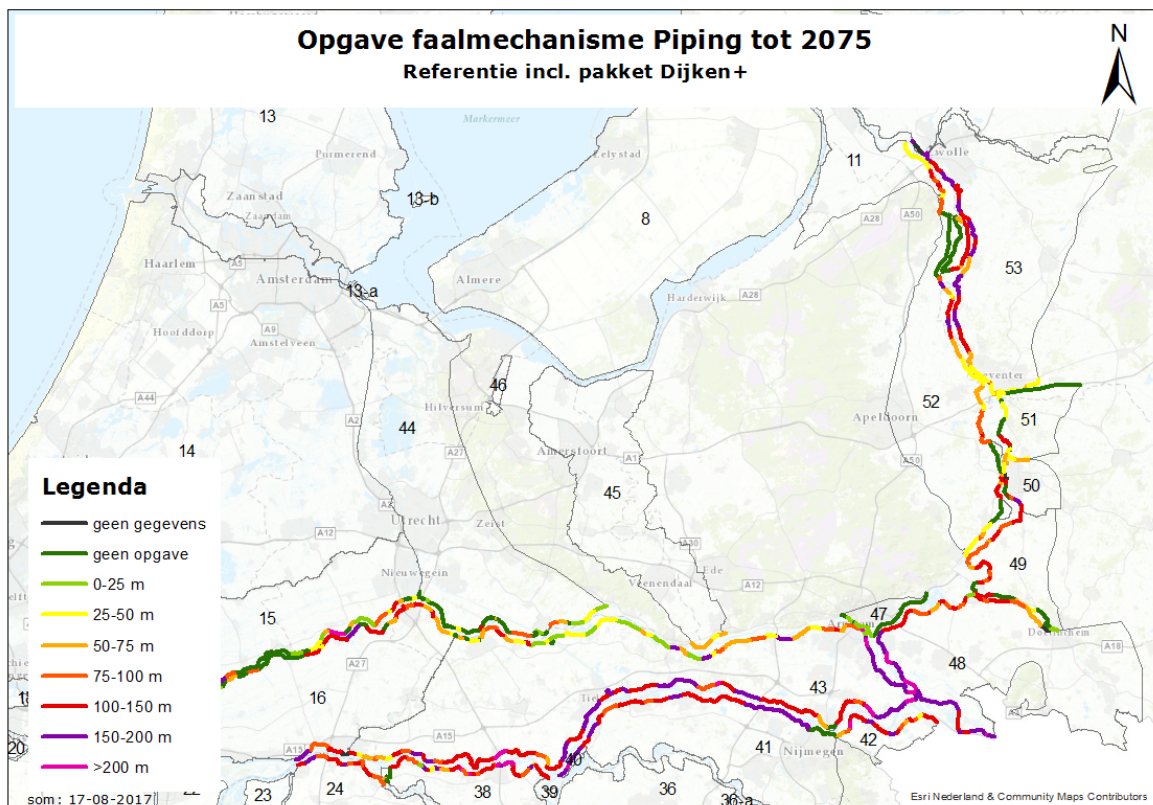


Figuur 24 Faalkansverloop van dijkvak 38001029, inclusief correctie van faalkansen, met inzet van rivierverruiming.

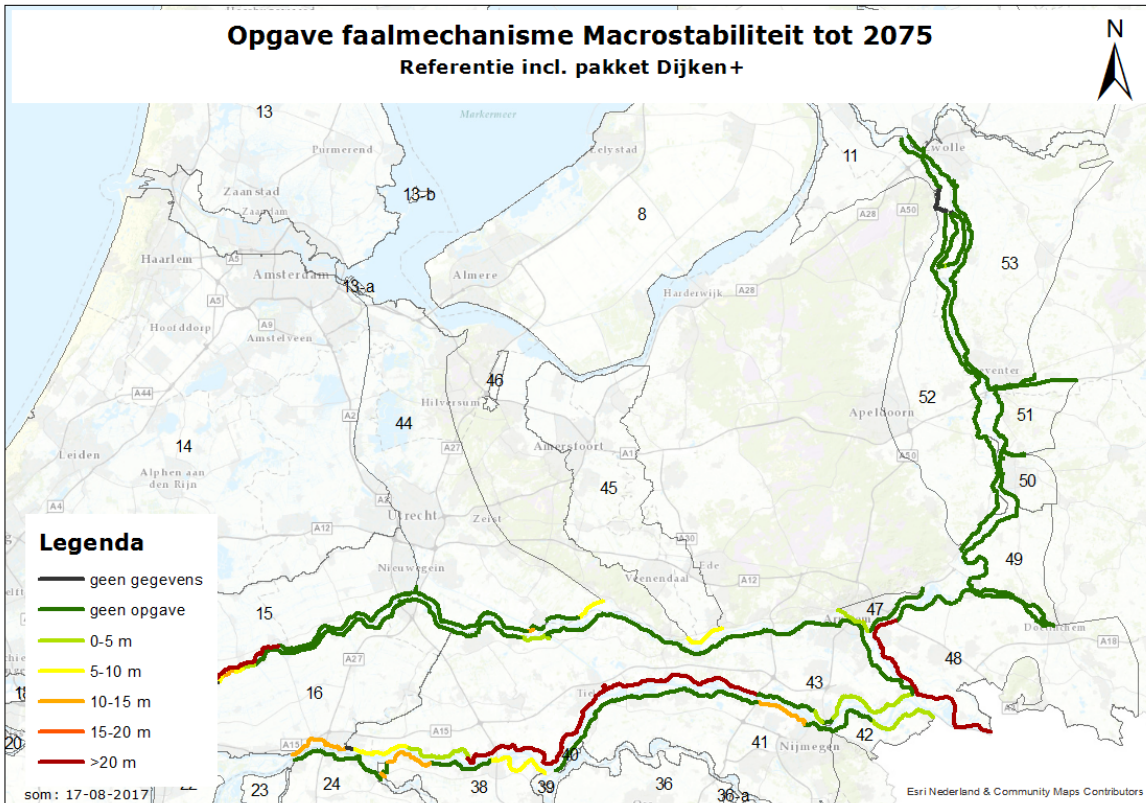
Bijlage B: Resultaten referentie RivierenTool



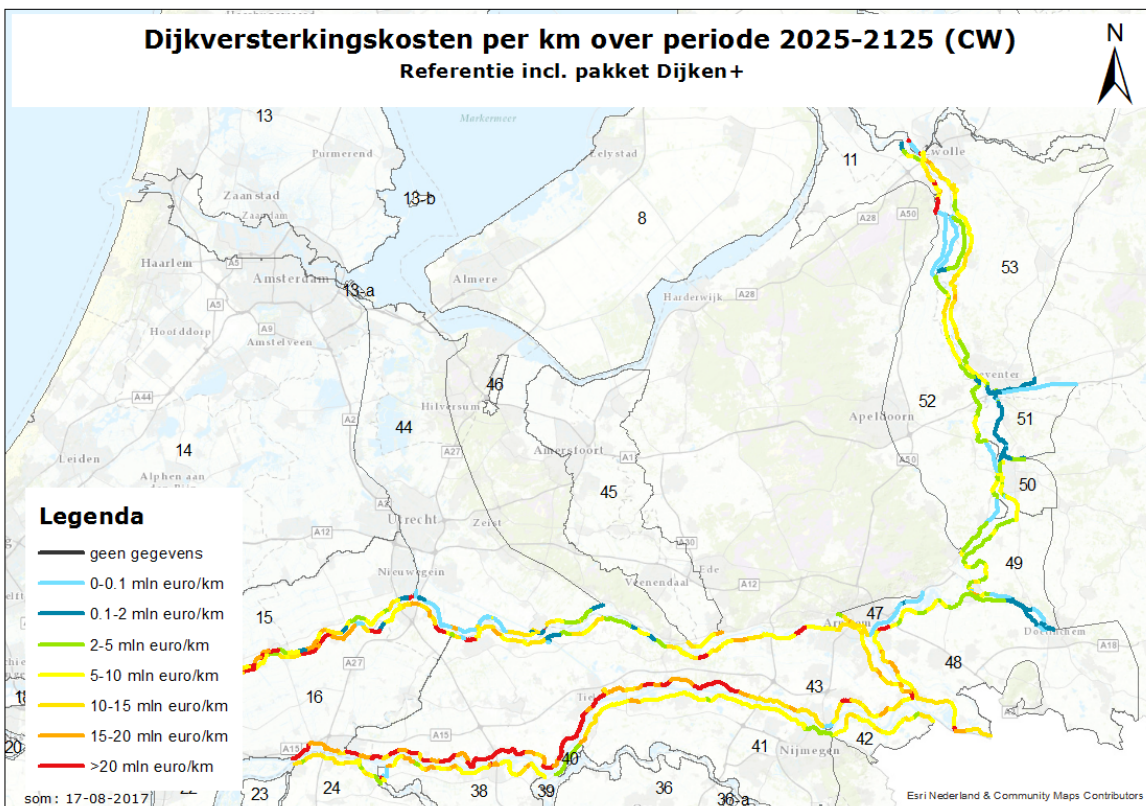
Figuur 25 Opgave hoogte tot 2075, Referentie incl. Dijken+



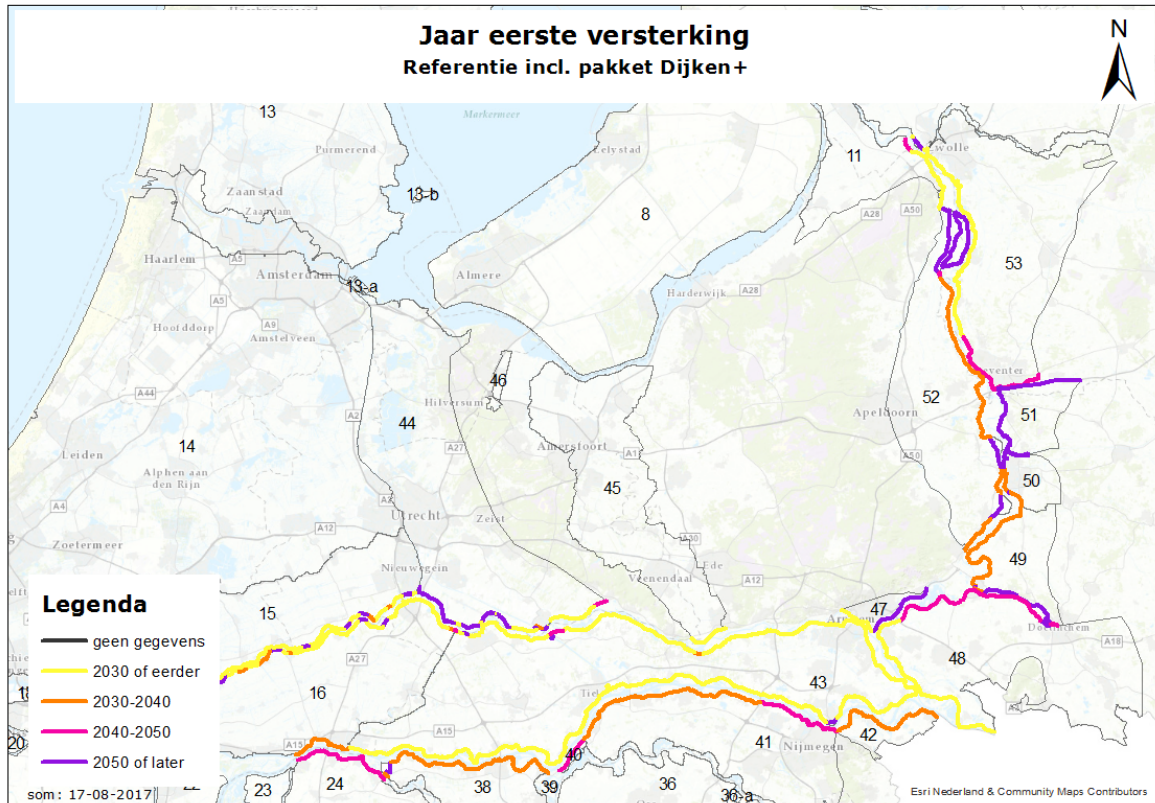
Figuur 26 Opgave piping tot 2075, Referentie incl. Dijken+



Figuur 27 Opgave macrostabiliteit tot 2075, Referentie incl. Dijken+



Figuur 28 Dijkversterkingskosten per km, Referentie incl. Dijken+



Figuur 29 Jaar eerste versterking, Referentie incl. Dijken+ (planning waterschappen, behalve op de Nederrijn-Lek)

	CW Dijkversterkingskosten	CW Risico
Totaal	6.595	9.136
IJssel	1.396	2.223
Nederrijn-Lek	2.317	4.178
Waal	2.883	2.736

Tabel 15 Contante waarde dijkversterkingskosten en overstromingsrisico in referentie. Bedragen in mln euro over de gehele rekenperiode.

Bijlage C: Toelichting waterstandseffect gestuurde variant

In deze bijlage is het waterstandseffect na optimalisatie van de gestuurde variant (Figuur 30) nader toegelicht aan de hand van een aantal figuren.

Afname van effect bij hogere afvoeren

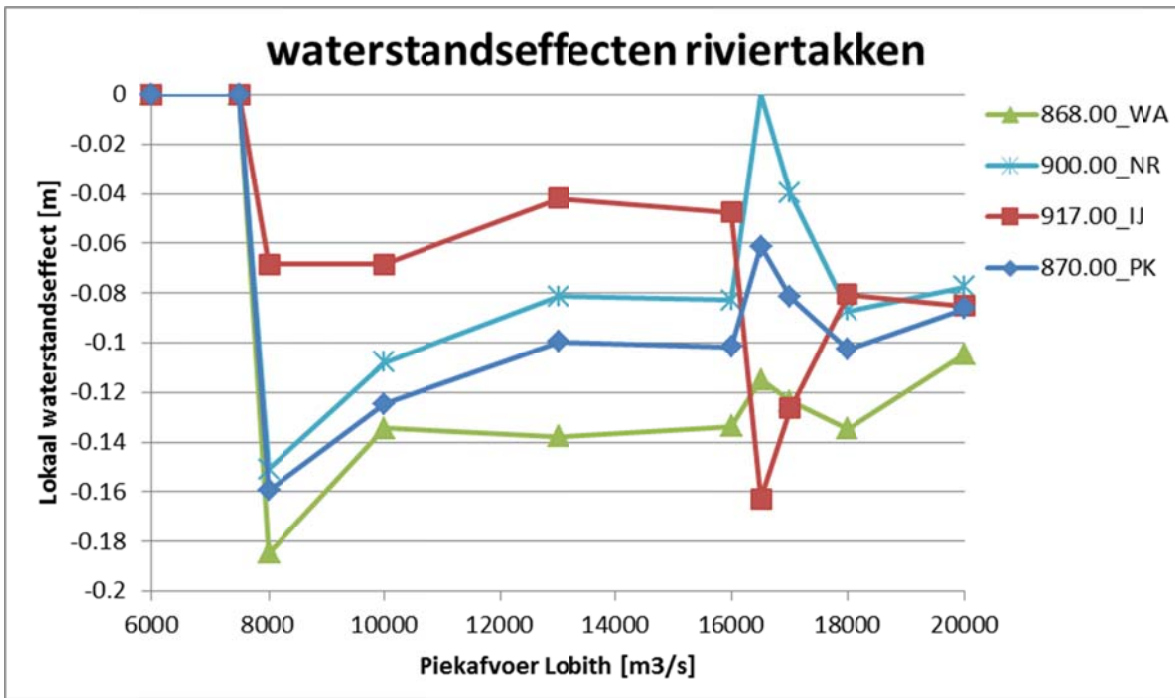
Het gebied wordt vanaf 8.000 m³/s ingezet, en het waterstandseffect neemt bij hogere afvoeren langzaam af. De reductie in piekafvoer neemt net na de inlaat van Rijnstrangen (km 860.00_WA) juist toe met de afvoer (Figuur 31, rode lijn). Dat komt doordat de top van de afvoergolf steeds smaller wordt bij hogere afvoeren, waardoor je met hetzelfde retentievolume meer van de afvoerpiek af kunt halen (Figuur 32). Dat het waterstandseffect desondanks afneemt met de afvoer, kan worden verklaard door de afvlakkende QH-relaties: 1 m³/s aftoppen leidt bij een afvoer van 8.000 m³/s tot meer waterstandsval dan bij een afvoer van 18.000 m³/s (Figuur 33).

Gedrag tussen 16.000 en 18.000 m³/s

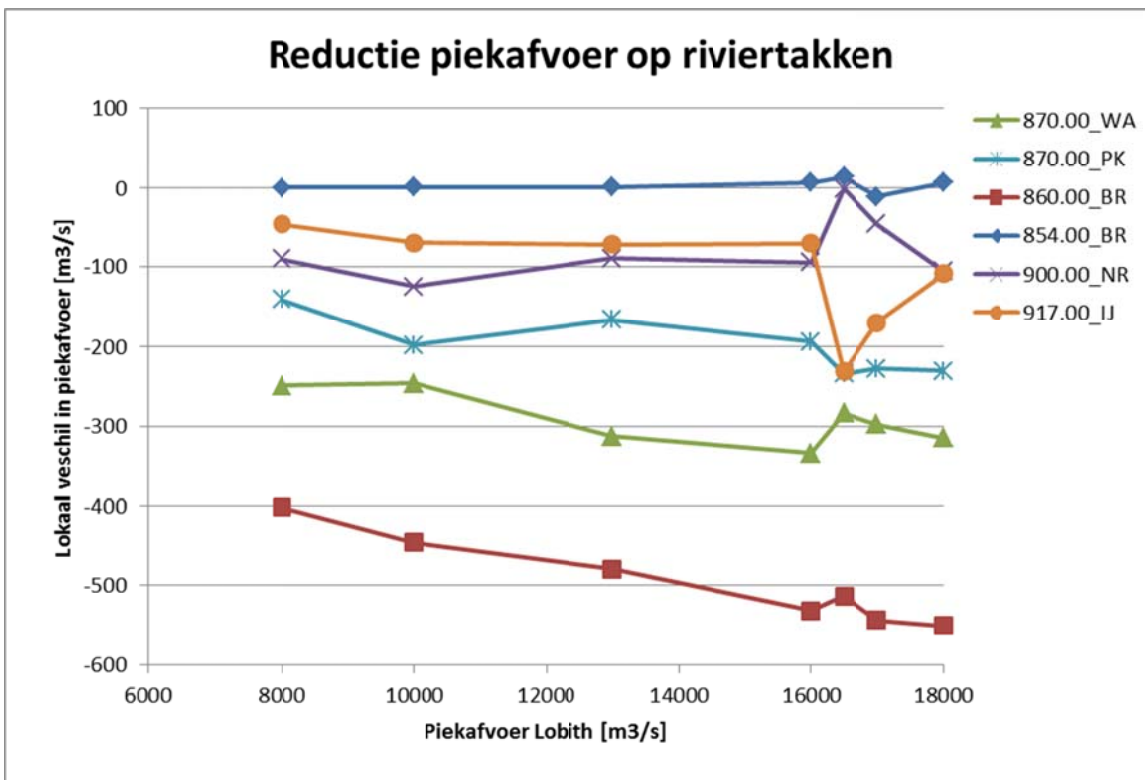
Bij de afvoeren van 16.500 en 17.000 m³/s is in alle lijnen een piek te zien. Deze wordt veroorzaakt door de sturing van de afvoerverdeling die als doel heeft om de Nederrijn-Lek te ontzien bij afvoeren tussen 16.000 en 18.000 m³/s, waarbij het doel is dat de afvoer naar de Nederrijn niet groter wordt dan 3.380 m³/s. Uit de QH-relatie op de Nederrijn (Figuur 34) is te zien dat de waterstand hier tijdelijk niet stijgt bij toenemende afvoer. Bij 16.500 m³/s blijft de waterstand gelijk, ongeacht het inzetten van Rijnstrangen, dus het waterstandseffect is daar nul. Bij 17.000 m³/s *zonder Rijnstrangen* kan de sturing bij de IJsselkop de gewenste afvoer naar de Nederrijn niet meer handhaven. Door inzet van Rijnstrangen lukt dit wel, waardoor de waterstand op de Nederrijn daalt met 4 cm. Bij nog hogere afvoeren neemt het waterstandseffect weer toe tot het effect bij 16.000 m³/s en lager.

Doordat de Nederrijn-Lek wordt ontzien, treedt het omgekeerde effect op bij de IJssel. Op de IJssel stijgen de waterstanden bij afvoeren tussen 16.000 en 18.000 m³/s juist extra snel (Figuur 35). Als Rijnstrangen voor een reductie in de afvoer zorgt, komt deze reductie geheel in mindering op de afvoeren op de IJssel. De piek in het waterstandseffect is op de IJssel in omgekeerde vorm terug te zien (Figuur 31).

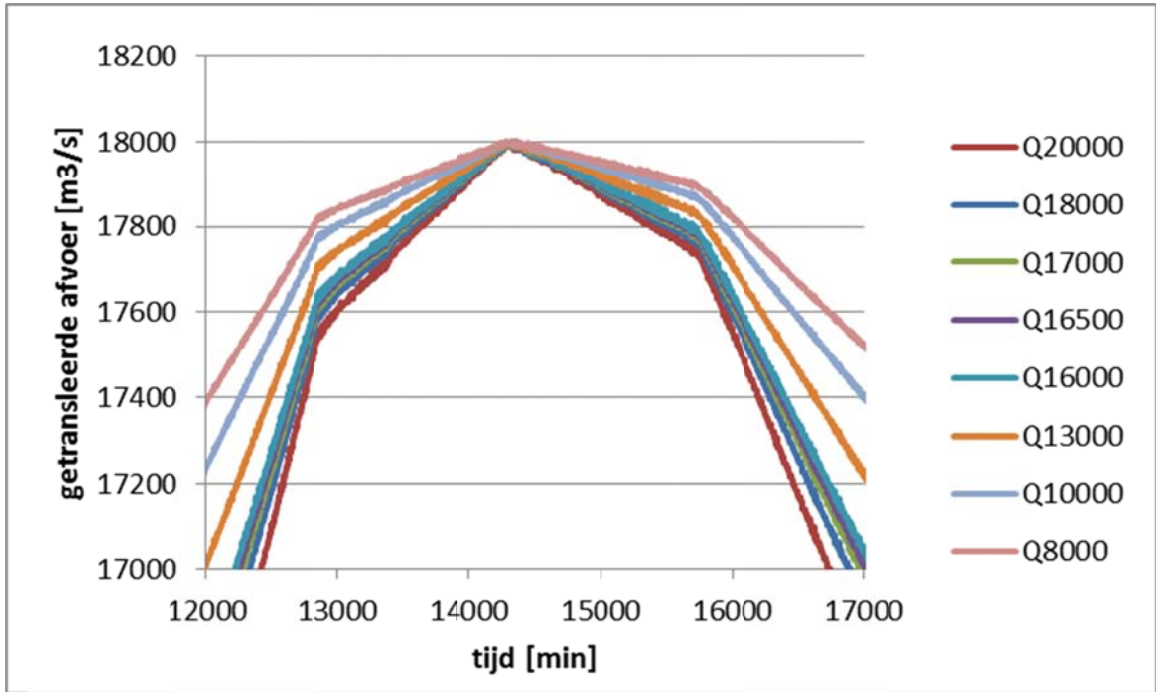
Het stabiliseren van de waterstand op de Nederrijn bij afvoeren tussen 16.000 en 18.000 m³/s werkt via het stuwkromme-effect door naar het Pannerdensch Kanaal en zelfs naar de Bovenrijn (Figuur 36). De piek in het waterstandseffect is daar in gedempte vorm terug te zien (Figuur 31).



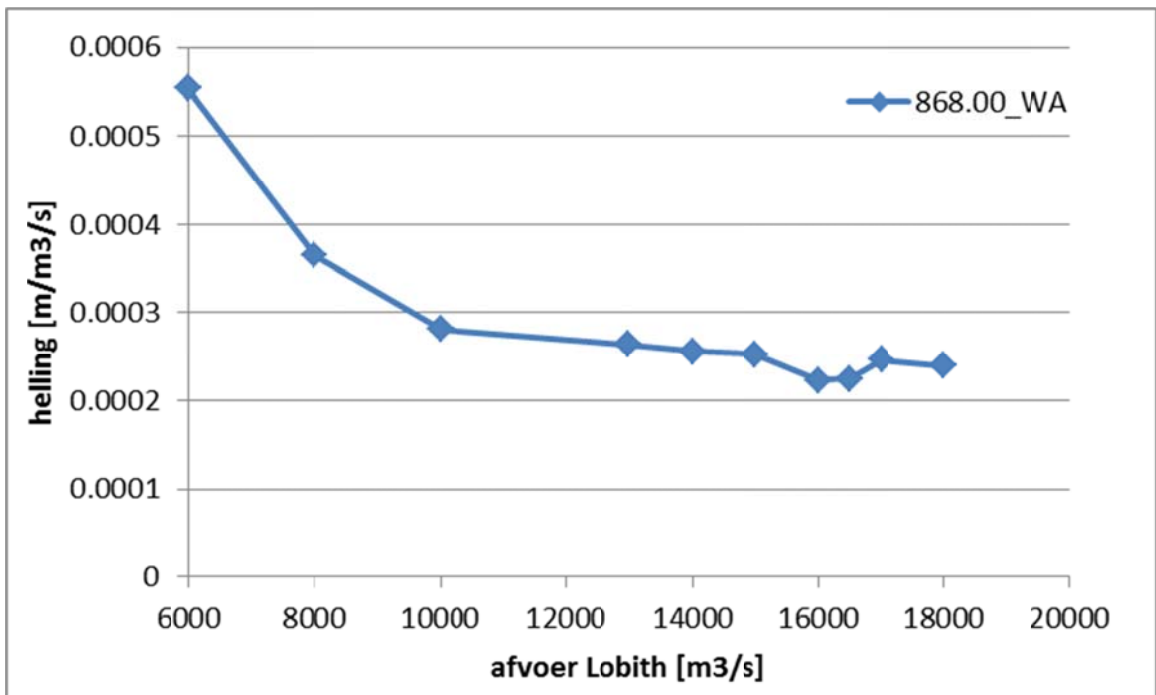
Figuur 30 Waterstandseffect (QdH relaties) bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.



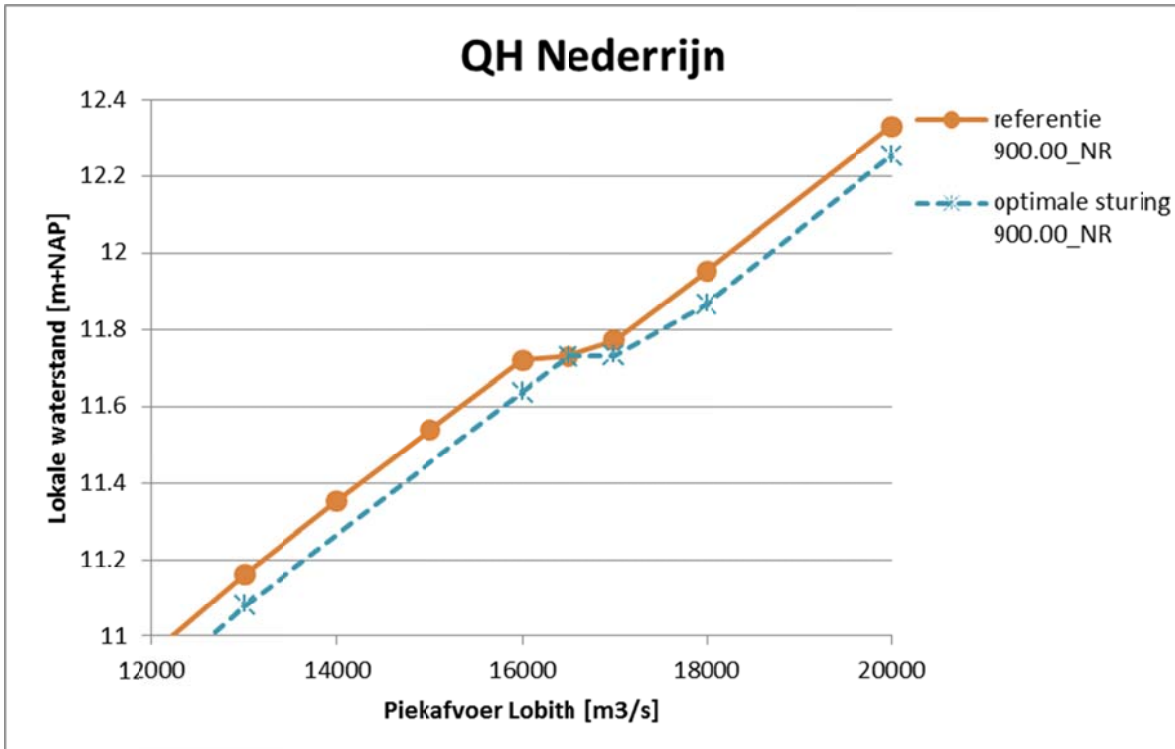
Figuur 31 Reductie in piekafvoer op verschillende takken bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant.



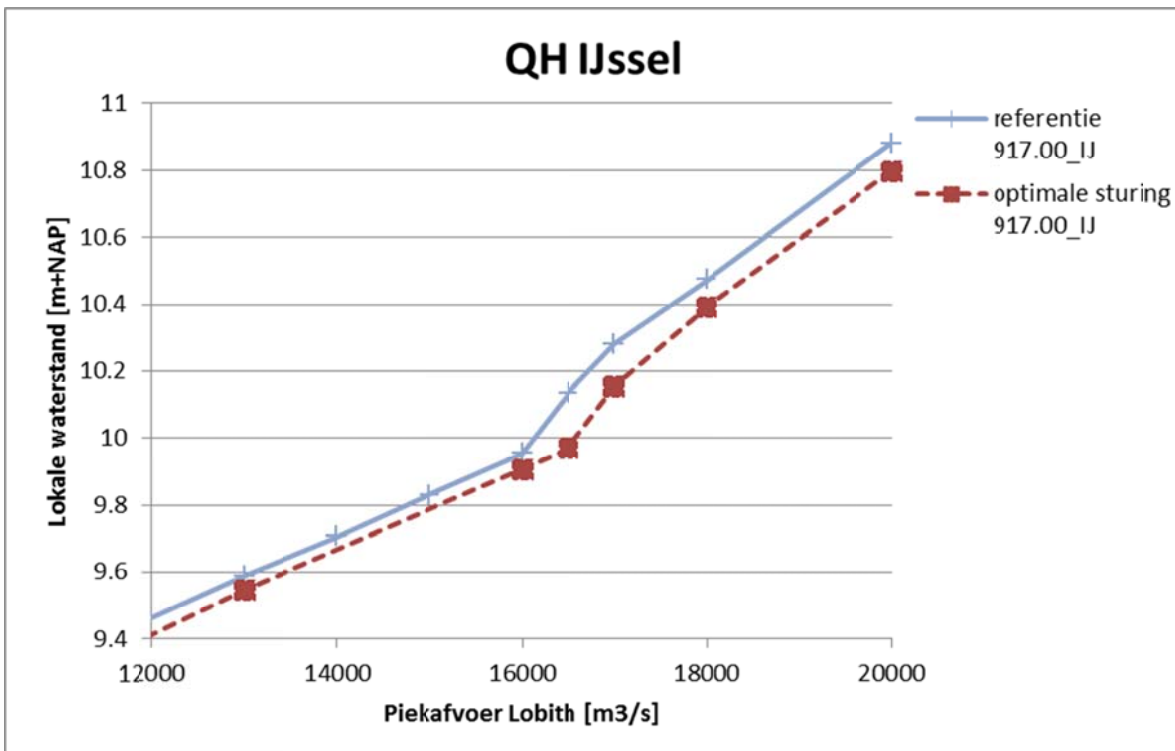
Figuur 32 Toppen van verschillende afvoergolven, waarbij de piekafvoer op 18.000 is gelegd.



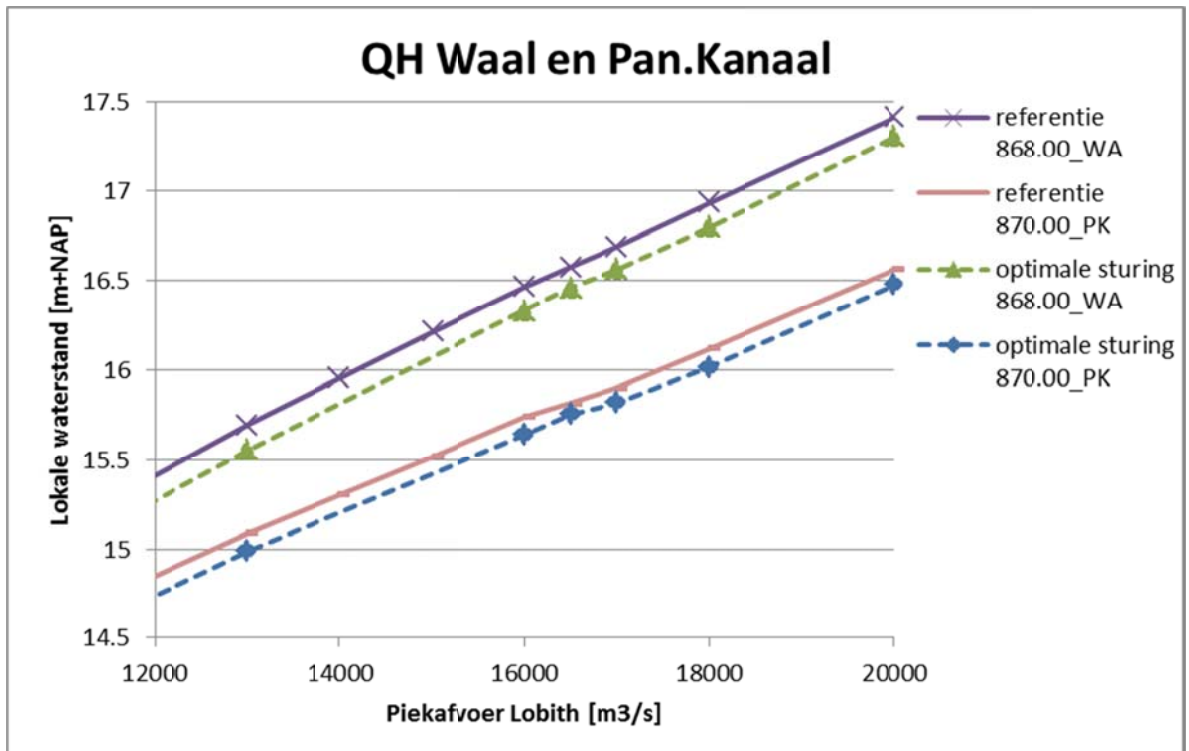
Figuur 33 Helling van de QH relatie op het begin van de Waal.



Figuur 34 QH relatie Nederrijn bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).



Figuur 35 QH relatie IJssel bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).



Figuur 36 QH relatie Waal en Pannerdensch Kanaal bij de optimale inzetniveaus van de gestuurde variant, en QH relatie zonder Rijnstrangen (referentie).



HKV IJN IN WATER BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl