

Het effect van negatieve systeemwerking - Dijkkring 42



Het effect van negatieve systeemwerking - Dijkkring 42

Auteur(s)

Siep Bakker

Bart Maas

Het effect van negatieve systeemwerking - Dijkkring 42

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	De heer ir. D.F. Kroekenstoel
Referenties	
Trefwoorden	Negatieve Systeemwerking, DR42, Dijkkring 42, D-Hydro, Waterschap Rivierenland

Documentgegevens

Versie	1.2
Datum	17-03-2025
Projectnummer	11210367-006
Document ID	11210367-006-ZWS-0002
Pagina's	43
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Siep Bakker	
	Bart Maas	

Samenvatting

In 2050 moeten alle Nederlandse waterkeringen voldoen aan de nieuwe normen zoals vastgesteld in de Waterwet (2017). Bij het bepalen van de dijktrajectnormen langs de Waal is gerekend met de nagestreefde afvoerverdeling tussen de verschillende Rijntakken. Wanneer er een verandering in deze afvoerverdeling plaatsvindt, heeft dat effect op de normgevende condities in de verschillende Rijntakken. Een scenario waarin een verandering van de afvoerverdeling kan plaatsvinden, is wanneer bovenstrooms van het splitsingspunt (Pannerdensche Kop) water in Dijkkring 42 stroomt als gevolg van een bres. Als dit water benedenstrooms van het splitsingspunt weer terugstroomt. Wanneer dit leidt tot hogere afvoeren/waterstanden in de Waal, wordt dit negatieve systeemwerking genoemd, vanwege het negatieve (verhogende) effect op de waterstanden in de ontvangende riviertak.

Het doel van deze studie is om het mogelijke overstromingsverloop en de effecten van systeemwerking via Dijkkring 42 in kaart te brengen. Om dit te bewerkstelligen wordt het overstromingsverloop door Dijkkring 42 geanalyseerd, waarbij ook de effecten van de slaperdijk in Duitsland, die de Dijkkring in tweeën verdeelt, in kaart worden gebracht. In de studie worden de bevindingen en gebruikte methoden uit Maas & De Bruijn (2024), waarin negatieve systeemwerking via Dijkkring 48 naar de IJssel geëvalueerd is, als uitgangspunt gebruikt. In de voorliggende studie zijn er 16 simulaties gedraaid, met vier verschillende breslocaties. Ook is er gevarieerd in de bresmomenten in zowel de Rijndijk als de slaperdijk. De gebruikte afvoergolf heeft een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar. In een van de scenario's is een kunstmatig verbrede afvoergolf gebruikt om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren.

Uit de resultaten blijkt dat wanneer de breslocatie zich ten oosten van de slaperdijk bevindt, er helemaal geen terugstroom naar de Waal plaatsvindt. De slaperdijk zorgt in essentie voor twee losse dijkkringen die allebei opgevuld moeten worden voordat er terugstroming plaats kan vinden. Ook wanneer er een bres in de slaperdijk ontstaat, blijft de waterstand in het deel ten oosten van de slaperdijk nog lang hoog staan door het relatief lage bresdebiet door de slaperdijk t.o.v. het bresdebiet in de bres van de Rijndijk. Wanneer de bres zich ten westen van de slaperdijk bevindt, vindt er wel in meerdere scenario's terugstroming naar de Waal plaats. Bij de 1/10.000 golf kwam deze terugstroming in alle scenario's 2-3 dagen na de piek van de afvoergolf in de Waal, waardoor de systeemwerking (i.e. instroom van de Rijn in de dijkkring) juist zorgt voor lagere piekwaterstanden t.o.v. het scenario zonder doorbraak. Enkel in het scenario met de kunstmatig verbrede afvoergolf was er sprake van dusdanig grote negatieve systeemwerking dat de piekwaterstanden toenamen t.o.v. het scenario zonder doorbraak.

Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat de kans op hogere afvoeren of piekwaterstanden op de Waal als gevolg van een bres in de kering van Dijkkring 42 heel klein is. Een verhoogde afvoer op de Waal zal optreden als er na een bres in de Boven-Rijn veel water door Dijkkring 42 stroomt en vervolgens een grote hoeveelheid daarvan vanuit Dijkkring 42 de Waal instroomt. Zonder bres zou ongeveer twee derde van de Boven-Rijn-afvoer naar de Waal gaan. Door de bres in de keringen langs de Boven-Rijn wordt de afvoer op de Boven-Rijn, en dus ook op de Waal, gereduceerd. Alleen als het piekvolume dat vanuit Dijkkring 42 de Waal instroomt meer is dan ongeveer twee derde van het bresvolume en op het moment van passeren van de piek instroomt, dan zal de piekafvoer op de Waal toenemen.

De kans hierop neemt toe bij:

- een vroege doorbraak (ver voordat de piek passeert),
- een doorbraak ver benedenstrooms in Dijkkring 42 (maar bovenstrooms van het splitsingspunt),
- een bredere afvoergolf op de Rijn,
- een bres in de dijk langs de Waal van Dijkkring 42 waardoor er een groter debiet vanuit de dijkkring terug de rivier in kan stromen.

Zeker wanneer de geplande versterkingsprojecten in het Duitse deel van Dijkkring 42, zoals vastgesteld in het 'Fahrplan Deichsanierung', zijn afgerond, neemt de kans op een relatief vroege bres af. Dit verkleint de kans op het samenvallen van terugstroom naar de Waal vanuit Dijkkring 42 en de piek van de afvoergolf in de Waal verder. Deze kans wordt daarmee nog verwaarloosbaarder in vergelijking met de normeringen van de dijken langs de Waal. De kans op een situatie waarbij de Waalafvoer toeneemt is veel kleiner dan 1/10.000 per jaar en daardoor naar verwachting niet relevant voor de ontwerpeisen van de keringen langs de Waal.

Als in de toekomst door klimaatverandering en/of het verhogen van de dijken in Duitsland (wat zou zorgen voor minder topvervlakking) de afvoergolf op de Boven-Rijn hoger en/of breder zou worden, neemt de kans op een vergroting van de Waalafvoer door een bres in de dijken van de Niederrhein of Boven-Rijn toe.

Dit onderzoek geeft dus geen aanleiding om negatieve systeemwerking door een doorbraak in Dijkkring 42 en de gevolgen daarvan op de Waalafvoer te beschouwen bij het bepalen van de belasting op de Waaldijken en de eisen aan het profiel van de Waaldijken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond en doel	7
1.2	Belangrijkste bevindingen uit voorgaande studie	8
1.3	Aanpak op hoofdlijnen	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Methode	10
2.1	Situatiebeschrijving	10
2.2	Modelbeschrijving	11
2.3	Scenario's	11
2.3.1	Breslocaties Rijndijk	13
2.3.2	Breslocaties slaperdijk	14
2.3.3	Bresmomenten Rijndijk	14
2.3.4	Bresmomenten slaperdijk	14
2.4	Randvoorwaarden en initiële condities	14
3	Resultaten	16
3.1	Overstromingskarakteristieken	16
3.1.1	Bresdebiet: effect breslocatie en bresmoment	16
3.1.2	Golfvorm	20
3.1.3	Overstromingsverloop	20
3.1.4	Effect van slaperdijk op het overstromingsverloop	21
3.2	Invloed op negatieve systeemwerking	25
4	Discussie	29
4.1	Factoren die het effect van doorbraken op de Waalafvoer bepalen	29
4.2	Relevantie van het systeemwerkingseffect op toetsing en ontwerp van de Waaldijken	31
4.3	Vergelijking met negatieve systeemwerking op de IJssel	33
5	Conclusies en aanbevelingen	36
6	Referenties	38
A	Resultaten bressimulaties WSRL	39
B	Instellingen bresgroei	40
C	Waterstandsverloop op de Waal	41

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doel

In de Waterwet (2017) is vastgelegd dat alle Nederlandse waterkeringen in 2050 moeten voldoen aan de normering als gesteld in de Waterwet. Om vast te stellen of keringen aan deze norm voldoen, wordt de overstromingskans bepaald als een functie van de belasting op een kering (de buitenwaterstand en de frequentie van overschrijding van die buitenwaterstand) en de sterkte van de kering.

Om te weten welke frequentie van voorkomen bij welke waterstand hoort, is bij een afvoer van 16.000 m³/s te Lobith vastgesteld hoe het water uit de Boven-Rijn verdeeld wordt over de verschillende riviertakken. Indien nodig worden voorafgaand aan het nieuwe hoogwaterseizoen door de rivierbeheerder Rijkswaterstaat twee regelwerken bij de splitsingspunten anders ingesteld om bij een afvoer van 16.000 m³/s te Lobith de gewenste “beleidsmatige” afvoerverdeling te krijgen. In bepaalde situaties kan de werkelijke afvoerverdeling echter afwijken van deze beleidsmatige verdeling. Bij het optreden van een dijkdoorbraak op een locatie bovenstrooms van het splitsingspunt kan het water via een binnendijks gebied voorbij het splitsingspunt stromen, en vervolgens later weer terug een riviertak instromen, wat mogelijk leidt tot een verhoogde waterstand op de ontvangende tak. Dit effect wordt negatieve systeemwerking genoemd. Aan de andere kant kan de dijkdoorbraak in de Boven-Rijn ook zorgen voor een afname van de belasting benedenstrooms van de dijkdoorbraak. Dit omdat een deel van de Rijnafoer wegstroomt uit de rivier en geborgen wordt in het overstroomde gebied. Dit effect wordt positieve systeemwerking genoemd.

Eerder zijn onderzoeken uitgevoerd naar negatieve systeemwerking in de IJssel als gevolg van een doorbraak van de noordelijke dijk langs de Niederrhein en Boven-Rijn (Dijkring 48) (Klerk et al., 2014; Bomers et al., 2019; Maas & de Bruijn, 2022 & 2024). In dit scenario stroomt water via Dijkring 48 naar de IJssel, waardoor waterstanden in de IJssel hoger kunnen worden dan bij een bepaalde afvoer berekend is. In deze studies wordt aangegeven dat het van belang is deze negatieve systeemwerking te kwantificeren om te kunnen bepalen of de kans op verhoogde waterstanden benedenstrooms zo groot is dat dit een aanpassing van de norm voor dijktrajecten zou kunnen rechtvaardigen.

Een vergelijkbare situatie zou zich kunnen voordoen bij dijkdoorbraken langs de zuidelijke bandijk (hierna: Rijndijk) van de Niederrhein en Boven-Rijn (Dijkring 42). Deze dijkkring strekt zich uit over de grens met Duitsland en ligt ten zuiden van de Niederrhein, Boven-Rijn en Waal (Figuur 2-1). Een doorbraak in deze dijkkring zou kunnen zorgen voor een binnendijkse doorstroom langs het splitsingspunt (Pannerdensche Kop) en een terugstroom naar de Waal ter hoogte van Nijmegen. Hierdoor zou de waterstand en afvoer in de Waal kunnen toenemen. Een belangrijke factor is de aanwezigheid van een slaperdijk in Duitsland die Dijkring 42 in twee delen splitst. Het effect van deze dijk op het overstromingsverloop kan sterk verschillen, afhankelijk van de locatie van de bres en de mate van compartimentering die de dijk kan bewerkstelligen (i.e. standhouden, breken, doorstromen bij coupures).

Hieruit voortkomend is een tweeledig doel opgesteld voor deze studie; 1. Het beoordelen van het effect van een overstroming in Dijkring 42 op negatieve systeemwerking in de Waal en 2. Inzicht krijgen in het overstromingsverloop in Dijkring 42, met name in relatie tot het effect van de slaperdijk. Hiervoor wordt eenzelfde soort werkwijze gevolgd als in de eerdere studie voor Dijkring 48 (Maas & de Bruijn, 2024).

1.2 Belangrijkste bevindingen uit voorgaande studie

Deze studie maakt gebruik van de bevindingen gedaan in Maas & de Bruijn (2024). In deze studie zijn voor drie breslocaties langs de noordelijke Rijndijk meerdere doorbraakscenario's doorgerekend om het effect van negatieve systeemwerking in de IJssel te bepalen. De belangrijkste bevindingen die relevant zijn voor deze studie gaan over de factoren die negatieve systeemwerking beïnvloeden en zijn hieronder opgenomen.

Breslocatie

De breslocatie bepaalt de route die het water over land aflegt (en daarmee ook de tijdsduur) voordat het instroomt in de ontvangende riviertak. Bij een doorbraak dichterbij het splitsingspunt (Pannerdensche Kop) is de route naar de IJssel korter dan bij een doorbraak verder bovenstrooms langs de Boven-Rijn/Niederrhein, waardoor water sneller terugstroomt naar de rivier en de piekafvoer in de IJssel sterker toeneemt. Bovendien beïnvloedt de breslocatie, vanwege het per locatie verschillende verval tussen de aanwezige waterhoogte aan buitendijkse zijde en lokale maaiveldhoogte aan binnendijkse zijde de stroomsnelheid door de bres: een groter verval over de bres leidt tot een hoger debiet.

Moment van doorbraak

Het moment waarop de bovenstroomse dijk breekt, heeft een groot effect op de afvoer in de IJssel. Een doorbraak ruim vóór de piek van de Rijnaafvoergolf resulteert in een groter cumulatief bresvolume en meer terugstroom naar de IJssel. Dit versterkt de piekafvoer doordat de instroom samenvalt met de piek in de IJssel. Doorbraken die plaatsvinden op of na de piek van de afvoergolf hebben een beperkter effect, omdat er dan een kleiner cumulatief volume door de bres stroomt en minder overlap is tussen mogelijke terugstroom naar de rivier en de piekafvoer in de rivier.

Vorm van de afvoergolf

De hoogte en breedte van de Rijnaafvoergolf beïnvloeden de hydraulische condities in de IJssel. Bij hogere en bredere afvoergolven stroomt gedurende langere tijd meer water door de bres, wat de kans op negatieve systeemwerking in de IJssel vergroot. In deze studie is gerekend met een uniforme afvoergolf, maar eerder onderzoek met een lagere en smallere golf toonde aan dat dit resulteert in minder systeemwerking en geen verhoging van de waterstanden in de IJssel (Maas & de Bruijn, 2022). Een bredere afvoergolf zorgt ook voor een grotere kans op het samenvallen van de piekwaterstanden in de IJssel en de terugstroom vanuit de dijkkring naar de IJssel. Doordat de afvoergolf breed is, houden de hoge waterstanden immers langer aan.

Door een bres in de noordelijke dijk van de Niederrhein/Boven-Rijn ontstaan er lagere afvoeren en waterstanden op alle Rijntakken. De bres werkt als een ventiel voor de benedenstroomse afvoer. Alleen bij de IJssel is er kans op hogere afvoeren en waterstanden door negatieve systeemwerking, waarbij de kans toeneemt in geval van een bredere hoogwatergolf. Dit is toe te wijzen aan twee effecten: instroom over een langere periode én een grotere kans op het samenvallen van de piek van de hoogwatergolf op de IJssel en de terugstroom vanuit Dijkkring 48 naar de IJssel.

Conclusie

Het effect van negatieve systeemwerking is in de hierboven beschreven situatie groter wanneer:

- Het water een zo kort mogelijke route moet afleggen vanaf de bres naar de ontvangende riviertak;
- De bres ontstaat voordat de hoogste afvoer van de afvoergolf gepasseerd is, hoe eerder de bres hoe groter het effect;
- De maximale afvoer van de passerende afvoergolf langer aanhoudt (hogere en bredere afvoergolf).

1.3 Aanpak op hoofdlijnen

Deze studie maakt gebruik van een vergelijkbare aanpak als in Maas en De Bruijn (2024). In de analyses is per scenario gekeken naar de bresgroei, het bresdebiet, het overstromingspatroon door de dijkkring en de toestroom van water naar de Waal. De breslocaties die in deze studie zijn gebruikt, zijn bepaald op basis van overstromingssimulaties die in 2024 door Waterschap Rivierenland zijn uitgevoerd. Met de verschillende scenario's wordt gevarieerd in breslocaties, het startmoment van de bresgroei en de vorm van de afvoergolf. Deze variaties geven inzicht in de mate van negatieve systeemwerking en het effect op de Waalafvoer. Tot slot wordt aan de hand van de resultaten ingeschat of het effect van negatieve systeemwerking relevant kan zijn voor het ontwerp en de beoordeling van de Waaldijken.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak van het onderzoek in detail toegelicht. Hierin wordt allereerst een korte situatieschets gegeven, gevolgd door een toelichting van de gebruikte modelschematisatie. In paragraaf 2.3 worden de doorgerekende scenario's gepresenteerd waarna de afleiding van de gebruikte randvoorwaarden wordt besproken.

De resultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 3, waar wordt ingegaan op de werking van het systeem, het overstromingspatroon en de daaruit volgende hydraulische effecten op de Waal.

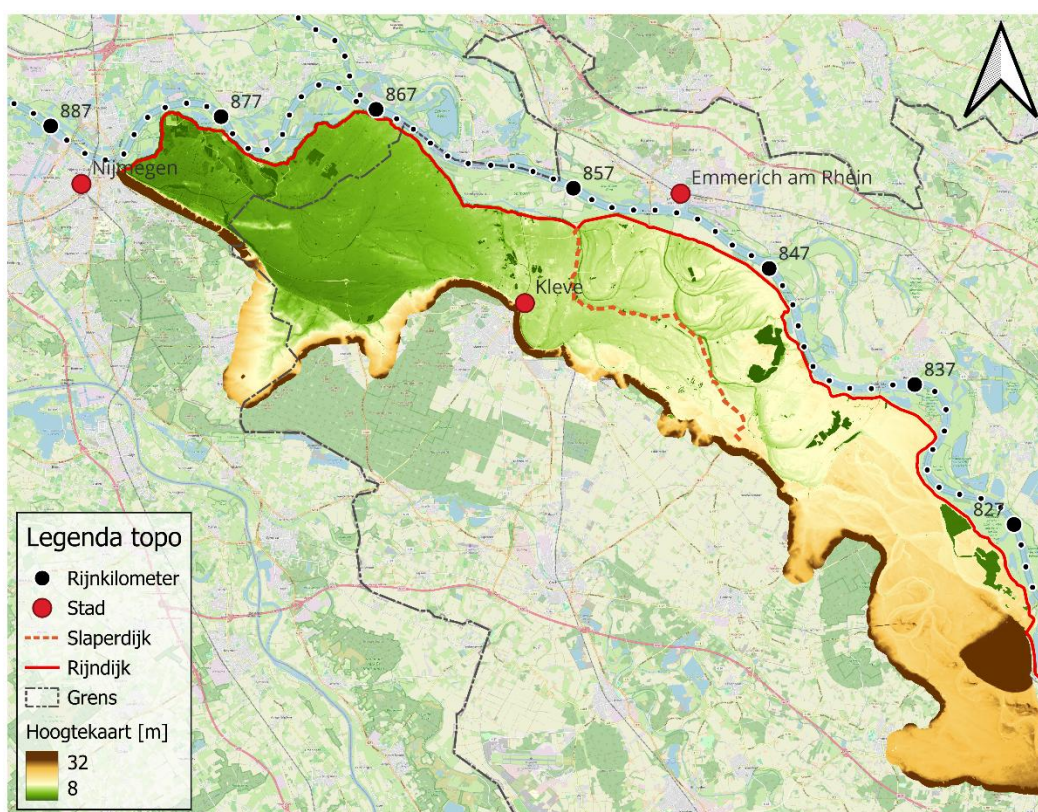
In hoofdstuk 4 volgt een discussie over welke variabelen invloed hebben op de mate van negatieve systeemwerking, de gedane aannames en het effect op de toets-ontwerpbelasting. Ook wordt er een vergelijking gemaakt met systeemwerking in de IJssel (via Dijkkring 48). Vervolgens worden in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies getrokken.

2 Methode

2.1 Situatiebeschrijving

Dijkring 42 is geografisch afgebakend als een smalle strook land die parallel aan de Rijn loopt (Figuur 2-1). Ten noorden van de dijkkring ligt de Rijn, welke in Duitsland de Niederrhein heet, in Nederland de Boven-Rijn en na het splitsingspunt (t.h.v. Rijnkilometer 867) de Waal. In het zuiden, oosten en westen zorgen hoge gronden voor een (scherpe) afbakening van het overstroombare gebied. Wanneer er een bres plaatsvindt in de Rijndijk, zal het water zich door deze ligging en afbakening in westelijke richting door de dijkkring verplaatsen, parallel aan de loop van de Rijn.

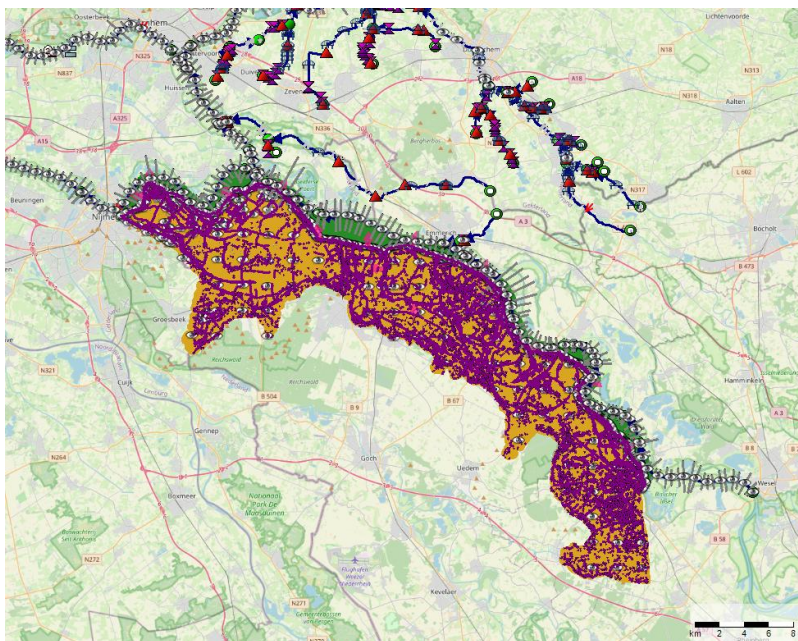
Het Nederlandse deel van de dijkkring wordt beheerd door Waterschap Rivierenland (WSRL). In Duitsland zijn er twee beheerders: ten oosten van Kleve, Deichverband Xanten – Kleve en ten westen van Kleve, Deichverband Kleve – Landesgrenze. De dijkkring wordt in twee delen opgesplitst door een oude slaperdijk, welke in het beheergebied van Deichverband Xanten-Kleve gelegen is. Wanneer er een bres ten oosten van de slaperdijk plaatsvindt, kan de slaperdijk een compartimenterende werking vervullen. Hierdoor zou het gebied ten westen van de slaperdijk langer of volledig droog kunnen blijven. In de slaperdijk zitten coupures, welke jaarlijks een testsluiting ondergaan, maar desalniettemin een kwetsbare plek in de slaperdijk kunnen vormen. De slaperdijk heeft vroeger als primaire kering gefungeerd en aan de wielen ten westen van de slaperdijk is af te lezen dat deze in zijn levensduur meerdere keren doorgebroken is.



Figuur 2-1 Overzichtskaart met hoogteligging van Dijkkring 42.

2.2 Modelbeschrijving

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van het door Waterschap Rivierenland beschikbaar gestelde model van Dijkkring 42. Dit model is ontwikkeld in D-HYDRO Suite 1D2D (v2024.03), waarbij het 1D2D-model van Dijkkring 48 van Waterschap Rijn & IJssel als basis is gebruikt (Prinsen et al., 2022). Het 1D-model beslaat het gebied vanaf Wesel (langs de Nederrijn in Duitsland) tot aan Hardinxveld (Waal), Krimpen aan de Lek (Nederrijn/Lek) en het Ketelmeer (IJssel). Het 2D-gedeelte beslaat het Duitse en Nederlandse deel van Dijkkring 42. Hierin zijn in tegenstelling tot het model van Dijkkring 48 ook alle waterlopen in 2D opgenomen. De 1D-waterlopen van het model van Dijkkring 48 zijn nog aanwezig in het model maar worden niet gebruikt in deze studie. Het 2D-grid van Dijkkring 42 is aan de noordzijde begrensd door de Rijndijk en aan de zuidzijde door hoge gronden.



Figuur 2-2 De schematisatie van het gebruikte model. Het 2D-gedeelte van het model (oranje) bevat een uitgebreide schematisatie van verhoogde lijnelementen (paars). Het model van Dijkkring 48 is als basis gebruikt bij de bouw van dit model, waardoor de 1D-schematisatie hiervan nog te zien is ten noorden van Dijkkring 42.

2.3 Scenario's

In deze studie zijn in totaal 16 scenario's doorgerekend om verschillende combinaties van breslocaties (zie Figuur 2-3), bresmomenten, golfvorm en de timing van deze variabelen ten opzichte van elkaar door te rekenen (Tabel 2-1). Een verduidelijking van de naamgeving van de scenario's is weergegeven in Figuur 2-4. Voor 15 van de 16 varianten is gewerkt met dezelfde golf, namelijk de golf horend bij een T10.000 afvoer (15.820 m³/s te Lobith). Voor de laatste variant is de golf kunstmatig verbreed, deze wordt nader beschreven in paragraaf 2.4. Er zijn in totaal 4 breslocaties langs de Nederrijn en Boven-Rijn gebruikt, waarvan drie ten oosten van de slaperdijk en één ten westen van de slaperdijk (Figuur 2-3). Deze breslocaties en naamgeving van de bres zijn gekozen o.b.v. beschikbare modelresultaten van WSRL (zie Bijlage A). Ook zijn er in deze studie twee breslocaties in de slaperdijk toegevoegd. Voor alle bressen is voor de bresgroei de Verheij-Van der Knaap (2002) formule gebruikt (Verheij, 2003). De gebruikte instellingen voor de bresgroei zijn hetzelfde voor alle bressen (zie Bijlage B). Terugstroom naar de Waal treedt alleen op als het water over de kering stroomt (er zijn dus geen situaties bekeken met in de Waaldijk ter hoogte van Nijmegen).

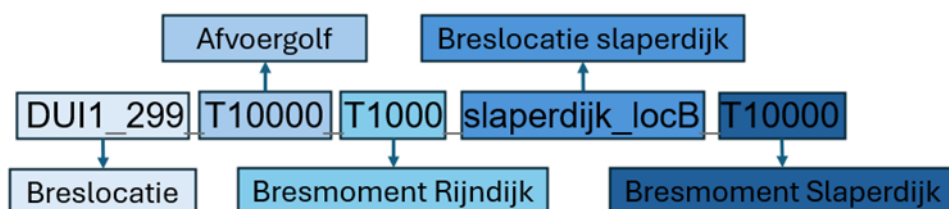


Figuur 2-3 De gebruikte breslocaties in de Rijndijken en de slaperdijk.

Tabel 2-1 Doorgerkende scenario's. Een toelichting over de opbouw van de scenarionaam is weergegeven in Figuur 2-4.

Scenarionaam	Breslocatie	Afvoergolf (Overschrijdingskans)	Bres in Rijndijk	Bres in Slaperdijk	Moment Bres in Slaperdijk
Referentiescenario	Geen doorbraak	1/10.000	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_102_T10000_piek	DUI1_102	1/10.000	Op de piek	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_102_T10000_T1000	DUI1_102	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_158_T10000_piek	DUI1_158	1/10.000	Op de piek	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_158_T10000_T1000	DUI1_158	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	DUI1_158	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie B	Piek golf bij bres Rijndijk
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_T10000	DUI1_158	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie A	Piek golf bij bres Rijndijk
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	DUI1_158	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie B	24 uur na bres Rijndijk
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_24H	DUI1_158	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie A	24 uur na bres Rijndijk
DUI1_299_T10000_piek	DUI1_299	1/10.000	Op de piek	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_299_T10000_T1000	DUI1_299	1/10.000	Bij Q van T1.000 golf	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	DUI1_299	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie B	Piek golf bij bres Rijndijk
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	DUI1_299	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	Locatie B	24 uur na bres Rijndijk
DUI1_375_T10000_piek	DUI1_375	1/10.000	Op de piek	n.v.t.	n.v.t.

Scenario-naam	Breslocatie	Afvoergolf (Overschrijdingskans)	Bres in Rijndijk	Bres in Slaperdijk	Moment Bres in Slaperdijk
DUI1_375_T10000_T1000	DUI1_375	1/10.000	Bij Q van T1.000 afvoergolf	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_375_T10000_T100	DUI1_375	1/10.000	Bij Q van T100 afvoergolf	n.v.t.	n.v.t.
DUI1_375_T10000EXT_T1000	DUI1_375	1/10.000 extended	Bij Q van T1.000 afvoergolf	n.v.t.	n.v.t.



Figuur 2-4 Verduidelijking van de naamgeving van de scenario's. De middelste rij is de naam, boven en onder de verduidelijking van het naamsegment. Deze naamgeving wordt gebruikt in de toelichting van de resultaten. Totstandkoming naam breslocatie: DUI1_299: ligt in Duitsland, 29,9 km benedenstrooms van de bovenstroomse modelgrens.

2.3.1 Breslocaties Rijndijk

Hieronder wordt beschreven waarom deze vier breslocaties in de Rijndijk gekozen zijn voor deze studie en welke scenario's er mee zijn doorgerekend.

Bres DUI1_102

Deze breslocatie ligt vrij haaks op de stroomrichting van de rivier in een buitenbocht. Hierdoor zou er relatief veel instroom plaats kunnen vinden. Deze bres is niet doorgerekend in combinatie met een bres in de slaperdijk.

Bres DUI1_158

Deze bres is gekozen omdat uit de simulaties van WSRL bleek dat hier het hoogste instroomdebiet van de breslocaties oostelijk van de slaperdijk plaatsvindt. Deze bres is daarom doorgerekend in combinatie met allebei de breslocaties in de slaperdijk.

Bres DUI1_299

Deze bres ligt relatief dicht bij de slaperdijk, waardoor de binnendijkse waterstand t.h.v. de bres relatief snel stijgt. Hierdoor neemt het verhang af waardoor er minder instroom kan plaatsvinden. Hier werd alsnog een hoog maximaal bresdebiet waargenomen in de resultaten van WSRL. Bovendien is bij deze breslocatie relatief weinig tijd beschikbaar voor het sluiten van coupures, waardoor doorstroming mogelijk zou zijn. Daarom is deze breslocatie aanvullend doorgerekend met een bres in de slaperdijk bij locatie B (Figuur 2-3).

Bres DUI1_375

Deze breslocatie ten westen van de slaperdijk is gekozen vanwege zijn hoge instroom- en terugstroomdebiet.

2.3.2 Breslocaties slaperdijk

Bres A

Punt A ligt in een buitenbocht van een waterloop die vlak langs de dijk loopt en waar hoge stroomsnelheden waargenomen worden in de modelresultaten (tot 3 m/s). Deze bres is alleen gemodelleerd in combinatie met Bres DUI1_158. Bres DUI1_299 ligt namelijk benedenstrooms van Bres A (waardoor er geen hoge stroomsnelheden langs deze bres zouden optreden), en bres DUI1_102 zou eenzelfde soort patroon van waterstandsstijging t.h.v. de bres veroorzaken als DUI1_158, maar langzamer doordat er minder instroom vanuit de Rijn plaatsvindt bij DUI1_102 dan bij DUI1_158.

Bres B

Punt B is de locatie waar de slaperdijk als eerste overstroomt (i.e. de laagste kruinhoogte). Bovendien liggen in deze regio meerdere oude wielen die duiden op eerdere doorbraken op deze locatie. Deze bres is zowel in combinatie met Rijndijkbres DUI1_158 als met DUI1_299 doorgerekend.

2.3.3 Bresmomenten Rijndijk

Voor alle 4 de breslocaties zijn twee basisvarianten doorgerekend:

- 1 Bresmoment in de Rijndijk op het moment dat de piek van de hoogwatergolf bij de bres is.
- 2 Bresmoment in de Rijndijk op het moment dat de T1.000 afvoer bij de bres wordt waargenomen (zie Tabel 2-2 voor de bijbehorende afvoeren). De bres ontstaat dus voordat de piek van de hoogwatergolf passeert.

Voor een gevoeligheidsanalyse zijn voor breslocatie DUI1_375 nog twee extra scenario's doorgerekend. In het eerste aanvullende scenario ontstaat de bres op het moment dat de golf de T100 afvoer bereikt. In het tweede aanvullende scenario wordt een kunstmatige verbrede T10.000 afvoergolf gebruikt, met een Bres in de Rijndijk op het moment dat de T1.000 afvoer bij de bres wordt waargenomen.

2.3.4 Bresmomenten slaperdijk

Voor twee breslocaties (DUI1_158 en DUI1_299) zijn ook bressen in de slaperdijk gesimuleerd. In deze scenario's vindt de bres in de Rijndijk plaats op het moment dat de T1000 afvoer bij de bres wordt waargenomen. Voor de slaperdijk zijn twee bresmomenten gekozen:

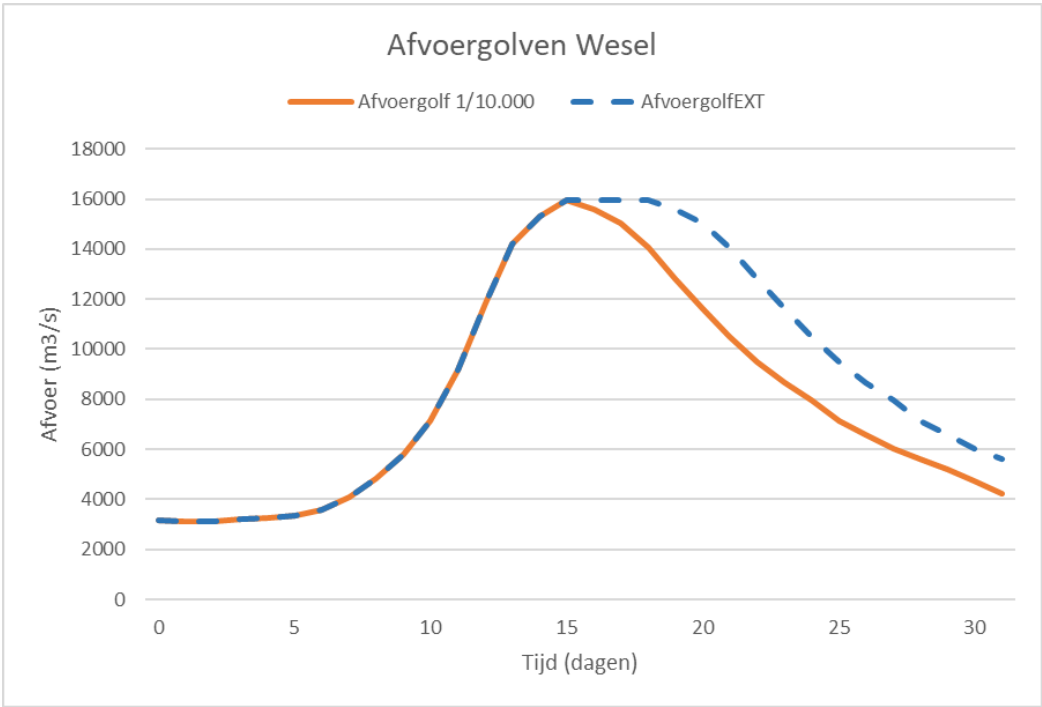
- 1 24 uur na de bres in de Rijndijk. Dit is een relatief snel bresmoment, wanneer de waterstanden bij de slaperdijk nog ruim onder de kruin liggen.
- 2 Op het moment dat de piek van de hoogwatergolf langs de bres in de Rijndijk komt. Als de bres later zou liggen is de hoogwatergolf zeker al voorbij voordat de dijk bij Nijmegen zou overstromen.

2.4 Randvoorwaarden en initiële condities

Om consistent te zijn met de eerdere studies van Maas & De Bruijn is voor alle simulaties als bovenstroomse randvoorwaarde de T10.000 golf gebruikt zoals beschreven in Hegnauer et al. (2022). De golf is berekend voor Lobith en daarom gecorrigeerd naar afvoeren bij Wesel (zie Tabel 2-2) volgens de methodiek gebruikt door Maas & De Bruijn (2022, paragraaf 2.4). De waarden van de hier gebruikte golf wijken iets af van de afvoergolven die later zijn gepubliceerd in Hegnauer et al. (2023) als zijnde de definitieve rapportversie van Hegnauer et al. (2022). Echter, deze afwijking bedraagt voor de gebruikte afvoeren minder dan 100 m³/s en daarom wordt niet verwacht dat het gebruik van de golven uit Hegnauer et al. (2022)

tot significant andere resultaten zal leiden dan de golven uit Hegnauer et al. (2023). Voor de benedenstroomse randvoorwaarden zijn Qh-relaties gebruikt zoals omschreven in Prinsen et al. (2020). In tegenstelling tot bij Maas & De Bruijn (2022) is de afvoer van de Oude IJssel niet verhoogd naar 50 m³/s, omdat dit onderdeel van het systeem niet in deze studie beoordeeld wordt.

Bevindingen uit Maas & De Bruijn (2024) waren onder andere dat de kans op negatieve systeemwerking groter wordt naarmate de afvoergolf breder wordt. Voor één scenario is gevarieerd met de vorm van de afvoergolf (DUI1_375_T10000EXT_T1000). De piek van de T10.000 afvoergolf houdt hier drie dagen aan. De gebruikte afvoergolven (standaard en de kunstmatig verbrede afvoergolf) zijn weergegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Gecorrigeerde randvoorwaarden bij de bovenstroomse rand van het model (Wesel). De oranje golf is de basisgolf en de blauwe (AfvoergolfEXT) is de kunstmatig verbrede golf om de gevoeligheidsanalyse voor één breslocatie uit te voeren.

Tabel 2-2 Gebruikte afvoeren per overschrijdingskans. Door topvervlakking op de Niederrhein is de maximale afvoer bij Wesel groter dan bij Lobith . De afvoeren voor T1.000 en T100 zijn enkel gebruikt om de bresmomenten te bepalen.

Overschrijdingskans	Q bij Lobith	Q bij Wesel
T10.000	15.820	15.957
T1.000	14.640 ¹	n.v.t.
T100	12.890	n.v.t.

¹ De gebruikte T1000 waarde in Maas & De Bruijn is 14.896, deze komt uit GRADE '17.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de uitgevoerde doorbraakscenario's gepresenteerd en toegelicht. Hieronder worden eerst de overstromingskarakteristieken (bresdebieten, golfvorm en overstromingsverloop) in de verschillende scenario's beschreven (Paragraaf 3.1). Vervolgens wordt het effect op de afvoeren en waterstanden in de Niederrhein/Boven-Rijn en Waal geëvalueerd (Paragraaf 3.2).

3.1 Overstromingskarakteristieken

3.1.1 Bresdebiet: effect breslocatie en bresmoment

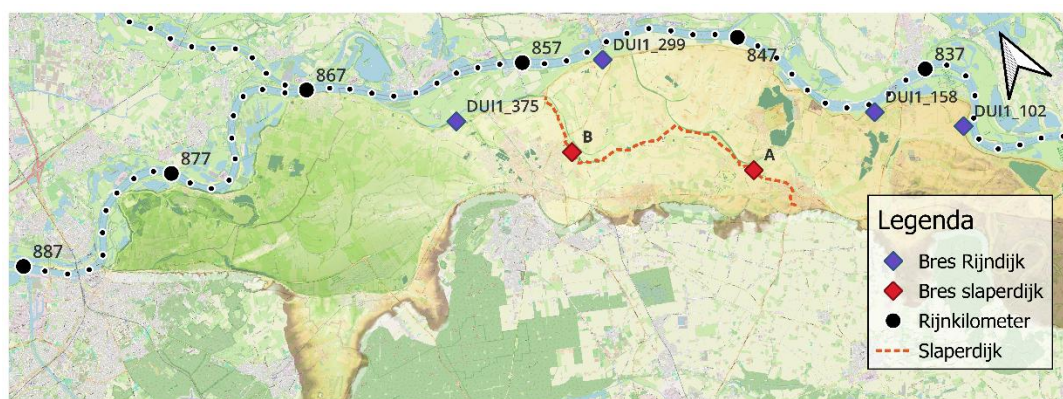
De instroomdebieten in de verschillende scenario's zijn weergegeven in Tabel 3-1. Het verloop van de bresdebieten door de bressen in de Rijndijk, slaperdijk en eventueel terugstroomdebiet zijn weergegeven in Figuur 3-2 (Scenario DUI1_102), Figuur 3-3 (Scenario DUI1_158), Figuur 3-4 (Scenario DUI1_299) en Figuur 3-5 (Scenario DUI1_375).

De maximale instroomdebieten variëren tussen de 800 en 1500 m³/s afhankelijk van het scenario. De hoogste maximale bresdebieten worden waargenomen bij bres DUI1_375, met als maximum 1468 m³/s. Een verklaring hiervoor is dat het achterland bij DUI1_375 ten opzichte van de rivierwaterstand relatief lager ligt dan bij de andere breslocaties. Dit zorgt voor een groter verval en daarmee een groter bresdebiet. Voor alle breslocaties in de Rijndijk ten oosten van de slaperdijk wordt het maximale bresdebiet waargenomen in scenario's waarbij de start van de bresgroei op de piek van de T10.000 afvoergolf plaatsvindt. Het verschil met scenario's met een eerder bresmoment (bres bij een lagere afvoer) is echter klein (<100 m³/s).

Het bresmoment heeft wel een grote invloed op de cumulatieve bresdebieten. Deze zijn namelijk hoger wanneer het bresmoment eerder plaatsvindt, een logisch gevolg van langere instroom. Bij enkele scenario's vindt ook terugstroom door de bres plaats (Kolom 4, Tabel 3-1). Met name bij bres DUI1_299 vindt er veel terugstroom plaats (~1.5x10⁸ m³). Doordat deze bres in het benedenstroomse gedeelte van het oostelijke deel van Dijkkring 42 ligt kan het water minder ver in westelijke richting stromen voordat het tegen de slaperdijk aanstroomt. Als gevolg daarvan stijgen de binnendijkse waterstanden ter hoogte van de bres relatief snel. Hierdoor wordt het verval door de bres kleiner en zal er minder instroom plaatsvinden. Bij de breslocaties DUI1_102 en DUI1_375 kan het water veel verder naar het westen stromen voordat het respectievelijk de slaperdijk of de noordwestelijke zijde van Dijkkring 42 bereikt (nabij Nijmegen). Hierdoor stijgen de binnendijkse waterstanden ter hoogte van deze breslocaties pas later of helemaal niet, en is de terugstroom op deze locaties daardoor relatief kleiner of niet voorkomend.

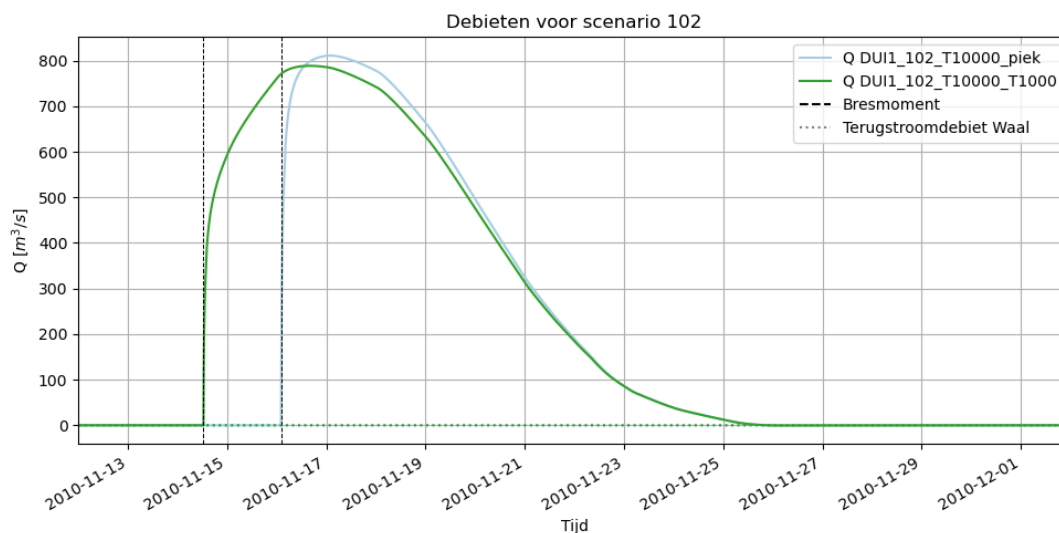
Tabel 3-1 Bresdebieten en cumulatieve volumes voor de verschillende scenario's. De kolom 'cumulatief bresvolume incl. terugstroom' geeft de instroom min terugstroom door de bres in de Rijndijk weer. De kolom 'Cumulatief terugstroomvolume Waal' geeft de terugstroom naar de Waal t.h.v. Nijmegen weer.

Scenario	Maximaal bresdebiet [m³/s]	Cumulatief bresvolume [10⁸ m³]	Cumulatief bresvolume incl. terugstroom² [10⁸ m³]	Cumulatief terugstroomvolume Waal [10⁸ m³]
DUI1_102_T10000_piek	810	3.17	3.17	0
DUI1_102_T10000_T1000	790	3.95	3.95	0
DUI1_158_T10000_piek	1010	4.08	3.85	0
DUI1_158_T10000_T1000	975	5.03	4.80	0
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	975	5.10	5.10	0
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_T10000	975	5.08	5.08	0
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	975	5.09	5.09	0
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_24H	975	5.09	5.09	0
DUI1_299_T10000_piek	1015	1.91	0.48	0
DUI1_299_T10000_T1000	958	2.32	0.84	0
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	958	2.53	1.67	0
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	960	2.50	1.57	0
DUI1_375_T10000_piek	1452	5.92	4.13	0.78
DUI1_375_T10000_T1000	1468	7.41	5.64	2.21
DUI1_375_T10000_T100	1371	7.70	5.98	2.51
DUI1_375_T10000EXT_T1000	1639	11.8	10.5	6.55

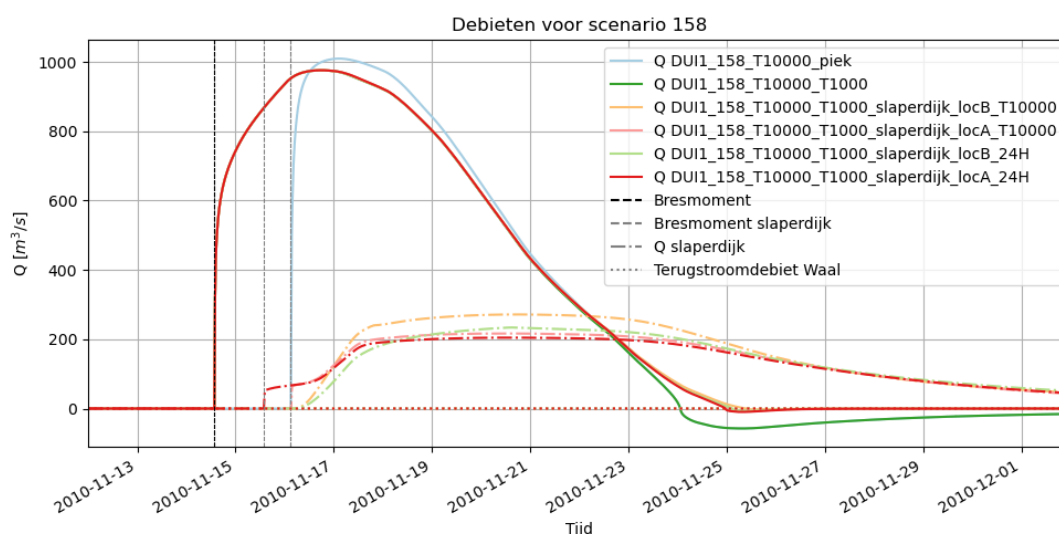


Figuur 3-1 Extra overzicht breslocaties.

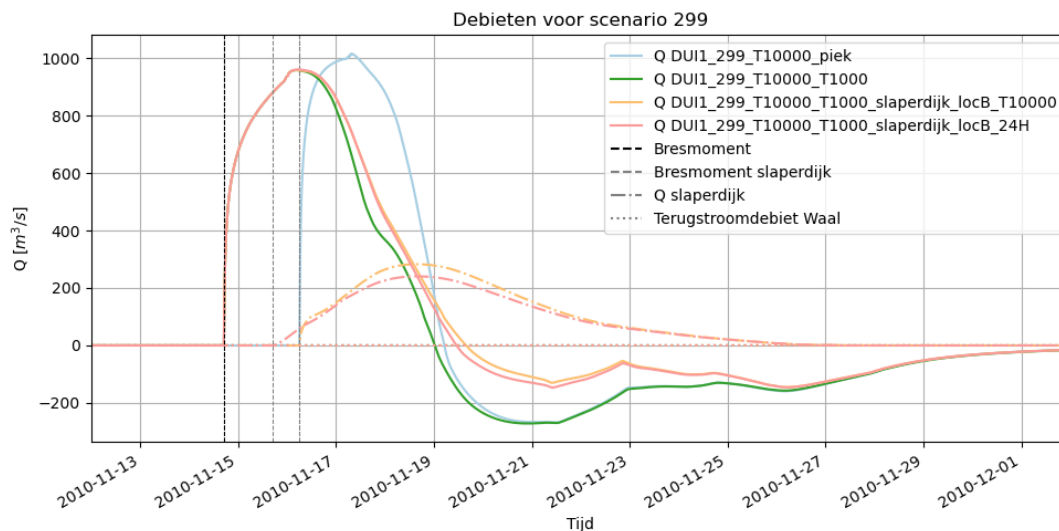
² Aan het einde van de simulatieperiode is het cumulatieve bresdebiet afgelezen. Op dit moment vond er bij enkele bressen nog terugstroom plaats als de binnendijkse waterstand hoger is dan op de rivier. Dit geeft dus een indicatie maar niet de daadwerkelijke waarde.



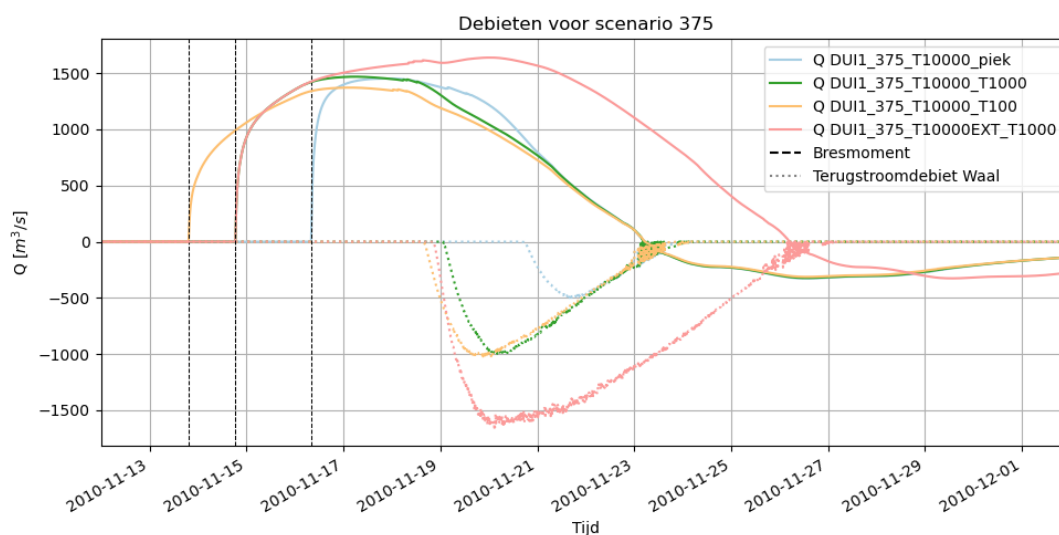
Figuur 3-2 De instroomdebieten voor de scenario's met bres 102 in de Rijndijk (ononderbroken lijnen). Er is bij deze scenario's geen terugstroom naar de Waal ter hoogte van Nijmegen.



Figuur 3-3 De instroomdebieten voor de scenario's met bres 158 in de Rijndijk (ononderbroken lijnen). Een negatief debiet voor deze breslocaties betekent terugstroom door de bres. De streep-stippellijnen weergeven het debiet door de slaperdijk voor de verschillende scenario's. Het eerste bresmoment in de slaperdijk is na 24 uur, het tweede moment op het moment dat de piekafvoer ter hoogte van de bres in de Rijndijk is. Q slaperdijk weergeeft de afvoer door de bres in de slaperdijk, maar niet over de kruin van de slaperdijk. Er vindt bij deze scenario's geen terugstroom naar de Waal bij Nijmegen plaats.



Figuur 3-4 De instroomdebieten voor de scenario's met bres 299 in de Rijndijk (ononderbroken lijnen). Een negatief debiet voor deze breslocaties betekend terugstroom door de bres. De streep-stippellijnen weergeven het debiet door de slaperdijk voor de verschillende scenario's weer. Het eerste bresmoment in de slaperdijk is na 24 uur, het tweede moment op het moment dat de piekafvoer ter hoogte van de bres in de Rijndijk is. Q slaperdijk weergeeft de afvoer door de bres in de slaperdijk, maar niet over de kruin van de slaperdijk. Er is bij deze scenario's geen terugstroom naar de Waal ter hoogte van Nijmegen.



Figuur 3-5 De instroomdebieten voor de scenario's met bres 375 in de Rijndijk (ononderbroken lijnen), en de bijbehorende terugstroomdebieten naar de Waal (stippellijnen) bij Nijmegen.

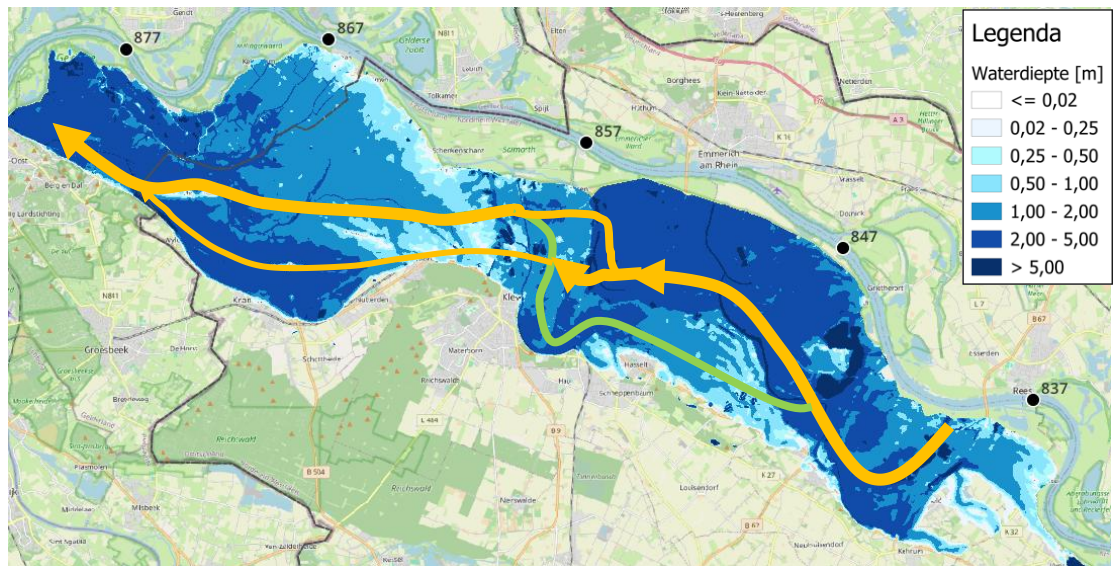
3.1.2 Golfvorm

In de simulaties is initieel niet gevarieerd met de golfvorm. Na evaluatie van de eerste resultaten is wel een simulatie met een extra brede golf uitgevoerd voor 1 breslocatie (*DUI1_375_T10000EXT_T1000*). Doordat de piekafvoer hierin langer aanhoudt (3 dagen de maximale afvoer horende bij een 1/10.000 afvoergolf (15.957 m³/s bij Wesel)), houdt de instroom hier ook langer aan (Figuur 3-5). Dit is terug te zien aan het cumulatieve instroomdebiet in dit scenario (zie Tabel 3-1), welke met een factor 1,59 toeneemt t.o.v. het vergelijkbare scenario zonder verlengde afvoergolf *DUI1_375_T10000_T1000*. Het maximale instroomdebiet in m³/s neemt ondertussen maar met een factor 1,12 toe. Een opvallend verschil is te zien bij het cumulatieve terugstroomvolume vanuit de dijkkring naar de Waal (zie Tabel 3-1), dit neemt toe met een factor 3 tot 6,55x10⁸ m³. 99% van het extra ingestroomde water, ten opzichte van de standaardgolf op deze breslocatie, stroomt ook weer terug naar de Waal. De extra instroom door de bres zorgt voor een ruim twee dagen langer aanhoudende terugstroom naar de Waal.

3.1.3 Overstromingsverloop

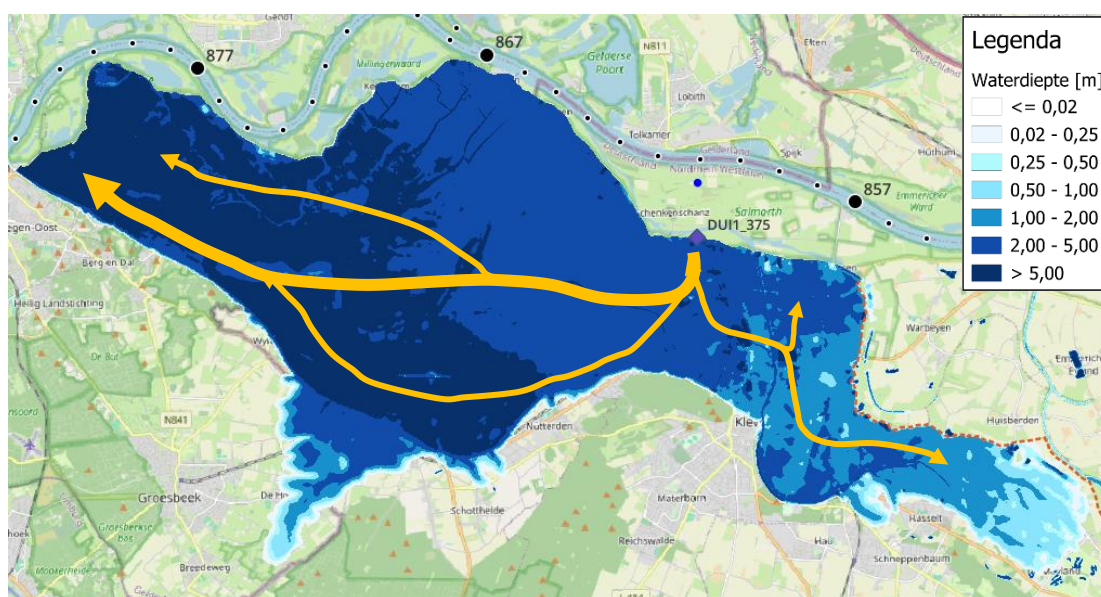
De timing van het overstromingsverloop en locatie specifieke waterdieptes in de dijkkring verschillen per breslocatie. De manier waarop het water zich door de dijkkring naar het westen verplaatst is echter in grote mate gelijk voor de verschillende breslocaties. In Figuur 3-6 wordt het overstromingsverloop indicatief weergegeven voor een scenario bij bres *DUI1_158*. Het water stroomt hier eerst richting de zuidelijke rand (hoge grond) en dan langs de slaperdijk naar het westen. De laagste punten van de slaperdijk liggen in het westen. Daar stroomt het water over de kruin van de slaperdijk. Het grootste deel van het water volgt dan de meest directe route naar het westen. Een deel stroomt naar het zuiden en vult daar een laag liggend gebied op.

Wanneer er een bres in de slaperdijk optreedt bij locatie B (de westelijke locatie) zal de doorstroom vrijwel hetzelfde zijn. Wanneer er een bres in de slaperdijk optreedt bij locatie A, volgt een deel van het water de groene lijn in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Indicatief overstromingsverloop voor breslocaties ten oosten van de slaperdijk. Hier weergegeven scenario *DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_24H*. Het water stroomt alleen langs de route van de groene pijl bij een bres in de slaperdijk bij locatie A.

Bij een bres bij breslocatie DUI1_375 (ten westen van de slaperdijk), volgt het water eenzelfde soort patroon richting het westen (Figuur 3-7). Een verschil is echter dat vlak voordat de terugstroom bij Nijmegen plaatsvindt, het water ook richting het oosten stroomt.



Figuur 3-7 Indicatief overstromingsverloop voor de breslocatie ten westen van de slaperdijk (DUI1_375_T10000_T1000).

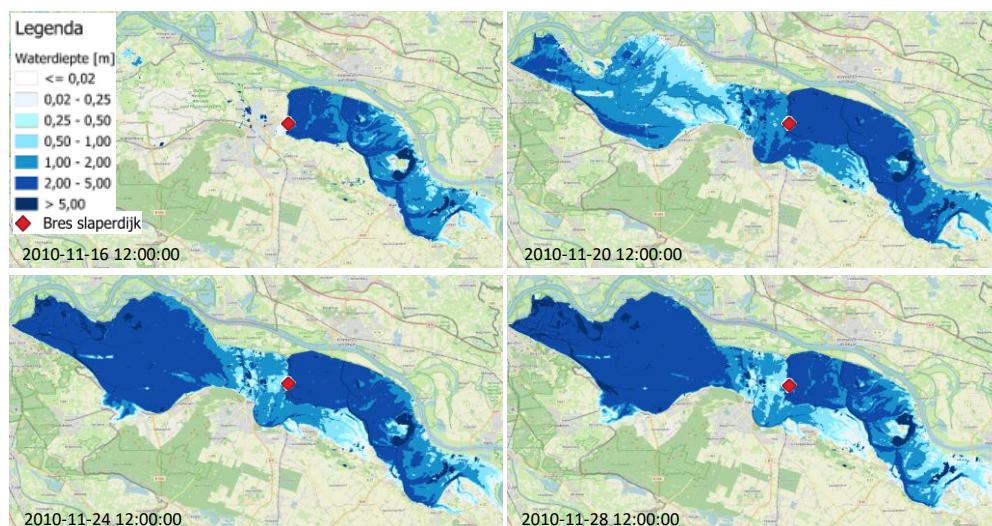
3.1.4 Effect van slaperdijk op het overstromingsverloop

De slaperdijk heeft een grote invloed op het overstromingsverloop in Dijkkring 42. Wanneer de breslocatie zich bovenstrooms van de slaperdijk bevindt en de slaperdijk stand houdt, heeft deze een vertragende werking op de doorstroom richting het westen. In essentie stroomt eerst de regio ten oosten van de slaperdijk vol en daarna de regio ten westen van de slaperdijk. Hierdoor is het totale 'bergingsvolume' van de dijkkring groter, waardoor er ook een grotere cumulatieve instroom nodig is om tot eventuele terugstroom naar de Waal bij Nijmegen te leiden.

Wanneer de slaperdijk wel breekt zijn de bresdebieten door deze bres relatief laag in vergelijking met de bressen in de Rijndijk. In Tabel 3-2 worden de maximale bresdebieten door de slaperdijk weergegeven (voor de scenario's waarin een bres in de slaperdijk plaatsvindt). De bresdebieten door de bressen in de slaperdijk zijn een factor vier lager dan de maximale debieten door de Rijndijk. In Figuur 3-8 is terug te zien dat na het plaatsvinden van de bres in de slaperdijk (linksboven - 2010-11-16), de waterdieptes ten oosten van de slaperdijk blijven toenemen en nog langere tijd hoger blijven dan op het moment van de bres in de slaperdijk.

Tabel 3-2 De cumulatieve debieten door/over de slaperdijk en door de bres van de slaperdijk. De laatste kolom geeft het maximale momentane debiet door de bres in de slaperdijk.

Scenario	Cumulatief volume door/over slaperdijk [10 ⁸ m ³]	Cumulatief volume door bres slaperdijk [10 ⁸ m ³]	Maximaal debiet door/over slaperdijk [m ³ /s]	Maximaal bresdebet bres slaperdijk [m ³ /s]
DUI1_102_T10000_piek	1.21	n.v.t.	539	n.v.t.
DUI1_102_T10000_T1000	1.97	n.v.t.	694	n.v.t.
DUI1_158_T10000_piek	2.12	n.v.t.	840	n.v.t.
DUI1_158_T10000_T1000	3.06	n.v.t.	936	n.v.t.
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	3.99	2.32 ³	926	272
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_T10000	3.90	2.03 ³	927	216
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	3.93	2.04 ³	936	234
DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locA_24H	3.88	1.98 ³	926	205
DUI1_299_T10000_piek	0.00182	n.v.t.	130	n.v.t.
DUI1_299_T10000_T1000	0.359	n.v.t.	368	n.v.t.
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_T10000	1.19	1.13	361	283
DUI1_299_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H	1.09	1.02	347	240

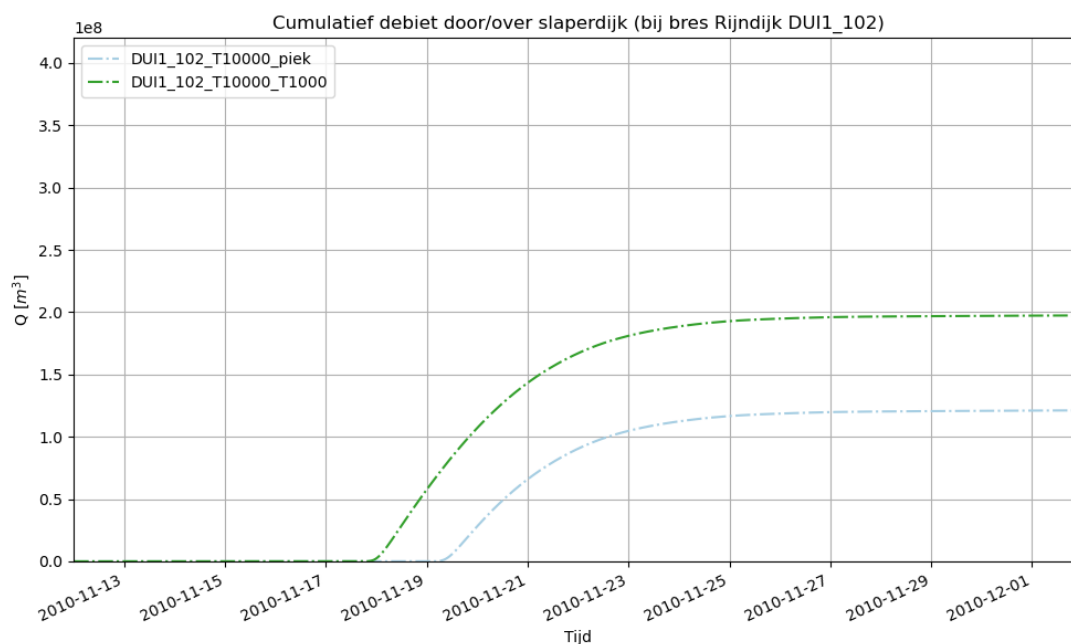


Figuur 3-8 Waterdieptekaarten (scenario DUI1_158_T10000_T1000_slaperdijk_locB_24H) voor vier verschillende momenten met een tussenstap van 4 dagen. De eerste kaart (linksboven) is het moment waarop de slaperdijk doorbreekt.

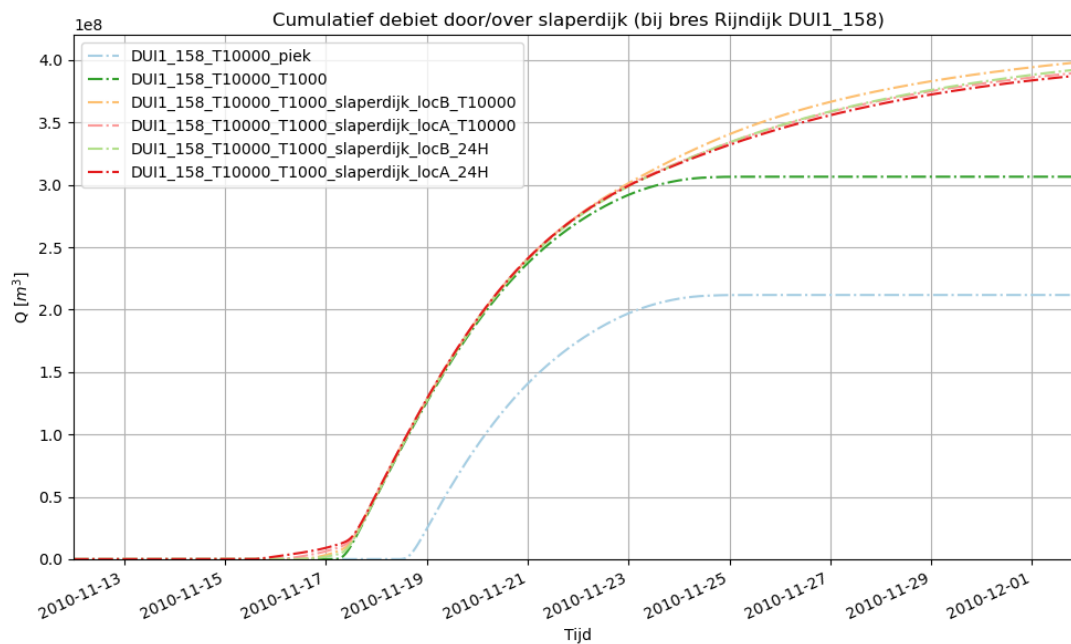
³ Doorstroom nog niet gestopt aan einde van simulatie.

Verdere analyse van de resultaten laat zien dat in de scenario's met een bres in de slaperdijk ook water over de kruin van de slaperdijk loopt. In Tabel 3-2 en Figuur 3-9, Figuur 3-10 en Figuur 3-11 staan de cumulatieve debieten door/over de slaperdijk weergegeven. Dit zijn dus zowel de debieten door een eventuele bres, als over de kruin van de dijk. De scenario's met een bres t.h.v. locatie DUI1_299 hebben de laagste doorstroom naar het westelijke deel van Dijkkring 42. De scenario's ter hoogte van locatie DUI1_102 starten later met doorstromen, maar met een vroeg bresmoment verdubbelt de doorstroom hier bijna: $\sim 1.1 \cdot 10^8$ en $\sim 2.0 \cdot 10^8$ voor *DUI1_102_T10000_piek* en *DUI1_102_T10000_T1000* respectievelijk. De scenario's met breslocatie DUI1_158 zorgen voor de grootste doorstroom door/over de slaperdijk. De combinatie van een groot bresdebiet, een kleiner overstroomd gebied (waardoor het water sneller over de slaperdijk stroomt dan bij de meer oostelijke bres), en het ontbreken van belemmeringen door stijgende binnendijkse waterstanden zorgt hier voor hoge (cumulatieve) debieten door zowel de Rijndijk als de slaperdijk. In de scenario's met breslocatie DUI1_158 en met een bres in de slaperdijk neemt het cumulatieve bresvolume nog toe aan het einde van de simulaties. Deze locaties zorgen dus voor de hoogste ($\sim 3.8 \cdot 10^8$ tot $\sim 4 \cdot 10^8$ cumulatieve debieten door/over de slaperdijk).

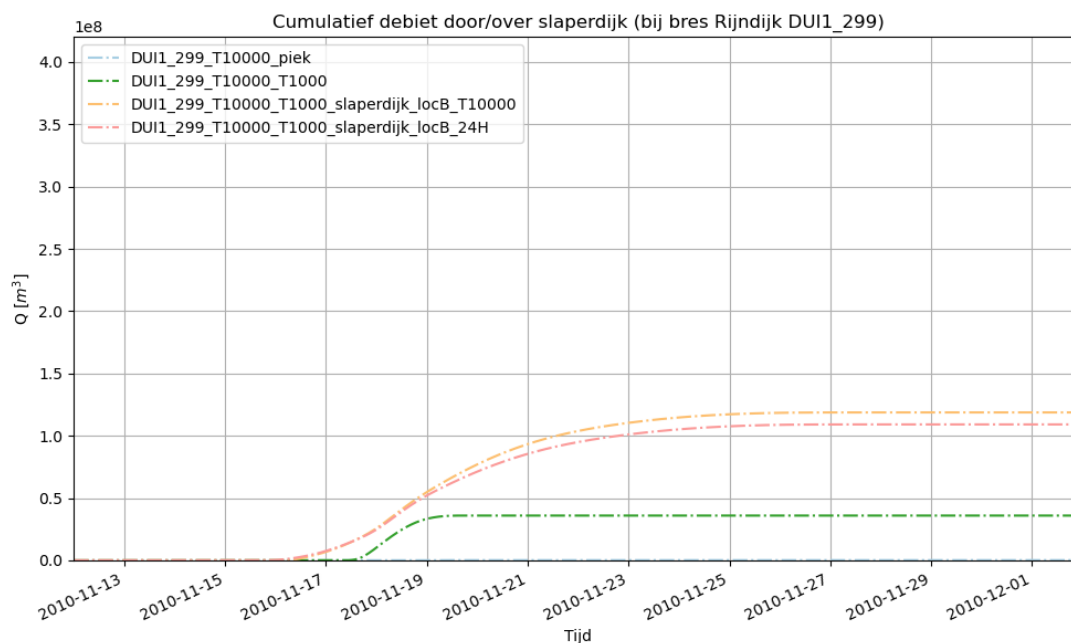
Wanneer de maximale bresdebieten door/over de slaperdijk vergeleken worden met de maximale debieten door alleen de bres in de slaperdijk, is goed te zien dat op de piek van de door-/overstroom een groot deel van het water over de kruin van de slaperdijk loopt. In de scenario's met bres DUI1_158 in de Rijndijk is het maximale debiet door de bres en over de kruin van de slaperdijk gezamenlijk ongeveer een factor 4 groter dan het bresdebiet door alleen de bres in de slaperdijk. Het effect van een later bresmoment in de slaperdijk is ook goed terug te zien in de maximale bresdebieten. De maximale bresdebieten zijn hoger als de bres in de slaperdijk later plaatsvindt, doordat de waterstanden achter de slaperdijk dan hoger zijn op het moment van de bres.



Figuur 3-9 Cumulatieve doorstroomvolumes door/over de slaperdijk bij de scenario's met bres DUI1_102 in de Rijndijk.



Figuur 3-10 Cumulatieve doorstroomvolumes door/over de slaperdijk bij de scenario's met bres DUI1_158 in de Rijn dijk.

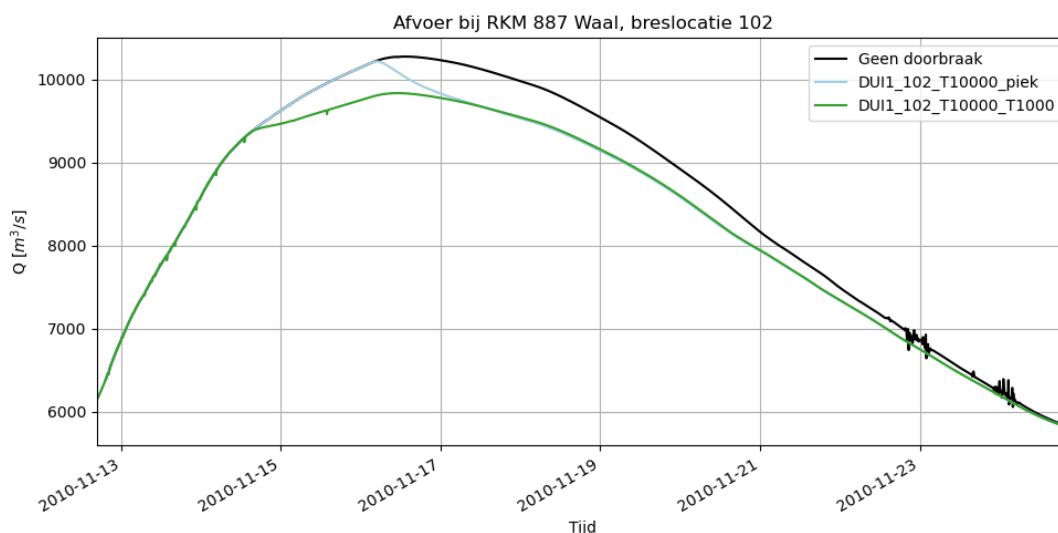


Figuur 3-11 Cumulatieve doorstroomvolumes door/over de slaperdijk bij de scenario's met bres DUI1_299 in de Rijn dijk. De lijn van scenario DUI1_299_T10000_piek loopt over de x-as en is daardoor slecht zichtbaar.

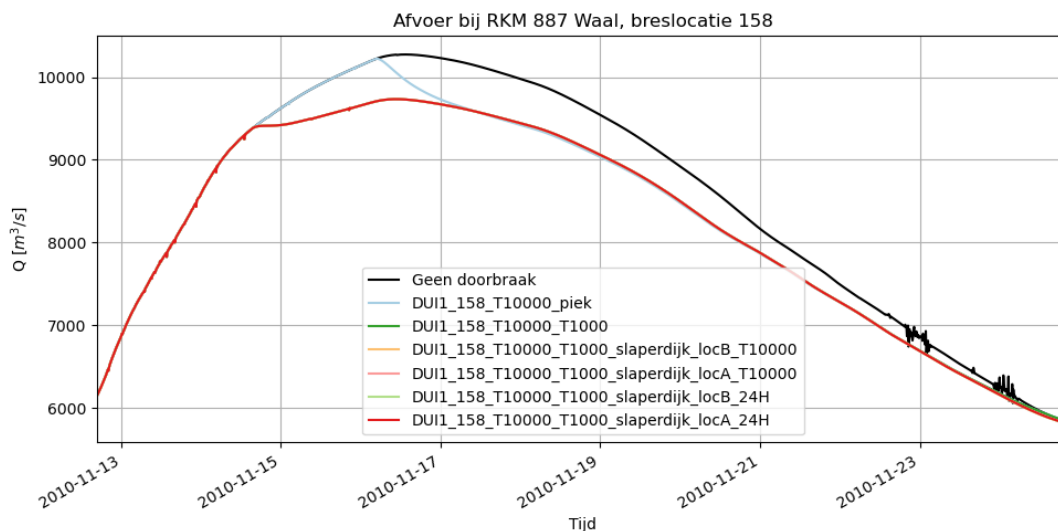
3.2 Invloed op negatieve systeemwerking

De invloed van een dijkdoorbraak in Dijkkring 42 op de waterstanden en afvoeren in de Waal wordt in deze paragraaf beschreven. In Figuur 3-12 t/m Figuur 3-15 wordt het debiet in de Waal ter hoogte van het Maas-Waalkanaal (RKM 887) weergegeven. Deze locatie ligt 4 kilometer benedenstrooms van het dijktraject waar terugstroom naar de Waal kan plaatsvinden. Vergelijkbare figuren met het waterstandsverloop op deze locatie zijn opgenomen in Bijlage C.

De resultaten voor de twee meest bovenstroomse breslocaties (DUI1_102 en DUI1_158) zijn vergelijkbaar (Figuur 3-12 en Figuur 3-13). Een vroege bres (op het moment dat de maximale afvoer horend bij een T1000-golf de bres passeert) zorgt voor afvlakking van de afvoerpiek (440 en 540 m³/s voor bres DUI1_102 en DUI1_158 respectievelijk) doordat een deel van de afvoer Dijkkring 42 instroomt (positieve systeemwerking). Wanneer de bres plaatsvindt op het moment dat de piek van de gebruikte afvoergolf de bres passeert, neemt de piekafvoer maar licht af (60 en 51 m³/s voor bres DUI1_102 en DUI1_158 respectievelijk) ten opzichte van een scenario zonder doorbraak. Wel houdt de piek in dit scenario minder lang aan (de afvoerpiek wordt spits). In deze scenario's stroomt er geen water terug naar de Waal, waardoor er hier enkel sprake is van positieve systeemwerking.

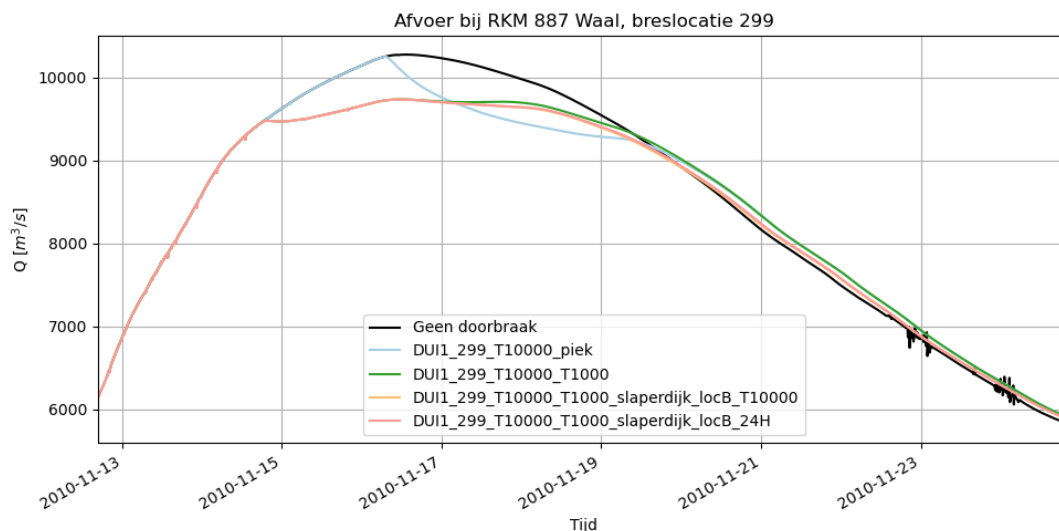


Figuur 3-12 Afvoeren t.h.v. RKM 887 voor scenario's met breslocatie 102.



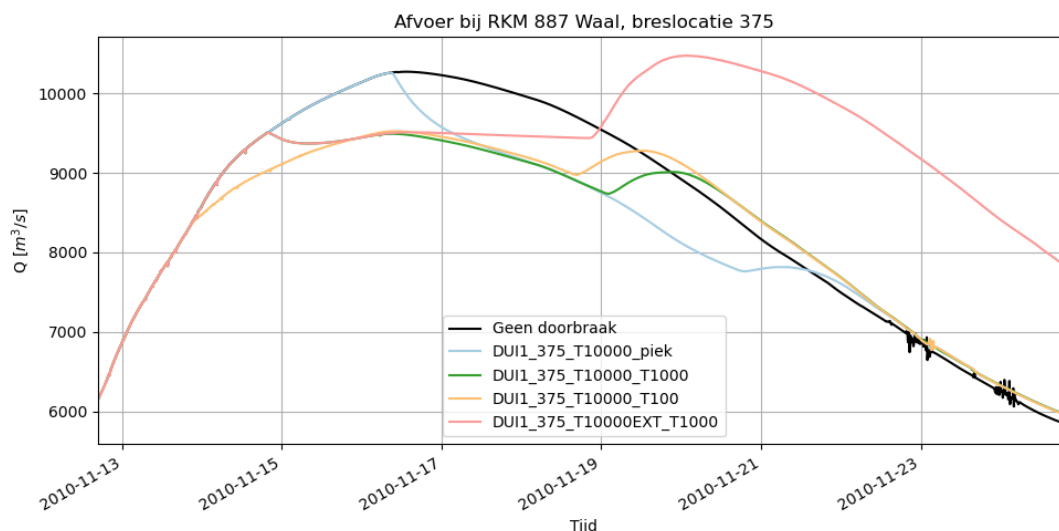
Figuur 3-13 Afvoeren t.h.v. RKM 887 voor scenario's met breslocatie 158.

De scenario's met breslocatie DUI1_299 (Figuur 3-14) hebben een vrij vergelijkbaar patroon t.o.v. de scenario's met breslocatie DUI1_102 en DUI1_158. Ook hier zien we geen toename van de maximale afvoer op de Waal. Wel zien we ten opzichte van breslocaties DUI1_102 en DUI1_158 dat de afvoer vanaf 2010-11-20 hoger ligt dan in het scenario zonder doorbraak. Dit is enkele dagen na de piek en zorgt daardoor niet voor een hogere piekafvoer. Dit komt doordat er in deze periode weer terugstroom door de bres naar de Nederrijn plaatsvindt. Ook in dit scenario is er enkel sprake van positieve systeemwerking.



Figuur 3-14 Afvoeren t.h.v. RKM 887 voor scenario's met breslocatie 299.

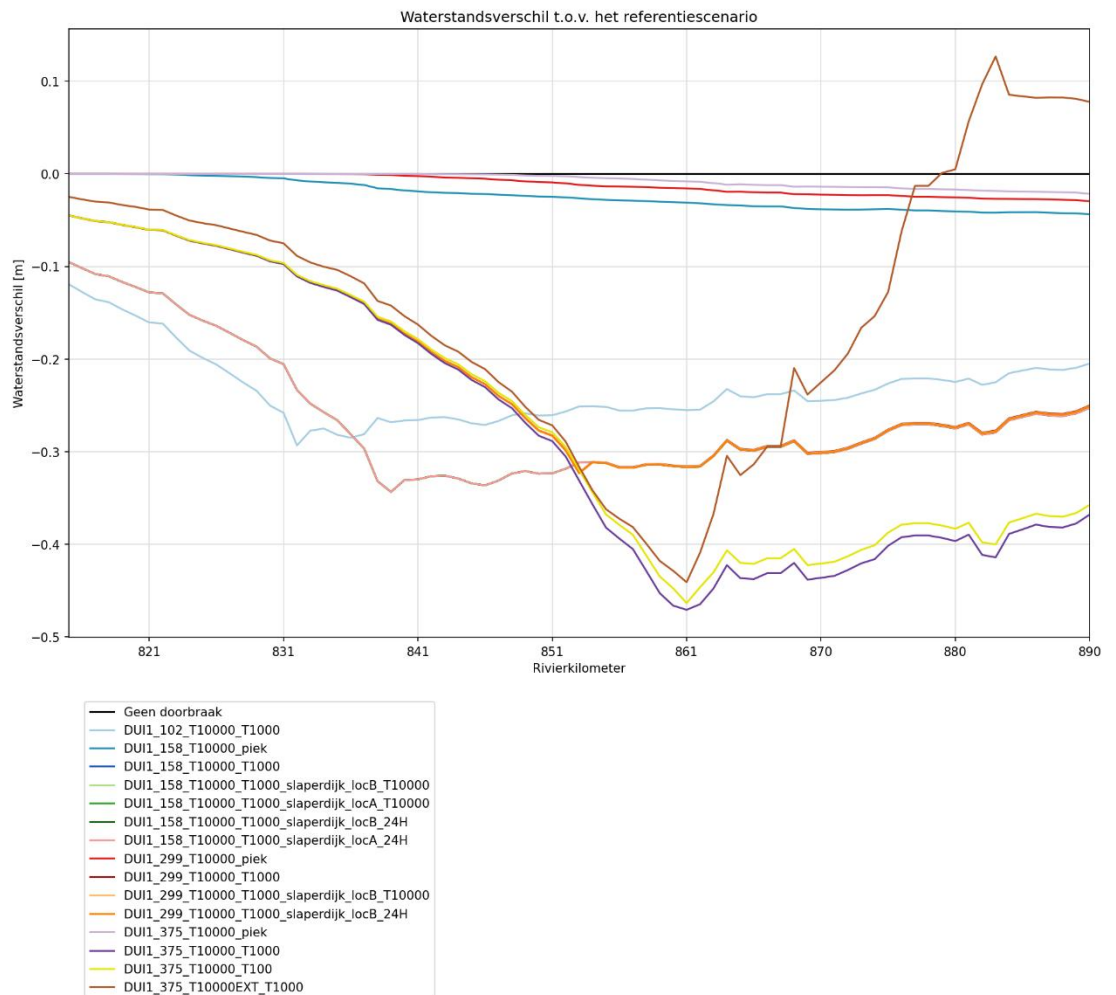
Bij de scenario's met bres DUI1_375 (Figuur 3-15) ziet de afvoergolf er tot enkele dagen na de piek vrij gelijkvormig uit ten opzichte van de overige breslocaties. Hierna vindt er in deze scenario's wel terugstroom naar de Waal plaats door overloop van dijktraject 42-1 nabij Nijmegen. Hier is dus sprake van negatieve systeemwerking. In de scenario's waar de standaardgolf gebruikt is valt de terugstroom ruim na de piek in de Waal en zorgt die ook niet voor een sterke verhoging van de afvoer. Dit is ook het geval bij een bres op een extreem vroeg moment (scenario *DUI1_375_T10000_T100*), al komt hierdoor het terugstroommoment naar de Waal wel dichterbij de piekafvoer op de Waal te liggen. De terugstroom naar de Waal zorgt echter alleen in het scenario met de kunstmatig verbreedde *T10000EXT-afvoergolf* voor zoveel terugstroom dat de waterstanden toenemen t.o.v. de situatie zonder bres. Er ontstaat op de Waal een nieuwe en hogere afvoerpiek met een maximale afvoer van 10.476 m³/s, dat is 202 m³/s hoger dan in het scenario zonder doorbraak.



Figuur 3-15 Afvoeren t.h.v. RKM 887 voor scenario's met breslocatie 375.

Het effect op de maximale waterstanden in de Waal is gevisualiseerd in Figuur 3-16. Hier is te zien dat de waterstanden door de hoge instroom in scenario *DUI1_375_T10000EXT_T1000* bovenstrooms van het terugstroomtraject juist lager zijn dan in het referentiescenario (doordat een deel van het water via Dijkkring 42 stroomt) terwijl ze tussen RKM 880 en 883 juist toenemen tot 12 cm boven het referentiescenario. Opvallend is dat de laagste piekwaterstanden (benedenstrooms van de breslocaties) worden waargenomen bij *DUI1_375_T10000_T1000* en *DUI1_375_T10000_T100*. Dit komt door de extra vroege instroom en de timing van de terugstroom die precies goed vallen om de afvoeren en daarmee ook de waterstanden laag te houden (zie ook Figuur 3-15).

In de scenario's waarin de bres pas op de piek van de afvoergolf start met groeien, is goed te zien dat de waterstanden maar enkele centimeters afnemen. Dit is ook een te verwachten resultaat, omdat de maximale waterstand, behorende bij de afvoergolf, van dit scenario wél bereikt wordt ter hoogte van de bres. Wel zullen deze hoge waterstanden minder lang aanhouden dan in het scenario zonder bres, doordat na de bres een deel van het water de dijkkring in stroomt.



Figuur 3-16 Verschil in maximale waterstand t.o.v. het referentiescenario (zonder doorbraak) tussen RKM 816 (Wesel) en RKM 890 (benedenstrooms van Nijmegen). De pieken ter hoogte van RKM 864 en 868 worden veroorzaakt door instabiliteit in het model.

4 Discussie

In dit hoofdstuk worden de factoren besproken die het effect van doorbraken langs de Nederrijn/Boven-Rijn op de Waalafvoer bepalen en wordt de relevantie van dit effect voor de belasting op de benedenstroomse dijktrajecten bediscussieerd.

4.1 Factoren die het effect van doorbraken op de Waalafvoer bepalen

De resultaten laten zien dat bij simulaties met een T10.000 afvoergolf de maximale waterstanden en afvoeren op de Waal niet zullen toenemen als gevolg van systeemwerking via Dijkkring 42. Wel zien we verschillen tussen de scenario's in het effect op de waterstanden en afvoeren op de Waal. Deze verschillen zijn te verklaren aan de hand van de volgende factoren:

- Breslocatie;
- Moment van breken ten opzichte van de top van de afvoergolf in de Rijn (breekt de dijk voor de top of op de top van de afvoergolf);
- Hoogte en vorm van de afvoergolf door de Rijn waarbij de doorbraak optreedt.

De effecten van deze variabelen worden hieronder toegelicht. Daarna wordt ook de relevantie van het systeemwerkingseffect op toetsing en ontwerp van de Waaldijken beschreven (4.2) en zal er een vergelijking met systeemwerking op de IJssel gemaakt worden (4.3).

Breslocatie

De breslocatie bepaalt of en op welk moment er terugstroom vanuit de dijkkring naar de Waal plaatsvindt. Het beïnvloedt namelijk de tijd die nodig is om de waterstand in het westelijke deel (ter hoogte van Nijmegen - RKM 883) van Dijkkring 42 zover te laten stijgen dat er terugstroom over de kruin van de Rijndijk naar de Waal kan plaatsvinden.

Het water moet een ongeveer gelijke afstand afleggen door Dijkkring 42 als door de Boven-Rijn/Waal om het potentiële terugstroompunt t.h.v. RKM 883 te bereiken. Het water verplaatst zich echter trager door Dijkkring 42 dan door de rivier doordat het zich over het oppervlak van de dijkkring verspreidt, deze zich vult en het ruwere landoppervlak het water vertraagt. Door deze effecten zal een bres verder naar het oosten voor meer vertraging zorgen dan een bres in het westen, waardoor het samenvallen van de terugstroom met de piekafvoer steeds onwaarschijnlijker wordt. Met name een bres ten oosten van de slaperdijk zorgt voor sterke vertraging. Dit komt doordat het gebied ten oosten van de slaperdijk tot grote diepte gevuld wordt t.g.v. de aanwezigheid van de slaperdijk. De aanwezigheid van de slaperdijk zorgt voor een grote extra 'buffercapaciteit' van de dijkkring. Dit is ook het geval wanneer er één bres in de slaperdijk ontstaat, omdat de bresdebieten door de bres in de slaperdijk veel lager zijn dan de debieten door de Rijndijk. Het gebied ten oosten van de slaperdijk blijft zich hierdoor ook met bij een bres in de slaperdijk verder vullen.

Ook als er meerdere bressen in de slaperdijk zouden optreden en het gebied ten oosten van de slaperdijk hierdoor snel zou leegstromen naar het westen (een niet getest scenario), is het samenvallen van een eventuele terugstroom met een piek in de Waal uiterst onwaarschijnlijk. Dit valt op te maken uit de resultaten van de scenario's met bres DUI1_375. Het water moet bij deze breslocatie de kortste afstand tot het mogelijke terugstroompunt naar de Waal overbruggen, het kleinste volume opvullen en heeft het grootste instroomdebiet van alle gebruikte breslocaties. Toch valt ook hier de terugstroom naar de Waal bij een zeer vroeg bresmoment (op het moment dat de maximale afvoer horende bij een T100 afvoergolf bereikt wordt) pas na de piek van de afvoergolf in de Waal.

Moment van breken

Uit de resultaten komt sterk naar voren dat de kans op een toename van de maximale waterstand en afvoer door negatieve systeemwerking toeneemt op het moment dat de bres van de Rijndijk eerder plaatsvindt. Dit is ten eerste het geval omdat bij een vroeger bresmoment het ingestroomde volume sterk toeneemt, de afvoer op de Rijn is namelijk nog aan het stijgen, leidend tot hogere binnendijkse waterstanden. Daarnaast zorgt een vroeg bresmoment ervoor dat de kans op samenvallen van terugstroom naar de Waal met de piek van de afvoer in de Waal groter wordt.

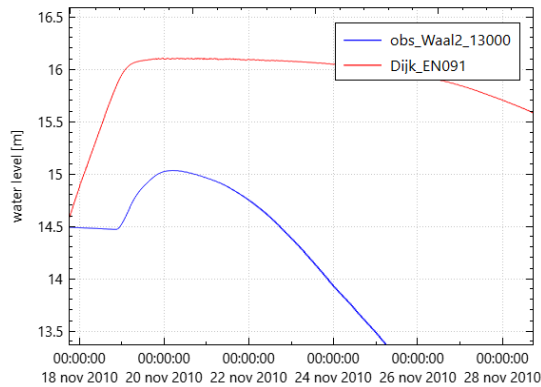
Golfvorm

Het gebruikte afvoerscenario, een T10.000 golf, is een extreem scenario. Uit de resultaten wordt duidelijk dat bij deze golf de kans op verhoging van de waterstanden in de Waal t.o.v. het referentiescenario door negatieve systeemwerking erg klein is. Daarom is gekeken of het verbreden van deze golf, waarbij de piek 3 dagen aanhoudt in plaats van meteen afneemt, wel tot een verhoging van de maximale waterstand kan leiden. De overschrijdingskans van de verbrede golf is niet bepaald maar is per definitie kleiner dan de gebruikte T10.000 golf. De resultaten laten zien dat in dit scenario negatieve systeemwerking resulteert in een toename van de maximale waterstand en afvoer. Het effect is ook minder afhankelijk van het bresmoment dan bij de andere golven doordat zowel de waterstanden in de Waal en de terugstroom naar de Waal vanuit Dijkkring 42 voor langere tijd hoog zijn. Het is daarom ook denkbaar dat bij een afvoergolf met een bredere vorm, bijvoorbeeld eerst een lagere piek en vervolgens een hoge piek, negatieve systeemwerking zou kunnen zorgen voor een toename van de maximale waterstanden op de Waal. Het effect hiervan op de Waaldijken wordt in paragraaf 4.2 verder toegelicht.

Andere invloeden op negatieve systeemwerking

Naast de bovengenoemde bepalende factoren voor het al dan niet plaatsvinden van negatieve systeemwerking, zijn er nog twee andere factoren waarvan de effecten hier niet bepaald zijn, maar welke wel een invloed zouden kunnen uitoefenen.

Als eerst wordt door Maas & De Bruijn (2024) het falen van de kering ter hoogte van de terugstroom vanuit de dijkkring naar de rivier benoemd als factor die de gevolgen van negatieve systeemwerking zou kunnen laten toenemen. Wanneer de kering bij dit terugstroomtraject zou falen en de buitenwaterstanden lager zijn dan de binnenwaterstanden, kunnen de waterstanden in de Waal snel toenemen door de plotselinge instroom vanuit Dijkkring 42. Doordat de waterstanden in de dijkkring zo een scenario zouden dalen, neemt ook het verval bij de bres toe (in het geval van een bres ten westen van de slaperdijk), waardoor de instroom hoger zou blijven. In de berekende scenario's vindt deze bres niet plaats, maar stroomt het water over de kruin van de dijk. De waterstand in de Waal is vervolgens lager, variërend van één tot enkele meters afhankelijk van de tijd (Figuur 4-1). Dit waterstandsverschil gaat samen met aanzienlijke terugstroomdebieten (boven de 1500 m³/s). De kruinhoogte varieert in het terugstroomgebied echter weinig, over een lengte van zo'n 3 kilometer ligt deze tussen de 15,83 en 16,18 meter. Hierdoor zal de terugstroom over de dijk zich naar verwachting niet sterk op één punt concentreren.



Figuur 4-1 Het verschil in waterstand binnendijks (Rood) en buitendijks (Blauw) ter hoogte van RKM 883 (terugstroomlocatie van Dijkkring 42 naar de Waal) in scenario DUI1_375_T10000EXT_T1000. De kruinhoogte van de dijk is hier 16.028 meter. Door terugstroom door de bres in de Rijndijk wordt de binnendijkse waterstand uiteindelijk lager dan de kruinhoogte van de dijk.

Een in deze studie niet gemodelleerd scenario, is een scenario met een bres in de Rijndijk dicht bij het splitsingspunt. Bij een bres in de Rijndijk rond het splitsingspunt zou de zuigende werking van de bres de afvoerverdeling ook kunnen beïnvloeden (i.e. een groter percentage van de Boven-Rijnafoer door de Waal) (Rozier & Asselman, 2019). Verwacht wordt dat de invloed van de instroom initieel zou leiden tot waterstandsverlaging op de Waal door de instroom in de dijkkring. Wanneer er echter terugstroom plaats zou vinden naar de Waal en er dan ook extra afvoer door de Waal stroomt door een scheef getrokken afvoerverdeling, zou dit kunnen leiden tot een kortstondige verhoging van de piekafvoeren in de Waal. Voor het doorrekenen van dit scenario zou een 2D-modellering van de riviertakken rond het splitsingspunt nodig zijn.

4.2 Relevantie van het systeemwerkingseffect op toetsing en ontwerp van de Waaldijken

Uit de gebruikte scenario's blijkt dat bij een doorbraak in Dijkkring 42 altijd positieve systeemwerking optreedt. De afvoer op de Boven-Rijn neemt af en zo ook die op de benedenstroomse takken. Negatieve systeemwerking vindt alleen plaats in scenario's met een bres ten westen van de slaperdijk en leidt alleen met een kunstmatig verbrede afvoergolf tot hogere maximale waterstanden en afvoeren. In het licht van deze resultaten wordt hieronder de faalkansen van dijktrajecten in Dijkkring 42 en benedenstroomse trajecten in de Waal besproken.

De berekende faalkansen voor 2025 (inclusief de geplande versterkingstrajecten ten tijde van de analyse⁴) zijn weergegeven in Figuur 4-2. De berekende faalkansen variëren van 1/1.000 tot 1/100.000 per jaar. Het gaat hier om de berekende faalkansen als samenstelling van de kansen van verschillende faalmechanismen. In principe kan een doorbraak ook optreden bij een lagere afvoer, maar dit heeft een veel kleinere kans. De ondergrens van de normering van benedenstroomse trajecten in de Waal is weergegeven in Figuur 4-3. Deze variëren tussen de 1/3.000 en 1/30.000 per jaar. Het grootste deel van de trajecten aan de Waal voldoet echter nog niet aan de gestelde norm⁵.

⁴ Voortgang dijkversterkingsprogramma Deichverband Xanten-Kleve: <https://dvxk.de/sanierungsabschnitte>. Nog niet versterkte dijkvakken: <https://dvxk.de/planung>. Dijkvakken in uitvoering: <https://dvxk.de/im-bau>.

⁵ [Waterveiligheidsporaal - beoordeling](#)

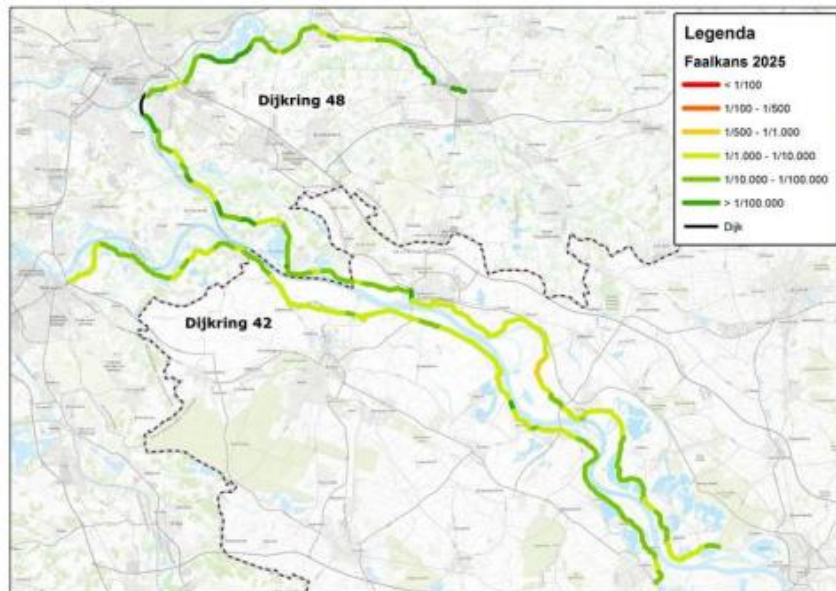
Als de Rijndijk langs Dijkkring 42 breekt bij een afvoer met een overschrijdingskans die groter of gelijk aan 1/10.000 per jaar is, dan zal het effect van de positieve systeemwerking sterker zijn dan dat van negatieve systeemwerking, waardoor er lagere maximale waterstanden optreden. Wanneer er een afvoer optreedt met een kleinere overschrijdingskans, zou er bij een golf met bijvoorbeeld een brede piek of 2 opeenvolgende pieken waarbij de bres tijdens de eerste piek plaatsvindt, wel negatieve systeemwerking met een verhoging van de maximale waterstanden kunnen optreden. Dit scenario zou dan een veel kleinere kans hebben dan 1/10.000 per jaar. Dit betekent dat de normkans voor benedenstroomse trajecten (welke variëren tussen de 1/3.000 en 1/10.000, en 1 traject 1/30.000) sowieso al overschreden zouden worden. De invloed van deze zeer extreme en zeldzame scenario's op de eisen aan de sterkte en dus het ontwerp van de dijk zijn beperkt.

In het huidige systeem is de kans op negatieve systeemwerking op de Waal dus zo onwaarschijnlijk dat het meenemen hiervan in de normering niet nodig lijkt. Naast bovengenoemde kansen is ook consistentie belangrijk. In Maas & De Bruijn (2024) worden meerdere overwegingen genoemd. Met name belangrijk voor de overweging in deze situatie is:

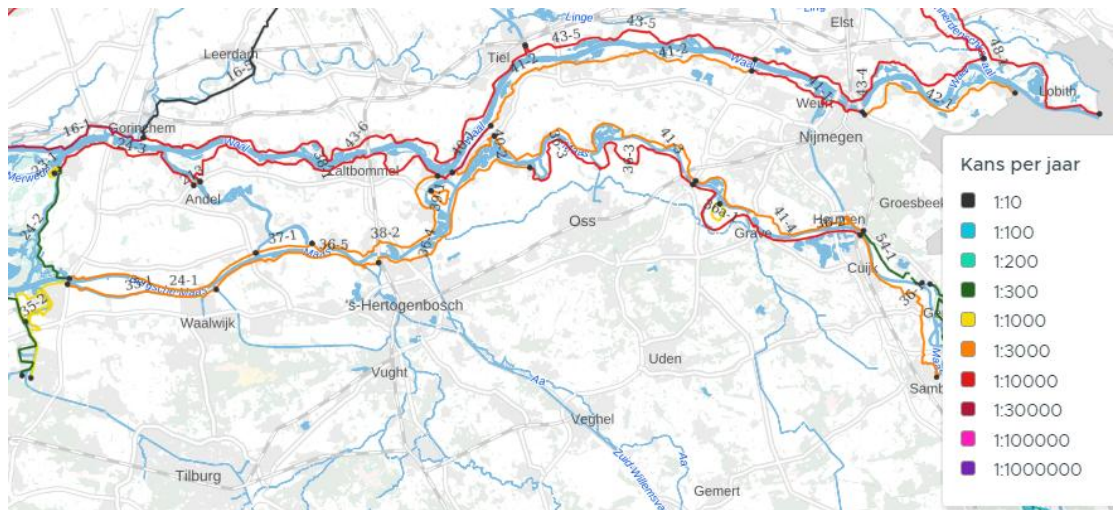
- Systeemwerking (zowel positief als negatief) wordt in de beoordeling van primaire keringen op de punten waar dit relevant is maar minimaal en versimpeld meegenomen. De omstandigheden die zich bij Dijkkring 42 zouden moeten voordoen om te zorgen voor negatieve systeemwerking, zijn erg specifiek en hebben een zeer kleine kans.
- Qua kostenefficiëntie zou het effectiever zijn om, als men zou willen ingrijpen, het dijktraject aan de Rijn tussen de slaperdijk en (een stuk ten westen van) het splitsingspunt te versterken. Echter, het grootste deel van dit traject ligt in Duitsland. Wanneer deze dijk later in de tijd breekt, wordt de kans op samenvallen van de terugstroomgolf vanuit Dijkkring 42 met de piek in de Waal kleiner.

Effect van klimaatverandering en onzekerheden

Een belangrijke factor welke in de toekomst voor andere uitkomsten zou kunnen zorgen, is het effect van klimaatverandering. Door klimaatverandering zullen de afvoeren horend bij een bepaalde overschrijdingskans toenemen (Hegnauer et al., 2023). Als de verwachte topvervlakking in de Duitse Rijn hetzelfde blijft, kan er een sterke verbreding van de golf plaatsvinden door topvervlakking. Dit zou tot gevolg kunnen hebben dat de kans op negatieve systeemwerking, horend bij een afvoer met dezelfde overschrijdingskans van de piek, maar een brede vorm, toeneemt.



Figuur 4-2 Indicatie faalkansen in 2025, na uitvoering van geplande dijkversterkingsprojecten. De faalkansen voor zowel het Nederlandse als Duitse deel zijn berekend met PC-ring volgens de VNK2 methodiek (Maaskant et al. 2019).



Figuur 4-3 Ondergrens van de normering (Bron: [Waterveiligheidsportaal - ondergrens](#))

4.3 Vergelijking met negatieve systeemwerking op de IJssel

In deze studie zijn dezelfde randvoorwaarden gebruikt als eerder voor het onderzoek naar negatieve systeemwerking op de IJssel (Maas en de Bruijn, 2024). Hierdoor is het mogelijk om hier de resultaten te vergelijken. Op deze manier kunnen nieuwe inzichten over belangrijke factoren die de (mate van) systeemwerking beïnvloeden opgedaan worden.

Het voornaamste verschil is dat bij gebruik van de standaard golf er op de Waal geen toename van de maximale waterstand en afvoer plaatsvindt, terwijl er in de IJssel een maximale toename van 60 cm ($\sim 700 \text{ m}^3/\text{s}$) waargenomen werd in één van de onderzochte scenario's. Belangrijke factoren die dit verschil kunnen verklaren zijn de aanwezigheid van waterlopen in de dijkkring en de topografie. De aanwezige waterlopen in Dijkkring 48 (met name de Oude IJssel) zorgen voor een snelle doorstroom door de dijkkring en instroom in de IJssel. In Dijkkring 42 zijn er geen grote waterlopen die de doorstroom versnellen. Daarnaast legt het water in Dijkkring 48 een kortere route af dan het water dat via het Pannerdens Kanaal naar de IJssel stroomt. In Dijkkring 42 moet het water dat door de dijkkring stroomt ongeveer dezelfde afstand afleggen als het water dat door de rivier stroomt. In beide dijkkringen spelen obstructies of dieper liggende delen een bufferende rol. In Dijkkring 48 kunnen de Rijnstrangen als waterbuffer fungeren. In Dijkkring 42 zal bij een bres ten oosten van de slaperdijk, de slaperdijk fungeren als een compartimenteringsdijk waardoor het westelijke deel langer droog blijft. In Dijkkring 48 ontbreekt een dergelijke compartimenterende slaperdijk.

De compartimentering in de dijkkring speelt ook nog een rol in het totale bergende volume van de betreffende dijkkring. In Tabel 4-1 is een inschatting van het totale geborgen volume voor zowel Dijkkring 42 als 48 weergegeven. Voor beide dijkkringen zijn de volumes berekend voor de meest benedenstroomse en meest bovenstroomse breslocaties in de Rijndijk. Bij een benedenstroomse bres in Dijkkring 42 (DUI_375) is het bergend volume van de dijkkring ongeveer gelijk aan een bres als bij een bovenstroomse bres in Dijkkring 48 (Spijk). Bij een bovenstroomse bres is het bergend volume van Dijkkring 42 echter een stuk groter. Opvallend is ook dat een benedenstroomse bres in Dijkkring 48 een groter bergend volume heeft, wat verklaard kan worden door verschillen in overstromingspatronen. Een groter bergend volume heeft als gevolg een latere terugstroom. Een kleiner bergend volume heeft als gevolg een snellere mogelijke terugstroom, waardoor de kans op het samenvallen van de terugstroom met de piek van de afvoergolf groter wordt. Hoe groot die kans is hangt samen met de breslocatie en de af te leggen route van het water door de dijkkring.

Tabel 4-1 Totaal bergend volume van de dijkkring per breslocatie, berekend op basis van de rasterkaarten met maximale waterdiepte per scenario. Dit is daarom in benadering van het bergende volume. Alle scenario's zijn berekend met een T10.000 golf met een bresmoment op het moment dat de maximale afvoer horend bij een T1.000 golf de bres passeert.

Dijkkring	Breslocatie	Volume [10^8 m^3]
42	DUI1_102 (bovenstrooms)	7,4 ⁶
42	DUI1_375 (benedenstrooms)	5,4
48	Bislich (bovenstrooms)	5,1
48	Spijk (benedenstrooms)	5,5

Ook de afvoercapaciteit van de riviertak waar negatieve systeemwerking zou kunnen optreden beïnvloedt de kans op verhoogde afvoeren t.o.v. een scenario zonder bres. De impact van eenzelfde hoeveelheid terugstroom is namelijk verschillend voor de IJssel en de Waal; waar terugstroom naar de IJssel zorgt voor een verhoging van de afvoer en waterstand met respectievelijk $\sim 700 \text{ m}^3/\text{s}$ en 60 cm, veroorzaakt terugstroom naar de Waal voor een

⁶ Omdat de dijkkring nog niet volgestroomd is in dit scenario, is het volume hier berekend als som van de bergend volume op het moment dat het water over de slaperdijk gaat stromen bij bresscenario DUI1_102 ($2.0 \cdot 10^8 \text{ m}^3$) (i.e. het bergend volume van het gebied ten oosten van de slaperdijk) en het bergend volume bij bres DUI1_375 ($5.4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$) (i.e. bergend volume van het gebied ten westen van de slaperdijk).

verhoging van de afvoer en waterstand met respectievelijk $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ en 8 cm. Oftewel, eenzelfde terugstroom in termen van volume, heeft een grotere impact op de IJssel dan op de Waal. Het verschil in waterstand wordt veroorzaakt door de geometrie van beide riviertakken. De IJssel is zo'n vier keer smaller dan de Waal en bij eenzelfde afvoertoeename zal er zich dus een grotere waterstandsstijging voordoen.

De grote relatieve toename van de afvoer op de IJssel (via Dijkkring 48) wordt ook veroorzaakt door de bestaande afvoerverdeling over de verschillende riviertakken. Bij de gebruikte T10.000 golf (zonder bres; $Q_{\text{max}} = 15.820 \text{ m}^3/\text{s}$) stroomt ongeveer 65% ($\sim 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) van de totale Boven-Rijn afvoer naar de Waal, terwijl er maar 15% ($\sim 2500 \text{ m}^3/\text{s}$) naar de IJssel stroomt. Eenzelfde debiet dat vanaf de Boven-Rijn via Dijkkring 48 of 42 naar respectievelijk de IJssel of de Waal stroomt, veroorzaakt dus een grotere procentuele toename van de afvoer in de IJssel dan in de Waal.

Door het verschil in afvoer per riviertak, verschilt ook de tijdsperiode waarin aanvullende toevoer vanuit de dijkkring tot hogere maximale waterstanden kan leiden tussen de twee dijkkringen. Deze periode is voor de Waal korter dan voor de IJssel. Zo bedraagt de periode waarin $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ terugstroom vanuit de dijkkring zorgt voor waterstandsverhoging, t.o.v. het referentiescenario, 213 uur in de IJssel en 119 uur in de Waal (bij de scenario's met een T10.000 afvoergolf).

Door deze eigenschappen van de betreffende riviertakken is de uitgangspositie voor de Waal beter dan voor de IJssel; het is onwaarschijnlijker dat de piek van de afvoergolf in de Waal en het terugstromen van water uit Dijkkring 42 naar de Waal samenvallen, en als ze samenvallen is er in de Waal meer terugstroom nodig voor een vergelijkbare relatieve impact op afvoeren en waterstanden omdat dit simpelweg een grotere riviertak is dan de IJssel. Enkel het kleinere bergende volume van Dijkkring 42 bij een benedenstroomse bres zorgt voor een slechtere uitgangspositie voor de Waal.

De invloed van factoren die door Maas & de Bruijn benoemd worden (breslocatie, timing van bresgroei en vorm van de afvoergolf) zijn ook terug te zien in de resultaten van deze studie. Hoe eerder de Rijndijk ten opzichte van de top van de hoogwatergolf faalt én hoe korter de route naar de ontvangende riviertak (hier Waal/IJssel) is, hoe groter de kans op een toename van waterstanden t.o.v. een scenario zonder doorbraak zal zijn. Voor beide riviertakken geldt dat het effect op de waterstanden groter is naarmate de breslocatie verder benedenstrooms ligt op de Boven-Rijn, doordat bij deze breslocaties minder water gebufferd wordt in de dijkkring.

5 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie was tweeledig, namelijk; 1. Het beoordelen van het effect van een overstroming in Dijkkring 42 op negatieve systeemwerking in de Waal en 2. Inzicht krijgen in het overstromingsverloop in Dijkkring 42, met name in relatie tot het effect van de slaperdijk. Om hier inzicht in te verkrijgen zijn er 16 simulaties uitgevoerd waarbij er een bres in de Rijndijk plaatsvond en in enkele simulaties ook een bres in de compartimenterende slaperdijk die de dijkkring in twee delen verdeelt. Op basis van de resultaten van deze simulaties is bediscussieerd of het relevant is om het effect van negatieve systeemwerking mee te nemen in de beoordeling en het ontwerp van de Waaldijken.

Er kan geconcludeerd worden dat bij een doorbraak in Dijkkring 42 de kans op negatieve systeemwerking resulterend in hogere afvoeren op de Waal minimaal is. Het breken van de Rijndijk en de daardoor veroorzaakte binnendijkse overstromingen hebben een dempend effect op de maximale afvoer in de Rijn. Dit effect is groter dan het volume dat verder benedenstrooms terug kan stromen in de Waal. Alleen in de scenario's met een bres ten westen van de slaperdijk werd terugstroom naar de Waal (i.e. negatieve systeemwerking) waargenomen. In deze scenario's is de afstand die het water door de dijkkring moet afleggen en het op te vullen volume in de dijkkring (voordat water over de kruin terug naar de Waal kan stromen) het kleinst. Toch valt in deze scenario's de terugstroom naar de Waal pas na de piek van de afvoergolf in de Waal. De maximale afvoeren en waterstanden in de Waal nemen in deze gevallen nog steeds af doordat een deel van het water Dijkkring 42 instroomt. Enkel bij een scenario waarin de afvoergolf verbreed is werd negatieve systeemwerking met als gevolg een verhoging van de maximale waterstand en afvoer t.o.v. het referentiescenario waargenomen. Dit scenario heeft in het huidige klimaat een dusdanig kleine overschrijdingskans dat het meenemen hiervan in de normering en hydraulische belasting van de Waal niet wordt aanbevolen. In de verre toekomst zou dit door hogere afvoeren (veroorzaakt door klimaatverandering) en topvervlakking in Duitsland wellicht wel kunnen plaatsvinden.

Wat betreft het overstromingsverloop zijn de inzichten die opgedaan zijn uit de scenario's met een breslocatie ten oosten van de slaperdijk interessant. Bij de scenario's met een bres in de Rijndijk ten oosten van de slaperdijk werd geen terugstroom naar de Waal waargenomen. Doordat in deze simulaties het deel van de dijkkring ten oosten van de slaperdijk eerst opvult en vervolgens het deel van de dijkkring ten westen van de slaperdijk, is de buffercapaciteit van de dijkkring als geheel in dit geval veel groter. Bij het plaatsvinden van één bres in de slaperdijk zijn de bresdebieten door deze bres niet hoog genoeg om te zorgen voor leegstroom van het gebied ten oosten van de slaperdijk. Ook wanneer er meerdere bressen in de slaperdijk zouden plaatsvinden (dit is in deze studie niet gesimuleerd), zou de vertraging veroorzaakt door de slaperdijk er naar alle waarschijnlijkheid voor zorgen dat een eventuele terugstroom naar de Waal na de piek van de afvoergolf van de Waal zou vallen.

De simulaties die in deze studie gedaan zijn geven een eerste beeld van de effecten van een overstroming in Dijkkring 42 op waterstanden en afvoeren in de Waal. Wanneer er in de toekomst aanvullende analyses uitgevoerd zouden worden, zijn er enkele scenario's/onderwerpen die nader beschouwd kunnen worden:

- 1 Wat is de kans op het falen van de kering waarover terugstroom plaatsvindt?
- 2 Het effect van hogere afvoergolven en afvoergolven met een andere vorm zou verder geëvalueerd kunnen worden. Dit kan bijvoorbeeld door een afvoergolf horende bij de KNMI'23 klimaatscenario's inclusief gemodelleerde topvervlakking te gebruiken. De verwachte topvervlakking in Duitsland geeft ook reden om te kijken naar extra brede golven.

6 Referenties

- Bomers, A., Schielen, R.M.J. & Hulscher, S.J.M.H. Consequences of dike breaches and dike overflow in a bifurcating river system. *Nat Hazards* 97, 309–334 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03643-y>
- Hegnauer, M. R. Leander, H. van den Brink, J. Beersma (2022). Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine Final report of GRADE-Rhine version 3.0 11205237-003-ZWS-0016, versie February 2022, conceptversie van Hegnauer et al., 2023
- Hegnauer, M. R. Leander, H. van den Brink, J. Beersma (2023). Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine Final report of GRADE-Rhine version 3.0 11205237-003-ZWS-0016, versie 26 May 2023, def versie van Hegnauer et al., 2022
- Klerk, W.J. (2013). Load interdependencies of flood defences. TU Delft, Master thesis.
- Maas, B. F & de Bruijn, K. M. (2022). Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel. Deltares rapport 11208036-007-ZWS-0001
- Maas, B. F & de Bruijn, K. M. (2024). Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel - Fase 2. Deltares rapport 11209264-008-ZWS-0001
- Maaskant, B., Barneveld, H. & Vermeer, K. (2019). Overstromingsrisico grensoverschrijdende dijkringen aan de Niederrhein. HKV – Lijn in Water. PR3112.
- Prinsen, G. R. Hutten, E. Gebremedhin: Update D-HYDRO model dijkkring 48, 11207210-002- ZWS-0004, 24 januari 2022
- Prinsen, G. R. Hutten, G. Verhoeven: Modelling dijkkring 48 met D-HYDRO. Deltares rapport 11203514-002-ZWS-0002, februari 2020
- Rozier, W., Asselman, N., (2019). Hydraulische systeemwerking in het rivierengebied, in relatie tot waterveiligheid. Rijkswaterstaat – Water Verkeer en Leefomgeving. Versie 1.2.
- Verheij, H., 2003. Modification breach growth model in HIS-OM. Tech. Rep. Q3299, WL | Delft Hydraulics, Delft, Nederland

A Resultaten bressimulaties WSRL

Tabel A-1 Resultaten van simulaties uitgevoerd door WSRL (met een andere afvoergolf dan gebruikt in deze studie). In groen de gebruikte breslocaties.

Breslocatie	Max bresdebiet (+-) [m³/s]	Terugstroomdebiet bij Nijmegen (+-)	Tijd tot overloop slaperdijk [uur]
DUI1_046	980	0	70
DUI1_102	960	0	59
DUI1_158	1220	0	46
DUI1_198	580	0	103
DUI1_237	750	0	74.5
DUI1_299	1200	0	48

Tabel A-2 Resultaten van simulaties uitgevoerd door WSRL (met een andere afvoergolf dan gebruikt in deze studie). In groen de gebruikte breslocaties.

Breslocatie	Max bresdebiet (+-)	Max Terugstroomdebiet bij Nijmegen(+)	Tijd tot start terugstroom
DUI1_348	1800	1350	80-85 uur
DUI1_375	1700	1050	80-85 uur
DUI1_422	1700	460	80 uur
EM059	2000	0	
EN024	2150	0	
EN075	2050	0	

B Instellingen bresgroei

In deze studie is voor alle bressen dezelfde bresgroeiformule gebruikt, namelijk de Verheij-van der Knaap formule. In deze studie zijn de coëfficiënten gebruikt behorende bij een zanddijk (Vergelijking 1). In D-HYDRO 1D2D zijn deze parameters in te stellen via “Factor 1” en “Factor 2”, welke voor een zanddijk empirisch bepaald zijn op 1,2 en 0,04. Daarnaast is de kritische stroomsnelheid (U_c) overgenomen uit Verheij (2003) en bepaald op 0,2 m/s. Om er voor te zorgen dat de bresgroei start is er een initiële bresbreedte nodig en een tijdsperiode waarin de bres over deze initiële breedte het laagste punt bereikt. Deze parameters zijn vastgesteld op respectievelijk 10 m en 10 minuten.

De parameters voor de initiële kruinhoogte (Z_0) en diepste punt van de bres ($Z_{\min}$) verschillen per breslocaties en zijn afhankelijk van de lokale topografie. Het diepste punt is gelijk gesteld aan het maaiveldniveau aan de binnendijkse zijde van de kering.

Vergelijking 1. Bresgroeiformule voor een zanddijk (Verheij, 2003).

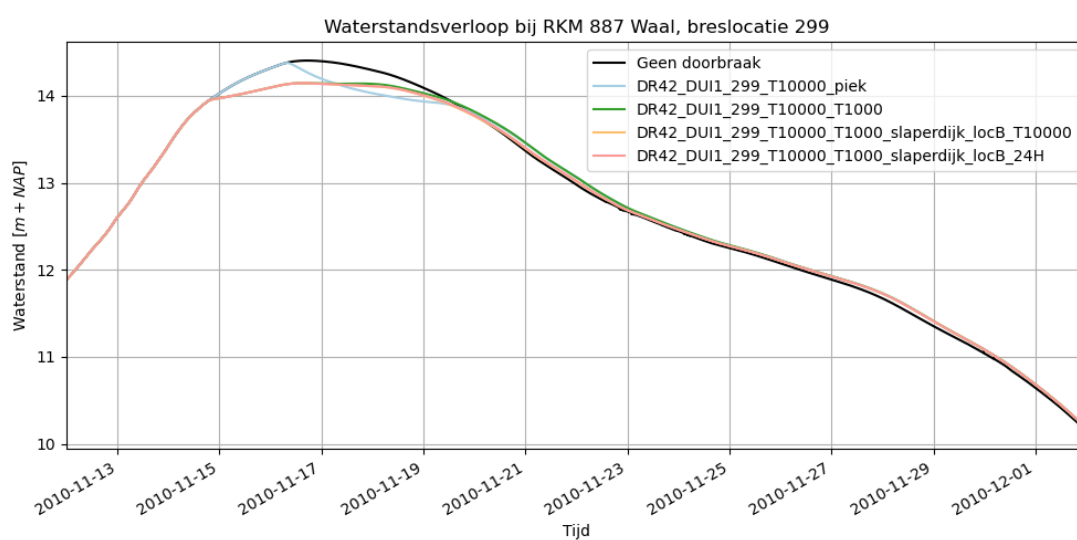
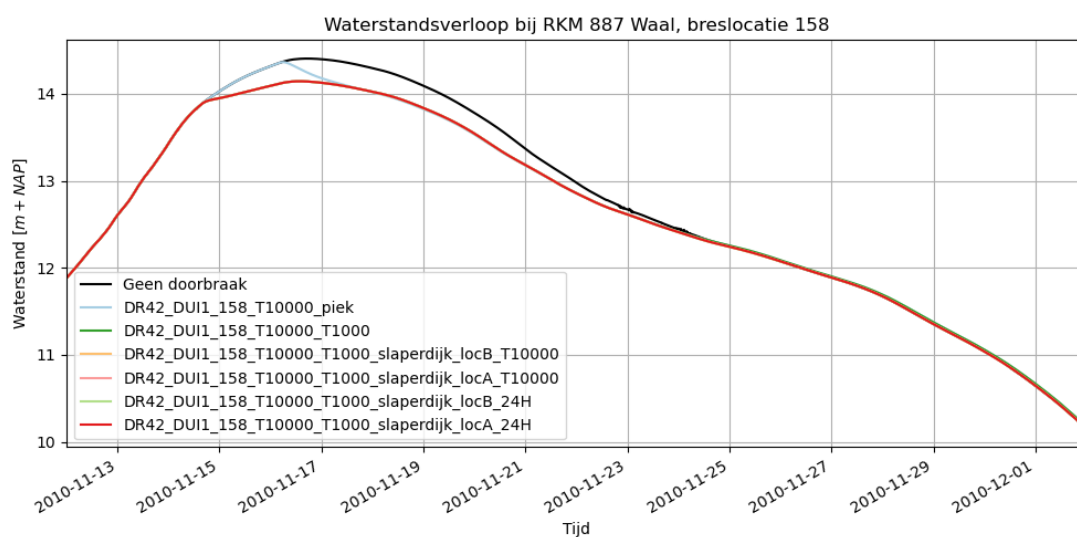
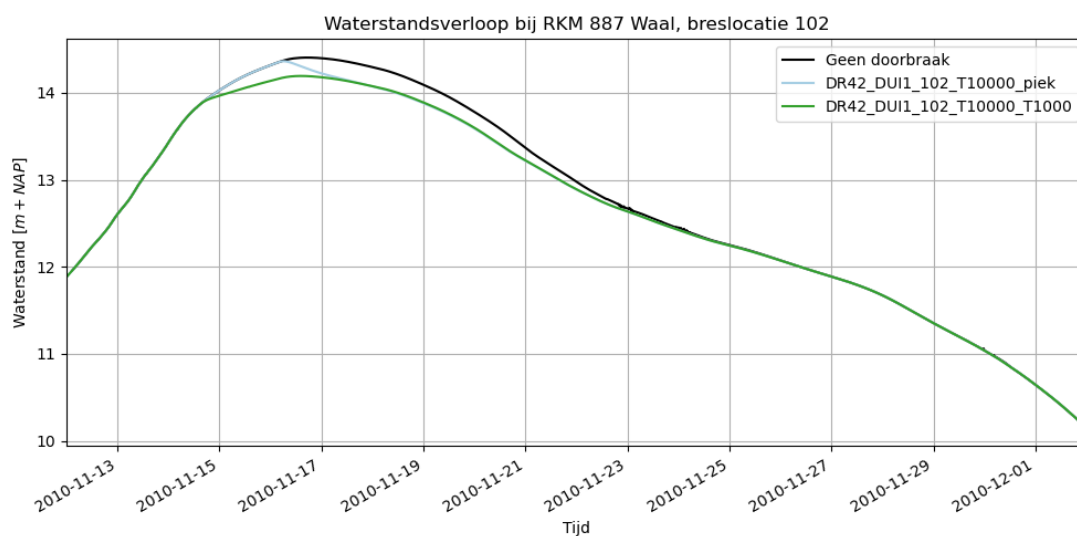
$$B = 1,2 \frac{g^{0,5} H^{1,5}}{u_c} \log \left(1 + \frac{0,04 \cdot g \cdot t}{u_c} \right)$$

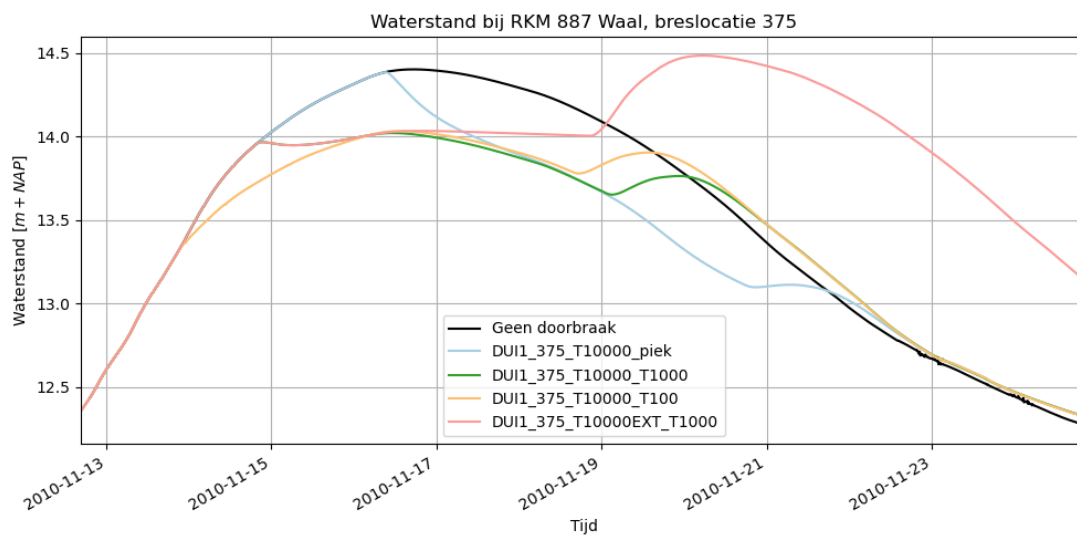
Parameters

Initial breach width (B_0)	10.000	[m]
Initial crest level (Z_0)	17.840	[m AD]
Factor 1 (Alfa)	1.200	[-]
Factor 2 (Beta)	0.040	[-]
Lowest crest level ($Z_{\min}$)	10.000	[m AD]
Critical flow velocity (U_c)	0.200	[m/s]
Period to reach z-min	00:10:00	[hh:mm:ss]

Figuur B-1 Voorbeeld instelling bresgroei in D-HYDRO 1D2D.

C Waterstandsverloop op de Waal





Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl