

Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel

Verkenning van negatieve systeemwerking dijkkring 48, Rijn- en IJssel



Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel
Verkenning van negatieve systeemwerking dijkkring 48, Rijn- en IJssel

Auteur(s)

Bart Maas

Karin de Bruijn

Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel

Verkenning van negatieve systeemwerking dijkkring 48, Rijn- en IJssel

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer ir. D.F. Kroekenstoel
Referenties	
Trefwoorden	Negatieve systeemwerking, Dijkkring 48, Dijkdoorbraak, IJssel, Oude IJssel

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	09-08-2022
Projectnummer	11208036-019
Document ID	11208036-007-ZWS-0001
Pagina's	50
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bart Maas	
	Karin de Bruijn	

Samenvatting

In 2017 zijn normen voor de primaire waterkeringen vastgelegd in de Waterwet. In 2050 moeten alle keringen aan deze nieuwe normen voldoen. Bij het bepalen van de dijkversterkingsopgave wordt er tot op heden voor de dijken langs de IJssel uitgegaan van de beleidsmatige afvoerverdeling (16.000 m³/s bij Lobith). Door een dijkdoorbraak zou er vanuit de Bovenrijn of de Duitse Niederrhein via het achterland water richting de IJssel kunnen stromen wat mogelijk leidt tot een verhoogde IJsselafvoer en dus een extra belasting op de dijken. Dit fenomeen wordt negatieve systeemwerking genoemd.

In deze studie is gefocust op de effecten van negatieve systeemwerking ten gevolge van dijkdoorbraken van de noordelijke dijk van de Bovenrijn of Niederrhein van dijkkring 48. Bij zo'n doorbraak kan er via dijkkring 48 water naar de IJssel stromen. Om dit effect te onderzoeken is gebruik gemaakt van drie scenario's die verschillen in grootte van de afvoergolf en startmoment van de bresgroei.

De drie scenario's laten een vergelijkbaar overstromingspatroon zien. Het water stroomt in noordwestelijke richting naar het stroomgebied van de Oude IJssel. Door de extra afvoer in de Oude IJssel treedt de Oude IJssel vervolgens bij Doetinchem buiten haar oevers met als gevolg dat het westelijke deel van de dijkkring onder water komt te staan. Het water stroomt via onder andere de Oude IJssel naar de IJssel. Er stroomt geen water over de dijken vanuit de dijkkring naar de IJssel.

Alle scenario's resulteren in een piekafvoer en in maximale waterstanden in de IJssel die lager liggen dan die horend bij de situatie zonder dijkdoorbraak. De dijkdoorbraak bij Bislich (en de daaruit resulterende afname van de Rijnafvoer) zorgen voor lagere piekafvoeren op de Rijntakken en ook op de IJssel. Het effect van de afvoer-reducerende werking van de bres is dus groter dan de extra afvoer die via dijkkring 48 de IJssel bereikt. De effecten van positieve systeemwerking (het effect dat de rivierafvoer verlaagd wordt doordat er water vanuit de rivier door de bres het achterland instroomt) zijn voor de IJssel dus groter dan die van negatieve systeemwerking.

Deze studie laat zien dat met de gebruikte modelconfiguratie en scenario's er geen directe reden is om negatieve systeemwerking mee te nemen in de belasting die gebruikt wordt voor de beoordeling en het ontwerp van de IJsseldijken. Het is aan te bevelen om in een vervolganalyse ook andere breslocaties te beschouwen zodat meer inzicht ontstaat in de effecten van negatieve systeemwerking bij doorbraken elders in de dijkkring, bijvoorbeeld meer benedenstrooms.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel	7
1.3	Aanpak op hoofdlijnen	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Methode	9
2.1	Situatiebeschrijving	9
2.2	Modelbeschrijving	9
2.3	Dijkdoorbraakscenario's	11
2.3.1	Scenario 1: Bislich – afvoergolf 1/1000 / doorbraak op het moment van het passeren van de piek	11
2.3.2	Scenario 2: Bislich – afvoergolf 1/10.000 / doorbraak gelijk met piekafvoer	11
2.3.3	Scenario 3: Bislich – afvoergolf 1/10.000 / doorbraak voor piekafvoer	11
2.4	Rand- en beginvoorwaarden	11
2.4.1	Corrigeren bovenstroomse randvoorwaarden	12
2.4.2	Infiltratiecoëfficiënt in 2D-model	12
2.4.3	Bepalen van initiële breshoogte	13
3	Resultaten	14
3.1	Scenario 1: Bislich – Afvoergolf 1/1.000	14
3.1.1	Bresgroei en bresdebiet	14
3.1.2	Overstromingsverloop	17
3.1.3	Maximale waterdiepte en stroomsnelheid	21
3.1.4	Effect op de IJssel	22
3.2	Scenario 2: Bislich – Afvoergolf 1/10.000, start bresgroei op top afvoergolf	24
3.2.1	Bresgroei en bresdebiet	24
3.2.2	Overstromingsverloop	25
3.2.3	Maximale waterdiepte en stroomsnelheid	29
3.2.4	Effect op de IJssel	30
3.3	Scenario 3: Bislich – Afvoergolf 1/10.000, start bresgroei voor top afvoergolf	32
3.3.1	Bresgroei en bresdebiet	32
3.3.2	Overstromingsverloop	33
3.3.3	Maximale waterdiepte en stroomsnelheid	37
3.3.4	Effect op de IJssel	38
3.4	Overzicht resultaten	40
3.4.1	Effect van initiële afvoergolf	40
3.4.2	Effect van timing start bresgroei	40
4	Discussie	43
4.1	Modelonzekerheden	43

4.2	Onder welke omstandigheden wordt systeemwerking wel relevant?	43
4.3	Verhoogde afvoer Oude IJssel	44
5	Conclusies en aanbevelingen	45
5.1	Conclusies	45
5.2	Aanbevelingen	46
5.2.1	Andere breslocaties	46
5.2.2	Verhoogde basisafvoer Oude IJssel	46
5.2.3	Overstappen naar een doorontwikkeld model	47
6	Referenties	48
A	Beoogde extra breslocaties	49

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2017 zijn normen voor de primaire waterkeringen vastgelegd in de Waterwet. In 2050 moeten alle keringen aan deze nieuwe normen voldoen. Om te bepalen of de keringen aan de normen voldoen en de dijkversterkingsopgave in beeld te brengen wordt de overstromingskans bepaald uitgaande van gegevens over de belasting op de keringen (de waterstanden en de frequentie van overschrijding van die waterstanden) en de sterkte van de keringen.

Bij het bepalen van de dijkversterkingsopgave wordt er tot op heden voor de IJssel uitgegaan van de beleidsmatige afvoerverdeling. Hierin is vastgesteld hoe de maatgevende afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith verdeeld dient te worden over de Rijntakken. Door een dijkdoorbraak zou er vanuit de Bovenrijn of de Duitse Niederrhein via het achterland echter water richting de IJssel kunnen stromen wat mogelijk leidt tot een verhoogde waterstand en dus een extra belasting op de dijken. Dit effect wordt negatieve systeemwerking genoemd. Aan de andere kant kan de dijkdoorbraak ook zorgen voor een afname van de belasting benedenstrooms van de dijkdoorbraak. Dit omdat een deel van de Rijnafvoer wegstroomt naar de naastgelegen dijkkring. Dit effect wordt positieve systeemwerking genoemd.

In dit onderzoek is gefocust op de effecten van negatieve systeemwerking in dijkkring 48 (Rijn & IJssel) op de afvoer op de IJssel. Als de kans op extreme afvoeren en waterstanden op de IJssel door deze negatieve systeemwerking significant toeneemt, dan is dit relevant voor de beoordeling en toetsing van keringen langs de IJssel.

In een eerder uitgevoerd onderzoek door Kusters & De Bruijn (2020) werd het effect van negatieve systeemwerking bij een doorbraak in de zuidelijke Waaldijk ter hoogte van dijkkring 41 (land van Maas en Waal) op waterstanden en afvoeren op de Maas onderzocht. In dat onderzoek werd ook de invloed van verschillende variabelen, zoals breslocatie, bresgrootte, timing van de afvoergolf en samenstelling van de dijk meegenomen. In dit onderzoek bleek dat er onder verschillende combinaties van variabelen sprake was van negatieve systeemwerking. De instroom vanuit het Land van Maas en Waal naar de Maas leidde in sommige gevallen tot een significante extra afvoer in de Maas. Dit onderzoek was uitgevoerd in SOBEK 2.16.003. In het model zijn zowel de rivieren als het binnendijkse gebied tweedimensionaal opgenomen.

In het gebied dat centraal staat in deze studie (dijkkring 48 en de IJssel) is de situatie anders. Daar leidt een bres in de dijken langs de Bovenrijn eerst tot een afname van het debiet in de IJssel waarna het vervolgens via terugstroom kan leiden tot een toename van het IJsseldebiet. Welke effect de doorslag geeft wordt hier nader onderzocht. In dit onderzoek is gewerkt met het nieuwe D-HYDRO 1D2D model van Waterschap Rijn en IJssel en is één bovenstroomse breslocatie beschouwd.

1.2 Doel

Het doel van deze studie is:

Het verkrijgen van inzichten in het effect van negatieve systeemwerking vanuit de Bovenrijn en Niederrhein op de waterstanden en afvoeren op de IJssel.

Op basis van dit inzicht wordt bediscussieerd of het relevant kan zijn om negatieve systeemwerking mee te nemen bij de beoordeling en het ontwerp van de IJsseldijken.

1.3 Aanpak op hoofdlijnen

Voor dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een in december 2021 opgeleverd overstromingsmodel in D-HYDRO Suite 1D2D (Prinsen *et al.*, 2022). Dit model omvat dijkkring 48, inclusief het deel op Duits grondgebied tussen Emmerich en Wesel, een klein deel van dijkkring 49, dat zich ten noorden van de Oude IJssel bevindt en de Rijntakken rond deze dijkkringen. Bij de ontwikkeling van dit model is er een basissom gedraaid met dijkdoorbraak nabij de Duitse plaats Bislich. Voor deze som is bij de modelrand Wesel een afvoergolf met overschrijdingsfrequentie van 1/1000 per jaar opgelegd, met een maximaal debiet van 14.894 m³/s bij Wesel. De afvoergolf is gebaseerd op GRADE-resultaten voor Lobith die gebruikt worden in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) (Hegnauer *et al.*, 2022). De resultaten van deze berekening zijn geanalyseerd en vervolgens is een aantal aanvullende berekeningen uitgevoerd.

In de analyses wordt gekeken naar de bresgroei, het bresdebiet, het inundatiepatroon en de toestroom van water naar de IJssel. Met de verschillende scenario's wordt gevarieerd in de afvoergolf en het startmoment van de bresgroei. Deze variaties zouden invloed kunnen hebben op de mate van negatieve systeemwerking op de IJsselafvoer. Aan de hand van de resultaten wordt een inschatting gemaakt of het effect van negatieve systeemwerking meegenomen dient te worden in de beoordeling van de IJsseldijken.

Omdat op het moment van uitvoering van het project nog geen betrouwbaar model voor andere breslocaties beschikbaar was of te maken was (zie toelichting in bijlage A), is in deze studie gefocust op een doorbraak bij Bislich. In de discussie (hoofdstuk 4) wordt het mogelijke effect bij andere breslocaties besproken.

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 basissom en doorgerekende scenario's gepresenteerd waarna de afleiding van de gebruikte randvoorwaarden wordt besproken.

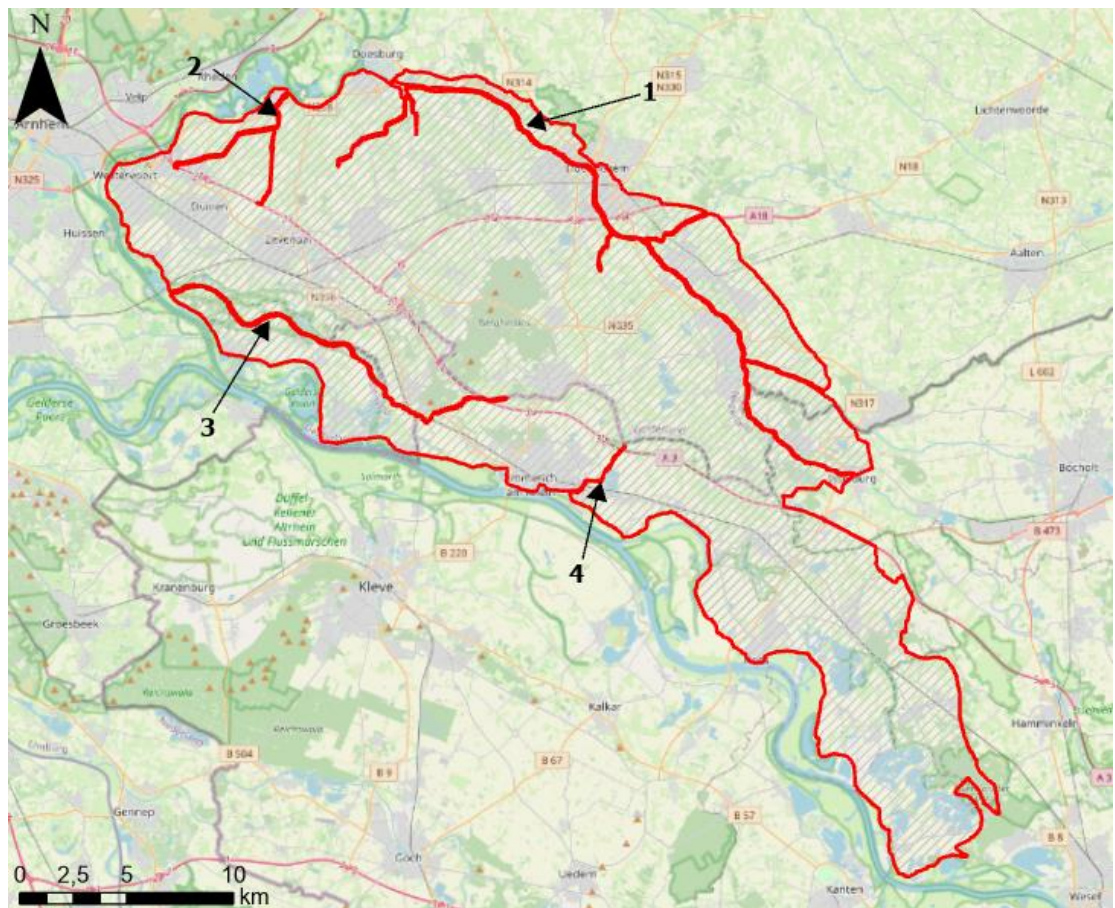
De resultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 3. Eerst worden de resultaten van de basissom uitgebreid besproken, waarna de resultaten van de variantsommen volgen. Per scenario wordt stilgestaan bij de bresontwikkeling, het inundatiepatroon en de toevoer naar de IJssel. In paragraaf 3.5 worden de resultaten van alle scenario's samengevat.

In hoofdstuk 4 volgt een discussie over de onzekerheden van het gebruikte model en aannames die gedurende het onderzoek gedaan zijn. Vervolgens worden in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies getrokken voor wat betreft de effecten van negatieve systeemwerking op de IJssel.

2 Methode

2.1 Situatiebeschrijving

Het onderzoeksgebied voor deze studie omvat het Duitse en Nederlandse deel van dijkkring 48 en de aanliggende Rijntakken (Figuur 2.1). Het gebied wordt aan de zuidzijde begrensd door de Niederrhein/Boven-Rijn, aan de westzijde door het Pannerdensch Kanaal en aan de noordwestzijde door de IJssel. Langs de noordzijde van dijkkring 48 loopt de Oude IJssel die nabij Doesburg uitmondt in de IJssel. Ten noorden van de Oude IJssel wordt ook een klein deel van dijkkring 49 meegenomen. De waterkeringen in het Nederlandse onderzoekgebied zijn in beheer van waterschap Rijn en IJssel (WRIJ).

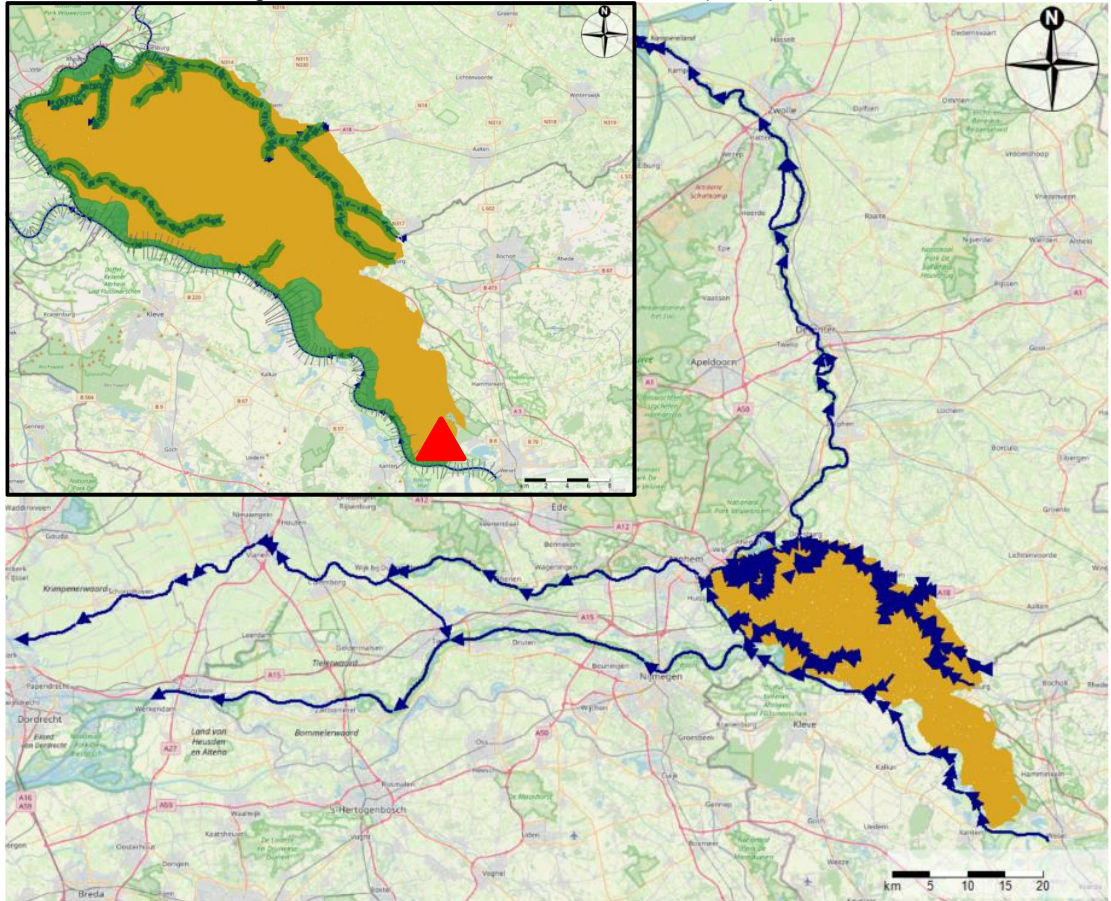


Figuur 2.1 Onderzoekgebied voor deze studie. De belangrijkste waterlopen binnen dijkkring 48 die in deze studie behandeld worden zijn met de cijfers 1 t/m 4 aangegeven. 1) Oude IJssel, 2) Zwalm (afwatering via sluis De Liemers), 3) Oude Rijn (afwatering via gemaal Kandia) en 4) Grenskanaal/Löwenberger Landwehr.

2.2 Modelbeschrijving

Voor dit onderzoek wordt gebruikt gemaakt van een in december 2021 opgeleverd overstromingsmodel voor dijkkring 48, ontwikkeld in D-HYDRO Suite 1D2D. Dit model is een update van een eerdere modelversie die is opgeleverd in februari 2020 aan WRIJ (Prinsen *et al.*, 2020). In het 2D-gedeelte is naast dijkkring 48 ook een klein deel van dijkkring 49, ten noorden van de Oude IJssel, meegenomen. De Rijntakken van Wesel (in Duitsland) tot het Ketelmeer, Krimpen en Hardinxveld en de belangrijkste wateren binnen dijkkring 48 zoals de Oude IJssel, Oude Rijn en Zwalm zijn opgenomen als 1D takken (Zie Figuur 2.1). Het 1D-

riviermodel en het 2D-model voor dijkkring 48 (plus een klein stuk van dijkkring 49) zijn met elkaar verbonden door middel van 1D2D-links die haaks op de 1D-rivier staan (zichtbaar in groen in Figuur 2.2). Water kan het 2D-deel van het model alleen in- en uitstromen via de 1D2D-links. Deze links zijn gebruikt om de bres te schematiseren. Ook zijn er links tussen het 2D-model en de 1D-waterlopen binnen de dijkkring. Aan de noordzijde van het model, daar waar dijkkring 48 en 49 overgaan in hogere gronden, is een dichte grens geschematiseerd. Er bevindt zich daar dus als het ware een glazen wand. Voor meer achtergrond informatie over de model ontwikkeling wordt verwezen naar Prinsen *et al.*, (2022).



Figuur 2.2 Rijntakkenmodel met dijkkring 48 model. In donkerblauw het 1D riviersysteem; oranje het 2D dijkkring 48 model (inclusief klein deel dijkkring 49) en groen de 1D2D-links. De rode driehoek geeft de breslocatie bij Bislich weer.

Het model is door Prinsen *et al.* (2022) gevalideerd meteen som van een dijkdoorbraak bij Bislich. Deze som is ook voor dit onderzoek gebruikt. Voor deze som is bij de modelrand Wesel een afvoergolf met overschrijdingsfrequentie van 1/1000 per jaar opgelegd, met een maximaal debiet van 14.894 m³/s (Figuur 2.3). De afvoergolf is gebaseerd op GRADE-resultaten voor Lobith die gebruikt worden in het BOI (Hegnauer *et al.*, 2022). In Prinsen *et al.* (2022) wordt beschreven hoe de randvoorwaarde bij Lobith is vertaald naar een randvoorwaarde voor Wesel. De piekafvoer passeert 360 uur (15 dagen) na de start van de simulatie de doorbraaklocatie Bislich. Op dat moment start de bresgroei en groeit de bres volgens de empirische Verheij – van der Knaap vergelijking (Verheij, 2003). De in het model geschematiseerde stuwen en gemalen lozen onder vrij verval en hebben geen maximaal debiet opgelegd gekregen. Het debiet wordt wel beperkt door de fysieke afmetingen van de stuwen en de waterstand. Daarnaast zijn momenteel de in het gebied aanwezige pompgemalen nog niet geschematiseerd in het gebruikte model. De totaal doorgerekende periode in het model bedraagt 720 uur (30 dagen). De rekentijd van deze som bedroeg gemiddeld 25 uur.

2.3 Dijkdoorbraakscenario's

Om te onderzoeken hoe groot het effect van systeemwerking van de Rijn op de IJssel is wordt in dit onderzoek naar verschillende scenario's gekeken. De gekozen breslocatie bevindt zich nabij de Duitse plaats Bislich. Voor deze locatie zijn de modelresultaten in een eerder stadium gevalideerd tijdens het ontwikkelen van het model (Prinsen *et al.*, 2022). De scenario's verschillen in grootte van de gebruikte afvoergolf en timing van de dijkdoorbraak. De drie scenario's zijn opgenomen in Tabel 2.1.

2.3.1 Scenario 1: Bislich – afvoergolf 1/1000 / doorbraak op het moment van het passeren van de piek

Deze som is door Prinsen *et al.* (2020) gebruikt om het model te valideren. Voor deze som is gebruik gemaakt van de 1/1000 per jaar afvoergolf met een maximaal debiet van 14.894 m³/s bij de bovenstroomse modelrand te Wesel en een gemiddelde golfbreedte. De bresgroei start op het moment dat de piekafvoer de breslocatie passeert.

2.3.2 Scenario 2: Bislich – afvoergolf 1/10.000 / doorbraak gelijk met piekafvoer

In het tweede scenario wordt gebruik gemaakt van een hogere piekafvoer (15.956 m³/s bij Wesel) door de GRADE 1/10.000 per jaar afvoergolf te gebruiken, zie Figuur 2.3. Gelijk aan het eerste scenario begint de bresgroei op het moment dat de piekafvoer de breslocatie passeert.

2.3.3 Scenario 3: Bislich – afvoergolf 1/10.000 / doorbraak voor piekafvoer

In dit scenario wordt net zoals in scenario 2 gebruik gemaakt van een 1/10.000 afvoergolf met een maximaal debiet van 15.956 m³/s. Echter, in dit scenario start de bresgroei al voordat de piek van de afvoergolf passeert, namelijk op het moment dat de Rijn de 1/1000-afvoer bereikt. Hierdoor zal er meer water door de bres stromen richting het achterland.

Tabel 2.1 Doorgerekende scenario's

Scenario	Breslocatie	Terugkeer frequentie afvoergolf	Tijdstip start bresgroei
1	Bislich	1/1000	Top afvoergolf
2	Bislich	1/10.000	Top afvoergolf
3	Bislich	1/10.000	Voor top afvoergolf (op afvoerniveau piek 1/1000 golf)

2.4 Rand- en beginvoorwaarden

Voor de simulatie dient aan de bovenstroomse modelrand bij Wesel een afvoertijdreeks opgegeven te worden en voor de benedenstroomse punten (Ketelmeer, Krimpen en Hardinxveld) een Qh-relatie. De bovenstroomse afvoertijdreeksen zijn afgeleid van de GRADE'21 afvoergolf bij Lobith (Hegnauer *et al.*, 2022). Deze is afkomstig uit het GRADE instrumentarium versie 3.0, en zal tevens gebruikt worden in het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium 2023 (BOI2023). De Qh-relaties zijn overgenomen uit Prinsen *et al.* (2020) en zijn in alle scenario's hetzelfde.

In de Oude IJssel is er een constante basisafvoer van 10 m³/s aangenomen. De basisafvoeren in de overige waterwegen (De Liemers, Grenskanaal/Löwenberger Landwehr en Oude Rijn/Kandia) zijn verwaarloosbaar en gelijkgesteld aan 0 m³/s.

2.4.1 Corrigeren bovenstroomse randvoorwaarden

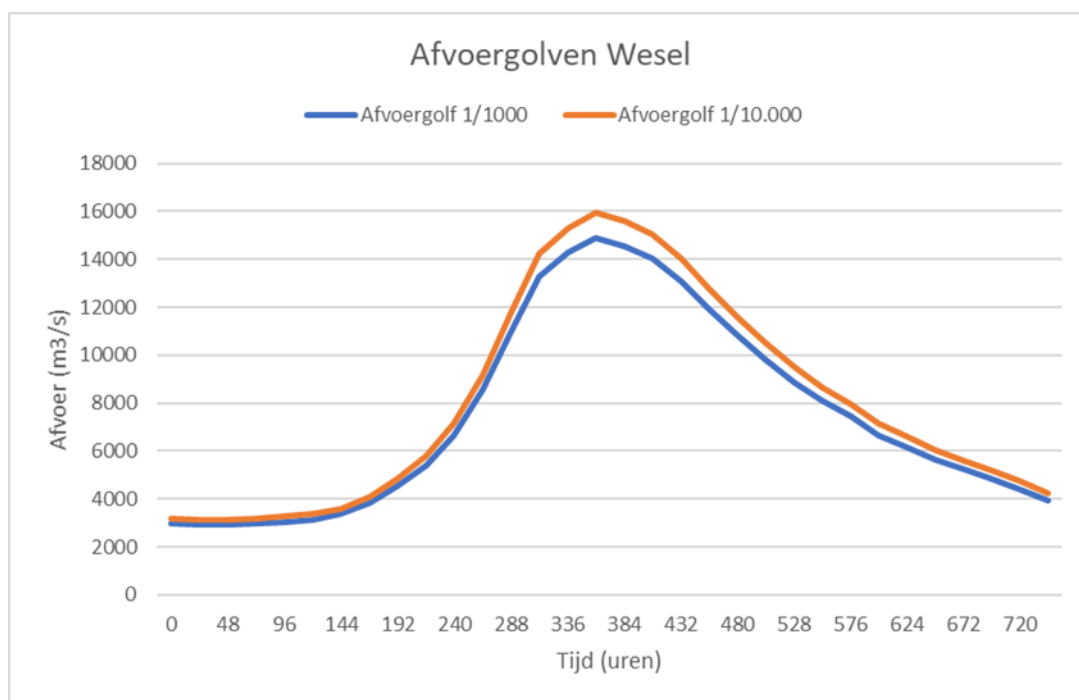
De beschikbare afvoerstatistiek is afgeleid voor de locatie Lobith. Het model van deze studie heeft randvoorwaarden nodig bij Wesel. Deze randvoorwaarden voor Wesel zijn zo ingesteld dat deze leiden tot exact de gewenste afvoer bij Lobith.

Dit afleiden van de randvoorwaarden bij Wesel is gedaan door:

- 1 Bij Wesel simpelweg de afvoergolven afgeleid voor Lobith (als in Hegnauer *et al.* (2022)) op te leggen bij Wesel
- 2 Vervolgens is geanalyseerd hoe de afvoergolf vervormd is bij Lobith t.g.v. o.a. topvervlakking.
- 3 Aan de hand van deze analyse is de benodigde correctie op de afvoergolf bij Wesel bepaald die leidt tot de juiste piekafvoer en gemiddelde afvoer ter hoogte van Lobith.

De twee gecorrigeerde afvoergolven (1/1000 & 1/10.000) bij Wesel zijn weergegeven in Figuur 2.3.

De toegepaste correctie op de 1/1000 afvoergolf bedroeg een toename van +56 m³/s op de piekafvoer (van 14.840 naar 14.896 m³/s) wat een orde grootte 0.4% verschil is. Voor de 1/10.000 afvoergolf bedroeg de correctie +120 m³/s (orde 0.8%) op de piekafvoer (van 15.829 naar 15.949 m³/s).



Figuur 2.3 Gecorrigeerde randvoorwaarden ij de bovenstroomse rand van het model (Wesel).

2.4.2 Infiltratiecoëfficiënt in 2D-model

In het 2D gedeelte van het model kan een infiltratiecoëfficiënt meegenomen worden. Aangezien we uitgaan van een natte winterperiode is de infiltratie afgesteld op 0 mm/dag¹. Neerslag is ook niet meegenomen. Dit betekent dat aangenomen is dat de neerslag en infiltratie in de periode van overstroming elkaar grofweg opheffen.

¹ Hierdoor wijken de resultaten af van Prinsen (2020) waar gerekend is met een infiltratie van 86 mm/dag

2.4.3 Bepalen van initiële breshoogte

De geometrische condities van de dijk op startlocatie van de bresgroei zijn bepaald met behulp van het aan het model gekoppelde hoogtemodel (DEM) (*Final_DEM_Dijkkring48_v8_nodata*). Door het maken van profielen loodrecht over de dijkkruin zijn de kruinhoogte, -breedte en hoogte van binnendijs gebied bepaald. Verder wordt aangenomen dat de desbetreffende dijksectie een zanddijk is. Deze aanname is nodig voor het gebruik van de Verheij - van der Knaap bresgroei formule. Hierin wordt aan de hand van het materiaal van de dijk de mate bresgroei wordt bepaald.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden eerst achter elkaar de verschillende scenario's besproken. Hierbij worden de volgende aspecten geadresseerd:

- Bresgroei en bresdebiet
- Het overstromingsverloop
- Het effect op de waterstanden en afvoeren in de Oude IJssel en IJssel.

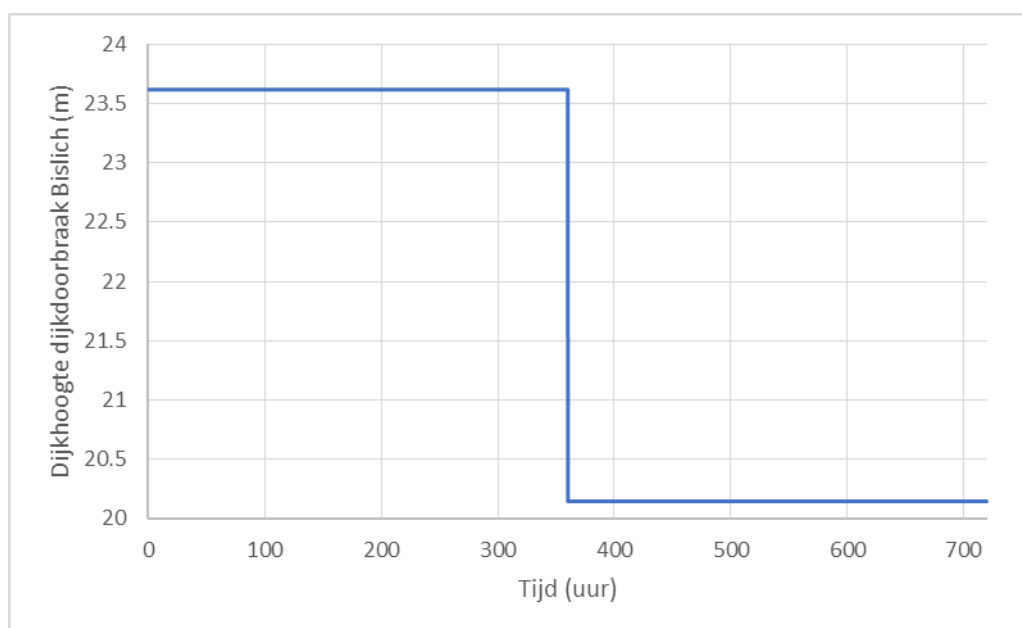
In paragraaf 3.4 worden de belangrijkste uitkomsten van de drie scenario's met betrekking tot negatieve systeemwerking met elkaar vergeleken.

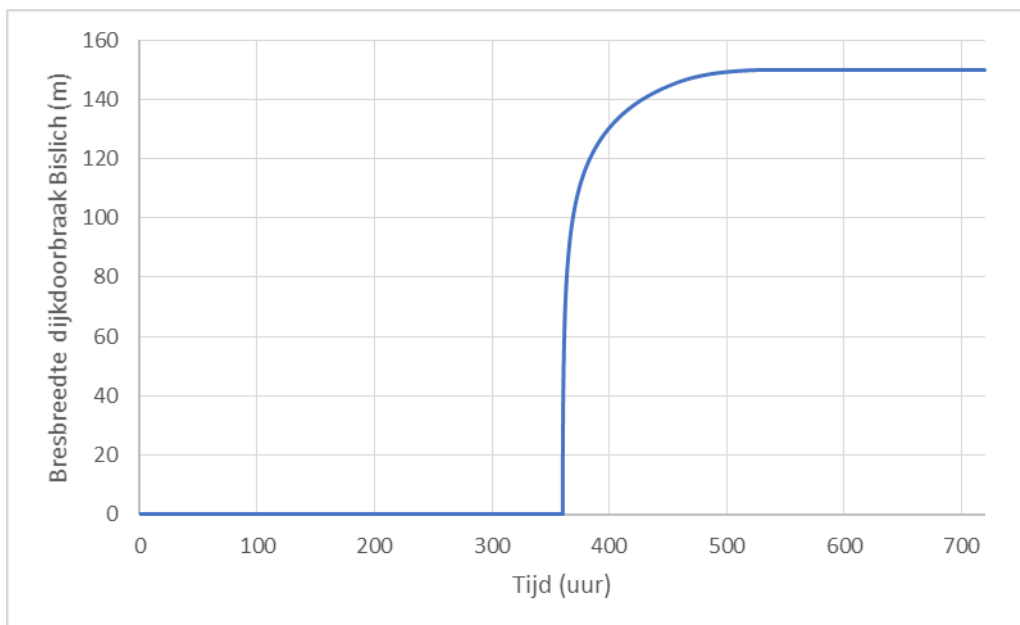
3.1 Scenario 1: Bislich – Afvoergolf 1/1.000

In het eerste scenario wordt er gebruik gemaakt van een 1/1000 afvoergolf met een maximale afvoer van 14.894 m³/s. De start van de bresgroei valt samen met het passeren van de piekafvoer. Bij deze berekening is dit op 360 uur.

3.1.1 Bresgroei en bresdebiet

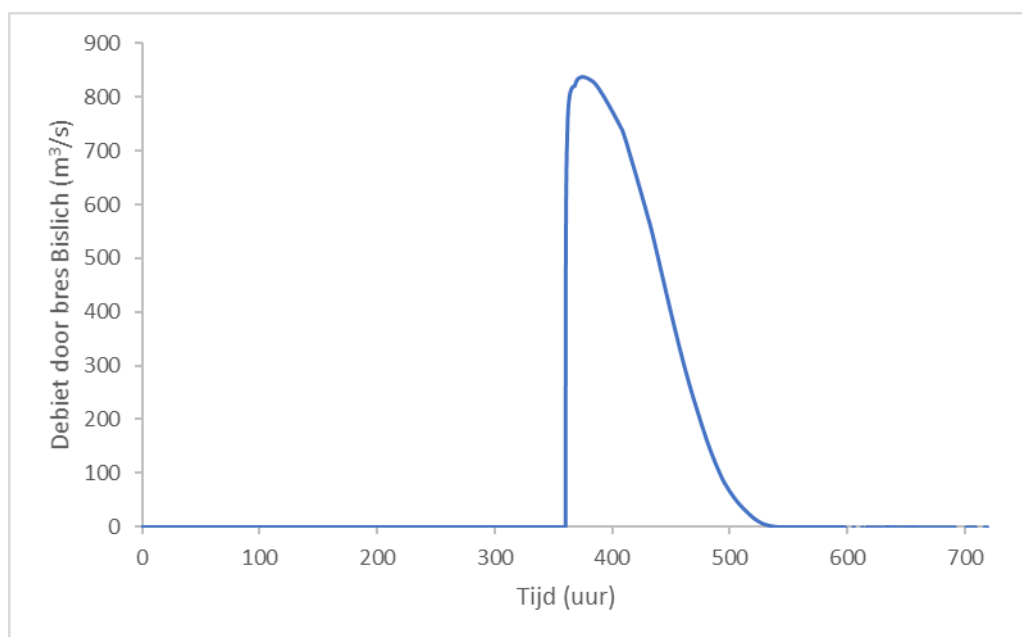
In het model is opgelegd dat in de eerste 10 minuten de bres in verticale richting verdiept tot maaiveld (+20,14 m NAP) waarna deze zich volgens de Verheij – van der Knaap formule (2002) in horizontale richting ontwikkelt tot een maximale breedte van 150 m over een periode van 144 uur (Figuur 3.1).

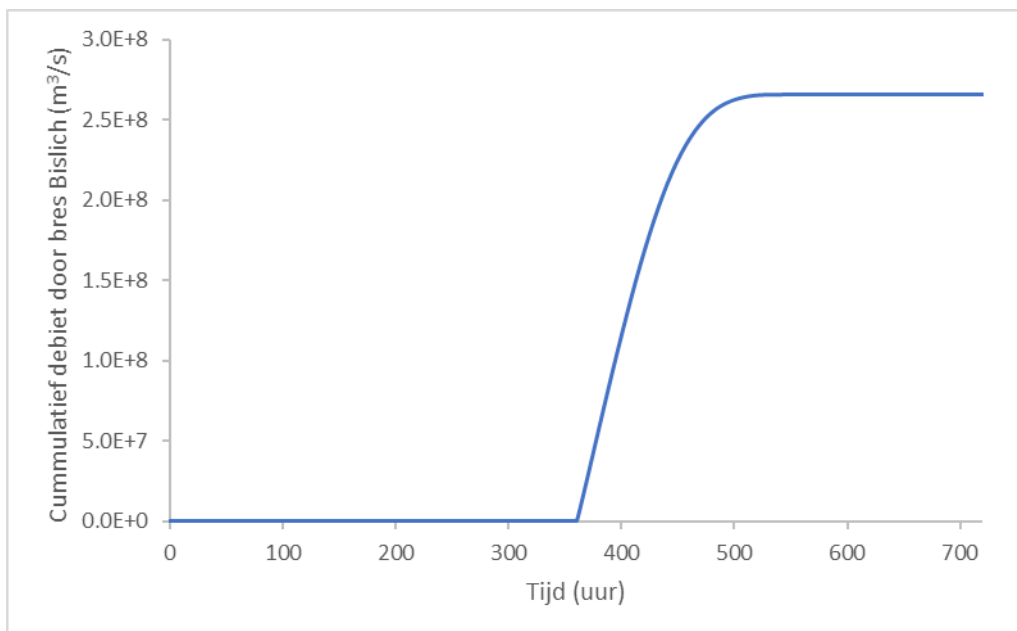




Figuur 3.1 Boven: de verticale bresontwikkeling; onder: bresontwikkeling in horizontale richting.

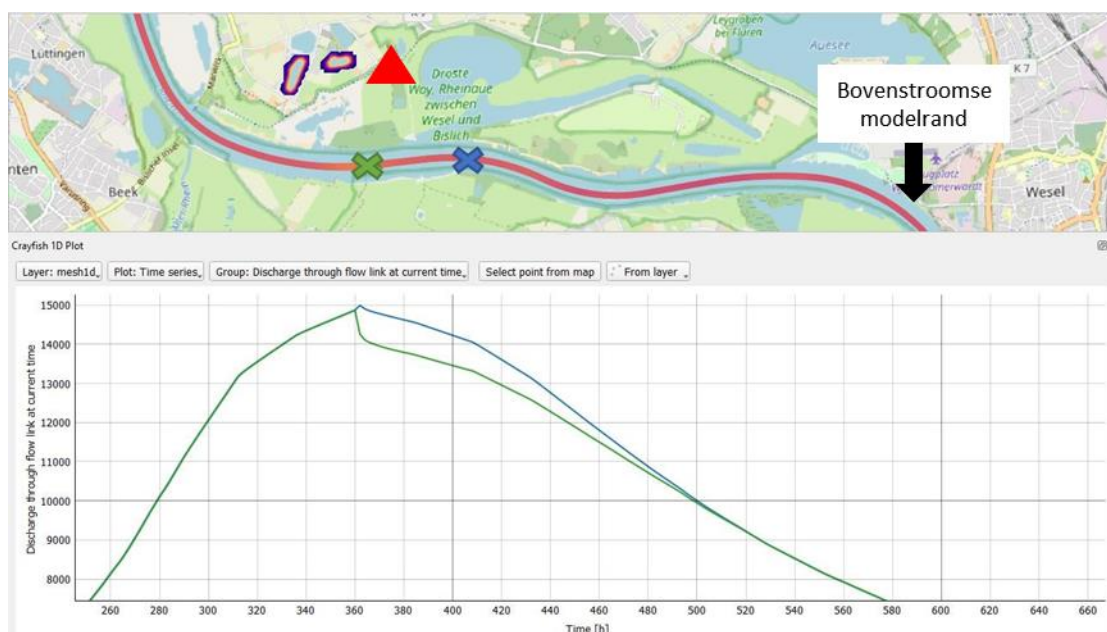
Het verloop van het bresdebiet en totale volume zijn weergegeven in Figuur 3.2. Na de start van de bresgroei neemt de afvoer door de bres in 14 uur toe tot het piekdebiet van $839 \text{ m}^3/\text{s}$ waarna deze weer geleidelijk afneemt doordat de rivierafvoer afneemt. Het totale volume dat door de bres stroomt gedurende de simulatie is $2,66 \times 10^8 \text{ m}^3$. Ongeveer 9 dagen na de start van de bresgroei is het bresdebiet weer $0 \text{ m}^3/\text{s}$ doordat de waterhoogte in de Rijn weer onder maaiveld (+20,14 m NAP) is gezakt en de instroom stopt.





Figuur 3.2 Boven: het bresdebit; onder het cumulatieve volume dat door de bres stroomt.

In Figuur 3.3 is het effect van de afvoer door de bres op het benedenstroomse debiet door de Bovenrijn/Niederrhein te zien. Deze afname komt precies overeen met de afvoer die door de bres stroomt.



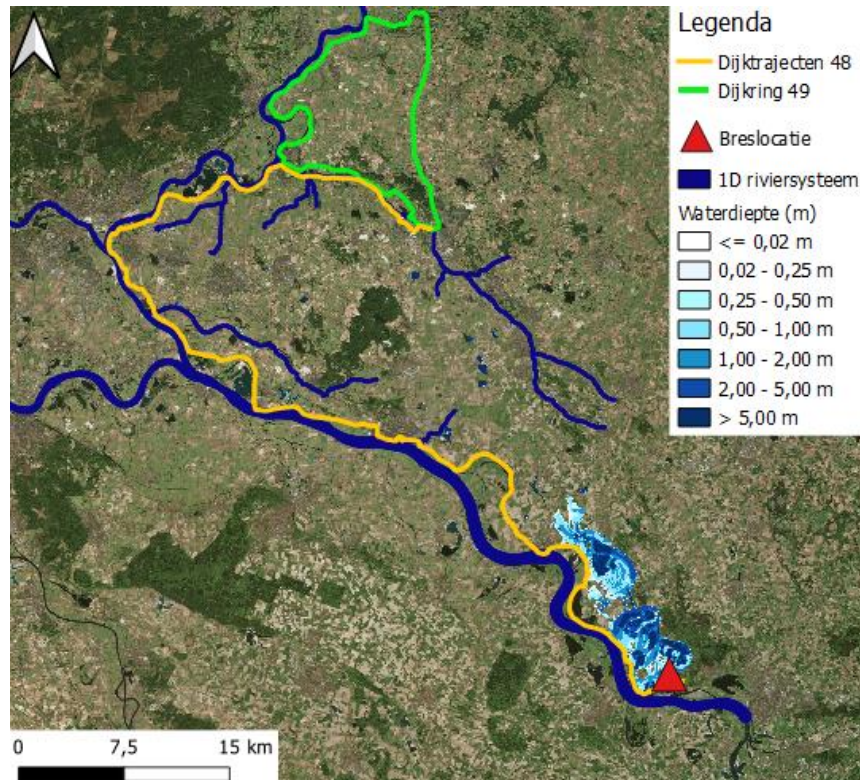
Figuur 3.3 Verschil in debiet bovenstrooms (blauw) en benedenstrooms (groen) van de breslocatie Bislich (rode driehoek).

3.1.2 Overstromingsverloop

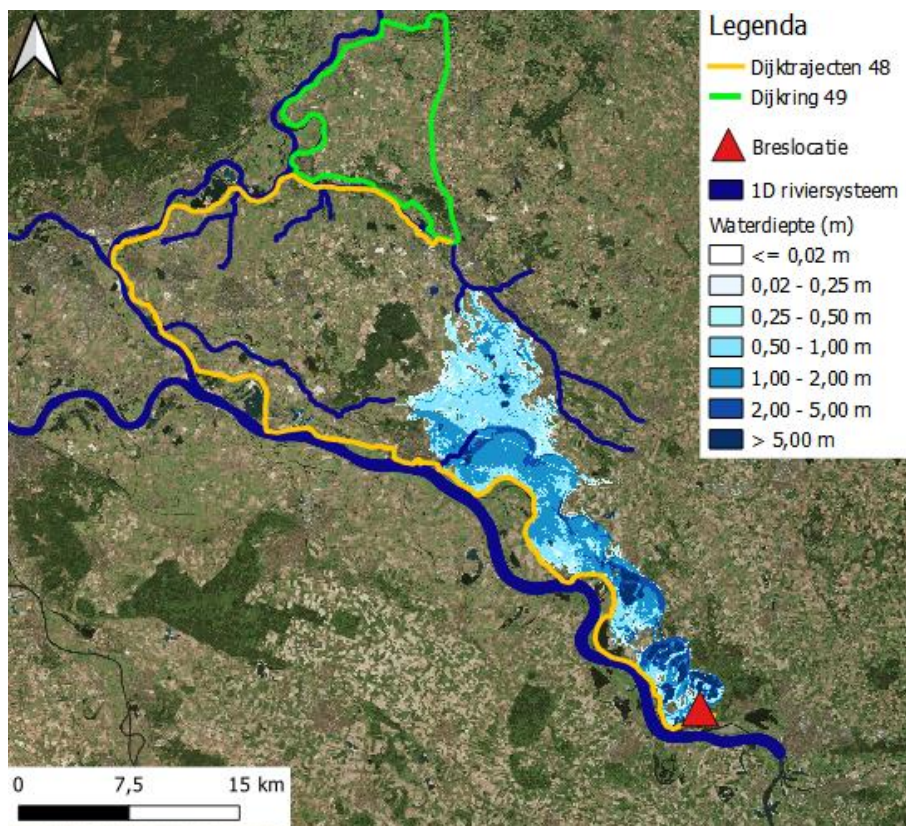
Op 16-11-2010 (360 uur) stroomt het water dijkkring 48 binnen. In de figurenreeks Figuur 3.4 t/m Figuur 3.8 is de ontwikkeling van de overstroming in intervallen weergegeven. Het water stroomt geleidelijk in noordwestelijke richting, waar eerst de oude Rijnmeanders onderlopen (1 dag na doorbraak) alvorens het stroomgebied van de Oude IJssel wordt bereikt. Dit vindt plaats 2,5 dagen na de start van de bresgroei. Ten zuiden van Doetinchem stroomt het water via onbedijkt gebied de Oude IJssel en het Waalse Water in (Figuur 3.5). Dit leidt tot een snelle verhoging van het debiet en waterdiepte van de Oude IJssel, tot aan de monding nabij Doesburg toe. Het maximale debiet in de Oude IJssel wordt gevonden nabij Doetinchem en bedraagt $400 \text{ m}^3/\text{s}$, een verhoging van $390 \text{ m}^3/\text{s}$ ten opzichte van het begindebiet. Deze hoge afvoer valt samen met stroomsnelheden tussen de 1 en 1.5 m/s, waar deze onder de bruggen kan pieken op 2 m/s. Verder stroomafwaarts neem het debiet van de Oude IJssel sterk af tot een maximum van $200 \text{ m}^3/\text{s}$ bij de monding bij Doesburg (Figuur 3.13). De belangrijkste reden hiervoor is dat de Oude IJssel op veel plaatsen buiten haar oevers treedt. Op dag 4 na de start van de bresgroei (20-11) stroomt het water binnendijks vanaf Doetinchem door richting het westelijke deel van de dijkkring. Het overstroomde gebied breidt zich uit voor een periode van 3 dagen (tot 23-11) alvorens het stagneert. Voor de plaatsen Westervoort, Duiven en Zevenaar lijkt de wateroverlast beperkt te blijven door de aanwezigheid van de rijksweg A12 die aan de noordzijde het water tegenhoudt.

Naast de overstroming vanuit de Oude IJssel treden in mindere mate ook het Grenskanaal (bij Klein Netterden/Netterden) en de Oude Rijn in het Rijnstrangengebied tot gemaal Kandia buiten hun oevers. Hier zijn de debieten echter vele male kleiner: deze liggen tussen de 10 en $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

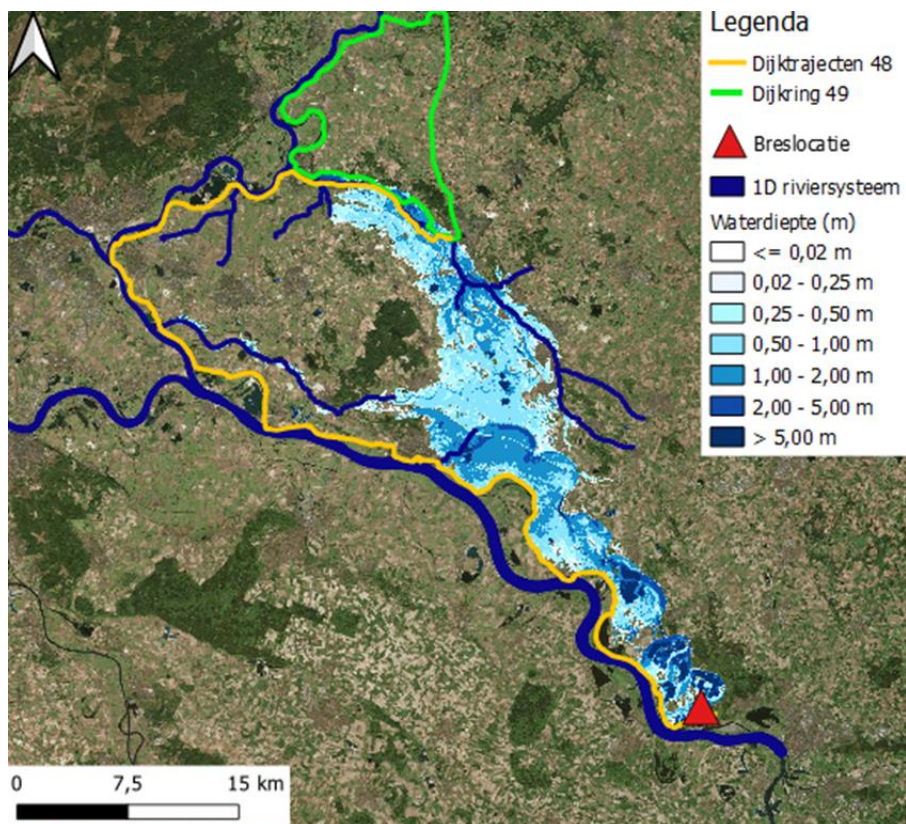
Aan het einde van de simulatie (15 dagen na de bres of 720 uur) staat nog een aanzienlijk deel van het gebied onder water. Met name ten noordoosten van Emmerich, ten noorden van Duiven en Zevenaar en aan de noordoever van de Oude IJssel staat het water nog meer dan 1 meter hoog (Figuur 3.8).



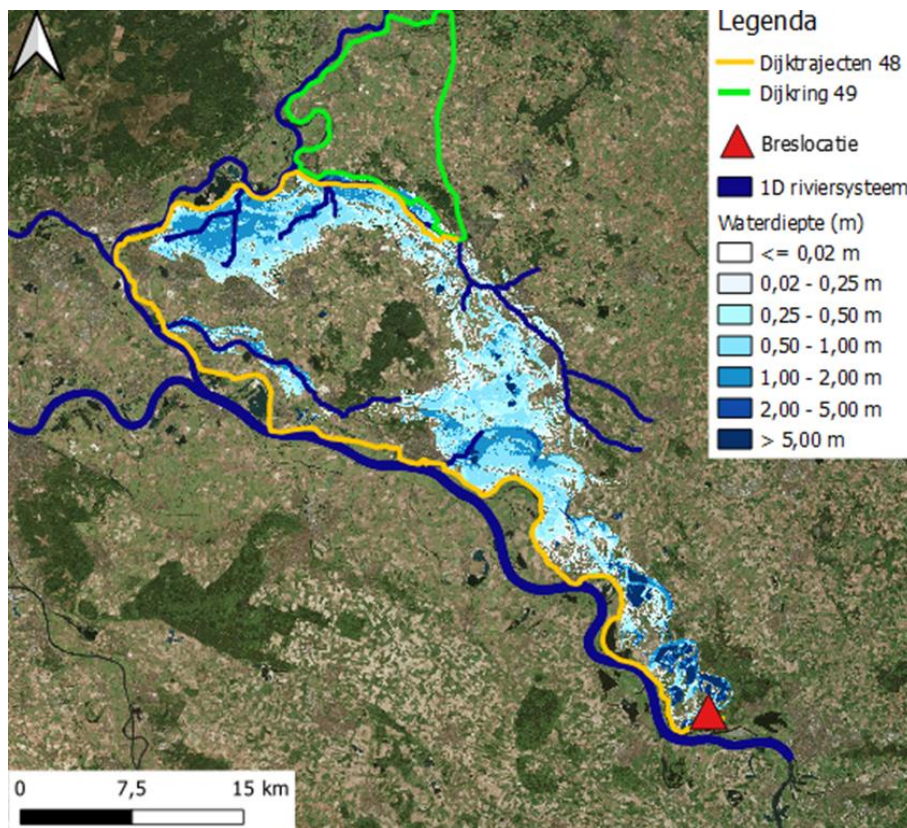
Figuur 3.4 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak bij Bislich (17-11-2010 02:00:00).



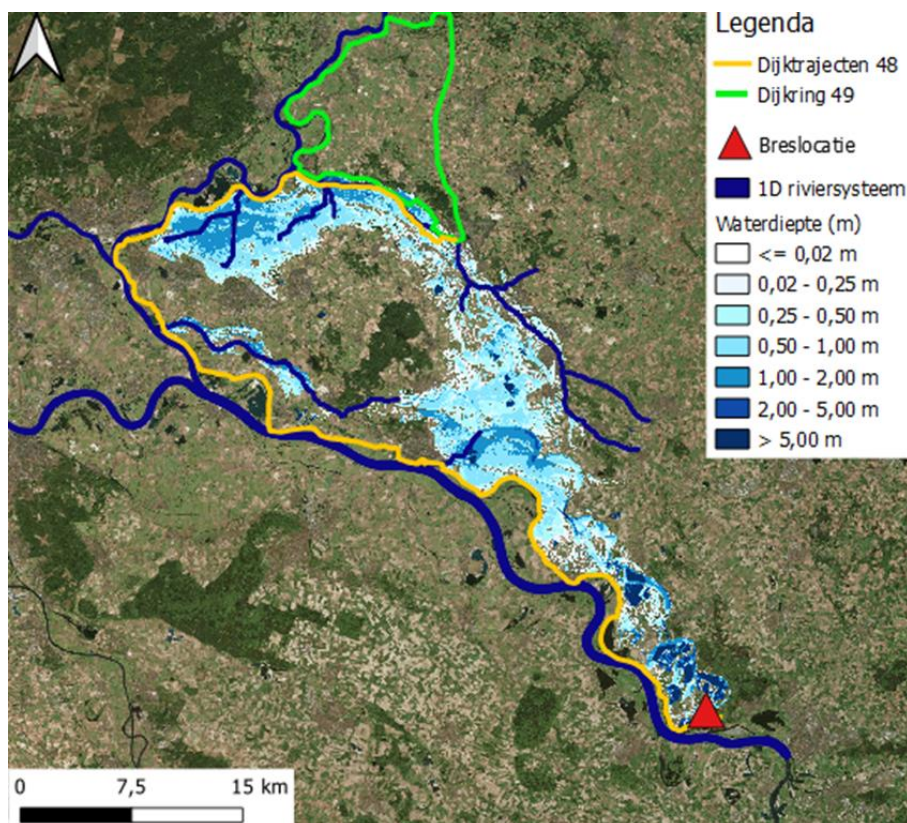
Figuur 3.5 Inundatiepatroon 2 dagen en 16 uur na dijkdoorbraak bij Bislich (18-11-2010 18:00:00). Het eerste moment dat via onbedijkt gebied het stroomgebied van de Oude IJssel bereikt wordt.



Figuur 3.6 Inundatiepatroon 4 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (20-11-2010 02:00:00).

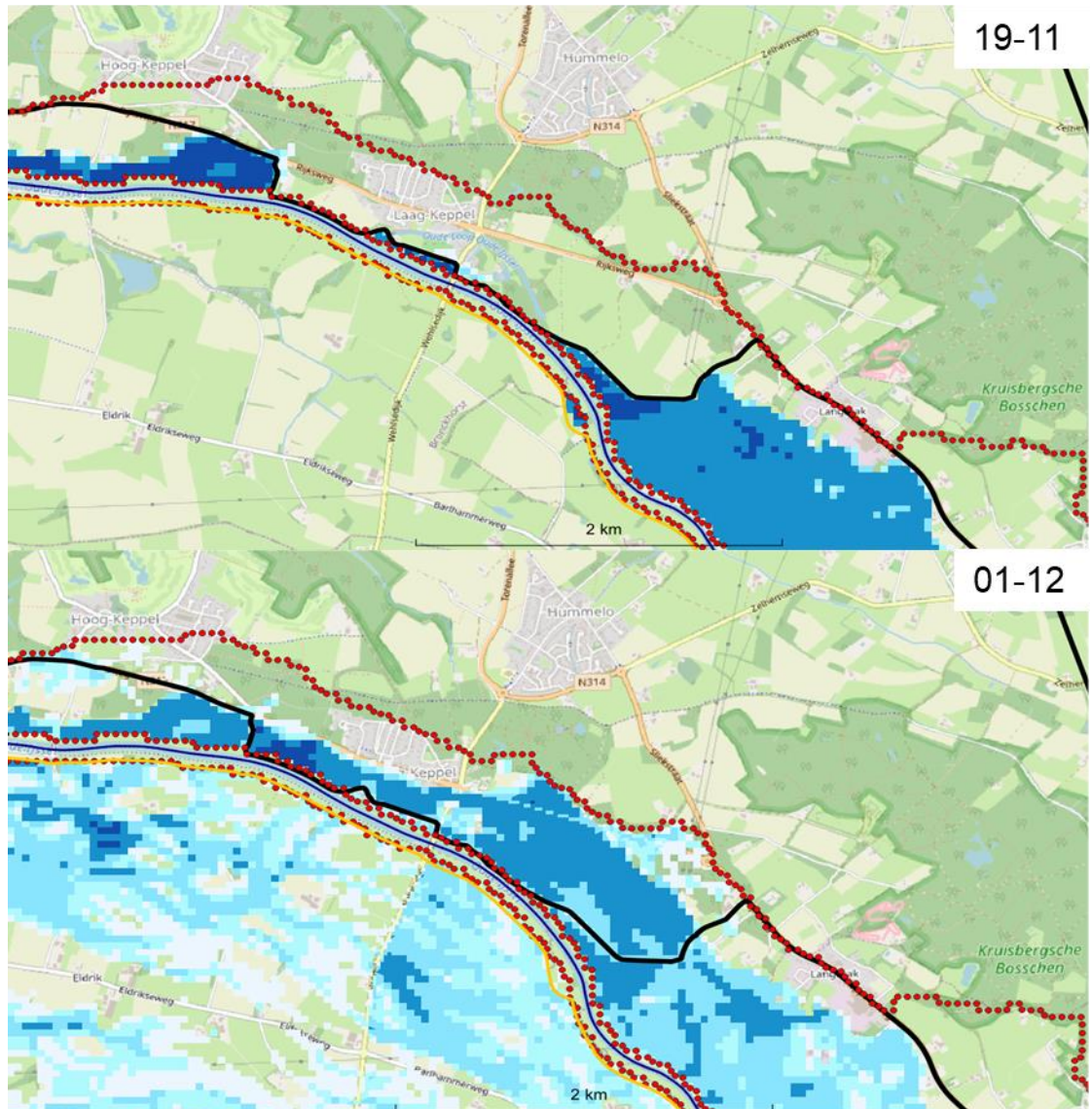


Figuur 3.7 Inundatiepatroon 9 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (25-11-2010 02:00:00).



Figuur 3.8 Inundatiepatroon 15 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (01-12-2010 00:00:00).

Doordat een klein stuk van dijkkring 49 is geschematiseerd in dit model is te zien dat vanuit de Oude IJssel de primaire kering ter hoogte van Laag Keppel overstroomt (19-11) (Figuur 3.9). Het water stroomt hierna snel het achterland binnen en blijft daar staan tot het einde van de simulatie. Dit wordt veroorzaakt doordat aan de noordzijde het gebied wordt begrensd door een hoge grond die voorkomt dat het water verder noordwaarts stroomt. Daarnaast zijn er enkele locaties waar het water wordt tegengehouden door de modelrand. Op deze locaties kan het water in theorie verder dijkkring 49 instromen. Net buiten het model liggen in dit gebied echter hoge gronden die voorkomen dat het water verder de dijkkring instroomt. Het effect van de modelrand is daarom verwaarloosbaar in dit scenario.

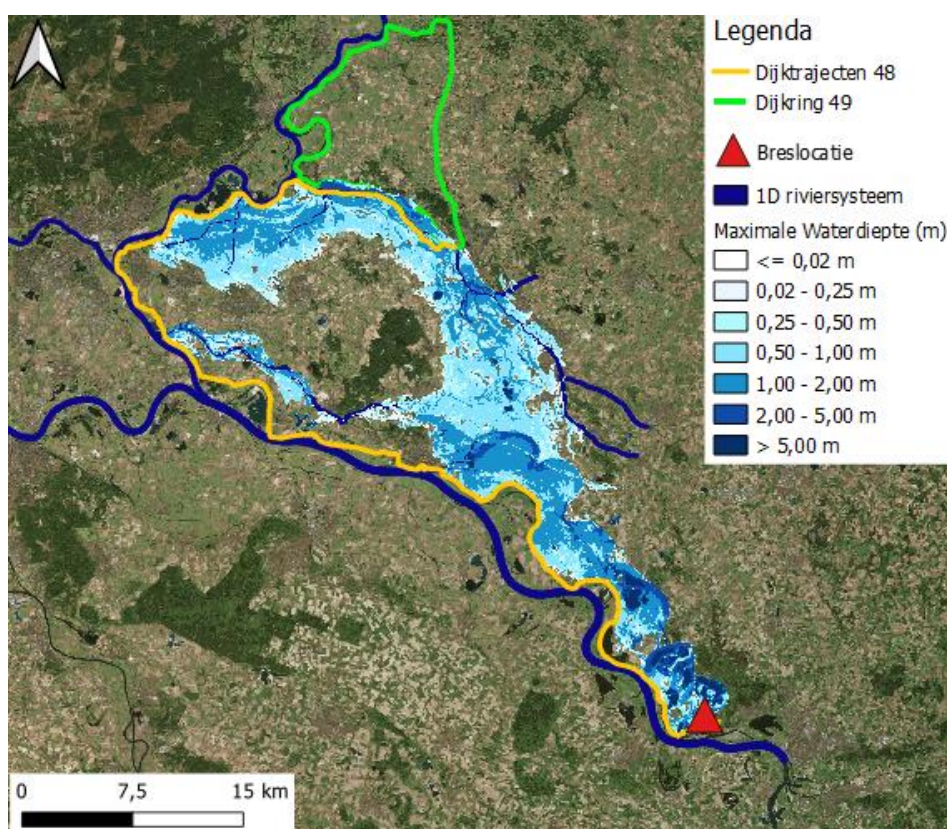


Figuur 3.9 Overstroming van primaire kering dijkkring 49 vanuit de Oude IJssel ter hoogte van Laag Keppel. In zwart is de primaire kering van DR49 ingetekend, in geel de primaire kering van DR48 en in rood-gestippeld de rand van het 2D model gedeelte.

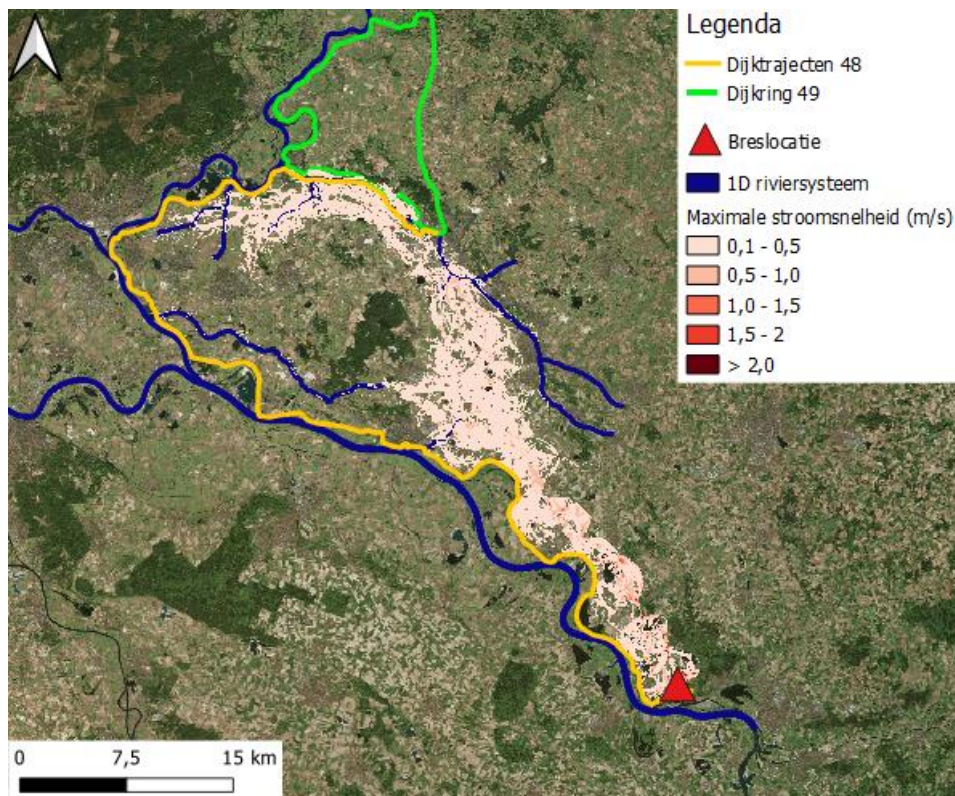
3.1.3 Maximale waterdiepte en stroomsnelheid

In Figuur 3.10 en Figuur 3.11 zijn respectievelijk de maximale waterdiepte en stroomsnelheden weergegeven. In Figuur 3.10 is goed te zien dat de grootste waterdieptes voorkomen in plassen en oude meanderbochten in Duitsland. Daarnaast treden aan de noordzijde van de Oude IJssel relatief grote waterdieptes op tot maximaal 4,5 m. Voor het grootste deel van het overstromde gebied rondom de Oude IJssel gaat het om waterdieptes variërend van enkele centimeters tot ± 3 m. Ook is goed te zien dat een groot deel van het westelijke gebied van de dijkkring onder water staat met maxima van rond de 2 m. De waterdieptes aan de binnenzijde van de dijk (dijktraject 48-2) zijn ongeveer 1m gedurende een periode van ten minste 10 dagen. In die periode zijn buitendijks de waterstanden hoger dan binnendijks. Hierdoor lijkt de kans op een doorbraak vanuit de dijkkring nihil. Van overstroming van de dijk is geen sprake, aangezien het gemiddeld hoogteverschil tussen de kruin van de dijk en het achterland 4 m bedraagt.

In Figuur 3.11 is te zien dat de stroomsnelheden in grote delen van het overstromde gebied relatief laag zijn, met lokaal uitschieters tot 2 m/s. De hoogste waarden worden weer in het zuidoostelijke deel gevonden, tussen Bislich en Rees. Rondom de Oude IJssel komen de maximale stroomsnelheden niet boven de 1 m/s.



Figuur 3.10 Maximale waterdiepte in het 2D-grid gedurende de overstroming.

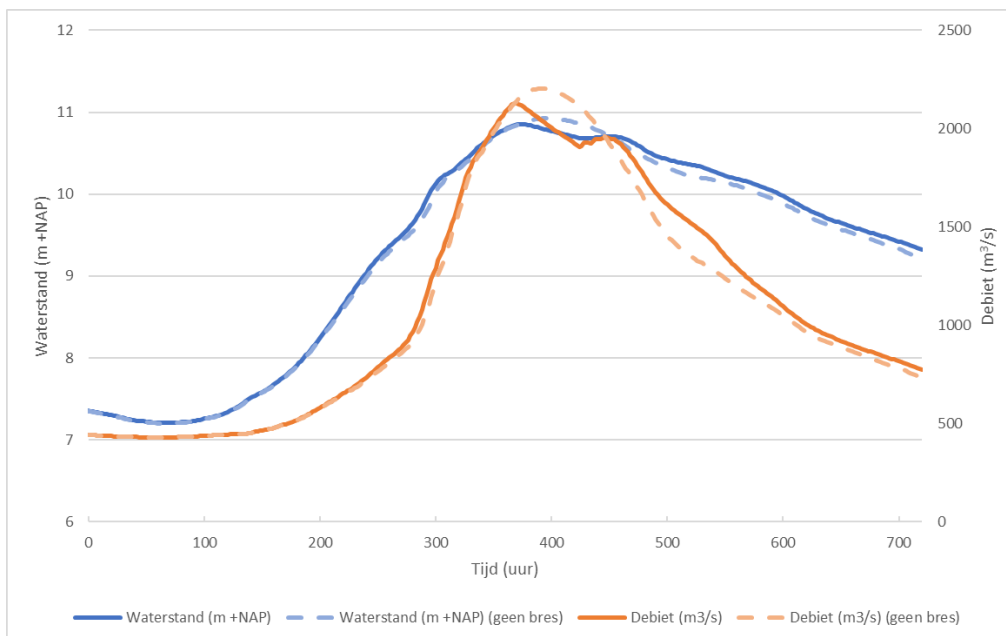


Figuur 3.11 Maximale stroomsnelheid in het 2D-grid gedurende de overstrooming.

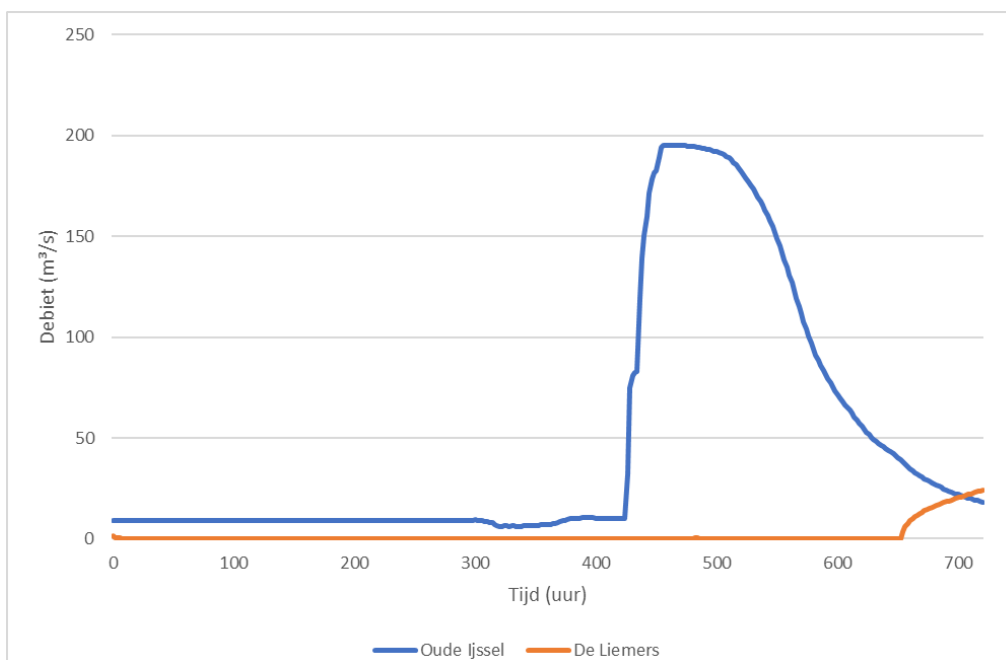
3.1.4 Effect op de IJssel

66 uur na de start van de bresgroei ($T = 426$ uur) bereikt het water, via de monding van de Oude IJssel, de IJssel (Figuur 3.12). Dit is 57 uur nadat de piekafvoer van de hoogwatergolf is gepasseerd nabij Doesburg op $T = 369$ uur. De extra afvoer die de Oude IJssel levert als gevolg van de dijkdoorbraak is duidelijk te zien in Figuur 3.12 en bedraagt op het maximum ongeveer $190 \text{ m}^3/\text{s}$. Het totale volume dat via de Oude IJssel de IJssel instroomt bedraagt $1,27 \times 10^8 \text{ m}^3$ over een tijdspanne van 287 uur (12 dagen) (Figuur 3.13). Naast de Oude IJssel stroomt er ook nog extra water via de afwateringssluis De Liemers de IJssel in met een maximaal debiet van $25 \text{ m}^3/\text{s}$ tegen het einde van de simulatie, wanneer de waterstand in de IJssel weer gezakt is. Dit volume is echter klein in vergelijking met de toestroom vanuit de Oude IJssel. Het extra volume zorgt niet voor een hogere piek in debiet of waterstand benedenstrooms (Figuur 3.12). Wel zorgt het voor een langere belasting op de dijken benedenstrooms met hoge afvoeren, hier $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ (hoogte tweede piek).

Vergeleken met het totale afvoervolume dat door de bres is gestroomd, bedraagt de uitstroom via de Oude IJssel 47,6%. Van de overige 52,4% stroomt 4,9% via andere routes terug in de Rijntakken: Via het Grenskanaal/Löwenberger Landwehr bij Emmerich stroomt 2,2% terug in de Niederrhein, 0,73% stroomt via de Oude Rijn (Rijnstrangen-Kandiagemaal) naar het Pannerdensch Kanaal en 1,95% via uitwateringssluis de Liemers bij Giesbeek naar de IJssel. De overige 47,5% bevindt zich aan het einde van de simulatie nog binnen dijkkring 48 in nog overstroomde gebieden (Tabel 3.1).



Figuur 3.12 Waterstand (blauw) en debiet (oranje) in de IJssel ter hoogte van de monding van de Oude IJssel. Ter vergelijking geven de gestreepte lijnen de situatie weer zonder dijkdoorbraak.



Figuur 3.13 Debiet van uitstroom Oude IJssel en afwateringssluis De Liemers in de IJssel.

Tabel 3.1 Overstromingsvolumes.

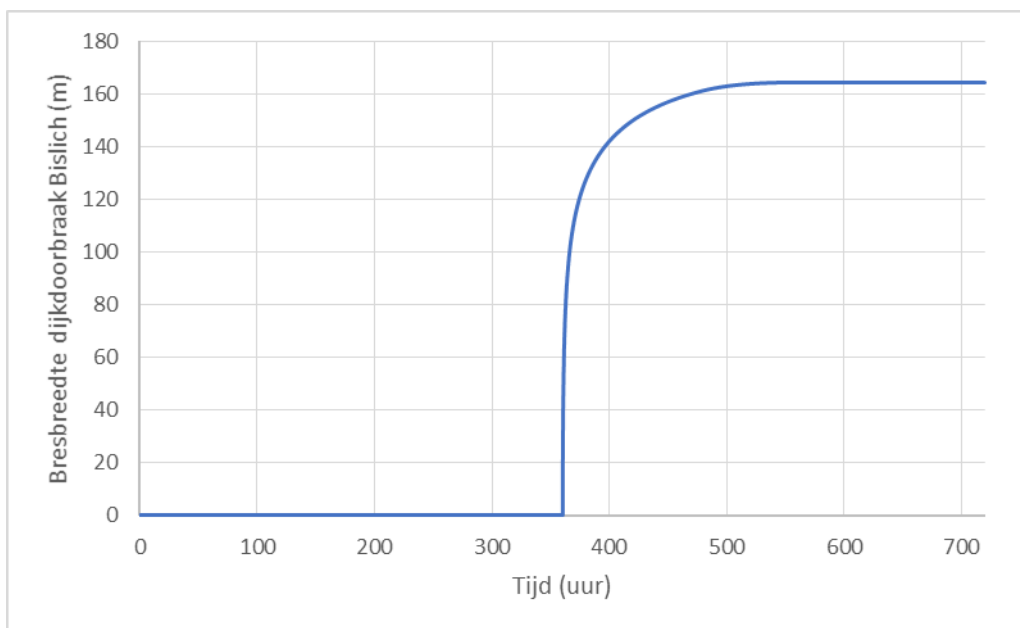
Overstroming	Volume (m ³) (% van totaal bresvolume)
Totaal volume door bres	2,66x10 ⁸ (100%)
Totale uitstroom via de Oude IJssel	1,27x10 ⁸ (47.6%)
Uitstroom via andere routes (Grenskanaal/Löwenberger Landwehr, Kandia, De Liemers)	1,29x10 ⁷ (4.9%)
Extra volume in dijkkring op T _{eind}	1,26x10 ⁸ (47,5%)

3.2 Scenario 2: Bislich – Afvoergolf 1/10.000, start bresgroei op top afvoergolf

In het tweede scenario wordt er gekeken naar het effect van een verhoogde afvoer door de Rijn door gebruikt te maken van een 1/10.000 per jaar afvoergolf. Het maximale debiet bij Wesel bedraagt met deze golf 15.949 m³/s. De start van de bresgroei valt samen met het passeren van de piekafvoer. Naast de verhoogde afvoer zijn alle randvoorwaarden hetzelfde als bij het eerste scenario.

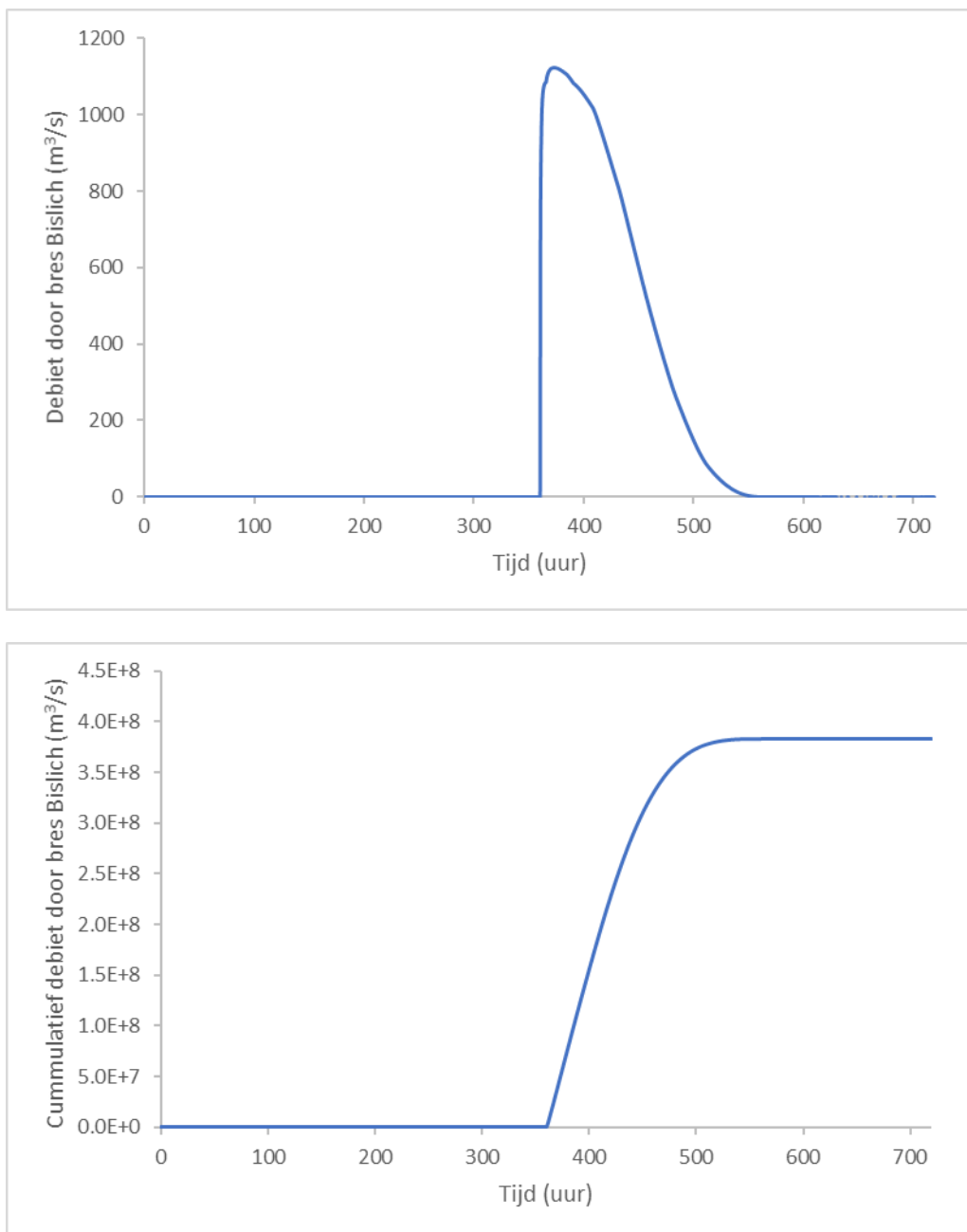
3.2.1 Bresgroei en bresdebiet

Gelijk aan scenario 1 start de bresgroei op het moment dat de piek van de hoogwatergolf passeert. Bij dit scenario start de bresgroei op 360 uur na start van de simulatie. In het model is opgelegd dat in de eerste 10 minuten de bres in verticale richting verdiept tot maaiveld (+20,14 m NAP) waarna deze volgens de Verheij – van der Knaap formule (Verheij, 2003) zich in horizontale richting ontwikkelt tot een maximale breedte van 165 m over een periode van 144 uur (Figuur 3.14).



Figuur 3.14 Bresgroei in horizontale richting. De bresgroei in verticale richting is hetzelfde als voor scenario 1 en is terug te vinden in Figuur 3.1.

Het verloop van het bresdebiet en totale volume zijn weergegeven in Figuur 3.15. Na de start van de bresgroei neemt de afvoer door de bres in 14 uur toe tot het piekdebiet van 1123 m³/s waarna deze weer geleidelijk afneemt. Het totale volume dat door de bres stroomt gedurende de simulatie is 3,68x10⁸ m³. Ongeveer 8 dagen na de start van de bresgroei is het bresdebiet weer 0 m³/s doordat de waterhoogte in de Rijn weer onder maaiveld (+20,14 m NAP) is gezakt (24-11).



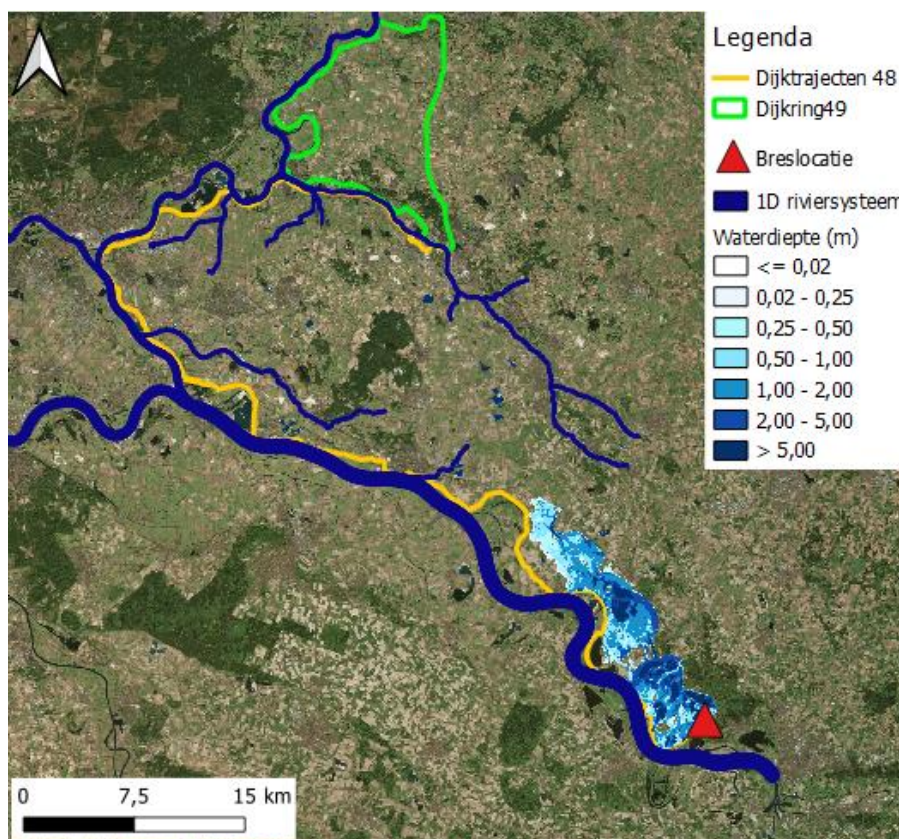
Figuur 3.15 Boven: het bresdebiet; onder: het cumulatieve volume dat door de bres stroomt.

3.2.2 Overstromingsverloop

In Figuur 3.16 tot en met Figuur 3.20 wordt het overstromingspatroon van scenario 2 visueel weergegeven in vijf beelden. In de eerste dagen na de dijkdoorbraak is het overstromingsverloop in scenario 2 vergelijkbaar met wat bij scenario 1 te zien was. Allereerst stromen de oude Rijnmeanders in Duitsland vol waarna het water verder in noordwestelijke richting stroomt. Op 18-11 06:00 (2 dagen 4 uur na dijkdoorbraak) stroomt er voor het eerst water via het achterland de Oude IJssel in. Dit is 12 uur eerder dan bij scenario 1. Ook zien we dat in de Oude IJssel het debiet piekt rond de 400 m³/s ter hoogte van Doetinchem. Echter zijn de stroomsnelheden nu groter met waarden tussen de 1.5 en 2 m/s. De stroomsnelheid neemt daarna geleidelijk weer af tot 0.15 m/s aan het einde van het simulatiebereik.

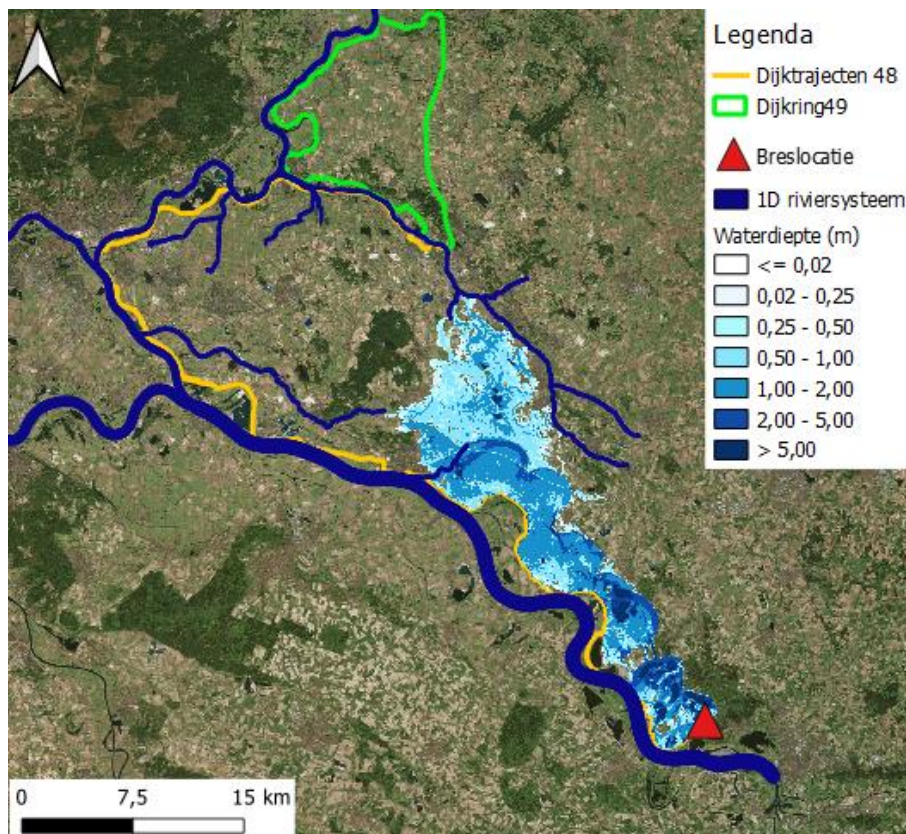
Op het moment dat deze grote afvoer in de Oude IJssel komt, begint de Oude IJssel, ter hoogte van Doetinchem, ook buiten haar oever te treden. Vervolgens stroomt een groot volume over het land in westelijke richting (Figuur 3.18). Vier dagen na de dijkdoorbraak staat het eerste water al tegen de noordzijde van het talud van de rijksweg A12. Via de Wijde Wetering en Zevenaarse Wetering kan het water onder de A12 verder richting het zuiden stromen. Door de beperkte doorvoer capaciteit is dit effect echter zeer klein. Wanneer 1 dag later de waterstand is toegenomen, begint het water ter hoogte van Westervoort/Duiven als eerste over de snelweg te stromen². Het gebied ten zuiden van de A12 blijft zich vervolgens vijf dagen lang vullen door toestroom vanuit het noorden. Op 25-11 (9 dagen na doorbraak) staat het grootste gebied onder water. In de plaatsen Westervoort, Duiven en Zevenaar staat gemiddeld tussen de 0.5 en 1.5 m water. Vanaf de 10^{de} dag na de doorbraak trekt het water zich langzaam in noordelijke richting terug richting de Wijde en Zevenaarse Wetering alvorens het water af te voeren richting de IJssel. Aan het einde van de simulatie op 01-12 staat nog een groot deel van de dijkkring onder water.

Net als in scenario 1 treden de grootste problemen op in het stroomgebied van de Oude IJssel. In dit scenario treden naast de IJssel ook het Grenskanaal (nabij Emmerich) en de Oude Rijn buiten hun oevers.

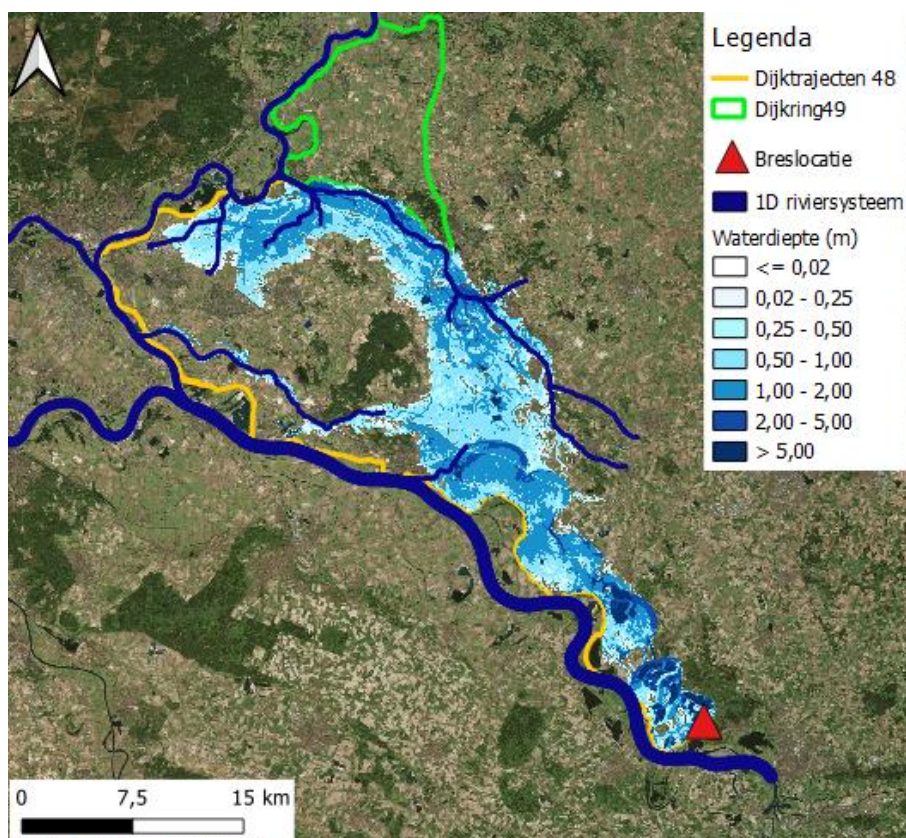


Figuur 3.16 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak bij Bislich (17-11-2010 02:00:00).

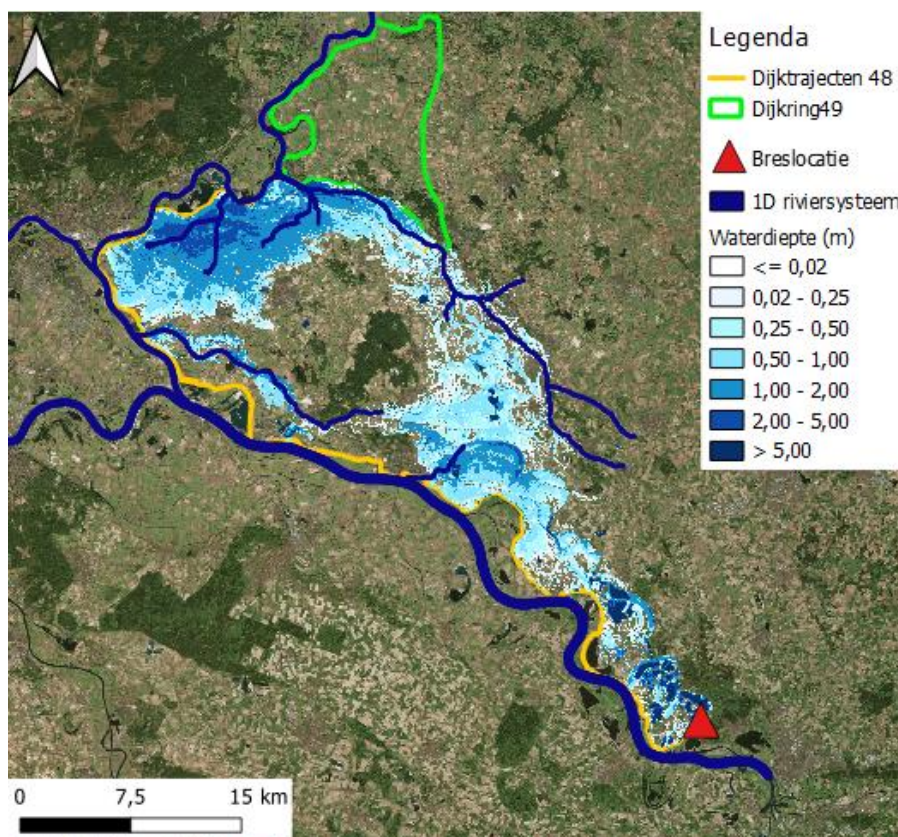
² In werkelijkheid kunnen er onderdoorgangen in de A12 aanwezig zijn. Echter, in het geval van een dijkdoorbraak bij Bislich is het mogelijk dat deze doorgangen gedicht worden om de overstrooming te vertragen.



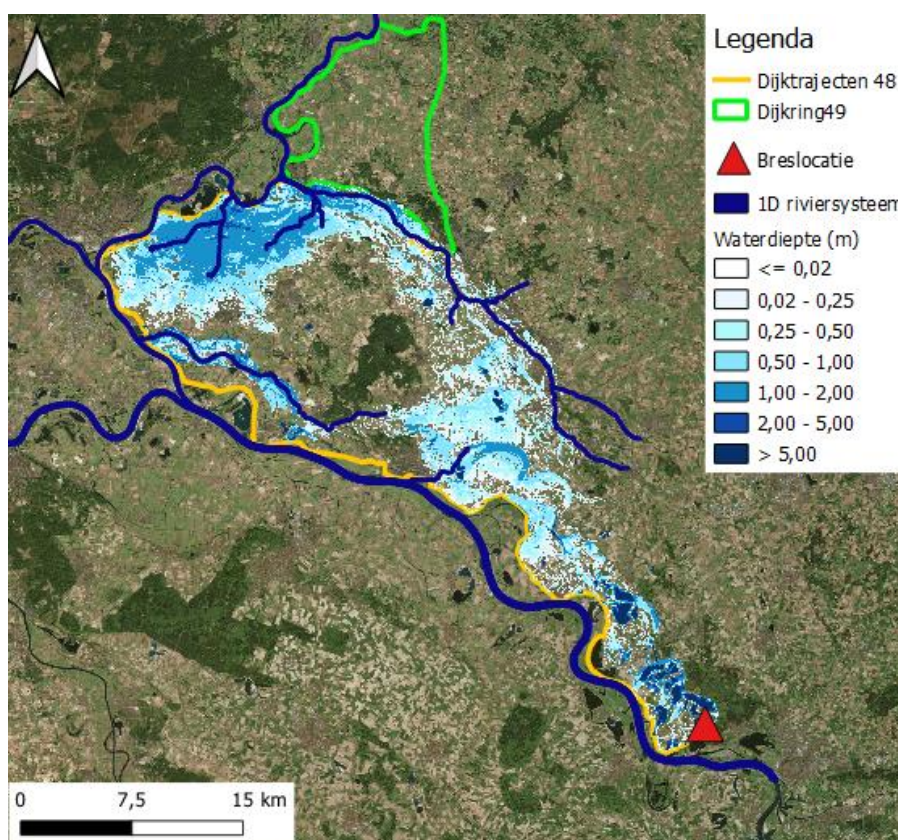
Figuur 3.17 Inundatiepatroon 2 dagen en 4 uur na dijkdoorbraak bij Bislich (18-11-2010 06:00:00). Het eerste moment dat via onbedijkt gebied het stroomgebied van de Oude IJssel bereikt wordt.



Figuur 3.18 Inundatiepatroon 4 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (20-11-2010 02:00:00).



Figuur 3.19 Inundatiepatroon 9 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (25-11-2010 02:00:00).

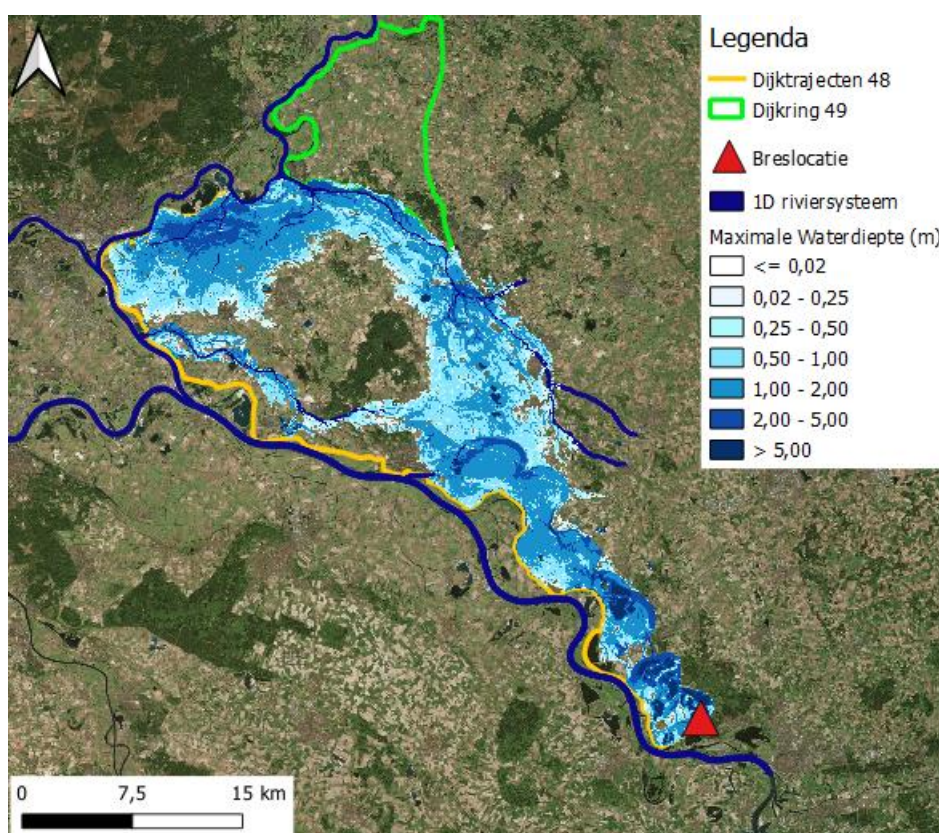


Figuur 3.20 Inundatiepatroon 15 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (01-12-2010 00:00:00).

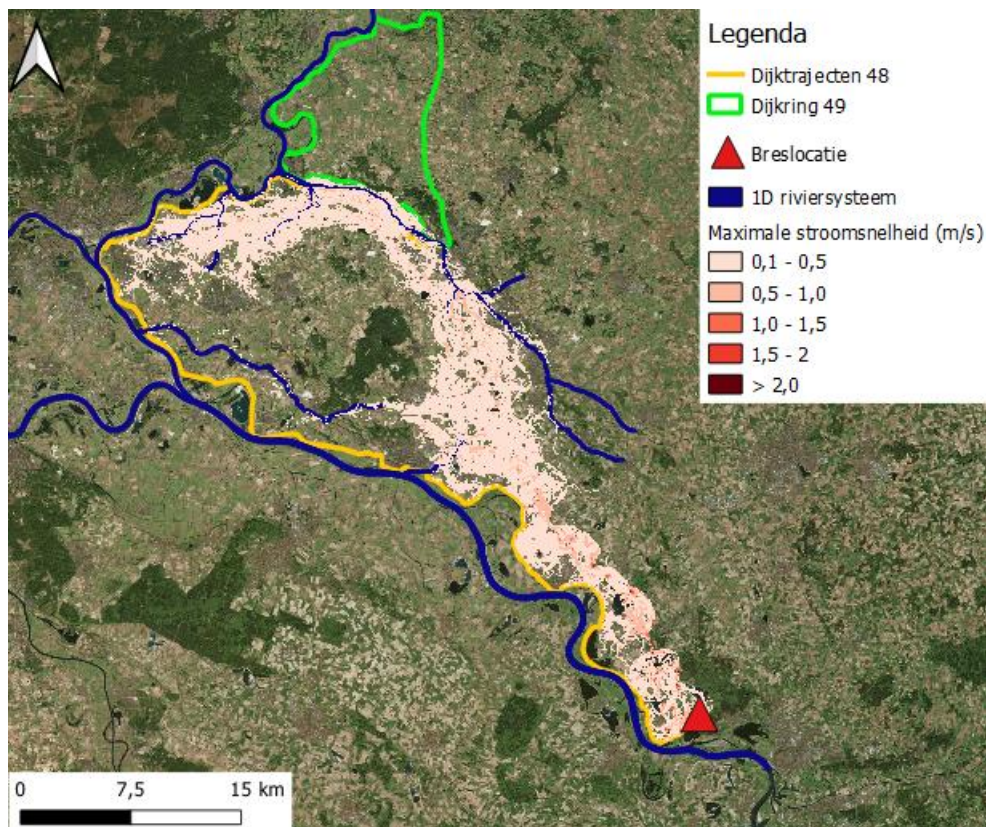
3.2.3 Maximale waterdiepte en stroomsnelheid

De grootste waterdieptes komen voor in de plassen en oude Rijnmeanders in het Duitse deel van het onderzoeksgebied (Figuur 3.21). Hier worden maximale waterdieptes van meer dan 5 m gevonden. Binnen het Nederlandse deel van dijkkring 48 worden de grootste waterdieptes gevonden richting het noorden (nabij monding Oude IJssel) en westen. Hier varieert de waterdiepte tussen de 2 en 4 m. De meeste gebieden met grote waterdieptes zijn onbebouwd. Echter ook rondom de woonkernen Westervoort, Duiven en Zevenaar zal het water tussen de 0.5 en 1.5 m stijgen, wat tot serieuze schade kan leiden. Ook staat er in het westelijke deel langdurig water tegen de binnenzijde van de IJsseldijk (traject 48-2). De maximale binnendijkse waterstand ligt rond de 11,2 m +NAP waar de gemiddelde kruinhoogte van de dijk tussen de 14 en 13 m +NAP ligt. Er is dus geen sprake van overtopping. Doordat tegelijkertijd de waterstand in de IJssel hoog is (max. 12 m +NAP, langs traject 48-2), zal de kans op doorbreken vanuit de dijkkring nihil zijn.

De maximale stroomsnelheden binnen de dijkkring zijn laag, gemiddeld tussen de 0.1 en 0.5 m/s. De hoogste snelheden worden gevonden in het zuidwestelijke deel tussen Bislich en Emmerich binnen de voormalige Rijnmeanders, waar de stroomsnelheden kunnen pieken op 2 m/s.



Figuur 3.21 Maximale waterdiepte in het 2D-grid gedurende de overstroming.



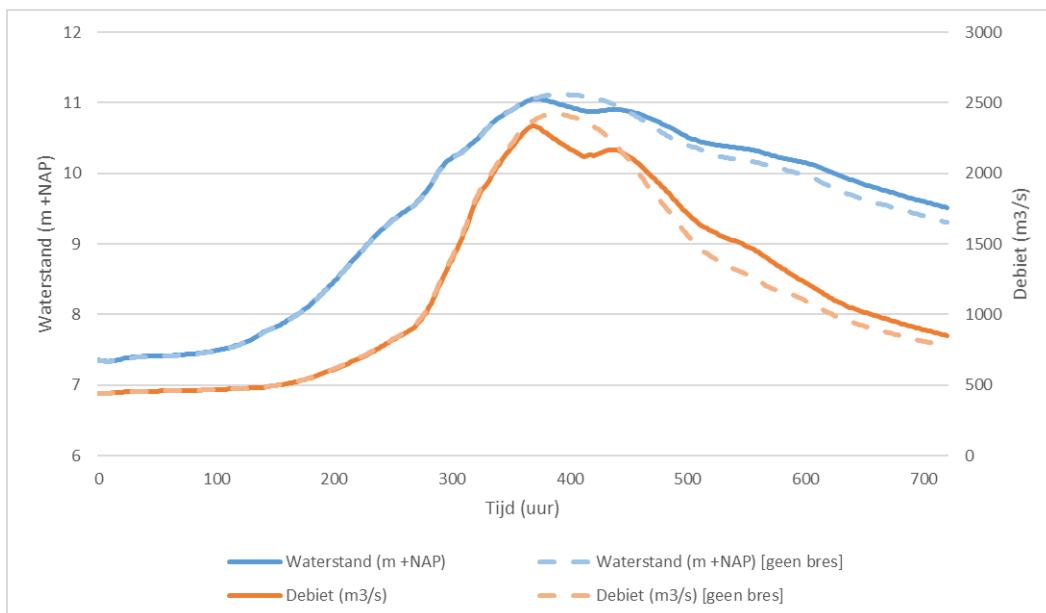
Figuur 3.22 Maximale stroomsnelheid in het 2D-grid gedurende de overstrooming.

3.2.4 Effect op de IJssel

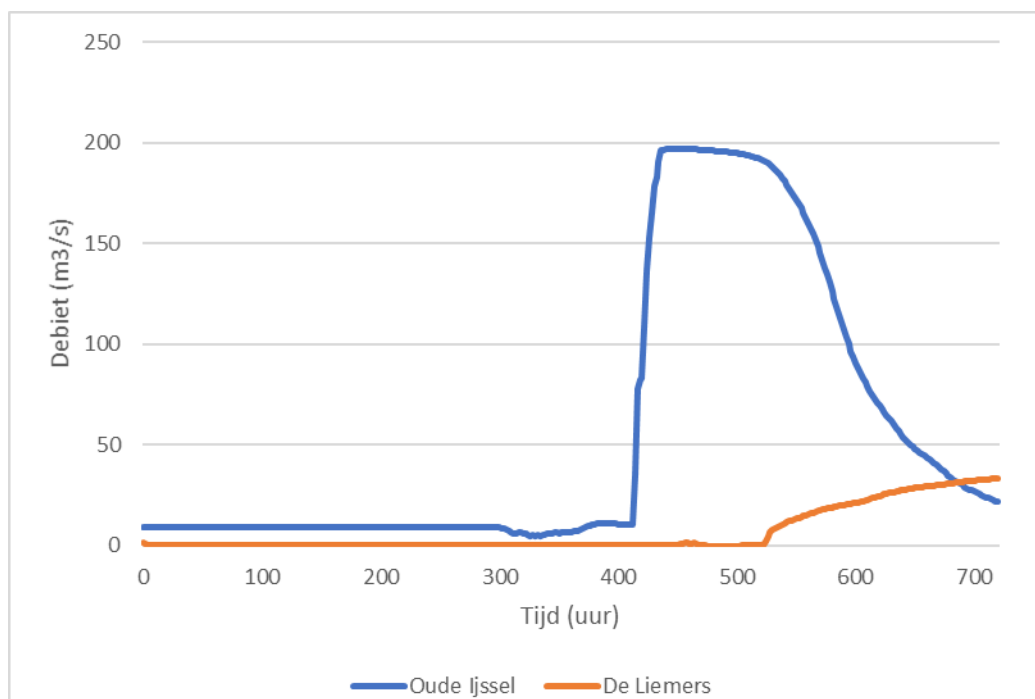
Ongeveer 54 uur na de start van de bresgroei ($T = 414$ uur) stroomt de extra afvoer door de Oude IJssel in de IJssel (Figuur 3.23). Dit is 44 uur nadat de piekafvoer de monding van de Oude IJssel is gepasseerd. De maximale extra afvoer vanuit de Oude IJssel naar de IJssel bedraagt $195 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figuur 3.24). Dit is maar $5 \text{ m}^3/\text{s}$ meer dan bij de scenario 1, echter houdt deze verhoogde afvoer wel langer aan. Deze instroom leidt tot een tweede afvoerpiek in de IJssel van $2167 \text{ m}^3/\text{s}$ op $T = 436$ uur. Het totale volume dat vanuit de Oude IJssel in de IJssel stroomt is $1,46 \times 10^8 \text{ m}^3$. Ook stroomt er via afwateringssluis De Liemers vanaf $T = 510$ uur extra water richting de IJssel. Deze bereikt een maximum van $35 \text{ m}^3/\text{s}$ tegen het einde van de simulatie, met een totale toestroom richting de IJssel van $1,64 \times 10^7 \text{ m}^3$. Het extra volume zorgt niet voor een hogere piek in debiet of waterstand benedenstrooms wanneer vergeleken wordt met de situatie zonder bres. Wel zorgt het voor een langere periode van hogere belasting op de dijken benedenstrooms met hoge afvoeren, hier $2100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vergeleken met het totale afvoervolume dat door de bres is gestroomd, bedraagt de uitstroom via de Oude IJssel 39,7%. Van de overige 60.3% stroomt 11.4% via andere routes terug in de Rijntakken. Via het grenskanaal/Löwenberger Landwehr bij Emmerich stroomt 1.6% terug in de Niederrhein, 0.5% stroomt via de Oude Rijn (Rijnstrangen-Kandiagemaal) naar het Pannerdensch Kanaal en 9.3% via uitwateringssluis de Liemers bij Giesbeek naar de IJssel.

De overige 48,8% bevindt zich aan het einde van de simulatie nog binnen dijkkring 48 in nog overstroomde gebieden (Tabel 3.2).



Figuur 3.23 Waterstand (blauw) en debiet (oranje) in de IJssel ter hoogte van de monding van de Oude IJssel. Ter vergelijking geven de gestreepte lijnen de situatie weer zonder dijkdoorbraak.



Figuur 3.24 Debiet van uitstroom Oude IJssel en afwateringssluis De Liemers in de IJssel.

Tabel 3.2 Overstromingsvolumes.

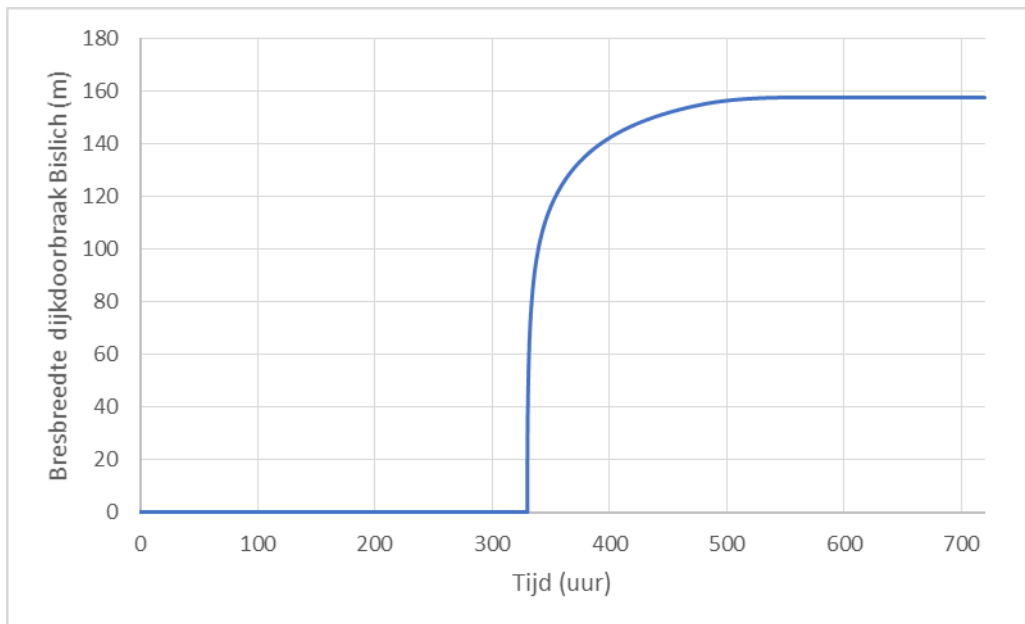
Overstroming	Volume (m ³) (% van totaal bresvolume)
Totaal volume door bres	3,68x10 ⁸ (100%)
Totale uitstroom via de Oude IJssel	1,46x10 ⁸ (39,7%)
Uitstroom via andere routes (Grenskanaal/Löwenberger Landwehr, Kandia, De Liemers)	4,21x10 ⁷ (11,4%)
Extra volume in dijkkring op T _{eind}	1,80x10 ⁸ (48,8%)

3.3 Scenario 3: Bislich – Afvoergolf 1/10.000, start bresgroei voor top afvoergolf

In scenario 3 is zowel de afvoergolf als de start van de bresgroei anders dan in scenario 1. In dit scenario is de 1/10.000 per jaar afvoergolf (gelijk aan scenario 2) gebruikt en start de bresgroei wanneer op de Nederrijn, ter hoogte van Bislich, het 1/1000 per jaar niveau wordt bereikt (= 14.894 m³/s).

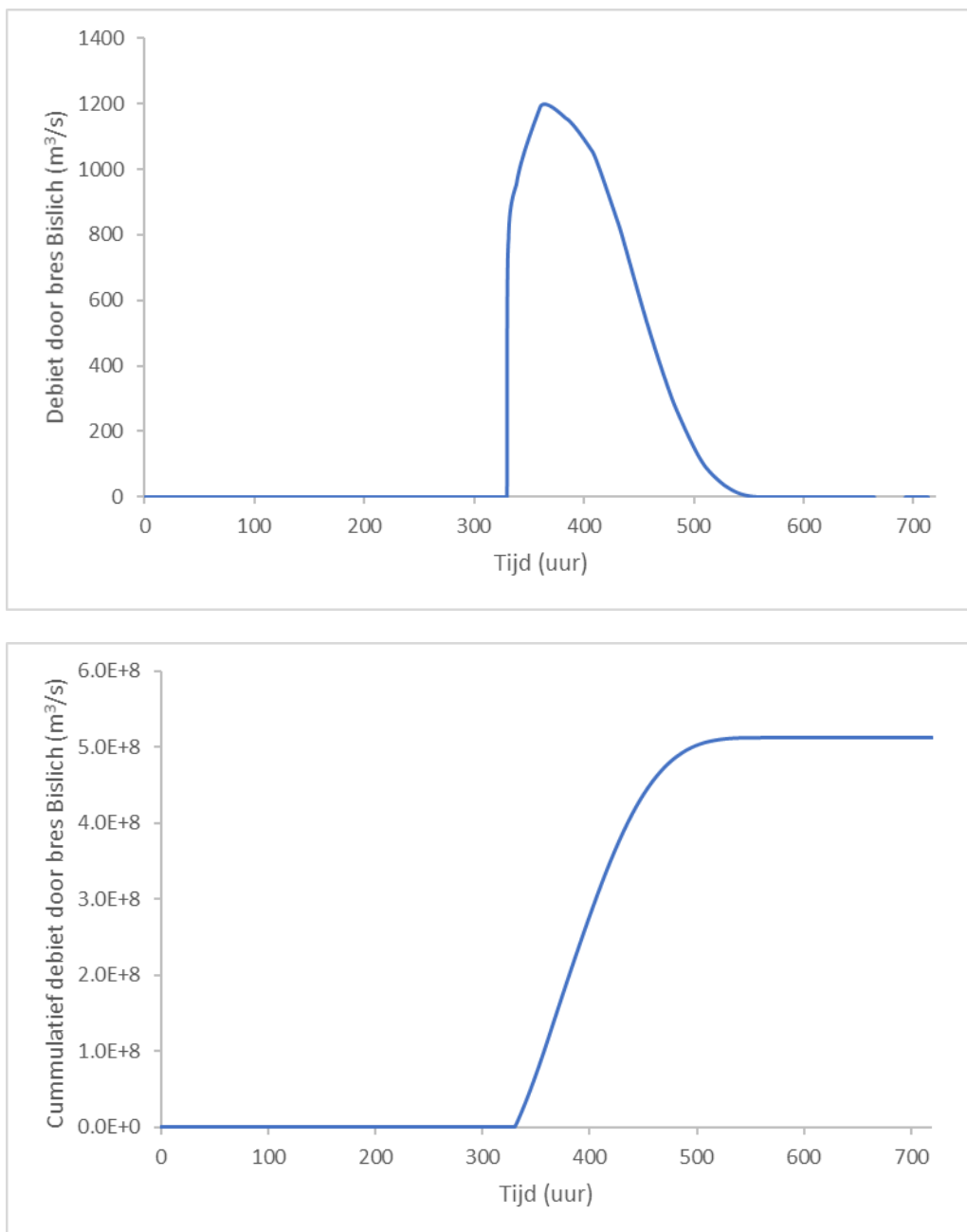
3.3.1 Bresgroei en bresdebiet

In dit scenario start de bresgroei al op 328 uur na start van de simulatie. In het model is net als in scenario's 1 en 2 opgelegd dat in de eerste 10 minuten de bres in verticale richting verdiept tot maaiveld (+20,14 m NAP) waarna deze volgens de Verheij – van der Knaap formule zich in horizontale richting ontwikkelt tot een maximale breedte van 159 m over een periode van 176 uur (Figuur 3.14).



Figuur 3.25 Bresgroei in horizontale richting.

Het verloop van het bresdebiet en totale volume zijn weergegeven in Figuur 3.26. Na de start van de bresgroei neemt de afvoer door de bres in 32 uur toe tot het piekdebiet van 1199 m³/s waarna deze weer geleidelijk afneemt. Het piekdebiet valt samen met het passeren van de piek van de hoogwatergolf op 16-11 02:00. Het totale volume dat door de bres stroomt gedurende de simulatie is 5,12x10⁸ m³. Ongeveer 10 dagen na de start van de bresgroei is het bresdebiet weer 0 m³/s doordat de waterhoogte in de Rijn weer onder maaiveld (+20,14 m NAP) is gezakt (24-11). De sterke toename van het totaal bresdebiet wordt veroorzaakt door het feit dat er voor een langere periode water door de bres kan stromen t.o.v. scenario 1 en 2.



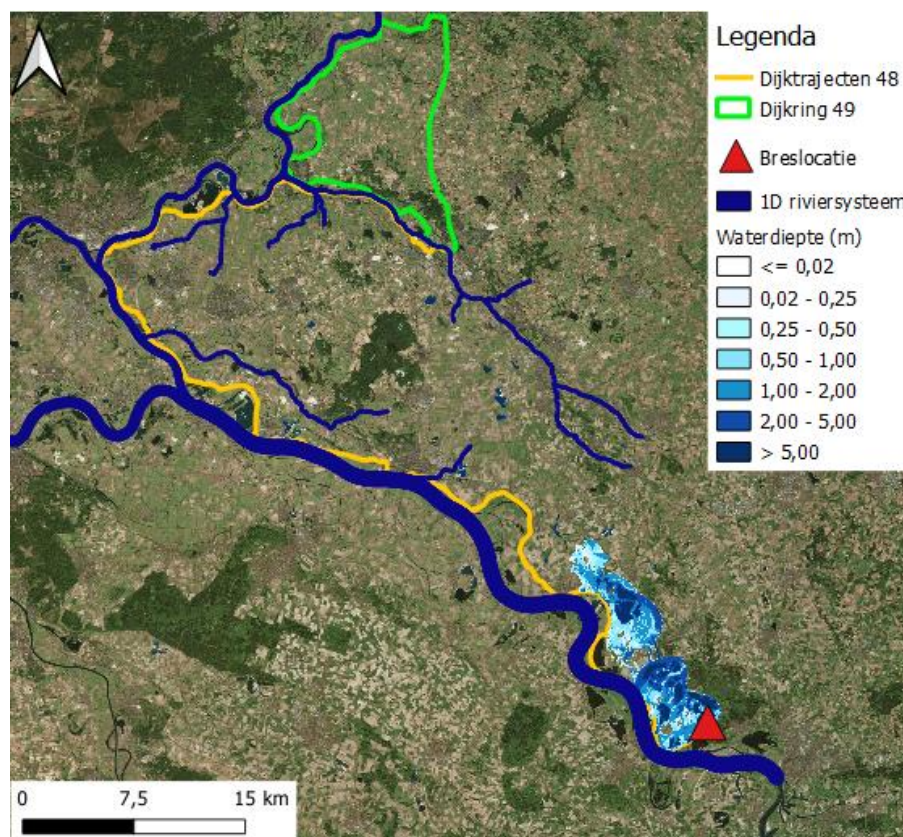
Figuur 3.26 Boven: het bresdebiet; onder: het cumulatieve volume dat door de bres stroomt.

3.3.2 Overstromingsverloop

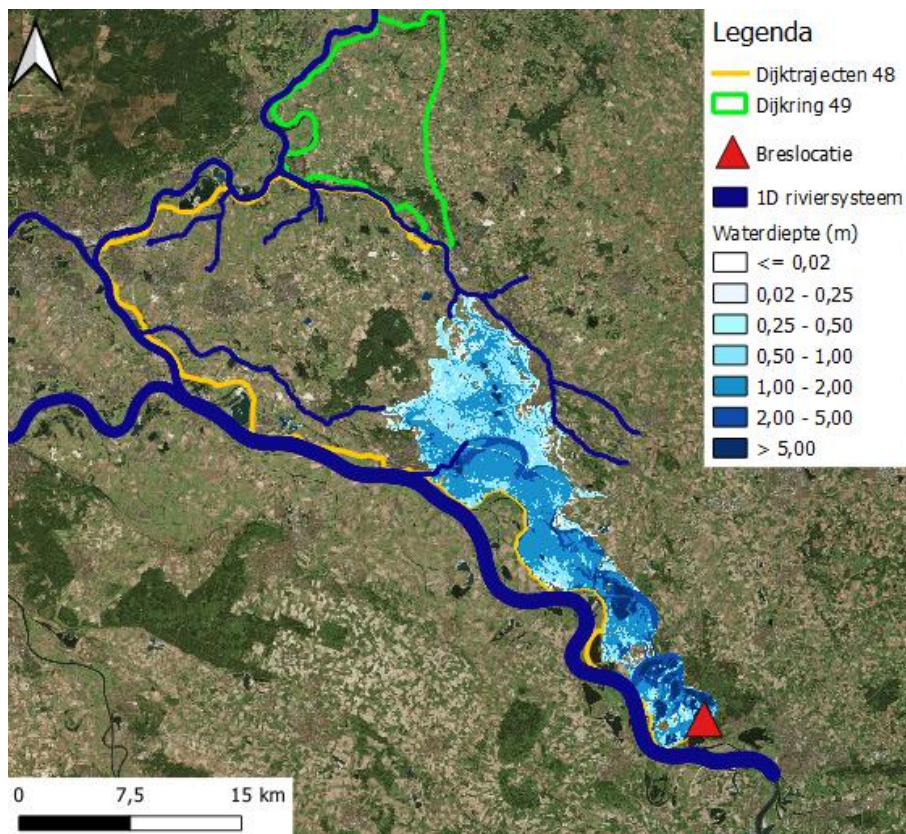
In Figuur 3.27 tot en met Figuur 3.31 wordt het overstromingspatroon van scenario 3 visueel weergegeven in vijf beelden. In de eerste dagen na de dijkdoorbraak is het overstromingsverloop in scenario 3 vergelijkbaar met de voorgaande scenario's. Allereerst stromen de oude Rijnmeanders in Duitsland vol waarna het water verder in noordwestelijke richting stroomt. Op 17-11 02:00 (2 dagen 6 uur na dijkdoorbraak) stroomt er voor het eerst water via het achterland de Oude IJssel in. Het debiet van de Oude IJssel piekt net ten zuiden van Doetinchem met een maximum van 450 m³/s. Dit gaat gepaard met stroomsnelheden tussen de 1.5 en 2.3 m/s. De stroomsnelheid neemt daarna geleidelijk weer af tot 0.15 m/s aan het einde van het simulatiebereik.

Op het moment dat deze grote afvoer in de Oude IJssel komt, begint de Oude IJssel, ter hoogte van Doetinchem, ook buiten haar oever te treden. Vervolgens stroomt een groot volume over het land in westelijke richting (Figuur 3.18). 4 dagen na de dijkdoorbraak staat het eerste water al tegen de noordzijde van het talud van de rijksweg A12. Via de Wijde Wetering en Zevenaarse Wetering kan het water onder de A12 verder richting het zuiden stromen. Door de beperkte doorvoercapaciteit is dit effect echter zeer klein. Wanneer 1 dag later de waterstand is toegenomen, begint het water ter hoogte van Westervoort/Duiven als eerste over de snelweg te stromen. Het gebied ten zuiden van de A12 blijft zich vervolgens vijf dagen lang vullen door toestroom vanuit het noorden. Op 25-11 (9 dagen na doorbraak) staat het grootste gebied onder water. In de plaatsen Westervoort, Duiven en Zevenaar staat gemiddeld tussen de 1 en 2.5 m water. Vanaf de 10^{de} dag na de doorbraak trekt het water zich langzaam in noordelijke richting terug richting de Wijde en Zevenaarse Wetering alvorens het water af te voeren richting de IJssel. Echter aan het einde van de simulatie staat op 01-12 nog een groot deel van de dijkkring onder water.

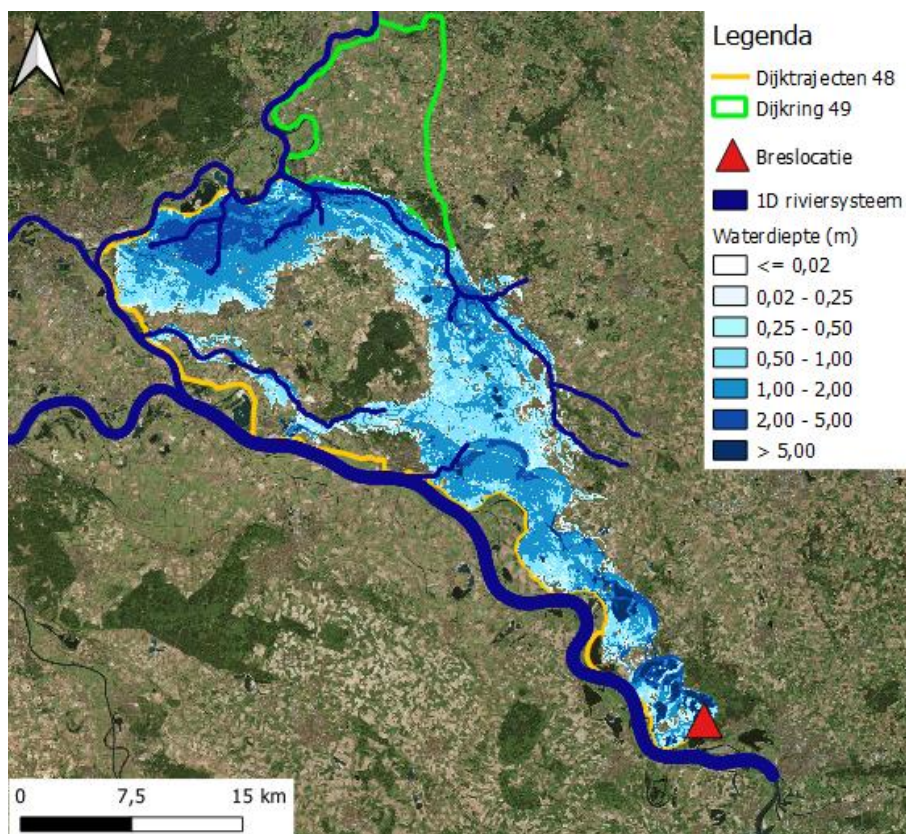
Overeenkomend met scenario 1 en 2 treden de grootste problemen op in het stroomgebied van de Oude IJssel. Ook in het stroomgebied van het Grenskanaal (nabij Emmerich) en de Oude Rijn neemt het overstromingsvolume toe ten opzichte van scenario 1 en 2.



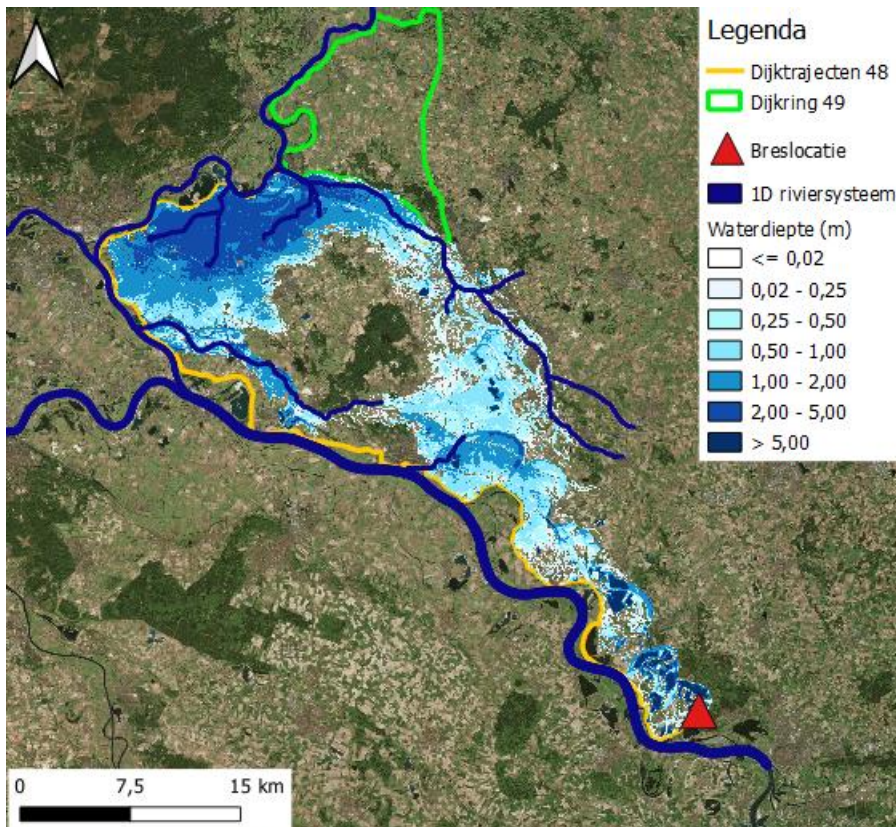
Figuur 3.27 Inundatiepatroon 1 dag na de dijkdoorbraak bij Bislich (15-11-2010 18:00:00).



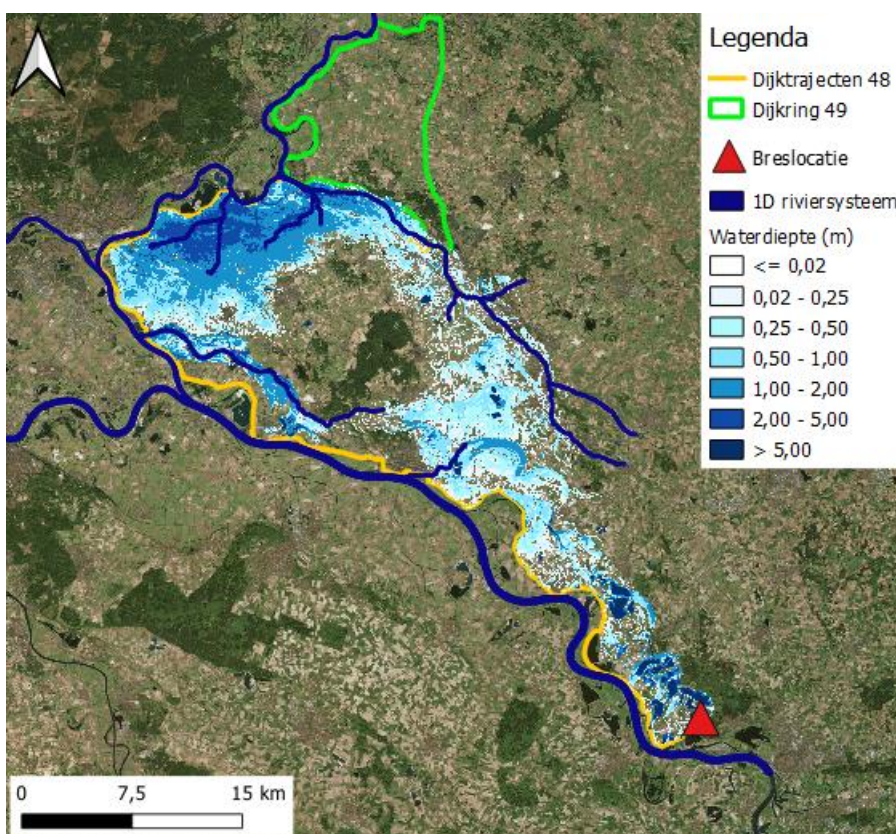
Figuur 3.28 Inundatiepatroon 2 dagen en 6 uur na dijkdoorbraak bij Bislich (17-11-2010 02:00:00). Het eerste moment dat via onbedijkt gebied het stroomgebied van de Oude IJssel bereikt wordt.



Figuur 3.29 Inundatiepatroon 6 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (20-11-2010 18:00:00).



Figuur 3.30 Inundatiepatroon 10 dagen na dijkdoorbraak bij Bislich (24-11-2010 02:00:00).

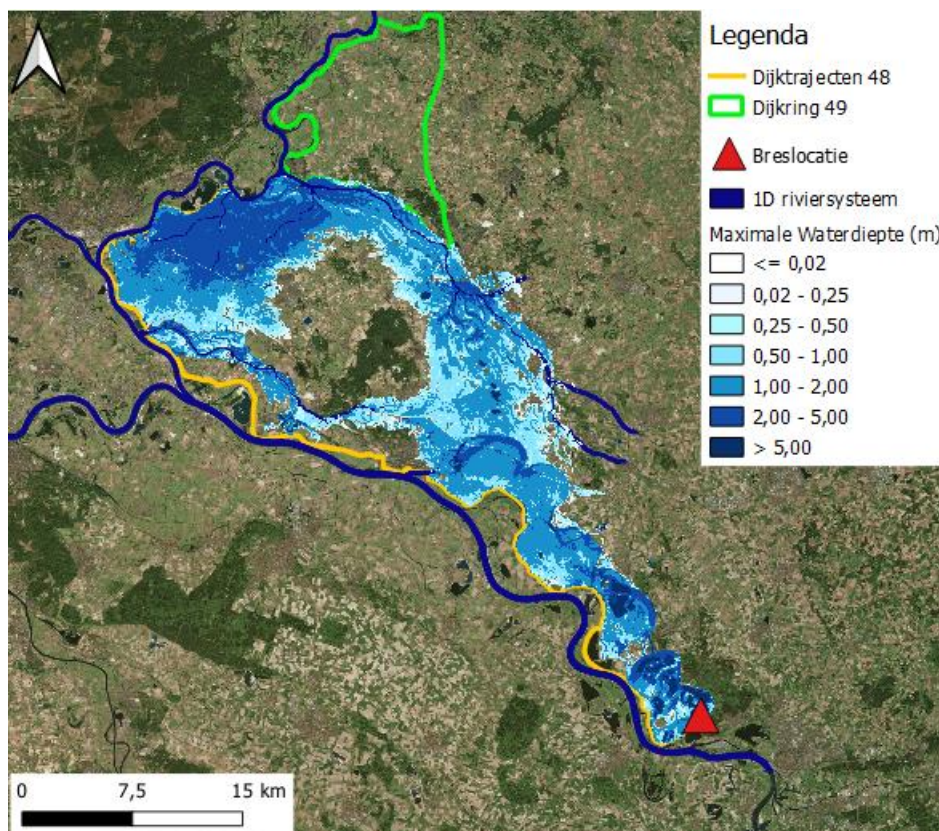


Figuur 3.31 Inundatiepatroon 16 dagen en 6 uur na dijkdoorbraak bij Bislich (01-12-2010 00:00:00).

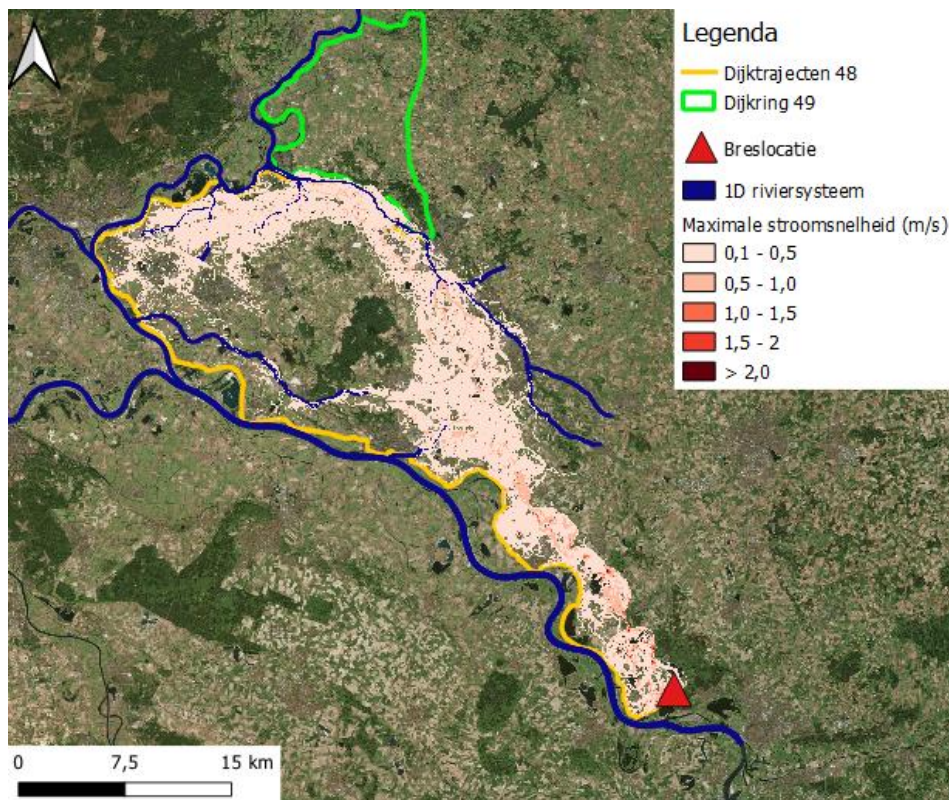
3.3.3 Maximale waterdiepte en stroomsnelheid

De grootste waterdieptes komen voor in de plassen en oude Rijnmeanders in het Duitse deel van het onderzoeksgebied (Figuur 3.32). Hier worden maximale waterdieptes van meer dan 5 m gevonden. Binnen het Nederlandse deel van dijkkring 48 worden de grootste waterdieptes gevonden richting het noorden (nabij monding Oude IJssel) en westen. Hier varieert de waterdiepte tussen de 2 en 4 m. Het algemene beeld is dat de grootste waterdieptes allemaal in onbebouwd gebied voorkomen. Rondom de woonkernen Westervoord, Duiven en Zevenaar echter zal het water tussen de 1.5 en 2.5 m stijgen, wat tot serieuze schade kan leiden. Ook staat er in het westelijke deel langdurig water tegen de binnenzijde van de IJsseldijk (traject 48-2). De maximale binnendijkse waterstand ligt rond de 12.0 m (1.8 m waterdiepte) waar de gemiddelde kruinhoogte van de dijk tussen de 14 en 13 m +NAP ligt. Er is dus geen sprake van overtopping. Doordat tegelijkertijd de waterstand in de IJssel hoog is (max. 12 m +NAP, langs traject 48-2), zal de kans op een doorbraak vanuit de dijkkring nihil zijn.

De maximale stroomsnelheden binnen de dijkkring zijn laag, gemiddeld tussen de 0.1 en 0.5 m/s. De hoogste snelheden worden gevonden in het zuidwestelijke deel tussen Bislich en Emmerich binnen de voormalige Rijnmeanders, waar de stroomsnelheden kunnen pieken op 2 m/s.



Figuur 3.32 Maximale waterdiepte in het 2D-grid gedurende de overstroming.

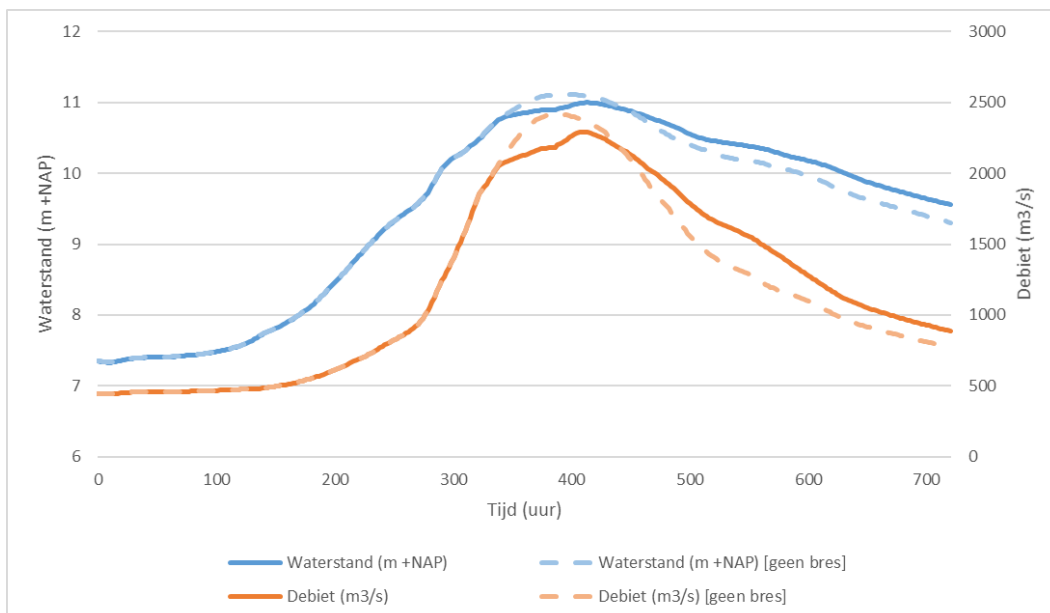


Figuur 3.33 Maximale stroomsnelheid in het 2D-grid gedurende de overstroming.

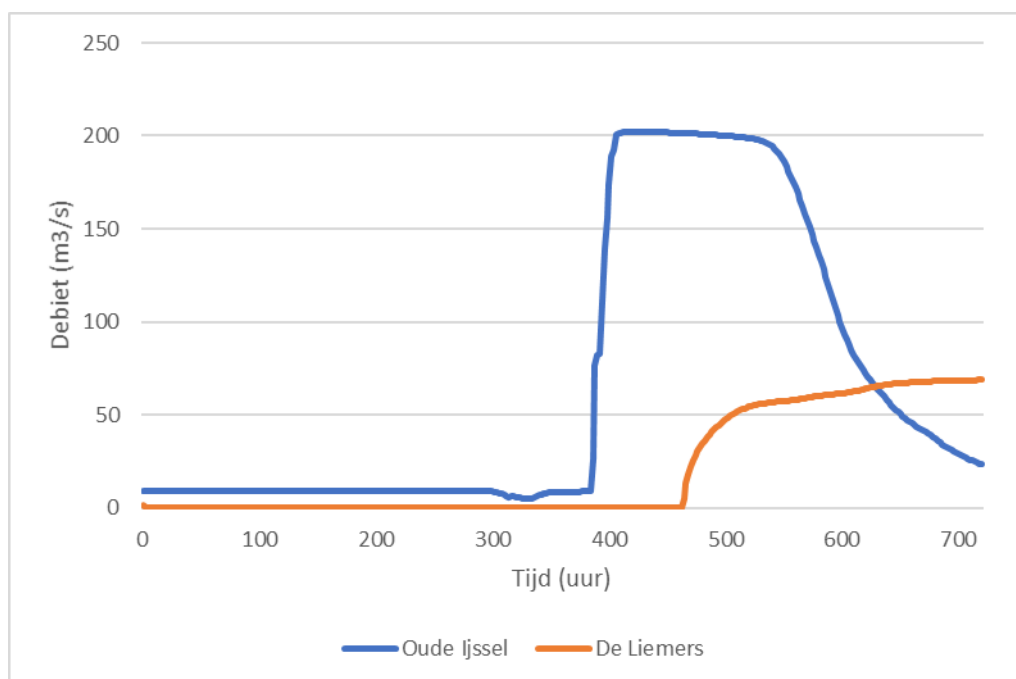
3.3.4 Effect op de IJssel

Ongeveer 56 uur na de start van de bresgroei ($T = 386$ uur) stroomt de extra afvoer door de Oude IJssel de IJssel in (Figuur 3.34). In dit scenario valt de eerste toevoer van extra afvoer via de Oude IJssel samen met de piek van de hoogwatergolf die door de IJssel trekt. De maximale extra afvoer vanuit de Oude IJssel bedraagt $205 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figuur 3.35), waarna er een nieuwe en hogere afvoerpiek ontstaat met een maximale afvoer van $2293 \text{ m}^3/\text{s}$ op $T = 408$ uur. Het totale volume dat vanuit de Oude IJssel in de IJssel stroomt is $1,72 \times 10^8 \text{ m}^3$. Ook stroomt er via afwateringssluis De Liemers vanaf $T = 476$ uur extra water richting de IJssel. Deze bereikt een maximum van $65 \text{ m}^3/\text{s}$ tegen het einde van de simulatie, met een totale toestroom richting de IJssel van $5,34 \times 10^7 \text{ m}^3$. Het extra volume zorgt echter niet voor een hogere piek in debiet of waterstand benedenstrooms wanneer vergeleken wordt met de situatie zonder bres. Wel zorgt het voor een langere periode van hogere belasting op de dijken benedenstrooms met hoge afvoeren, hier rond de $2200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vergeleken met het totale afvoervolume dat door de bres is gestroomd, bedraagt de uitstroom via de Oude IJssel 33,6%. Van de overige 66,4% stroomt 17,8% via andere routes terug in de Rijntakken. Via het grenskanaal/Löwenberger Landwehr bij Emmerich stroomt 1,4% terug in de Niederrhein, 0,9% stroomt via de Oude Rijn (Rijnstrangen-Kandiagemaal) naar het Pannerdensch Kanaal en 15,5% via uitwateringssluis de Liemers bij Giesbeek naar de IJssel. De overige 48,6% bevindt zich aan het einde van de simulatie nog binnen dijkkring 48 in nog overstroomde gebieden (Tabel 3.3).



Figuur 3.34 Waterstand (blauw) en debiet (oranje) in de IJssel ter hoogte van de monding van de Oude IJssel. Ter vergelijking geven de gestreepte lijnen de situatie weer zonder dijkdoorbraak.



Figuur 3.35 Debiet van uitstroom Oude IJssel en afwateringssluis De Liemers in de IJssel.

Tabel 3.3 Overstromingsvolumes.

Overstroming	Volume (m ³) (% van totaal bresvolume)
Totaal volume door bres	5,12x10 ⁸ (100%)
Totale uitstroom via de Oude IJssel	1,72x10 ⁸ (33.6%)
Uitstroom via andere routes (Grenskanaal/Löwenberger Landwehr, Kandia, De Liemers)	5,12x10 ⁷ (17.8%)
Extra volume in dijkkring op T _{eind}	2,49x10 ⁸ (48.6%)

3.4 Overzicht resultaten

In de voorgaande paragrafen zijn de drie scenario's individueel besproken en is gefocust op de gehele periode van start bresgroei tot het einde van de simulatie. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten, met betrekking tot systeemwerking, met elkaar vergeleken. De belangrijkste cijfers worden weergegeven in Tabel 3.4 en Tabel 3.5.

De belangrijkste bevinding is dat in geen van de drie doorgerekende scenario's de piekafvoer in de IJssel toeneemt ten opzichte van de situatie wanneer geen dijkdoorbraak optreedt. Het afvoerreducerende effect van de bres heeft dus een grotere invloed op de benedenstroomse waterstands- en afvoerpiek in de IJssel dan de extra toevoer via vooral de Oude IJssel.

3.4.1 Effect van initiële afvoergolf

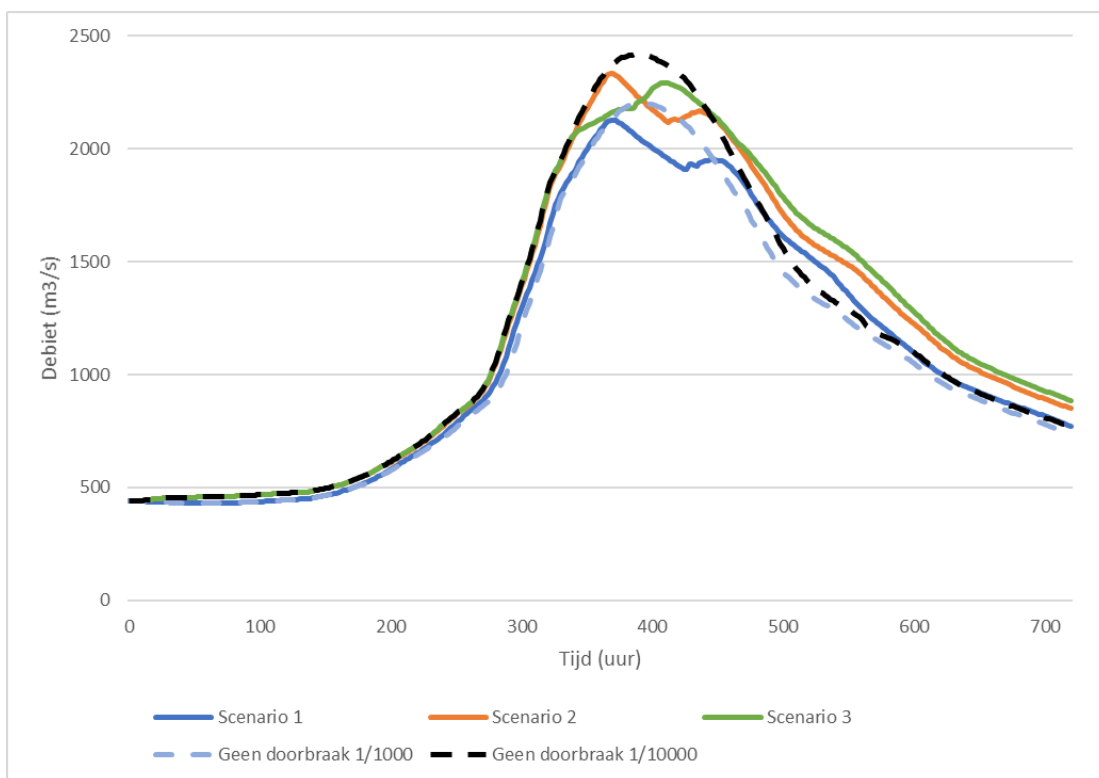
Door de randvoorwaarden te verhogen van een 1/1000 naar een 1/10.000 afvoergolf (scenario 1 vs. scenario 2) is er een toename in zowel bresdebiet, piekafvoer in de IJssel als extra toevoer vanuit de Oude IJssel (Tabel 3.4). De piekafvoer op de IJssel neemt met 220 m³/s toe. Ook is in Figuur 3.36 te zien dat de vorm van de afvoergolf vergelijkbaar blijft. Dit ondanks dat in de situatie met hogere initiële afvoer hogere stroomsnelheden worden bereikt en het water 10 uur eerder in de IJssel stroomt. Bij een hogere afvoer zit er dus minder tijd tussen de afvoerpieken van de IJssel en Oude IJssel. Dit vergroot de kans op negatieve systeemwerking.

3.4.2 Effect van timing start bresgroei

Wanneer scenario 2 en 3 met elkaar vergeleken worden valt op dat de vorm van de afvoergolf sterk verandert. Doordat in scenario 3 de bresgroei al voor de piekafvoer start, vloeit er 39% meer water door de bres. Door de afvoerreducerende werking van de bres wordt de piek van de afvoergolf over de Rijn en IJssel dusdanig verlaagd, dat deze ter hoogte van Doesburg 205 m³/s lager ligt in scenario 3 dan in een situatie zonder bres.

De totale toevoer vanuit de Oude IJssel neemt in scenario 3 met 15% toe ten opzichte van scenario 2. Ook het tijdsverschil tussen de afvoerpiek op de IJssel en het moment dat de verhoogde afvoer vanuit de Oude IJssel de IJssel instroomt neemt sterk af. In scenario 3 vallen deze bijna samen, waardoor er geen sprake meer is van twee pieken. De maximale afvoerpiek bij scenario 3 is 57 m³/s lager dan bij scenario 2. Dit komt neer op een waterstandsverschil van 0.1 m tussen de twee scenario's. Met deze scenario's is het voor de waterstand op de IJssel dus gunstig als de bres voor de piek van de hoogwatergolf begint met groeien.

Wanneer de afvoerpiek voorbij is en de afvoer gestaag afneemt, blijft de afvoer in de IJssel in scenario 3 hoger dan in scenario 2, dit is te zien in Figuur 3.36. Dit wordt verklaard door de toestroom vanuit de Oude IJssel en De Liemers die in scenario 3 voor een langere periode een verhoogde afvoer heeft. Hierdoor zal voor een langere periode de hydraulische belasting op de dijken benedenstrooms groter zijn voor het domein van de hoge afvoeren.



Figuur 3.36 Vergelijking afvoer IJssel nabij Doesburg voor de verschillende scenario's.

Tabel 3.4 Vergelijking resultaten ten opzichte van de situatie zonder bres.

	Afvoergolf 1/1.000 (geen bres)	Scenario 1 (Afvoergolf 1/1000)	Afvoergolf 1/10.000 (geen bres)	Scenario 2 (Afvoergolf 1/10.000)	Scenario 3 (Afvoergolf 1/10.000, bres voor piek)
Piekafvoer Neder-Rijn Bislich (m³/s)	14.894	14.863	15.932	15.920	14.968
Maximale waterstand Bislich (m +NAP)	22.9	22.7	23.3	23.3	22.9
Piekafvoer IJssel Doesburg (m³/s)	2203	2130	2418	2350	2293
Maximale waterstand Doesburg (m +NAP)	11.0	10.9	11.2	11.1	11.0
Piekafvoer Oude IJssel Doesburg (m³/s)	10	195	10	197	202
Maximaal bresdebiet (m³/s)	-	839	-	1123	1199
Totaal bresvolume (m³)	-	2,66x10 ⁸	-	3,68x10 ⁸	5,12x10 ⁸
Totale afvoer via Oude IJssel naar IJssel (m³/s)	-	1,27x10 ⁸	-	1,46x10 ⁸	1,72x10 ⁸
Totale uitstroom via andere routes (Grenskanaal/Löwenberger Landwehr, Kandia, De Liemers)		0,13x10 ⁸		0,42x10 ⁸	0,51x10 ⁸
Volume achtergebleven binnen dijkkring 48	-	1,26x10 ⁸	-	1,80x10 ⁸	2,49x10 ⁸

Tabel 3.5 Timing inundatiepatroon in uren na doorbraak (T0).

	Scenario 1 (Afvoergolf 1/1000)	Scenario 2 (Afvoergolf 1/10.000)	Scenario 3 (Afvoergolf 1/10.000, bres voor piek)
Start Bresgroei (uur na start simulatie)	360 = T0	360 = T0	328 = T0
Water bereikt Oude IJssel	64	52	54
Extra afvoer van Oude IJssel in IJssel	66	54	56
Piek hoogwatergolf IJssel nabij Doesburg	9	10	54
Verschil aankomst piek hoogwatergolf en eerste extra afvoer Oude IJssel	57	44	2

4 Discussie

4.1 Modelonzekerheden

Het gebruikte model heeft enkele beperkingen en onzekerheden. De belangrijkste om hier te noemen zijn de ligging van de modelrand bij dijkkring 49 en de bresgroei.

De modelrand bij dijkkring 49 beperkt in dit model het overstroomd gebied enigszins. De Oude IJssel bevindt zich dichtbij de noordelijke modelrand, die fungeert als een soort glazen wand. Tijdens de overstroming treedt de Oude IJssel zowel aan de noord als zuidzijde buiten haar oevers. Wanneer het water richting het noorden stroomt kan dit tegen de modelrand aanlopen. Dit verhindert dat er eventueel water in noordelijke richting verder dijkkring 49 in kan stromen. Ook kan dit zorgen voor een lichte overschatting van de waterdieptes aan de noordzijde van de Oude IJssel en een te hoog berekende afvoer richting de IJssel. Echter bij controle is gebleken dat de locaties waar het water tegen de rand aanloopt ook in werkelijkheid nabij hoge gronden liggen. Het effect is daarom verwaarloosbaar verondersteld. Bovendien beïnvloedt deze mogelijke overschatting de conclusie dat negatieve systeemwerking niet leidt tot hogere piekafvoeren in de bestudeerde scenario's niet. Immers, wanneer er meer water naar dijkkring 49 zou stromen, zou er nog minder water bij Doesburg de IJssel ingaan.

De bresgroei die zal optreden is zeer onzeker en is belangrijk voor het effect van systeemwerking: wanneer de bres sneller groeit of de bres breder wordt, zal er meer water naar binnen stromen en zal er ook meer naar de IJssel doorstromen. Echter, ook bij het extreme scenario met de 1/10.000 per jaar afvoer en een doorbraak voor de piek is het effect op de IJsselaflow beperkt. Als de bres nog eerder zou optreden en groter zou worden, dan kan systeemwerking wel optreden. Het afvoerreducerend effect van de bres is dan groter, maar ook de terugstroom, via de Oude IJssel, kan dan meer samenvallen met de afvoerpiek in de IJssel. Het gecombineerde effect kan dan leiden tot netto een hogere IJsselaflow dan zonder bres het geval zou zijn geweest. De kans hierop is echter klein.

4.2 Onder welke omstandigheden wordt systeemwerking wel relevant?

De hier beschreven resultaten gaan allemaal uit van een breslocatie bij Bislich. Bij deze berekeningen is het effect van de afvoerreductie van de bres (waardoor water uit de rivier dijkkring 48 instroomt) op de IJsselaflow groter dan het effect van de terugstroom van het water naar de IJssel. Aangezien de afvoergolf door de rivier veel sneller verloopt dan over land, komt de terugstroom vanuit de Oude IJssel pas nadat de piek in de rivier gepasseerd is. Wanneer die terugstroom eerder zou optreden, wordt het effect van die terugstroom relevanter. Hiervoor zijn twee opties denkbaar. De eerste optie is dat de breslocatie daar is waar water een korte of snelle route naar de IJssel kan vinden. Om dit uit te sluiten zou een bres bij bijvoorbeeld Dornick of net benedenstrooms van Rees gesimuleerd moeten worden, een locatie dicht bij de grens met Nederland.

Een andere mogelijkheid is dat de IJsseldijk breekt door belasting vanuit de binnenzijde. In dat geval kan er mogelijk sneller en meer water van het overstroomd gebied naar de IJssel stromen. Echter, wanneer de IJsselwaterstanden hoog zijn, is de kans daarop klein en zal er juist water de dijkkring binnenstromen. . Wanneer de IJsselwaterstanden laag zijn, leidt dit extra water waarschijnlijk niet tot een extremere IJsselafvoer dan in de simulaties waargenomen. In de huidige berekeningen zijn geen extreme waterstanden tegen de binnendijkse kant van de IJsseldijken geobserveerd en was de waterstand buitendijks altijd hoger dan binnendijks. Mogelijk ontstaan die wel bij andere breslocaties. Om dit uit te sluiten zou een bres bij Spijk gesimuleerd kunnen worden.

4.3 Verhoogde afvoer Oude IJssel

Wanneer er sprake is van een (extrem) hoogwater op de Rijn is het mogelijk dat de basisafvoer op de Oude IJssel ook verhoogd is. In de doorgerkende scenario's is echter uitgegaan van een constante basisafvoer van 10 m³/s ongeacht de afvoer op de Rijn. Uit de berekeningen is naar voren gekomen dat de maximale afvoercapaciteit van de Oude IJssel (nabij Doesburg) rond de 200 m³/s ligt. Wanneer de basisafvoer hoger zal liggen, neemt de netto afvoercapaciteit af en zal naar verwachting resulteren tot meer overstromingen in het westelijke deel van de dijkkring.

Om dit effect te illustreren wordt een voorbeeld gegeven aan de hand van de afvoer gebruikt voor scenario 3. Met een basisafvoer van 40 m³/s zal de overgebleven afvoercapaciteit nog zo'n 160 m³/s zijn. Voor scenario 3 zal dit betekenen dat er ongeveer 2.5x10⁷ m³ minder via de Oude IJssel afgevoerd kan worden. Dit is 14% minder dan met een basisafvoer van 10 m³/s. Echter, doordat de Oude IJssel een maximale afvoercapaciteit heeft zal in deze situatie niet zorgen voor een verhoging van de afvoerpiek op de IJssel. Wel zal deze maximale toestroom langer aanhouden. In de situatie zonder bres heeft de verhoogde basisafvoer van de Oude IJssel wel effect op de piekafvoer en waterstanden verder benedenstrooms op de IJssel.

5 Conclusies en aanbevelingen

Met deze studie is een eerste beeld verkregen van het mogelijke effect van negatieve systeemwerking bij een doorbraak nabij Bislich (Duitsland) op de waterstanden en afvoeren op de IJssel. Dit is gedaan door gebruik te maken van drie scenario's, waarin gevarieerd is met de afvoergolf en timing van de bresgroei.

5.1 Conclusies

Aan de hand van de onderzochte scenario's kan geconcludeerd worden dat ten gevolge van een doorbraak bij Bislich negatieve systeemwerking zal optreden, maar dat dit niet leidt tot meer extreme IJsselafoeren dan in een situatie zonder doorbraak. De dijkdoorbraak bij Bislich (en de daaruit resulterende afname van de Rijnafvoer) zorgen voor lagere piekafvoeren op de Rijntakken en dus ook op de IJssel. Het effect van de afvoerreducerende werking van de bres is dus groter dan de extra afvoer die via de Oude IJssel de IJssel bereikt. De effecten van positieve systeemwerking zijn dus groter dan die van negatieve systeemwerking.

Als de bresgroei bij Bislich start op het moment dat de piek van de afvoergolf op de Rijn bij Bislich passeert, dan komt de instroom van het water uit dijkkring 48 via de Oude IJssel in de IJssel lang nadat de piek van de afvoergolf door de IJssel is gepasseerd. De afvoergolf stroomt immers veel sneller door de rivier dan over land naar Doesburg. De toestroom via de Oude IJssel bereikt de IJssel pas 57 en 44 uur bij respectievelijk scenario 1 en 2, na het passeren van de piekafvoer van de hoogwatergolf door de rivier. Op dat moment zijn de waterstanden alweer aan het zakken. Het vertragende effect van de stroming door dijkkring 48 zorgt dus voor een meer gefaseerde toestroom van water naar de IJssel.

Het startmoment van bresgroei heeft effect op het totale volume dat de dijkkring binnenstroomt (dat neemt toe, wanneer de bres eerder optreedt) en de periode tussen de afvoerpiek in de IJssel en Oude IJssel. Als de bres eerder start met groeien wordt deze periode kleiner, wat in theorie kan zorgen voor een extreme afvoerpiek op de IJssel (scenario 3). Echter in scenario 3 zien we dat de afvoerpiek op de IJssel $210 \text{ m}^3/\text{s}$ lager is dan in scenario 2, doordat de bres meer water uit de Rijn trekt. Hierdoor leidt het samenvallen van de hoogwatergolf in de IJssel en verhoogde toestroom vanuit de Oude IJssel niet tot hogere waterstanden dan zonder doorbraak op zouden treden.

Verder is het niet te verwachten dat via overtopping van de IJsseldijken (traject 48-2) er water in de IJssel zal stromen. De maximale waterstanden aan de binnentoe van de dijk staan 1 a 2 meter onder de kruin van de dijk, onder het minst gunstigste scenario. Hierdoor zijn de enige routes voor het water om de dijkkring te verlaten de Oude IJssel en in mindere mate de afwateringskanalen De Liemers, Grenskanaal/Löwenberger Landwehr en Oude Rijn/Kandia.

In de drie onderzochte scenario's zorgt de bres nabij Bislich niet voor een netto toename in de maximale hydraulische belasting langs de IJsseldijken. Wel laat het zien dat de afvoer en waterstanden op de IJssel langer op een semi-hoog niveau zullen blijven om vervolgens weer geleidelijk te dalen. Dit kan de kans op falen door faalmechanismes waarbij de duur van hoogwater belangrijk is, zoals piping en macrostabiliteit, vergroten. Op dit moment wordt hier in het BOI nog geen rekening mee gehouden.

Deze studie laat zien dat met de gebruikte modelconfiguratie en scenario's er geen directe reden is om negatieve systeemwerking mee te nemen in de belasting die gebruikt wordt voor de beoordeling en het ontwerp van de IJsseldijken.

5.2 Aanbevelingen

5.2.1 Andere breslocaties

Voor nu blijkt dat het gebruikte D-HYDRO 1D2D-model nog niet betrouwbaar genoeg is om op andere locaties dan Bislich tot betrouwbare resultaten te komen. Het probleem wat hier aan ten grondslag ligt is de koppeling tussen het 1D- en 2D-model via de aangebrachte 1D2D-links (zie Bijlage A). Dit probleem is reeds besproken met en wordt opgepakt door de modelontwikkelaars binnen Deltares.

In deze studie is aangetoond dat wanneer de bresgroei op een eerder moment start, de periode tussen de hoogwaterpiek op de IJssel en extra toestroom vanuit de Oude IJssel kleiner wordt. Wanneer meer benedenstroomse breslocaties worden aangewezen is het mogelijk dat het water sneller bij de Oude IJssel is en dus terugstroomt in de IJssel. Dit kan zorgen voor andere inundatiepatronen en timing van toevoer naar de IJssel. Om een goed beeld te krijgen of de combinatie van locatie en timing effect kan hebben op de netto afvoer en waterstanden van de IJssel, en dus beoordeling en het ontwerp van de IJsseldijken, dienen de volgende aanvullende scenario's overwogen te worden, zie Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Mogelijke breslocaties.

Breslocatie	Terugkeer frequentie afvoergolf	Tijdstip start bresgroei
Dornick	1/10.000	Top afvoergolf
Dornick	1/10.000	Voor top afvoergolf (op afvoerniveau piek 1/1000 golf)
Spijk	1/10.000	Top afvoergolf
Spijk	1/10.000	Voor top afvoergolf (op afvoerniveau piek 1/1000 golf)

5.2.2 Verhoogde basisafvoer Oude IJssel

In de doorgerkende sommen had de Oude IJssel een basisafvoer van 10 m³/s. Echter tijdens hoogwater op de Rijn kan het zo zijn dat ook de afvoer op de Oude IJssel verhoogd is. Uit de berekeningen is naar voren gekomen dat de maximale afvoercapaciteit van de Oude IJssel rond de 200 m³/s ligt. Als de basisafvoer hoger is, neemt de netto afvoercapaciteit van de Oude IJssel af. Dit kan eventueel leiden tot meer overstromingen en hogere waterstanden binnen de dijkkring en voor een langere tijd verhoogde afvoer richting de IJssel.

5.2.3 Overstappen naar een doorontwikkeld model

Momenteel is ARCADIS in opdracht van WRIJ bezig met het doorontwikkelen van de in deze studie gebruikte modelschematisatie en werkt Deltares aan modelverbeteringen. Wanneer deze voldoende gevalideerd zijn, kunnen ook andere breslocaties worden uitgerekend. Een belangrijke voorwaarde is dat het eerder genoemde probleem met de 1D2D-links is opgelost, zodat op verschillende locaties juiste bresdebieten kunnen worden doorgerekend. Tijdens de doorontwikkeling door ARCADIS worden de volgende aanpassingen gedaan ten opzichte van het hier gebruikte model:

- Toevoegen van pompen en gemalen: In het in deze studie gebruikte model lozen de gemalen en stuwen onder vrij verval en is er geen maximaal debiet opgelegd. Het ontbreken van de pompen en gemalen kan leiden tot een onderschatting van de uitstroom vanuit de dijkkring.
- Toevoeging van meer *fixed weirs* en aanpassingen van onderdoorgangen waardoor het inundatiepatroon binnen de dijkkring realistischer gesimuleerd kan worden.
- Toevoeging van een nieuw rekengrid. Dit nieuwe grid zorgt voor snellere rekentijden en een optie om het model uit te breiden met een grid voor dijkkring 49. Dit zou er voor zorgen dat overschatting door aanwezigheid van de gesloten modelrand ten noorden van de Oude IJssel wordt verholpen.

6 Referenties

Anna Kusters en Karin de Bruijn: Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de Maas, 11203684-003-ZWS-0008, 22 september 2020

Mark Hegnauer, Robert Leander, Henk van den Brink en Jules Beersma: Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine Final report of GRADE-Rhine version 3.0 11205237-003-ZWS-0016, 2 February 2022, draft

Geert Prinsen, Rinske Hutten, Eskader Gebremedhin: Update D-HYDRO model dijkkring 48, 11207210-002-ZWS-0004, 24 januari 2022

Geert Prinsen, Rinske Hutten, Govert Verhoeven: Modellerings dijkkring 48 met D-HYDRO. Deltares rapport 11203514-002-ZWS-0002, februari 2020

Verheij, H. (2003). Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM. WL Delft Hydraulics.

Waterveiligheidsportaal, geraadpleegd op 25-01-2022: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/norm>

A Beoogde extra breslocaties

Gedurende dit onderzoek is gebleken dat het gebruikte model niet tot betrouwbare resultaten kan komen voor andere locaties dan Bislich. Dit probleem is met de D-HYDRO-1D2D modelontwikkelaars besproken en is terug te voeren op de 1D2D-links (groter dan 2D gridresolutie (>40m)) nabij de breslocatie. Prinsen *et al.* (2022) geven aan dat door deze lange links de debieten te laag kunnen uitvallen wanneer het D-HYDRO model met default-instelling wordt gedraaid. De ontwikkelaars hebben extra opties toegevoegd in de MDU-file om debieten in de correcte orde van grootte te krijgen. Deze staan beschreven in Prinsen *et al.* (2022). Echter, deze aanpassingen bleken niet voldoende te zijn om ook tot consistente resultaten te komen voor de andere locaties.

Tijdens deze studie zijn voor de locaties Dornick en Spijk alle randvoorwaarden afgeleid en ook sommen gedraaid om het effect van de breslocatie te onderzoeken. Echter de berekende bresdebieten bleken bij nadere analyse niet consistent en betrouwbaar te zijn. Al met een kleine verschuiving van enkele honderden meters langs de kering, verschilde het bresdebiet met enkele honderden kubieke meters per seconde. Na overleg met de ontwikkelaars is toen besloten om deze resultaten niet mee te nemen in het huidige onderzoek. De sommen voor locatie Bislich zijn echter in een eerder stadium gevalideerd waardoor hiervoor genoeg vertrouwen is in betrouwbare resultaten.

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