

## Verdieping gebiedskennis grensoverschrijdende dijkringen 42 en 48



## Verdieping gebiedskennis grensoverschrijdende dijkringen 42 en 48

### Auteur(s)

Tjitske Geertsema

Rita Lammersen

## Verdieping gebiedskennis grensoverschrijdende dijkringen 42 en 48

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer ir. D.F. Kroekenstoel
<b>Referenties</b>	SITO-PS Transnationale Samenwerking
<b>Trefwoorden</b>	Rijn, overstromingen, traject Wesel-Lobith, dijkkring 42 en 48

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	29-07-20244
<b>Projectnummer</b>	11208037-005
<b>Document ID</b>	11208037-005-ZWS-0002
<b>Pagina's</b>	93
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Tjitske Geertsema	
	Rita Lammersen	

# Samenvatting

Na afloop van het project over de overstromingsrisico's van de grensoverschrijdende dijkringen (Maaskant et al., 2019) zijn door HKV (Maaskant, 2020) in overleg met DGWB, RWS, WSRL, WRIJ en provincie Gelderland een aantal vragen geformuleerd, waaronder de volgende:

- 1 Bij welke afvoer speelt overtopping ("ventielwerking") aan beide zijden van de Rijn?
- 2 Wat zijn bij verschillende waterstanden en Rijnafvoeren, de (verschillende) overstromingspatronen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen overloop en overloop gevolgd door bres?
- 3 Gegeven de verschillende overstromingspatronen, kan worden aangegeven wat de verwachte voorspel- en aankomsttijden in Nederland zijn?
- 4 Welk effect heeft dijkverhoging in Duitsland (tussen Wesel en Lobith) voor Nederland op de werklijn in Nederland?
- 5 Hoe verandert de invloed van ventielwerking in de tijd volgens de verschillende klimaatscenario's?

Om deze vragen te beantwoorden is het hydraulische SOBEK3-model van GRADE Rijn gebruikt. Dit model begint in Andernach, loopt door tot ver in de Nederlandse Rijntakken, en omvat niet alleen de rivier maar ook de binnendijkse overstroombare gebieden. De berekeningen zijn uitgevoerd gebruikmakend van zeer extreme hoogwatergolven (20.000 - 30.000 m<sup>3</sup>/s) bij Andernach die afkomstig zijn uit eerdere berekeningen met GRADE of daarvan afgeleid zijn. Uit eerder onderzoek (Geertsema et al., 2022) was gebleken dat de dijken op het traject van Wesel tot Lobith overstromen bij dergelijk extreme afvoergolven met terugkeertijden van 30.000 jaar tot meer dan 100.000 jaar. Voor deze extreme gebeurtenissen zijn de effecten van dijkdoorbraken en dijkverhogingen tussen Wesel en Lobith op de afvoeren in de rivieren en de overstroming van binnendijks gebied bestudeerd.

Daarbij zijn vier verschillende dijkdoorbraakscenario's bestudeerd: met dijkdoorbraken naar zowel dijkkring 42 als 48 (1 bres per dijkkring), zonder dijkdoorbraak naar dijkkring 48, zonder dijkdoorbraak naar dijkkring 42 en zonder dijkdoorbraken naar zowel dijkkring 42 als 48. Daarnaast zijn vijf verschillende dijkverhogingsscenario's bestudeerd: geen dijkverhoging, 0.5 m, 0.7 m en 1 m dijkverhoging, en oneindig hoge dijken. Deze dijkverhogingsscenario's zijn met dijkdoorbraken naar dijkringen 42 als 48 en zonder dijkdoorbraken naar dijkringen 42 als 48 doorgerekend. Daarnaast is ook gekeken naar het effect van klimaatverandering, waarbij gebruik is gemaakt van de KNMI 2014 klimaatscenario's.

Bij een waterstand boven de 24,5 m+NAP bij Wesel overstromen de dijken naar dijkringen 42 en 48. Deze waterstand wordt overschreden bij een afvoergolf van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Bij hogere afvoerpieken is het overstromingspatroon groter en ontstaan de overstromingen eerder. Voor de doorgerekende afvoerpieken ontstaan de overstromingen tussen de 13.5 en 15.5 dagen na de start van de modelberekening, wat gelijk staat aan -0,5 tot 0,4 dagen na de afvoerpiek in Andernach.

Bij de waterstand van 24,1 m+NAP bij Wesel overstroomt de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 en overstroomt ook dijkkring 42 doordat water uit de overstromingsvlakte binnendijks naar dijkkring 42 stroomt. Deze manier van overstromen is in dijkkring 42 dominantanter dan de overtopping van dijken. In dijkkring 48 is de overtopping van dijken de dominante factor van overstromingen. In deze dijkkring komt er namelijk geen water binnendijks vanuit een bovenstroomse overstromingsvlakte. Bij afvoerpieken van 27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en hoger vinden er ook overstromingen plaats in dijkkring 49, doordat water vanuit de overstromingsvlakte van dijkkring 48 naar dijkkring 49 stroomt. Dijkdoorbraken spelen zowel in dijkkring 42 als dijkkring 48 een minder grote rol bij de overstromingen dan overtopping van dijken.

Als de dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 niet doorbreken (of enkel dijkdoorbraaklocatie 9 niet), is de oppervlakte van de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 kleiner en in dijkkring 48 groter. In dat geval blijft er meer water en dus meer afvoer in de Rijn benedenstrooms van dijkdoorbraaklocatie 9. De overstromingsvlakte in dijkkring 42 is kleiner, omdat er geen water door dijkdoorbraaklocatie 9 naar dijkkring 42 stroomt. De overstromingsvlakte in dijkkring 48 is groter, omdat de hogere afvoer in de Rijn resulteert in meer dijkoverstromingen naar dijkkring 48. De piekafvoer bij Lobith is maximaal 200 m<sup>3</sup>/s groter als er geen dijkdoorbraken optreden ten opzichte van de situatie dat dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 wel doorbreken.

Als de dijken worden verhoogd tussen Wesel en Lobith, vindt er minder uitwisseling tussen de binnendijkse overstromingsvlakte en de Rijn plaats. Het gevolg is dat de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 groter en in dijkkring 48 kleiner wordt. De overstromingsvlakte in dijkkring 42 wordt groter doordat hogere dijken ervoor zorgen dat er minder water bovenstrooms van Wesel vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 terugstroomt naar de Rijn. Deze terugstroomlocaties zijn essentieel voor de afvoer in de Rijn tussen Xanten en Lobith vanaf 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Deze terugstroomlocaties liggen nabij Xanten en 1 kilometer bovenstrooms van dijkdoorbraak 9. De overstromingsvlakte van dijkkring 48 is kleiner, omdat de hogere dijken resulteren in minder dijkoverstromingen naar dijkkring 48 en in een hogere afvoer bij Lobith. Hogere dijken resulteren tevens tot meer overtopping van de Nederlandse dijken nabij Westervoort.

Deze studie heeft laten zien dat de piekafvoer bij Lobith voor de hoogste doorgerekende afvoergolf (30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) toeneemt met 1700, 2400, 3500 en 5600 m<sup>3</sup>/s bij dijkverhogingen van respectievelijk 50 cm, 70 cm en 100 cm en oneindig hoge dijken. De afvoergolven in Lobith lijken bij verhoogde dijken daarnaast meer op de afvoergolven bij Wesel omdat er minder aftopping plaatsvindt.

De berekende afvoergolven zijn zeer extreem met terugkeertijden van 30.000 jaar en meer. De kans van voorkomen wordt echter groter door de verwachte klimaatverandering. De klimaatscenario's van KNMI 2014 voorspellen dat de onderzochte afvoergolven in 2050 een overschrijdingsfrequentie hebben tussen 1/2.000 en kleiner dan 1/100.000 per jaar rekening houdend met modelonzekerheden uit GRADE. Voor 2085 is de verwachting dat de onderzochte afvoergolven een overschrijdingsfrequentie hebben tussen 1/500 en 1/5.000 per jaar rekening houdend met modelonzekerheden uit GRADE. De kans van voorkomen op deze extreme gebeurtenissen neemt volgens de scenario's dus significant toe in de toekomst.

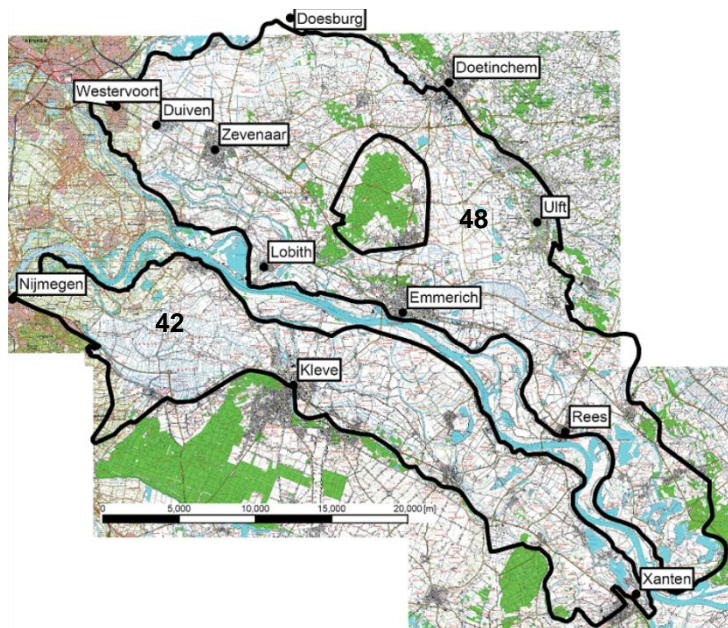
# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Methode</b>	<b>10</b>
2.1	Keuze afvoergolven	10
2.2	Dijkdoorbraakscenario's	14
2.3	Dijkverhogingsscenario's	15
2.4	Analyse	16
2.5	Klimaatscenario's	17
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>18</b>
3.1	Overstromingspatronen	18
3.1.1	Resultaten met het oorspronkelijke model uit GRADE (Becker, 2020)	18
3.1.2	Resultaten dijkdoorbraakscenario's en dijkhoogtescenario's	21
3.2	Langsprofielen	24
3.2.1	Maximale afvoeren	24
3.2.2	Verschillen van piekwaterstanden	28
3.3	Maximale afvoeren en afvoergolven bij uitgavepunt Xanten en bij Lobith	29
3.4	Afvoer door dijkdoorbraken	32
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>39</b>
4.1	Algemene conclusies: systeemwerking	39
4.2	Bij welke afvoer speelt overtopping ("ventielwerking") aan beide zijden van de Rijn?	40
4.3	Wat zijn bij verschillende waterstanden en Rijnafoeren de (verschillende) overstromingspatronen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen overloop en overloop gevolgd door bres?	41
4.4	Gegeven de verschillende overstromingspatronen kan worden aangegeven, wat de verwachte voorspel- en aankomsttijden in Nederland zijn?	42
4.5	Welk effect heeft dijkverhoging in Duitsland (tussen Wesel en Lobith) voor Nederland op de werklijn in Nederland?	43
4.6	Hoe verandert de invloed van ventielwerking in de tijd volgens de verschillende klimaatscenario's?	44
<b>5</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>45</b>
5.1	Schematisatie van dijkdoorbraaklocaties	45
5.2	Onzekerheidsanalyse respectievelijk schematisatie van scenario's voor noodmaatregelen	45
5.3	Onderzochte dijkverhogingsscenario's	46
5.4	Actualisering afvoerstatistiek	46

	<b>Referenties</b>	<b>47</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Schematisatie dijkverhogingsscenario's</b>	<b>49</b>
<b>B</b>	<b>Filmpjes overstromingspatronen</b>	<b>51</b>
<b>C</b>	<b>Afvoergolven Xanten en Lobith</b>	<b>52</b>
C.1	Dijkdoorbraakscenario's	52
C.2	Dijkverhogingsscenario zonder dijkdoorbraken	54
C.3	Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken	56
<b>D</b>	<b>Langsprofielen van afvoer</b>	<b>58</b>
D.1	Dijkdoorbraakscenario's	58
D.2	Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken	59
D.3	Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken	60
<b>E</b>	<b>Langsprofielen van waterstanden en waterstandsverschillen</b>	<b>61</b>
E.1	Dijkdoorbraakscenario's	61
E.2	Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken	63
E.3	Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken	65
<b>F</b>	<b>Afvoeren door dijkdoorbraaklocatie 8 en 9</b>	<b>67</b>
F.1	Dijkdoorbraakscenario's	67
F.2	Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken	69
F.3	Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken	71
<b>G</b>	<b>Overstromingskaarten dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging</b>	<b>73</b>
<b>H</b>	<b>Overstromingskaarten dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken</b>	<b>79</b>
<b>I</b>	<b>Overstromingskaarten dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken</b>	<b>85</b>
<b>J</b>	<b>Overzicht belangrijke bevindingen uit overstromingskaarten in bijlagen G t/m I</b>	<b>91</b>

# 1 Inleiding

In het gebied waar de Rijn vanuit Duitsland Nederland binnenstroomt, liggen aan de rechter- en linkeroever twee grensoverschrijdende dijkkringen. De Nederlandse naamgeving voor deze dijkkringen zijn dijkkring 42 en 48 aan respectievelijk de linkeroever en rechteroever in benedenstroomse richting (Figuur 1-1). Door het grensoverschrijdende karakter van beide dijkkringen kunnen een dijkvertopping of dijkdoorbraken in Duitsland potentieel leiden tot overstromingen in Nederland en andersom. Hydraulische berekeningen van de Duitse Niederrhein vanaf Andernach, die gedaan zijn in het GRADE-project (Geertsema et al., 2022; Hegnauer et al., 2022), laten zien dat de hydraulische werking van dit gebied essentieel is voor de hoeveelheid water die onder extreme hoogwateromstandigheden Nederland zowel buitendijks (in de rivier tussen de dijken) als ook binnendijks binnenstroomt.



Figuur 1-1: Ligging van de dijkkringen 42 en 48 (Maaskant et al. 2019)

Na afloop van het project over de overstromingsrisico's van de grensoverschrijdende dijkkringen (Maaskant et al., 2019) zijn door HKV (Maaskant, 2020) in overleg met DGWB, RWS, WSRL, WRIJ en provincie Gelderland een aantal vragen geformuleerd, waaronder de volgende vragen:

- 1 Bij welke afvoer speelt overtopping (“ventielwerking”) aan beide zijden van de Rijn?
- 2 Wat zijn bij verschillende waterstanden en Rijnafvoeren de (verschillende) overstromingspatronen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen overloop en overloop gevolgd door bres?
- 3 Gegeven de verschillende overstromingspatronen, kan worden aangegeven wat de verwachte voorspel- en aankomsttijden in Nederland zijn?
- 4 Welk effect heeft dijkverhoging in Duitsland (tussen Wesel en Lobith) op de werklijn van Lobith in Nederland?
- 5 Hoe verandert de invloed van ventielwerking in de tijd volgens de verschillende klimaatscenario's?



Het doel van dit onderzoek is om beter inzicht te krijgen in de werking van het riviersysteem van de Rijn in het Duits-Nederlandse grensgebied, waaronder overstromingen bij dijkdoorbraken en 'overtopping' van waterkeringen tussen Wesel en Lobith.

### **Leeswijzer**

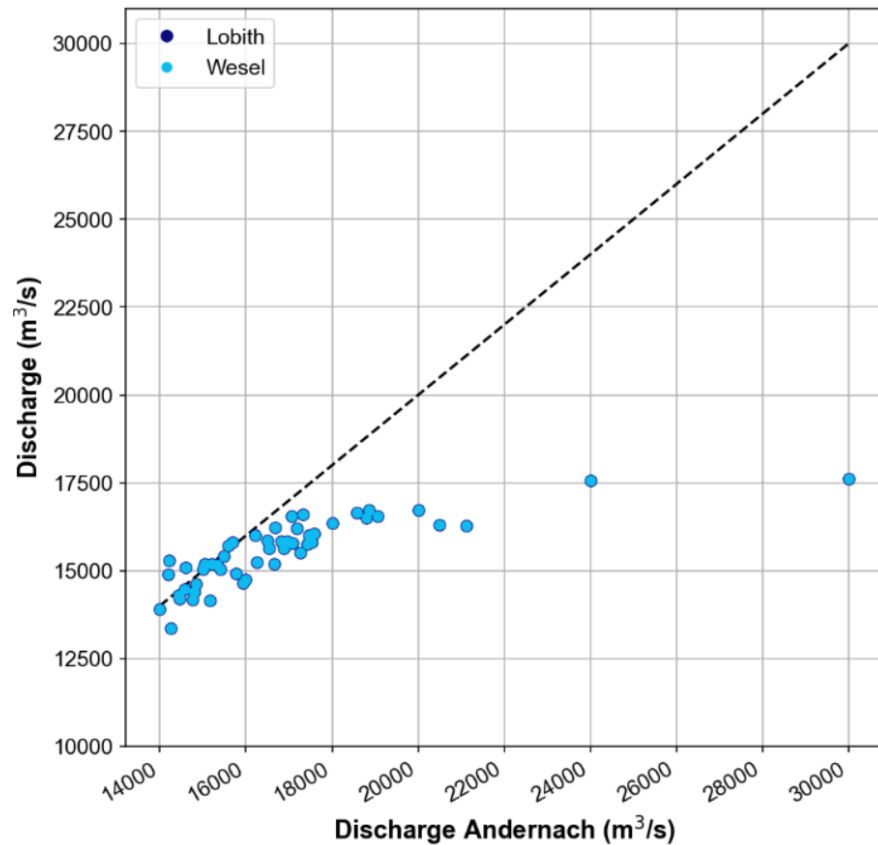
Hoofdstuk 2 beschrijft de gebruikte methode om tot de antwoorden op de bovenstaande vragen te komen. Hoofdstuk 3 geeft de belangrijkste resultaten weer. Alle resultaten zijn daarnaast opgenomen in de bijlages B t/m J. In Hoofdstuk 4 worden vervolgens de onderzoeksvragen beantwoord, conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven.

## 2 Methode

Deltares kan de geformuleerde vragen deels beantwoorden met eerder uitgevoerde berekeningen van het gekoppelde 1D2D SOBEK3-model van de Rijn in het project GRADE Rijn. Hierbij is een 1D model van de rivier tussen de waterkeringen gekoppeld aan een 2D model van het binnendijkse gebied, dat potentieel kan overstromen. De koppeling tussen beide modelonderdelen vindt plaats op de lijn van de waterkeringen. Deze zijn voor het Duitse deel beschreven voor de situatie die gepland is voor het jaar 2025, en voor het Nederlandse deel voor de situatie rond 2018. Nadere informatie over dit model is te vinden in Becker (2020). Om tot toegespitste antwoorden te komen op de vragen, heeft Deltares de onderstaande aanpak gebruikt, waarbij aanvullende berekeningen zijn uitgevoerd.

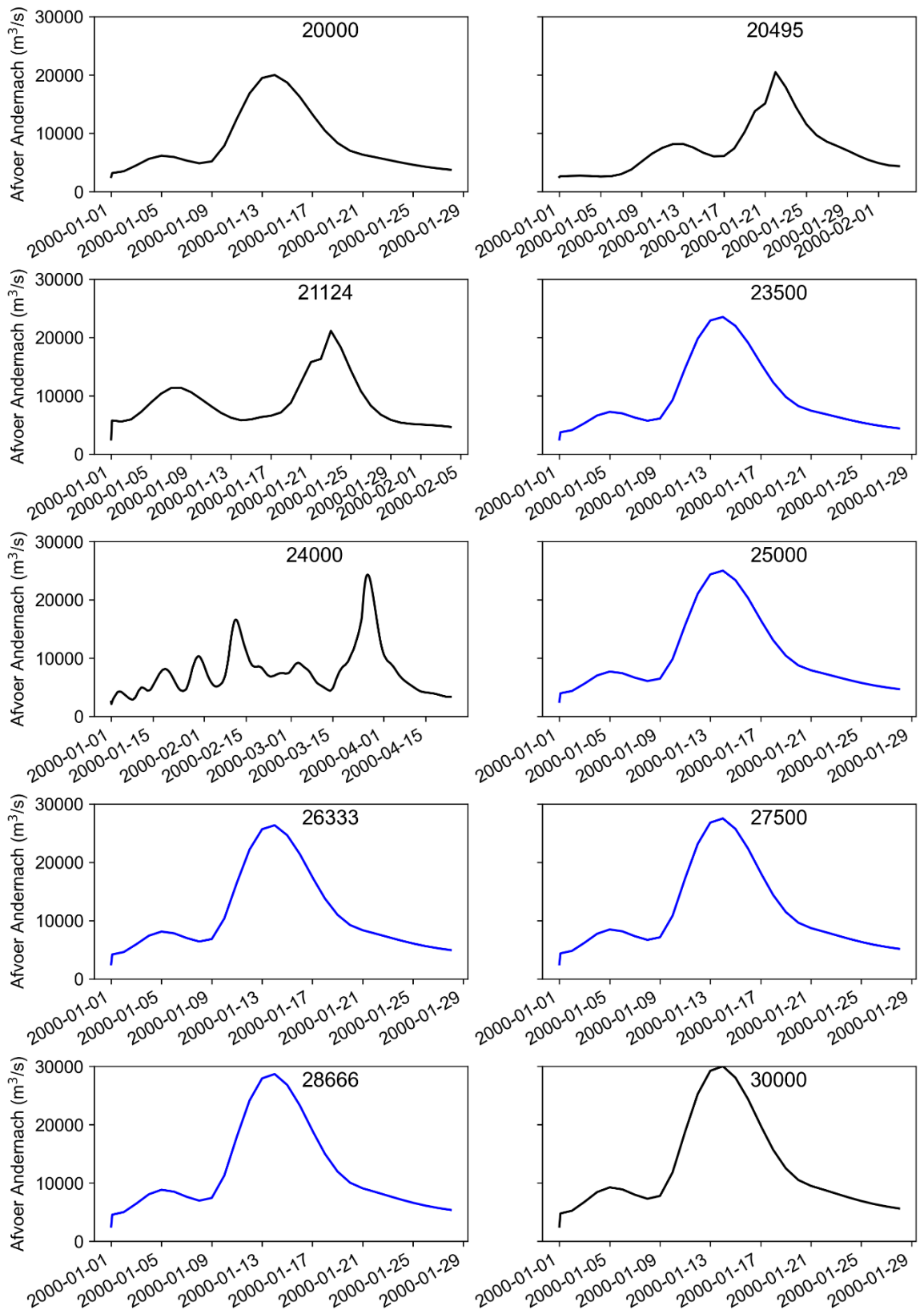
### 2.1 Keuze afvoergolven

Onderzoek dat uitgevoerd is in kader van de GRADE-onzekerheidsanalyse (OZA) van de Rijn (Geertsema et al., 2022) laat zien dat het meeste effect van overstromingen in Duitsland op de piekafvoeren van de Rijn optreedt bij afvoergolven met piekafvoeren van 20.000 tot 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (zie Figuur 2-1). Voor deze onzekerheidsanalyse waren alleen vijf afvoergolven doorgerekend, met piekafvoeren tussen 20.000 en 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (zie Figuur 2-1 en zwarte golven in Figuur 2-2). Hieraan zijn vijf afvoergolven met piekafvoeren in het bereik van 20.000 tot 30.000 m<sup>3</sup>/s toegevoegd, waarbij de nadruk ligt op de afvoeren tussen de 24.000 en 30.000 m<sup>3</sup>/s. De 'nieuwe' afvoergolven zijn gegenereerd door een synthetische golf uit het GRADE-project met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach op te schalen (blauwe golven in Figuur 2-2). De afvoeren zijn enkel opgeschaald bij Andernach, dus de afvoeren van de zijrivieren zijn gelijk gebleven. Met deze gegenereerde afvoergolven kunnen we gedetailleerder onderzoeken welke afvoergolven leiden tot overtopping van de primaire waterkeringen in dijkkringen 42 en 48 en wat de effecten van dijkverhogingen zijn (vraag 1 t/m 4).



Figuur 2-1: Berekende maximale afvoer bij Wesel en Lobith als gevolg van een opgelegde afvoer bij Andernach uit de onzekerheidsanalyse GRADE Rijn (Geertsema et al., 2022). Bij de stad Wesel stroomt veel water via binnendijks gebied, waardoor de maximale afvoer die tussen de dijken bij Wesel langsloopt nagenoeg gelijk is aan die bij Lobith en de lichtblauwe en donkerblauwe bolletjes op elkaar liggen. In dit onderzoek hebben we daarom Xanten gekozen als uitvoerlocatie (zie paragraaf 2.4 voor meer informatie).

Figuur 2-2 laat het verloop van de afvoergolven bij Andernach zien. Naast de verschillende hoogtes van de (piek-)afvoeren zijn ook de golfvormen kenmerkend. Hierbij valt op dat de golfvormen van de golven met de piekafvoeren van 20.000, 23.500, 25.000, 26.333, 27.500, 28.666 en 30.000 m<sup>3</sup>/s nagenoeg hetzelfde zijn. Dit is te wijten aan het feit dat al deze golven afgeleid zijn van de golf met 20.000 m<sup>3</sup>/s. Daarnaast heeft de afvoergolf met een piekafvoer van 24.000 m<sup>3</sup>/s een langere duur, 4 maanden in plaats van ongeveer een maand voor de andere golven.



Figuur 2-2: Onderzochte afvoergolven bij Andermach. De zwarte afvoergolven illustreren de grootste afvoergolven gebruikt bij het onzekerheidsonderzoek GRADE Rijn (Geertsema et al., 2022). De blauwe afvoergolven zijn toegevoegd aan deze afvoergolven ten behoeve van deze studie. Zij zijn opgeschaald op basis van de afvoergolf met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andermach.

De gekozen gesimuleerde afvoeren bij Andernach resulteren in waterstanden en afvoeren bij Lobith en Xanten (Tabel 1). Voor deze studie is gekozen om Xanten in plaats van Wesel als observatiepunt te gebruiken. Dit omdat niet al het water in de Rijn langs Wesel stroomt, maar ook veel water door het binnendijkse gebied aan de overkant van Wesel (Figuur 3-1). Dit water stroomt grotendeels net bovenstrooms van Xanten via Bislicher Insel weer terug naar de rivier. Xanten geeft daarom een beter beeld van de totale afvoer die aan de bovengrens van het riviertraject langs dijkkring 42 en dijkkring 48 loopt.

Hier valt op dat een afvoergolf met een hogere afvoerpiek (bijvoorbeeld 20.495 en 21.124 m<sup>3</sup>/s) bij Andernach kan leiden tot een lagere afvoerpiek (bijvoorbeeld respectievelijk 16.270 en 16.335 m<sup>3</sup>/s) bij Xanten. Blijkbaar worden de 2 afvoergolven, die in Andernach een hogere piekafvoer hebben dan de “kleine” golf met de piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s, door overstromingen in het gebied tussen Andernach en Wesel zo sterk gedempt, dat zij bij Wesel een lagere afvoer respectievelijk waterstand veroorzaken dan de “kleine” golf. Dit omdat de “kleine” golf tot minder dijkovertopping en dijkdoorbraken leidt in het gebied tussen Duisburg en Wesel, waar de dijken hoger zijn dan in het stuk nog verder bovenstrooms.

Tabel 1: Overzicht van de piekwaterstanden en piekafvoeren bij Xanten en Lobith en de terugkeertijden voor de piekafvoer bij Lobith voor de tien gesimuleerde golven bij Andernach. De waterstanden zijn afgerond in deze tabel op 5 cm en de afvoeren op 5 m<sup>3</sup>/s. Voor deze simulaties is het model SOBEK3 GRADE Rijn (Becker, 2020) niet aangepast.

Piekafvoer Andernach (m <sup>3</sup> /s)	Piekwaterstand Xanten (m+NAP)	Piekafvoer Xanten (m <sup>3</sup> /s)	Piekwaterstand Lobith (m+NAP)	Piekafvoer Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Terugkeertijden (jaar) <sup>1)</sup>	
					Zonder onzekerheid Grade	Met onzekerheid GRADE
20.000	24,20	16.625	18,05	16.825	>100.000	~50.000
20.495	24,05	16.270	17,90	16.435	>100.000	~30.000
21.124	24,05	16.335	17,90	16.400	>100.000	~30.000
23.500	24,85	17.325	18,25	17.725	>100.000	>100.000
24.000	25,00	17.435	18,25	17.675	>100.000	>100.000
25.000	25,05	17.820	18,25	17.785	>100.000	>100.000
26.333	25,25	18.115	18,25	17.815	>100.000	>100.000
27.000	25,35	18.225	18,30	17.840	>100.000	>100.000
28.666	25,40	18.415	18,35	17.860	>100.000	>100.000
30.000	25,60	18.270	18,40	17.800	>100.000	>100.000
1) Hegnauer et al., 2022						

Op basis van de modellering met het (basis-)model (Becker, 2020), zoals het gebruikt is voor de berekeningen van de piekafvoeren bij Lobith in Hegnauer et al., (2022) en Geertsema et al., (2022), zijn de herhalingstijden geschat die bij deze piekafvoeren horen (Tabel 1). Voor het huidige klimaat gaat het om herhalingstijden die voor alle piekafvoeren hoger dan 100.000 jaar liggen, mits er geen rekening wordt gehouden met de onzekerheden van het modelinstrumentarium GRADE. Als de onzekerheden van GRADE wel worden meegenomen krijgen de 3 lagere golven een herhalingstijd van 50.000 of 30.000 jaar toegekend. Het gaat dus voor alle gevallen om heel zeldzame gebeurtenissen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de berekende piekafvoeren bij Lobith in het heel vlakke bereik van de afvoerstatistiek liggen, waar een relatief klein verschil in piekafvoer een grote verandering van herhalingstijd veroorzaakt. De toekenning van een herhalingstijd aan een piekafvoer is daarom heel gevoelig.

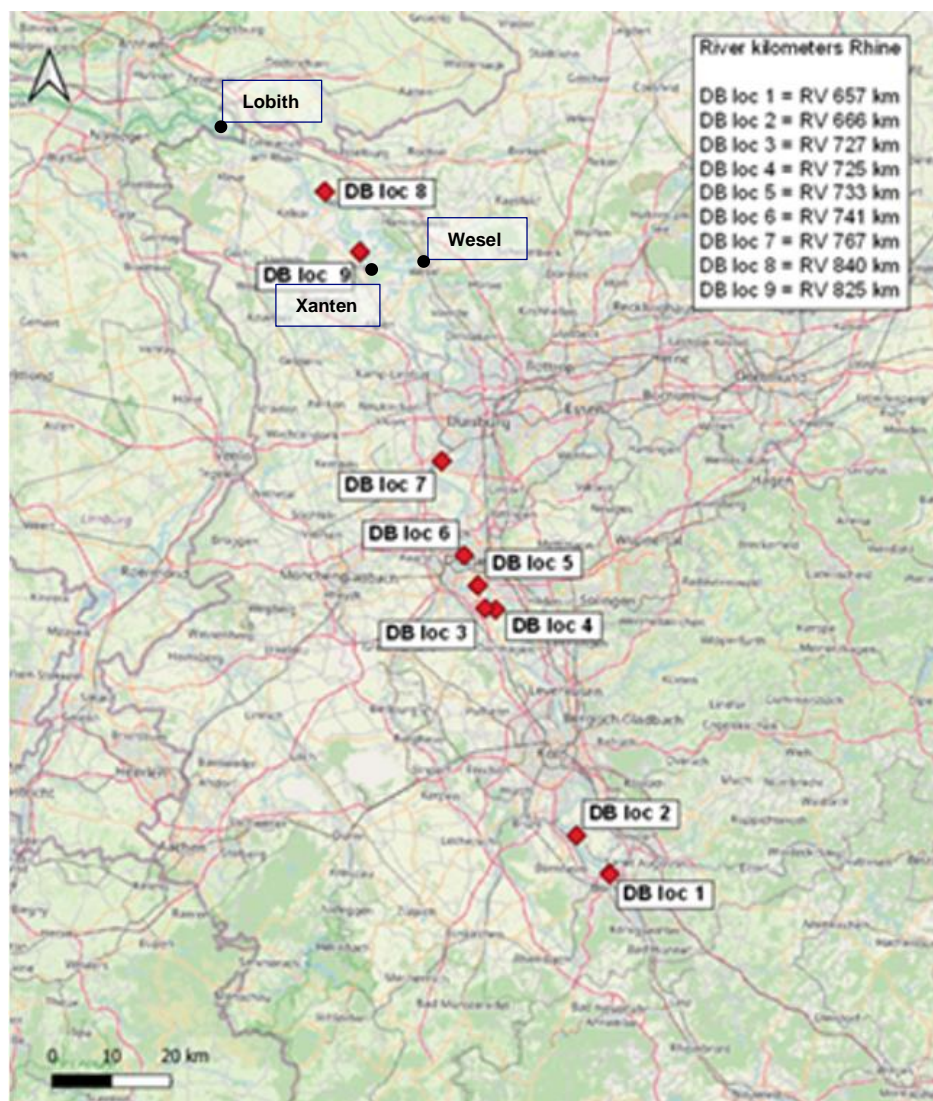
## 2.2 Dijkdoorbraakscenario's

Met behulp van de tien afvoergolven bij Andernach zijn verschillende dijkdoorbraakscenario's doorgerekend. In het huidige model van GRADE Rijn 3.0 zitten 9 dijkdoorbraaklocaties waarvan twee op het traject tussen Wesel en Lobith, een aan de linkerkant en een aan de rechterkant van de rivier (zie Figuur 2-3 en Becker, 2020). Deze dijkdoorbraaklocaties zijn aangeduid als potentieel kwetsbare locaties van de dijk, waarbij wordt aangenomen dat de dijk breekt op het moment dat het water de kruin van de dijk bereikt. Dit betekent dat als de waterstand gelijk komt met de kruin van de dijk, er een dijkdoorbraak wordt gesimuleerd in het model. Dijkdoorbraaklocatie 8 in de buurt van Rees breekt door naar het noorden (ook wel rechts genoemd) naar dijkkring 48 (DR48), waarbij de kruin van de dijk zakt met 3.5 m tot het maaiveld. Locatie 9 in de buurt van Bislich breekt door naar het zuiden (ook wel links genoemd) naar dijkkring 42 (DR42), waarbij de kruin van de dijk zakt met 4 m tot het maaiveld. Bij de simulatie van de doorbraak neemt ook de breedte van de doorbraak exponentieel toe naar 200 m in 30 uur (voor meer informatie zie Becker, 2020). In alle scenario's blijft op de locaties zonder dijkdoorbraak de dijk op dezelfde hoogte, wat betekent dat de dijken kunnen overlopen maar niet kunnen breken. Andere waterkeringen, zoals keermuren, hoge gronden en mobiele waterkeringen, lopen net als de locaties zonder dijkdoorbraak over, maar breken niet.

Voor de dijkdoorbraakscenario's hebben we alle gedefinieerde golven van paragraaf 2.1 gerund voor de 4 scenario's in Tabel 2. In totaal zijn er 40 sommen (10 afvoergolven maal 4 scenario's) gedraaid voor de dijkdoorbraakscenario's. Deze sommen beantwoorden specifiek vragen 1 en 2 uit de inleiding en deels vraag 3.

Tabel 2: Overzicht van de dijkdoorbraakscenario's

Scenario	Toelichting	Doorbraaklocatie
2a	doorbraak links (DR42) en rechts (DR48)	1-7 actief, 8 en 9 actief
2b	doorbraak links (DR42)	1-7 actief, 8 niet actief en 9 actief
2c	doorbraak rechts (DR48)	1-7 actief, 8 actief en 9 niet actief
2d	zonder doorbraak voor DR42 en DR48	1-7 actief, 8 en 9 niet actief



Figuur 2-3: Kaart van de dijkdoorbraaklocaties in het GRADE-Rijn-model. In dit project focussen we op het gebied van Wesel tot Lobith, waarin dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 liggen (Becker, 2020).

## 2.3 Dijkverhogingsscenario's

Om vraag 4 uit de inleiding te beantwoorden hebben we verschillende dijkverhogingen gesimuleerd. We hebben de dijken en de keermuren op het traject tussen Wesel en Lobith verhoogd met respectievelijk 0,5, 0,7, 1 en 1000 meter ten opzichte van de huidige hoogte in het model (=geplande hoogte voor 2025). Bijlage A licht nader toe op welke dijktrajecten dijkverhoging wordt toegepast. De dijkverhoging van 1000 meter representeert oneindig hoge dijken.

Voor de dijkverhogingsscenario's worden alle gedefinieerde golven uit paragraaf 2.1 en de dijkdoorbraakscenario's 2a en 2d uit paragraaf 2.2 doorgerekend voor de 5 dijkverhogingen in Tabel 3. In totaal worden er 100 sommen (10 afvoergolven maal 2 dijkdoorbraakscenario's maal 5 dijkverhogingsscenario's) gedraaid in dit onderdeel van de studie.

Tabel 3: Overzicht van de dijkverhogingsscenario's

Scenario	Dijkverhogingsscenario		Doorbraaklocatie van scenario	
3a/2a	3a	Dijkverhoging van 50 cm	2a (Tabel 2)	1-9 actief
3b/2a	3b	Dijkverhoging van 70 cm	2a (Tabel 2)	1-9 actief
3c/2a	3c	Dijkverhoging van 100 cm	2a (Tabel 2)	1-9 actief
3d/2a	3d	Oneindig hoge dijken	2a (Tabel 2)	1-9 actief
3e/2a	3e	Zonder dijkverhoging	2a (Tabel 2)	1-9 actief
3a/2d	3a	Dijkverhoging van 50 cm	2d (Tabel 2)	1-7 actief, 8 en 9 niet actief
3b/2d	3b	Dijkverhoging van 70 cm	2d (Tabel 2)	1-7 actief, 8 en 9 niet actief
3c/2d	3c	Dijkverhoging van 100 cm	2d (Tabel 2)	1-7 actief, 8 en 9 niet actief
3d/2d	3d	Oneindig hoge dijken	2d (Tabel 2)	1-7 actief, 8 en 9 niet actief
3e/2d	3e	Zonder dijkverhoging	2 (Tabel 2)	1-7 actief, 8 en 9 niet actief

## 2.4 Analyse

Voor het beantwoorden van de vragen uit de inleiding concentreren wij ons op de volgende parameters:

- Overstromingspatronen
  - De grootste overstromingen vinden plaats aan het einde van de modelberekening op 28 dagen vanaf de start. We kiezen er daarom voor om dit tijdstip weer te geven als resultaat. Daarin gebruiken we ook een definitie van overstromen als de waterdiepte groter of gelijk is aan 2 cm. Deze drempelwaarde is namelijk de eerste uitvoerklasse in het uitvoerbestand.
    - de overstromingspatronen van de verschillende dijkdoorbraakscenario's met verschillende afvoergolven worden vergeleken in één figuur
    - de overstromingspatronen van de verschillende dijkverhogingsscenario's met verschillende afvoergolven worden vergeleken in één figuur, waarbij er een onderscheid wordt gemaakt tussen wel en geen dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith
    - Filmpjes en de beweging van de overstroming worden meegeleverd en bestudeerd in hoofdstuk 3 "Resultaten".
- Langsprofielen van de maximale waterstanden en afvoeren langs het traject van Wesel naar Lobith
- Afvoer bij Lobith en Xanten
  - Voor de afvoer bij Lobith wordt dezelfde locatie genomen als het meetpunt Lobith van Rijkswaterstaat.
  - Voor de afvoer bij Xanten is gekozen voor een observatiepunt benedenstrooms van Wesel op de rivierkilometer 820 (5,49 km benedenstrooms van de monding van de Lippe). De locatie van Wesel had aanvankelijk de voorkeur, maar aan de overkant van de stad Wesel stroomt er bij de extremere hoogwatergolven water door het binnendijkse gebied, zodat niet al het water in de Rijn langs dit observatiepunt loopt (zie Figuur 2-1). Dit water stroomt grotendeels net bovenstrooms van Xanten via Bislicher Insel weer terug naar de rivier. Xanten geeft daarom een beter beeld van de totale afvoer die aan de bovenzijde van het riviertraject langs dijkkring 42 en dijkkring 48 stroomt en is daarom gekozen als bovenstrooms observatiepunt.
- Afvoer bij dijkovertopping / door bres
- Koppeling aan werklijn met klimaatverandering KNMI 2014 voor 2050 en 2100



## 2.5 Klimaatscenario's

Om vraag 5 uit de inleiding te beantwoorden bestuderen we de werklijnen van de KNMI-klimaatscenario's uit 2014 (Sperna Weiland et al., 2015). Deze zijn ten behoeve van de implementatie van de werklijnen in het nationale watermodel in 2016 geactualiseerd. De onzekerheden die uit de modellering met het GRADE-instrumentarium komen, zijn in de werklijn opgenomen (Hegnauer, 2016). Hierdoor wijken de getallen die gebruikt zijn in deze studie (Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7) af van de gepubliceerde getallen door Sperna Weiland et al. (2015). Er is gekozen voor klimaatscenario's uit 2014, omdat deze tijdens het schrijven van dit rapport het meest recent waren.

## 3 Resultaten

In dit hoofdstuk laten we de belangrijkste resultaten zien om de vragen uit hoofdstuk 1, de inleiding, te beantwoorden. De overige resultaten hebben we weergegeven in bijlage B tot I.

### 3.1 Overstromingspatronen

#### 3.1.1 Resultaten met het oorspronkelijke model uit GRADE (Becker, 2020)

Om een eerste indruk te krijgen van de overstromingspatronen in dijkkring 42 en dijkkring 48 is er gekeken naar de afvoergolven met piekafvoeren van 25.000 en 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Hierbij is uitgegaan van de originele schematisatie, dus zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraken zodra de waterstand in de rivier de kruinhoogte bereikt. De afvoergolf met een piekafvoer bij Andernach van 25.000 m<sup>3</sup>/s resulteert in overstromingen in zowel de dijkkring 42 als dijkkring 48 (Figuur 3-1).

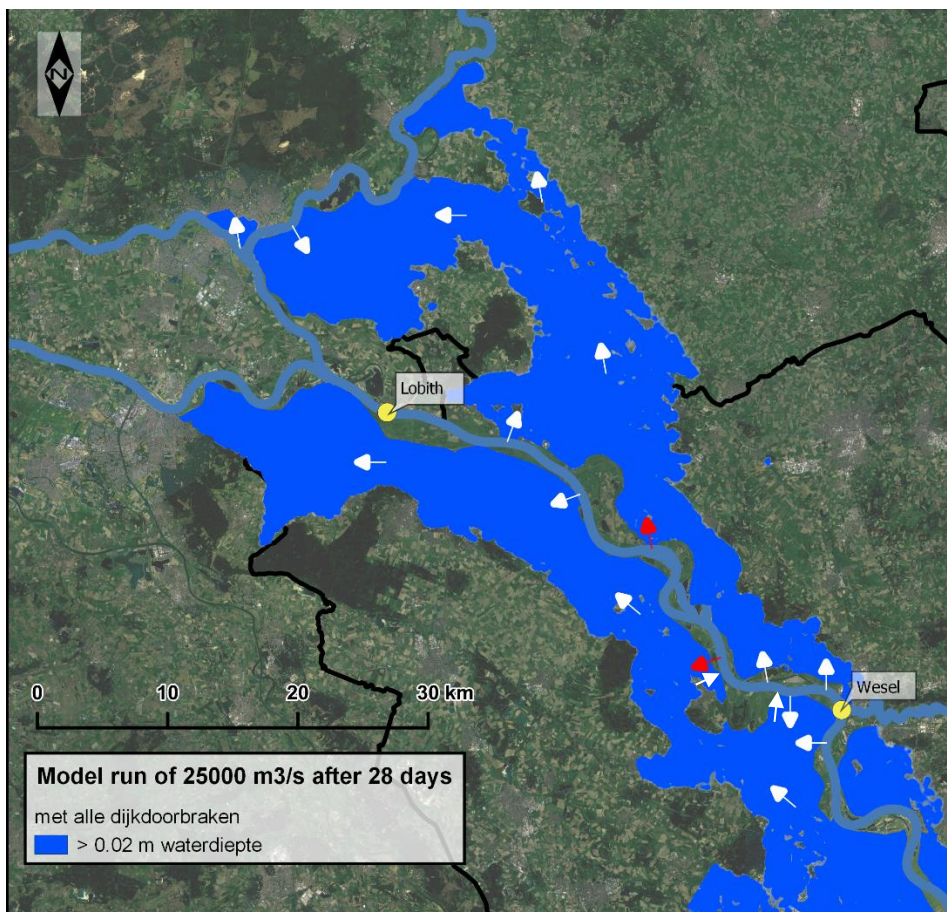
In dijkkring 48 ontstaan er overstromingen door de bres (DB8) en door het overstromen van de waterkeringen op verschillende plekken in Duitsland en bij de hoge grond net benedenstrooms van Wesel. Eerste overstromingen vinden plaats na 14,5 dag vanaf de start van de modelberekeningen. Het meeste water in de binnendijkse overstromingsvlakte beweegt parallel aan de Rijn via de Oude IJssel richting de IJssel of richting Westervoort. Daarnaast vindt er vanuit de rivier ook overtopping van de dijk bij Westervoort plaats net benedenstrooms van de splitsing van de Rijn en de IJssel na 14,5 dag. Het water van de dijk-overtopping bij Westervoort, samen met het water dat door dijk-overtopping en dijkdoorbraak in het Duitse deel van dijkkring 48 de dijkkring binnenstroomt, hoopt zich op in het gebied van Westervoort, Zevenaar en Duiven.

In dijkkring 42 ontstaan overstromingen in eerste instantie door water dat binnendijks vanuit de overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 stroomt naar dijkkring 42. Hier zijn de bijdragen van overtopping in Duitsland en stroming door de bres DB9.

In de dijkringen 42 en 48 vindt in de meeste gevallen overtopping plaats bij dijken<sup>1</sup>. Enkel bij Emmerich wordt overtopping gesimuleerd bij muren en mobiele keringen. Het verloop van de overstromingen is te zien in de meegeleverde filmpjes (bijlage B).

---

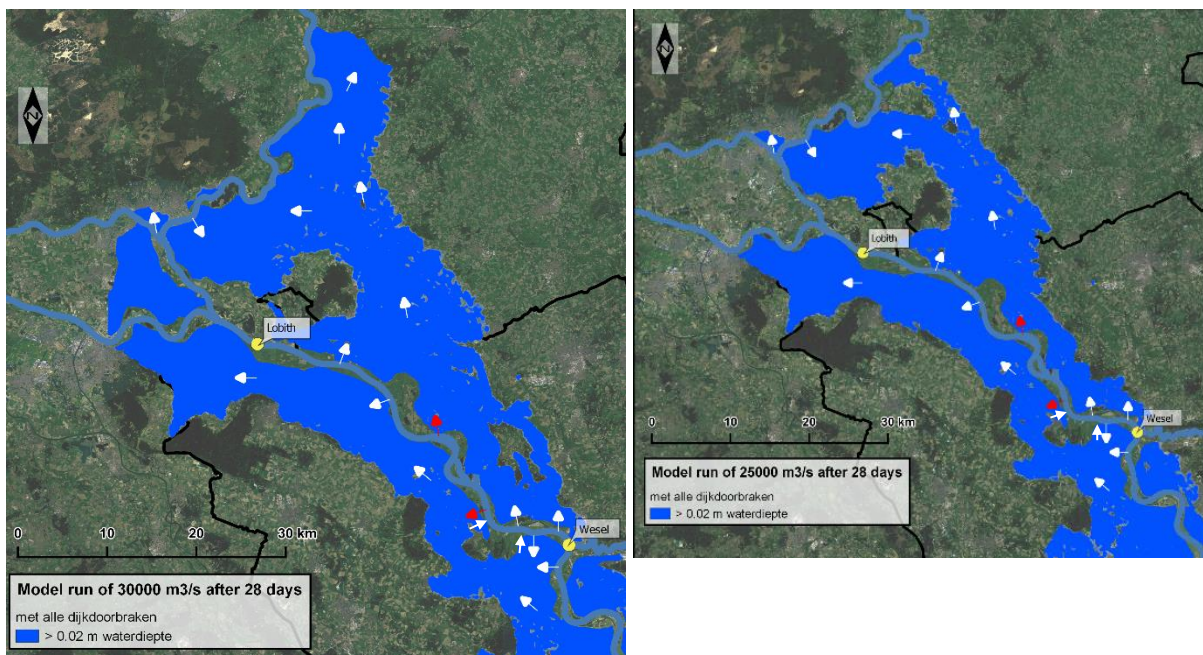
<sup>1</sup> Bij de modelleringen met GRADE Rijn is ernaar gestreefd dat de dijk doorbreekt zodra water over een dijk stroomt (Becker, 2020). Dit kan echter alleen als er in het model op die locatie een doorbraaklocatie is gedefinieerd. Het is daarom te overwegen om meer doorbraaklocaties op te nemen in het hydraulische model van GRADE. De onzekerheidsanalyse heeft echter laten zien dat het voor de piekafvoeren bij Lobith weinig uit maakt of er enkel dijk-overtopping plaats vindt of ook dijkdoorbraken (Geertsema et al., 2022).



Figuur 3-1: Maximale binnendijkse overstromingsvlakten (waterdiepte > 0,02 m) bij een afvoergolf met een piekafvoer bij Andernach van 25.000 m<sup>3</sup>/s met alle dijkdoorbraken. De pijlen geven de stroming van het water naar en in de binnendijkse overstromingsvlakte weer, dus niet de stroming van de binnendijkse overstromingsvlakte naar de rivier. De rode pijlen illustreren de stromingen bij de dijkdoorbraaklocaties 8 (DB8) en 9 (DB9).

Voor afvoergolven met andere piekafvoeren bij Andernach verandert het overstromingspatroon in de dijkringen 42 en 48. Bij een afvoergolf met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach overstromen dijkringen 42 en 48 nauwelijks (bijlagen G, H en I). De waterstanden komen bij deze afvoergolf net boven de 24,1 m+NAP bij Wesel. Deze 24,1 m+NAP is namelijk de waterstand waarop veel dijken rondom Wesel overstromen en ook water via een binnendijkse route vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 naar dijkkring 42 stroomt. Bij een waterstand boven de 24,5 m+NAP bij Wesel overstromen de dijken naar dijkringen 42 en 48. Deze waterstand wordt overschreden bij een afvoergolf van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach.

Bij een afvoergolf met een piekafvoer van 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach overstromen niet enkel dijkringen 42 en 48, maar is ook de gehele dijkkring 49 overstroomd en het gedeelte van de Betuwe ten zuiden van Arnhem dat meegenomen is in het model (Figuur 3-2). Ook de laaggelegen delen van Arnhem lopen onder water door dijkoverstromen vanuit de Nederrijn. Daarnaast staan er grotere gebieden van het bovenstroomse deel van dijkkring 48 onder water ten opzichte van de situatie met lagere afvoergolven. In dijkkring 42 is het overstroomde gebied steeds ongeveer even groot. Dit komt door de 'harde' begrenzing in het westen van de stuwwal Reichswald en in het oosten en noorden dijken. Bij de afvoergolf met een piekafvoer van 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach kan de waterstand bij Xanten oplopen tot 25,6 m+NAP. Bij deze hoge afvoerpieken wordt de waterstand van 24,1 m+NAP eerder bereikt, waardoor de dijkringen ook eerder overstromen bij hogere afvoeren (Tabel 4).



Figuur 3-2: Maximale binnendijkse overstromingsvlakten (waterdiepte > 0,02 m) bij een afvoergolf met een piekafvoer bij Andernach van 30.000 m<sup>3</sup>/s met alle dijkdoorbraken (links) en ter vergelijking de maximale binnendijkse overstromingsvlakten (waterdiepte > 0,02 m) bij een afvoergolf met een piekafvoer bij Andernach van 25.000 m<sup>3</sup>/s (rechts). De pijlen geven de stroming van het water in de binnendijkse overstromingsvlakte weer, dus niet de stroming van de binnendijkse overstromingsvlakte naar de rivier. De rode pijlen illustreren de stromingen bij de dijkdoorbraaklocaties 8 (DB8) en 9 (DB9).

In dijkkring 48 (DR48) kunnen de overstromingen in Nederland vanuit twee kanten ontstaan: vanuit de dijkovertopping bij Westervoort en vanuit overstromingen in het Duitse deel van DR48 die zich uitstrekken naar het Nederlandse deel bij 's Heerenberg en Megchelen aan de Nederlands-Duitse grens. De aankomsttijden van de overstromingen in dagen zijn weergegeven voor deze twee locaties in Tabel 4. De aankomsttijden zijn in de eerste rij aangegeven als dagen vanaf het begin van de modelberekening. Het is daarbij essentieel om te weten dat de afvoergolven beginnen te stijgen vanaf dag 9 in Andernach en de piek in Andernach wordt bereikt op dag 14.

Tabel 4 laat zien dat de dijkovertopping bij Westervoort naar dijkkring 48 al plaatsvindt na -0,5 tot 1,4 dagen na de afvoerpiek in Andernach. Bij de hoogste afvoer vinden de overstromingen dus al voor de afvoerpiek in Andernach plaats (tweede rij). Daarnaast laat Tabel 4 zien dat de dijkovertopping bij Westervoort eerder plaatsvindt dan dat het water binnendijs aankomt bij de Duits-Nederlandse grens van dijkkring 48. Dit water is een samenvloeiing van water dat overstroomt bij de keermuur bij Emmerich en bij de dijken net benedenstrooms van Wesel. Het water komt gemiddeld 2,5 dagen (derde rij) na de overstroming van de keermuur bij Emmerich of de dijken bij Wesel aan bij de Duits-Nederlandse grens.

De overstromingen in dijkkring 42 aan de Duits-Nederlandse grens bij Millingen aan de Rijn vinden 14 tot 24 uur na de overstromingen aan de Duits-Nederlandse grens in dijkkring 48 plaats. Het water van deze overstromingen ontstaan door een samenvloeiing van overstromingen over de dijken tussen Wesel en Xanten en van overstromingen bovenstrooms van dijkkring 42. Dit water komt gemiddeld 3,3 dagen (derde rij) na de overstroming bij de dijken tussen Wesel en Xanten of bij het overstromen van de bovenstroomse grens van dijkkring 42 aan bij de Duits-Nederlandse grens bij Millingen aan de Rijn.

Tabel 4: De aankomsttijden in dagen van de overstromingen in Nederland in dagen voor dijkringen 48 en 42.

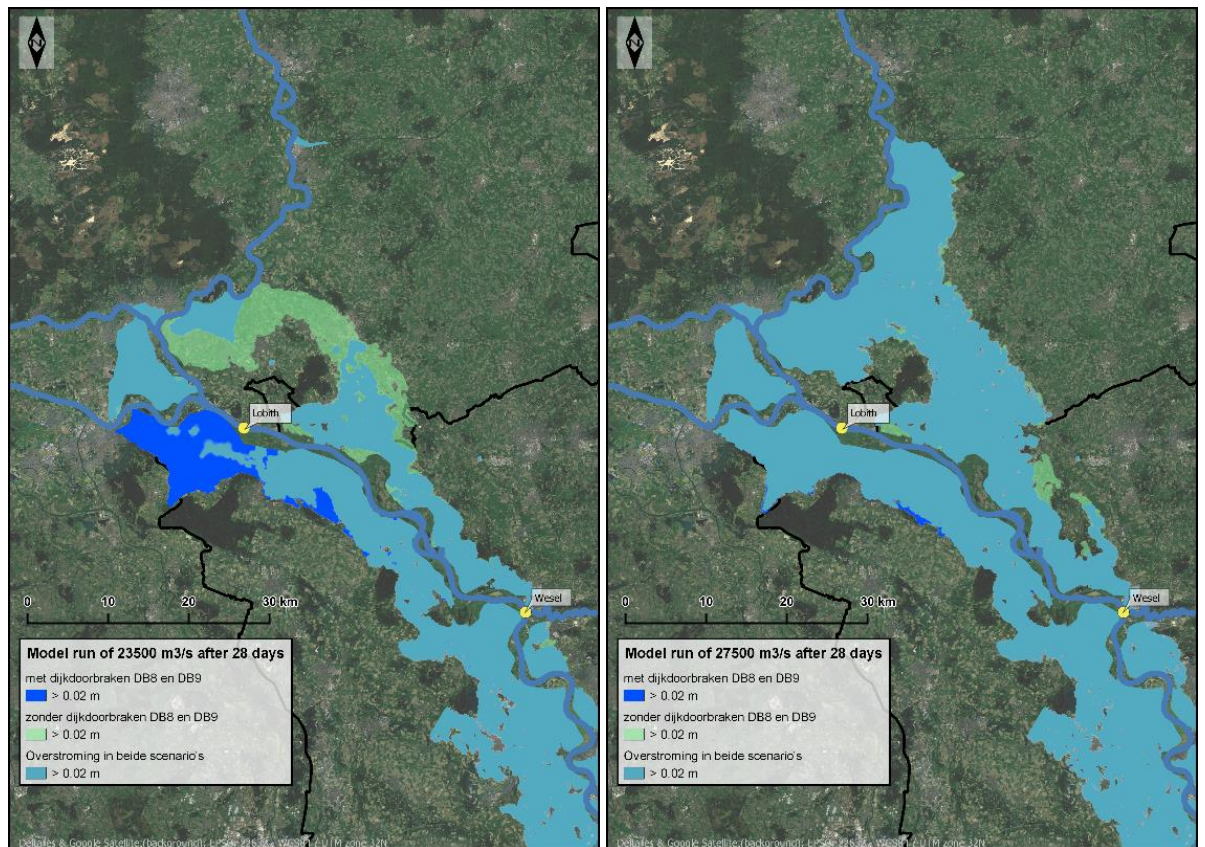
			30000	27500	25000	23500	20000
1	Aankomsttijd vanaf begin modelberekening	Westervoort DR48	13.5	14.0	14.2	14.4	15.4
		grens NL-D DR48	15.2	15.5	16.4	17.5	n.v.t.
		grens NL-D DR42	15.9	16.5	17.3	18.1	n.v.t.
2	Aankomsttijd vanaf afvoerpiek bij Andernach	Westervoort naar DR48	-0.5	0	0.2	0.4	1.4
		grens NL-D in DR48	1.2	1.5	2.4	3.5	n.v.t.
		grens NL-D in DR42	1.9	2.5	3.3	4.1	n.v.t.
3	Aankomsttijd vanaf moment van dijkdoorbraak / dijkoverstromen	grens NL-D in DR48	2.1	2.2	2.3	3.2	n.v.t.
		grens NL-D in DR42	2.7	3.1	3.5	3.9	n.v.t.

### 3.1.2 Resultaten dijkdoorbraakscenario's en dijkhoogtescenario's

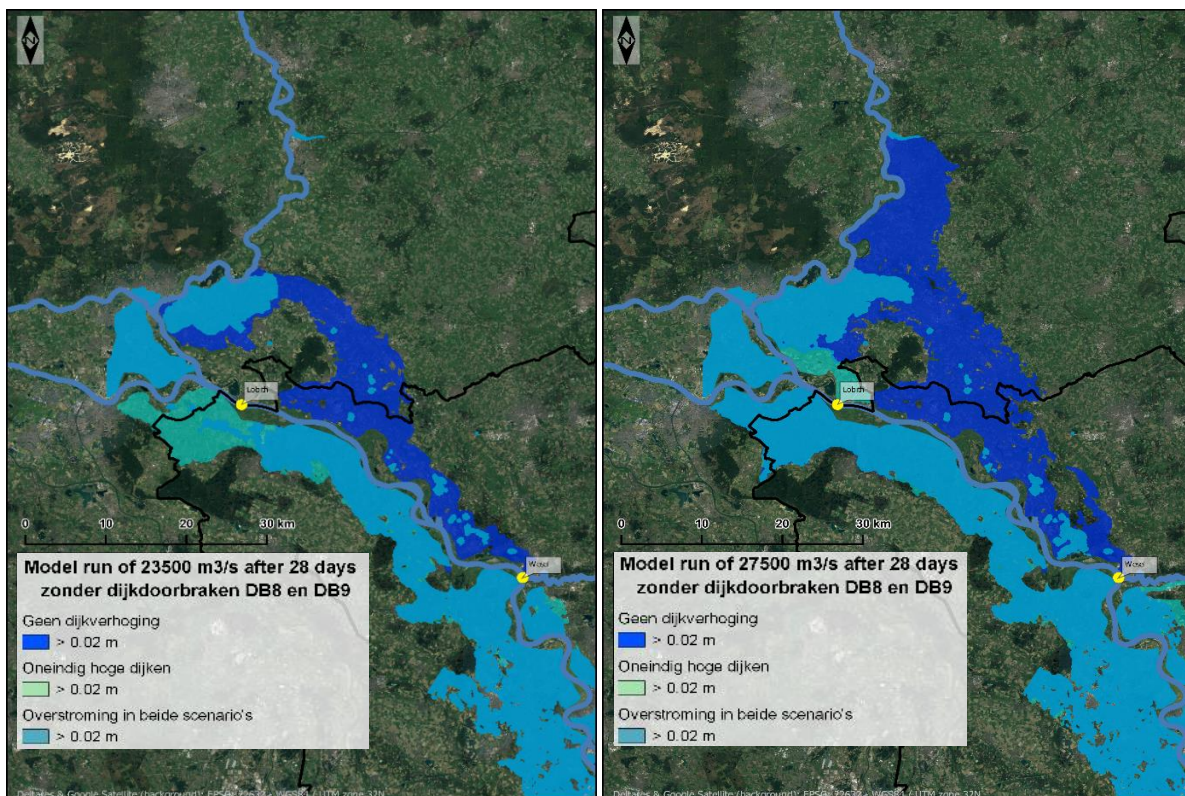
In de volgende paragrafen kijken we naar de overstromingspatronen die berekend zijn voor de verschillende scenario's, zoals geschetst in Tabel 2 (dijkdoorbraakscenario's) en Tabel 3 (dijkhoogtescenario's). We focussen daarbij op de resultaten voor de afvoergolven met een piekafvoer van 23.500 en 27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach, zodat we goed naar de verschillen kunnen kijken. Tevens presenteren we voor de dijkdoorbraakscenario's voornamelijk de scenario's met alle dijkdoorbraken en de scenario's zonder de dijkdoorbraken DB8 en DB9 en voor de dijkverhogingscenario's de scenario's zonder dijkverhoging en met oneindig hoge dijken. In bijlage G t/m I kunnen de overstromingsvlakten van alle scenario's en de afvoergolven van 20.000, 23.500, 25.000, 27.500 en 30.000 m<sup>3</sup>/s in meer detail worden bestudeerd. Een beknopt overzicht met de belangrijkste bevindingen uit de bijlagen G t/m I is te vinden als tabel in bijlage J.

De binnendijkse overstromingsvlakten voor de **verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging** komen overeen, vooral voor hoge afvoergolven (Figuur 3-3). Bij de lagere afvoergolven (23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) is de overstromingsvlakte voor dijkkring 42 groter met dan zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9, terwijl de overstromingsvlakte voor dijkkring 48 kleiner is met dan zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9. Overstromingen in het scenario zonder dijkdoorbraken worden gevoed door overtopping van de waterkeringen of door water dat uit bovenstroomse binnendijkse overstromingsvlaktes naar benedenstroomse binnendijkse overstromingsvlaktes stroomt (zoals beschreven bij Figuur 3-1). De overstromingsvlakte bij het dijkdoorbraakscenario met enkel DB8 (naar dijkkring 48) is identiek aan de overstromingsvlakte met alle dijkdoorbraken. Bij het dijkdoorbraakscenario met enkel DB9 (naar dijkkring 42) is de overstromingsvlakte in dijkkring 48 zelfs iets groter dan de overstromingsvlakte bij het dijkdoorbraakscenario zonder de dijkdoorbraken DB8 en DB9. Dat de overstromingsvlakte toeneemt in de aanwezigheid van dijkdoorbraken wordt verwacht, omdat er meer water uit de rivier naar de overstromingsvlakte kan stromen. Dat de overstromingsvlakte in dijkkring 48 afneemt met dijkdoorbraken ligt minder voor de hand, maar wordt veroorzaakt door de dijkdoorbraak bij locatie DB9 richting dijkkring 42, welke tegelijkertijd plaatsvindt en veel water wegtrekt uit de rivier. Dijkdoorbraaklocatie DB9 (dijkkring 42) ligt namelijk ongeveer 15 km bovenstrooms van locatie DB8 (dijkkring 48). Een andere schematisatie met bijvoorbeeld DB8 bovenstrooms van DB9 zou een ander resultaat geven.

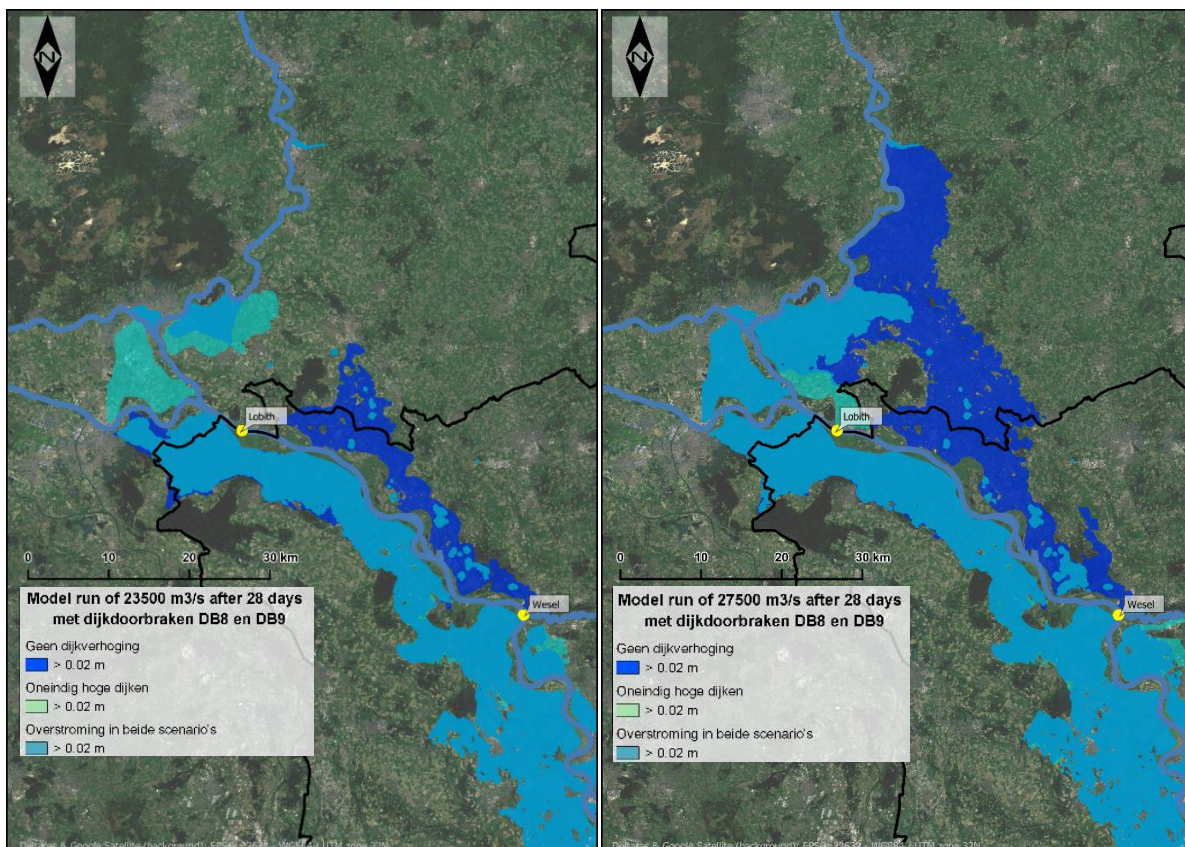
Bij hogere afvoeren (27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) laten de overstromingsvlaktes voor de **verschillende dijkverhogingsscenario's zonder en met dijkdoorbraken DB8+DB9** grotere verschillen zien dan voor de verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging (Figuur 3-4 en Figuur 3-5). Bij lagere afvoeren (23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) zijn de overstromingsvlaktes kleiner, maar geven eenzelfde soort patroon weer als bij hogere afvoeren. In dit overstromingspatroon is het opmerkelijk dat overstromingen plaatsvinden bij oneindig hoge dijken. In dijkkring 48 vinden overstromingen plaats bij dijken in Nederland (bij Westervoort) die niet zijn verhoogd. In dijkkring 42 stroomt het water vanuit overstromingsvlaktes verder bovenstrooms via een binnendijkse route dijkkring 42 binnen. Water stroomt bijvoorbeeld door overtopping bij de hoge gronden bovenstrooms van dijkkring 42 (ongeveer 4 km bovenstrooms van Wesel) richting overstromingsvlaktes en stroomt vervolgens richting dijkkring 42. Als gevolg geeft het scenario met oneindig hoge dijken een grotere overstromingsvlakte dan de andere dijkverhogingsscenario's (Figuur 3-4). Dit wordt veroorzaakt doordat het water van de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 bij oneindig hoge dijken niet meer terug kan stromen naar de rivier. Dit omdat het dijkstuk aan de overkant van Wesel tussen Wesel-Lippemonding en de hoge grond ten zuidoosten van Xanten is verhoogd (Zie ook toelichtingen in paragrafen 3.2, 3.3 en 3.4). Het algemene beeld is echter dat de overstromingsvlaktes afnemen bij een toename van de keringshoogte, voornamelijk bij dijkkring 48 (bijlagen H en I).



Figuur 3-3: Binnendijkse overstromingsvlaktes (waterdiepte > 0,02 m) na 28 dagen na de start van de modelberekening voor twee verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging voor de afvoergolven met piekafvoeren van 23.500 en 27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach.



Figuur 3-4: Binnendijkse overstromingsvlakten (waterdiepte > 0,02 m) na 28 dagen na de start van de modelberekening voor twee verschillende dijkverhogingsscenario's, zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9, voor de afvoergolven met piekafvoeren van 23.500 en 27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. In het scenario zonder dijkverhoging is de voorspelling gemaakt van de verwachte dijkhoogte in 2025. In het scenario met oneindig hoge dijken zijn enkel de waterkeringen verhoogd over het traject van Wesel tot Lobith en niet de hoge gronden of dijken in Nederland.



Figuur 3-5 : Binnendijkse overstromingsvlakten (waterdiepte > 0,02 m) na 28 dagen vanaf de start van de modelrun voor twee verschillende dijkverhogingsscenario's, met dijkdoorbraken DB8 en DB9, voor de afvoergolven met piekafvoeren van 23.500 en 27.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. In het scenario zonder dijkverhoging wordt uitgegaan van de verwachte dijkhoogte in 2025. In het scenario met oneindig hoge dijken zijn enkel de waterkeringen verhoogd op het traject van Wesel tot Lobith en niet de hoge gronden of dijken in Nederland.

## 3.2 Langsprofielen

In deze paragraaf bestuderen we de langsprofielen van de piekafvoeren en de piekwaterstanden langs het traject van Wesel tot Lobith. In de hoofdttekst focussen we op de meest inzichtelijke resultaten. Alle overige langsprofielen zijn beschreven in bijlagen D en E. Voor de langsprofielen van de waterstanden hebben we gekozen om de waterstandsverschillen ten opzichte van het scenario zonder dijkverhoging te laten zien (bijlage E), omdat in de langsprofielen van de waterstanden zelf nauwelijks verschillen tussen de diverse scenario's zichtbaar zijn.

### 3.2.1 Maximale afvoeren

Figuur 3-6, Figuur 3-7 en bijlage D laten langsprofielen zien van de piekafvoeren bij de verschillende scenario's en afvoergolven in het traject tussen rkm 810 (bovenstrooms van Wesel) en rkm 867 (Pannerdense Kop). Een plotselinge toename van de afvoer in het langsprofiel betekent een bron van water, zoals de toestroom van een zijrivier (Lippe) of water dat terugstroomt van een binnendijks gelegen overstromingsvlakte naar de rivier, zoals in de meeste scenario's net benedenstrooms van Wesel bij rkm 820 en rkm 825. Afnemende afvoeren zijn het gevolg van water dat stroomt naar een binnendijks gelegen overstromingsvlakte, zoals bij dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 (mits die "aan" staan) en locaties waar overtopping van dijken, keermuren of hoge gronden plaatsvindt (rkm 835, rkm 852 en rkm 860).

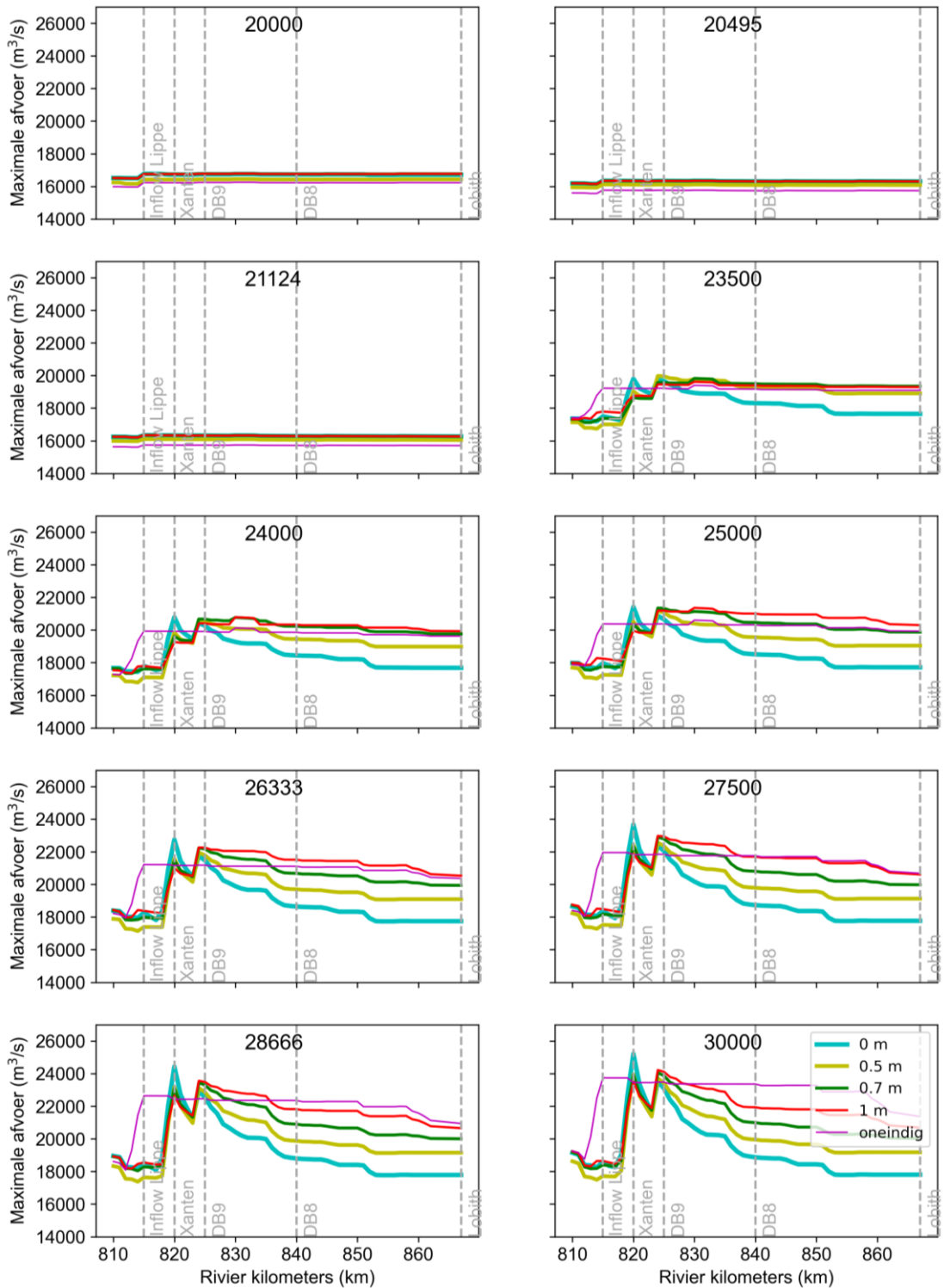


In detail verschilt de situatie afhankelijk van de beschouwde hoogwatergolf. Bij afvoeren lager dan 21.124 m<sup>3</sup>/s bij Andernach vindt geen dijkvertopping plaats tussen Wesel en Lobith (zelfs niet in het scenario zonder dijkverhoging), omdat de waterstanden lager blijven dan de kruinhoogte (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). Voor afvoeren groter dan 21.124 m<sup>3</sup>/s bij Andernach resulteren de dijkverhogingsscenario's in verschillende afvoerprofielen over het traject Wesel en Lobith. De afvoer bovenstrooms van Wesel is relatief laag, maar er stroomt bij deze afvoeren water naar de rivier net bovenstrooms van dijkkring 42 bij Xanten en ook 1 km bovenstrooms van dijkdoorbraaklocatie 9. Na deze toevoerlocaties neemt de afvoer geleidelijk af richting Lobith door overtopping van waterkeringen, dijkdoorbraken of topvervlakking. Enkel voor het dijkverhogingsscenario met oneindig hoge dijken neemt de piekafvoer bij rivierkilometer 815 (bij de Lippemonding) toe. De schematisatie van een oneindig hoge dijk benedenstrooms van rkm 815 tot Lobith voorkomt het terugstromen van water naar de rivier en in plaats daarvan stroomt er meer water al bij rkm 815 terug naar de rivier. De dijken bij rkm 815 en verder bovenstrooms zijn niet verhoogd, omdat dit buiten het traject Wesel-Lobith valt. De piekafvoer neemt richting Lobith vervolgens ook bij oneindig hoge dijken geleidelijk af, vooral bij rivierkilometer 852 en 860 rkm. Deze locaties corresponderen met de keermuren bij Emmerich (rkm 852) en met de dijken in Nederland (rkm 860). Op beide locaties zijn de dijken niet verhoogd in de verschillende dijkverhogingsscenario's.

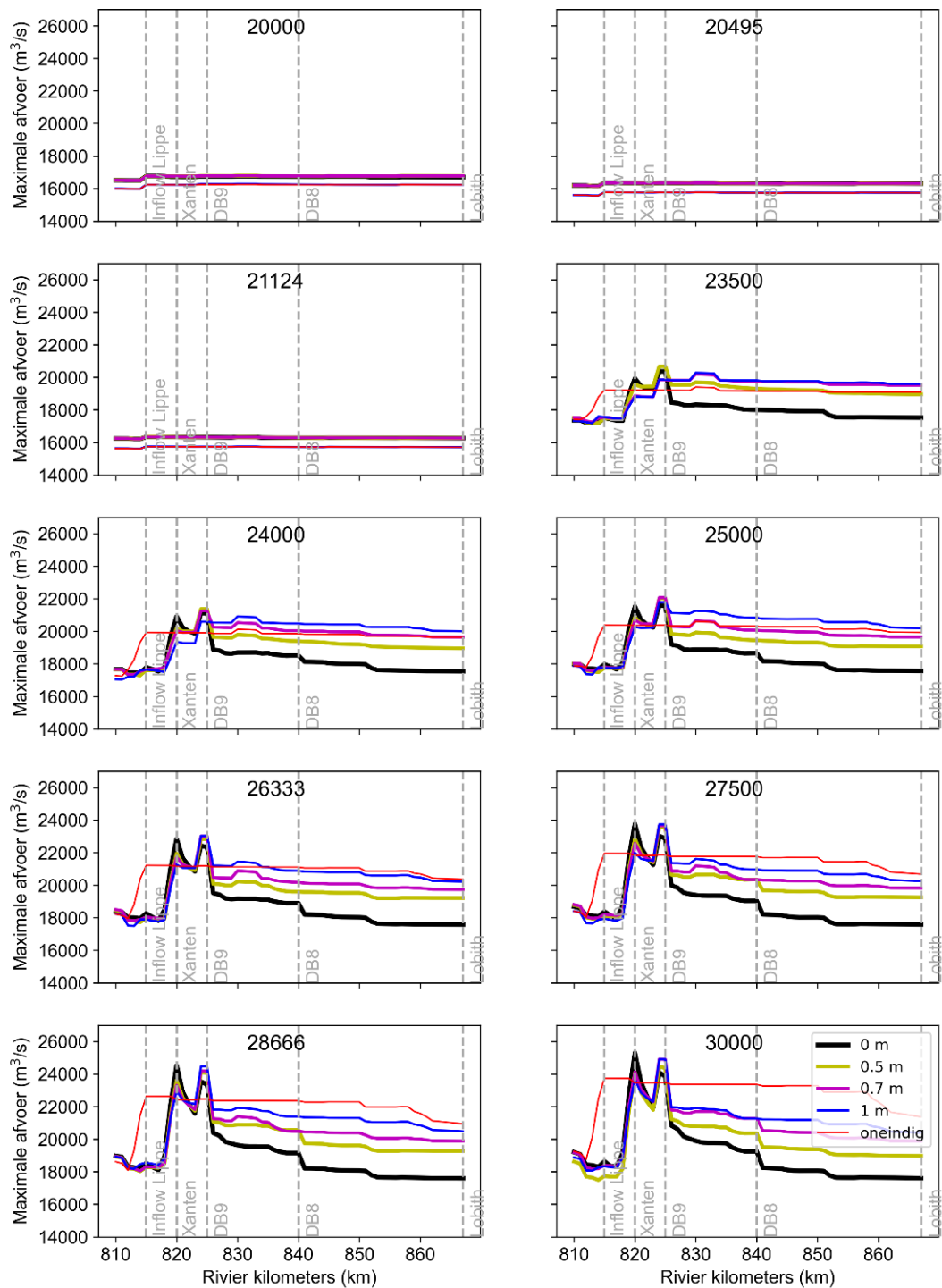
Bij een vergelijking van de vier dijkverhogingsscenario's is te zien dat de hoogste dijkverhoging tot de hoogste afvoeren leiden (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). De verschillen tussen de dijkverhogingsscenario's nemen toe met de afvoer bij Andernach. Het dijkverhogingsscenario met oneindig hoge dijken geeft echter een ander beeld. Bij de afvoeren tussen 23.500 en 26.333 m<sup>3</sup>/s bij Andernach resulteert een dijkverhoging van 0,7 tot 1 meter in hogere afvoeren in de rivier dan bij oneindig hoge dijken. Dit is een gevolg van de blokkade van de terugstroming van water van dijkkring 42 naar de rivier bij Xanten en 1 km bovenstrooms van dijkdoorbraak 9 in het scenario met oneindig hoge dijken. Er is daarom minder afvoer in de Rijn tussen breslocatie DB9 en Lobith voor de afvoeren tussen 23.500 en 26.333 m<sup>3</sup>/s bij Andernach.

De afname van de afvoer op het traject van de dijkdoorbraaklocatie 9 (naar dijkkring 42) naar Lobith is verschillend voor de dijkverhogingsscenario's met en zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 (Figuur 3-6 en Figuur 3-7). De dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 hebben een redelijk constante afname van afvoer over dit traject, terwijl de dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken veel afvoer verliezen bij de dijkdoorbraken, met een vlakker afvoerverloop tussen de dijkdoorbraaklocaties en Lobith. Naast de dijkdoorbraaklocaties (rkm 825 en rkm 840), de keermuren (rkm 852) en de niet-verhoogde Nederlandse dijken (vanaf 858 rkm) valt ook rivierkilometer 835 op door afvoerterlies bij hogere afvoeren. Op deze locatie neemt de buitendijkse overstromingsvlakte significant toe door de retentiegebieden Lohrwardt, wat leidt tot extra topvervlakking op deze locaties en dus geen dijkvertopping.

De langsprofielen van de verschillende dijkdoorbraakscenario's (zonder dijkverhoging) lijken op elkaar (bijlage D.1). Verschillen zijn in eerste instantie te zien bij de dijkdoorbraaklocaties zelf. Daarnaast zijn ook kleinere verschillen te zien bij verschillende locaties waar overtopping plaats vindt.



Figuur 3-6: Langsprofielen van de piekafvoeren op het traject Wesel-Lobith voor verschillende dijkhoogtescenario's zonder dijkdoorbraken op dit traject. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de piekafvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijn representeren de modeluitkomst met respectievelijk een verhoging van de dijken met 0,5, 0,7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.



Figuur 3-7: Langsprofiel van de piekafvoeren op het traject Wesel-Lobith voor verschillende dijkhoogtescenario's met dijkdoorbraken op dit traject (locaties DB8 en DB9). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de piekafvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijn representeren de modeluitkomst met respectievelijk een verhoging van de dijken met 0,5, 0,7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

### 3.2.2 Verschillen van piekwaterstanden

De figuren in bijlage E geven de langsprofielen weer van de piekwaterstanden voor het traject Wesel - Lobith en de verschillen tussen de piekwaterstanden van verschillende dijkdoorbraakscenario's respectievelijk dijkhoogtescenario's ten opzichte van het corresponderende scenario met alle dijkdoorbraken en zonder dijkverhoging.

Figuur E-2 in bijlage E.1 laat zien dat de waterstanden voor de vier dijkdoorbraakscenario's niet veel verschillen. Een uitzondering is het traject rondom dijkdoorbraaklocatie DB9. Hier zijn de waterstanden bij scenario "met DB8 en DB9" hoger dan bij scenario's waar DB9 uit staat (scenario zonder DB9 en scenario zonder DB8 en DB9). Dit komt doordat er geen water meer wordt aangetrokken door de dijkbreuk. Een tweede uitzondering zijn de waterstandsverschillen vanaf rond rkm 850 bij de hogere afvoergolven. Ook hier zijn de waterstanden bij scenario "met DB8 en DB9" hoger bij scenario's waar DB9 uit staat (scenario zonder DB9 en scenario zonder DB8 en DB9). Dit komt waarschijnlijk doordat de waterstanden in dijkkring 42 lager zijn als de dijkdoorbraak DB9 niet plaatsvindt, waardoor er meer water kan instromen naar dijkkring 42 bij de Nederlandse dijken, welke niet zijn verhoogd in de dijkdoorbraakscenario's.

De waterstandsverschillen zijn gevarieerder als verschillende dijkverhogingsscenario's worden vergeleken. In bijlage E.2 en E.3 zijn de resultaten te zien voor de dijkverhogingsscenario's. Voor de kleinere afvoergolven met de piekafvoeren kleiner dan 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach zijn de resulterende waterstandsverschillen tussen de dijkverhogingsscenario's en het scenario zonder dijkverhoging zeer gering voor de verschillende scenario's (Figuur E-4 en Figuur E-6). De waterstandsverschillen voor de dijkverhogingsscenario's 0,5, 0,7 en 1 m ten opzichte van het scenario zonder dijkverhoging worden langzaam groter voor de afvoergolven van 23.500 tot 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach, maar voor afvoergolven groter dan 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach blijven de waterstandsverschillen gelijk aan het waterstandsverschil van 25.000 bij m<sup>3</sup>/s Andernach. Uitzondering hierop zijn de waterstanden bij oneindig hoge dijken ten opzichte van het scenario zonder dijkverhoging: deze blijven toenemen als de afvoergolven groter worden. Dit patroon van toename van waterstandsverschillen met toenemende afvoer in de langsprofielen is gelijk aan het patroon in de langsprofielen van de afvoeren (Figuur 3-7) .

Interessant is ook het patroon van de verschillen in piekwaterstanden in het lengteprofiel zelf: voor alle golven en scenario's neemt vanaf de Lippemonding tot ca. rkm 835 het waterstandsverschil toe en daarna weer af (Figuur E-4 en Figuur E-6). De toename wordt veroorzaakt door een verlaging van de hoeveelheid water die de dijk overstroomt en door de dijkdoorbraken DB8 en DB9 de rivier uitstroomt bij verhoging van de dijken. Dit speelt gedeeltelijk ook in het traject vanaf rkm 835, echter dit wordt gedeeltelijk weer gecompenseerd door de hogere afvoeren die over de Nederlandse dijken van de rivier afstromen en daardoor de waterstanden versterkt naar beneden trekken, ook in het Duitse deel van de rivier. De Nederlandse dijken zijn namelijk in de dijkverhogingsscenario's niet verhoogd. Bijzonder sterk is dit te zien bij de scenario's met oneindig hoge dijken voor de hogere afvoergolven bij Andernach.

Bovendien zijn bij de scenario's met oneindig hoge dijken de waterstandsverschillen met de corresponderende scenario's met de dijkhoogte zoals die in het GRADE-3.0-model zit bij rkm 810 relatief hoog en dalen deze plotseling bij de Lippemonding. Dit heeft ermee te maken dat aan de overkant van Wesel bij het scenario met oneindig hoge dijken geen water terug kan stromen naar de rivier tussen Wesel-Lippemonding en de hoge grond ten zuidoosten van Xanten. Hierdoor wordt het water verder bovenstrooms opgestuwd en stroomt het water nu verder bovenstrooms van de Lippemonding aan de linkerkant van de rivier terug naar de rivier. Dit leidt tot hogere afvoeren in dit riviertraject (Figuur 3-6 en Figuur 3-7) en vervolgens ook hogere waterstanden (Figuur E-4 en Figuur E-6).

### 3.3 Maximale afvoeren en afvoergolven bij uitgavepunt Xanten en bij Lobith

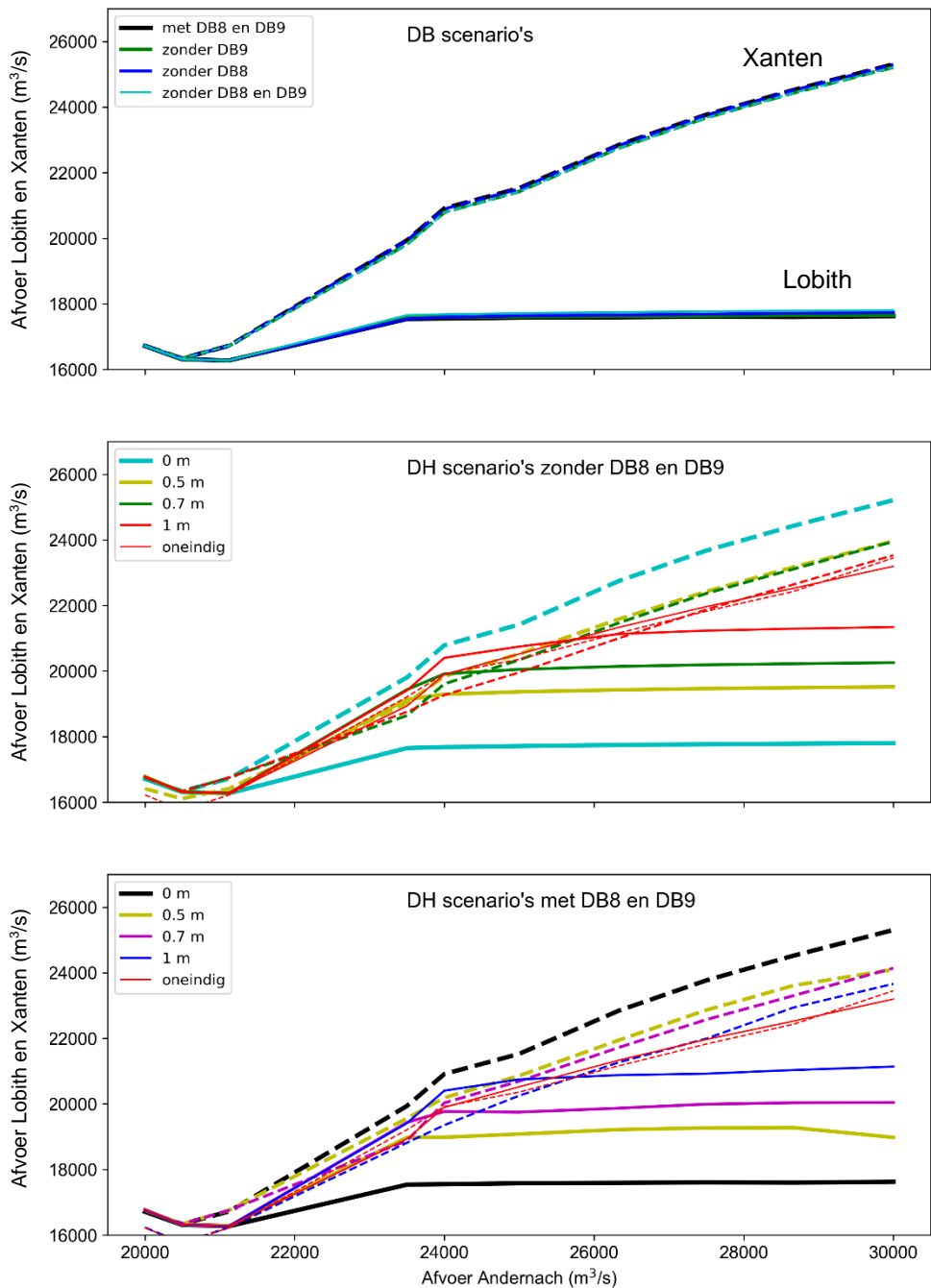
Een ander aspect om naar het effect van de dijkvertopping en dijkdoorbraken langs het riviertraject tussen Xanten en Lobith te kijken is door de afvoergolven en maximale afvoeren net bovenstrooms en net benedenstrooms van dit traject te beschouwen. Figuur 3-8 illustreert voor de verschillende afvoergolven bij Andernach de maximale afvoeren bij Xanten (gestippelde lijn) en Lobith (doorgetrokken lijn). Het bovenste paneel laat de verschillende dijkdoorbraakscenario's zien met de huidige dijkhoogte. De verschillende dijkdoorbraakscenario's resulteren in minimale verschillen in afvoerpieken bij Lobith en Xanten. Voor Xanten aan de bovengrens van het beschouwde riviertraject was dit te verwachten. Voor Lobith is dit effect te verklaren doordat de dijken enkel doorbreken als het water de kruin van de dijk bereikt. Dijkdoorbraken of overtopping worden dus geïnitieerd bij gelijke waterstanden en dus bij gelijke afvoer. Bovendien kan het water dat in de scenario's met dijkdoorbraken afgevoerd wordt via de dijkdoorbraaklocaties in de scenario's zonder dijkdoorbraken gecompenseerd worden door water dat over een grotere lengte over de dijk stroomt. Wel is er voor Lobith een verandering van de golfvorm te zien afhankelijk van het dijkdoorbraakscenario (bijlage C1, Figuur C-2). Bij de grotere afvoergolven leidt de vermindering van dijkdoorbraken tot een verbreding van de golf, met in het scenario zonder DB8 en DB9 de breedste golf en in het scenario met DB8 en DB9 de smalste golf. Dat heeft geen effect op de maximale afvoer bij Lobith maar enkel op het cumulatieve volume van de afvoergolf bij Lobith. Bij Xanten blijft ook de golfvorm hetzelfde, onafhankelijk van het dijkdoorbraakscenario.

De onderste twee panelen van Figuur 3-8 laten de resultaten van de verschillende dijkverhogingsscenario's met en zonder dijkdoorbraken zien. Er is nauwelijks verschil tussen de dijkverhogingsscenario's met (middelste paneel) of zonder dijkdoorbraken (onderste paneel). Dit leidt tot de conclusie dat twee bressen of geen bres niet veel uitmaakt voor de piekafvoeren bij Lobith, mits dijken niet falen voordat de waterstand in de rivier de kruinhoogte bereikt. Het overstromen van dijken is dus dominant over de dijkdoorbraken. Het is daarom te verwachten dat een extra bres weinig effect op de afvoer bij Lobith heeft, omdat het water dat in de scenario's met dijkdoorbraak afgevoerd wordt via de dijkdoorbraaklocatie in de scenario's zonder dijkdoorbraak gecompenseerd wordt door water dat over een grotere lengte over de dijk stroomt.

De dijkverhogingsscenario's resulteren daarentegen in grotere verschillen in piekafvoer door dijkverhogingen. De piekafvoeren in Lobith nemen zoals verwacht toe met toenemende dijkverhoging. Voor de dijkverhogingsscenario's 0,5 m, 0,7 m en 1 m zijn de maximaal berekende afvoeren met dijkdoorbraken respectievelijk 19.300 m<sup>3</sup>/s, 20.050 m<sup>3</sup>/s en 21.150 m<sup>3</sup>/s en zonder dijkdoorbraken respectievelijk 19.500 m<sup>3</sup>/s, 20.250 m<sup>3</sup>/s en 21.350 m<sup>3</sup>/s in Lobith (Figuur 3-8). Voor het scenario met oneindig hoge dijken stijgt de piekafvoer verder door naar 23.200 m<sup>3</sup>/s. De verhoogde dijken houden dus meer water in de Rijn. Deze verhoogde afvoer bij Lobith treedt al op bij de afvoergolf met een piekafvoer van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach.

Anders is het beeld bij de piekafvoeren bij Xanten. Hier leiden hogere dijken tot lagere piekafvoeren. Om dit te begrijpen, is het belangrijk om zich te realiseren dat net bovenstrooms van deze locatie veel water van de (binnendijkse) overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 terug naar de Rijn stroomt (Figuur 3-6). De dijkverhogingen van Wesel tot Lobith resulteren dus in het bemoeilijken van de terugstroom vanuit de binnendijkse overstromingsvlakten naar de Rijn. Dit verschil treedt op bij de afvoergolven met de piekafvoeren vanaf 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (Figuur 3-8, Bijlage C.2 en Bijlage C.3) en dit verschil is het grootst tussen het scenario zonder dijkverhoging en het scenario met de oneindig hoge dijken. Voor het scenario met de oneindig hoge dijken resulteert dit effect in lagere afvoeren bij Lobith dan voor het scenario met de 1 meter dijkverhoging voor de afvoergolven met piekafvoeren van 24.000 en 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (onderste paneel van Figuur 3-8). Bij de dijkverhogingsscenario's van 0,7 en 1 m is voor deze afvoergolven de belemmering van de terugstroming van water vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte aan de overkant van Wesel naar de rivier bij oneindig hoge dijken dus groter dan het verlies van rivierwater door dijkvertopping en dijkdoorbraken op het traject van Wesel tot Lobith.

Voor de extremere afvoergolven met een piekafvoer van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en hoger is een demping van de afvoergolven van Xanten te zien bij afvoeren van boven de 19.000 m<sup>3</sup>/s bij Xanten. Anders dan verwacht neemt deze demping toe met toenemende dijkhoogte. Dit is, zoals in de vorige alinea's al toegelicht, te verklaren door de sterkere belemmering van de toestroom van water uit verder bovenstrooms liggende binnendijkse overstromingsvlakten naar de rivier, waardoor er netto minder water bij Xanten passeert.



Figuur 3-8: Piekafvoer bij Lobith (doorgetrokken lijnen) en Xanten (gestippelde lijnen) ten opzichte van de piekafvoer van de onderzochte afvoergolven bij Andernach. De kleuring refereert naar de verschillende scenario's, waarbij het bovenste paneel de verschillende dijkdoorbraakscenario's (zonder dijkverhoging) representeert, het middelste paneel de dijkverhogingen zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 en het onderste paneel de dijkverhogingen met de dijkdoorbraken DB8 en DB9.

### 3.4 Afvoer door dijkdoorbraken

Bij dit onderzoek is ook gekeken naar de afvoer die bij de dijkdoorbraaklocaties DB8 en DB9 van de rivier naar het binnendijkse gebied stroomt. Voor de verschillende scenario's zijn de resultaten gepresenteerd in Figuur 3-9 en bijlage F. Hieruit kunnen we drie lessen halen. Ten eerste is er, zoals verwacht, nauwelijks afvoer als er geen dijkdoorbraken worden gesimuleerd (middelste paneel van Figuur 3-9 en bijlage F.2). De afvoer, die wel wordt berekend als uitstroom op deze locatie is het resultaat van plaatselijke overtopping van de dijk. Hierbij wordt uitgegaan van een overtopplengte van 200 m. Echter, in werkelijkheid zal de lengte waarbij overtopping plaatsvindt, vele malen groter zijn.

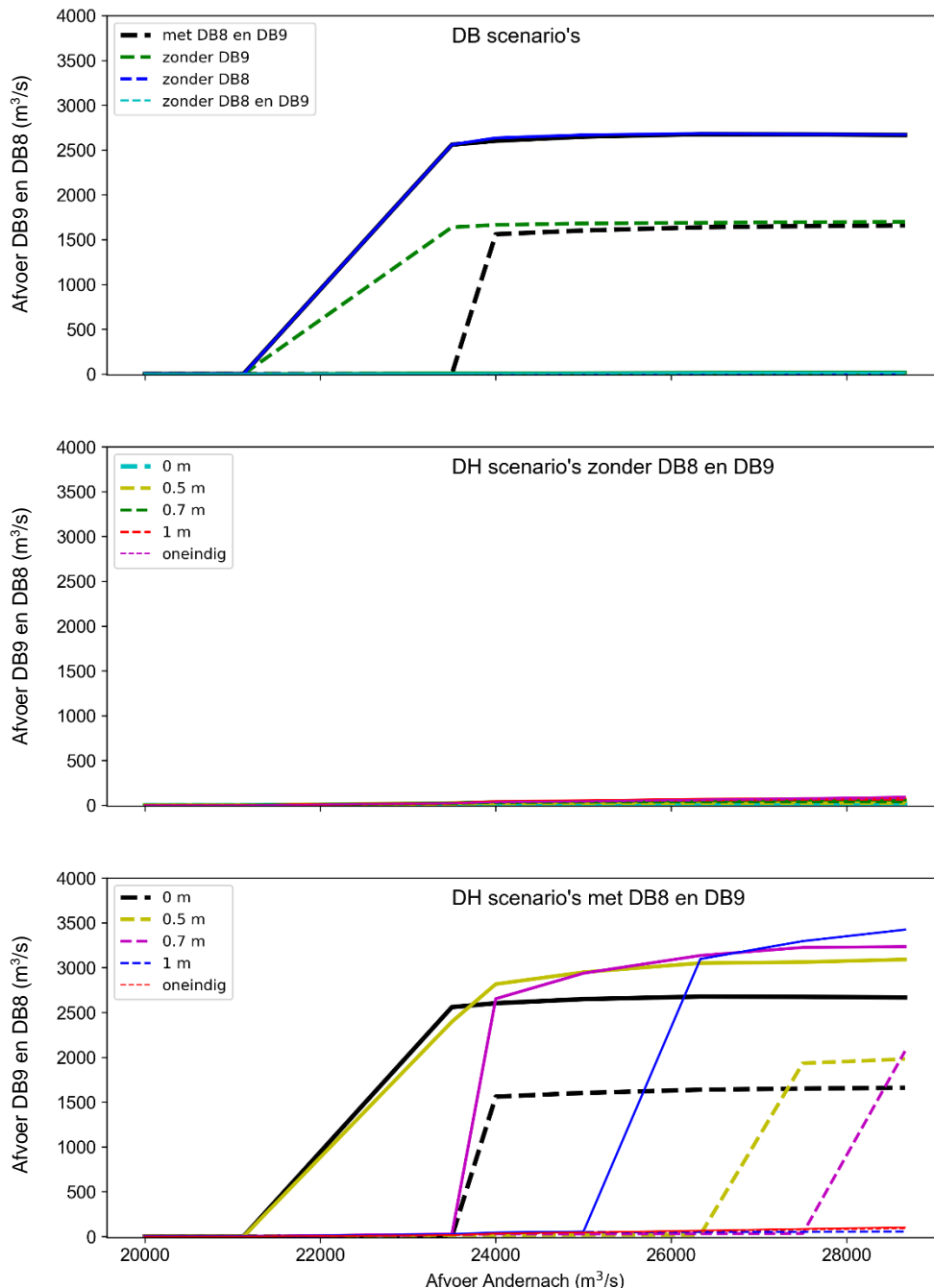
Ten tweede bestaat voor beide doorbraaklocaties DB8 en DB9 vanaf een bepaalde grootte van de afvoergolf bij Andernach een maximale piekafvoer die door de bres wordt afgevoerd (bovenste paneel van Figuur 3-9 en bijlage F.1). Deze maximale piekafvoer door dijkdoorbraken zonder dijkverhoging is onafhankelijk van de afvoergolf in de rivier ongeveer 2700 m<sup>3</sup>/s voor dijkdoorbraaklocatie 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en 1700 m<sup>3</sup>/s voor dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm 840 naar dijkkring 48). Dit verschil in afvoer door de dijkdoorbraken is te verklaren doordat het maaiveld aan binnendijkse kant van de dijk ten opzichte van de kruin van de dijk veel lager ligt bij dijkdoorbraaklocatie 9 (8.0 m+NAP) dan bij dijkdoorbraaklocatie 8 (4.6 m+NAP). De afvoer door dijkdoorbraaklocatie 8 wordt maximaal 100 m<sup>3</sup>/s lager wanneer gelijktijdig dijkdoorbraaklocatie 9 doorbreekt. Bovendien vindt de doorbraak van DB8 pas plaats bij de onderzochte afvoergolf met piekafvoer 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach in plaats van de 23.500 m<sup>3</sup>/s afvoergolf als beide dijkdoorbraaklocaties worden meegenomen. Dijkdoorbraak 9 heeft dus blijkbaar een effect op het onttrekken van water en heeft invloed op het gedrag van dijkdoorbraak 8, die rond 15 km benedenstrooms van dijkdoorbraak 9 ligt.

Ten derde treden dijkdoorbraken pas bij de afvoergolven met de hogere piekafvoeren bij Andernach op als de dijken worden verhoogd (onderste paneel van Figuur 3-9 en bijlage F.3). Voor dijkdoorbraaklocatie 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) treedt een doorbraak op voor de 23.500 m<sup>3</sup>/s golf bij Andernach bij geen of 0,5 meter dijkverhoging, terwijl bij een dijkverhoging van 1 meter pas een doorbraak optreedt bij de 26.333 m<sup>3</sup>/s afvoergolf. Voor dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm 840 naar dijkkring 48) treedt een doorbraak op voor de 23.500 m<sup>3</sup>/s golf bij Andernach bij het scenario zonder dijkverhoging. Bij een dijkverhoging van 0,5 m en 0,7 m treedt een dijkdoorbraak pas op bij de golven van respectievelijk 27.550 m<sup>3</sup>/s en 30.000 m<sup>3</sup>/s. Bij een dijkverhoging van 1 meter treedt geen dijkdoorbraak op voor alle berekende afvoergolven.

Voor de dijkdoorbraaklocatie 9 naar dijkkring 42 is de maximale afvoer door de bres ongeveer gelijk bij een afvoergolf van 26.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach voor de dijkverhogingen van 0,5, 0,7 en 1 meter. Als de afvoer verder toeneemt, wordt de afvoer door de bres geleidelijk groter voor de hogere dijkverhogingen. Dit effect is minder duidelijk voor dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm 840 naar dijkkring 48). Het is moeilijker een uitspraak te doen over de oorzaak van dit verschil, omdat er bij de doorgerekende afvoergolven minder vaak dijken doorbraken. Het is echter waarschijnlijk dat door de dijkverhoging de waterstand minder snel de kruinhoogte bereikt (onderste paneel Figuur 3-9). Dijkdoorbraaklocatie 8 heeft dus een kleiner effect op de afvoer en wordt minder snel getriggerd dan dijkdoorbraaklocatie 9.

Het verschil in piekafvoeren door de dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 bij verschillende dijkhoogten en afvoergolven bij Andernach is ook terug te vinden bij de afvoergolven (bijlage F). Wat opvalt is dat het tijdstip waarop een dijk doorbreekt, naar achteren schuift met toenemende dijkhoogte, mits er überhaupt een doorbraak plaatsvindt. Tevens wordt er niet in alle gevallen een maximale afvoer door de bres bereikt. Als dat nog wel zo is, dan wordt die hoger met hogere dijken.





Figuur 3-9: Piekafvoer door dijkdoorbraaklocatie 8 (gestippelde lijn) of dijkdoorbraaklocatie 9 (doorgetrokken lijn) ten opzichte van de onderzochte afvoergolf bij Andernach (hier gekenmerkt door de piekafvoer bij Andernach). De kleuring refereert naar de verschillende scenario's, waarbij het bovenste paneel de verschillende dijkdoorbraakscenario's (zonder dijkverhoging) representeert, het middelste paneel de dijkverhogingen zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 en het onderste paneel de dijkverhogingen met de dijkdoorbraken DB8 en DB9.

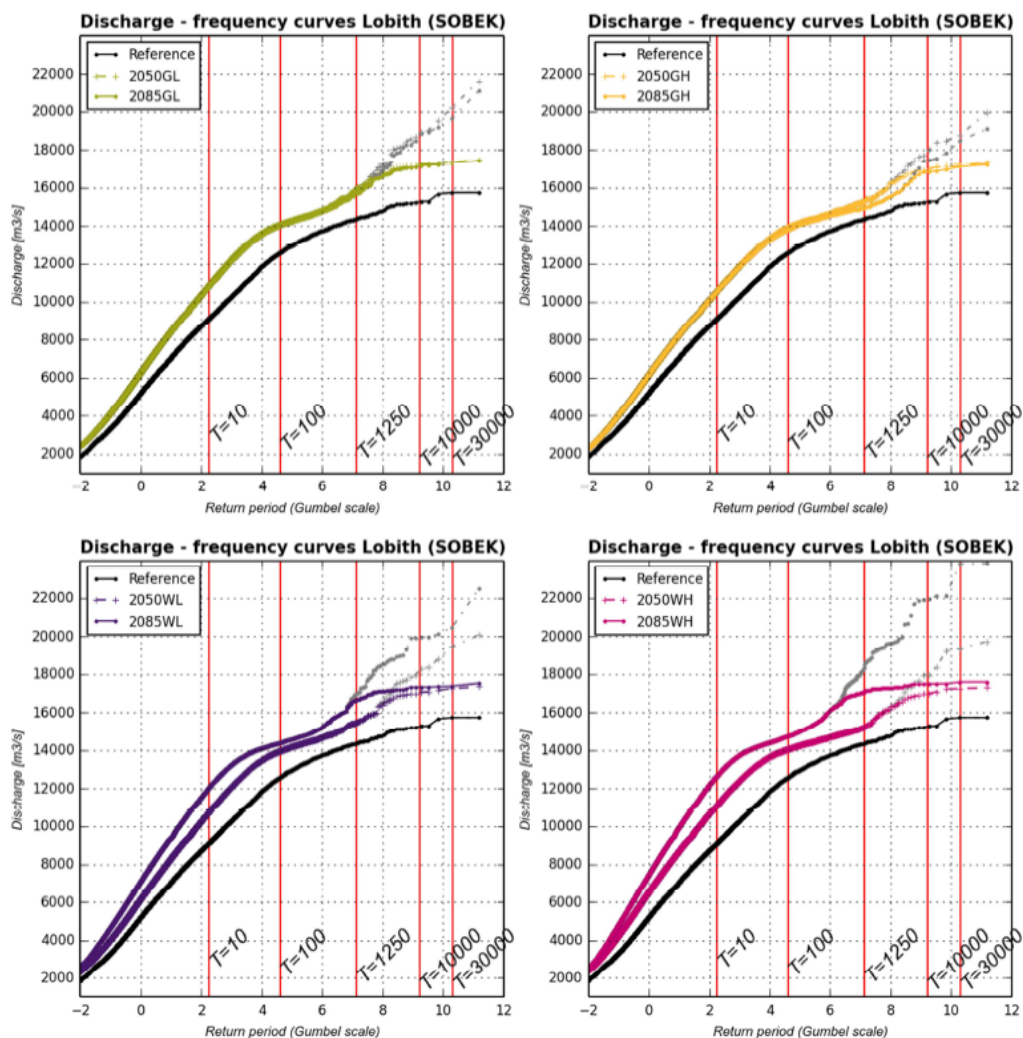
### Klimaatscenario's

Om een indruk te geven van hoe klimaatverandering herhalingstijden voor verschillende afvoeren verandert, is gekeken naar de afvoerstatistiek van de KNMI-klimaatscenario's van 2014 (Sperna Weiland et al, 2015).

In Figuur 3-10 zijn de 4 verschillende klimaatscenario's voor de twee zichtjaren 2050 en 2085 weergegeven:

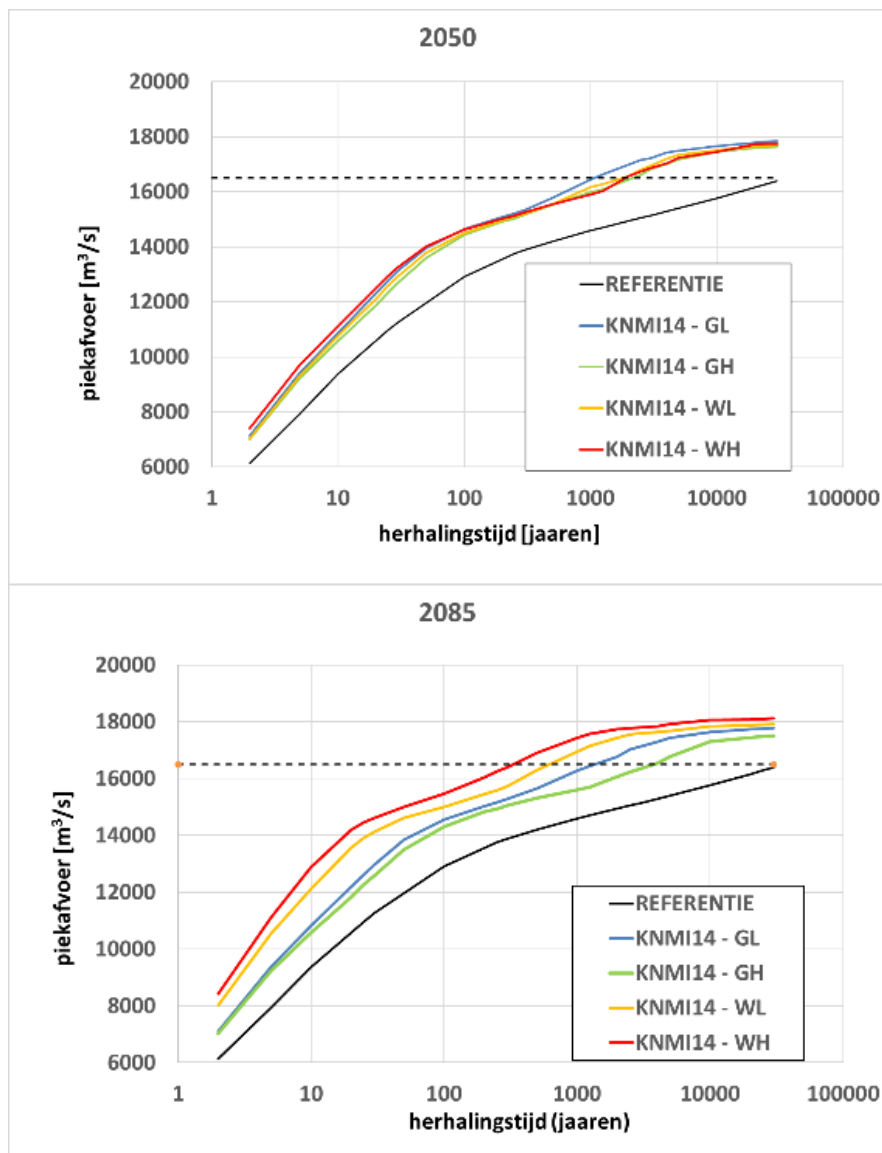
- gematigde temperatuurstijging en lage waarde verandering luchtstromen (GL),
- gematigde temperatuurstijging en hoge waarde verandering luchtstromen (GH),
- sterke temperatuurstijging en lage waarde verandering luchtstromen (WL)
- sterke temperatuurstijging en hoge waarde verandering luchtstromen (WH)

De verschillende klimaatscenario's laten vanaf een piekafvoer van iets onder de 14.000 m<sup>3</sup>/s een eerste sterke afvlakking zien, welke veroorzaakt wordt door dijkvertoppingen en dijkdoorbraken tussen Bonn en Wesel. Daarna stijgt de afvoerstatistiek weer voordat bij een afvoer rond 16.500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith weer een sterke afvlakking van de curve (lijnen in kleuren) te zien is. In de studie van 2015 is hiervoor nog een kunstmatige aftopping (correctie) van de hoogwaterstatistiek of werklijn uitgevoerd. Dit omdat het destijds beschikbare hydraulische model nog niet in staat was het overtoppen van de dijken in het gebied van dijkringen 42 en 48 volledig te berekenen. In Figuur 3-10 zijn de resultaten zonder aftopping te zien als grijze punten.



Figuur 3-10: Afvoerfrequentiecurves voor de Rijn bij Lobith voor alle KNMI'14-klimaatscenario's en bijbehorende zichtjaren op basis van de hydraulische modelresultaten (SOBEK-RE). Dit model was wel in staat het effect van bovenstroomse overstromingen tot aan Wesel te berekenen, maar niet de dijkvertoppingen in het traject tussen Wesel en Lobith. Daarom is een correctie uitgevoerd. In grijs zijn de resultaten weergegeven zonder deze correctie en in kleur met correctie (Bron Sperna Weiland et al, 2015). Let op: deze resultaten zijn zonder de modelonzekerheden van GRADE.

Het punt van aftopping door overstromingen tussen Wesel en Lobith ('ventielwerking') heeft verschillende terugkeertijden voor verschillende klimaatscenario's en zichtjaren. Om dit inzichtelijk te maken zijn in Figuur 3-11 de afvoerfrequentiecurves van de verschillende klimaatscenario's gesorteerd voor de zichtjaren 2050 en 2085. Hierbij is gebruik gemaakt van de werklijnen met aftopping en inclusief onzekerheden van GRADE zoals die in 2016 opgenomen zijn in het Nationale Watermodel (Hegnauer, 2016). De referentie in de legenda verwijst naar de afvoerstatistiek voor het huidige klimaat zoals die berekend is met het meest recente GRADE 3.0 instrumentarium (hier inclusief onzekerheden in GRADE). Voor het zichtjaar 2050 bevinden zich de terugkeertijden waar aftopping door overstromingen begint plaats te vinden tussen 1.000 en 2.000 jaar bij de verschillende klimaatscenario's (Tabel 5). Voor het zichtjaar 2085 is de spreiding van de terugkeertijden van aftopping door overstromingen groter, namelijk tussen de 500 en 4.000 jaar. Het is opvallend dat de kans op voorkomen voor klimaatscenario GH toeneemt van zichtjaar 2050 naar 2085. Dit is een bekende 'tekortkoming' van de KNMI'14-klimaatscenario's en de hoofdreden waarom de KNMI'14-scenario's nooit zijn toegepast voor het ontwerp van de primaire waterkeringen. Bij de ontwikkeling van de afvoerscenario's die bij de KNMI'23-scenario's horen, wordt daarom vanaf het begin eraan gewerkt om dergelijk gedrag te voorkomen. De kans van voorkomen van aftopping door overstromingen ('ventielwerking') neemt bij de verschillende klimaatscenario's en zichtjaren echter aanzienlijk toe ten opzichte van het huidige klimaat (referentie), waar ventielwerking een terugkeertijd van > 30.000 jaar heeft.



Figuur 3-11: Afvoerfrequentiecurves voor de verschillende KNMI'14-klimaatscenario's (met aftopping en inclusief onzekerheden GRADE), onderverdeeld in zichtjaar 2050 (boven) en 2085 (onder). De stippellijn geeft de afvoer weer waar aftopping door overstromingen een rol begint te spelen in de situatie zonder dijkverhogingen (gegevens KNMI'14-scenario's uit Hegnauer 2016 en referentie uit Hegnauer et al., 2022).

Tabel 5 geeft de herhalingstijden weer wanneer in de afvoerfrequentielijn geen rekening wordt gehouden met de modelonzekerheden van GRADE. Hier zijn de herhalingstijden duidelijker hoger en de kans van voorkomen dus lager. Dit maakt duidelijk hoe gevoelig de uitspraak over herhalingstijden is, afhankelijk van de keuze van de afvoerfrequentielijn.

Tabel 5: De terugkeertijden waar aftopping door overstroming voor de verschillende klimaatscenario's begint te spelen, afgelezen uit Figuur 3-112

Terugkeertijden [jaren]	Referentie <sup>1)</sup>	2050GL <sup>2)</sup>	2050GH <sup>2)</sup>	2050WL <sup>2)</sup>	2050WH <sup>2)</sup>	2085GL <sup>2)</sup>	2085GH <sup>2)</sup>	2085WL <sup>2)</sup>	2085WH <sup>2)</sup>
met onzekerheid GRADE	~30.000	~1.000	~2.000	~2.000	~2.000	~1.259	4.000	~1.000	500
zonder onzekerheid GRADE	>30.000	~10.000	~20.000	~20.000	~20.000	~10.000	~50.000	~5000	~1.250

<sup>1)</sup> Hegnauer et al. (2022)

<sup>2)</sup> niet gepubliceerde achtergrondinformatie bij Hegnauer (2016), een verdere uitwerking van Sperna Weiland et al. (2015)

De recentelijk voor BOI2023 opgeleverde werklijn van Lobith (Hegnauer et al., 2022) is opgesteld met dijkdoorbraken en zonder dijkverhoging. Dijkdoorbraken en met name dijkverhogingen hebben, zoals bestudeerd in de eerdere hoofdstukken van deze studie, niet alleen invloed op de afvoeren bij Lobith maar ook op de afvoer waarbij dijkovertopping begint plaats te vinden langs het riviertraject tussen Wesel en Lobith en vervolgens ook op het aftoppen van de piekafvoeren bij Lobith. Op basis van de eerder beschreven resultaten is voor de verschillende dijkverhogings- en dijkdoorbraakscenario's een grove schatting gemaakt van de afvoeren waarbij aftopping door dijkoverstromen tussen Wesel en Lobith een rol begint te spelen, en zijn hieraan voor verschillende klimaatscenario's herhalingstijden toegekend (Tabel 6). Ook is er onderscheid gemaakt tussen wel of niet rekening houden met onzekerheden uit GRADE.

Tabel 6: Afvoer waarbij aftopping door overstromingen een rol begint te spelen voor de verschillende onderzochte scenario's van dijkhoogtes en dijkdoorbraken met daarbij horende terugkeertijden

Scenario dijkhoogte en dijkdoorbraak	Afvoer waarbij aftopping tussen Wesel en Lobith begint (m <sup>3</sup> /s)	herhalingstijd zonder onzekerheid GRADE			herhalingstijd met onzekerheid GRADE		
		huidig klimaat <sup>1)</sup>	KNMI'14 WH 2050 <sup>2)</sup>	KNMI'14 WH 2085 <sup>2)</sup>	huidig klimaat <sup>1)</sup>	KNMI'14 WH 2050 <sup>2)</sup>	KNMI'14 WH 2085 <sup>2)</sup>
2a+3e Zonder verandering aan het model (met dijkdoorbraken DB8 en DB9 en zonder dijkverhoging)	~16.500	>100.000	~3.000	~500	~50.000	~1.500	~300
2d Zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 (zonder dijkverhoging)	~16.700	>100.000	~4.000	~700	~50.000	~2.000	~400
3a Dijkverhoging van 0,5 m (met dijkdoorbraken DB8 en DB9)	~18.200	>100.000	~10.000	~1.250	>100.000	~4.500	~600
3b Dijkverhoging van 0,7 m (met dijkdoorbraken DB8 en DB9)	~18.900	>100.000	~15.000	~1.500	>100.000	~5.000	~1.000
3c Dijkverhoging van 1 m (met dijkdoorbraken DB8 en DB9)	~20.000	>100.000	>100.000	~4.000	>100.000	>10.000	~1.250
3d Oneindig hoge dijken (zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9)	n.v.t. geen aftopping		n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t

<sup>1)</sup> Hegnauer et al. (2022)

<sup>2)</sup> niet gepubliceerde achtergrondinformatie bij Hegnauer (2016), een verdere uitwerking van Sperna Weiland et al. (2015)

<sup>2)</sup> Bij de KNMI'14-scenario's vallen in de G-scenario's voor een aantal piekafvoeren de herhalingstijden voor het zichtjaar 2050 hoger uit dan voor het zichtjaar 2085. Dit is de reden waarom de KNMI'14-scenario's nooit zijn toegepast voor het ontwerp van de primaire waterkeringen.

In Tabel 7 is tot slot een schatting gemaakt van de herhalingstijden van de piekafvoeren van de onderzochte golven onder klimaatverandering. Hiervoor is gebruik gemaakt van het KNMI'14-scenario WH voor 2 zichtjaren. Afhankelijk van het gekozen zichtjaar en het wel of niet meenemen van de onzekerheden van GRADE wordt een gevarieerder beeld verkregen van herhalingstijden, met name voor het zichtjaar 2085 als wij rekening houden met onzekerheden in GRADE.

Tabel 7: Overzicht van de piekafvoeren bij Andernach en Lobith en de terugkeertijden voor de piekafvoeren bij Lobith voor de tien gekozen golven bij Andernach. Voor deze simulaties is het basismodel (Becker, 2020) niet aangepast.

Piekafvoer Andernach (m <sup>3</sup> /s)	Piekafvoer Lobith (m <sup>3</sup> /s)	Terugkeertijden op basis van werklijn zonder onzekerheden van GRADE Lobith (jaar)			Terugkeertijden op basis van werklijn met onzekerheden van GRADE Lobith (jaar)		
		huidig klimaat <sup>1)</sup>	KNMI'14 WH 2050 <sup>2)</sup>	KNMI'14 WH 2085 <sup>2)</sup>	huidig klimaat <sup>1)</sup>	KNMI'14 WH 2050 <sup>2)</sup>	KNMI'14 WH 2085 <sup>2)</sup>
20.000	16.825	>100.000	>100.000	~10.000	~50.000	~2.800	~500
20.495	16.435	>100.000	~10.000	~1.250	~30.000	~1.800	~300
21.124	16.400	>100.000	~10.000	~1.250	~30.000	~1.800	~300
23.500	17.725	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~20.000	~2.000
24.000	17.675	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~15.000	~1.800
25.000	17.785	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~100.000	~3.000
26.333	17.815	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~4.500
27.000	17.840	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~4.500
28.666	17.860	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~5.000
30.000	17.800	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	>100.000	~5.000

<sup>1)</sup> Hegnauer et al. (2022)  
<sup>2)</sup> niet gepubliceerde achtergrondinformatie bij Hegnauer (2016), een verdere uitwerking van Sperna Weiland et al. (2015)

Kanttekening bij alle bovengenoemde tekeningen van herhalingstijden is dat bijna alle onderzochte afvoeren in het vlakke bereik van de gebruikte afvoervrekwentielijnen liggen. Dit betekent dat kleine verschillen in afvoeren leiden tot grote veranderingen in herhalingstijden. Het is daarom moeilijk om tot een goede schatting van herhalingstijden te komen.

## 4 Conclusies

In dit hoofdstuk starten we met een overzicht van de algemene conclusies en de leerpunten over de werking van het systeem. Vervolgens beantwoorden we de vragen uit de inleiding met behulp van de resultaten uit hoofdstuk 3.

### 4.1 Algemene conclusies: systeemwerking

Bij een waterstand boven de 24,5 m+NAP bij Wesel overstromen de dijken naar dijkkring 42 en 48. Deze waterstand wordt overschreden bij de onderzochte afvoergolven met piekafvoeren van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en hoger. Echter binnendijkse overstromingen in dijkkring 42 vinden al plaats bij een waterstand vanaf 24,1 m+NAP bij Wesel door water dat vanuit binnendijkse overstromingsvlakten verder bovenstrooms van dijkkring 42 via een binnendijkse route naar dijkkring 42 stroomt. De waterstand van 24,1 m+NAP treedt wel op bij de onderzochte afvoergolf met een afvoerpiek van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach, maar niet bij de onderzochte afvoergolven met afvoerpieken van 20.500 en 21.200 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Blijkbaar worden de 2 afvoergolven, die in Andernach een hogere piekafvoer hebben dan de golf met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s, door overstromingen in het gebied tussen Andernach en Wesel zo sterk gedempt, dat zij bij Wesel een lagere afvoer respectievelijk waterstand veroorzaken dan de lagere golf van 20.000 m<sup>3</sup>/s.

In dijkkring 42 zijn overstromingen door water dat uit de bovenstroomse overstromingsvlakte binnendijks naar dijkkring 42 stroomt dominantier dan de overtopping van dijken. In dijkkring 48 is dijkoovertopping de dominante factor van overstromingen. In deze dijkkring komt er namelijk geen water van de bovenstroomse overstromingsvlakte. Overstromingen door dijkdoorbraken spelen in dijkkring 42 en dijkkring 48 een minder grote rol dan dijkoovertopping. Bij de afvoergolven met afvoerpieken in Andernach van 27.500 m<sup>3</sup>/s en hoger vinden er tevens overstromingen plaats in dijkkring 49, doordat water binnendijks vanuit dijkkring 48 naar dijkkring 49 stroomt.

Bij een toename van de afvoer bij Andernach zijn de overstromingspatronen groter en ontstaan de overstromingen eerder in de tijd. Voor de doorgerekende afvoerpieken vinden de overstromingen tussen de 13,5 en 15,5 dagen na de start van de modelrun plaats, wat gelijk staat aan -0,5 tot 0,4 dagen na de afvoerpiek in Andernach. De overstromingen kunnen al voorkomen voordat de afvoerpiek in de rivier wordt bereikt. Dat gebeurt zoals eerder al aangegeven bij waterstanden vanaf 24,1 m+NAP bij Wesel.

Als de dijkdoorbraaklocaties 8 en 9 niet doorbreken (of enkel dijkdoorbraaklocatie 9 niet), is het oppervlak van de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 kleiner en in dijkkring 48 groter. In dat geval blijft er meer water en dus meer afvoer in de Rijn benedenstrooms van dijkdoorbraaklocatie 9. De overstromingsvlakte in dijkkring 42 is kleiner, omdat daarheen geen water door dijkdoorbraaklocatie 9 stroomt. De overstromingsvlakte in dijkkring 48 is groter, omdat de hogere afvoer in de Rijn resulteert in meer dijkoverstromingen naar dijkkring 48. De piekafvoer bij Lobith is maximaal 200 m<sup>3</sup>/s hoger dan als er geen dijkdoorbraken optreden ten opzichte van de situatie dat dijkdoorbraaklocatie 8 of 9 doorbreekt.

Als de dijken worden verhoogd tussen Wesel en Lobith, vindt er minder uitwisseling tussen de binnendijkse overstromingsvlakte en de Rijn plaats. Het gevolg is dat de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 groter en in dijkkring 48 kleiner wordt. De overstromingsvlakte in dijkkring 42 wordt groter doordat hogere dijken ervoor zorgen dat er minder water vanuit de binnendijkse overstromingsvlakten bovenstrooms van dijkkring 42 en in dijkkring 42 zelf terugstroomt naar de Rijn. Deze terugstroomlocaties zijn essentieel voor de afvoer in de Rijn tussen Xanten en Lobith bij de onderzochte afvoergolven vanaf 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Deze terugstroomlocaties liggen nabij Xanten, circa 1 kilometer bovenstrooms van dijkdoorbraak 9 en ook bovenstrooms van Wesel. De blokkade van de terugstroming op deze locaties in de gemaakte modelschematisatie wordt veroorzaakt door een verhoogde dijk aan de overkant van Wesel tussen Wesel-Lippemonding en de hoge grond ten zuidoosten van Xanten (Birten). De overstromingsvlakte van dijkkring 48 is kleiner, omdat de hogere dijken resulteren in minder dijkoverstromingen naar dijkkring 48.

Hogere dijken resulteren tevens in meer overtopping van de Nederlandse dijken nabij Westervoort. Deze studie heeft laten zien dat de piekafvoer voor de hoogste doorgerekende afvoergolf toeneemt met 1700, 2400, 3500 en 5600 m<sup>3</sup>/s bij Lobith bij dijkverhogingen van respectievelijk 50 cm, 70 cm en 100 cm en oneindig hoge dijken. De afvoergolven in Lobith lijken bij verhoogde dijken daarnaast meer op de afvoergolven bij Xanten.

De berekende afvoergolven zijn zeer extreem met terugkeertijden van 30.000 jaar en meer voor het huidige klimaat. De kans van voorkomen wordt echter groter door de verwachte klimaatverandering. De KNMI'14-klimaatscenario's voorspellen voor de piekafvoeren van de onderzochte afvoergolven voor 2050 een herhalingstijd van tussen de 2.800 en meer dan 100.000 jaar en voor 2085 van tussen de 500 en 5.000 jaar. Deze herhalingstijden gelden voor het KNMI'14-GH-klimaatscenario, waarbij rekening wordt gehouden met de modelonzekerheden van GRADE. De kans van voorkomen op deze extreme gebeurtenissen neemt dus toe in de toekomst.

## 4.2 Bij welke afvoer speelt overtopping (“ventielwerking”) aan beide zijden van de Rijn?

Bij een waterstand van 24,1 m+NAP en een afvoer van ongeveer 16.500 m<sup>3</sup>/s bij Xanten vinden er binnendijkse overstromingen plaats in dijkkring 42 door water dat vanuit bovenstroomse binnendijkse overstromingsvlakten naar dijkkring 42 stroomt. Deze waterstand komt al voor bij de onderzochte afvoergolf met een afvoerpiek van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Echter bij de afvoergolven met afvoerpieken tussen de 20.500 en 21.200 m<sup>3</sup>/s bij Andernach treedt deze waterstand niet op. Kennelijk worden de 2 grotere golven op het traject tussen Andernach en Wesel sterker gedempt dan de kleinere golf. Dit omdat de laatst genoemde tot minder dijkovertopping leidt in het gebied tussen Duisburg en Wesel, waar de dijken hoger zijn dan verder bovenstrooms.

Bij een waterstand boven 24,5 m+NAP en een afvoer boven 17.000 m<sup>3</sup>/s bij Xanten treedt er overtopping van de dijken naar dijkkringen 42 en 48 op. Deze waterstand wordt overschreden bij de onderzochte afvoergolf met piekafvoeren van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en hoger. De stroming vindt in dat geval niet alleen van rivier naar de binnendijkse overstromingsvlakte plaats, maar ook van de binnendijkse overstromingsvlakte naar de rivier (alleen dijkkring 42). Bij de afvoergolven met piekafvoeren van 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach en groter overstromt dijkkring 49 ook.



### 4.3 Wat zijn bij verschillende waterstanden en Rijnafvoeren de (verschillende) overstromingspatronen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen overloop en overloop gevolgd door bres?

In deze studie zijn vier verschillende dijkdoorbraakscenario's onderzocht:

- met dijkdoorbraken naar zowel dijkkring 42 als 48 (DB9 en DB8),
- zonder dijkdoorbraak naar dijkkring 48 (DB8), wel naar dijkkring 42 (DB9),
- zonder dijkdoorbraak naar dijkkring 42 (DB9), wel naar dijkkring 48 (DB8), en
- zonder dijkdoorbraken naar zowel dijkkring 42 als 48 (DB9 en DB8).

Bij de kleinste onderzochte hoogwatergolf met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach vinden nagenoeg geen overstromingen plaats in de dijkringen 42 en 48. Vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 begint water via een binnendijkse route de dijkkring 42 in te stromen. Bij dijkkring 48 begint water over de keermuur bij Emmerich te stromen en ook ten noorden van Westervoort over de IJsseldijk.

Bij de hoogwatergolf met een piekafvoer van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach wordt in het scenario zonder dijkdoorbraken (naar dijkringen 42 en 48) de binnendijkse overstromingsvlakte in dijkkring 42 kleiner en in dijkkring 48 groter dan in het scenario met dijkdoorbraken naar dijkkring 42 en dijkkring 48 zoals gerealiseerd in het basismodel. De overstromingsvlakte in dijkkring 42 is kleiner, omdat er geen water door dijkdoorbraaklocatie 9 naar dijkkring 42 stroomt. In dit scenario blijft er meer water en dus meer afvoer in de Rijn benedenstrooms van dijkdoorbraaklocatie DB9. De overstromingsvlakte in dijkkring 48 wordt daardoor groter, omdat de hogere afvoer in de Rijn resulteert in meer dijkoverstromingen naar dijkkring 48. De overstromingsvlaktes voor het scenario met alle dijkdoorbraken en het scenario zonder dijkdoorbraakscenario naar dijkkring 48 maar wel naar dijkkring 42, zijn vrijwel gelijk. Dit laat zien dat het met name voor dijkkring 48 uitmaakt of een dijkdoorbraak aan de overkant van de rivier naar dijkkring 42 plaatsvindt of niet. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat dit alleen voor de gemodelleerde schematisatie geldt, met doorbraaklocatie DB9 ca. 15 km bovenstrooms gelegen van doorbraaklocatie DB8.

De onderzochte afvoergolven met piekafvoeren van 25.000, 27.500 en 30.000 m<sup>3</sup>/s zetten de hele dijkkring 48 onder water, onafhankelijk van het scenario. Ook lopen via dijkkring 48 de in de modelschematisatie aanwezige delen van dijkkring 49 onder water. Bij de afvoergolven met piekafvoeren van 27.500 en 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach lopen zij volledig onder water, bij de afvoergolf met een piekafvoer van 25.000 m<sup>3</sup>/s alleen deels, waarbij de grootste overstromingsvlakte bereikt wordt bij het scenario waarin bij locatie DB9 geen dijkdoorbraak richting dijkkring 42 plaatsvindt, en wel bij locatie DB8 richting dijkkring 48. Dit komt overeen met eerdere observaties zoals beschreven in voorgaande alinea.

Met toenemende dijkhoogte (zonder dijkdoorbraken) neemt in dijkkring 48 voor de verschillende onderzochte hoogwatergolven de oppervlakte van het overstromd gebied af, waarbij bij toenemende afvoergolf de overstromde vlakte toeneemt bij gelijkblijvende dijkhoogte. Pas bij oneindig hoge dijken vinden geen overstromingen meer plaats vanuit Duitsland, wel nog bij Westervoort, omdat daar de dijken in het model niet opgehoogd zijn.

Gecombineerd met dijkdoorbraakscenario's neemt met verhoging van de dijken het overstromde oppervlakte in dijkkring 48 af, met name als er ook een dijkdoorbraak plaatsvindt bij locatie DB9 richting dijkkring 42. Dit komt overeen met eerder beschreven observaties (zie eerdere alinea's in deze sectie). Echter bij de grotere onderzochte hoogwatergolven met 27.500 en 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach is nauwelijks verschil meer te zien, omdat de dijkkring dan volledig onder water loopt.

Anders is de situatie in dijkkring 42. Met uitzondering van de kleinste onderzochte golf met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach loopt bij nagenoeg alle golven dijkkring 42 volledig onder water, onafhankelijk van de dijkhoogte; zelfs bij oneindig hoge dijken. Dit komt doordat in alle gevallen water de dijkkring binnenstroomt vanuit binnendijks gebied bovenstrooms van dijkkring 42. Dit blijkt het meest dominante effect te zijn met name voor de situaties met dijkverhoging. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de simulaties niet alleen de Duitse dijken van dijkkring 42 zijn opgehoogd, maar ook de dijken aan de overkant van Wesel vanaf circa de Lippemonding tot de hoge grond ten zuidoosten van Xanten. Dit belemmert het terugstromen van water vanuit het binnendijkse gebied naar de rivier, welk effect toeneemt met toenemende dijkverhoging. Daarnaast loopt er ook water over de Nederlandse dijken naar dijkkring 42 zelfs bij oneindig hoge dijken in Duitsland, omdat de Nederlandse dijken niet zijn opgehoogd.

De voor dijkkring 42 beschreven overstromingspatronen bij verschillende dijkhoogtes zijn tevens terug te vinden bij de dijkhoogtescenario's met dijkdoorbraken. Alleen bij de hoogwatergolf met een piekafvoer van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach is de overstromingsvlakte in dijkkring 42 groter in de situaties met dijkdoorbraak DB9 richting dijkkring 42 dan zonder dijkdoorbraak DB9. Dit komt overeen met eerder beschreven observaties betreffende de dijkdoorbraakscenario's (zonder dijkverhoging). Voor de grotere hoogwatergolven met piekafvoeren van 25.000, 27.500 en 30.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach is voor de verschillende dijkhoogtescenario's nauwelijks meer een verschil te zien tussen de scenario's met en zonder dijkdoorbraken, omdat de dijkkring volledig volloopt.

#### 4.4 Gegeven de verschillende overstromingspatronen kan worden aangegeven, wat de verwachte voorspel- en aankomsttijden in Nederland zijn?

Onder de huidige condities van dijkhoogte en gemodelleerde dijkbreuk hebben de overstromingen in het Nederlandse deel van dijkkring 48 twee oorsprongen: een vanuit dijkovertopping ten noorden van Westervoort en een vanuit het bovenstroomse Duitse gedeelte van dijkkring 48 over de Duits-Nederlandse grens. De dijkovertopping bij Westervoort ontstaat bij hogere waterstanden dan 13,3 m+NAP op de IJssel bij Westervoort. Deze waterstand wordt bij alle onderzochte afvoergolven overschreden. De dijkovertopping bij Westervoort vindt plaats na 13,5 tot 15,5 dagen na de start van de modelberekening en bereikt onmiddellijk na overtopping het gebied van Nederland, nog voordat de overstroming vanuit de dijkovertoppingen en dijkdoorbraak via de Duits-Nederlandse grens Nederland bereikt. De overstromingen bij de Duits-Nederlandse grens vanuit Duitsland vinden plaats tussen de 15 en 17,5 dagen na de start van de modelberekeningen en het duurt 2 tot 3 dagen na dijkovertopping of dijkdoorbraak tot de overstroming Nederland bereikt. Bij de grotere onderzochte afvoergolven met piekafvoeren van hoger dan 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach wordt ook dijkkring 49 bereikt.

De overstromingen in dijkkring 42 aan de Duits-Nederlandse grens bij Millingen aan de Rijn vinden 14 tot 24 uur na de overstromingen aan de Duits-Nederlandse grens in dijkkring 48 plaats. Het water van deze overstromingen ontstaat door een samenvloeiing van overstromingen over de dijken tussen Wesel en Xanten en overstromingen bovenstrooms van dijkkring 42. Dit water komt gemiddeld 3,3 dagen na de overtopping van de dijken tussen Wesel en Xanten of na het begin van het instromen van het water uit het bovenstrooms gelegen binnendijkse gebied naar dijkkring 42 aan bij de Duits-Nederlandse grens bij Millingen aan de Rijn.

## 4.5 Welk effect heeft dijkverhoging in Duitsland (tussen Wesel en Lobith) voor Nederland op de werklijn in Nederland?

Dijkverhogingen op het traject tussen Wesel en Lobith verkleinen de uitwisseling van water tussen de binnendijkse overstromingsvlakte en de Rijn. Dit gebeurt zowel van de overstromingsvlatkes naar de Rijn als van de Rijn naar de overstromingsvlatkes. Over het algemeen zorgen hogere dijken voor hogere piekafvoeren in Lobith, omdat de mate van overtopping wordt verkleind. Voor de grotere onderzochte afvoergolven met piekafvoeren groter dan 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach worden bij Lobith afvoerniveaus van 17.700 m<sup>3</sup>/s, 19.300 m<sup>3</sup>/s, 20.050 m<sup>3</sup>/s en 21.150 m<sup>3</sup>/s niet meer overschreden bij respectievelijk 0 cm, 50 cm, 70 cm en 100 cm dijkverhoging als rekening wordt gehouden met dijkdoorbraak. Als geen rekening wordt gehouden met dijkdoorbraken verhoogt zich dit afvoerniveau bij Lobith van 17.800 m<sup>3</sup>/s naar respectievelijk 19.500 m<sup>3</sup>/s, 20.250 m<sup>3</sup>/s en 21.350 m<sup>3</sup>/s voor de verschillende dijkhoogtescenario's. De maximale afvoer die Nederland via de Rijn bij Lobith (buitendijks) kan bereiken neemt dus toe met 1.700, 2.400, en 3.500 m<sup>3</sup>/s bij dijkverhogingen in Duitsland van respectievelijk 50 cm, 70 cm en 100 cm. Alleen bij de situatie met oneindig hoge dijken stijgt de piekafvoer met groter wordende afvoergolf naar 23.200 m<sup>3</sup>/s bij Lobith voor de hoogste onderzochte afvoergolf.

Daarentegen wordt de mate van terugstroming van de binnendijkse overstromingsvlakte van dijkkring 42 naar de Rijn verkleind. Deze terugstroming vindt plaats vanaf een afvoergolf met een afvoerpiek van 23.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Bij deze afvoergolf overstroomt de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 en stroomt water net bovenstrooms van Xanten via de Bislicher Insel en net bovenstrooms van dijkdoorbraaklocatie 9 bij de stad Xanten terug naar de Rijn. In het scenario met oneindig hoge dijken resulteert het tegenhouden van deze terugstroming vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte naar de Rijn in een lagere afvoer bij Lobith voor de onderzochte afvoergolven met afvoerpieken tussen 23.500 en 25.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach ten opzichte van het scenario met een 1 meter dijkverhoging. Bij hogere afvoergolven (met piekafvoeren vanaf 26.333 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) geven oneindig hoge dijken weer hogere piekafvoeren bij Lobith ten opzichte van de andere dijkverhogingsscenario's. Dit vanwege het grotere waterverlies door overtopping van dijken tussen Xanten en Lobith bij deze dijkverhogingsscenario's.

Wat betreft het effect van dijkverhoging op de afvoerstatistiek (ook wel werklijn genoemd) voor het huidige klimaat kan worden geconcludeerd dat dijkverhoging in het traject tussen Wesel en Lobith alleen effecten heeft op afvoeren met herhalingstijden die vele malen hoger zijn dan die gebruikt worden voor de beoordeling van de primaire waterkeringen. Dit omdat de afvoergolven in het riviertraject tussen Andernach en Wesel dermate worden gedempt, dat zij door de waterkeringen in het traject van de dijkringen 42 en 48, zoals zij nu (in 2024) aanwezig zijn, gekeerd kunnen worden.

In relatie met klimaatverandering liggen de piekafvoeren van de onderzochte afvoergolven wel in het afvoerbereik dat relevant is voor de afvoerstatistiek zoals gebruikt wordt voor het ontwerpen van de primaire hoogwaterkeringen. De studie heeft duidelijk gemaakt dat bij dergelijke afvoeren naast de demping van de afvoergolven tussen Andernach en Wesel ook nog een reductie van de (piek-)afvoer van Lobith plaats vindt in het traject van de dijkringen 42 en 48 tussen Wesel en Lobith. Zo heeft de studie laten zien dat de maximale afvoer die Nederland via de Rijn bij Lobith (buitendijks) kan bereiken rond 1.700, 2.400, en 3.500 m<sup>3</sup>/s toeneemt bij dijkverhogingen van respectievelijk 50 cm, 70 cm en 100 cm ten opzichte van de maximale afvoerwaarde die voor de huidige situatie van de dijkhoogte (2024) wordt berekend. Echter om uit de resultaten van deze studie een nieuwe werklijn af te leiden, zijn wel golven in het goede afvoerbereik gekozen maar is het aantal rekenresultaten te klein.

Daarnaast worden de resultaten vertroebeld doordat ook de dijk op de linkeroever van de Rijn vanaf ongeveer Wesel-Lippemonding tot aan de hoge grond ten zuidoosten van Xanten verhoogd is bij de dijkverhogingsscenario's. Het wordt daarom aanbevolen dit dijktraject niet aan te passen bij de analyse van de scenario's met noodmaatregelen voor de klimaatwerklijnen voor KNMI'23-scenario's. De dijkverhogingen van 50, 70, en 100 cm van deze studie komen dan overeen met noodmaatregelsscenario's (zandzakken) voor de klimaatwerklijnen voor BOI2023 door de hoogwaterkeringen te verhogen met 50, 70 en 100 cm (zie ook de aanbevelingen van deze studie).

#### 4.6 Hoe verandert de invloed van ventielwerking in de tijd volgens de verschillende klimaatscenario's?

Het moment waarop aftopping van de afvoergolven door overstromingen ('ventielwerking') begint, heeft bij verschillende (KNMI'14-) klimaatscenario's en zichtjaren een verschillende kans van voorkomen. Voor het zichtjaar 2050 is de kans van voorkomen voor aftopping door overstromingen 1/1.000 tot 1/2.000 bij de verschillende klimaatscenario's. Voor het zichtjaar 2085 is de spreiding van de kans van voorkomen van aftopping door overstromingen groter, namelijk tussen de 1/500 tot 1/4.000 jaar. De kans van voorkomen neemt dus aanzienlijk toe ten opzichte van het huidige klimaat (referentie) met een kans van <1/30.000 jaar. Bij alle hier genoemde getallen is rekening gehouden met de modelonzekerheid van GRADE.

## 5 Aanbevelingen

Tijdens de uitvoering van de studie is gebleken dat het systeem van afvoer op de rivier en overstroming van binnendijks gebied, en de wisselwerking tussen beide, in het grensgebied van de Rijn complexer reageert dan tot nu toe werd gedacht. Met name de situatie net bovenstrooms van dijkkring 42 speelt een rol bij mogelijke overstromingen van dijkkring 42 die eerder niet was bekend. Door deze complexiteit zijn er daarom extra vragen opgekomen, welke hieronder worden behandeld en waarvoor aanbevelingen voor de toekomst gedaan worden.

### 5.1 Schematisatie van dijkdoorbraaklocaties

In de gebruikte modelschematisatie in deze studie is (maximaal) één dijkdoorbraak naar dijkkring 42 en één dijkdoorbraak naar dijkkring 48 geschematiseerd, waarbij dijkdoorbraken alleen plaatsvinden nadat de waterstand in de rivier op de dijkdoorbraaklocatie de kruinhoogte van de dijk bereikt. Bij heel extreme afvoergolven betekent dat dat op andere locaties dijkovertopping plaatsvindt hoewel daar volgens het idee dat dijken doorbreken zodra de rivierwaterstand de kruinhoogte bereikt de dijk door zou moeten breken. Deze bevinding roept de vraag op of we niet meer dijkdoorbraaklocaties moeten toevoegen. Het voorliggende onderzoek en eerder uitgevoerde onzekerheidsanalyses (Geertsema et al., 2022) laten zien dat het voor de afvoer bij Lobith nauwelijks uitmaakt of de dijken alleen overstromen (geen bres) of dat er bressen ontstaan. In het laatste geval zal er minder dijkoverstromen plaatsvinden. Netto heeft dit dan een vergelijkbaar effect op de maximale afvoer bij Lobith. Echter in hoeverre deze conclusie zou kunnen veranderen als er nog meer dijkdoorbraken in de buurt van elkaar liggen, zou in een vervolgonderzoek verder kunnen worden uitgezocht. Dit is dan ook een aandachtspunt voor toekomstige onzekerheidsanalyses en herschematisaties van het hydraulisch model in kader van het GRADE-project.

### 5.2 Onzekerheidsanalyse respectievelijk schematisatie van scenario's voor noodmaatregelen

Deze studie heeft laten zien dat de (piek-)afvoeren bij Lobith aanzienlijk kunnen wijzigen afhankelijk van de gehanteerde dijkhoogte in het traject tussen Wesel en Lobith. Dit omdat de uitwisseling tussen water in de rivier en de binnendijkse overstromingsvlakte belemmerd wordt afhankelijk van de dijkhoogte. Zoals verwacht neemt bij toenemende dijkhoogte de dijkoverstroming af. De daardoor veroorzaakte overstroming van de binnendijkse gebieden van dijkkring 42 en 48 neem tevens af en de afvoer bij Lobith neemt toe. Een bijzonder punt is dat in deze studie ook de dijk aan de overkant van Wesel ter hoogte van de Wesel-Lippemonding en de hoge grond ten zuidoosten van Xanten meegenomen is bij het verhogen van de dijken in de dijkhoogtescenario's. Dit stuk dijk ligt bovenstrooms van dijkkring 42 en maakt geen deel uit van de hoogwaterkering van dijkkring 42. Door dit dijkstuk te verhogen wordt het terugstromen van water vanuit de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 terug naar de Rijn in toenemende mate belemmerd, en bij oneindig hoge dijken helemaal verhinderd. Verwacht wordt dat bij het niet meenemen van dit dijkstuk bij de dijkverhogingsscenario's de afvoer bij Xanten hoger wordt en dat minder water doorstroomt van de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 naar dijkkring 42. De maximale afvoer die Lobith überhaupt kan bereiken via de rivier zelf wordt hierdoor niet of nauwelijks beïnvloed. Dit komt doordat de hogere afvoeren bij Xanten tot sterkere overstromingen tussen Xanten en Lobith zullen leiden zodat bij Lobith ongeveer dezelfde piekafvoeren worden bereikt.

Bij het opstellen van de afvoerstatistiek die bij de KNMI'23-scenario's hoort zullen werklijnen opgeleverd worden voor scenario's van noodmaatregelen, waarbij de dijken met respectievelijk 50, 70 en 100 cm verhoogd worden door middel van zandzakken. Naar aanleiding van de boven beschreven bevindingen moet goed worden nagedacht of het dijktraject tussen Wesel-Lippemonding en de hoge grond bij Xanten wel of niet moet worden meegenomen bij de schematisatie van de noodmaatregelen.

### 5.3 Onderzochte dijkverhogingsscenario's

In deze studie is een aantal dijkverhogingsscenario's bestudeerd, waaruit in beperkte mate conclusies kunnen worden getrokken. Zo heeft deze studie laten zien dat verhoogde dijken tussen Wesel en Lobith leiden tot hogere afvoeren bij Lobith en vervolgens tot meer overstromingen nabij Westervoort, indien de IJsseldijk bij Westervoort niet gelijktijdig verhoogd wordt. Dit maakt duidelijk dat een verhoging van dijken in Duitsland samen moet gaan met een verhoging van dijken in Nederland, waarschijnlijk niet alleen bij Westervoort maar in grote delen van Nederland.

Ook dijkverhogingen bovenstrooms van dijkkring 42 en 48 kunnen invloed hebben op afvoeren in de rivier bij Lobith en overstromingen in Nederland. Een goed voorbeeld hiervan zijn de resultaten uit de dijkverhogingsscenario's waar ook een dijkstuk bovenstrooms van dijkkring 42 is verhoogd. Hierdoor stroomt met toenemende dijkhoogte meer water van de binnendijkse overstromingsvlakte bovenstrooms van dijkkring 42 naar dijkkring 42 (en minder terug naar de Rijn) en dat leidt daar tot omvangrijkere overstromingen.

Dit laat zien dat bij dijkverhogingen de effecten op het volledige systeem moeten worden beschouwd, niet alleen in het gebied van de grensoverschrijdende dijkkringen 42 en 48, maar ook verder bovenstrooms en verder benedenstrooms van dit gebied.

Hierdoor was deze studie niet uitgebreid genoeg om de voor- en nadelen van dijkverhogingsmaatregelen en de effectiviteit daarvan te begrijpen. Het kan daarom interessant zijn om in een vervolgstudie de effectiviteit van de beschreven en aanvullende maatregelen te bestuderen bij deze extreme gebeurtenissen, vooral omdat de verwachting is dat deze gebeurtenissen in de toekomst vaker kunnen voorkomen.

### 5.4 Actualisering afvoerstatistiek

In deze studie hebben we gezien dat de afvoeren op de Rijn en bijhorende herhalingstijden significant zouden kunnen wijzigen door klimaatverandering. Mogelijkerwijs worden er tevens maatregelen genomen, zoals dijkverhoging op het traject van Wesel tot Lobith. In de komende jaren zullen deze aspecten onder aandacht blijven onder andere door genomen en geplande maatregelen langs de Rijn en voortschrijdend inzicht op het gebied van klimaatverandering. Het blijft daarom belangrijk om de afvoerstatistiek periodiek te herzien en de nieuwste veranderingen en inzichten op te nemen, zoals dat bij het wettelijke Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) ook gedaan wordt.

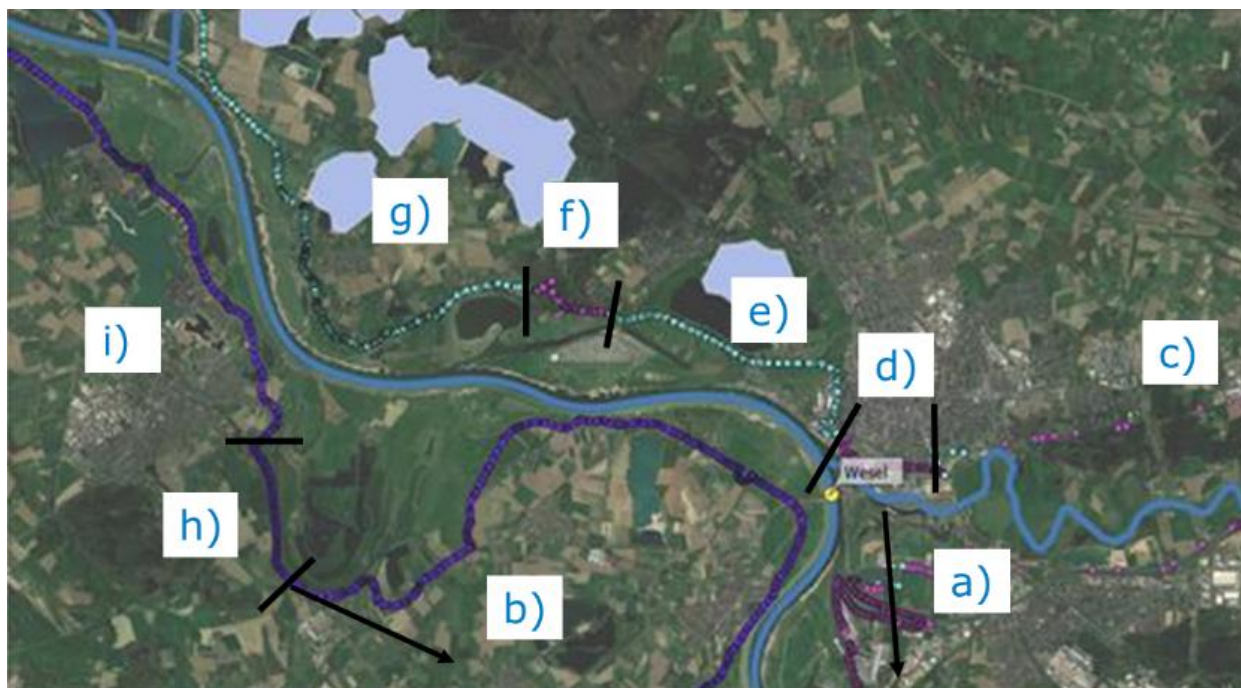
# Referenties

- Becker, A. (2020), 1D2D model of the Lower Rhine and the upper Dutch Rhine branches between Andernach and Nijmegen, Arnhem and Zutphen. Deltares report 11205237-002-ZWS-0001.
- Geertsema, T., Hutten, R., Hegnauer, M. (2022), Uncertainty analysis SOBEK3-1D2D model of the Rhine, Deltares-rapport 11205237-003-ZWS-0010, July 2022.
- Hegnauer, M. (2016), Werklijnen o.b.v. KNMI'14 scenario's, Memo Deltares 1230045-002-ZWS-0001, maart 2016.
- Hegnauer, M., Beersma, J., van den Brink, H., Leander, R. (2022), Generator of Rainfall and Discharge Extremes for the Rhine, Final report of GRADE-Rhine version 3.0, Deltares-rapport 11205237-003-ZWS-0016, July 2022.
- Maaskant, B. (2020), PvA voor vragen ventielwerking grensoverschrijdende dijkringen, HKV-memo PR4052.10, juli 2020.
- Maaskant, B., Barneveld, H., Vermeer, K. (2019), Overstromingsrisico grensoverschrijdende dijkringen aan de Niederrhein, eindrapport, HKV-rapport PR3112, juni 2019.
- Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L., Beersma, J. (2015), Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of Rhine and Meuse, comparison with earlier scenario studies, eindrapport, Deltares-rapport, 1220042-000.

# Bijlagen



# A Schematisatie dijkverhogingsscenario's



## 1 Bovenstrooms van Wesel

- a) Rechteroever: modelschematisatie hetzelfde als in het basismodel voor alle scenario's
- b) Linkeroever: modelschematisatie hetzelfde als in het basismodel voor alle scenario's

## 2 Tussen Wesel en Lobith

Rechteroever

- c) Rechteroever Lippe:
  - in het basismodel geschematiseerd als hoge gronden
  - in deze studie wordt dit gebied omgezet naar oneindig hoge dijken
- d) Stadsgebied van Wesel deel 1<sup>3</sup>:
  - in het basismodel geschematiseerd als hoge gronden
  - in deze studie wordt dit gebied omgezet naar oneindig hoge dijken
- e) Stadsgebied van Wesel deel 2 en Ausee tot hoge grond ten oosten van Bislich<sup>3</sup>:
  - in het basismodel geschematiseerd als dijk
  - laten als in het basismodel: afhankelijk van scenario verhogen met 0,5; 0,7; 1,0 m
  - zorg voor goede aansluiting van dijk met hoge grond ten oosten van Bislich<sup>3</sup>
- f) hoge grond ten oosten van Bislich
  - in het basismodel geschematiseerd als hoge gronden
  - laten als in het basismodel
  - zorg voor goede aansluiting van waterkeringen vanaf Bislich, de waterkering Wesel deel 2 en Ausee aan de hoge grond

<sup>3</sup> Document 425002z157\_DVP\_Übersichtskarten\_Bezirke-Bislich.pdf laat zien dat het beheersgebied van Deichverband Bislich-Landesgrenze begint bij de hoge grond ten oosten van Bislich. Uit de berekeningen van 2021 blijkt dat overtoppingen van hoogwaterkeringen in het stadsgebied van Wesel achterlangs ook kunnen stromen naar dijkkring 48. Daarom is traject e) "Stadsgebied van Wesel deel 2 en Ausee tot hoge grond ten oosten van Bislich" meegenomen in de dijkverhogingsscenario's.

- g) vanaf hoge grond ten oosten van Bislich tot Lobith (incl. Nederlandse dijken tussen de grens en Lobith)<sup>3</sup>:
  - in het basismodel geschematiseerd als dijken tot Nederlandse grens
  - afhankelijk van het scenario verhogen met 0,5; 0,7;1,0 m
  - zorg voor goede aansluiting dijk aan hoger grond ten oosten van Bislich

#### Linkeroever

- h) hoge grond ten zuidoosten van Xanten
  - in het basismodel geschematiseerd als dijk
  - schematiseren dat het werkt als hoge grond. Deze hoge grond loopt steil naar boven (15-20 m)
- i) Waterkering vanaf hoge grond ten zuidoosten van Xanten tot landsgrens met Nederland bij Millingen
  - nu geschematiseerd als dijken
  - afhankelijk van het scenario verhogen met 0,5; 0,7;1,0 m
  - zorg ervoor dat de dijk goed aansluit op de hoge grond ten zuidoosten van Xanten ook bij verhoogde dijken

### 3 Benedenstrooms van Lobith

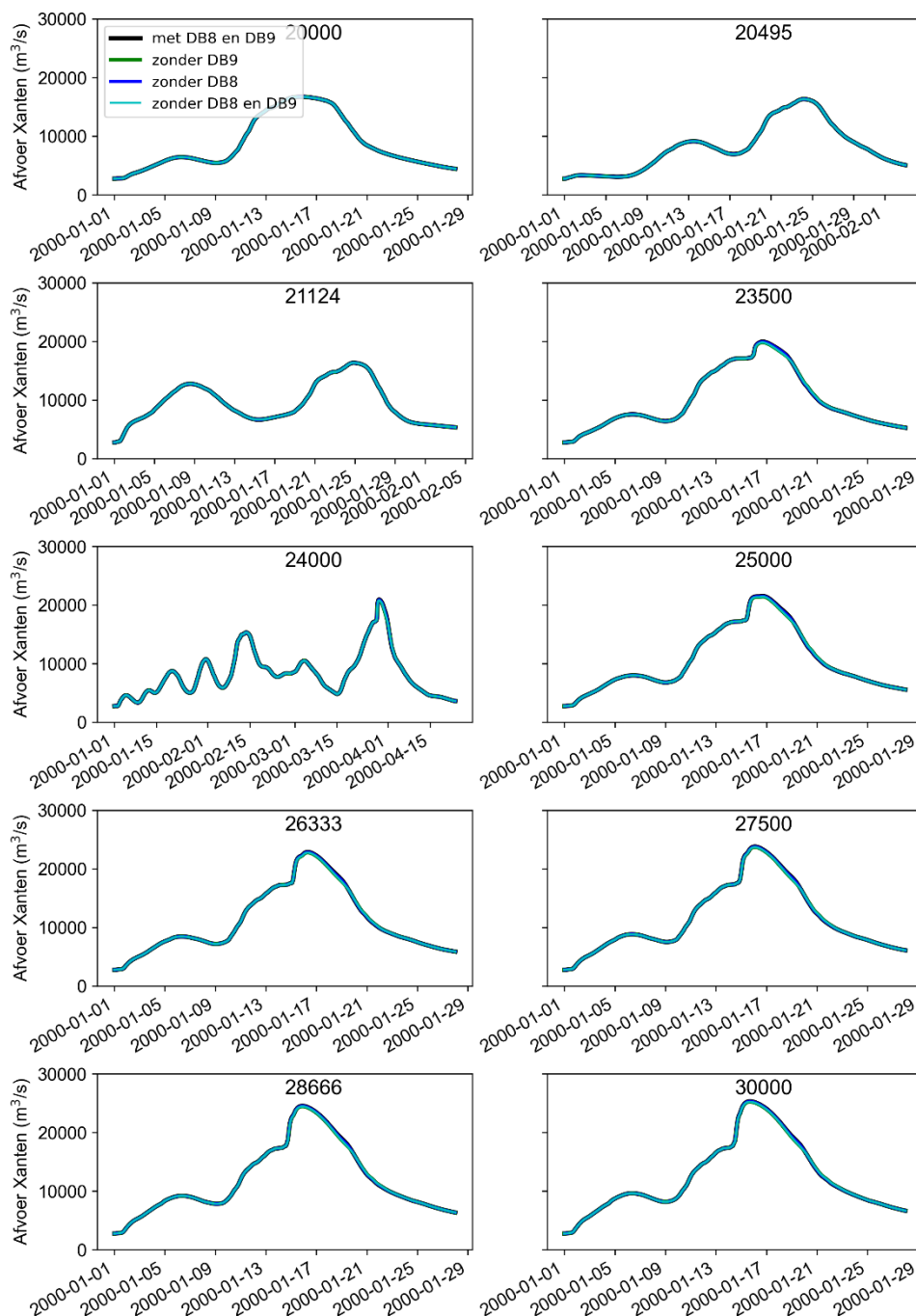
- j) Rechteroever: schematisatie zo laten als het is voor alle scenario's
- k) Linker oever: schematisatie zo laten als het is voor alle scenario's

## B Filmpjes overstromingspatronen

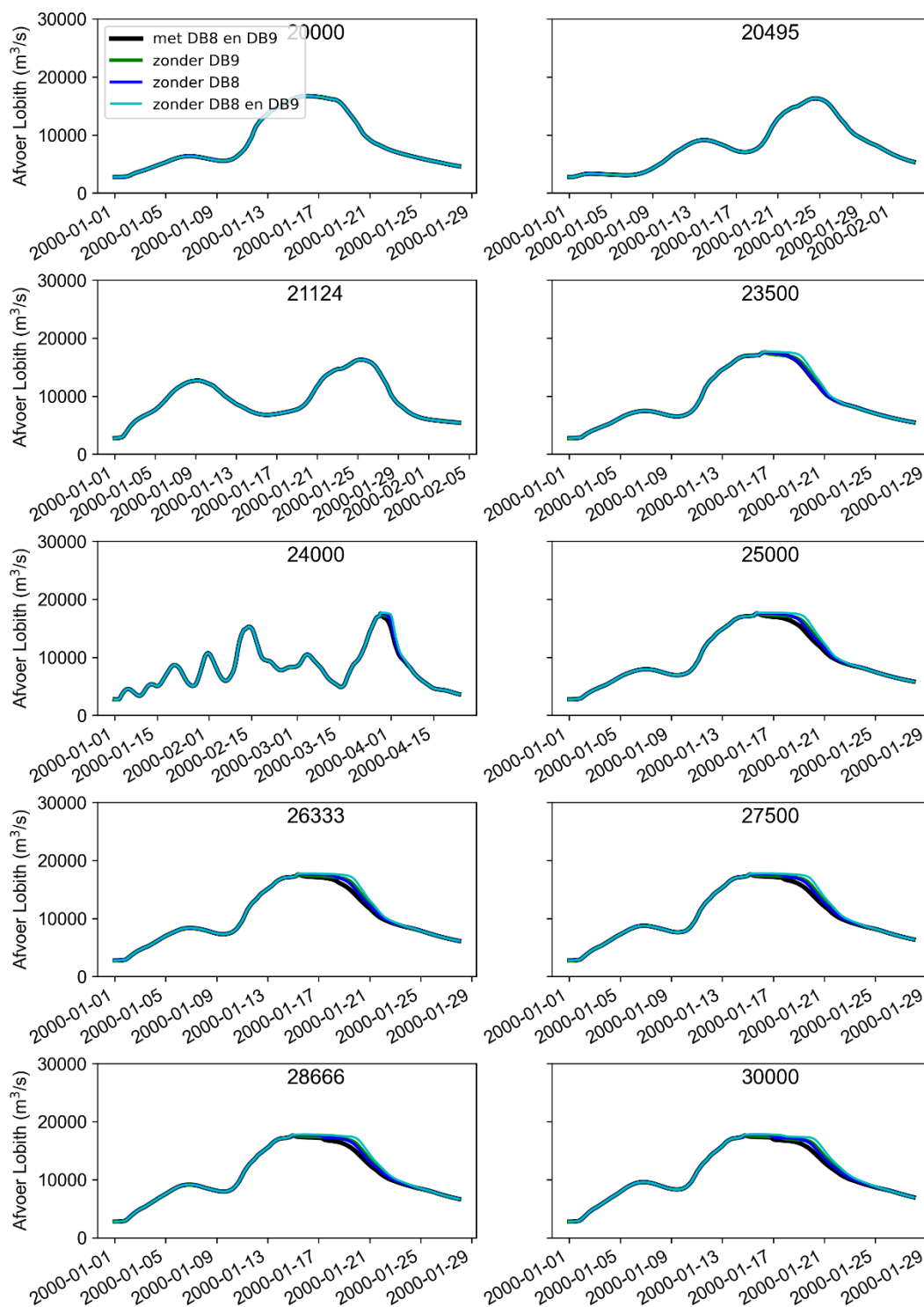
Zie meegeleverd bestand "Bijlage B – Filmpjes\_overstromingspatronen.zip"

# C Afvoergolven Xanten en Lobith

## C.1 Dijkdoorbraakscenario's

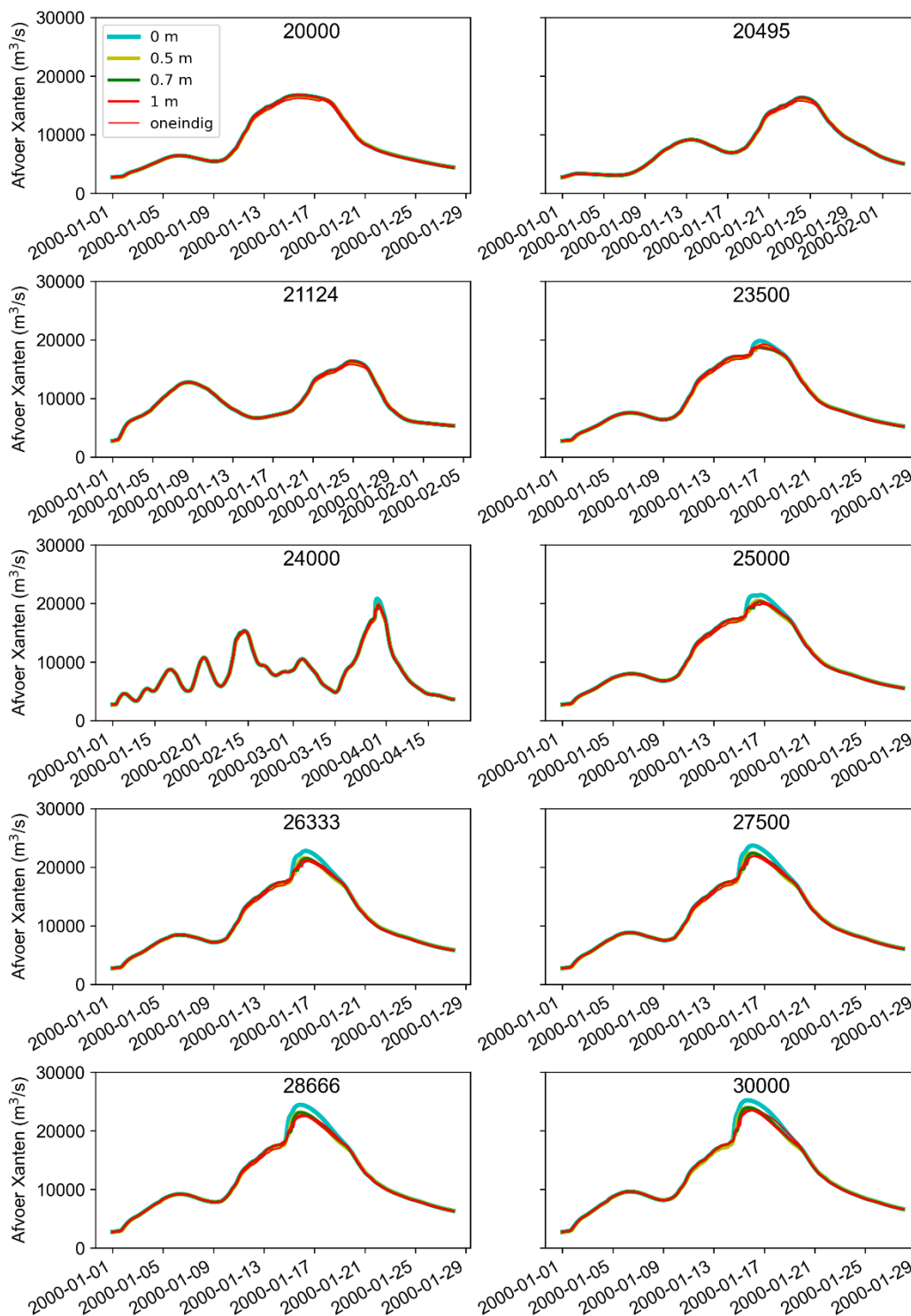


Figuur C-1: De afvoer bij Xanten voor de verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder de dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48).

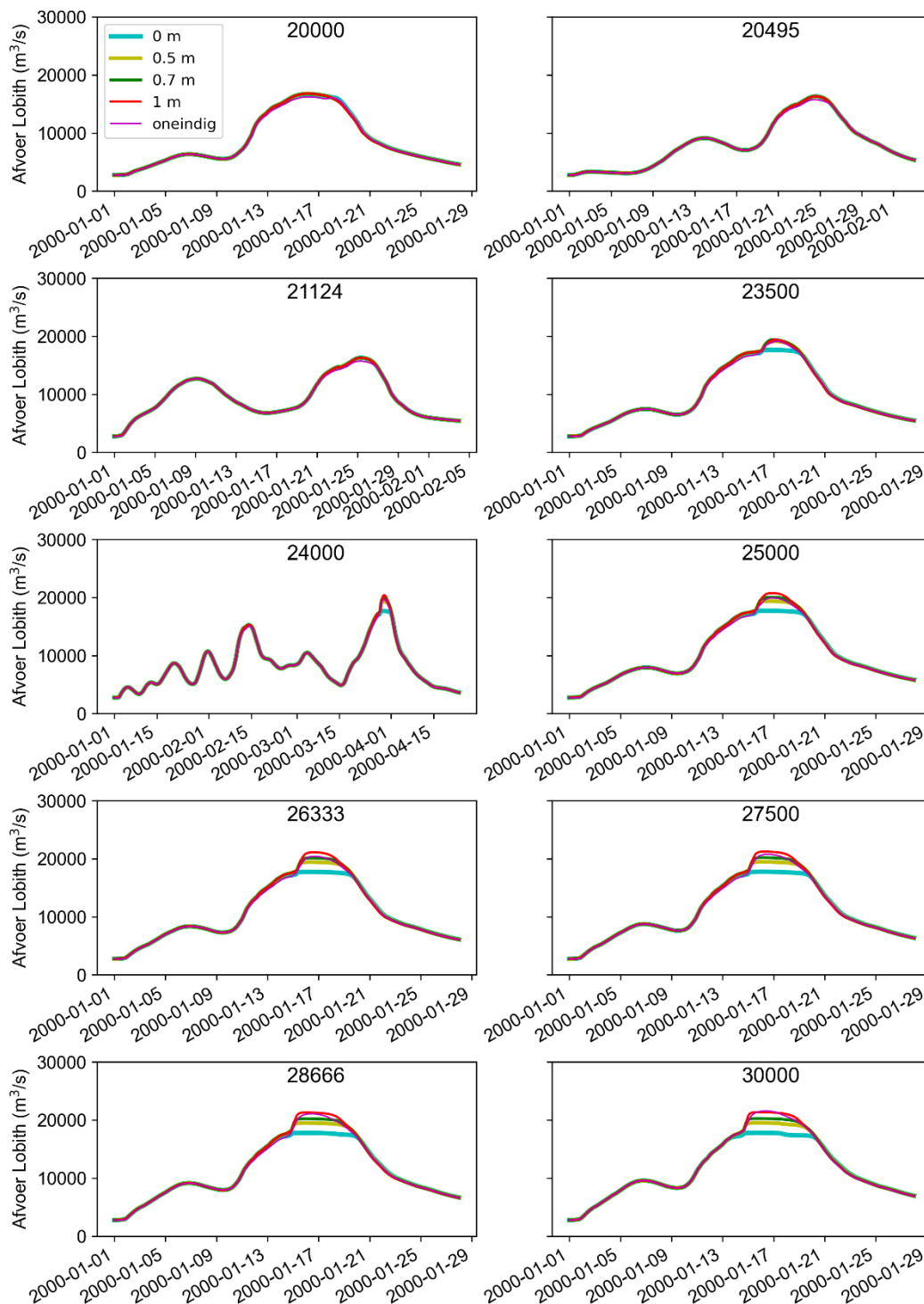


Figuur C-2: De afvoer bij Lobith voor de verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder de dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48).

## C.2 Dijkverhogingsscenario zonder dijkdoorbraken

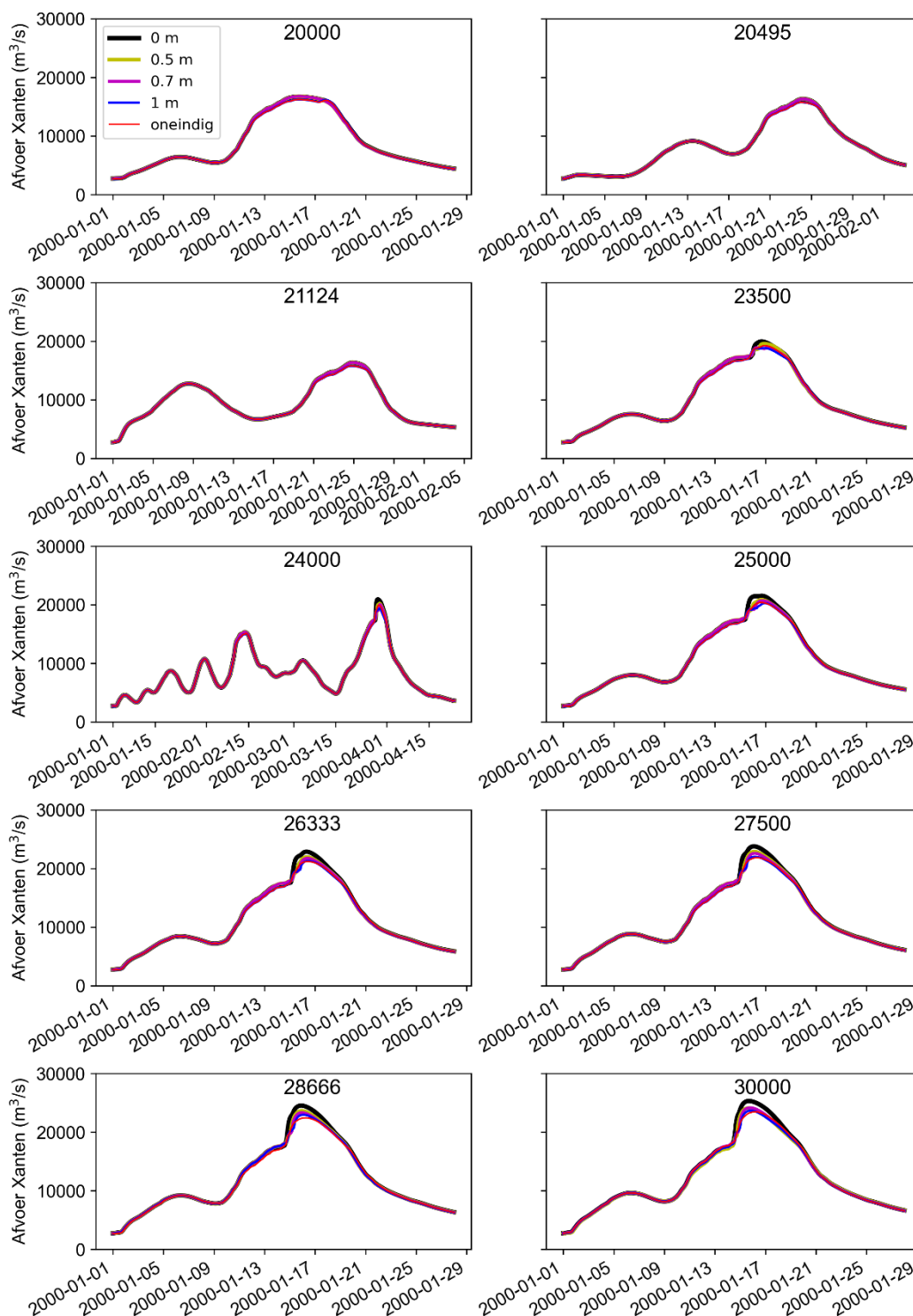


Figuur C-3: De afvoer bij Xanten voor de verschillende dijkhoogtescenario's (zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst met respectievelijk een verhoging van de dijken van 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.



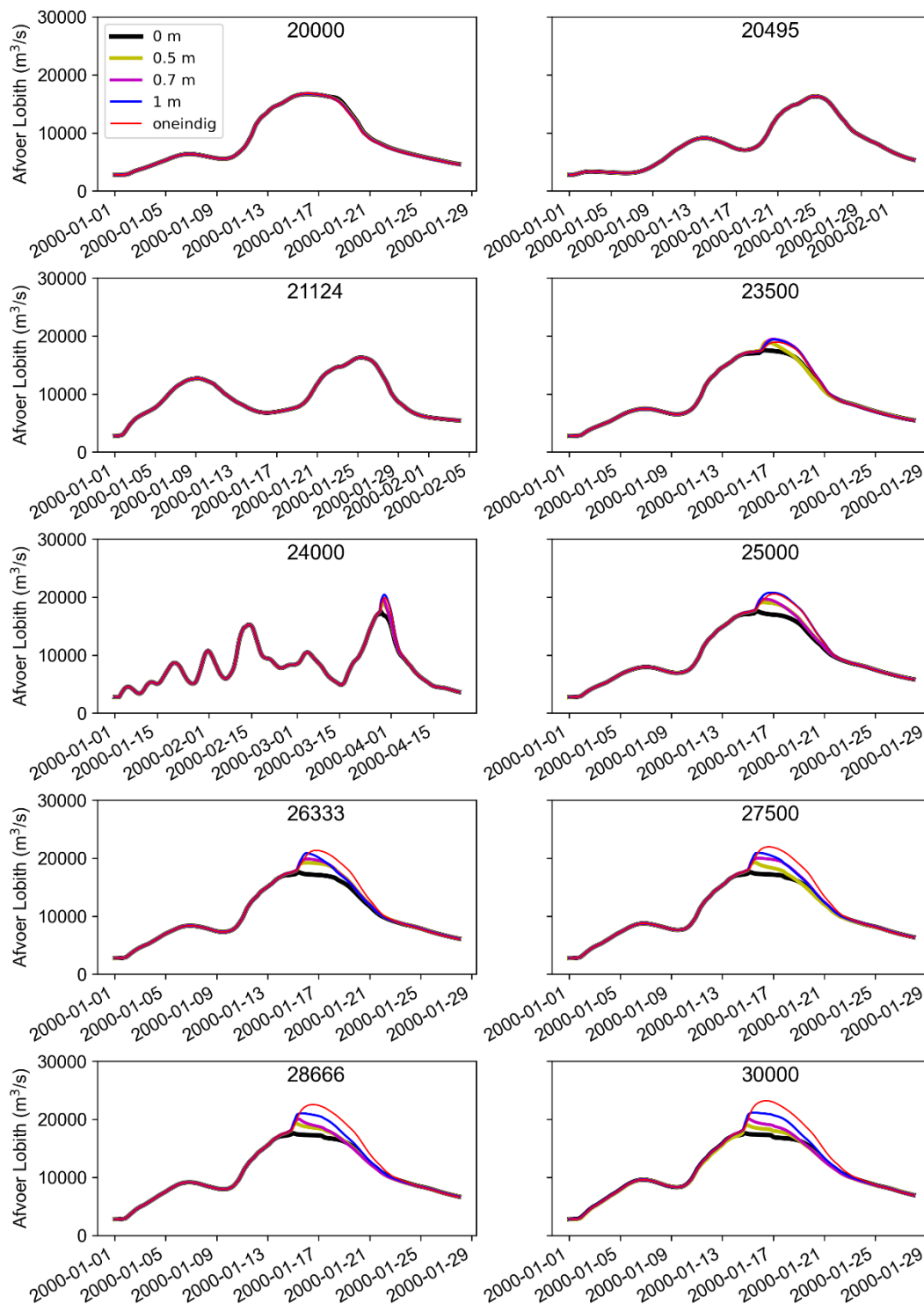
Figuur C-4: De afvoer bij Lobith voor de verschillende dijkhoogtescenario's (zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst met respectievelijk een verhoging van de dijken van 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

### C.3 Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken



Figuur C-5: De afvoer bij Xanten voor de verschillende dijkhoogtescenario's (met dijkdoorbraken DB8 en DB9). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken van respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

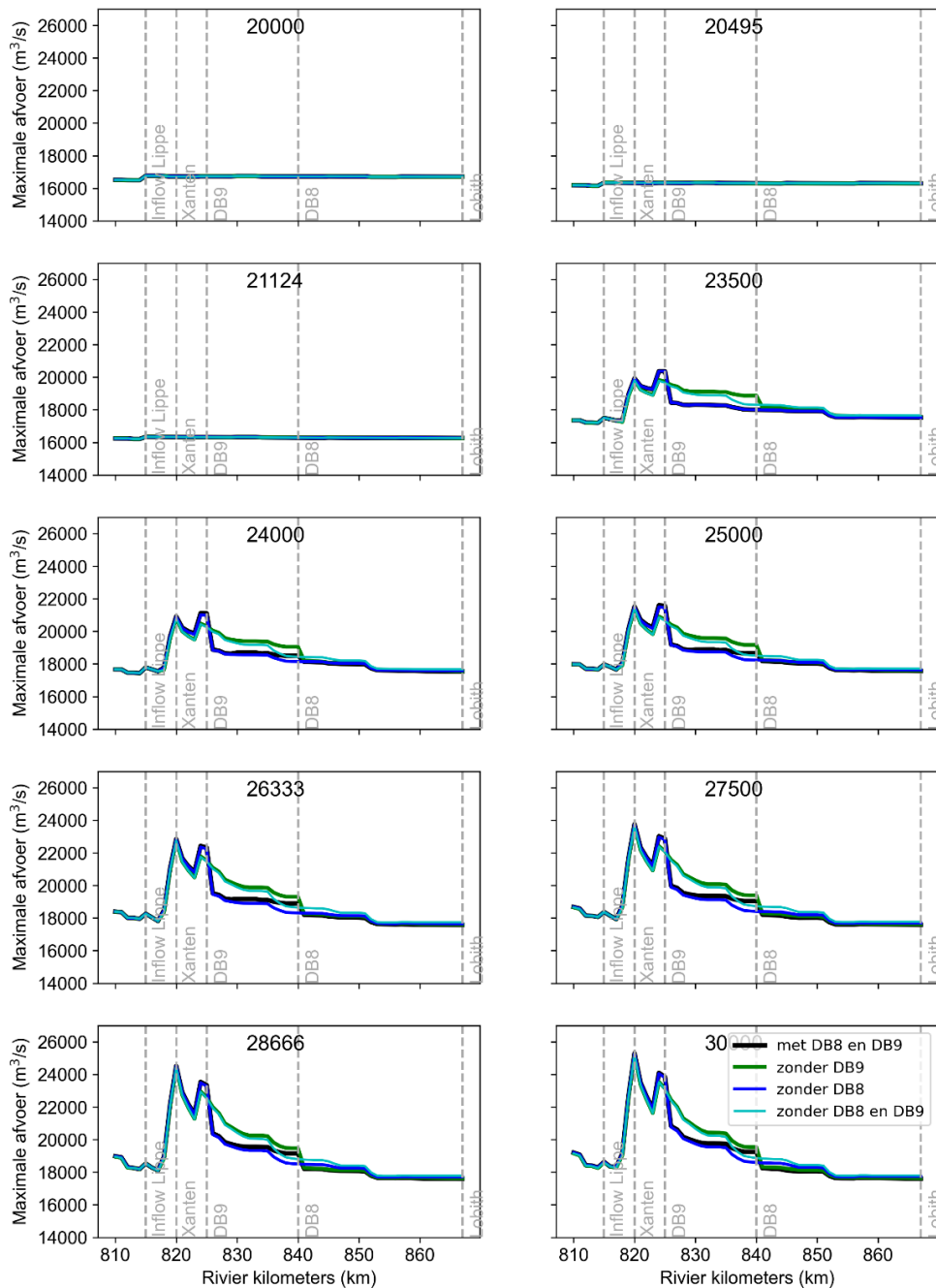




Figuur C-6: De afvoer bij Lobith voor de verschillende dijkhoogtescenario's (met dijkdoorbraken DB8 en DB9). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken van respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

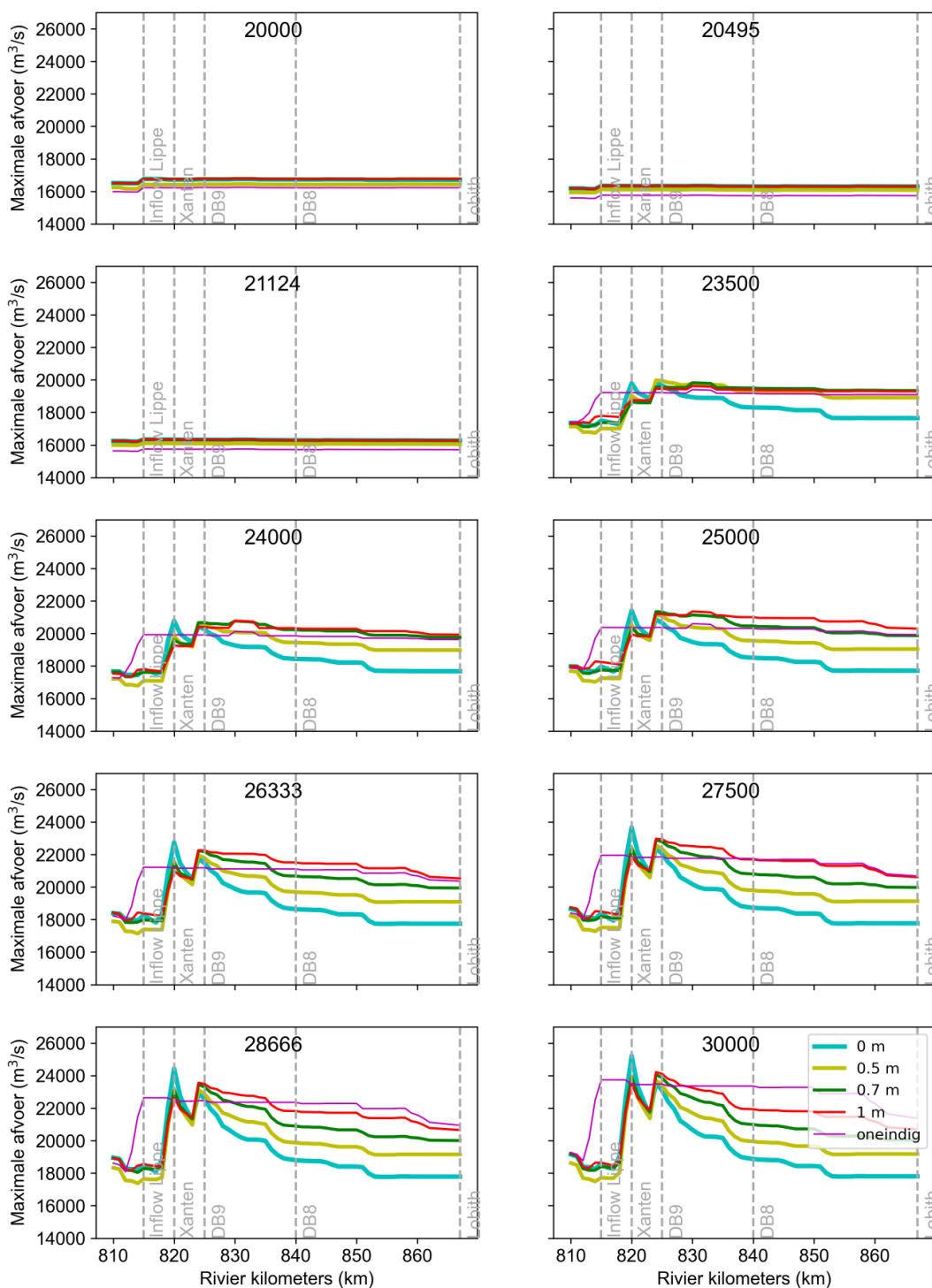
# D Langsprofielen van afvoer

## D.1 Dijkdoorbraakscenario's



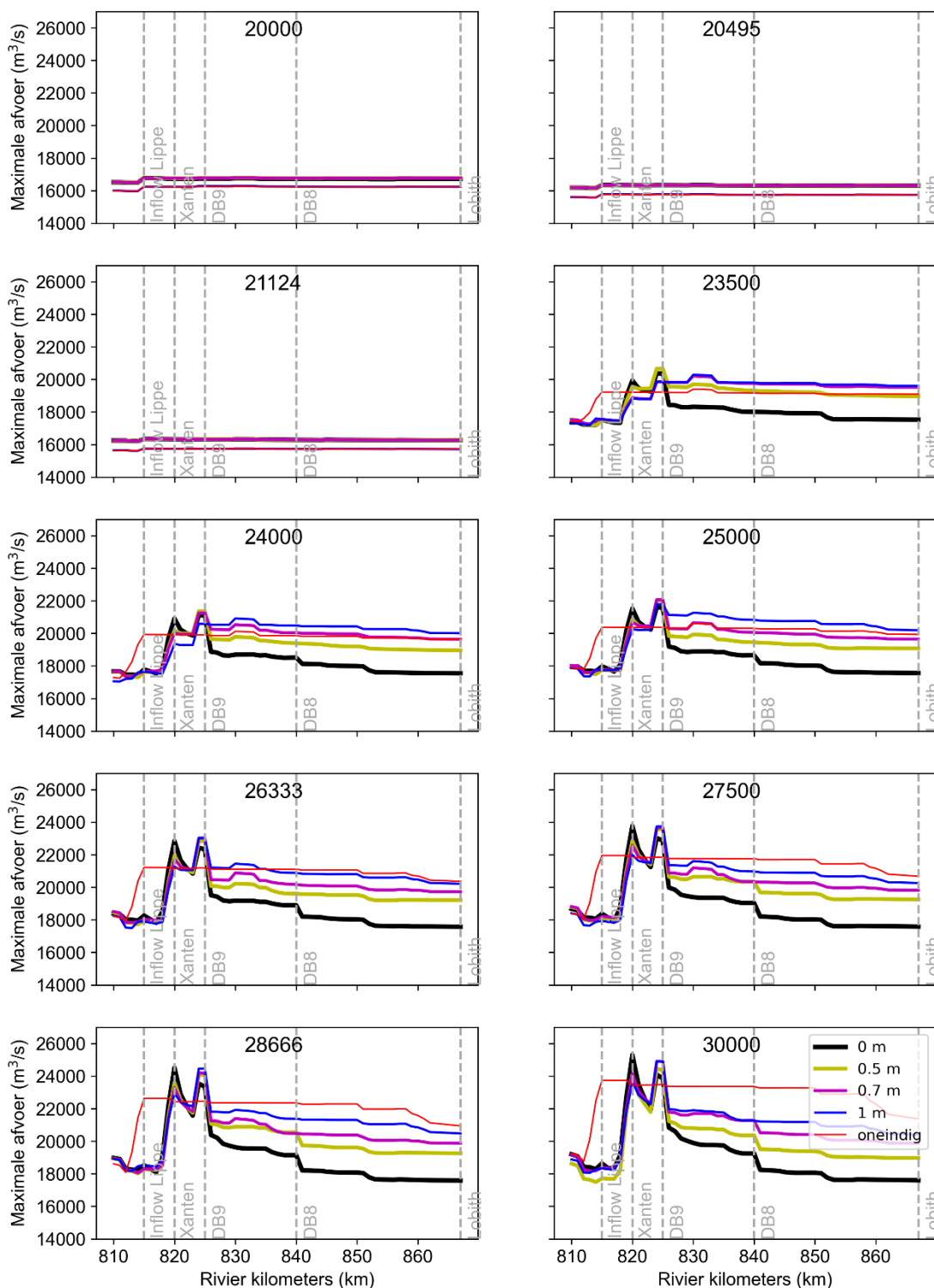
Figuur D-1: De maximum afvoer op het traject tussen Wesel en Lobith voor verschillende dijkdoorbraakscenario's. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder de dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48).

## D.2 Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken



Figuur D-2: De maximum afvoer voor verschillende dijkhoogtescenario's zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9 op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleur geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst voor verhogingen van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

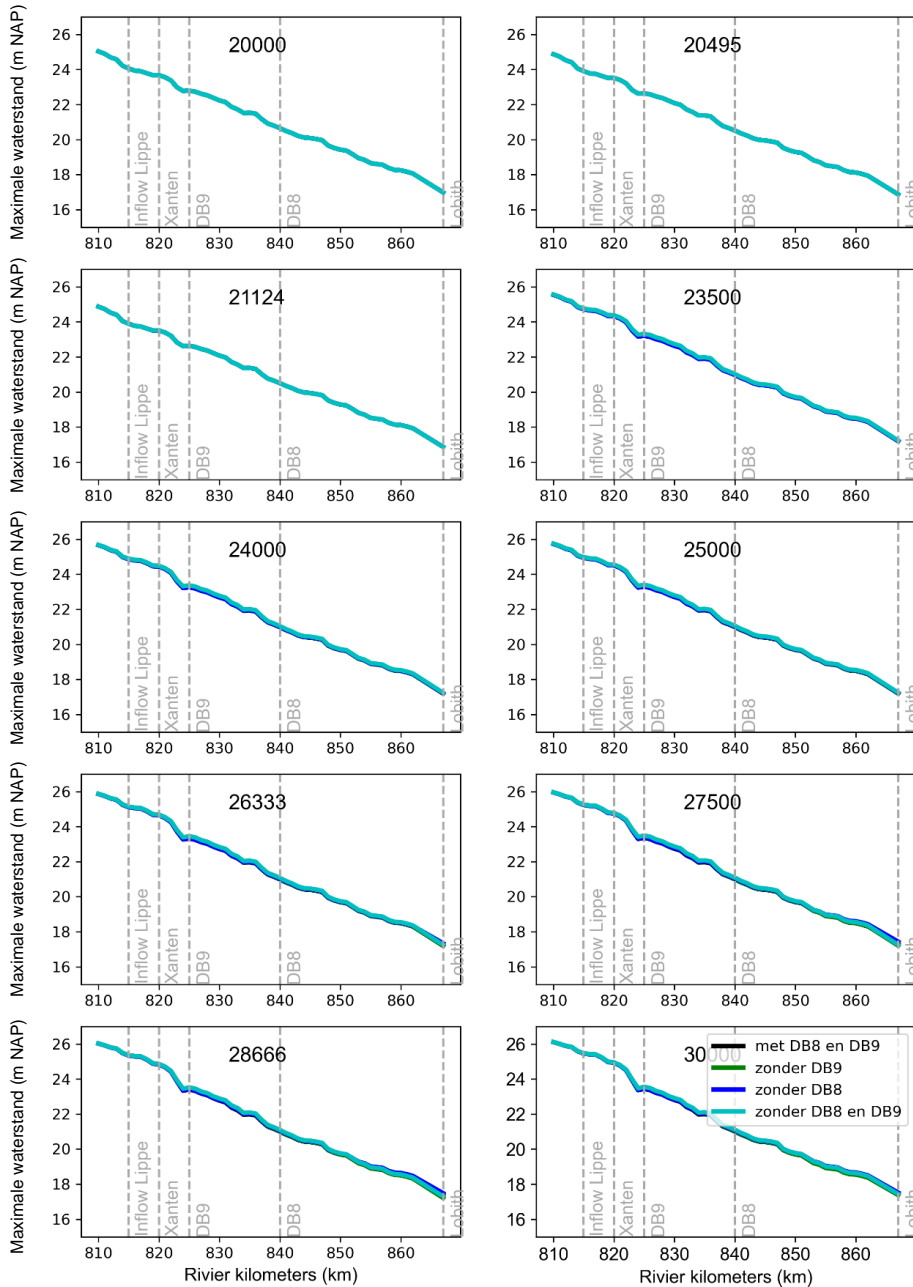
### D.3 Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken



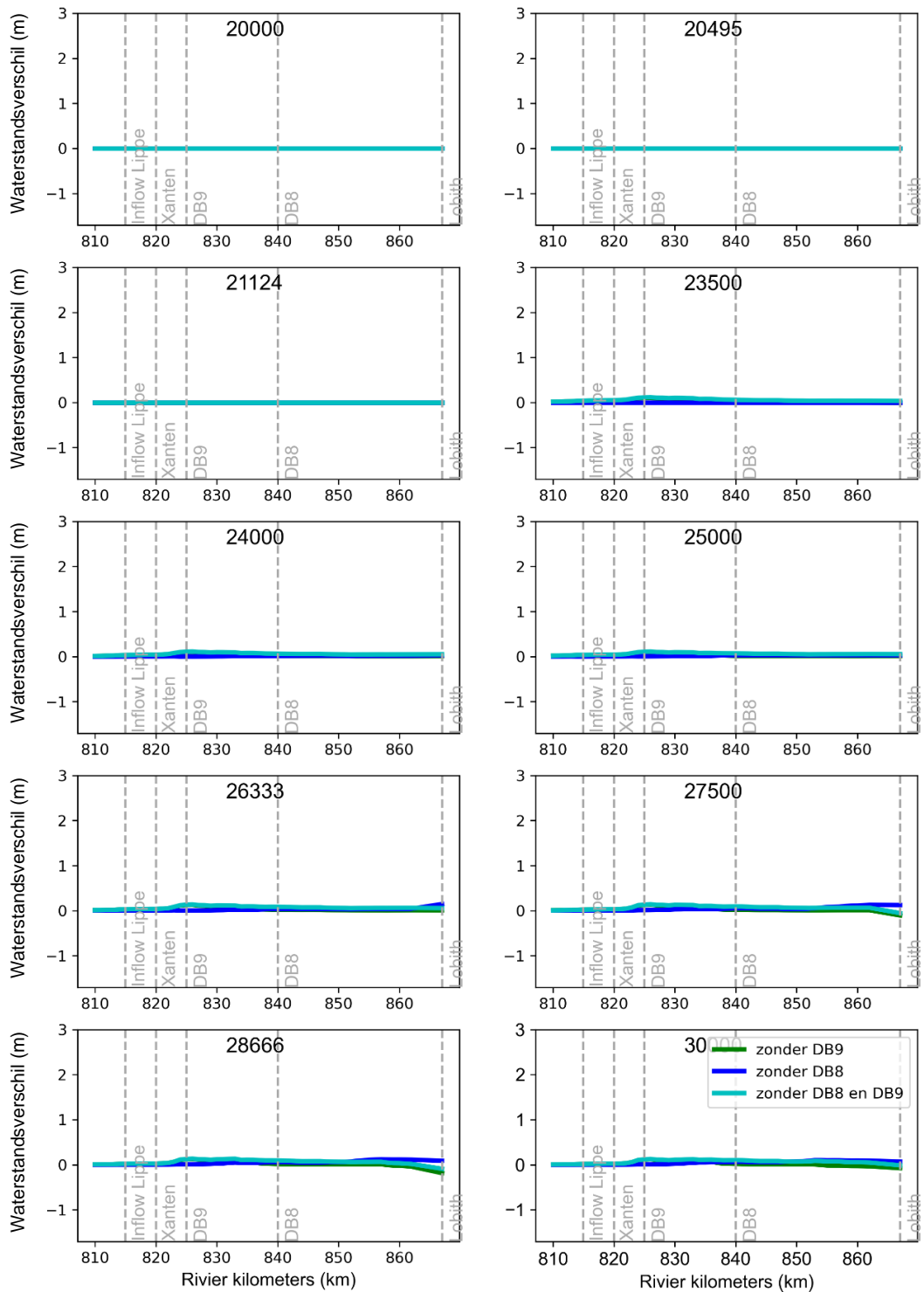
Figuur D-3: De maximum afvoer voor verschillende dijkhoogtescenario's met dijkdoorbraken DB8 en DB9 op het traject tussen Lobith en Wesel. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.

# E Langsprofielen van waterstanden en waterstandsverschillen

## E.1 Dijkdoorbraakscenario's

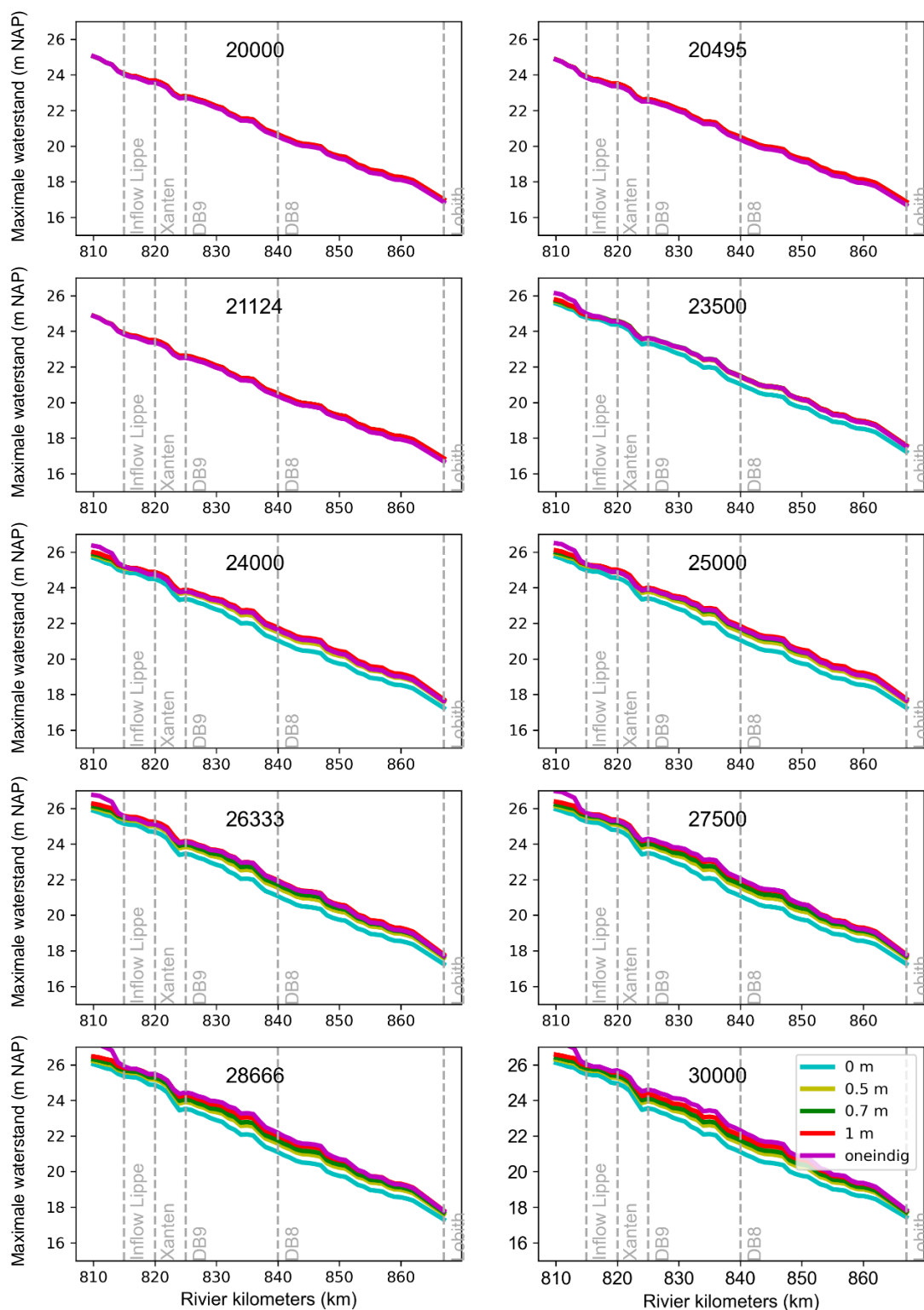


Figuur E-1: De maximum waterstand op het traject tussen Wesel en Lobith voor verschillende dijkdoorbraakscenario's. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder de dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48).

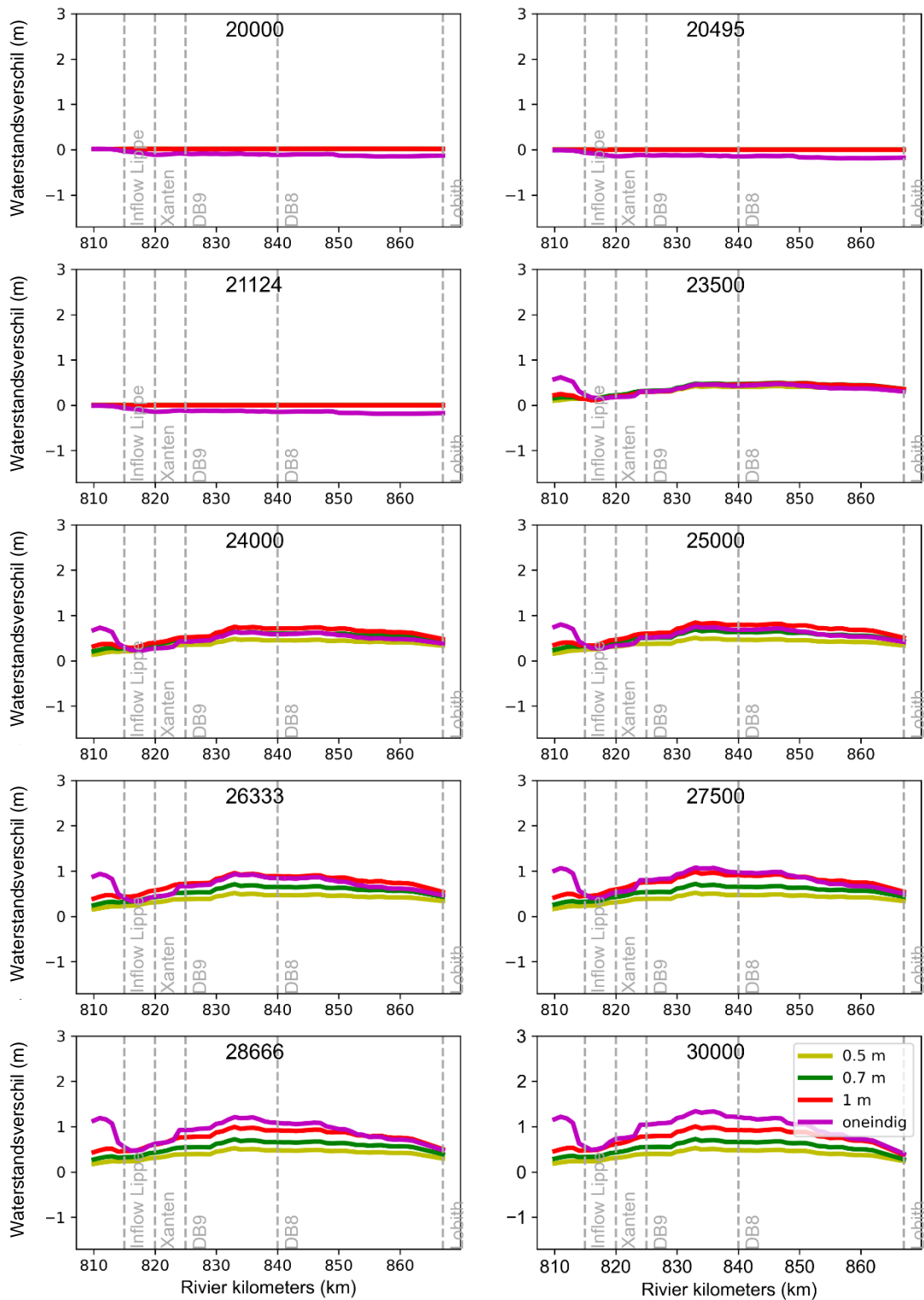


Figuur E-2: Het verschil tussen de waterstanden van het scenario met alle dijkdoorbraken (DB8 en DB9) en de verschillende andere dijkdoorbraakscenario's op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleur geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48). Positieve waarden geven een waterstandsverhoging ten opzichte van het scenario met alle dijkdoorbraken DB8 en DB9 aan, negatieve waarden een verlaging.

## E.2 Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken



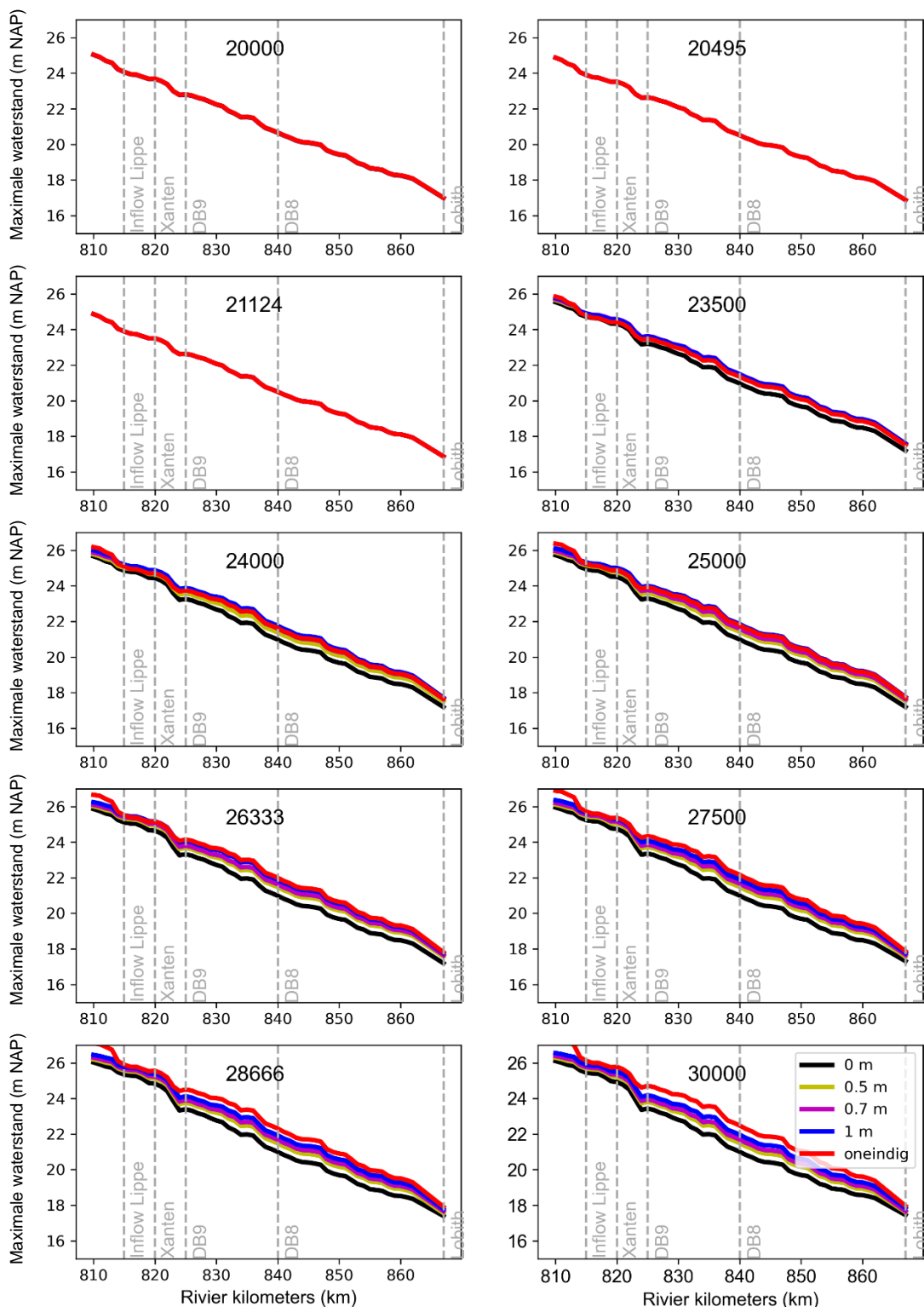
*Figuur E-3: De maximum waterstand voor verschillende dijkhoogtescenario's zonder dijkdoorbraken (DB8 en DB9) op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.*



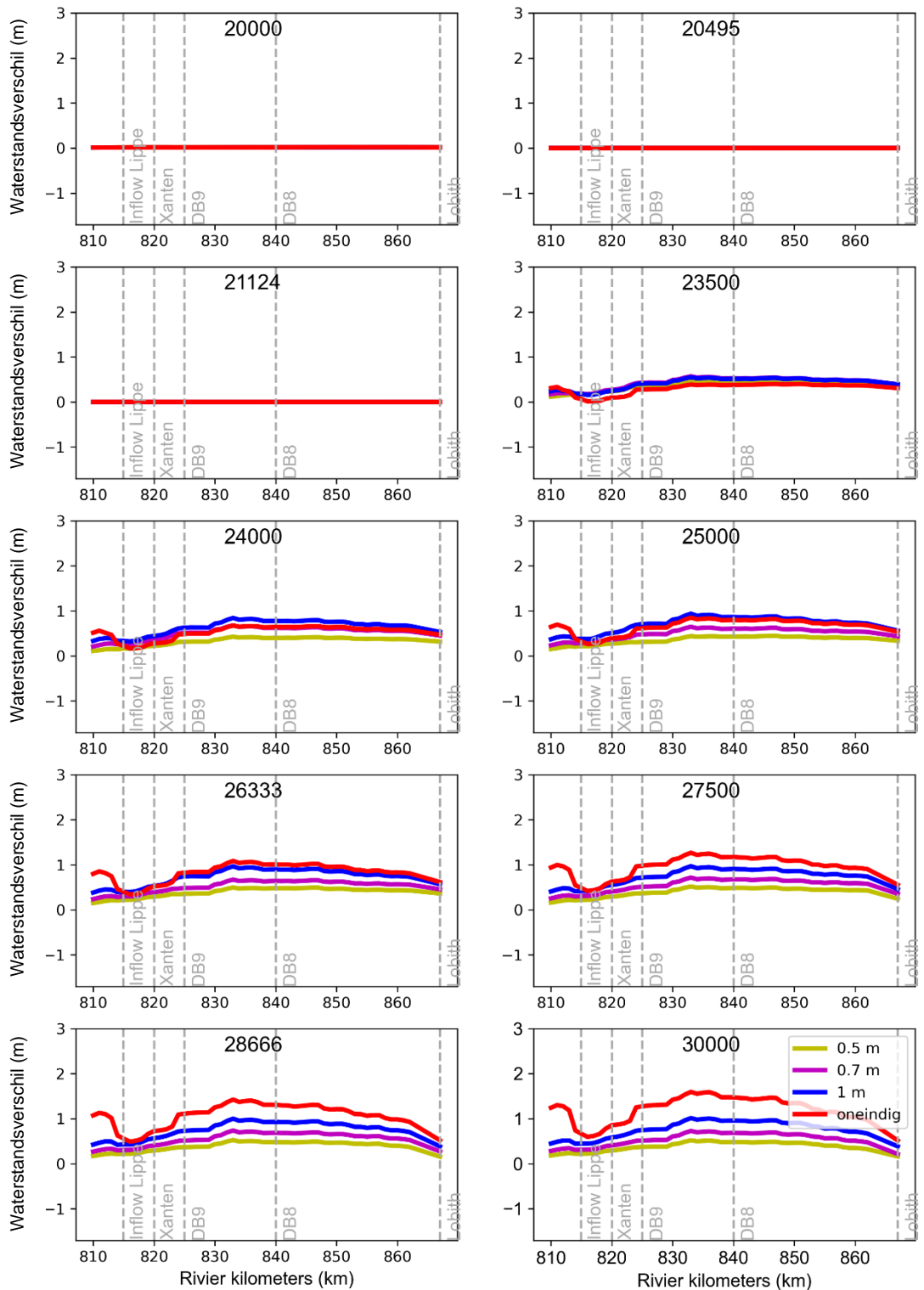
Figuur E-4: Het verschil tussen de waterstanden van het scenario zonder dijkverhoging en de verschillende dijkverhogingsscenario's (alle zonder dijkdoorbraken DB8 en DB9) op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter. Positieve waarden geven een waterstandsverhoging ten opzichte van het scenario zonder dijkverhoging aan, negatieve waarden een verlaging.



## E.3 Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken



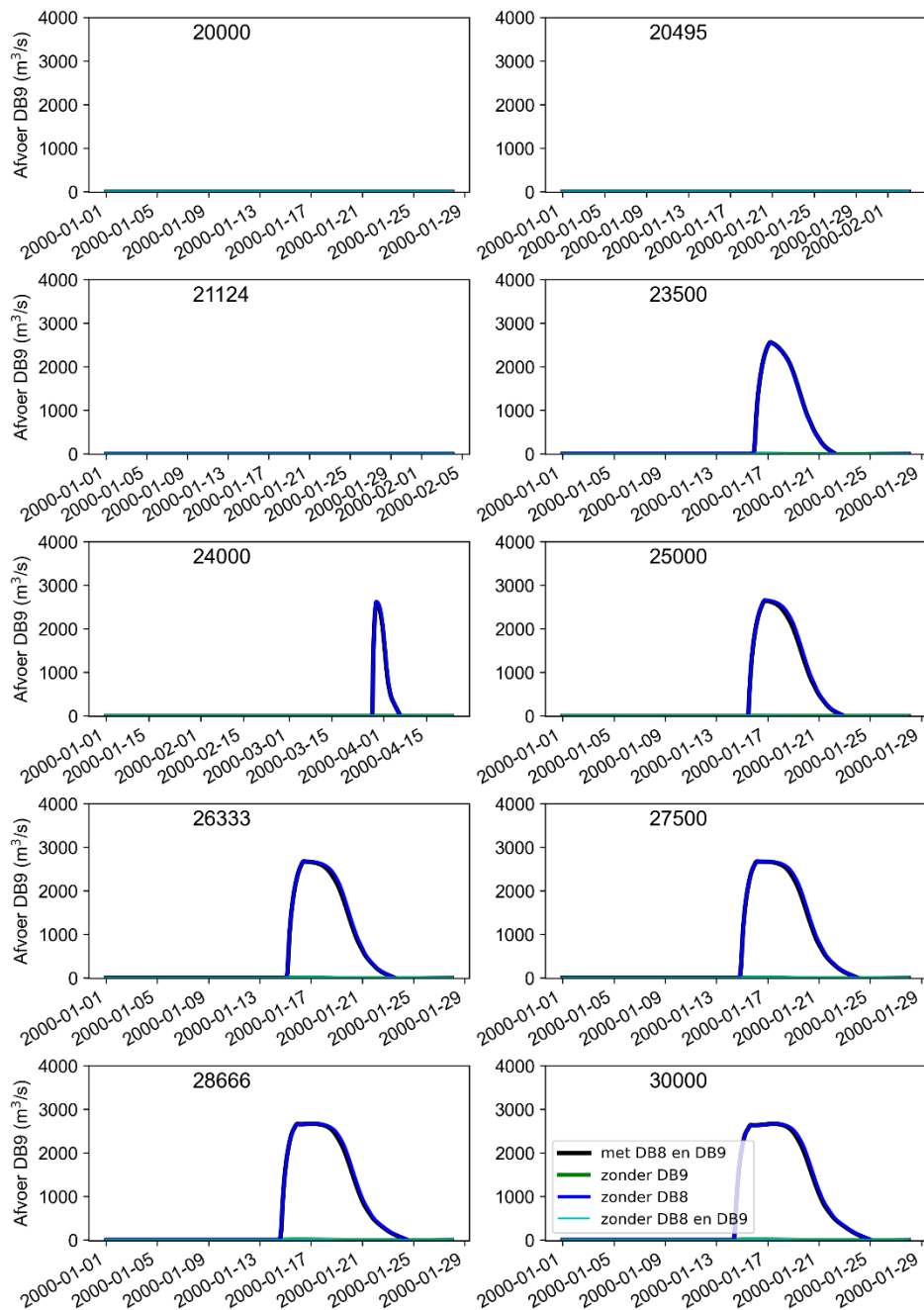
Figuur E-5: De maximum waterstand voor verschillende dijkhoogtescenario's (alle met dijkdoorbraken DB8 en DB9) op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft het dijkhoogtescenario weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.



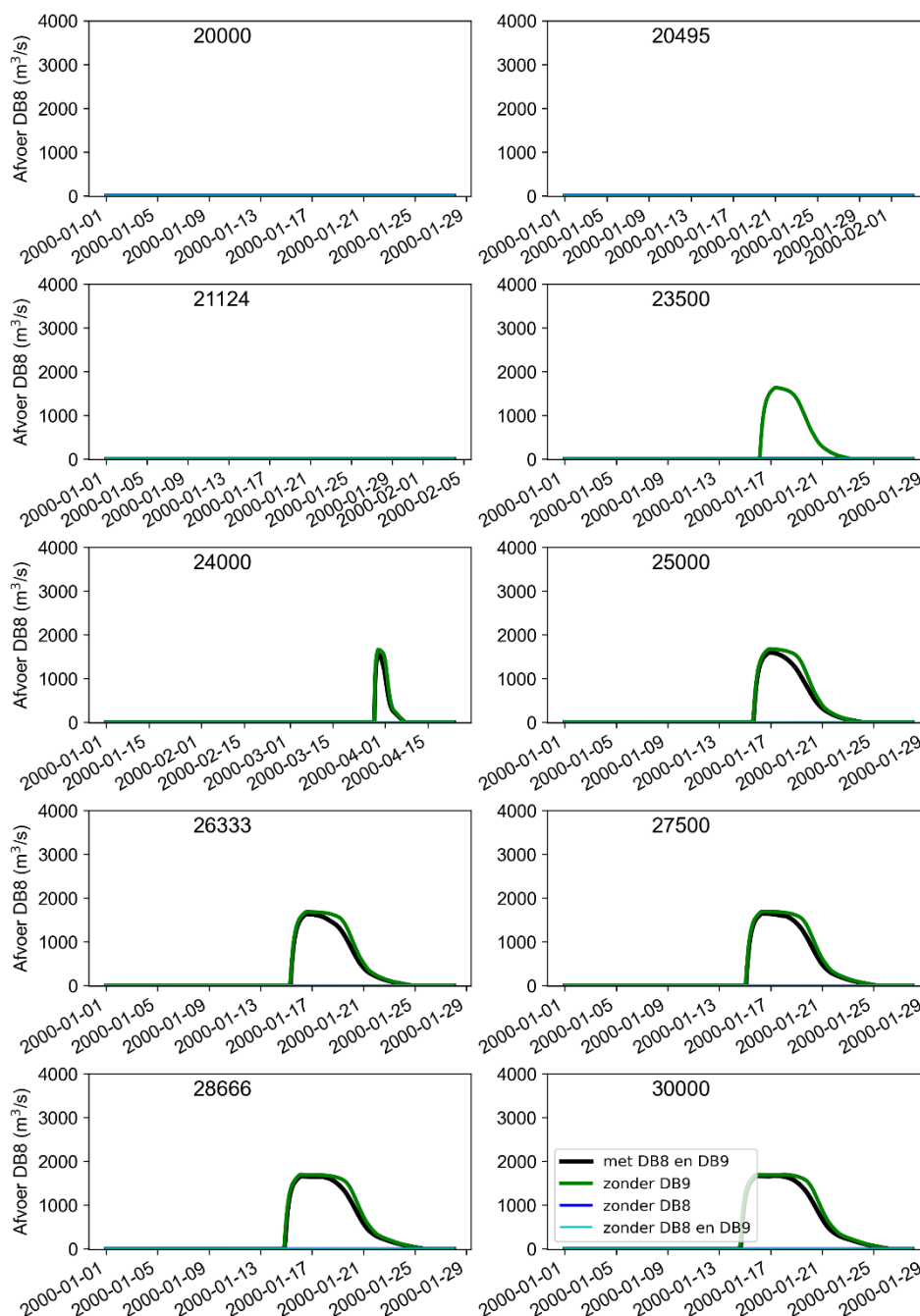
Figuur E-6: Het verschil tussen de waterstanden van het scenario zonder dijkverhoging en de verschillende dijkverhogingsscenario's (alle met dijkdoorbraken DB8 en DB9) op het traject tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft het dijkhoogtescenario weer. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter. Positieve waarden geven een waterstandsverhoging ten opzichte van het scenario zonder dijkverhoging aan, negatieve waarden een verlaging.

# F Afvoeren door dijkdoorbraaklocatie 8 en 9

## F.1 Dijkdoorbraakscenario's

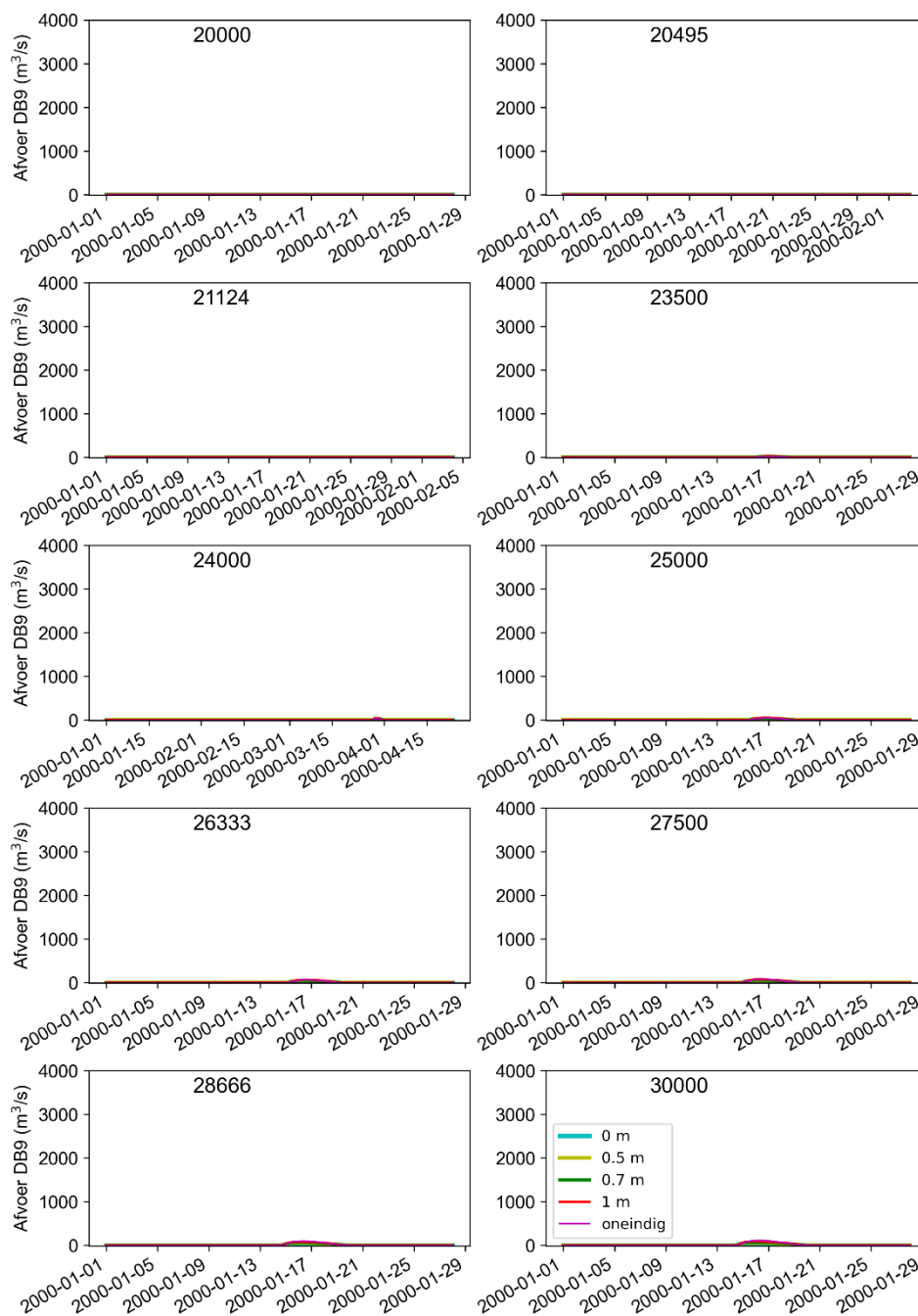


Figuur F-1: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) voor de verschillende dijkdoorbraakscenario's (zonder dijkverhoging). De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken aan en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder de dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48). Merk op dat de zwarte lijn exact achter de donkerblauwe lijn ligt.

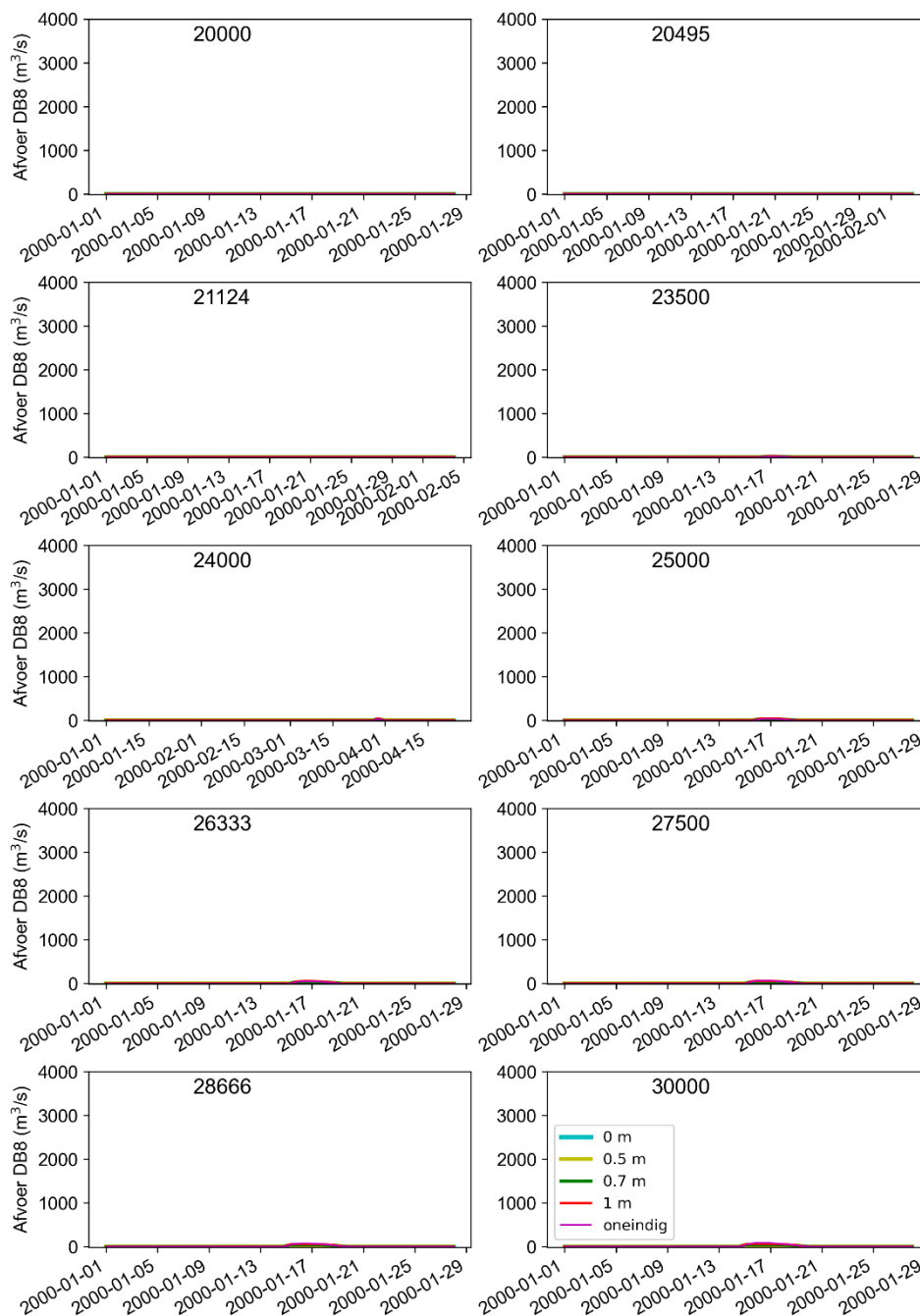


Figuur F-2: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm 840 naar dijkkring 48) voor de verschillende dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkdoorbraakscenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken aan en de lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder alle dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De groene lijn representeert de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) en de donkerblauwe lijn de modeluitkomst met alle dijkdoorbraken behalve dijkdoorbraak 8 (rkm 840 naar dijkkring 48).

## F.2 Dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken

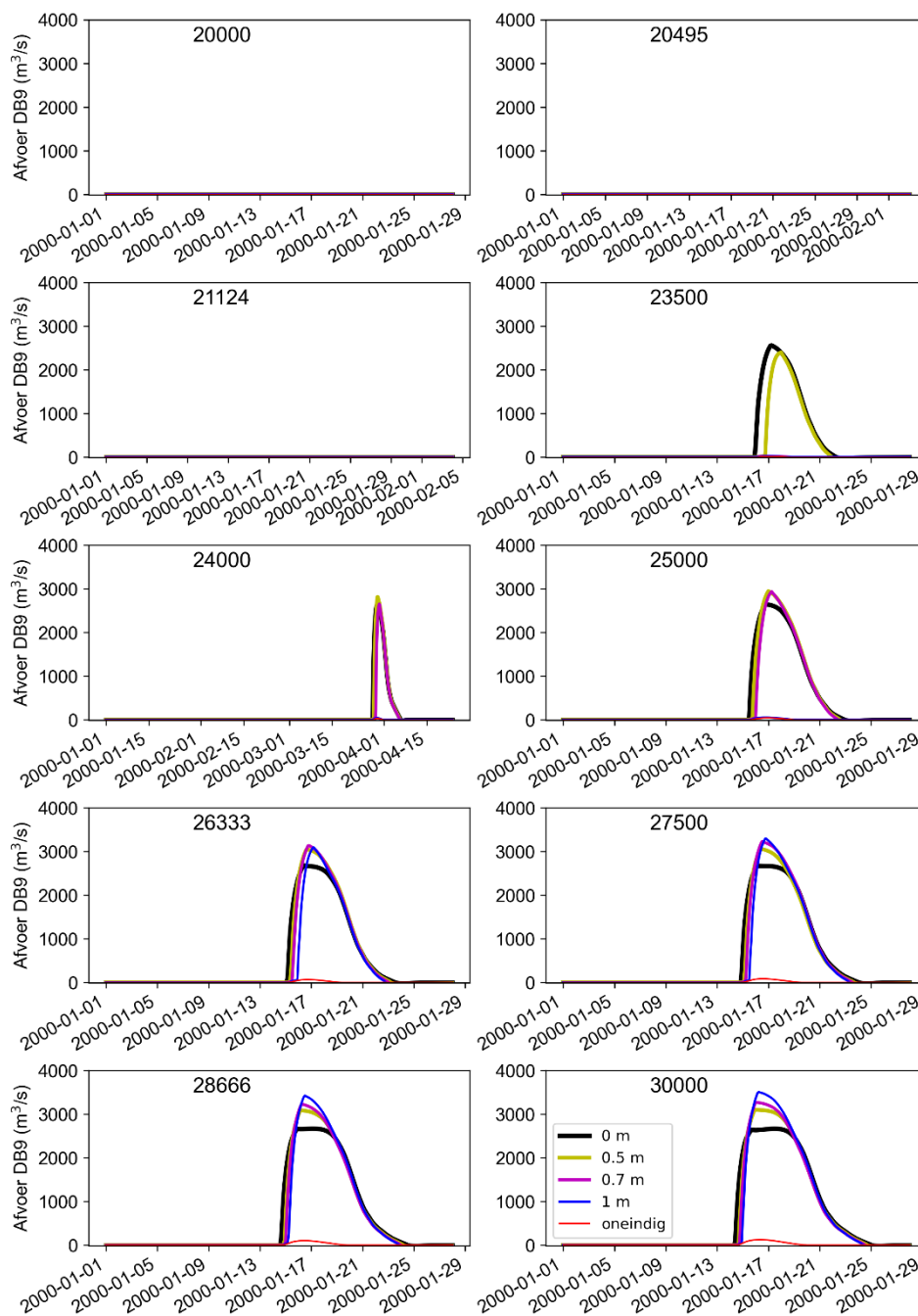


Figuur F-3: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) voor verschillende dijkverhogingen zonder dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst voor verhogingen van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter. Merk op dat er inderdaad geen afvoer door de dijkdoorbraaklocaties gaat. Dat de waarde van de afvoer soms toch iets groter is dan nul, komt door dijkvertopping ter hoogte van de breslocatie.

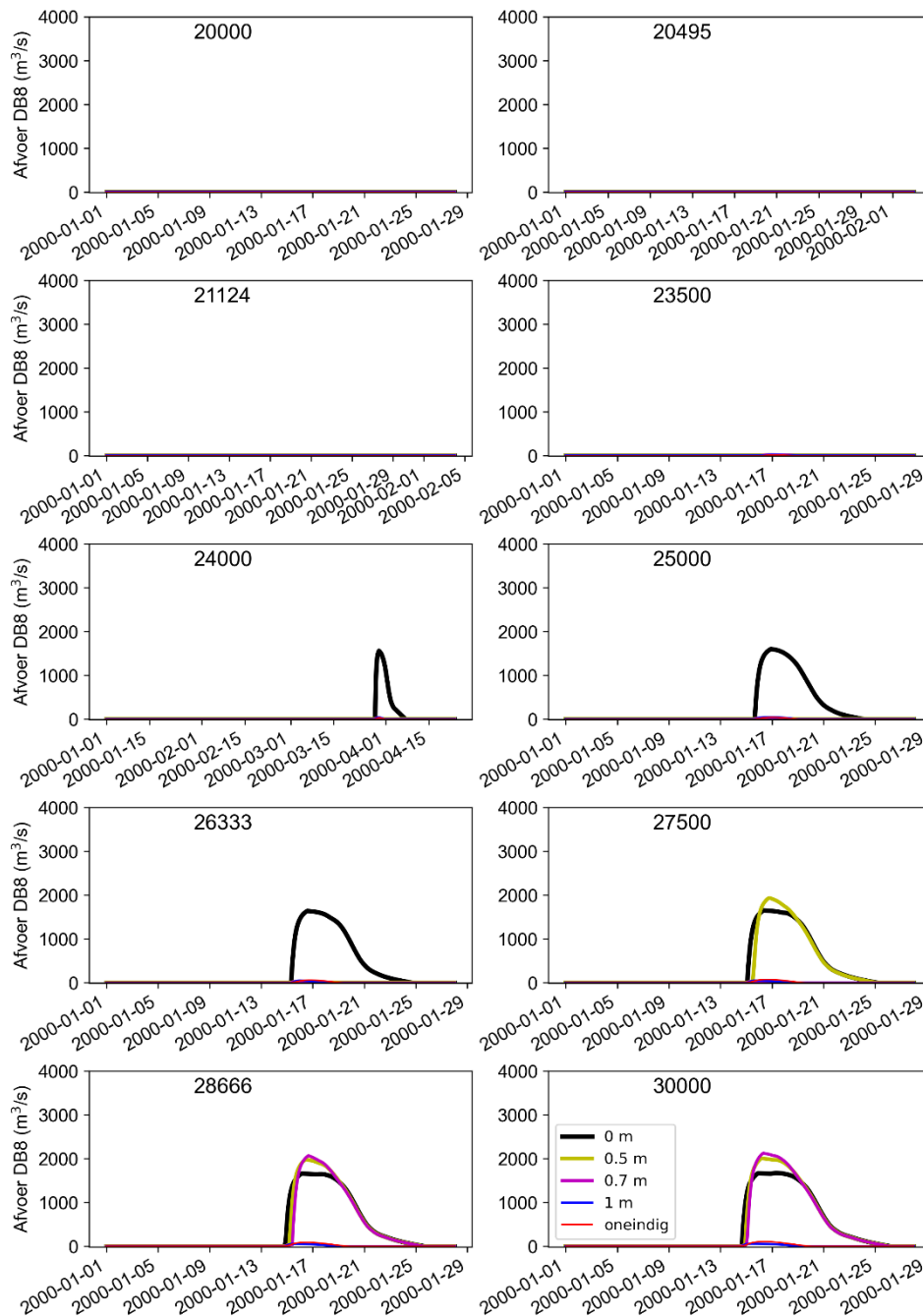


Figuur F-4: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm 840 naar dijkkring 48) voor verschillende dijkverhogingen zonder dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De lichtblauwe lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en zonder dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, donkergroene, rode en magenta lijnen representeren de modeluitkomst voor verhogingen van de dijken met respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter. Merk op dat er inderdaad geen afvoer door de dijkdoorbraaklocaties gaat. Dat de waarde van de afvoer soms toch iets groter is dan nul, komt door dijkvertopping ter hoogte van de breslocatie.

### F.3 Dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken



Figuur F-5: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 9 (rkm 825 naar dijkkring 42) voor verschillende dijkverhogingen met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft de dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging en met dijkdoorbraaklocaties tussen Wesel en Lobith. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken van respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 1000 (oneindig hoge dijken) meter.



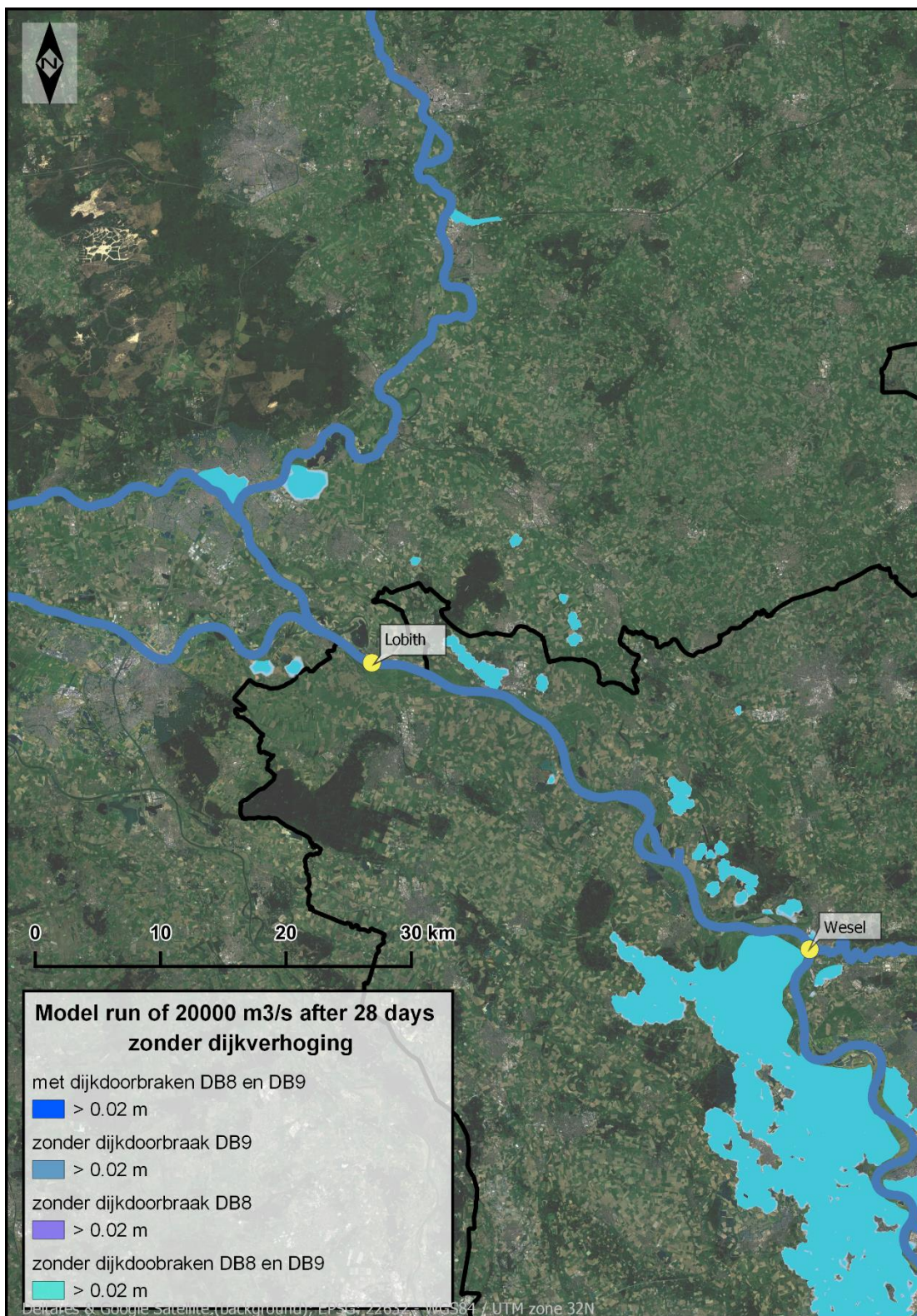
Figuur F-6: De afvoer door de dijkdoorbraaklocatie 8 (rkm840 naar dijkkring 48) voor verschillende dijkverhogingen met dijkdoorbraken tussen Wesel en Lobith. De naam aan de bovenkant van de panelen geeft de maximale afvoer van de onderzochte afvoergolf bij Andernach weer en de kleuring geeft dijkhoogtescenario's weer. De zwarte lijn representeert de modeluitkomsten zonder dijkverhoging tussen Wesel en Lobith met dijkdoorbraaklocaties op dat traject. De lichtgroene, magenta, blauwe en rode lijnen representeren de modeluitkomst met een verhoging van de dijken van respectievelijk 0.5, 0.7, 1 en 100 (oneindig hoge dijken) meter.



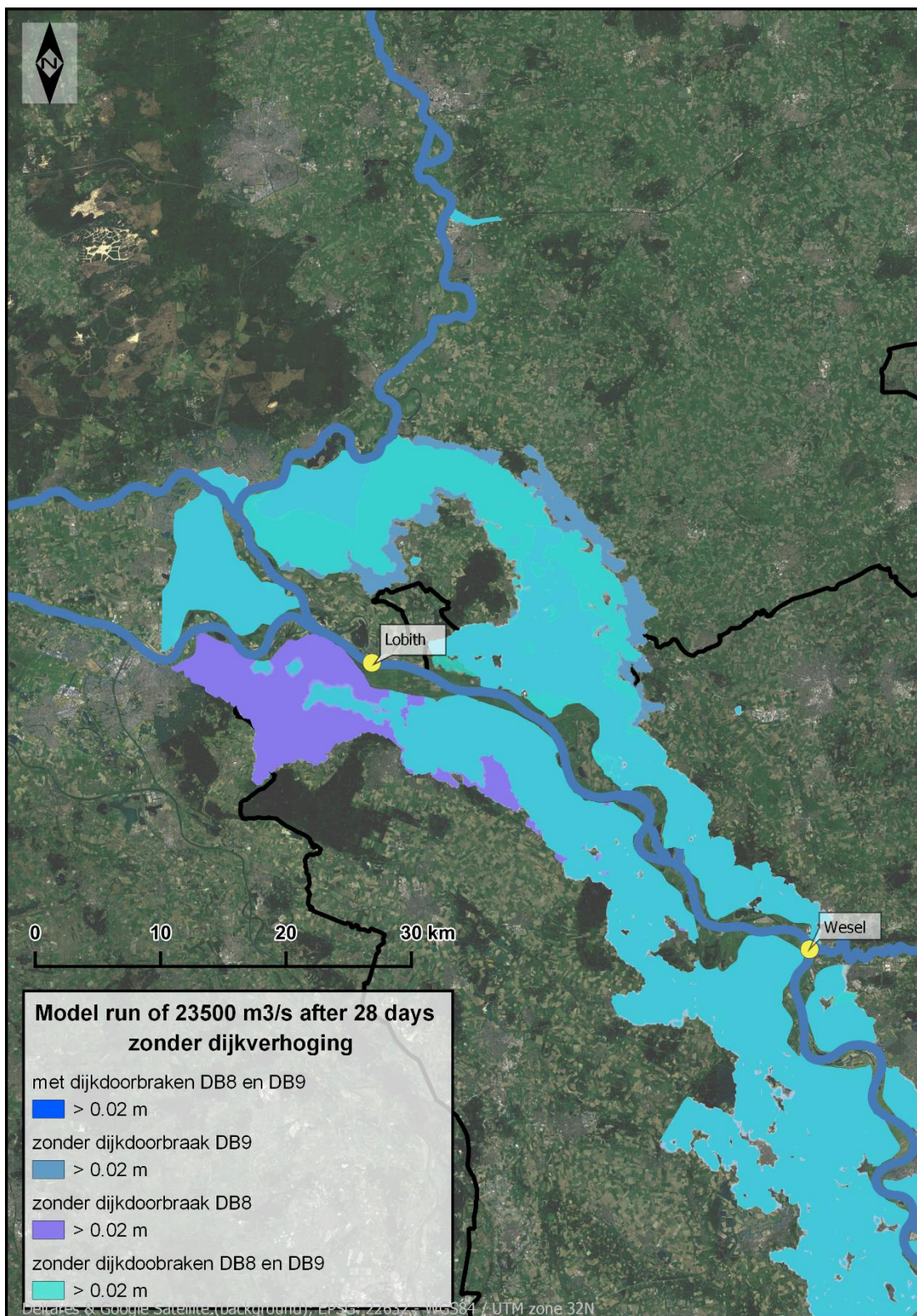
## G Overstromingskaarten dijkdoorbraakscenario's zonder dijkverhoging

De verschillende scenario's hebben in de bijlage alle een andere kleur gekregen. De positie van de kleur in de legenda correspondeert met de positie van weergave van de scenario's. De onderste kleur in de legenda correspondeert met het onderste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in de grootste overstromingsgebied en dus onder de andere scenario's ligt. De bovenste kleur in de legenda correspondeert met het bovenste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in het kleinste overstromingsgebied en dus maar gedeeltelijk op de andere scenario's ligt. Om verschillen tussen de scenario's te kunnen zien, zijn de overstromingsvlaktes gedeeltelijk doorzichtig gemaakt, waardoor de kleuring in de kaarten iets fletser is weergegeven dan in de legenda.

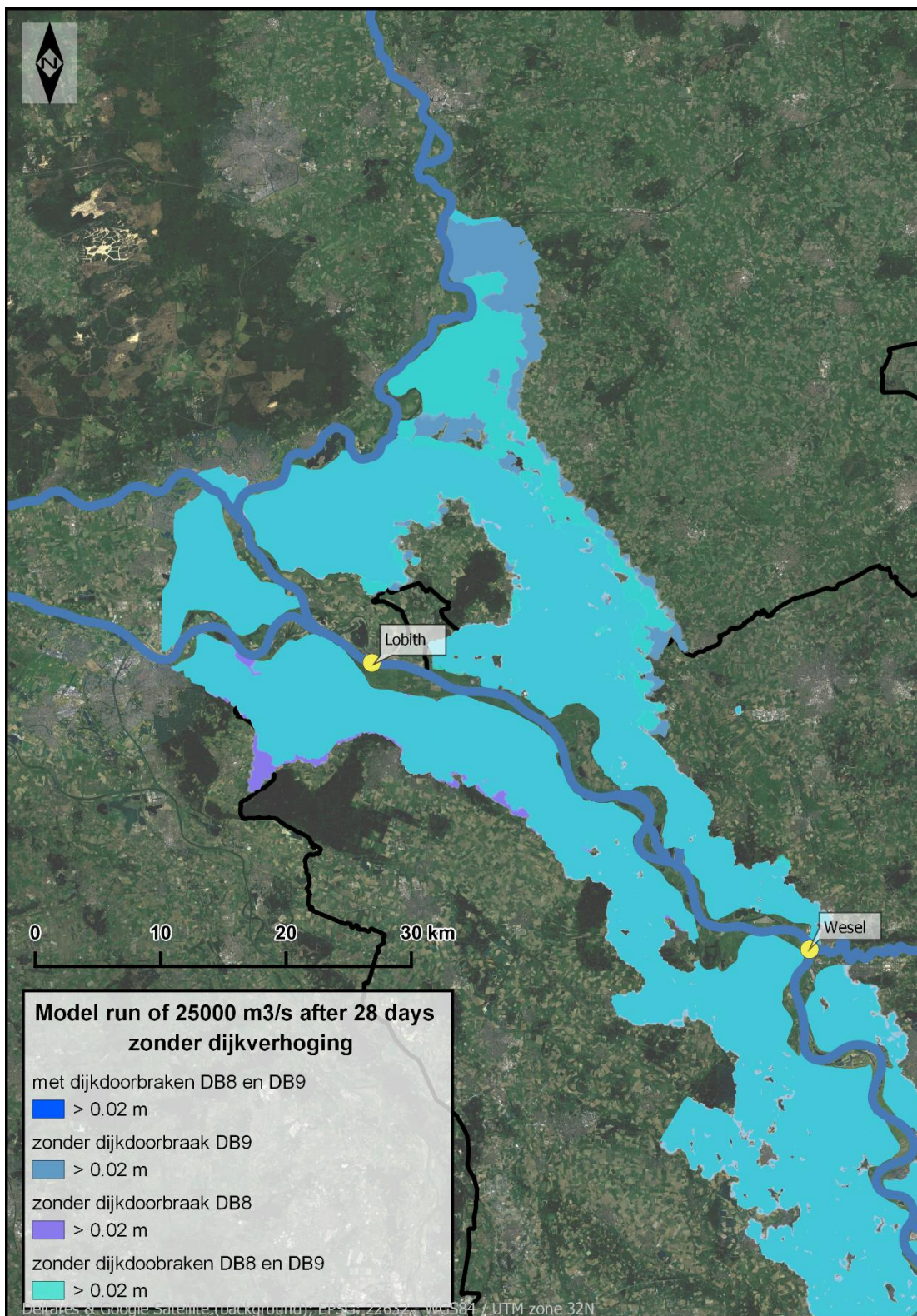
Een beknopt overzicht van de belangrijkste bevindingen van de figuren in bijlage G t/m I is te vinden in bijlage J.



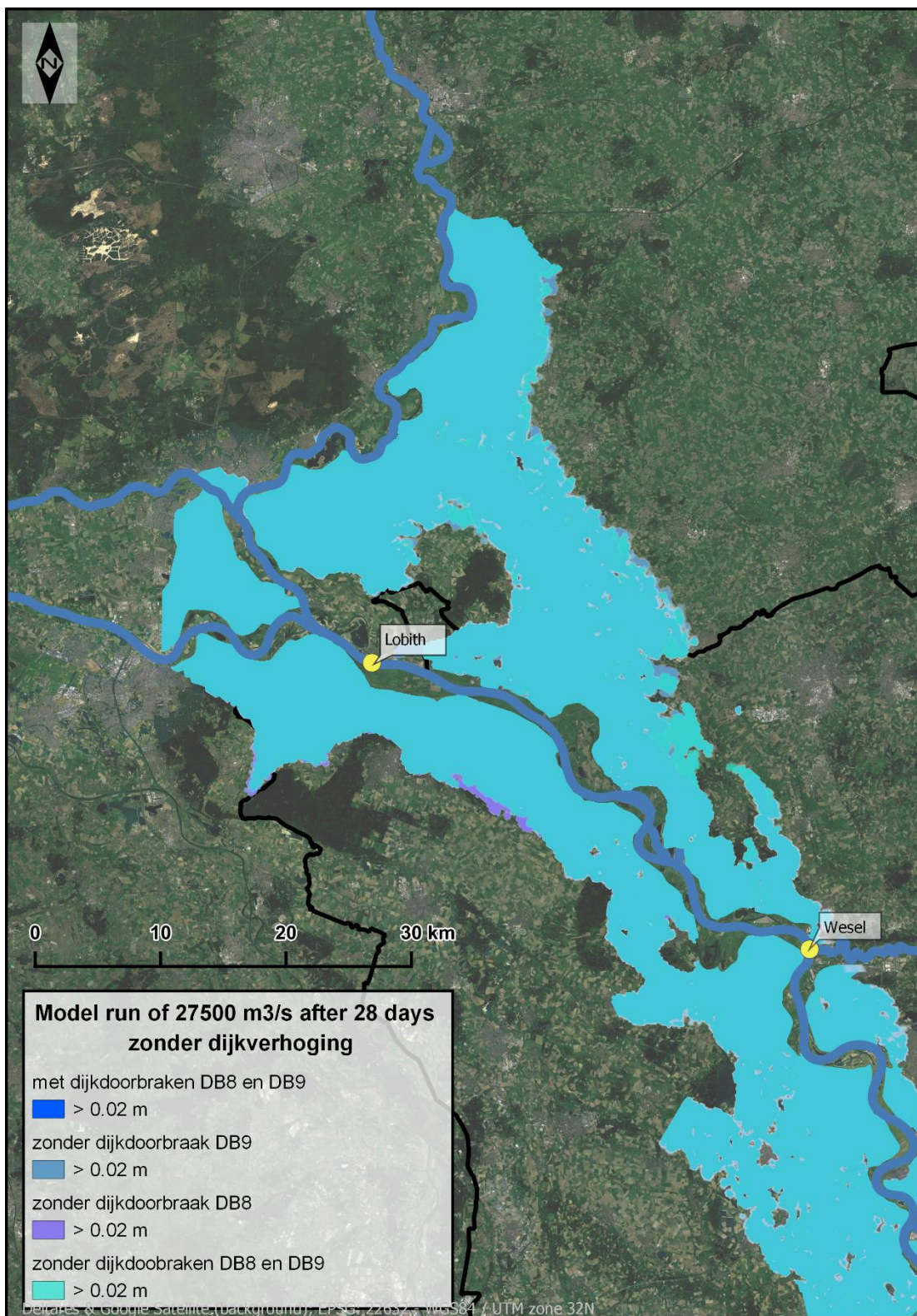
Figuur G-1: Verschillende dijkdoorbraakscenario's bij een afvoer van 20000 m<sup>3</sup>/s.



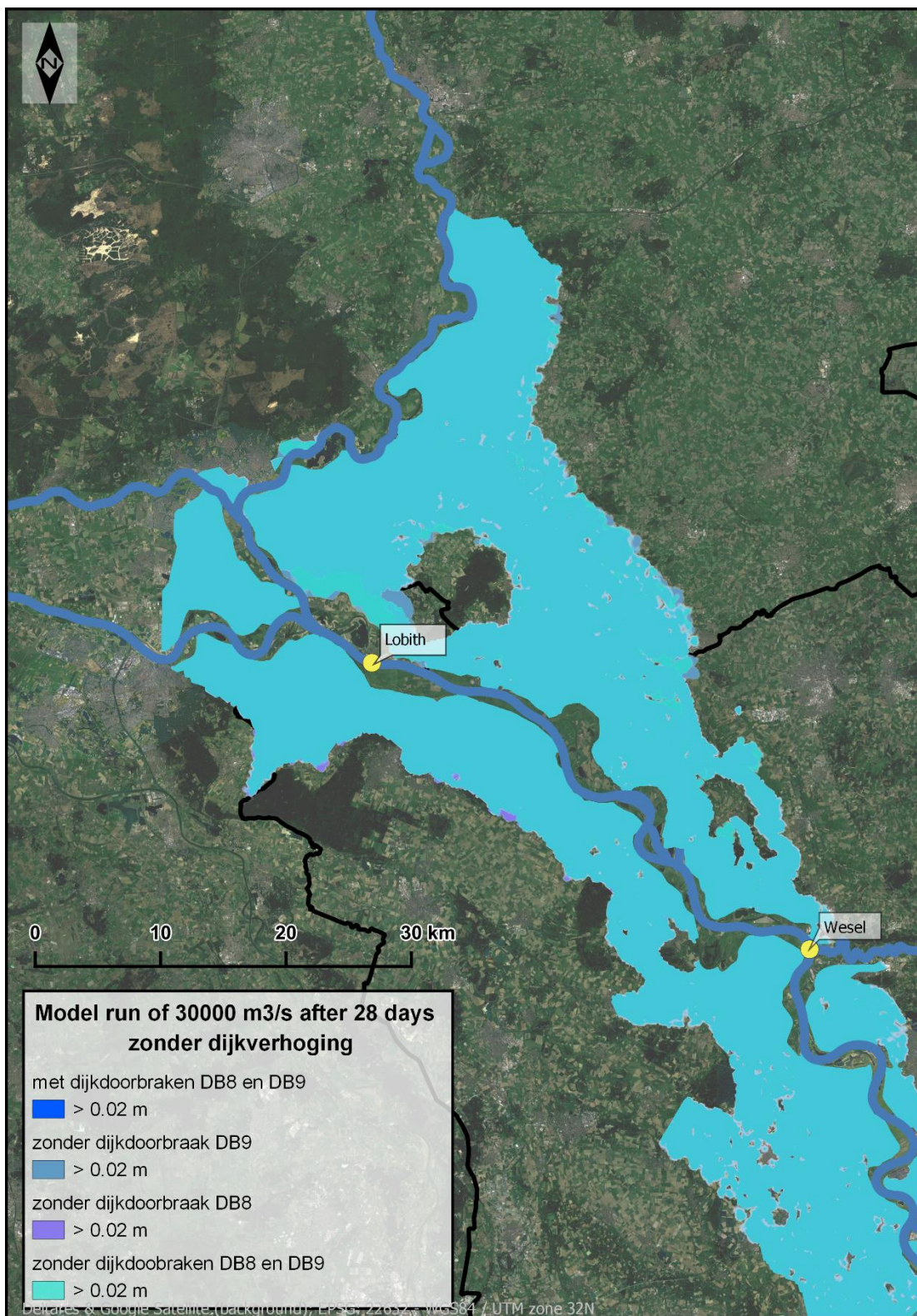
Figuur G-2: Verschillende dijkdoorbraakscenario's bij een afvoer van 23500 m<sup>3</sup>/s.



Figuur G-3: Verschillende dijkdoorbraakscenario's bij een afvoer van 25000 m<sup>3</sup>/s.



Figuur G-4: Verschillende dijkdoorbraakscenario's bij een afvoer van 27500 m<sup>3</sup>/s.

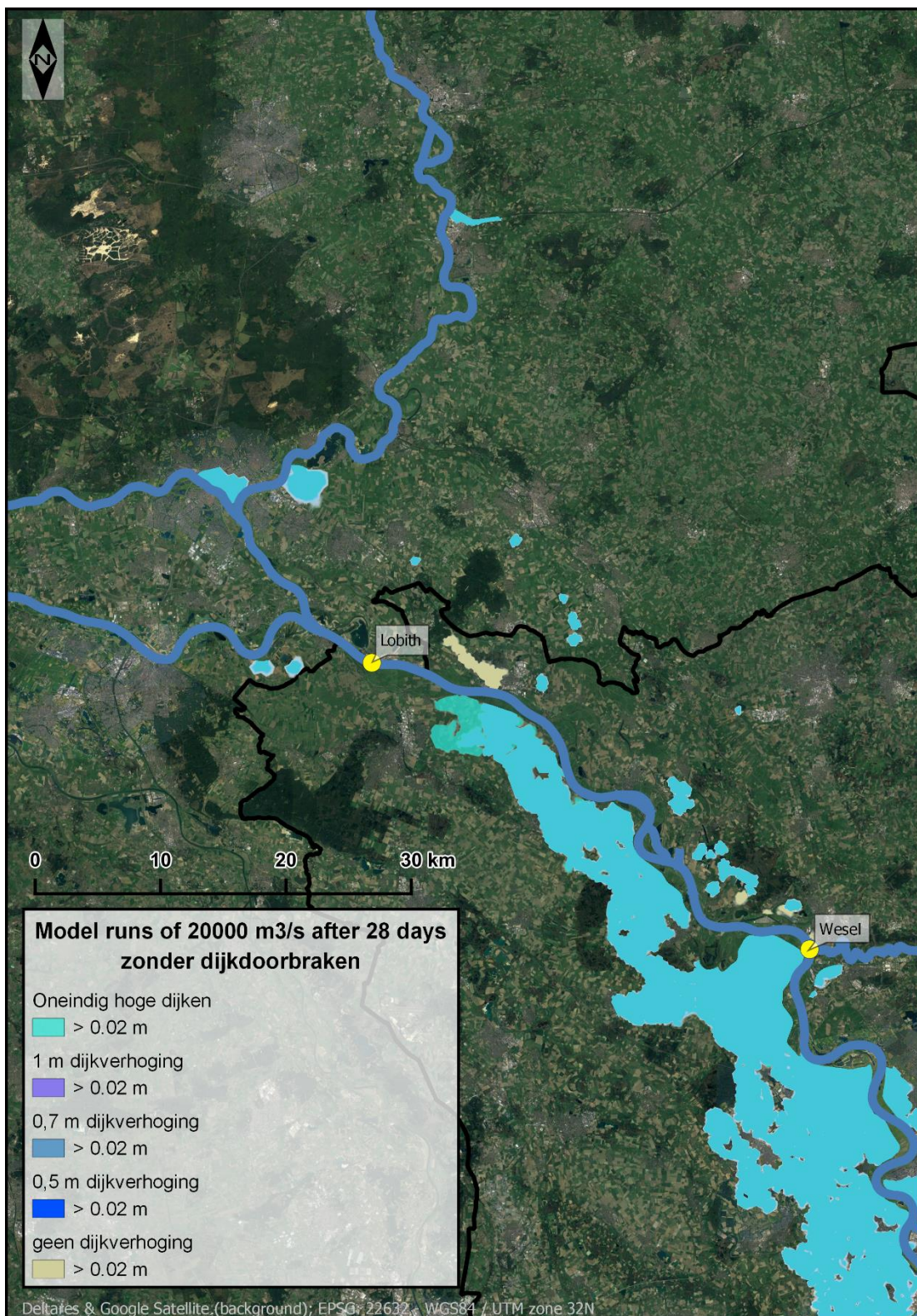


Figuur G-5: Verschillende dijkdoorbraakscenario's bij een afvoer van 30000 m<sup>3</sup>/s.

## H Overstromingskaarten dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken

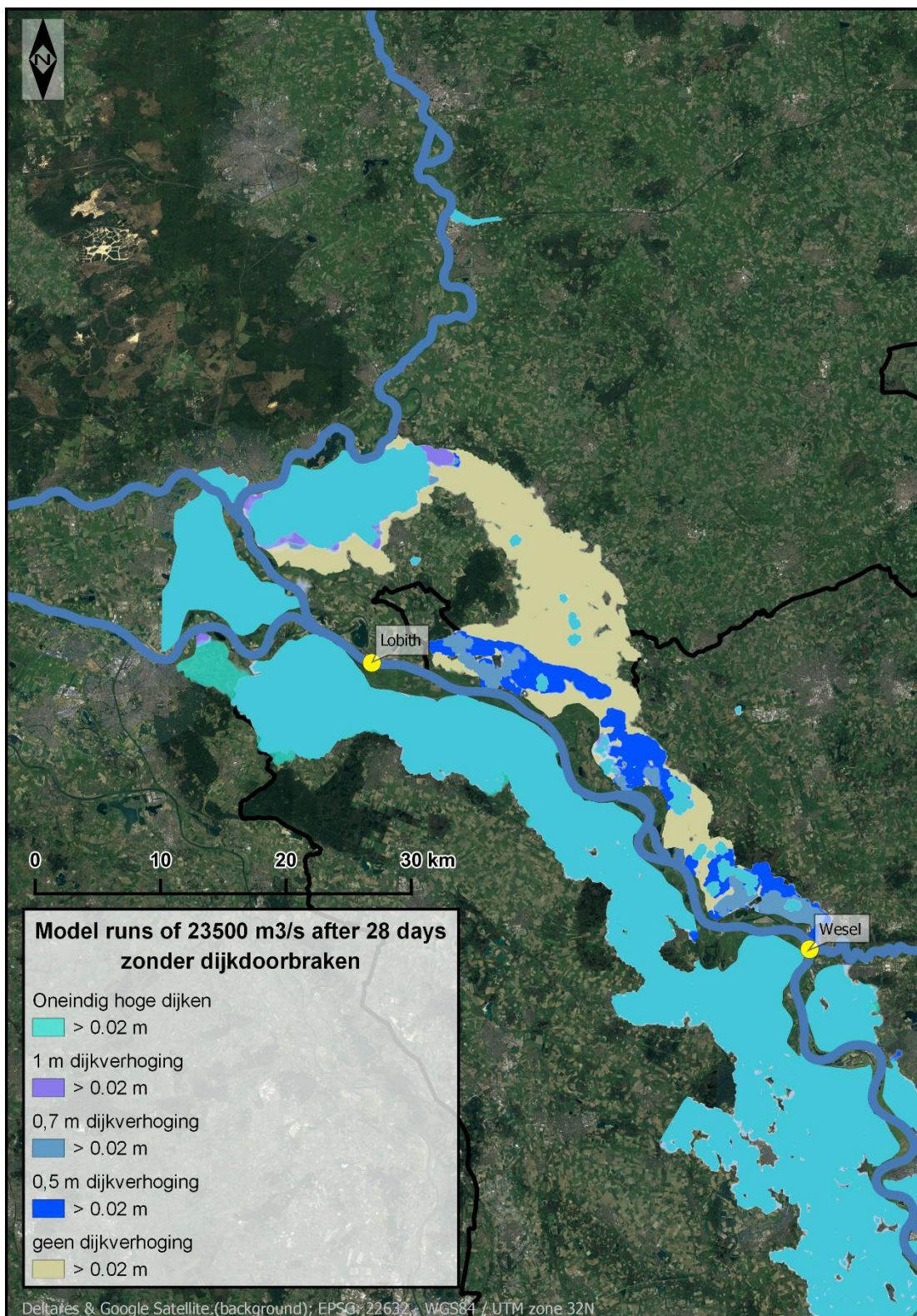
De verschillende scenario's hebben in de bijlage alle een andere kleur gekregen. De positie van de kleur in de legenda correspondeert met de positie van weergave van de scenario's. De onderste kleur in de legenda correspondeert met het onderste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in de grootste overstromingsgebied en dus onder de andere scenario's ligt. De bovenste kleur in de legenda correspondeert met het bovenste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in het kleinste overstromingsgebied en dus maar gedeeltelijk op de andere scenario's ligt. Om verschillen tussen de scenario's te kunnen zien, zijn de overstromingsvlaktes gedeeltelijk doorzichtig gemaakt, waardoor de kleuring in de kaarten iets fletser is weergegeven dan in de legenda.

Een beknopt overzicht van de belangrijkste bevindingen van de figuren in bijlage G t/m I is te vinden in bijlage J.

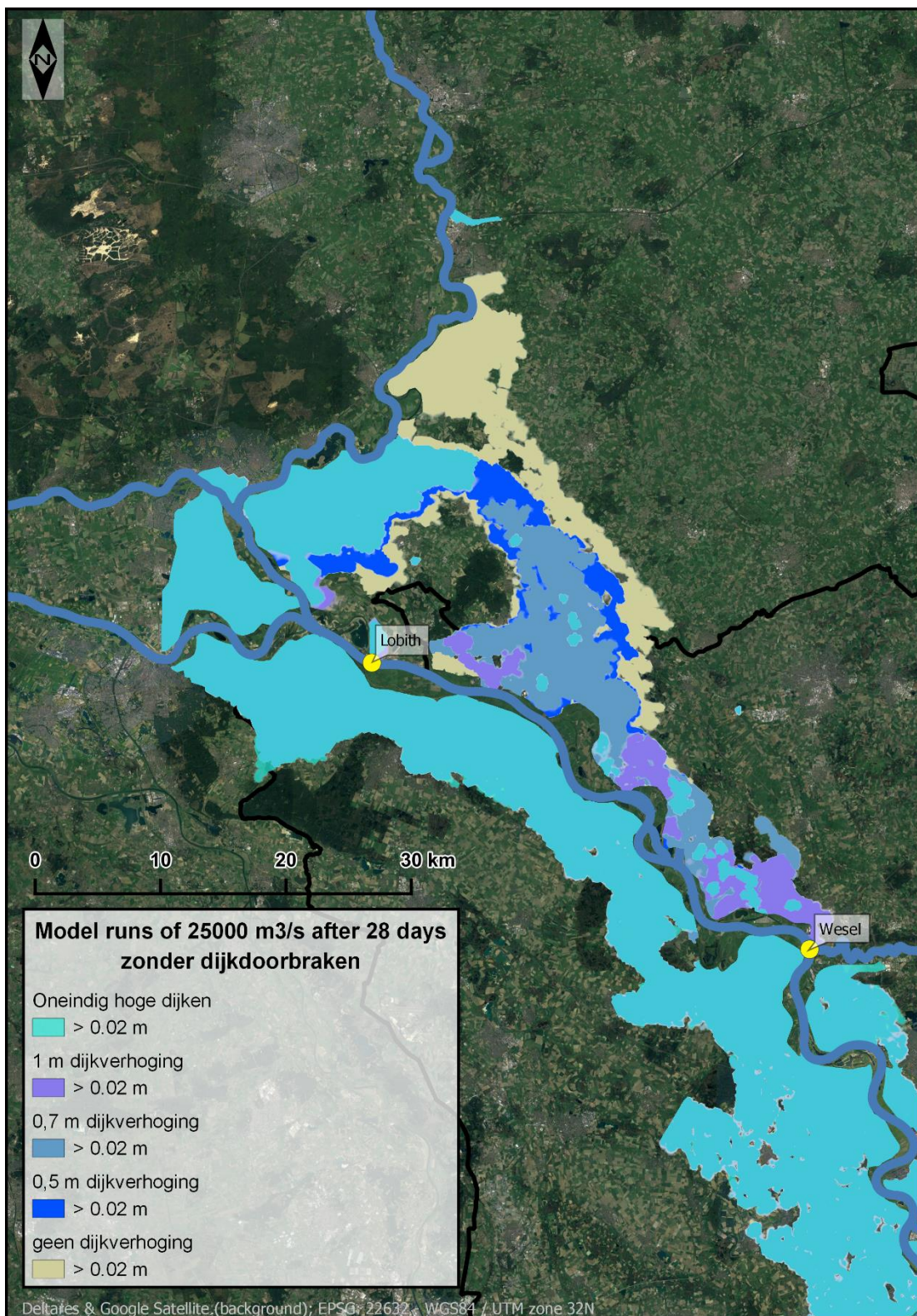


Figuur H-1: Verschillende dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken bij een afvoer van 20000 m<sup>3</sup>/s.

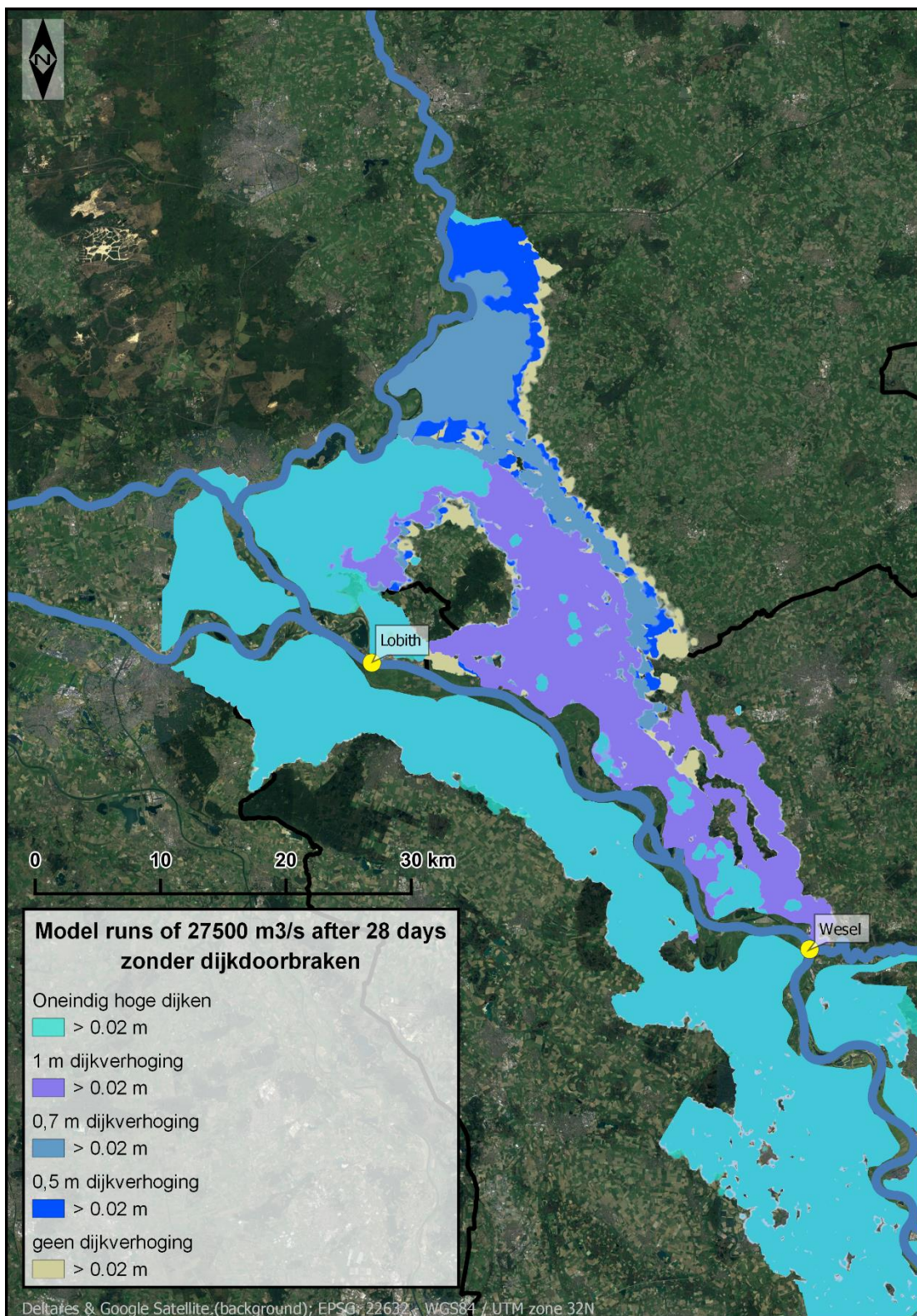




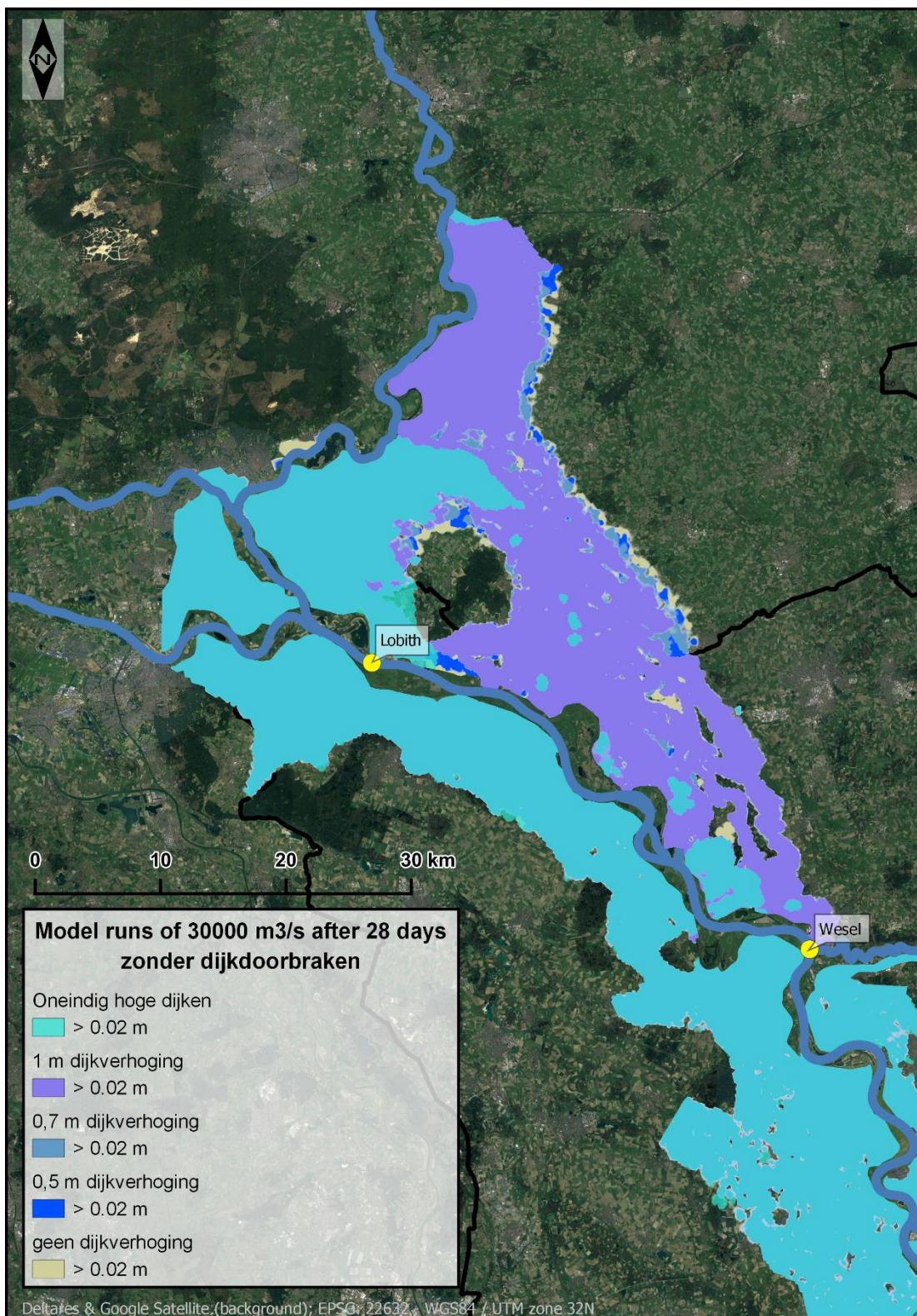
Figuur H-2: Verschillende dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken bij een afvoer van 23500 m<sup>3</sup>/s.



Figuur H-3: Verschillende dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken bij een afvoer van 25000 m<sup>3</sup>/s.



Figuur H-4: Verschillende dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken bij een afvoer van 27500 m<sup>3</sup>/s.

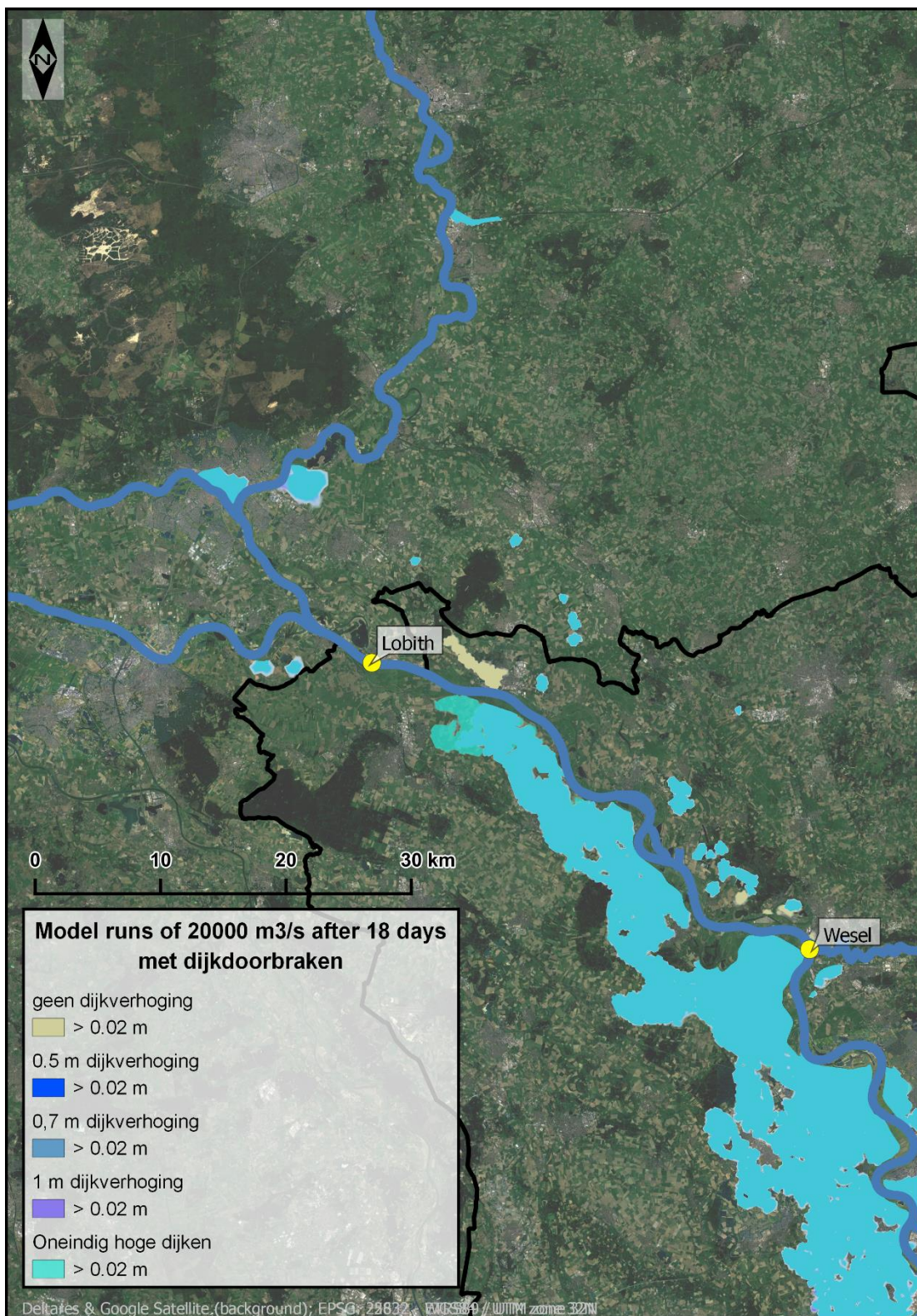


Figuur H-5: Verschillende dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken bij een afvoer van 30000 m<sup>3</sup>/s.

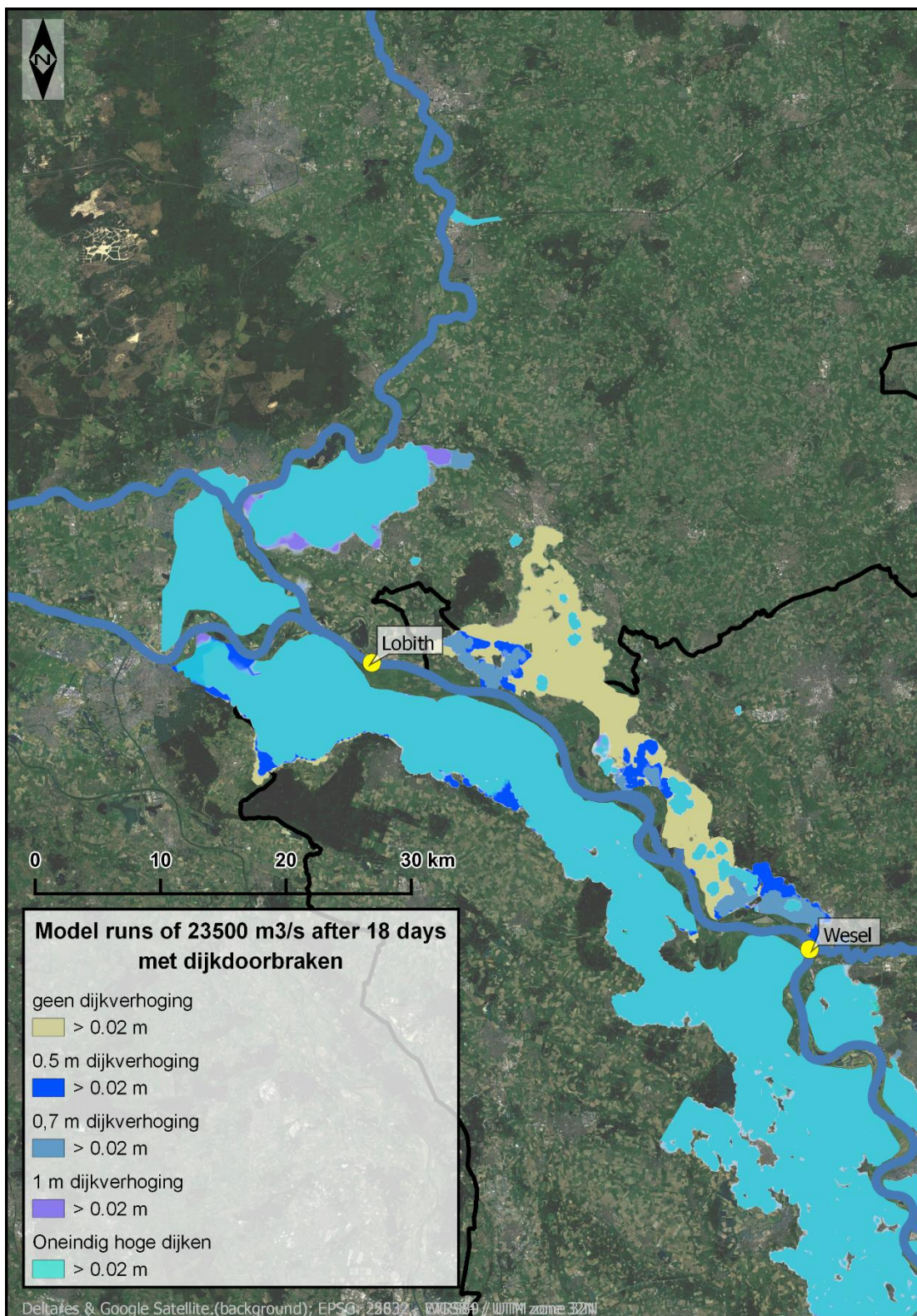
# I Overstromingskaarten dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken

De verschillende scenario's hebben in de bijlage alle een andere kleur gekregen. De positie van de kleur in de legenda correspondeert met de positie van weergave van de scenario's. De onderste kleur in de legenda correspondeert met het onderste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in de grootste overstromingsgebied en dus onder de andere scenario's ligt. De bovenste kleur in de legenda correspondeert met het bovenste weergegeven scenario, welke over het algemeen resulteert in het kleinste overstromingsgebied en dus maar gedeeltelijk op de andere scenario's ligt. Om verschillen tussen de scenario's te kunnen zien, zijn de overstromingsvlaktes gedeeltelijk doorzichtig gemaakt, waardoor de kleuring in de kaarten iets fletser is weergegeven dan in de legenda.

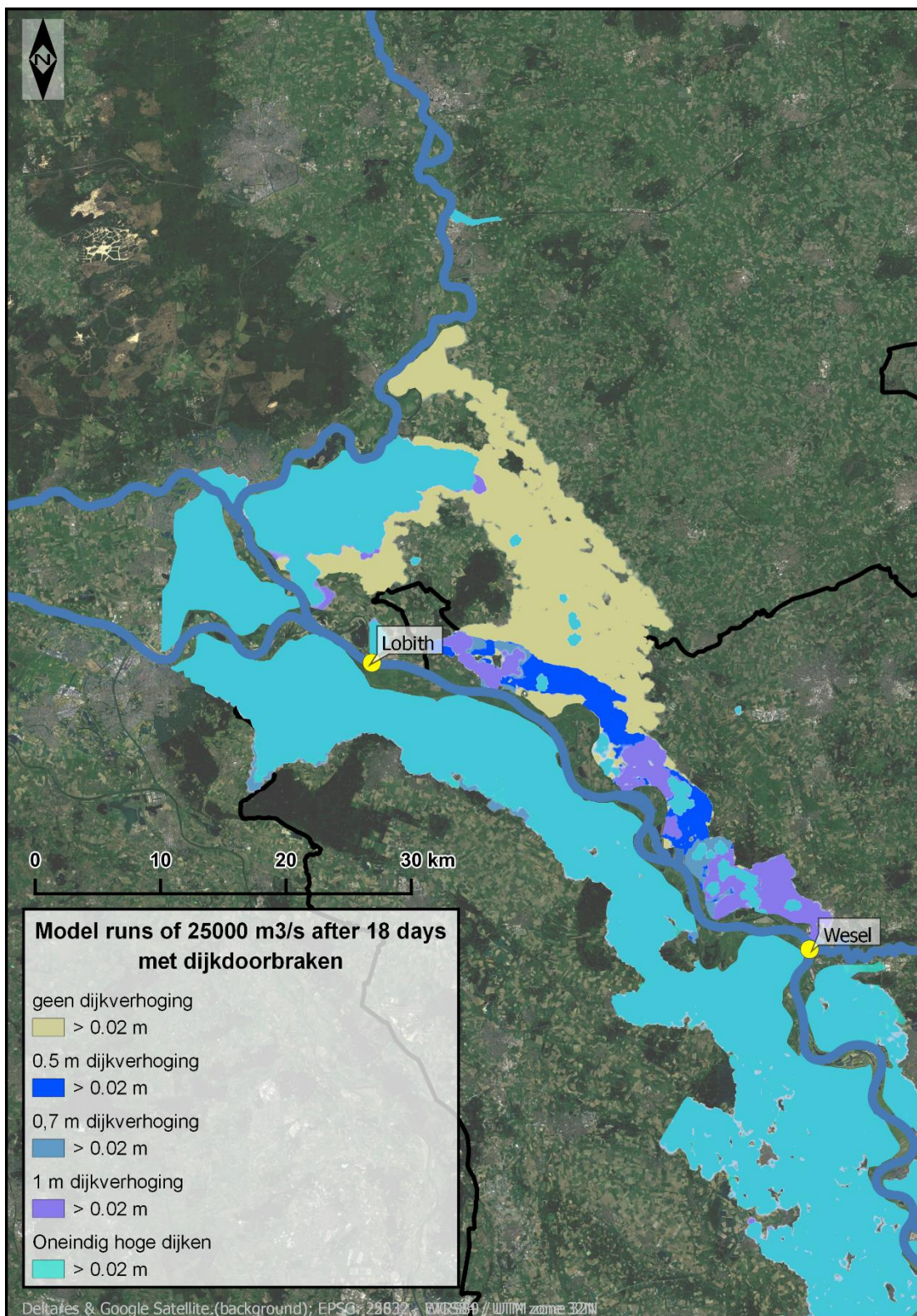
Een beknopt overzicht van de belangrijkste bevindingen van de figuren in bijlage G t/m I is te vinden in bijlage J.



Figuur I-1: Verschillende dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken bij een afvoer van 20000 m<sup>3</sup>/s.

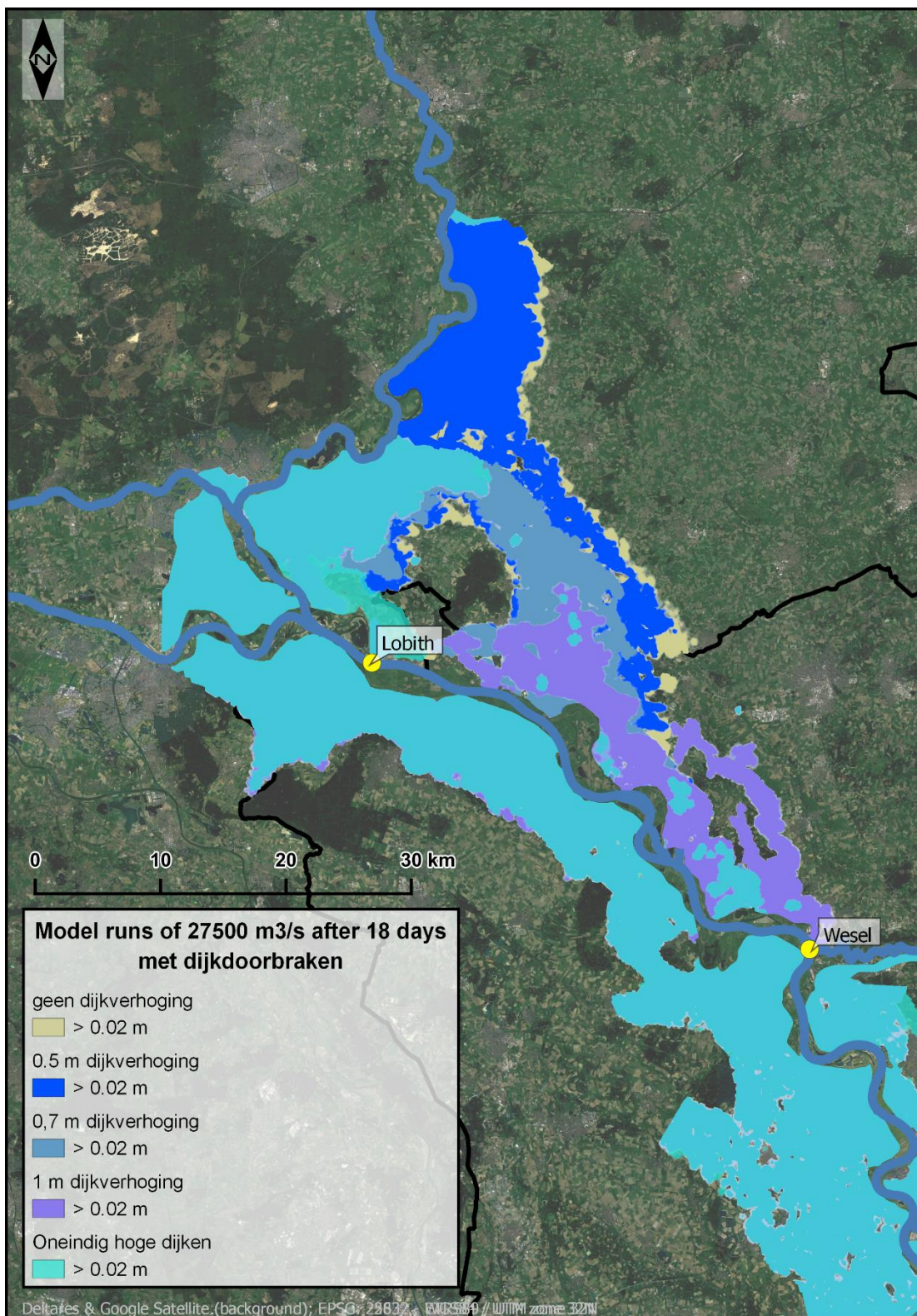


Figuur I-2: Verschillende dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken bij een afvoer van 23500 m<sup>3</sup>/s.

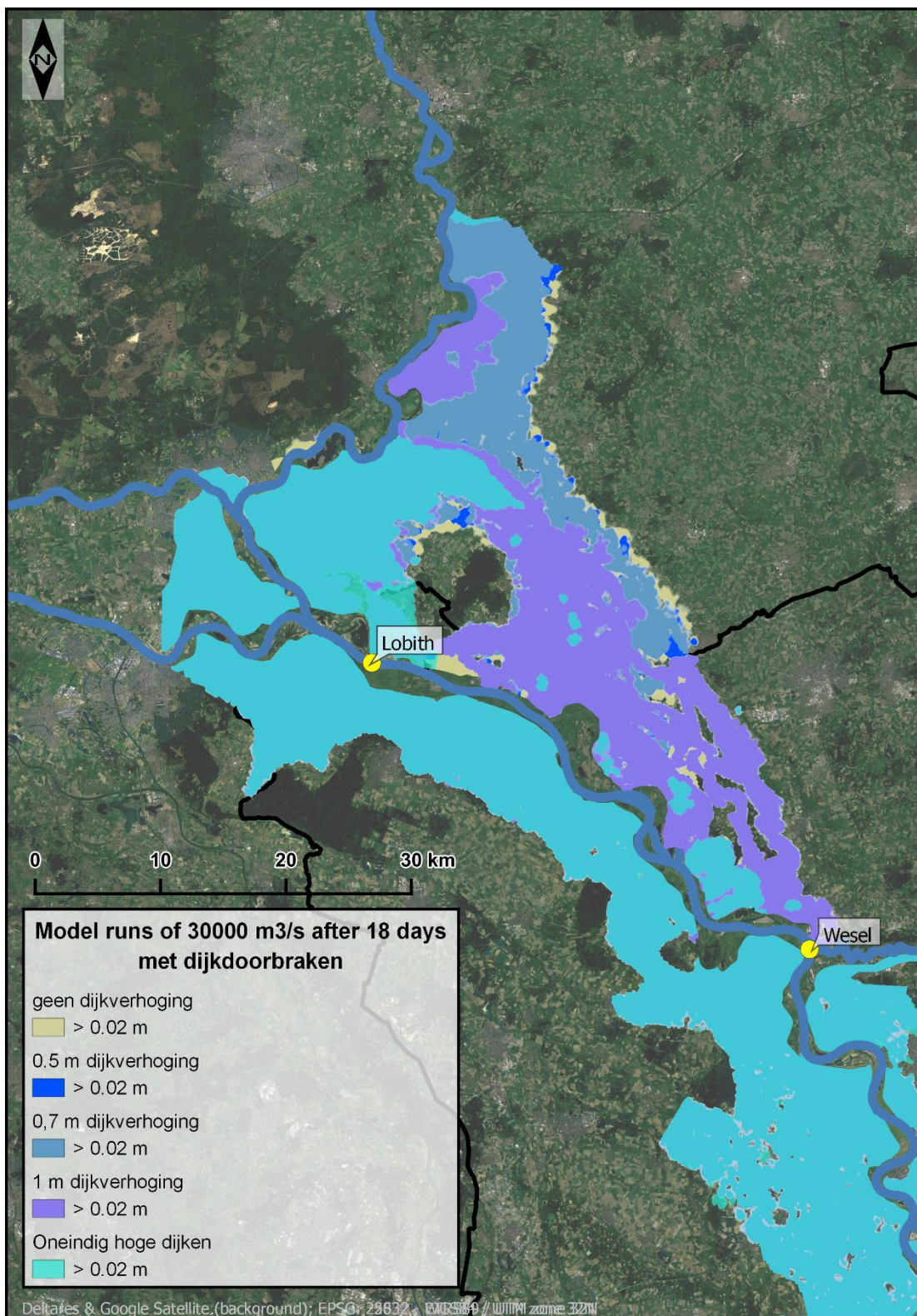


Figuur I-3: Verschillende dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken bij een afvoer van 25000 m<sup>3</sup>/s.





Figuur I-4: Verschillende dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken bij een afvoer van 27500 m<sup>3</sup>/s.



Figuur I-5: Verschillende dijkverhogingsscenario's met dijkdoorbraken bij een afvoer van 3000 m<sup>3</sup>/s.

## J Overzicht belangrijke bevindingen uit overstromingskaarten in bijlagen G t/m I

afvoergolf	DR 42	DR 48
<b>Dijkdoorbraakscenario's (DB8 = doorbraak richting DR48 en DB9 = doorbraak richting DR42 aan/uit) zonder dijkverhogingen [bijlage G]</b>		
Golf 20.000 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	Geen/nauwelijks overstromingen in DR42, alleen heel lokaal bij Kekerdom in NL en helemaal in het bovenstroomse gebied van de dijkkring begint het binnendijks vanuit de al volgelopen binnendijkse overstromingsvlakte naar dijkkring 42 in te stromen. Dit onafhankelijk van het doorbraakscenario	Geen/nauwelijks overstromingen in DR48, alleen heel lokaal bij Emmerich richting de Wild, ten noorden van Westervoort en in Arnhem. Dit onafhankelijk van het doorbraakscenario
Golf 23.500 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	Grootschalige overstromingen in DR 42, omvang afhankelijk van het dijkdoorbraakscenario: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kleinste overstromingsvlakte in scenario zonder DB8 en DB9 tot ongeveer Kleve en</li> <li>• grootste overstromingsvlakte in scenario met DB9 en DB8 en zonder DB9/met DB8 de volledige dijkkring vullend</li> </ul> dus DB9 belangrijk	Grootschalige overstromingen in DR 48, omvang afhankelijk van het dijkdoorbraakscenario: met <ul style="list-style-type: none"> <li>• kleinste overstromingsvlakte in scenario met DB8 en DB9 en</li> <li>• het grootste overstromingsvlakte bij scenario zonder DB9 maar met DB8</li> <li>• gevolgd door scenario zonder DB8 en DB9 als zijnde ietsje kleiner dan vorig scenario</li> </ul> dit resultaat is niet volgens de verwachting dat een dijkdoorbraak tot grotere overstromingsvlaktes leidt t.o.v. alleen dijkvertopping. De reden is dat het voor het overstroom van DR48 heel relevant is of (ook) DB9 richting dijkkring 42 actief is of niet. Deze dijkdoorbraaklocatie die ca 15 km bovenstrooms van DB8 ligt trekt veel water naar DR42, zodat minder water naar DR 48 loopt zoals in het scenario waar beide doorbraaklocaties actief zijn respectievelijk het scenario waar wel DB9 (richting dijkkring 42) actief is en water alleen via dijkvertopping richting dijkkring 48 loopt. Het grootste overstromingsoppervlak wordt veroorzaakt door de combinatie geen dijkdoorbraak DB9 richting dijkkring 42 maar wel richting dijkkring 48. Dit volgt dan weer de verwachting dat dijkdoorbraak leidt tot meer overstromingen (hier in de combinatie DB9 niet/DB8 wel t.o.v. DB9 niet/DB8 niet)
Golf 25.000 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet</li> <li>• Ook delen van DR 49 lopen onder water waarbij <ul style="list-style-type: none"> <li>○ de grootste overstromingsvlakte optreedt bij het scenario waar DB 9 niet doorbreekt en DB8 wel, waarbij het gemodelleerde deel van DR49 volledig overstroomt</li> </ul> </li> </ul>
Golf 27.500 m <sup>3</sup> /s Bij Andernach	Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet</li> <li>• + gemodelleerde deel van DR49 volledig overstroomd</li> </ul>
Golf 30.000 m <sup>3</sup> /s Bij Andernach	Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onafhankelijk van welk scenario wordt de hele dijkkring onder water gezet</li> <li>• + gemodelleerde deel van DR49 volledig overstroomd</li> </ul>

afvoergolf	DR 42	DR 48
<b><i>Dijkverhogingsscenario's (0,5, 0,7, 1,0 m en oneindig hoog) zonder dijkdoorbraken [bijlage H]</i></b>		
Alle golven	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij nagenoeg alle golven loopt de DR 42 volledig onder water onafhankelijk van de dijkhoogte; zelfs bij oneindig hoge dijken.</li> <li>• Alleen bij de kleinste golf (20.000 m<sup>3</sup>/s Andernach) is alleen de DR tot ~Kleve/Lobith betrokken en ook dit weer onafhankelijk van de dijkhoogte en dat hoewel geen dijkovertopping plaatsvindt tussen Wesel en Lobith.</li> <li>• Dit omdat in alle gevallen (ook) water vanuit binnendijs gebied bovenstrooms van DR 42 de DR binnen stroomt --&gt; dit blijkt het meest dominante effect te zijn!</li> <li>• Daarnaast loopt er blijkbaar ook water over de Nederlandse dijk de DR42 in, zelfs bij oneindig hoge dijken in Duitsland, omdat de Nederlandse dijken niet zijn opgehoogd; in heel beperkte mate speelt dit al bij de 20.000 m<sup>3</sup>/s golf bij Andernach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Met toenemende dijkhoogte neemt voor de verschillende onderzochte hoogwatergolven de oppervlakte van het overstromd gebied af</li> <li>• Daarbij neemt bij toenemende afvoergolf de overstromde vlakke toe bij gelijkblijvende dijkhoogte.</li> <li>• Uitzondering is de kleinste golf (20.000 m<sup>3</sup>/s piekafvoer bij Andernach) waar nauwelijks overstromingen plaatsvinden behalve bij Emmerich over de keermuur. Alle dijkhoogtes behalve Emmerich zijn dus hoog genoeg om te kunnen keren</li> <li>• Pas bij oneindig hoge dijken vinden geen overstromingen meer plaats vanuit Duitsland, echter wel nog bij Westervoort, omdat daar de dijken in het model niet opgehoogd zijn.</li> </ul>
<b><i>Dijkverhogingsscenario's (0,5, 0,7, 1,0 m en oneindig hoog) gecombineerd met dijkdoorbraak (DB8 = doorbraak richting DR48 en DB9 = doorbraak richting DR42 aan) [bijlage I]</i></b>		
Alle golven	<p>Algemene patronen zoals bij dijkverhogingsscenario's zonder dijkdoorbraken, verschillen alleen in details</p> <p>Geen verschil tussen scenario's met en zonder dijkdoorbraken --&gt; dominant effect van binnendijs doorstromen van water van verder bovenstrooms</p>	Trend: met dijkdoorbraak overstromen kleinere gebieden dan zonder dijkdoorbraken

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](http://www.deltares.nl)