

# Afvoercapaciteit Niederrhein

Invloed van rivierverruiming op de rivierafvoer  
bij Lobith



Opdrachtgever



Rijkswaterstaat





# Afvoercapaciteit Niederrhein

---

Invloed van rivierverruiming op de rivierafvoer  
bij Lobith



**Auteurs**

Lieke Lokin  
Vincent Vuik

PR3930.10  
27 februari 2019



# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel	1
1.3	Onderzoeksvragen	2
1.4	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>Werkwijze</b>	<b>3</b>
2.1	Software en Hardware	3
2.2	Model	3
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>7</b>
3.1	Effecten op waterstanden	7
3.2	Waterstand versus dijkhoogte in Duitsland	9
3.3	Effecten op de rivierafvoer	10
3.4	Overloop versus dijkdoorbraak	12
3.5	Overstromingspatronen	13
3.6	Samenvatting effecten	17
<b>4</b>	<b>Synthese</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>27</b>
5.1	Conclusies	27
5.2	Aanbevelingen	28
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>29</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>31</b>
A	Golf met piekwaarde van 21.500 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	33
B	Golf met piekwaarde van 24.000 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	38
C	Golf met piekwaarde van 27.000 m <sup>3</sup> /s bij Andernach	43



# 1 Inleiding

## 1.1

### Aanleiding

Rivierverruimende maatregelen in de Nederlandse Bovenrijn resulteren in een waterstandsdeling, waarvan het effect ook op de Niederrhein in Duitsland merkbaar is. Waterstandsdeling in Duitsland kan zowel positieve als negatieve effecten hebben op de Nederlandse waterveiligheid. Positief, doordat de kans op een overstroming vanuit Duitsland (via de Oude IJssel, een overstroming 'via de achterdeur') kleiner wordt. Negatief, doordat de waterstandsdeling mogelijk leidt tot minder overstromingen in Duitsland, waardoor de Nederlandse Rijntakken een hogere rivierafvoer te verwerken krijgen.

In de toekomst zal de invloed van overstromingen in Duitsland steeds relevanter worden, omdat zij door klimaatverandering (zonder adequate ingrepen) steeds vaker zullen voorkomen. Aftoppen van de rivierafvoer wordt dan steeds belangrijker voor de waterveiligheid langs de Nederlandse Rijntakken. Grensoverschrijdende effecten zijn dus van belang voor een visie op systeemwerking, en voor systeemmaatregelen die worden voorzien in het grensgebied, zoals Rijnstrangen. Er is echter nog niet eerder onderzocht hoe groot en relevant de effecten van overstromingen in Duitsland op de rivierafvoer zijn.

Recent is een nieuw hydraulisch model van de Duitse en Nederlandse Rijn ontwikkeld, waarin zowel het rivierbed als het binnendijkse gebied zijn opgenomen, alsmede de interactie tussen deze twee delen van het model. Daardoor kunnen de effecten van overstromingen in Duitsland beter in beeld gebracht worden dan met de oudere modellen, die niet het volledige binnendijkse gebied bevatten. Dit model is toegepast in de voorliggende studie.

## 1.2

### Doel

Het doel van dit onderzoeksproject is het verkrijgen van inzicht in de effecten van rivierverruiming in Nederland op de afvoer van de Rijn bij Lobith, door interactie tussen de waterstandsdeling en overstromingen langs de Duitse Niederrhein mee te nemen. Het in kaart brengen van deze interactie draagt bij aan systeembekendheid, waardoor effecten van maatregelen nabij de grens op waterveiligheid beter in beeld kunnen worden gebracht.

## Onderzoeksvragen

Dit onderzoek beantwoordt de volgende onderzoeksvragen.

**Vraag 1:** hoe verhoudt het aftopgedrag (maximale afvoer) op basis van eerdere inschattingen zich tot het gedrag in het nieuwe model?

**Vraag 2:** Wat zijn de effecten van een waterstandsdeling bij Lobith op de rivierafvoer bij Lobith?

**Vraag 3:** Wat is het effect van een waterstandsdeling bij Lobith op herhalings tijden van extreme afvoeren op de Nederlandse Rijntakken?

**Vraag 4:** Welke invloed heeft een waterstandsdeling bij Lobith op overstroomingspatronen in Duitsland en Nederland, en welke invloed heeft de model-schematisatie daarop?

**Vraag 5:** Welke inzichten en aandachtspunten volgen uit deze studie voor het berekenen van de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen die bovenstrooms van de grens nog invloed hebben?

## Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de werkwijze voor dit onderzoek. Hoofdstuk 3 vat de resultaten van de berekeningen samen. In Hoofdstuk 4 worden de resultaten gekoppeld aan de onderzoeksvragen in een synthese. Vervolgens besluit het rapport met conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 5.



## 2 Werkwijze

### 2.1 Software en Hardware

De berekeningen zijn gedaan op het rekencluster van HKV met Windows 7 als besturingssysteem. De software waarmee gerekend is een door Deltares toegeleverde niet-officiële release van SOBEK 3, afgeleid van SOBEK 3.7.4. Daarbij is gebruik gemaakt van de DIMR (Deltares Integrated Model Runner) functie voor het opstarten van de berekeningen. Voor pre- en post-processing van modelberekeningen is gebruik gemaakt van de Delta Shell, met de officiële release van SOBEK 3.7.4.

De scripts voor de analyse van de resultaten zijn gemaakt in Python 3.6 met de volgende packages: Pandas, Numpy, Gridded, os, Matplotlib en netCDF4. De binnen het project ontwikkelde scripts voor de visualisaties van de overstromingen en het verloop van de waterstanden zijn separaat opgeleverd aan Rijkswaterstaat.

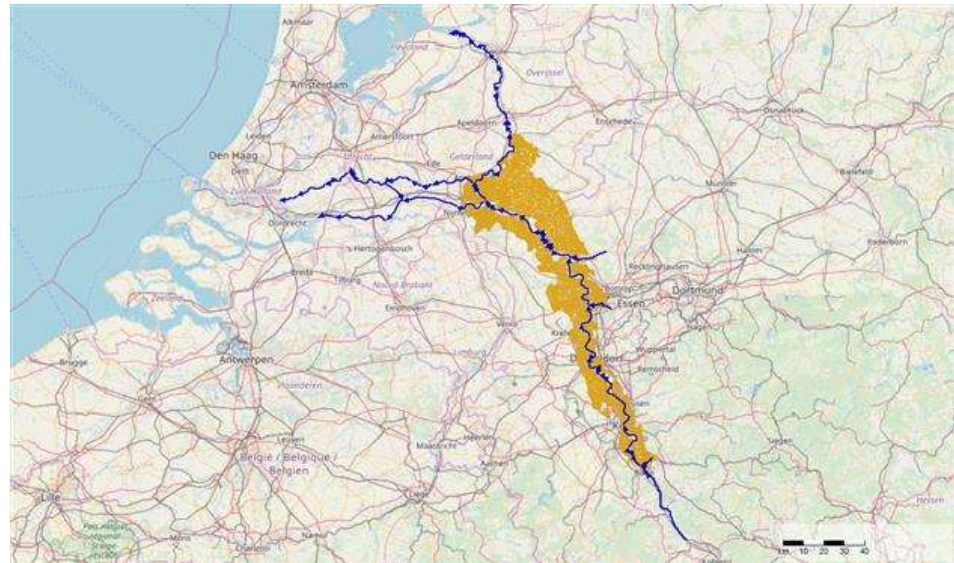
### 2.2 Model

Het gebruikte model voor deze studie is: DuitseRijn-v12\_DB\_v374. Dit is een 1D-2D SOBEK 3-model dat nog in ontwikkeling is, en aan het projectteam ter beschikking is gesteld door Deltares. De 1D-schematisatie bestaat uit de Rijn vanaf Andernach (rivierkilometer 615) tot de benedenstroomse randen van de Waal, Lek en IJssel bij respectievelijk Hardinxveld, Krimpen aan de Lek en het Ketel/Kattendiep.

Het 2D-deel van het model beslaat het overstroombare gebied rondom de Rijn, vanaf Bonn tot de lijn Nijmegen-Arnhem-Zutphen. Dit is een triangulair rooster. De basis voor de bodemhoogte en ruwheid komt uit Baseline. Dit deel van het model is nog volledig uitontwikkeld. Er worden nog tests uitgevoerd door Deltares, en verbeteringen in de modelschematisatie van het buitendijkse gebied toegepast.

De koppeling tussen het 1D- en 2D-rooster bestaat uit verbindingen ('links') die de dijken en kades representeren, zie Figuur 1. Voor deze koppeling zijn twee versies doorgerekend: een versie met en een versie zonder dijkdoorbraken. Het verschil tussen deze varianten is dat zonder dijkdoorbraken alleen uitwisseling tussen de twee delen bestaat wanneer het waterniveau in het 1D-model hoger is dan de kruinhoogte van de dijk, waardoor overloop optreedt. In het model mét doorbraken wordt bresgroei gesimuleerd wanneer er overloop plaatsvindt, waardoor er een groter volume water het binnendijkse gebied binnen stroomt. Water kan ook weer terug de rivier in stromen als de rivierwaterstand voldoende is gedaald.

*Figuur 1  
Het 1D- en 2D-deel  
van het 1D-2D  
SOBEK 3-model.*



### 2.2.1

#### Randvoorwaarden

Naast de bovenstroomse rand bij Andernach zijn nog drie extra bovenstroomse randvoorwaarden gedefinieerd op de Siegel, Lippe en Ruhr, waarmee de toevoer via deze rivieren wordt gesimuleerd. Deze rivieren hebben elk een eigen tak in het model met een lengte van 5 tot 10 km. Kleinere toevoeren zijn ingevoerd als laterale debieten. Voor al deze randen is de toevoer afgeleid met GRADE. De randvoorwaarden voor de verschillende golven zijn toegeleverd door Deltares (zie paragraaf 2.2.2)

Op de benedenstroomse randen van het 1D-model zijn relaties tussen afvoer en waterstand (Qh-relaties) gedefinieerd. Zulke Qh-relaties zijn ook gespecificeerd voor locaties waar het water het 2D-rooster uit kan stromen. Daarmee wordt gespecificeerd hoeveel afvoer het model kan verlaten bij een bepaalde waterdiepte. Deze Qh-relaties zijn niet gewijzigd ten opzichte van het door Deltares toegeleverde model.

### 2.2.2

#### Afvoergolven

In dit onderzoek zijn drie afvoergolven gebruikt, met verschillende piekafvoeren: 21.500, 24.000 en 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 1, 2 en 3). Alleen voor het bepalen van een geschikte onttrekking (paragraaf 2.2.3) is nog een vierde golf gebruikt, met een piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach ('golf 0'). Bij deze golf treden alleen overstromingen op bovenstrooms van Wesel, waardoor deze golf zich goed leent voor het verkennen van het effect van onttrekkingen op de Nederlandse Bovenrijn op de waterstand bij Lobith (paragraaf 2.2.3), zonder beïnvloeding door overstromingen nabij de grens.

De golven worden opgelegd op bovenstroomse rand van het model, bij Andernach. Alle drie de golven, inclusief de bijbehorende lateralen, zijn toegeleverd door Deltares, en komen uit de GRADE-serie met klimaatscenario W+

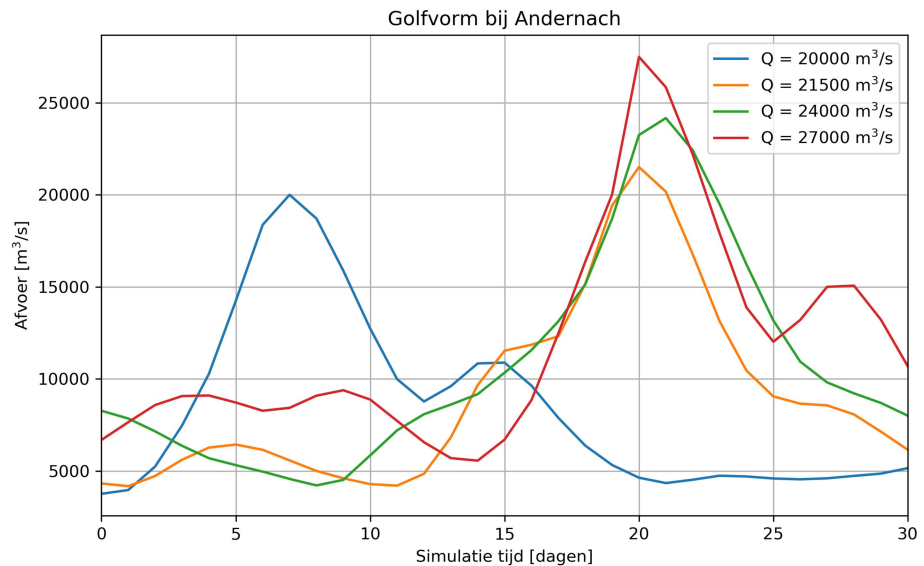
(KNMI, 2006) voor het zichtjaar 2100. Binnen de set met golven voor het huidige klimaat zijn namelijk geen situaties aanwezig, waarbij significante overstromingen optreden in het bovenstroomse gebied, op relatief korte afstand van Lobith.

In de onderstaande Tabel 1 zijn de karakteristieken van de verschillende golven weergegeven. De breedte wordt hier gedefinieerd als het aantal dagen waarbij bij Andernach het debiet groter is dan 12.000 m<sup>3</sup>/s. De bij Andernach opgelegde golven zijn weergegeven in Figuur 2.

Tabel 1  
Karakteristieken  
gebruikte afvoergol-  
ven uit GRADE

Golf	Piekwaarde afvoer bij Andernach [m <sup>3</sup> /s]	Breedte van de golf [dagen]
0	20.000	5,0
1	21.500	7,1
2	24.000	9,2
3	27.000	12,6

Figuur 2  
Verloop in de tijd  
van de gebruikte  
afvoergolven uit  
GRADE



### 2.2.3

### Waterstandsdeling via onttrekking van debiet

Er zijn meerdere mogelijkheden voor het bewerkstellingen van een waterstandsdeling bij Lobith. Twee opties zijn overwogen:

1. Een debiet onttrekken nabij Lobith, en verder benedenstrooms weer in het systeem brengen.
2. Alleen een debiet onttrekken nabij Lobith, en de afvoer in de benedenstroomse Rijntakken verlaagd laten.

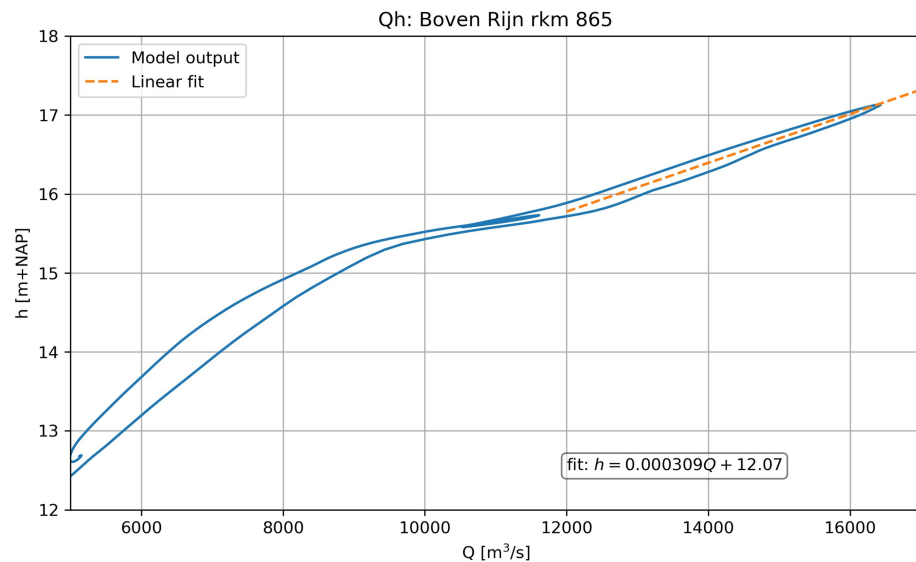
Optie 1 is afgefallen, omdat de afstand tussen Lobith en de Pannerdensche Kop vrij klein is, ruimschoots korter dan de halveringslengte van de stuwkromme. Dit had ingehouden dat het effect van de onttrekking weer deels ongedaan gemaakt zou worden door de toestroom een aantal kilometer benedenstrooms. Aangezien waterstanden en debieten in het Nederlandse

deel van de Rijntakken buiten de scope van dit onderzoek vallen, is er daarom voor gekozen om de ingreep te beperken tot een eenvoudige onttrekking van afvoer op de Nederlandse Bovenrijn, optie 2.

Om een debiet te onttrekken aan de Bovenrijn is een 'LateralDischarge' punt toegevoegd aan het model ter plaatse van rivierkilometer 865, bij Millingen. Op dit punt wordt de onttrekking van het debiet in 5 dagen opgebouwd naar de gewenste waarde, waarna deze constant gehouden wordt.

Voor een schatting van de toe te passen onttrekking is gebruik gemaakt van de Qh-relatie voor rivierkilometer 865, op basis van een modelberekening met de golf met piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (circa 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, zie Figuur 3). De Qh-relatie is afgeleid via lineaire regressie op de combinaties van afvoer en waterstand, voor afvoeren boven 12.000 m<sup>3</sup>/s (oranje stippellijn in Figuur 3). In dit bereik leidt een verschil in debiet van 1000 m<sup>3</sup>/s tot een waterstandsverschil van 31 cm.

*Figuur 3  
Qh-relatie bij rivierkilometer 865, op basis van een modelberekening met een piekwaarde van de afvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach*



Met inachtneming van de halveringslengte van de stuwkromme zijn de volgende onttrekkingen gekozen: 750, 1500 en 2250 m<sup>3</sup>/s. Tabel 2 geeft de effecten op de piekwaterstand, zoals berekend door het model met de golf met piekafvoer van 20.000 m<sup>3</sup>/s. Bij km 865 komt de modelmatig berekende waterstands daling goed overeen met de vooraf ingeschatte waterstands daling via de Qh-relatie. Deze waterstands daling reduceert vervolgens in bovenstroomse richting tot de waarden bij Lobith (vierde kolom), en bij Wesel (vijfde kolom).

*Tabel 2  
Berekende waterstands dalingen bij verschillende onttrekkingen bij km 865.*

Onttrekking [m <sup>3</sup> /s]	Daling waterstand km 865 uit Qh relatie [cm]	Berekende daling km 865 [cm]	Berekende daling Lobith [cm]	Berekende daling Wesel [cm]
750	23	23,8	18,3	2,1
1500	46	48,6	37,1	4,2
2250	70	73,5	55,5	5,8

# 3 Resultaten

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de modelberekeningen. Paragraaf 3.1 beschrijft de effecten op waterstanden, waarna paragraaf 3.2 de waterstanden langs de Duitse Niederrhein vergelijkt met de dijkhoogtes aan weerszijden van de rivier. Paragraaf 3.3 laat zien hoe de rivierafvoer afneemt van Andernach naar Lobith door rivieroverstromingen, en wat de invloed is van waterstandsval bij Lobith.

De hoofdtekst van het rapport bevat resultaten voor de afvoergolf met een piekafvoer van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, Tabel 1). Deze golf geeft een goed beeld van de belangrijkste rekenresultaten, omdat er bij deze golf overstromingen optreden in Duitsland, dicht bij de Nederlandse grens. In de bijlagen A t/m C zijn figuren opgenomen voor alle drie de afvoergolven.

In de basisberekeningen treedt dijkdoorbraak op zodra overloop van een dijk plaatsvindt. In paragraaf 3.4 zijn ook de resultaten opgenomen van een alternatieve berekening, waarbij de dijken alleen overstromen, zonder dat er bressen ontstaan.

Paragraaf 3.5 laat overstromingspatronen zien, en het effect van de waterstandsverlagende maatregelen daarop. Paragraaf 3.6 bevat tenslotte samenvattende figuren met de getallen uit de berekeningen voor de verschillende golven.

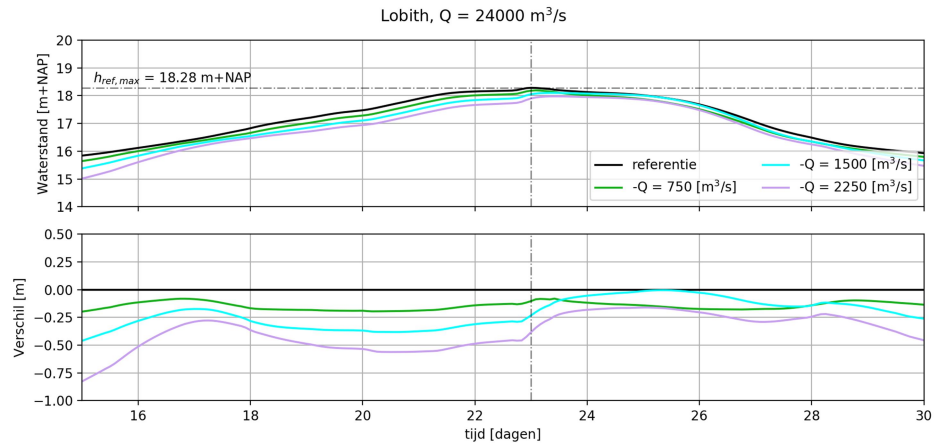
## 3.1

### Effecten op waterstanden

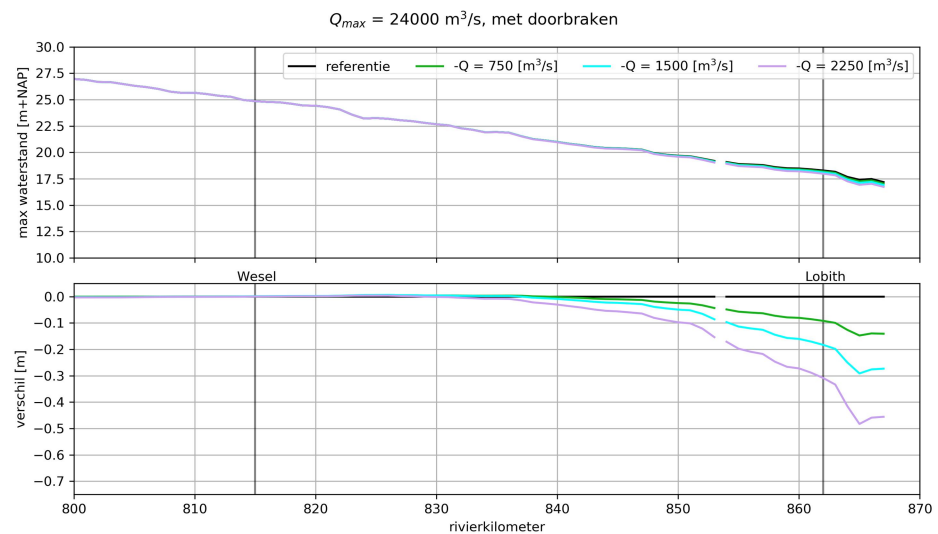
Zoals beschreven in paragraaf 2.2.3 waren onttrekkingen geen doel op zichzelf, maar een middel om rivierkundige ingrepen met een waterstandsverlagend effect bij Lobith na te bootsen. Netto waterstandsverschillen worden veroorzaakt door een combinatie van twee bruto effecten: het effect van de onttrekking, en het effect van een toename van de totale rivierafvoer (zie paragraaf 3.2).

In de onderstaande figuren zijn de (netto) effecten van de drie verschillende onttrekkingen op de waterstand weergegeven voor de afvoergolf met een piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, Tabel 1), voor de simulatie waarbij dijkdoorbraak optreedt zodra overloop van een dijk plaatsvindt. Figuur 4 geeft het tijdsverloop van de waterstand bij Lobith en Figuur 5 het waterstandsverloop over het deel van de Rijn tussen Wesel en de Pannerdensch Kop.

**Figuur 4**  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de waterstand bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, met doorbraken). Verticale lijn: maximale waterstand.



**Figuur 5**  
Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale waterstand, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, met doorbraken).



De piekwaterstanden bij Lobith liggen 9, 18 en 31 cm lager bij deze golf, door respectievelijk 750, 1500 en 2250 m<sup>3</sup>/s te onttrekken bij rkm 865. De focus ligt op de waterstanden rond de piek van de golf. Op de flanken van de golf zijn de waterstandsverschillen als gevolg van de constante onttrekking nog groter, maar deze verschillen vallen buiten de scope van deze studie, en zijn daarom geaccepteerd.

Tabel 3 toont de verschillen in maximale waterstand voor alle afvoergolven, onttrekkingen en overstroming versus dijkdoorbraak. De waardes betreffen verschillen in het maximum van de waterstand bij Lobith. Diverse maxima treden niet noodzakelijkerwijs gelijktijdig op. De waterstandsverschillen bij de laagste van de drie afvoergolven (golf 1, Tabel 1) zijn het grootst, omdat bij deze golf geen overstromingen optreden in het deel van de Rijn direct bovenstrooms van Lobith. Bij golf 2 en 3 wordt de waterstandsverlaging weer deels ongedaan gemaakt door een toename van de afvoer (paragraaf 3.2).

Tabel 3  
Effect van onttrekkingen bij rkm 865 op waterstanden bij Lobith, voor verschillende afvoergolven en in berekeningen met dijkdoorbraken en met alleen overloop.

Golf	Piekaflow Andernach (m <sup>3</sup> /s)	Doorbraken	Piekwaterstand Lobith (m NAP), referentie	Effecten op waterstanden (cm)		
				750 m <sup>3</sup> /s	1500 m <sup>3</sup> /s	2250 m <sup>3</sup> /s
1	21.500	Ja	18,04	-17	-35	-54
2	24.000	Ja	18,28	-9	-18	-31
3	27.000	Ja	18,28	-10	-20	-29
1	21.500	Nee	18,04	-17	-36	-54
2	24.000	Nee	18,33	-9	-19	-30
3	27.000	Nee	18,34	-9	-19	-29

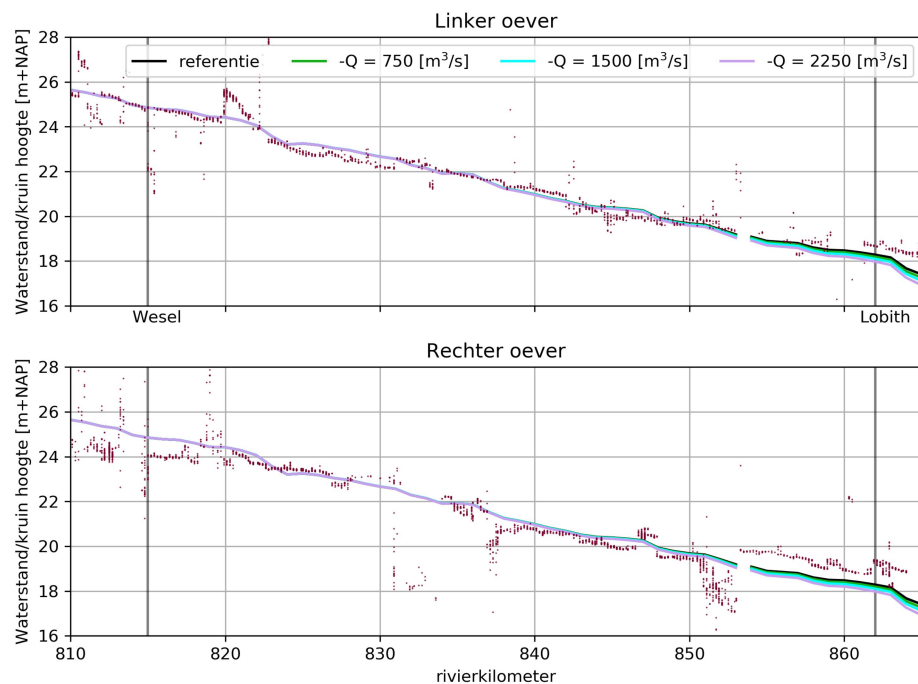
### 3.2

## Waterstand versus dijkhoogte in Duitsland

Bij 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 1) blijven de waterstanden tussen Wesel en Lobith grotendeels onder de kruinhoogte van de dijk. Onder de aanname dat dijken alleen breken na overschrijden van de kruinhoogte, treden voor deze golf dus geen noemenswaardige overstromingen op in dit gebied. Een waterstandsval bij Lobith via een onttrekking heeft daardoor geen duidelijke effecten op de rivierafvoer (zie Tabel 4).

Figuur 6 toont de waterstanden in de rivier bij de golf met 24.000 m<sup>3</sup>/s piekaflow bij Andernach (golf 2) ten opzichte van de dijkhoogtes tussen Wesel en Lobith, aan de linker en rechter oever. De kruinhoogtes zijn verkregen uit het Baseline model van de Niederrhein, en vervolgens gekoppeld aan de dichtstbijzijnde rivierkilometer. Hierdoor zijn er aan de meeste rivierkilometers meerdere kruinhoogtes gekoppeld.

Figuur 6  
Maximale waterstand in relatie tot de kruinhoogte van de dijken bij de linker en rechter oever, voor de golf met een piekaflow van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. (golf 2, met dijkdoorbraken). Referentie in zwart, situaties met onttrekking in kleuren.



Bij 24.000 en 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2 en 3) treden er aan beide zijden van de rivier overstromingen op, voornamelijk rond rkm 825-830 (linkeroever), rkm 835-845 (rechteroever) en rkm 848-852 (rechteroever). Waterstandsdeling bij Lobith leidt daardoor tot minder grote overstromingen bovenstrooms van Lobith, voornamelijk rond rkm 850. Hierdoor is het netto effect (effect onttrekking minus effect van minder aftoppen) van een onttrekking kleiner dan het bruto effect (puur het effect van de onttrekking).

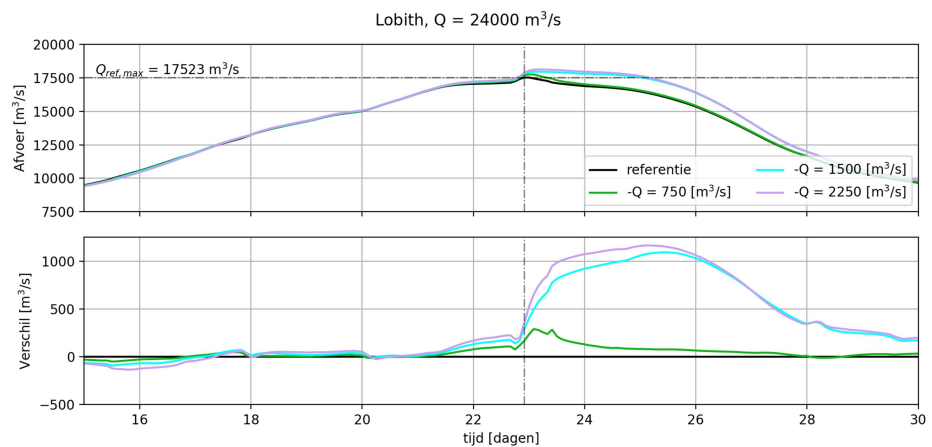
### 3.3

## Effecten op de rivierafvoer

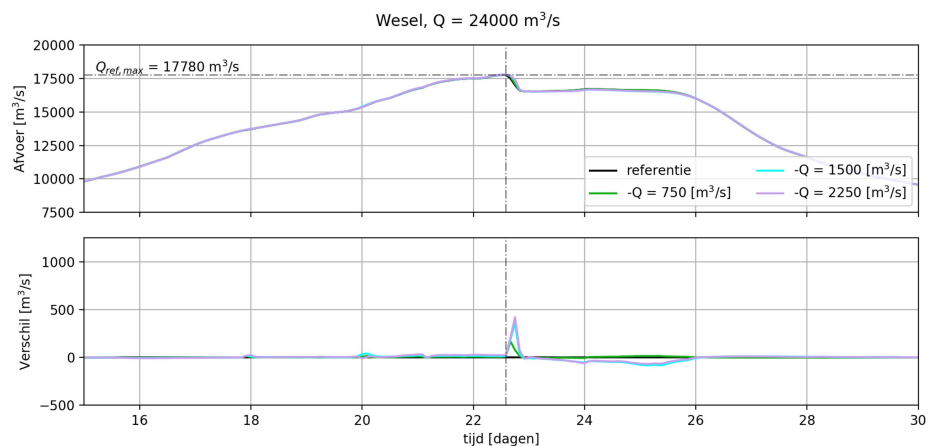
Het effect van de onttrekking op de afvoer door de totale bedding van de Rijn (tussen beide dijken) is weergegeven als tijdsverloop in Figuur 7 (t.p.v. Lobith) en Figuur 8 (t.p.v. Wesel). Figuur 9 geeft de maximale rivierafvoer en het verschil in maximale afvoer over de rivierkilometers.

Uit Figuur 7 blijkt dat het verschil in de maximale afvoer (op de piek van de golf) aanzienlijk kleiner is dan het maximale verschil in de afvoer (op de achterflank). Een waterstandsdeling bij Lobith vermindert namelijk het wegstromen van water via de bressen die zijn ontstaan tijdens de piek van de golf. Hierdoor treedt er in de achterflank van de golf (24-28 dagen) een aanzienlijke verhoging van de afvoer bij Lobith op, tot meer dan 1000 m<sup>3</sup>/s bij 20-30 cm waterstandsdeling bij Lobith (onttrekkingen van 1500-2250 m<sup>3</sup>/s).

**Figuur 7**  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, met doorbraken).



**Figuur 8**  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Wesel, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, met doorbraken).

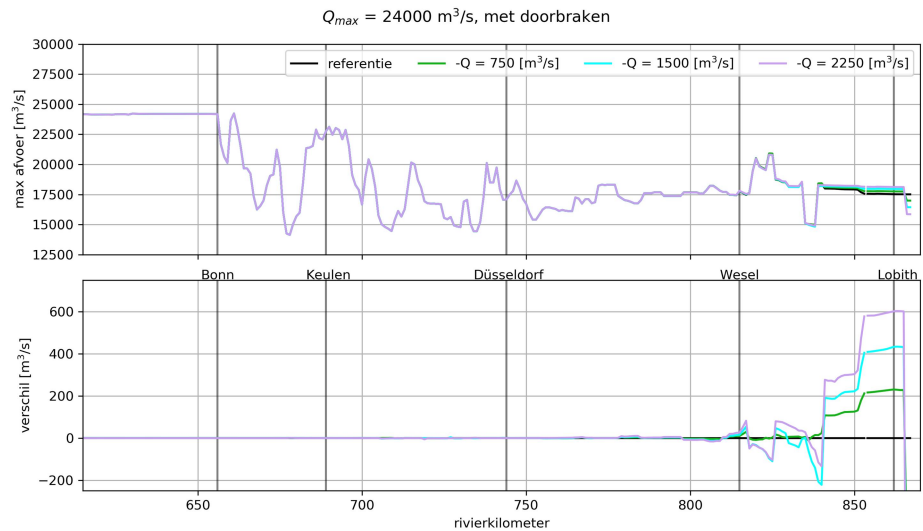




Op het moment van de piek zorgt een onttrekking bij rkm 865 met bijbehorende waterstands­daling voor een toename van de afvoer van de Rijn bij Lobith, doordat er minder overstromingen en doorbraken optreden boven­streams. Ter plaatse van Wesel zijn de verschillen op de afvoer niet meer noemenswaardig, omdat water­standseffecten van de onttrekkingen en overstromingen niet zover reiken (Figuur 5).

In bijlage B zijn voor de andere twee afvoergolven (1 en 3) en voor de situa­tie zonder dijkdoorbraken (dus alleen overloop) dezelfde figuren opgenomen.

*Figuur 9  
Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale rivierafvoer, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2, met doorbraken).*



Tabel 4 toont de verschillen in maximale rivierafvoer voor alle afvoergolven, onttrekkingen en overstroming versus dijkdoorbraak. De waarden betreffen verschillen in het maximum van de rivierafvoer bij Lobith, die niet noodzake­lijkerwijs exact gelijktijdig op hoeven te treden.

*Tabel 4  
Effect van onttrekkingen op rivierafvoer bij Lobith, voor verschillende afvoergolven en in berekeningen met en zonder dijkdoorbraken.*

Golf	Piekafvoer Andernach (m <sup>3</sup> /s)	Doorbraken	Piekafvoer Lobith (m <sup>3</sup> /s), referentie	Effecten op afvoeren (m <sup>3</sup> /s)		
				750 m <sup>3</sup> /s	1500 m <sup>3</sup> /s	2250 m <sup>3</sup> /s
1	21.500	Ja	16.645	+20	+35	+47
2	24.000	Ja	17.523	+231	+435	+604
3	27.000	Ja	17.542	+242	+453	+659
1	21.500	Nee	16.664	+20	+33	+47
2	24.000	Nee	17.655	+217	+418	+616
3	27.000	Nee	17.679	+220	+425	+629

Tussen Andernach en Lobith wordt reeds in de referentiesituatie de piek van de golven 2 en 3 breder en lager door overstromingen. Bij beide golven bereikt zonder onttrekking ruim 17.500 m<sup>3</sup>/s de Rijn bij Lobith (Tabel 4).

Bij de kleinste water­stands­daling bij Lobith (door 750 m<sup>3</sup>/s onttrekking) neemt de afvoer bij Lobith bij golf 2 en 3 met ongeveer 240 m<sup>3</sup>/s toe (1,4%), doordat er meer water in de rivier blijft in Duitsland bij de verlaagde water­standen. Wanneer in het Nederlandse gedeelte van de Rijn verder geen

overstromingen plaatsvinden, zal dit bij benadering op de benedenstroomse Rijntakken leiden tot de volgende toenames van de afvoer: Waal 160 m<sup>3</sup>/s, Pannerdensch Kanaal 80 m<sup>3</sup>/s, IJssel 27 m<sup>3</sup>/s en Nederrijn-Lek 53 m<sup>3</sup>/s. Op deze takken betekent geeft dit een stijging van de maximale waterstand in de orde van 6 cm op de Waal, 4 cm op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn, en 2 cm op de IJssel (o.b.v. HKV, 2011).

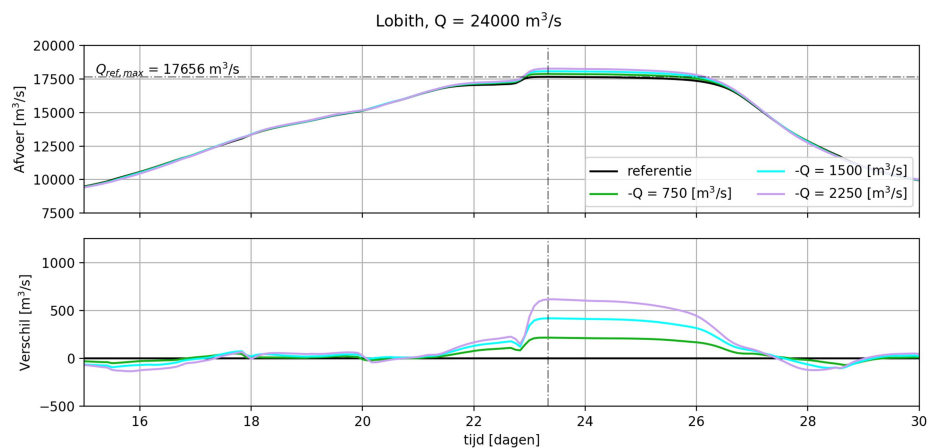
Bij de grootste beschouwde waterstandsvaling bij Lobith (door de onttrekking van 2250 m<sup>3</sup>/s) neemt de afvoer benedenstrooms op de Rijntakken in totaal met ruim 600 m<sup>3</sup>/s toe (3,5%). Dit zorgt voor de volgende effecten op de benedenstroomse riviertakken: +400 m<sup>3</sup>/s en +16 cm op de Waal, +200 m<sup>3</sup>/s en +10 cm op het Pannerdensch Kanaal, +133 m<sup>3</sup>/s en +9 cm op de Nederrijn en +67 m<sup>3</sup>/s en +6 cm op de IJssel.

### 3.4

## Overloop versus dijkdoorbraak

Figuur 10 toont voor golf 2 het tijdsverloop van het debiet bij Lobith voor de situatie waarbij dijken niet doorbreken, maar alleen overstromen. Deze figuur dient vergeleken te worden met Figuur 7, waarbij dijken wél doorbreken zodra overloop optreedt. Op de piek van de golf zijn de verschillen tussen deze twee berekeningen beperkt (ca. 15 m<sup>3</sup>/s). In de achterflank van de golf zijn echter grote verschillen zichtbaar. In de berekening waarbij bressen zijn ontstaan, blijft de afvoer op de Rijntakken in de gehele achterflank van de golf lager dan in de situatie met alleen overloop, zoals reeds toegelicht bij Figuur 7.

*Figuur 10  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2), voor de berekening zonder dijkdoorbraken.*



Als alleen overloop optreedt, wordt de afvoer gedurende ongeveer drie dagen afgetopt tot een constant niveau van ongeveer 17.600 m<sup>3</sup>/s (Figuur 10). Bij een waterstandsvaling bij Lobith van 30 cm (onttrekking van 2250 m<sup>3</sup>/s) neemt dit constante niveau toe tot ongeveer 18.200 m<sup>3</sup>/s. In de referentiesituatie (dus zonder waterstandsverlaging bij Lobith) houdt de piek korter aan in de berekening met doorbraken (Figuur 7) dan in de berekening met alleen overloop (Figuur 10). Een forse waterstandsverlaging bij Lobith (20-30 cm) zorgt ervoor dat ook in de berekening mét doorbraken de afvoer lang tegen

de piekwaarde aan ligt. De afvoergolf bij Lobith benadert dan qua vorm de golf uit de situatie met alleen overloop.

Tabel 5 drukt dit effect uit in termen van een verandering van het aantal dagen waarvoor de rivierafvoer bij Lobith hoger ligt dan 17.000 m<sup>3</sup>/s. Een onttrekking bij rkm 865 (met bijbehorende waterstandsdeling bij Lobith) zorgt niet alleen voor een hogere piekafvoer (paragraaf 3.2) maar ook voor een langere duur van de twee hogere afvoergolven.

*Tabel 5  
Effect van onttrekkingen op lengte van de piek van de golf bij Lobith, voor verschillende afvoergolven en in berekeningen met en zonder dijkdoorbraken.*

Golf	Piekafvoer Andernach (m <sup>3</sup> /s)	Doorbraken	Aantal dagen met afvoer boven 17.000 m <sup>3</sup> /s			
			ref, 0 m <sup>3</sup> /s	750 m <sup>3</sup> /s	1500 m <sup>3</sup> /s	2250 m <sup>3</sup> /s
1	21.500	Ja	0,0	0,0	0,0	0,0
2	24.000	Ja	1,9	2,4	3,9	4,1
3	27.000	Ja	2,2	2,6	2,8	3,8
1	21.500	Nee	0,0	0,0	0,0	0,0
2	24.000	Nee	4,7	4,8	4,9	4,9
3	27.000	Nee	4,4	4,6	4,8	4,8

### 3.5

## Overstromingspatronen

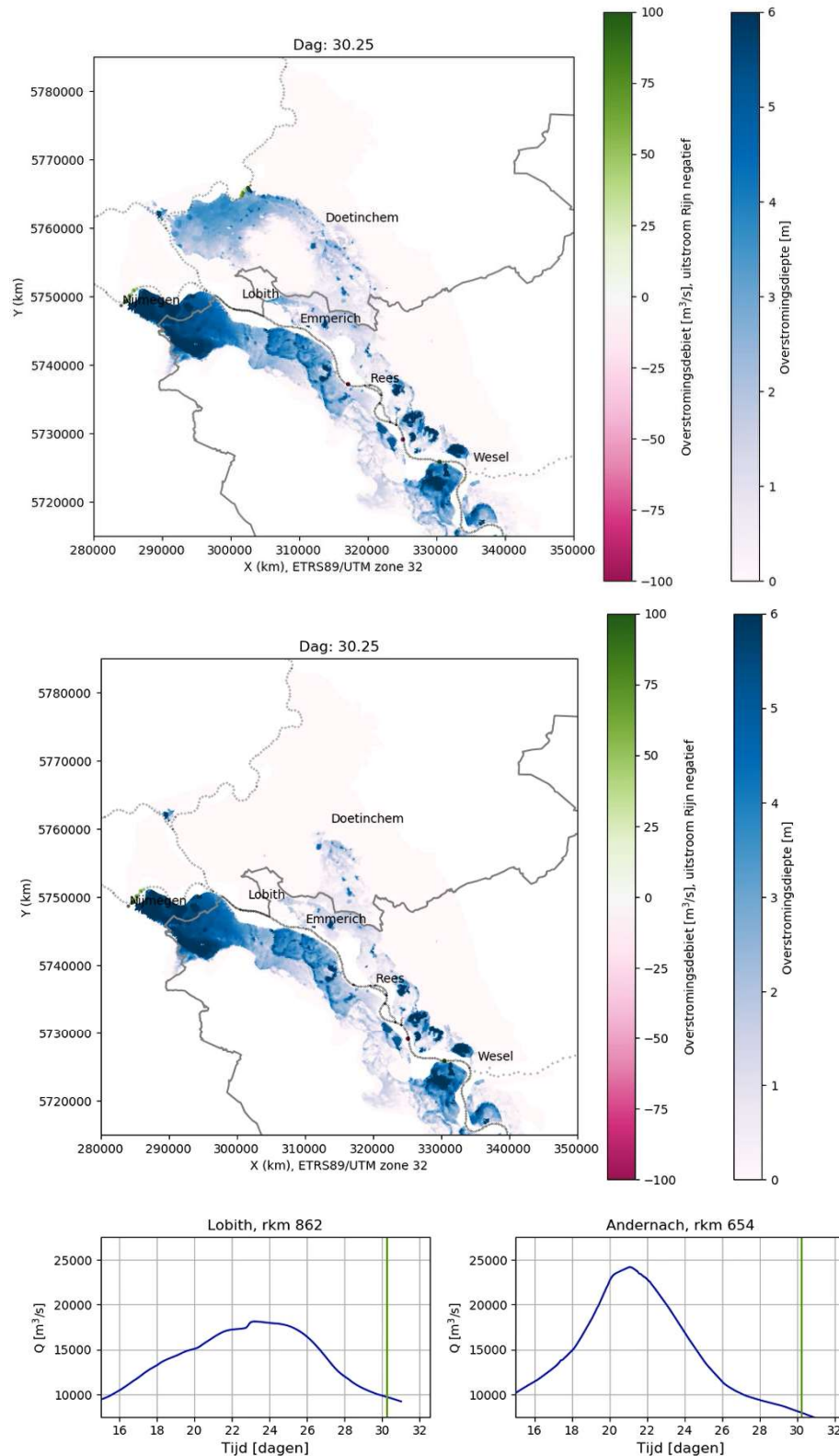
De figuren in deze paragraaf tonen de inundatiediepte als gevolg van overstromingen tussen Wesel en de benedenstroomse grens van het 2D rooster, na passeren van de golven 2 en 3 (Tabel 1). Dit tijdstip laat zien hoever het water bij een dijkdoorbraak uiteindelijk kan doordringen in het binnendijkse gebied. Bij golf 1 treden geen noemenswaardige overstromingen op dicht bij de grens, waarom de overstromingspatronen voor deze golf niet zijn opgenomen in dit rapport.

De bovenste kaarten tonen de inundatiediepte in de referentiesituatie, en de onderste kaarten in het geval van de grootste waterstandsdeling bij Lobith (door de onttrekking van 2250 m<sup>3</sup>/s bij rkm 865). Via de paars-groene kleurschaal is aangegeven waar langs de rivier uitwisseling van water met het binnendijkse gebied optreedt.

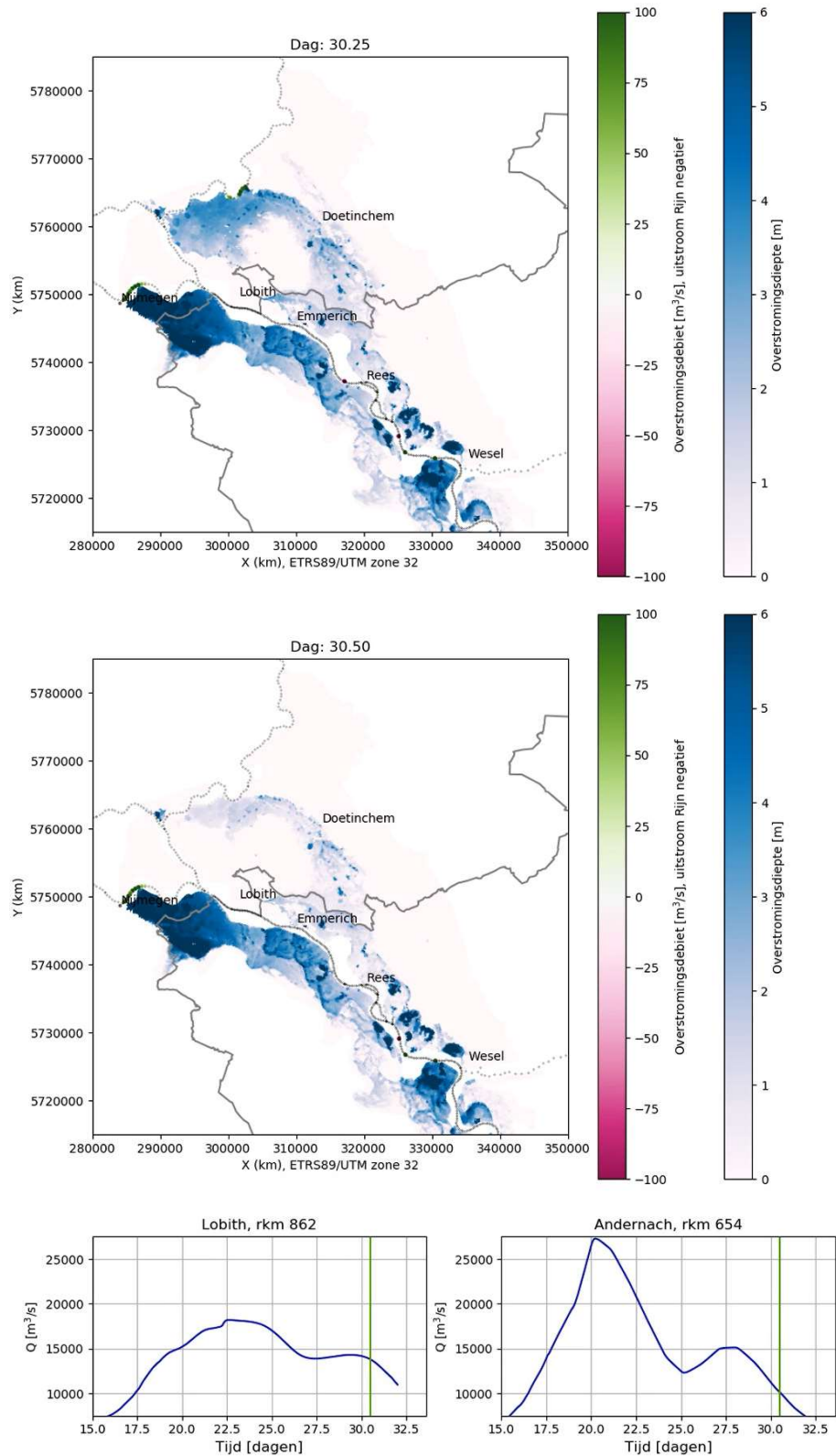
*NB1. De uitwisseling tussen de rivier en de binnendijkse gebieden is in deze figuren beperkt, omdat de golf hier reeds gepasseerd is. Op eerdere momenten binnen de afvoergolf is deze uitwisseling duidelijker zichtbaar.*

*NB2. De ontwikkeling van de inundatiedieptes voor alle doorgerekende afvoergolven, scenario's voor dijkdoorbraken en onttrekkingen bij rkm 865 zijn separaat bij dit rapport opgeleverd in de vorm van animaties.*

**Figuur 11**  
 Inundatiediepte na passeren van de golf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach (golf 2), in de berekening met dijkdoorbraken, in de referentiesituatie (bovenste kaart) en in de situatie met 2250 m<sup>3</sup>/s onttrekking bij rkm 865 (onderste kaart). Onder de kaarten staat het verloop van de afvoergolf bij Lobith (links) en Andernach (rechts), met de verticale streep op het tijdstip behorend bij de kaarten.



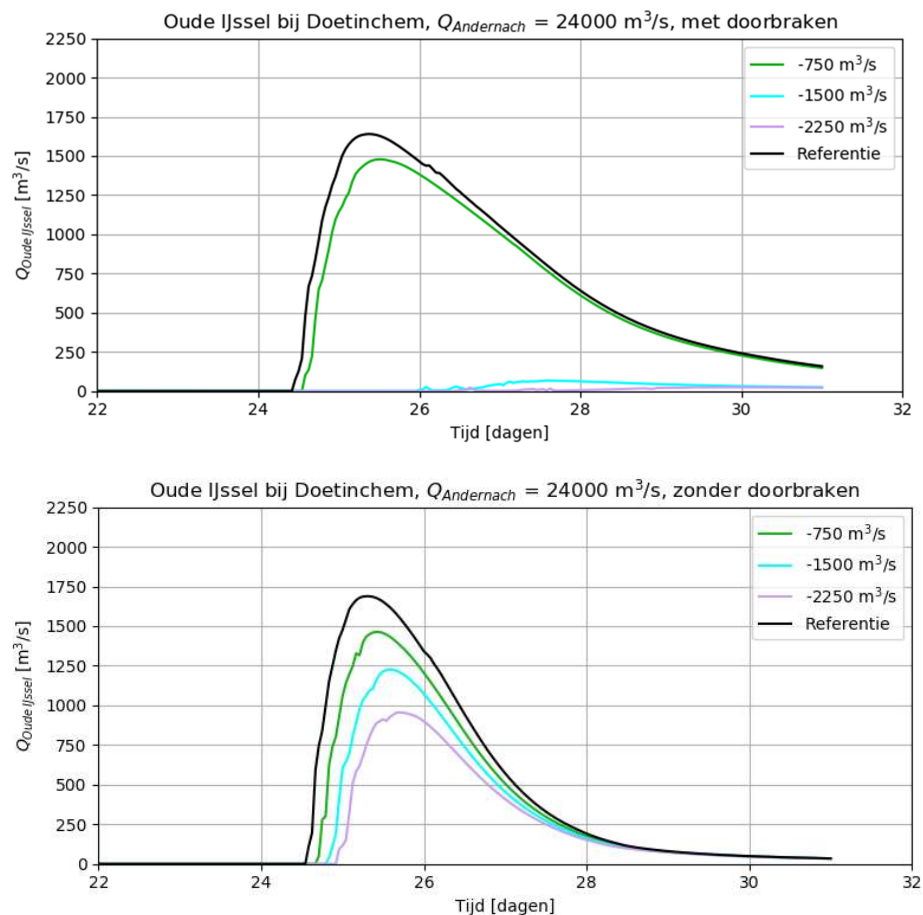
**Figuur 12**  
 Inundatiediepte na  
 passeren van de golf  
 met piekwaarde van  
 27.000 m<sup>3</sup>/s bij  
 Andernach (golf 3),  
 in de berekening  
 met dijkdoorbraken,  
 in de referentiesitua-  
 tie (bovenste kaart)  
 en in de situatie met  
 2250 m<sup>3</sup>/s onttrek-  
 king bij rkm 865  
 (onderste kaart).  
 Onder de kaarten  
 staat het verloop  
 van de afvoergolf bij  
 Lobith (links) en  
 Andernach (rechts),  
 met de verticale  
 streep op het tijdstip  
 behorend bij de  
 kaarten.



Ten opzichte van de referentiesituatie dringt er in de scenario's met waterstandsval bij Lobith minder water het binnendijkse gebied binnen, en starten de overstromingen later. De overstroming gaat in het model door het laaggelegen gebied, de oude beddingen van de Rijntakken. Aan de Noordzijde van de rivier stroomt het water door de bedding van de Oude IJssel, via Doetinchem, richting Pannerdensch Kanaal en de IJssel. Vaak bereikt daar het water aan de binnenzijde van de dijk niet het kruinniveau van de dijken, zodat het water niet terugstroomt naar de rivier. Regionale keringen in het overstroomde gebied kunnen de overstromingspatronen beïnvloeden, en een compartimenterende werking hebben. Deze keringen zijn mogelijk niet of onnauwkeurig in het model aanwezig. De grootste waterstandsval op de Rijn bij Lobith (door de onttrekking van  $2250 \text{ m}^3/\text{s}$ ) zorgt ervoor dat bij golf 2 de overstroming niet verder komt dan Doetinchem.

Figuur 13 toont voor golf 2 de afvoer door de bedding van de oude IJssel bij Doetinchem. Hier stroomt in de berekening met doorbraken en 20-30 cm waterstandsverlaging bij Lobith (door  $1500\text{-}2250 \text{ m}^3/\text{s}$  onttrekking) nauwelijks water meer doorheen, tegen maximaal ruim  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  in de referentiesituatie. Waterstandsverlaging bij Lobith zorgt er dus voor dat er zodanig veel minder water het binnendijkse gebied binnenkomt, dat het overstroomde gebied beperkt van omvang blijft. Bij de berekening zonder doorbraken (alleen overloop) zijn waterstanden in de Rijn langduriger hoog, waardoor waterstandsverlaging bij Lobith alleen een gradueel verschil bewerkstelligt.

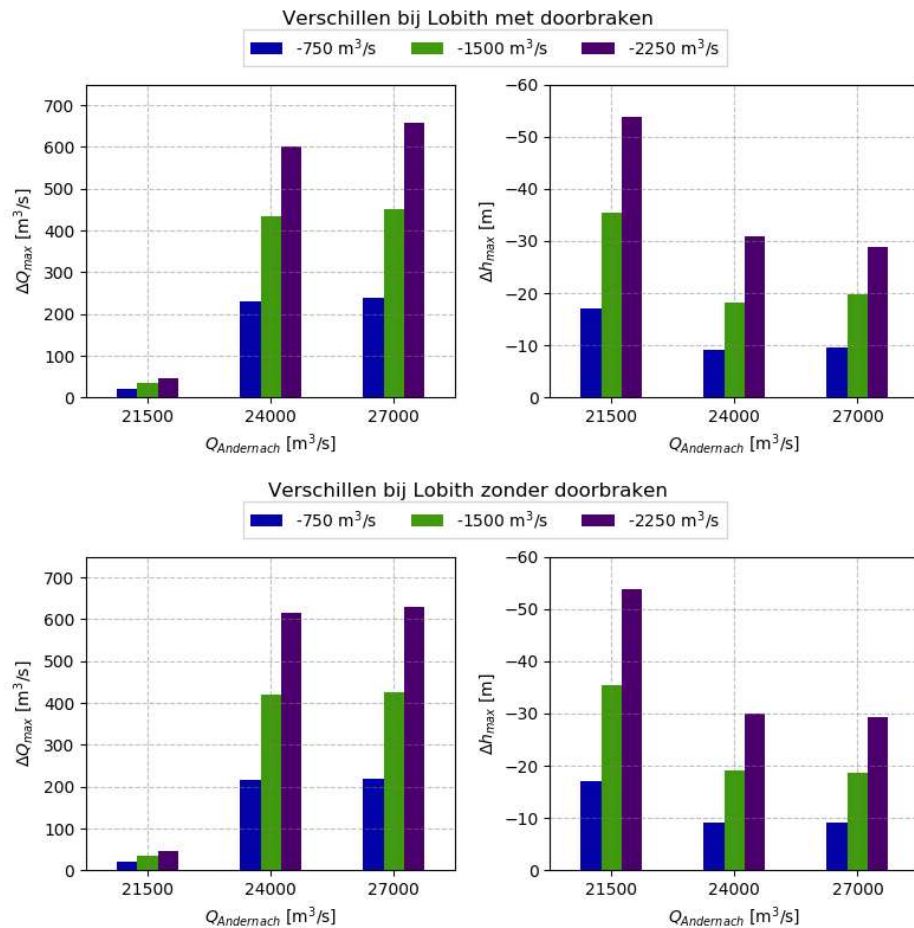
*Figuur 13 Afvoer door de Oude IJssel bij Doetinchem bij de golf met piekwaarde van  $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Andernach (golf 2), en bij diverse onttrekkingen in de Rijn bij rkm 865, in de situatie met doorbraken (boven) en de situatie met alleen overloop (onder).*



## Samenvatting effecten

Figuur 14 toont samenvattend het effect van onttrekkingen bij rkm 865 op de waterstand en afvoer bij Lobith, bij drie verschillende afvoergolven, voor de berekeningen met dijkdoorbraken dan wel alleen overloop. De waarden betreffen verschillen in het maximum van de waterstand en het debiet bij Lobith, die niet noodzakelijkerwijs exact gelijktijdig op hoeven te treden.

*Figuur 14  
Effecten van verschillende onttrekkingen op de maximale rivierafvoer (linker figuren) en maximale waterstand (rechter figuren) bij Lobith, voor verschillende afvoergolven (horizontale assen), en voor de simulaties met dijkdoorbraken (bovenste figuren) en met alleen overloop (onderste figuren).*



De voornaamste resultaten zijn:

1. Bij golf 1 (21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach) heeft waterstandsvaling bij Lobith geen noemenswaardig effect op de rivierafvoer bij Lobith. Dit effect treedt alleen op bij de hogere golven 2 en 3 (24.000 en 27.000 m<sup>3</sup>/s).
2. De golven 2 en 3 zijn sterk vergelijkbaar in termen van effect op de maximale waterstand en maximale rivierafvoer bij Lobith.
3. De toename in rivierafvoer lijkt vrij lineair toe te nemen met de grootte van de waterstandsvaling bij Lobith.
4. Voor de piekwaterstand is er weinig verschil tussen berekeningen met doorbreken dan wel alleen overstrooming van de dijken. Er zijn echter wel grote verschillen in vorm en duur van de piek. Overloop van dijken treedt namelijk slechts kortdurend op, terwijl water langdurig weg kan stromen uit de rivier als er eenmaal een bres is ontstaan.

Het volgende hoofdstuk verbindt deze resultaten verbonden aan de onderzoeksvragen die zijn geformuleerd in paragraaf 1.3.





# 4 Synthese

Dit hoofdstuk beantwoordt de onderzoeksvragen 1 tot en met 4 op basis van de resultaten uit het vorige hoofdstuk en de bijlagen bij dit rapport. Vraag 5 wordt aan de orde gebracht in de conclusies in hoofdstuk 5. De golven met piekwaarden van 21.500, 24.000 en 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach worden in de teksten hieronder kortweg aangeduid als golf 1, 2 en 3 (zie Tabel 1).

## **Vraag 1: hoe verhoudt het aftopgedrag (maximale afvoer) op basis van eerdere inschattingen zich tot het gedrag in het nieuwe model?**

De nieuwe berekeningen tonen opnieuw aan hoe belangrijk overstromingen in Duitsland zijn voor de afvoer van de Rijn die bij de grens Nederland binnenkomt. De afvoergolven 2 en 3, met een sterk verschillende afvoer bij Andernach (24.000 en 27.000 m<sup>3</sup>/s), resulteren in vrijwel dezelfde piekafvoer bij Lobith (respectievelijk 17.520 en 17.538 m<sup>3</sup>/s in de berekening met doorbraken). Dit duidt op een fysisch maximum bij Lobith, ongeacht de rivierafvoer bovenstrooms in Duitsland. Dit is in overeenstemming met eerder onderzoek op basis van GRADE berekeningen, waaruit voor de huidige riviergeometrie een fysisch maximum van circa 17.500 m<sup>3</sup>/s volgde, verband houdend met overstromingen in Duitsland (ENW, 2016).

Wel verschillen beide golven duidelijk in vorm en duur. Bij Andernach overschrijdt golf 2 gedurende 9,2 dagen een afvoer van 12.000 m<sup>3</sup>/s (50% van de piekwaarde). Bij golf 3 is dit 12,6 dagen het geval (Tabel 1). Bij Lobith is dit verschil nog steeds merkbaar: respectievelijk 10,7 en 11,9 dagen boven 12.000 m<sup>3</sup>/s, en 15,6 en 21,8 dagen boven 9.000 m<sup>3</sup>/s (50% van de piekwaarde). De golven verschillen daardoor ook in overstromingspatroon (zie vraag 4).

Als alle dijken bovenstrooms van Lobith niet doorbreken, maar enkel overstromen, heeft dit geen grote invloed op de piekafvoer (135 m<sup>3</sup>/s toename bij golf 2 en 141 m<sup>3</sup>/s bij golf 3). Wel zijn er aanzienlijke gevolgen voor de duur van de afvoergolf bij Lobith. Met overstromingen is de piek kort: 1,9 dagen boven 17.000 m<sup>3</sup>/s bij golf 2, en 2,2 dagen bij golf 3 (zie Tabel 5). Zonder overstromingen benadert de rivierafvoer langdurig de piekwaarde: 4,7 dagen boven 17.000 m<sup>3</sup>/s bij golf 2, en 4,4 dagen bij golf 3.

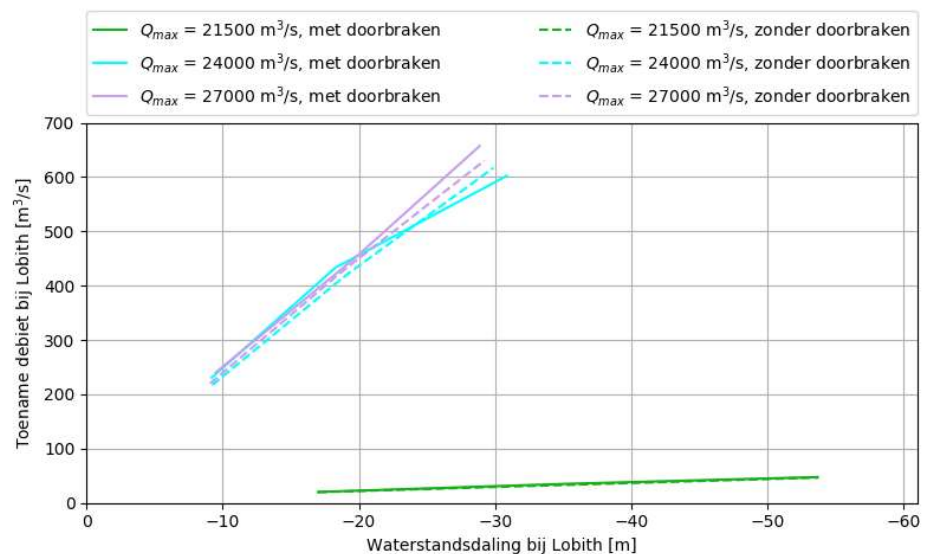
## **Vraag 2: Wat zijn de effecten van een waterstandsval bij Lobith op de rivierafvoer bij Lobith?**

Waterstandsverlaging bij Lobith leidt tot minder overstromingen in het bovenstroomse deel van de Rijn. Hierdoor blijft er meer water in de rivier, en neemt de afvoer van de Rijn toe. Dit zorgt ervoor dat de waterstandsverlaging bij Lobith weer deels wordt tenietgedaan, en resulteert in een toename van de rivierafvoer en waterstanden verder benedenstrooms op de Neder-

landse Rijntakken Waal, Pannerdensch Kanaal, IJssel en Nederrijn. In een aantal gevallen kwam de berekende afvoer bij Lobith door een waterstands-daling wél boven de 18.000 m<sup>3</sup>/s uit.

Figuur 15 toont voor de drie afvoergolven hoe een waterstandsverlaging bij Lobith samenhangt met een verandering in de piekafvoer bij Lobith. De verschillende piekafvoeren treden niet noodzakelijkerwijs tegelijk op. Te zien is dat er bij golf 1 wel een effect is op waterstanden, maar nauwelijks een effect op de rivierafvoer. Dit komt doordat er bij deze golf nog geen grote overstromingen plaatsvinden dicht bij de grens, met uitzondering van de kade bij Emmerich. Opmerkelijk is de grote overeenkomst tussen de golven 2 en 3, zowel met doorbreken als overstromen van bovenstroomse dijkringen.

*Figuur 15  
Netto toename van de piekafvoer bij Lobith door een daling van de piekwaterstand bij Lobith voor drie verschillende afvoergolven (waardes afvoer bij Andernach), in de situaties met en zonder dijkdoorbraken.*



De waterstands-daling op de horizontale as van Figuur 15 betreft een netto waterstands-daling bij Lobith, die bestaat uit twee componenten:

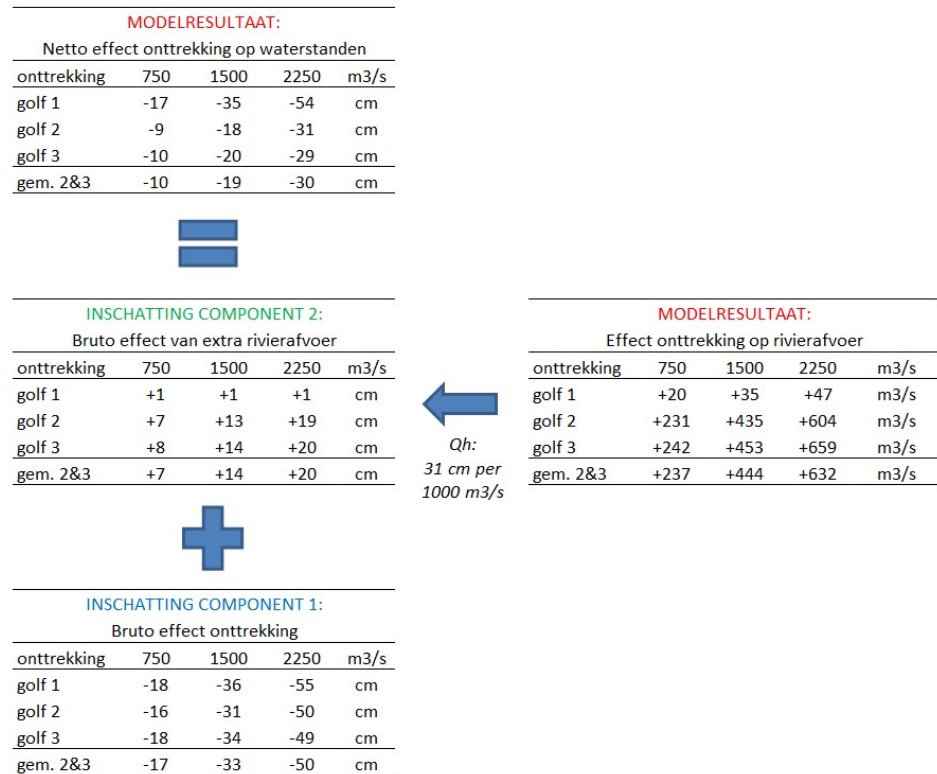
1. Een bruto waterstands-daling door rivierverruiming in Nederland;
2. Een bruto waterstandstijging door een toegenomen rivierafvoer.

Als in een rivierkundige studie het effect van rivierverruiming zou worden berekend met een model waarin overstromingen in Duitsland niet zijn opgenomen, wordt alleen een bruto waterstands-daling door rivierverruiming berekend (component 1). Er zou dan separaat nog moeten worden ingeschat hoeveel extra rivierafvoer Nederland binnen zal komen bij afvoerniveaus rond 17.000 m<sup>3</sup>/s, waarbij overstromingen in Duitsland nabij Lobith relevant worden. We geven hier een inschatting van de afwijkingen in waterstanden en rivierafvoeren die daardoor worden veroorzaakt.

Voor deze inschatting maken we gebruik van de lineaire Qh-relatie uit Figuur 3 (31 cm per 1000 m<sup>3</sup>/s). De effecten op rivierafvoer (zie Tabel 4) zijn via deze Qh-relatie vertaald naar bruto waterstandstijgingen (component 2). Door deze bruto waterstandstijgingen van de netto waterstands-dalingen (Tabel 3) af te trekken, wordt een inschatting verkregen van bijbehorende bruto waterstands-dalingen bij Lobith. Deze werkwijze is getoond in Figuur 16.

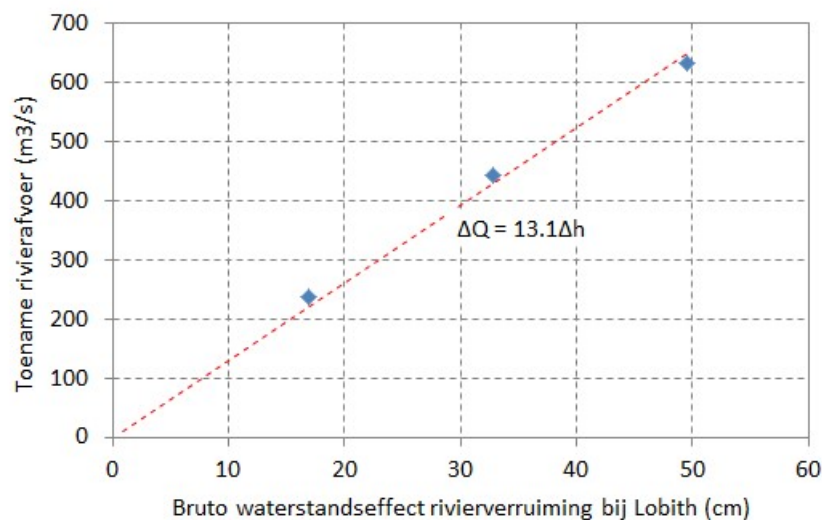
Het netto effect van rivierverruiming bij Lobith bedraagt slechts circa 60% van het bruto effect van de verruiming. Ongeveer 40% van het waterstandseffect wordt dus tenietgedaan door een toename in de afvoer.

*Figuur 16  
Opsplitsing van netto waterstandsdaling in een bijdrage van de onttrekking en een bijdrage van de toegenomen rivierafvoer.*



De toename van de rivierafvoer door de waterstandsdaling bij Lobith is merkbaar op de gehele benedenstroomse Rijntakken. Figuur 17 toont een rechte lijn door nul en de gemiddelde waarden voor de golven 2 en 3. Deze lijn geeft bij Lobith 130 m<sup>3</sup>/s extra rivierafvoer per 10 cm bruto waterstandsdaling (component 1 uit Figuur 16). Deze verhouding (130 m<sup>3</sup>/s per 10 cm) geldt voor de situatie waarbij de rivierafvoer wordt beperkt (afgetopt) door overstromingen in Duitsland.

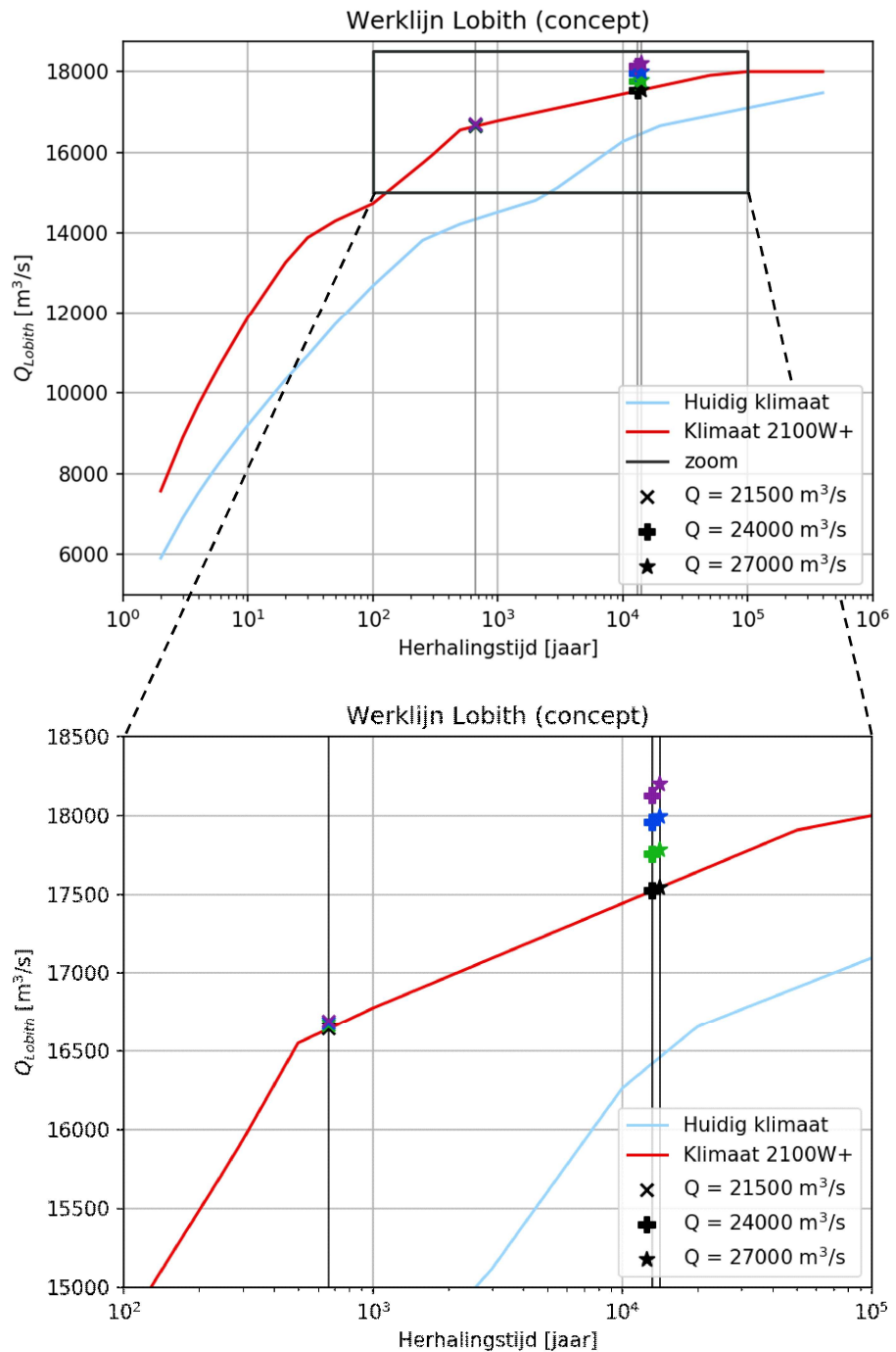
*Figuur 17  
Gevolgen van een bruto waterstandsdaling bij Lobith ( $\Delta h$ , component 1 uit Figuur 16) op de rivierafvoer bij Lobith ( $\Delta Q$ ), gemiddeld over de golven 2 en 3 uit Tabel 1.*



**Vraag 3: Wat is het effect van een waterstandsdaling bij Lobith op herhalingstijden van extreme afvoeren op de Nederlandse Rijntakken?**

Voor het bepalen van de terugkeertijden bij de berekende debieten bij Lobith is gebruik gemaakt van de concept werklijn vanuit het GRADE instrumentarium, behorend bij het klimaat in 2100 volgens het W+ klimaatscenario. Deze concept werklijn beschrijft welke rivierafvoer met welke terugkeertijd te verwachten is, en is door Deltares ter beschikking gesteld voor dit onderzoek. De concept GRADE werklijnen voor het huidige klimaat en W+ in 2100 zijn weergegeven in Figuur 18.

*Figuur 18  
Concept GRADE werklijnen bij huidig klimaat en in 2100 bij klimaatscenario W+. Markers tonen het effect van onttrekkingen van 750, 1500 en 2250 m<sup>3</sup>/s (groen, blauw, paars) op de ligging van de werklijn bij de 3 verschillende afvoergolven.*



De werklijn is afgeleid voor twee situaties: het huidige klimaat en het voorspelde klimaat in 2100 volgens het W+ klimaatscenario, waarin hogere extreme rivierafvoeren worden verwacht. Binnen het huidige klimaat loopt de werklijn tot een debiet van 17.474 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, met een geschatte herhalingstijd van 400.000 jaar. Binnen het klimaatscenario W+ in 2100 loopt de werklijn tot een maximaal debiet van 18.000 m<sup>3</sup>/s. Dit is het hoogste debiet dat bij Lobith door de Rijn kan komen (het 'fysisch maximum', volgens de huidige inzichten). Ook in de berekeningen voor de huidige studie komt het debiet in de referentiesituatie niet boven deze waarde uit.

De 3 geselecteerde golven uit GRADE zijn afkomstig uit de set met realisaties van neerslag voor het W+ scenario in 2100 (zie paragraaf 2.2.2). Daarom is de herhalingstijd van de piekafvoeren in de 3 golven ook ingeschat met de werklijn voor het W+ klimaatscenario in 2100, zie Tabel 6. De piekafvoeren bij Lobith volgen uit de simulaties met dijkdoorbraken, wat gezien wordt als de simulatie die het best bij de werkelijkheid aansluit.

*Tabel 6  
Afgeleide herhalingstijden (T) van de piekafvoeren bij Lobith in de referentiesituatie met dijkdoorbraken*

	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>max</sub> [m+NAP]	T (2100, W+) [jaar]
Golf 1	16.644	18,04	664
Golf 2	17.520	18,28	13.211
Golf 3	17.538	18,29	14.130

Bij de terugkeertijden uit Tabel 3 is in Figuur 18 grafisch weergegeven hoe het debiet verschuift als gevolg van de waterstandsdeling die volgt op een onttrekking van 750, 1500 en 2250 m<sup>3</sup>/s nabij Lobith. Bij golf 1 zijn de effecten op de werklijn nog beperkt. Bij golf 2 en 3 is een aanzienlijke verticale verschuiving zichtbaar. Dit duidt erop dat waterstandsdeling bij Lobith een significante invloed heeft op de vorm van de werklijn, en daarmee op de terugkeertijd van extreme afvoeren in de benedenstroomse Rijntakken.

#### **Vraag 4: Welke invloed heeft een waterstandsdeling bij Lobith op overstromingspatronen in Duitsland en Nederland, en welke invloed heeft de modelschematisatie daarop?**

*De overstromingspatronen voor alle doorgerekende afvoergolven, scenario's voor dijkdoorbraken en onttrekkingen bij rkm 865 zijn separaat bij dit rapport opgeleverd in de vorm van animaties. Deze dienen als ondersteuning bij het beantwoorden van deze vraag.*

De waterstandsdeling bij Lobith zorgt via de stuwkromme voor lagere waterstanden op de Niederrhein, waardoor er minder overstromingen plaatsvinden. Dit zorgt voor minder aftopping van de afvoergolf. Hiermee is het volume water dat het binnendijks gebied instroomt ook kleiner.

De waterstand bij **golf 1** overschrijdt de kerende hoogte van de kade van Emmerich, waardoor er maximaal 15 m<sup>3</sup>/s over de kade stroomt. Bij alle berekeningen met waterstandsdeling nabij Lobith wordt bij Emmerich de waterstand zo veel verlaagd, dat de kade net niet meer overstroomt.

Verder bovenstrooms, rondom Wesel, blijven overstromingen ontstaan, ook met waterstands dalingen. Aangezien bij Wesel het waterstandseffect minder dan 10% van de waterstands daling bij Lobith is, is hier de invloed op de overstromingen minimaal. Ook zorgen overstromingen bij Wesel niet voor binnendijks doorstromen naar de Nederlandse grens. Het verschil tussen overstroomd of doorbreken van de dijken leidt bij golf 1 niet tot noemenswaardig andere overstromingspatronen tussen Wesel en Lobith.

Bij **golf 2 en 3** zijn aanzienlijke overstromingen van het achterland zichtbaar. Een waterstands daling leidt dan ook tot significante verschillen in overstromingspatronen. In de berekening waarbij dijken niet doorbreken, maar alleen overlopen, zorgen waterstands dalingen voor een afname van het debiet richting de overstroomde gebied. Dit debiet is evenredig aan de lokale waterstands daling. Wanneer dijkdoorbraken meegenomen worden in de simulatie, is dit effect niet meer lineair.

Bij **golf 2** zorgt waterstands daling tussen Wesel en Rees voor minder overstromingen en daardoor minder doorbraken. Daarnaast bereikt de overstroming Nederland op een later tijdstip. Berging in het overstroomde gebied zorgt tevens voor verlaging van het debiet dat doorstroomt richting Nederland. Bij de twee grootste waterstands dalingen (door onttrekkingen van 1500 en 2250 m<sup>3</sup>/s) zorgt dit ervoor dat de overstromingen in de bedding van de Oude IJssel bij Doetinchem sterk afnemen tot minder dan 100 m<sup>3</sup>/s (Figuur 13). Waterstands daling bij Lobith resulteert dus in een afname van de omvang van een eventuele overstroming via 'de achterdeur', de rechter oever van de Rijn.

Tenslotte zorgen dijkdoorbraken, in vergelijking met alleen overloop, voor een aanzienlijk grotere hoeveelheid water die via de linker oever van de IJssel (tussen Wesel en Rees) richting de hoge gronden bij Nijmegen stroomt. De invloed van waterstands verlaging bij Lobith op de overstromingspatronen in dit gebied is gering.

Het gebruikte model is in eerste instantie niet ontwikkeld voor gedetailleerde overstromingsmodellering. Daarom zijn de overstromingspatronen ook niet gevalideerd. In het 2D domein zijn de bodemhoogtes en ruwheden en overlagen afgeleid uit Baseline model van deze regio. Het overstromingspatroon lijkt goed overeen te komen het hoogtemodel.

De volgende eigenschappen van het model beïnvloeden het overstromingspatroon:

- bodemligging en rooster,
- aanwezigheid en hoogte van lijnelementen zoals regionale keringen,
- keuze van de modelrand,
- definitie van Q-h relaties op de buitenrand van het 2D-rooster,
- wijze van simuleren van de doorbraken.

Met name de schematisatie van de regionale keringen lijkt van belang voor de overstromingen. Vergelijking met het AHN en een reliëfkaart van het

bundesland Nordrhein-Westfalen duiden er namelijk op dat regionale keringen en andere lijnelementen de overstromingen sterk sturen. Dit bepaalt de berging van de gebieden en daarmee hoe snel het water door kan stromen. De keuze van de ligging van de modelrand, en de specificatie van Qh-relaties op die randen zouden ook nog invloed kunnen hebben op de berging. In de simulaties bereiken de overstromingspatronen echter alleen de randen van het model bij hoge gronden, waar het water ook in werkelijkheid niet weg kan stromen. De Qh-relaties op de open randen van het 2D-deel van het model worden niet bereikt in deze berekeningen, waardoor deze geen invloed hebben op de berekende overstromingspatronen.

In het gebruikte model is overloop de enige trigger voor het optreden van een dijkdoorbraak. Dijken kunnen echter ook doorbreken bij waterstanden ruim onder de kruinhoogte van de kering, als gevolg van faalmechanismen als golfoverslag, piping en macro-instabiliteit. Uit de analyse van het overstromingspatroon met en zonder doorbraken voor golf 2, lijkt een complex samenspel van locaties en timing van doorbraken te bepalen welke gebieden in welke mate overstromen.





# 5 Conclusies

In de conclusies en aanbevelingen van dit rapport staat de laatste onderzoeksvraag centraal:

**Vraag 5: Welke inzichten en aandachtspunten volgen uit deze studie voor het berekenen van effectiviteit van rivierverruimende maatregelen die bovenstrooms van de grens invloed hebben?**

## 5.1 Conclusies

Verschillende extreme afvoergolven op de Rijn bij Andernach resulteren door overstromingen in Duitsland in een vrijwel gelijke piekafvoer bij Lobith: ongeveer 17.500 m<sup>3</sup>/s (kolom 4 uit Tabel 4). Dit duidt op een maximale afvoercapaciteit van de Rijn bij de huidige inrichting, en voor het beschouwde bereik aan rivierafvoeren. De piekafvoer bij Lobith is vrijwel ongevoelig voor het verschil tussen overstromen en doorbreken van dijken langs de Rijn in Duitsland.

Verschillen in golfkarakteristieken (piekafvoer, golfvorm) en gedrag van de dijken (doorbreken of alleen overstromen) komen echter wel tot uitdrukking in verschillen in overstromingspatroon in Duitsland, en indirect ook in Nederland. Daarnaast zorgen een hogere golf bij Andernach en het slechts overstromen van dijken beide voor een grotere tijdsduur waarop de rivierafvoer bij Lobith het maximale niveau van 17.500 m<sup>3</sup>/s benadert.

Waterstandsverlaging bij Lobith leidt tot minder overstromingen in het bovenstroomse deel van de Rijn. Hierdoor blijft er meer water in de rivier, en neemt de afvoer van de Rijn toe. Dit leidt tot afvoeren boven 18.000 m<sup>3</sup>/s in extreme gevallen (Tabel 4). Een waterstandsdeling bij Lobith door rivierverruiming in Nederland neemt met ongeveer 40% af door deze toename van de rivierafvoer, voor afvoergolven waarbij de maximale afvoercapaciteit van de Rijn wordt benaderd (17.500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith).

Als rivierverruiming wordt berekend met een model waarin effecten van overstromingen in Duitsland niet zijn opgenomen, moet rekening gehouden worden met 130 m<sup>3</sup>/s extra rivierafvoer voor elke 10 cm waterstandsdeling bij Lobith. Het netto effect van deze bruto 10 cm komt dan uit op 6 cm. De toename van de afvoer bij Lobith leidt tot een (bruto) toename van rivierafvoeren en waterstanden op de complete benedenstroomse Rijntakken: Waal, Pannerdensch Kanaal, IJssel, Nederrijn en Lek.

De overstromingspatronen volgen de bodemligging en kerende elementen zoals kades. Afhankelijk van het doorbreken en de doorbraak locaties verandert het patroon. Waterstandsdelingen hebben voornamelijk in de situatie

met doorbraken, invloed op het overstromen van de Oude IJssel. Echter is dit effect pas bij grote waterstandsdalingen (bruto effect  $> \sim 30$  cm) van belang.

## 5.2

### Aanbevelingen

Het is belangrijk om bij projecten als rivierverruiming, kribverlaging en stroomlijning nabij de grens niet alleen rekening te houden met een verlaging van waterstanden (bij een rivierafvoer rond  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), maar ook met een verhogend effect op de rivierafvoer bij Lobith (bij hogere rivierafvoeren, vanaf ongeveer  $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Het effect van waterstandsdaling op de rivierafvoer zal naar verwachting in de toekomst relevanter worden, omdat extreme rivierafvoeren dan waarschijnlijk toenemen door klimaatverandering, en (zonder ingrepen) vaker leiden tot overstromingen in Duitsland. Via een probabilistische beschouwing kan worden onderzocht wat de netto effecten van rivierverruiming zijn op de (toekomstige) overstromingskansen van dijkringen langs de Rijntakken. Een beschouwing van waterstandseffecten bij  $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$  volstaat niet bij projecten met grensoverschrijdende waterstandseffecten.

Hoewel de piekafvoer bij Lobith in de referentiesituatie (zonder waterstandsverlaging bij Lobith) een maximum waarde laat zien, geldt dit niet voor de duur van de afvoergolf. Deze wordt langer naarmate de golf verder bovenstrooms (bij Andernach) extremer is. Daarnaast wordt deze beïnvloed door het doorbreken ofwel alleen overstromen van dijken in Duitsland. We bevelen aan om na te gaan wat het belang is van deze bevindingen voor de kansverdeling van de tijdsduur van extreme rivierafvoeren, en daarmee voor de kans van optreden van faalmechanismen als piping.

Dijkversterkingen in Duitsland, en plannen daarvoor, moeten nauwlettend worden gevolgd door de Nederlandse overheid. Nabij de grens treden momenteel vooral overstromingen op nabij rivierkilometer 850. Een verandering van de keringen op dit traject zal invloed hebben op de in dit rapport beschreven interactie tussen waterstand en rivierafvoer bij Lobith.

In Duitsland en Nederland is sprake van doorgaande bodemerosie in het zomerbed. Bodemerosie leidt tot een groter doorstroomoppervlak, en daarmee tot lagere waterstanden in de gehele Rijn. Dit kan indirect als gevolg hebben dat er bij gelijke afvoer relatief minder overstromingen optreden in Duitsland, waardoor een hogere rivierafvoer de Nederlandse grens bij Lobith kan bereiken. Bodemerosie kan daarmee indirect ongunstig zijn voor de Nederlandse waterveiligheid. Het verdient aanbeveling om via aanvullende berekeningen de relevantie van deze interactie te onderzoeken.

We bevelen tenslotte aan om nader te onderzoeken of lijnelementen als kades en compartimenteringskeringen correct aanwezig zijn in het 2D-domein van het SOBEK 3-model. Zonder deze lijnelementen kan de omvang van overstromingen worden overschat, en de waterdiepte in gebieden dichtbij de Rijn worden onderschat.

# 6 Referenties

**ENW (2016).**

Heeft de Rijnafvoer bij Lobith een maximum? ENW notitie. prof.dr.ir. H.J. de Vriend, prof.dr.ir. M. Kok, ir. J. Pol, ir. M. Hegnauer. Oktober 2016.

**HKV (2011).**

Qf-relaties Rijntakken. HKV rapport pr1444, J.H.A. Wijbenga. December 2011.

**KNMI (2006)**

KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2006.



# Bijlagen



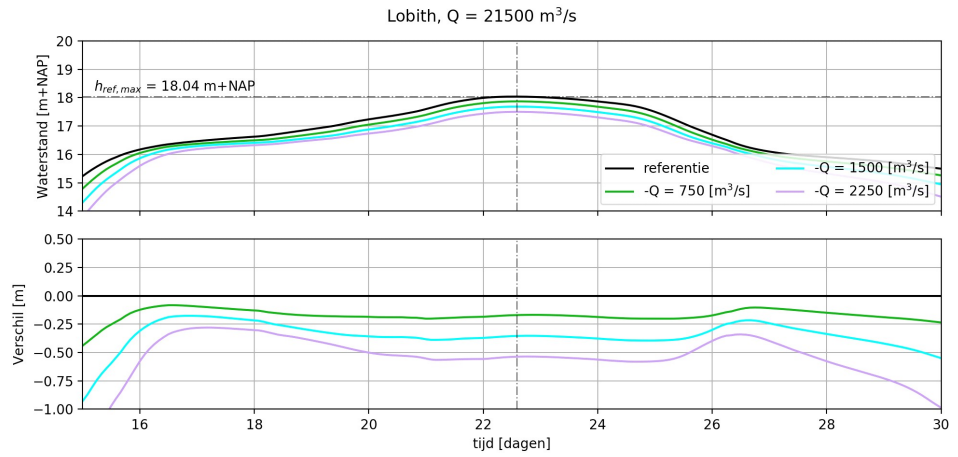
# A

## Golf met piekwaarde van 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach

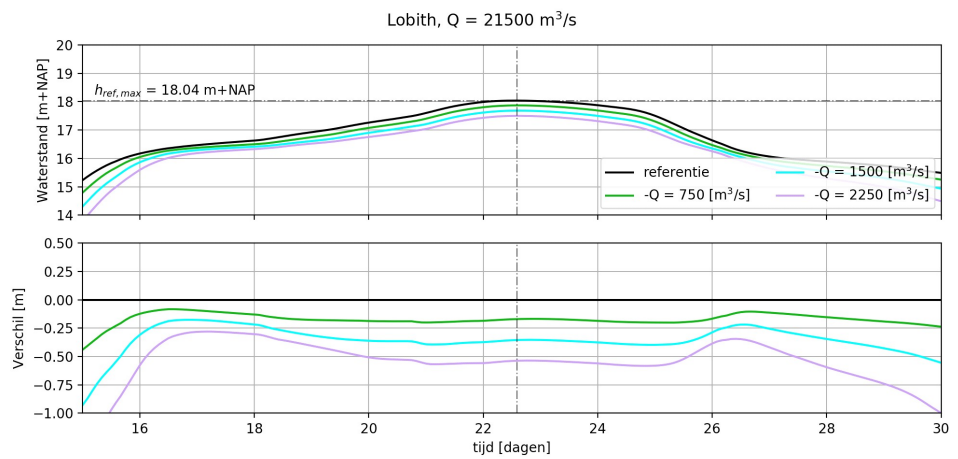
### A.1

### Effecten op waterstand

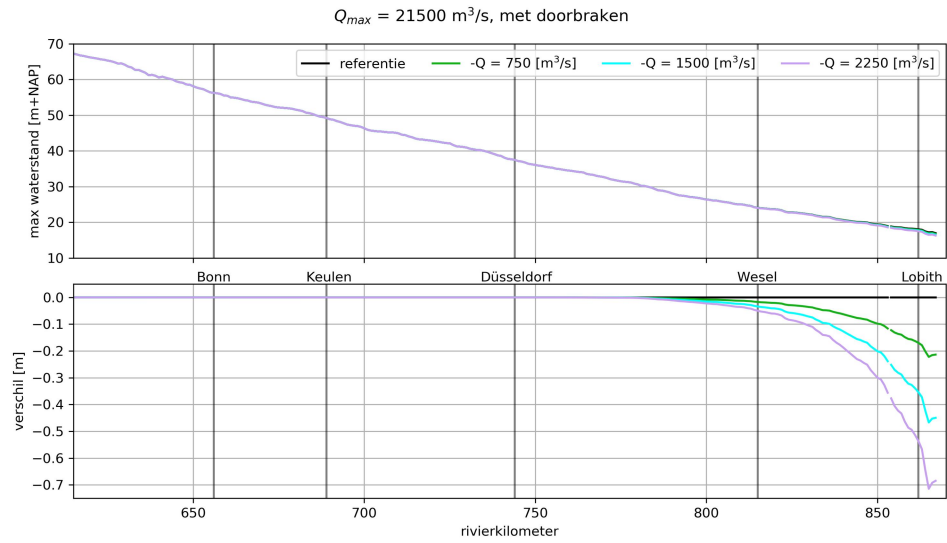
*Figuur 19  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de waterstand bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.*



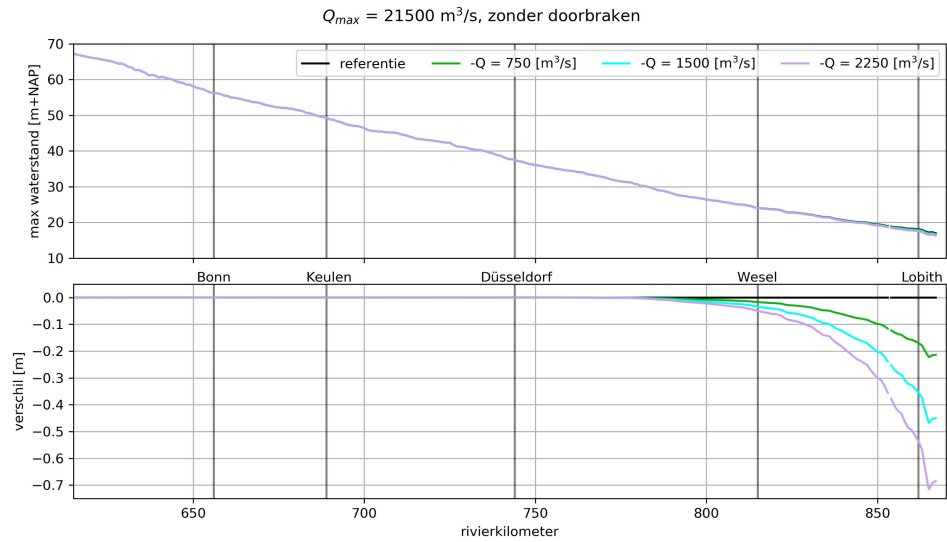
*Figuur 20  
Idem, situatie zonder doorbraken.*



*Figuur 21  
Ruimtelijk verloop  
van het effect van  
drie onttrekkingen  
op de maximale  
waterstand, bij een  
afvoergolf met  
piekwaarde van  
21.500 m<sup>3</sup>/s bij  
Andernach. Situatie  
met doorbraken.*

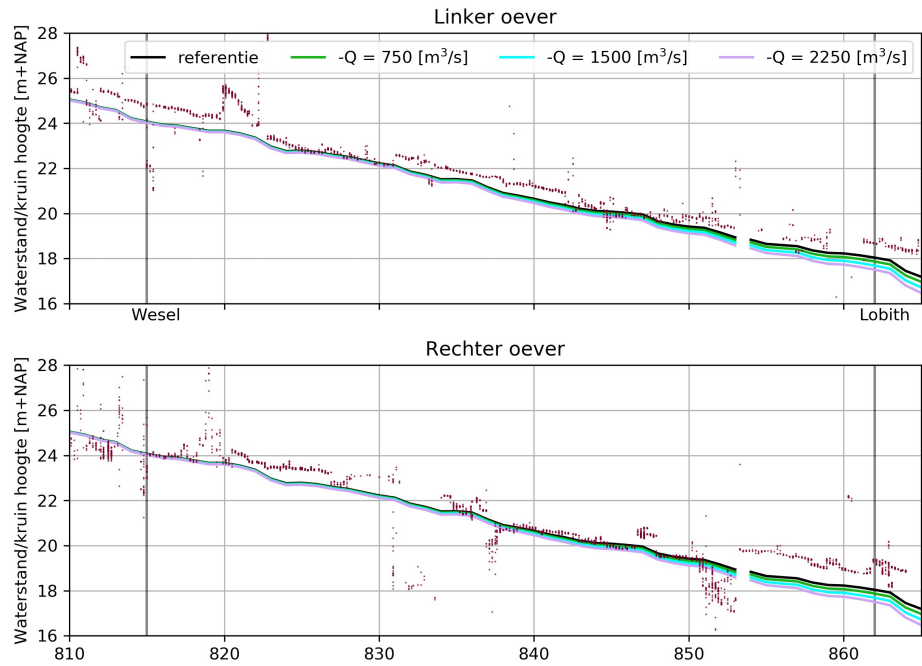


*Figuur 22  
Idem, situatie  
zonder doorbraken.*

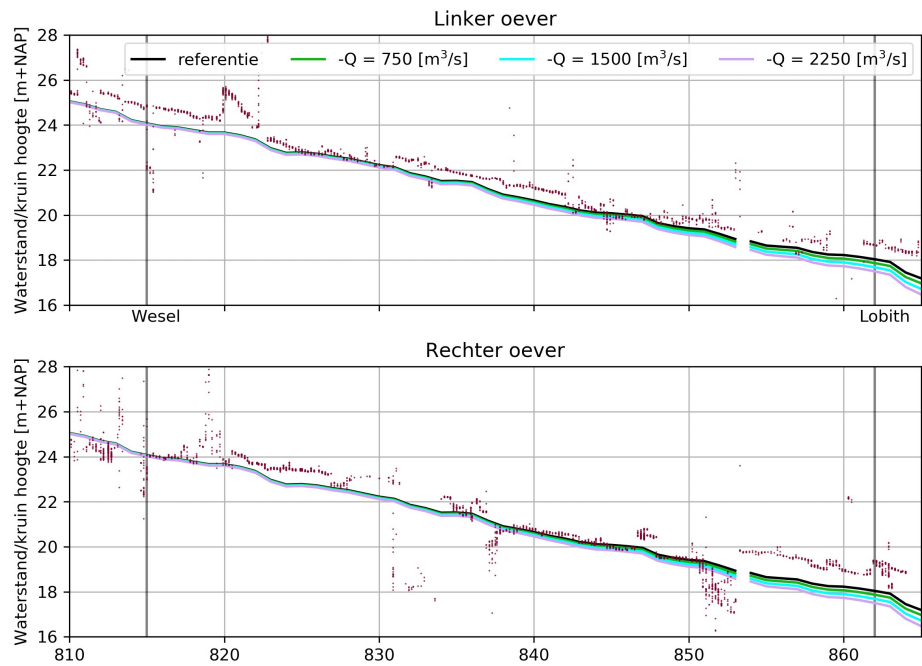




**Figuur 23**  
 Maximale waterstand in relatie tot de kruinhoogte van de dijken bij de linker- en rechteroever, voor de golf met een piekafvoer van 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met dijkdoorbraken.

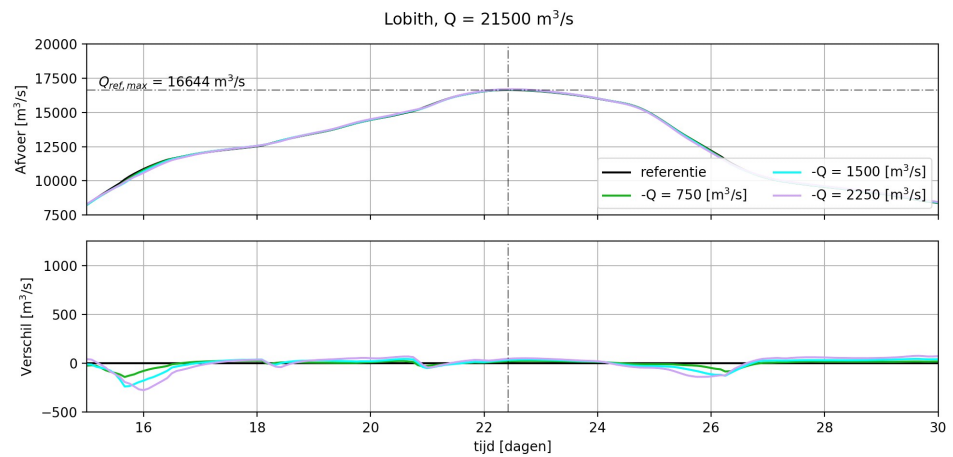


**Figuur 24**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.

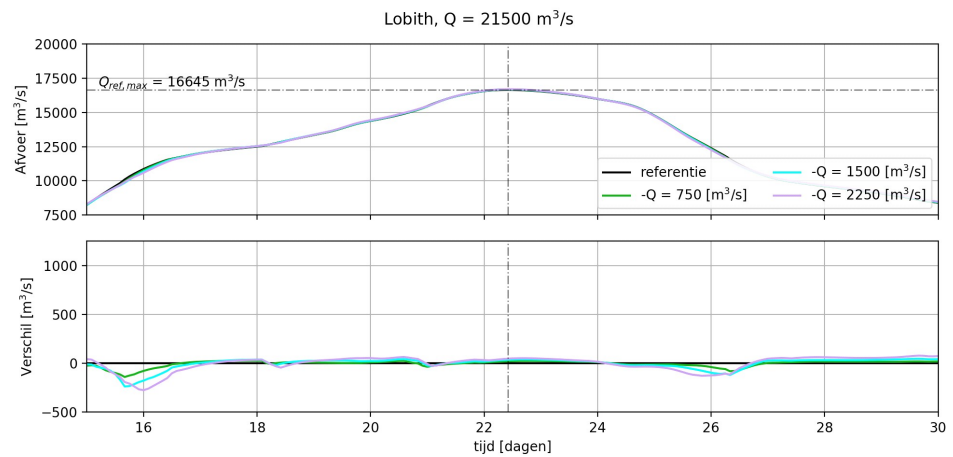


## Effecten op rivierafvoer

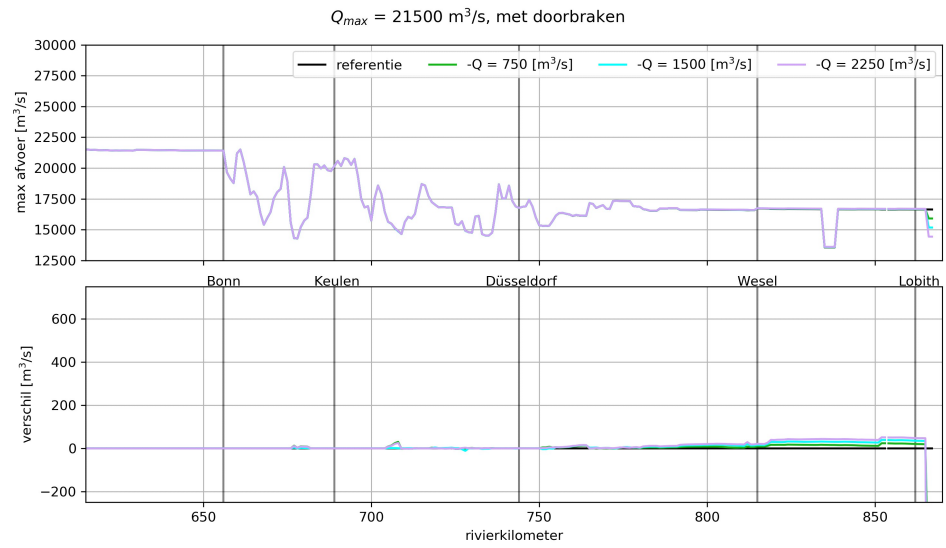
**Figuur 25**  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.



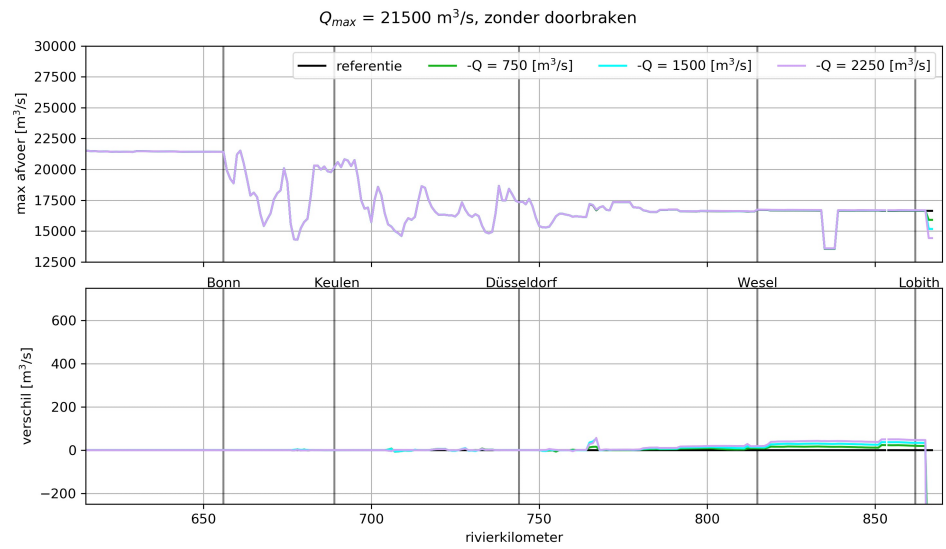
**Figuur 26**  
Idem, situatie zonder doorbraken.



**Figuur 27**  
 Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale rivierafvoer, bij een afvoergolf met piekwaarde van 21.500 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.



**Figuur 28**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.



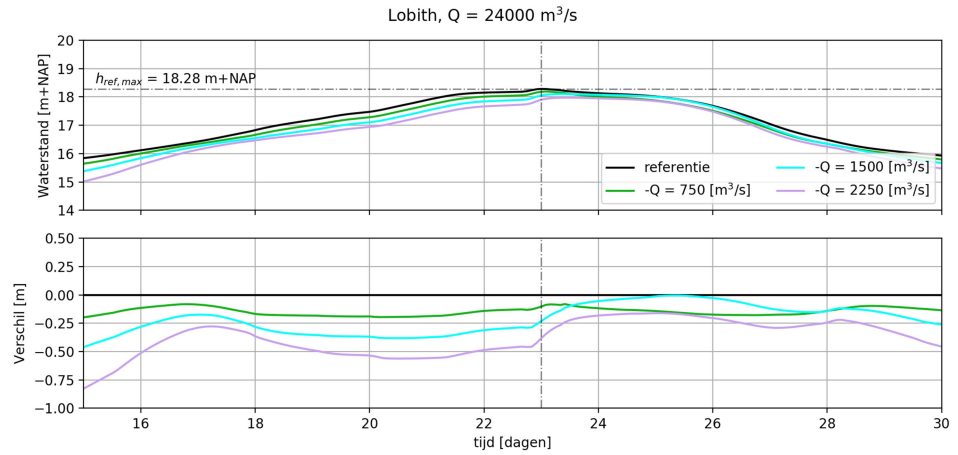
## B

## Golf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach

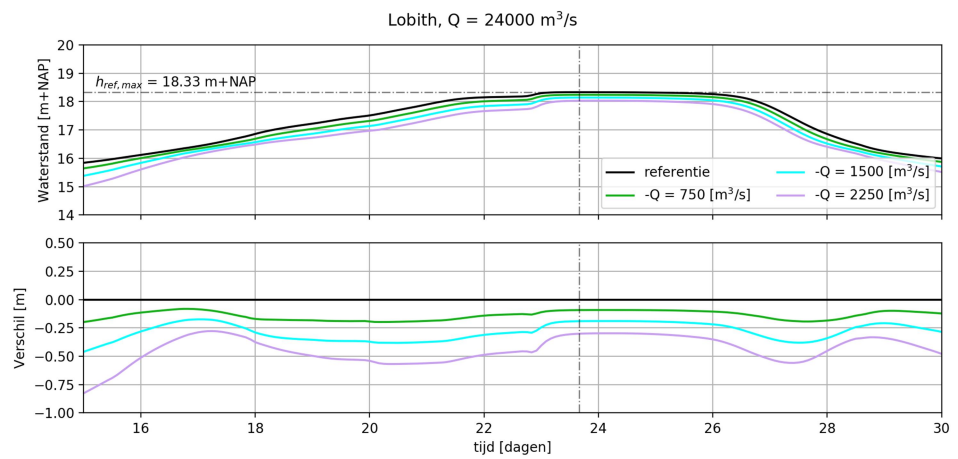
### B.1

### Effecten op waterstand

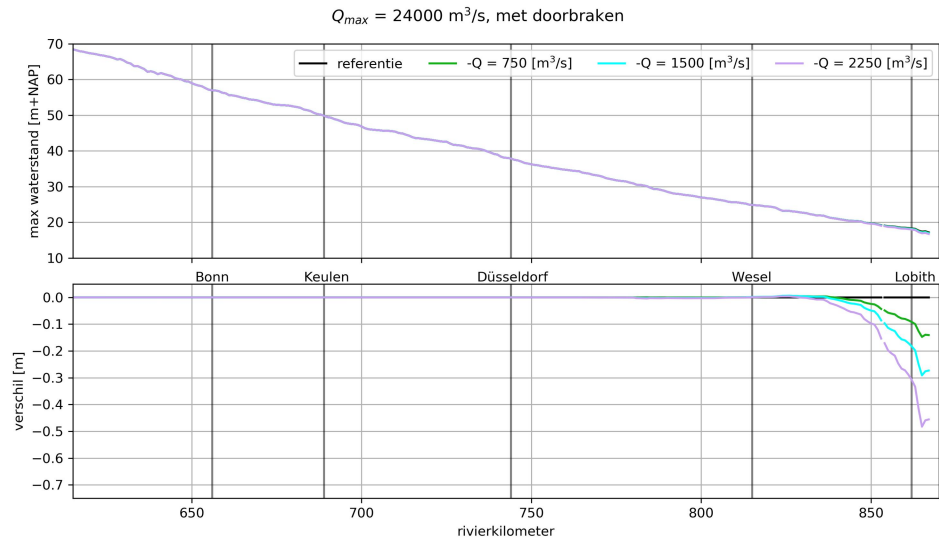
*Figuur 29  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de waterstand bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.*



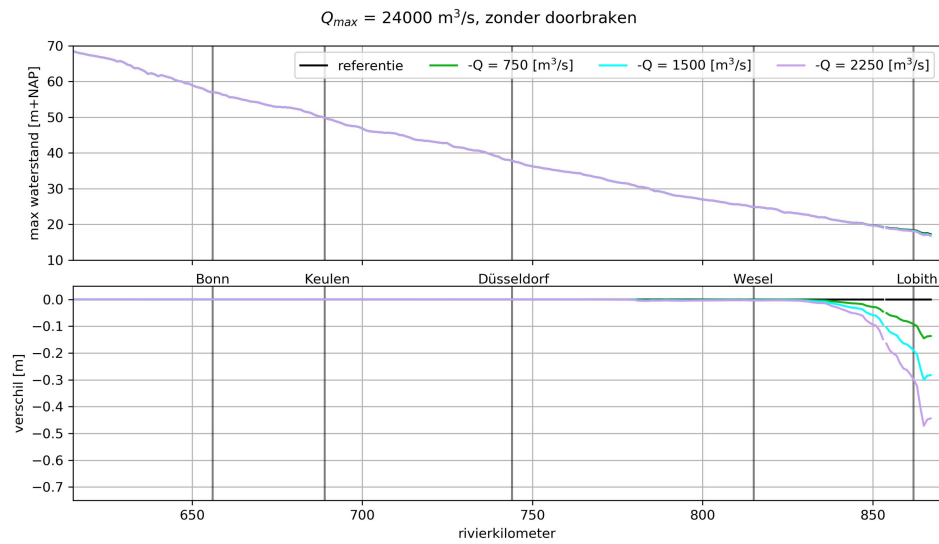
*Figuur 30  
Idem, situatie zonder doorbraken.*



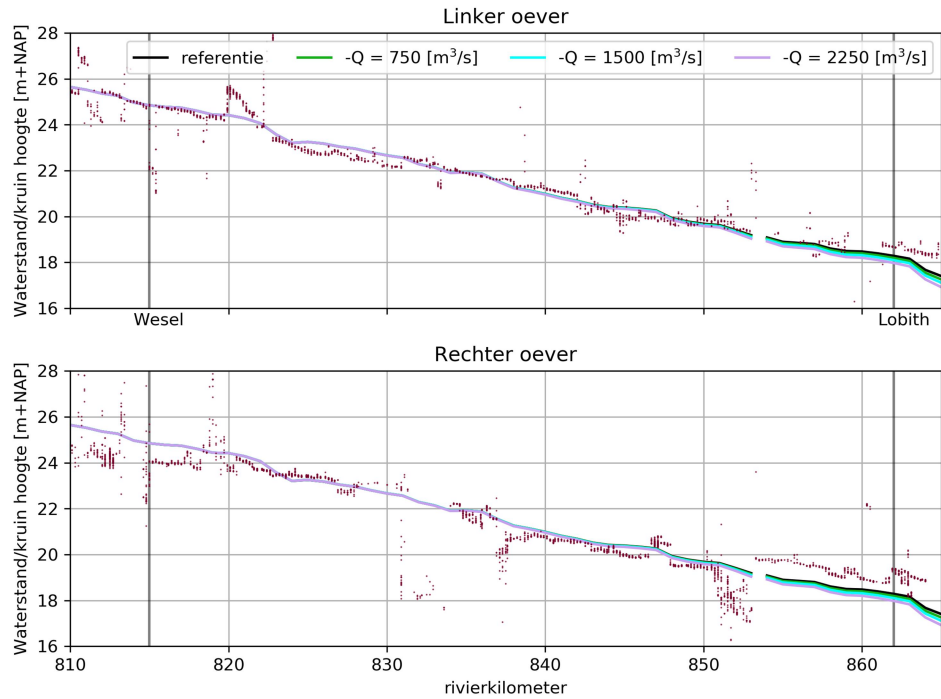
*Figuur 31  
Ruimtelijk verloop  
van het effect van  
drie onttrekkingen  
op de maximale  
waterstand, bij een  
afvoergolf met  
piekwaarde van  
24.000 m<sup>3</sup>/s bij  
Andernach. Situatie  
met doorbraken.*



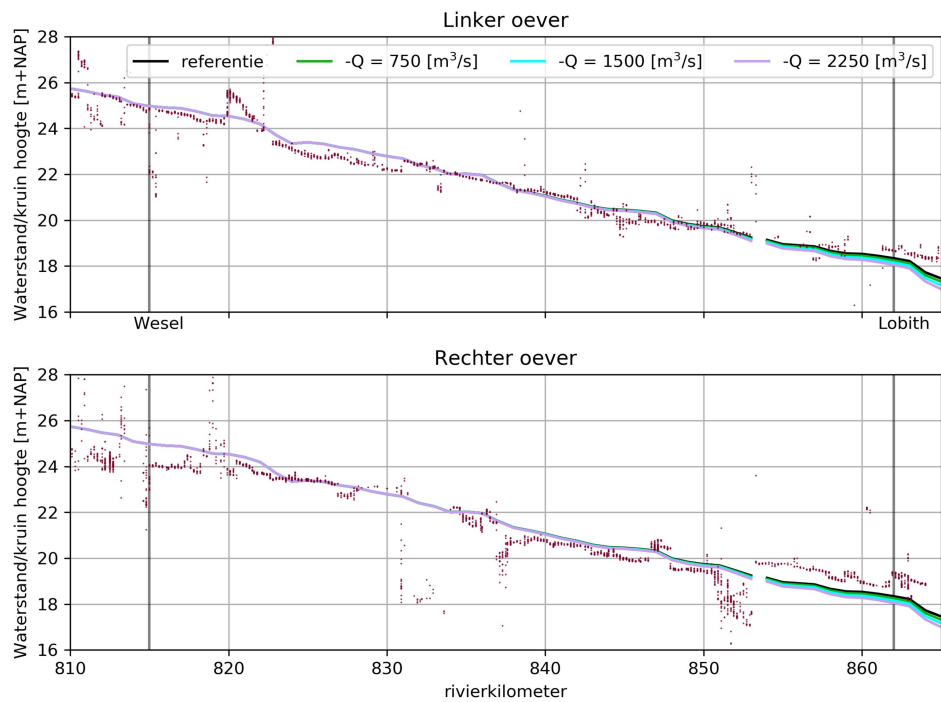
*Figuur 32  
Idem, situatie  
zonder doorbraken.*



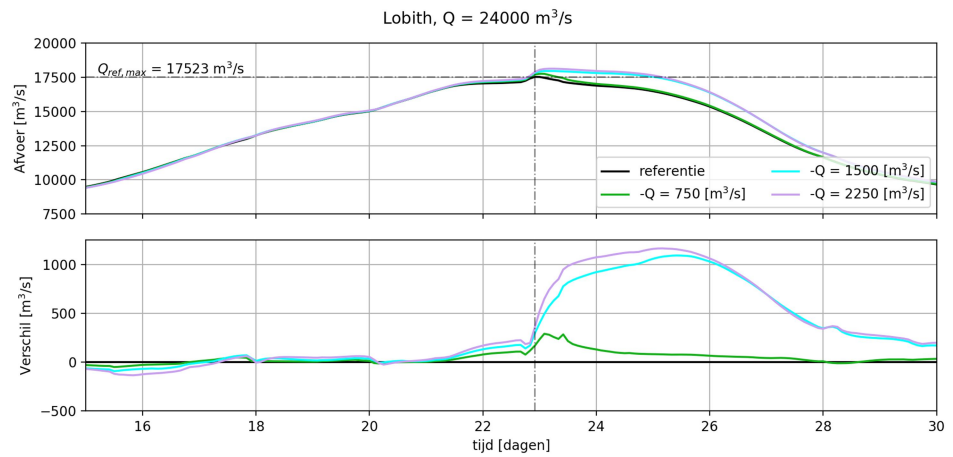
**Figuur 33**  
 Maximale waterstand in relatie tot de kruinhoogte van de dijken bij de linker- en rechteroever, voor de golf met een piekafvoer van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met dijkdoorbraken.



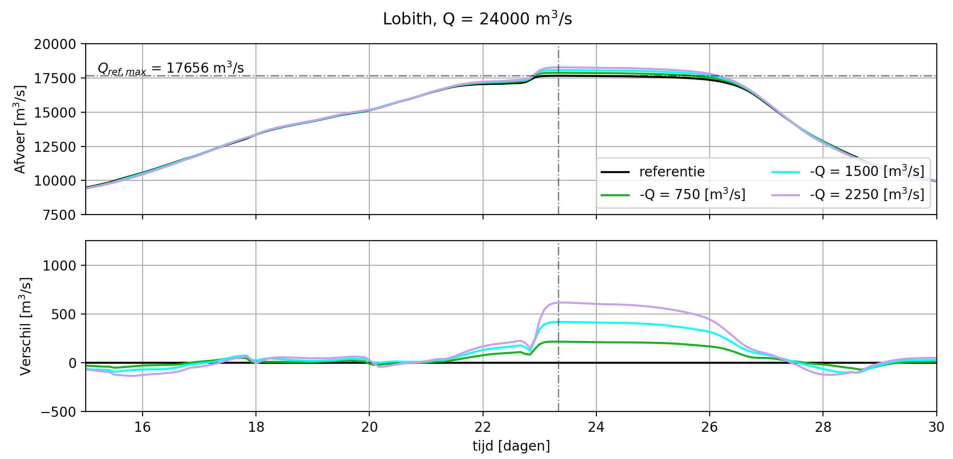
**Figuur 34**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.



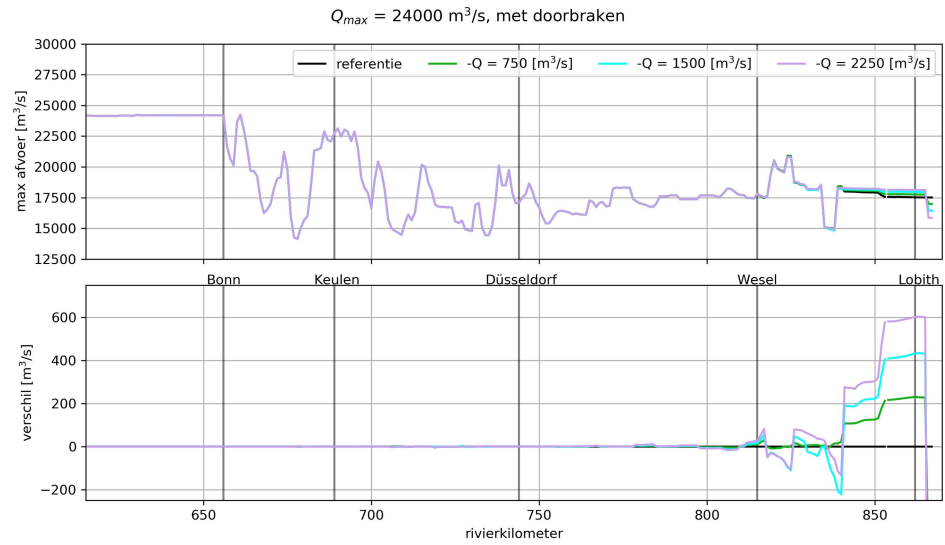
*Figuur 35  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.*



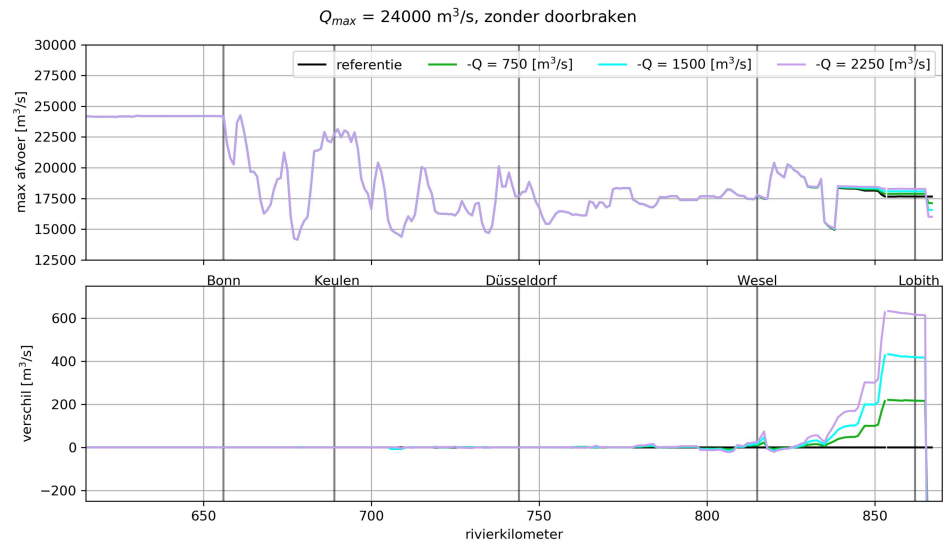
*Figuur 36  
Idem, situatie zonder doorbraken.*



**Figuur 37**  
 Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale rivierafvoer, bij een afvoergolf met piekwaarde van 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.



**Figuur 38**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.





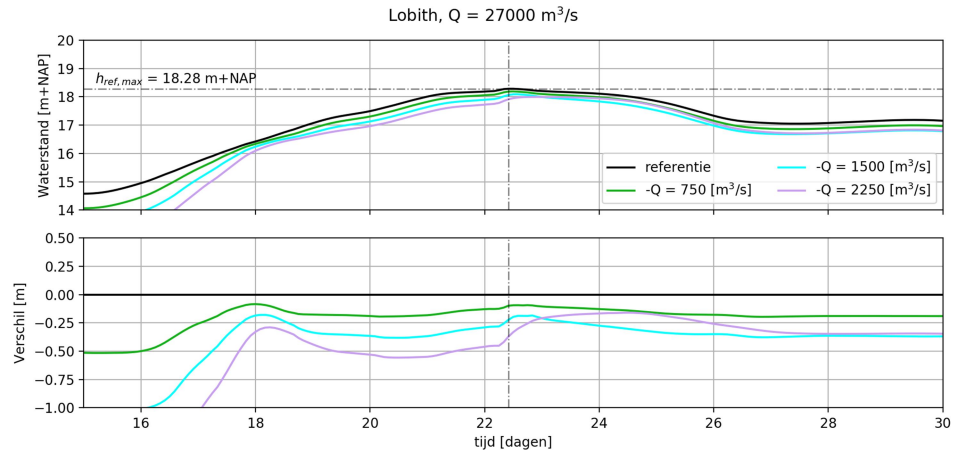
# C

## Golf met piekwaarde van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach

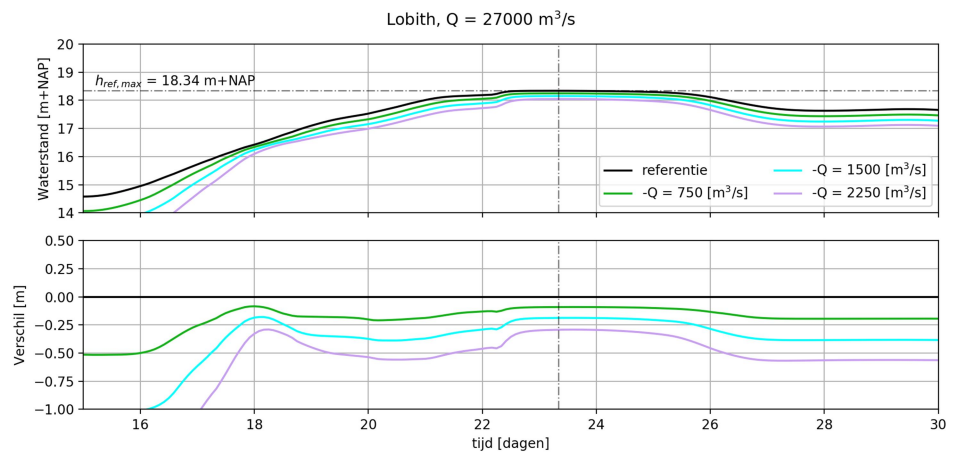
### C.1

### Effecten op waterstand

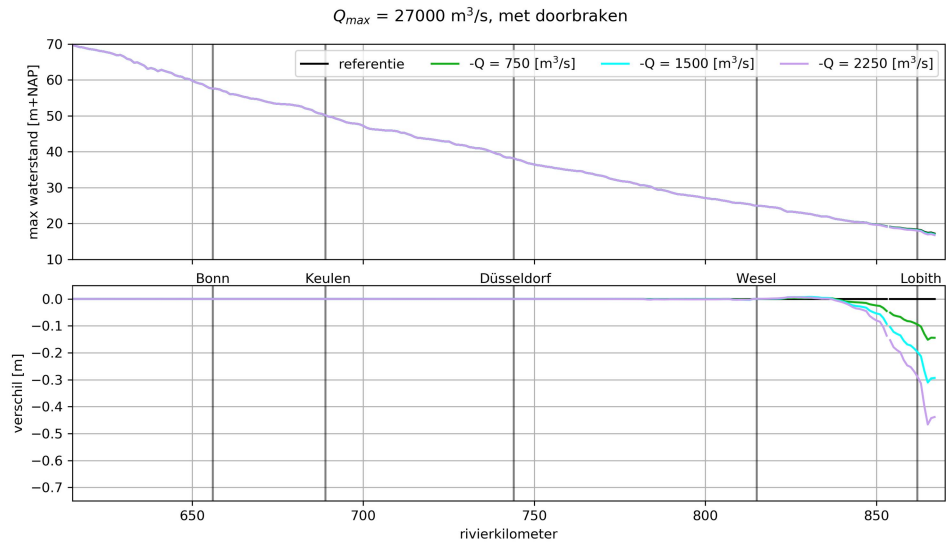
*Figuur 39  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de waterstand bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.*



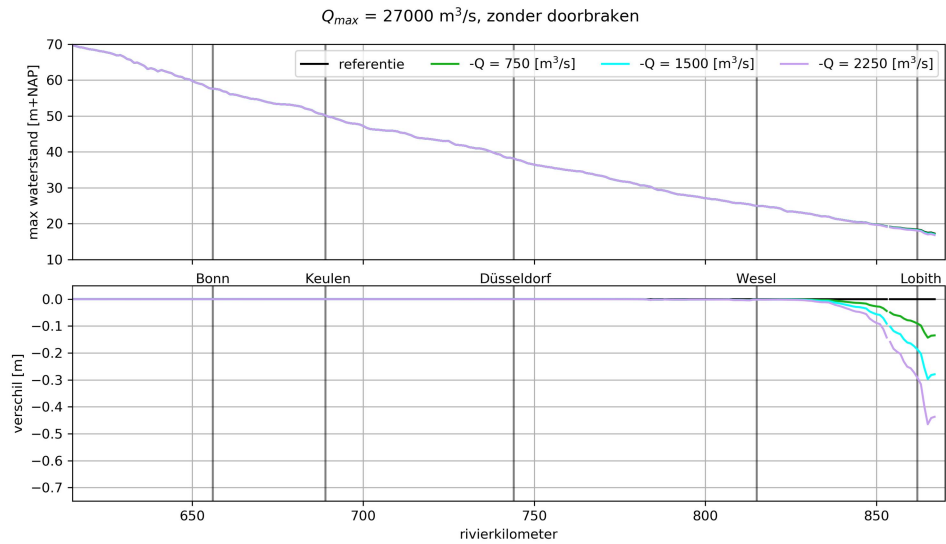
*Figuur 40  
Idem, situatie zonder doorbraken.*



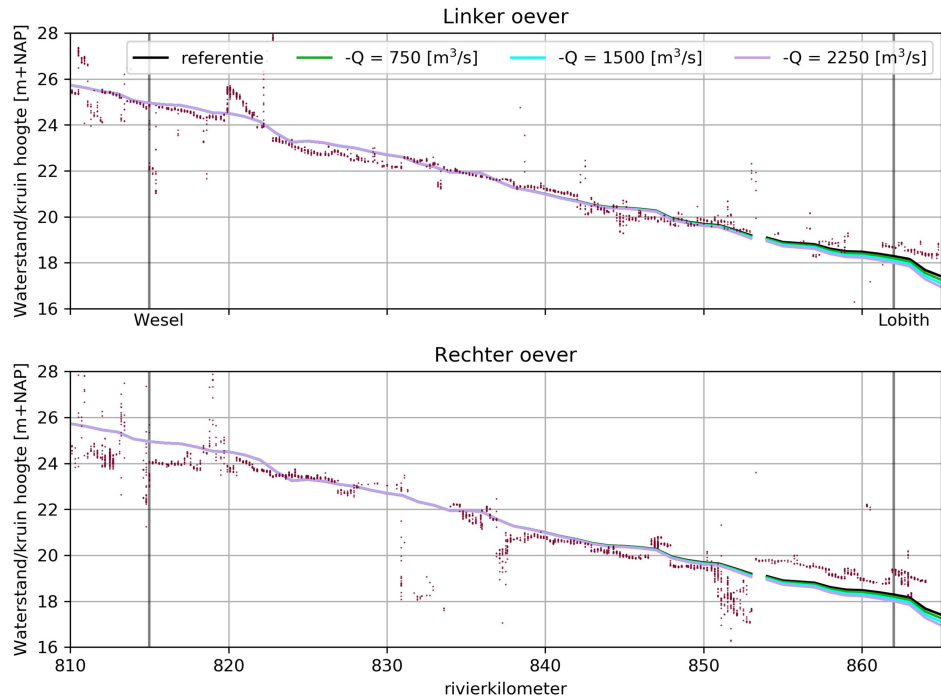
**Figuur 41**  
 Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale waterstand, bij een afvoergolf met piekwaarde van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.



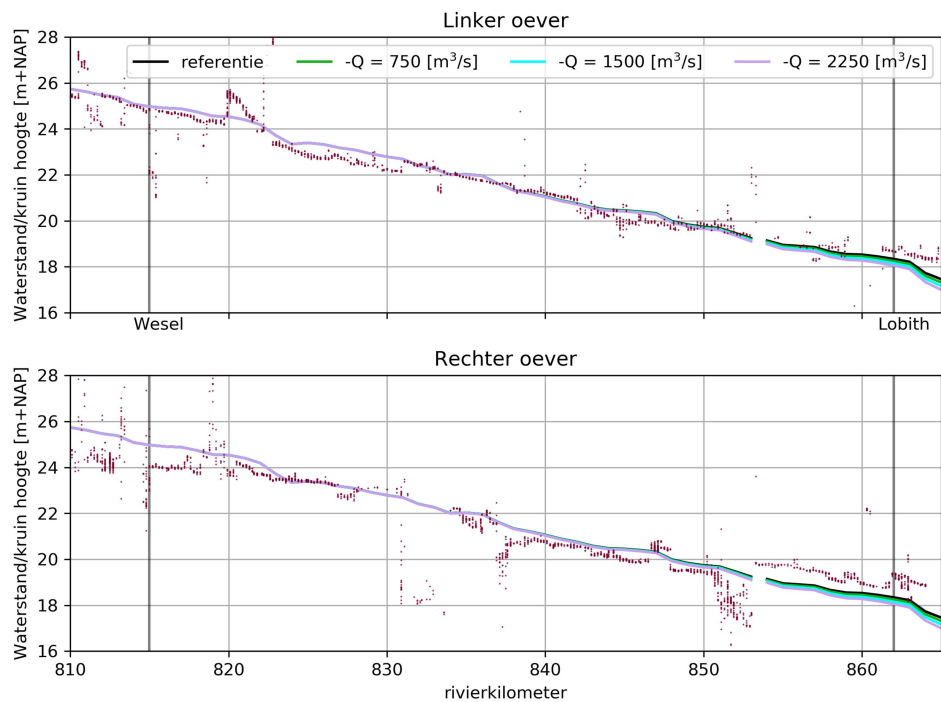
**Figuur 42**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.



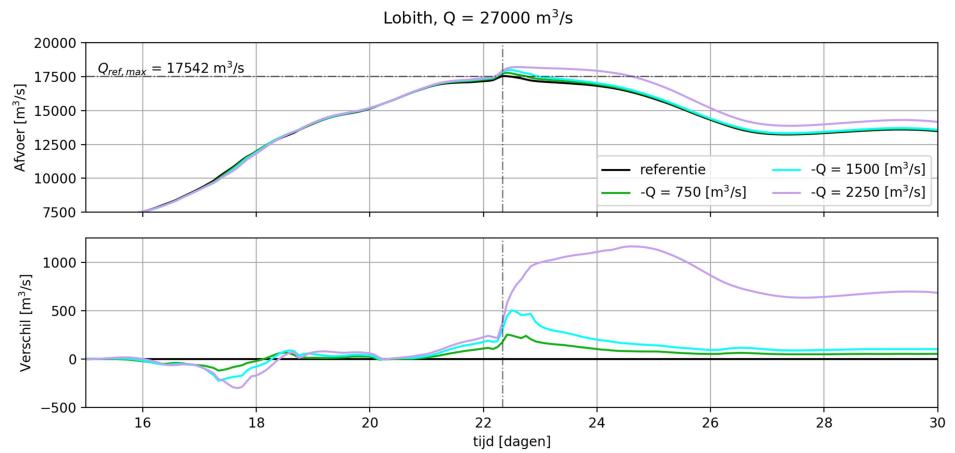
**Figuur 43**  
 Maximale waterstand in relatie tot de kruinhoogte van de dijken bij de linker- en rechteroever, voor de golf met een piekafvoer van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met dijkdoorbraken.



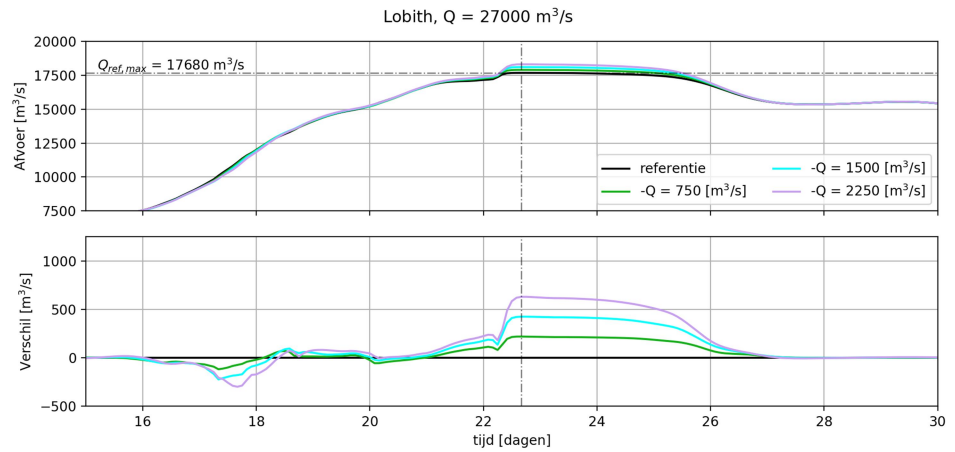
**Figuur 44**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.



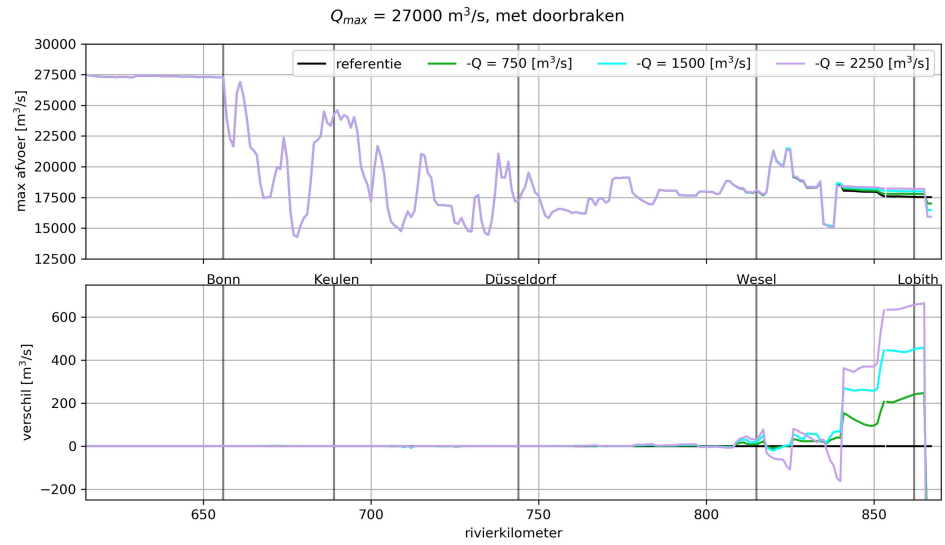
*Figuur 45  
Tijdsverloop van het effect van drie onttrekkingen op de rivierafvoer bij Lobith, bij een afvoergolf met piekwaarde van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.*



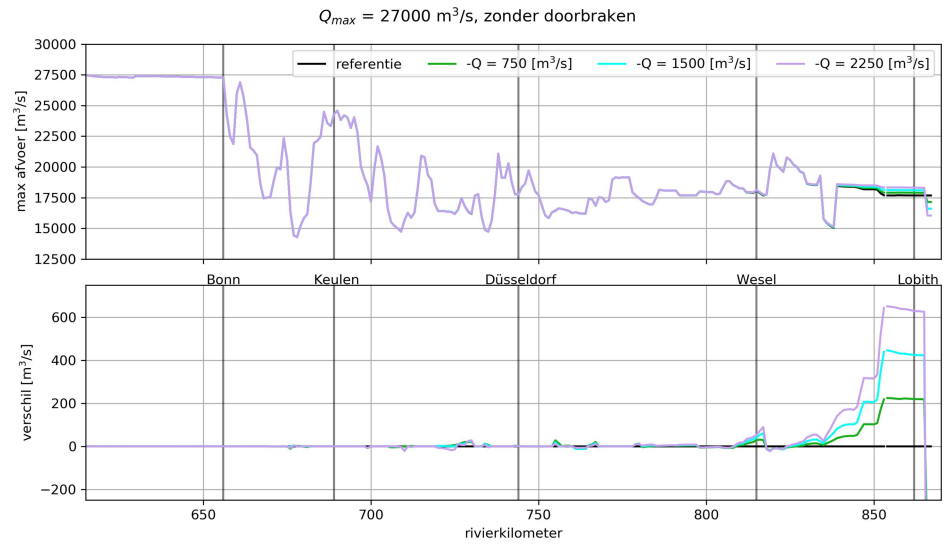
*Figuur 46  
Idem, situatie zonder doorbraken.*



**Figuur 47**  
 Ruimtelijk verloop van het effect van drie onttrekkingen op de maximale rivierafvoer, bij een afvoergolf met piekwaarde van 27.000 m<sup>3</sup>/s bij Andernach. Situatie met doorbraken.



**Figuur 48**  
 Idem, situatie zonder doorbraken.





**Hoofdkantoor**

HKV lijn in water BV  
Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

**Nevenvestiging**

Informaticalaan 8  
2628 ZD Delft

0320 29 42 42

[info@hkv.nl](mailto:info@hkv.nl)

[www.hkv.nl](http://www.hkv.nl)