

## Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Functie Hoogwaterveiligheid



**Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal**  
Functie Hoogwaterveiligheid

**Auteur(s)**

Nathalie Asselman

Peter de Grave

## Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Functie Hoogwaterveiligheid

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Arjan Sieben
<b>Referenties</b>	Eindevaluatie en analyse WaalSamen, pilot Langsdammen, zaaknummer 31154483
<b>Trefwoorden</b>	Langsdammen, Waal, Waterveiligheid

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.7
<b>Datum</b>	30-09-2021
<b>Projectnummer</b>	11204644-009
<b>Document ID</b>	11204644-008-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	28
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Nathalie Asselman Peter de Grave	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Nathalie Asselman			
0.7	Nathalie Asselman	Anke Becker	Bianca Peters	

# Samenvatting

## Inleiding

Rijkswaterstaat heeft aan Deltares gevraagd om een integrale eindevaluatie te verzorgen voor de pilot langsdammen. Het doel van deze eindevaluatie is het met kennis en feiten onderbouwen van een advies dat Rijkswaterstaat moet geven aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat. Deze eindevaluatie is onderverdeeld in 11 inhoudelijke deelprojecten, aangeduid met “WP” (werkpakket), die elk een afzonderlijk achtergrondrapport leveren. Voor u ligt het achtergrondrapport van WP6 over het effect van langsdammen, zoals aangelegd in de pilot voor de Waal, op de functie Hoogwaterveiligheid. Vragen die in dit rapport beantwoord worden zijn:

- Wat is het huidige effect van de langsdam op de hoogwaterstanden?
- In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?
- Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context van de nieuwe normering?
- Zijn langsdammen van invloed op de vorming van ijsdammen?

## Effect op hoogwaterstanden

De hoofdvraag voor hoogwaterveiligheid is of de verwachte verlaging van hoogwaterstanden daadwerkelijk optreedt. Hiervoor zijn berekeningen gemaakt met een Delft3D model<sup>1</sup> (zie Paarlberg et al., 2021). Voor het effect van langsdammen op hoogwaterveiligheid is vooral gekeken naar het waterstandseffect op de as van de rivier bij afvoeren hoger dan 6.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

De doorgerekende varianten bestaan uit een aantal basisvarianten en een aantal optimalisaties. De basisvarianten bestaan uit:

- V0 – referentiesituatie met oorspronkelijke kribben: deze variant is gebruikt om de waterstanden voor aanleg van de langsdammen te bepalen.
- V1 – langsdammen met volledig open instroomopeningen aan bovenstroomse zijdes van de oevergeulen (hoogte OLR-1.75 m).
- V2 – langsdammen met gesloten instroomopeningen: deze variant komt overeen met V1, maar dan met geheel gesloten instroomopeningen aan de bovenstroomse zijdes van de oevergeulen (hoogte OLR +1.25m).
- V3 – langsdammen met hoger liggende instroomopeningen: deze variant lijkt op V1, maar de instroomopeningen aan de bovenstroomse zijdes zijn deels gesloten. Deze variant komt overeen met de huidige situatie in het veld.

Voor de bodemhoogte is uitgegaan van de situatie direct na aanleg (dus zonder morfologische ontwikkelingen). De bodemhoogte in de oevergeul varieert, maar ligt ongeveer op OLR -4.75 m.

De optimalisatievarianten waarvoor de effecten op hoogwaterveiligheid zijn bepaald zijn vermeld in onderstaande tabel. Vopt\_05a en Vopt\_05b geven inzicht in de gevoeligheid voor een andere bodemhoogte in de oevergeul achter de langsdam. Vopt\_06a t/m Vopt\_06c geven inzicht in de gevoeligheid van de hoogwaterstanden voor een andere breedte van de oevergeul. En Vopt\_07 geeft aan wat er gebeurt als de langsdam wordt vervangen door een verticale damwand.

---

<sup>1</sup> Het effect van de langsdammen op hoogwaterstanden is onderzocht met een model, omdat er geen metingen beschikbaar zijn bij afvoeren van meer dan 7.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith en omdat de metingen het *gecombineerde* effect van de langsdammen, kribverlaging en nevengeul Passewaaij laten zien.

Tabel 1-1 Varianten die onderzocht zijn In het kader van mogelijke optimalisatie van het ontwerp en waarvoor effecten bij hoogwater zijn bepaald.

Code	Modelvariant	Omschrijving
Vopt_05a	OG_h_OLR_min_0p00	De bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-0,0 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).
Vopt_05b	OG_h_OLR_min_2p75	De bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-2,75 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).
Vopt_06a	OG_w_100p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt overal 110/120 m en de bodemhoogte ligt minimaal op OLR-2,75. Bij V1 varieert de breedte (ca 50 tot 120m).
Vopt_06b	OG_w_075p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt 75% van de breedte van optie 6a
Vopt_06c	OG_w_050p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt 50% van de breedte van optie 6a
Vopt_07	V1_no_dam_in_bed_weir	De langsdam wordt verwijderd, er komt een verticale damwand voor in de plaats.

Figuur 1-1 toont de verlaging van de hoogwaterstanden bij verschillende afvoeren als gevolg van de realisatie van variant V3 (de huidige situatie in het veld). De drie langsdammen bevinden zich in het traject van km 911,5 tot km 921,5. De grafiek is gemaakt voor de variant V3, maar de basisvarianten V1 en V2 geven een vrijwel identiek beeld. Tabel 1-2 vat de effecten samen.

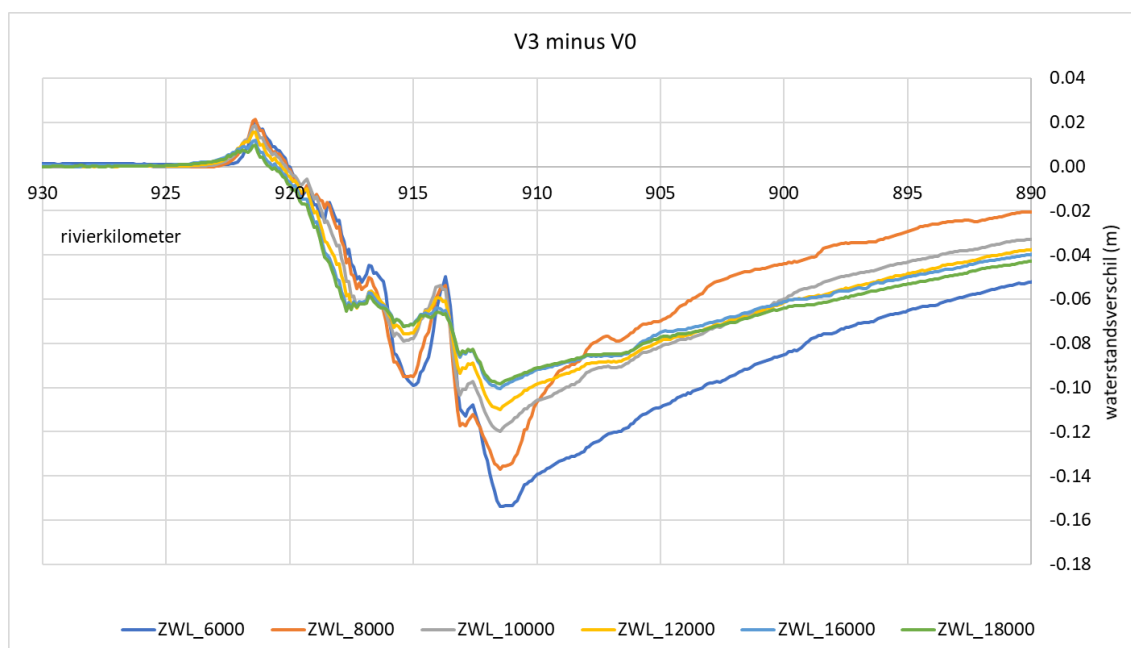
De grootste waterstandsdeling treedt op aan de bovenstroomse zijde van de meest bovenstrooms gelegen langsdam. Dit is ongeveer bij km 911,5. In boven- en benedenstroomse richting wordt het effect steeds kleiner. Het grootste effect treedt op bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s (maximaal 16 cm waterstandsdeling). Dit komt doordat de uiterwaarden dan nog nauwelijks mee stromen. Veranderingen in de hoofdgeul hebben daardoor relatief veel effect op de waterstand. Bij hogere afvoeren wordt het effect kleiner. Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s of 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith is de maximale waterstandsdeling van varianten V1 t/m V3 ongeveer 10 cm.

Het effect van de langsdammen is tot ver bovenstrooms merkbaar, waarschijnlijk zelfs tot de riviersplitsing bij de Pannerdense Kop. Bij een rivierafvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith kan de waterstandsdeling leiden tot een beperkte verschuiving van orde 20 à 30 m<sup>3</sup>/s meer afvoer naar de Waal. Dit effect kan bij hoge afvoeren echter worden gecorrigeerd met behulp van regelwerk Pannerden.

Het geheel of gedeeltelijk sluiten van de instroomopeningen leidt tot iets minder waterstandsdeling. Bij de aanleg van langsdammen over een lengte van 10 km en geheel geopende instroomopeningen, bedraagt de waterstandsdeling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith ongeveer 10 cm. Het ophogen van de drempels in de instroomopening (deels sluiten) leidt tot 2 mm minder waterstandsdeling. Wanneer de instroomopening geheel gesloten is, leidt dit tot maximaal 1 cm minder waterstandsdeling.

De optimalisatievarianten laten zien dat:

- Ophoging van de bodem in de oevergeul leidt tot minder waterstandsdeling. Bij ophoging tot OLR-2,75m, is de waterstandsdeling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith beperkt tot 3 cm (in plaats van 10 cm).
- Verbreding van de oevergeul leidt tot een grotere waterstandsdeling. Wanneer de oevergeul wordt opgehoogd tot OLR-2,75, maar tevens wordt verbreed tot een breedte van 110/120 m (de huidige breedte varieert van 50 tot 120 m), dan leidt dat tot een waterstandsdeling van maximaal 22 cm bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith.
- Het vervangen van de langsdam door een damwand heeft voor waterveiligheid eveneens een gunstig effect. De maximale waterstandsdeling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith bedraagt dan 14 cm.



Figuur 1-1 Waterstandsval door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V3), in vergelijking tot een situatie zonder langsdammen (V0).

Tabel 1-2. Verandering in waterstand (in cm) bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith.

Variant	Beschrijving	Ten opzichte van situatie zonder langsdammen (V0)	Ten opzichte van basisvariant V1
V1	Volledig open instroomopening (~OLR-1,75 m), bodemligging oevergeul varieert (~OLR-4,75 m)	-10	-
V2	Gesloten instroomopeningen (~OLR +1,25 m)	-10	0.7
V3	Met deels gesloten instroomopeningen (situatie in het veld)	-10	0.2
Vopt_05a	Minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-0,0 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).	-3	7
Vopt_05b	Minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-2,75 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).	-9	1
Vopt_06a	Breedte van de oevergeul bedraagt overal 110/120 m en de bodemhoogte ligt overal op OLR-2,75. Bij V1 varieert de breedte (ca 50 tot 120m).	-22	-12
Vopt_06b	De breedte van de oevergeul bedraagt 75% van de breedte van optie 6a	-15	-4
Vopt_06c	De breedte van de oevergeul bedraagt 50% van de breedte van optie 6a	-12	-2
Vopt_07	Langsdam wordt vervangen door een verticale damwand	-14	-4

### Realisatie over grotere lengte

De maximale waterstandsval van een maatregel is afhankelijk van de lengte waarover de maatregel wordt uitgevoerd. Dit komt doordat de maximale verlaging volgens een stuwkromme moet worden opgebouwd. Uit gelineariseerde stromingsvergelijkingen volgt dat het effect van de langsdammen ongeveer twee keer groter kan zijn wanneer deze worden gerealiseerd over een lengte van minimaal 40 tot 60 km.

### **Vergelijking met oorspronkelijke taakstelling**

Een vergelijking met de oorspronkelijke taakstelling is niet mogelijk omdat de langsdammen nooit een aparte (eigen) taakstelling hebben gekregen. De taakstelling en alle uitgevoerde analyses hadden betrekking op de *combinatie* van langsdammen en kribverlaging.

### **Langsdammen in het licht van de nieuwe normering**

Sinds 1 januari 2017 zijn nieuwe wettelijke normen van kracht voor het beschermen van Nederland tegen overstromingen. Hoogwaterveiligheid wordt in deze nieuwe normering niet langer gekoppeld aan maatgevende hoogwaterafvoeren, maar aan overstromingsrisico's die afhangen van faalkansen en de gevolgen van overstroming.

Om voor 2050 aan de nieuwe beschermingsnormen te voldoen, moeten de dijken langs de Waal fors worden verhoogd en versterkt. Vallen de hoogwaterstanden lager uit, dan leidt dat tot een kleinere dijkverhogingsopgave en daarmee tot een, beperkte, kostenbesparing (naar verwachting minder dan 2% van de totale investeringskosten).

### **Effect op ijsdammen**

Het mogelijke ontstaan van ijsdammen in strenge winters vormt een afzonderlijke factor bij de veiligheid tegen overstromingen. Overstromingsrampen door ijsdammen waren in de negentiende eeuw de aanleiding om de Rijntakken grootschalig met kribben te normaliseren. De inrichting van de rivier voorkomt zo de stroomvertragingen en de aanzandingen waarop ijsdammen plegen te ontstaan. Tegenwoordig treden ijsdammen nauwelijks meer op dankzij deze normaliseringswerken, regionale opwarming van het klimaat, en lozingen van koelwater en afvalwater. Toch verdienen ze blijvende aandacht in het rivierbeheer. Strenge vorst blijft mogelijk en koelwaterlozingen op de Rijn nemen af. Aanpassingen aan het systeem met kribben roepen de vraag op of deze niet weer het gevaar van ijsdammen vergroten. Gestrekte rivierwerken als de langsdammen lijken ijs echter juist beter te geleiden dan batterijen kribben. Bovendien zijn de koppen van de langsdammen voorzien van ijsbrekers. Hoewel de proefondervindelijke ervaring van een strenge winter ontbreekt, valt redelijkerwijs aan te nemen dat de langsdammen de ijsveiligheid niet aantasten.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1	Achtergrond	9
1.2	Doelstelling	9
1.3	Leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>Aanpak</b>	<b>11</b>
2.1	Effect op hoogwaterstanden - modelsimulaties	11
2.2	Effect van langsdammen in het licht van de nieuwe normering	11
<b>3</b>	<b>Doorgerekende varianten</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>16</b>
4.1	Waterstandsdeling basisvarianten	16
4.1.1	Variant V1: instroomopeningen geheel open	16
4.1.2	Variant V2: gesloten instroomopeningen	17
4.1.3	Variant V3: deels gesloten instroomopening	19
4.2	Uitvoering over grotere lengte	20
4.3	Vergelijking met oorspronkelijke taakstelling	20
4.4	Vergelijking met metingen	21
4.5	Waterstandsdeling optimalisatievarianten	22
4.6	Effect van langsdammen in het licht van de nieuwe normering	24
4.7	Effect van langsdammen op ijssdammen	25
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Literatuur</b>	<b>29</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Het riviersysteem van de Rijn, met daarin alle Nederlandse Rijntakken, kent problemen met onder meer hoogwaterveiligheid, insnijding van de zomerbedbodem, daling van laagwaterstanden en grondwaterstanden, de kwaliteit van het rivierecosysteem, en het gebruik van de rivier als vaarweg. De laatste decennia wordt onderkend dat de sectorale aanpak niet efficiënt is. De beleidsdirecties van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat hebben de wens uitgesproken voor een meer innovatieve systeem- en gebiedsgerichte aanpak, met integrale aandacht voor alle probleemvelden tegelijk. Deze integrale aanpak beoogt de som van alle problemen te reduceren in plaats van slechts de problemen van een beperkt aantal sectoren.

Voor deze integrale aanpak heeft Rijkswaterstaat Oost-Nederland een idee gelanceerd onder de werknaam WaalSamen. Dit is een plan voor herinrichting van het zomerbed in de gehele Waal. De herinrichting wijzigt het principe van het bestaande normalisatiesysteem door het zomerbed te verdelen in twee parallelle stroomgeulen, gescheiden door een langsdam. Om de eigenschappen van deze systeemwijziging in de praktijk te beproeven is over een lengte van tien kilometer de pilot Langsdammen uitgevoerd. Het doel daarvan is een proof of concept, om meer zekerheid te verkrijgen over de integrale werking en de potenties van een dergelijke systeemwijziging.

Voor de pilot werd het Waaltraject Wamel-Ophemert (km 911.5-921.5) bij Tiel gekozen. Om redenen van efficiëntie werd de pilot tegelijk uitgevoerd met Fase III van het project Kribverlaging Waal van het programma Ruimte voor de Rivier. Hiervoor leverde Rijkswaterstaat Oost-Nederland op 30 juni 2011 de producten van een SNIP-3-besluit op aan de Programmadirectie Ruimte voor de Rivier van Rijkswaterstaat, inclusief een omwisselbesluit om geplande kribverlaging te vervangen door langsdammen. De Staatssecretaris van Verkeer en Waterstaat bekrachtigde dit eind 2011. De langsdammen tussen Wamel en Ophemert werden vervolgens in de periode van augustus 2014 tot maart 2016 gerealiseerd.

Voor, tijdens en na de aanleg van de langsdammen is een uitgebreid monitorings- en onderzoeksprogramma uitgevoerd door de partners van de samenwerkingsovereenkomst 'WaalSamen'. Dit programma is afgesloten met een integrale eindevaluatie, onderverdeeld in 12 inhoudelijke deelprojecten die worden aangeduid met "WP" (werkpakket). Voor u ligt het deelrapport van WP6 over het onderdeel van de evaluatie van het tweegeulensysteem met langsdammen dat gericht is op de functie hoogwaterveiligheid. De deelrapporten vormen de ondergrond van het hoofdrapport, maar de inzichten en conclusies zijn bij het opstellen van dat hoofdrapport integraler beschouwd, verder geëvolueerd en verduidelijkt. Waar dat mogelijk tot verschillen heeft geleid, zijn de conclusies van het hoofdrapport leidend.

## 1.2 Doelstelling

Doel van dit onderdeel binnen de eindevaluatie langsdammen is om na te gaan of de verwachte verlaging van hoogwaterstanden door de aanleg van langsdammen in het kader van de pilot op de Waal daadwerkelijk optreedt. Vragen die in dit rapport beantwoord moeten worden zijn:

- Wat is het huidige effect van de langsdam op de hoogwaterstanden?
- In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?
- Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context van de nieuwe normering?
- Zijn langsdammen van invloed op de vorming van ijsdammen?

## 1.3 Leeswijzer

Na deze inleiding volgt in hoofdstuk 2 uitleg over de gevolgde aanpak. De doorgerekende referentiesituatie en de doorgerekende varianten met langsdammen staan beschreven in hoofdstuk 3. Alle resultaten zijn uiteen gezet in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 bevat de belangrijkste conclusies. Een overzicht van de gebruikte literatuur is te vinden in hoofdstuk 6.

## 2 Aanpak

### 2.1 Effect op hoogwaterstanden - modelsimulaties

Bij het bestuderen van het effect van de langsdammen op hoogwaterstanden is gebruik gemaakt van modelberekeningen<sup>2</sup>.

De effecten op hoogwaterstanden worden berekend met een tweedimensionaal dieptegemiddeld hydrodynamisch model. Dat doet beter recht aan de ruimtelijke inrichting van de rivier dan een eendimensionaal model. Gekozen is voor een model op basis van Delft3D, omdat dit voor hydrodynamica gelijkwaardig is aan WAQUA en bovendien ook gebruikt wordt voor de morfologische effectbepaling van de langsdammen (Paarlberg et al, 2021). Het model is voorafgaand aan de eindevaluatie zorgvuldig gekalibreerd (Omer et al, 2019)<sup>3</sup>.

Het 2D diepte gemiddeld Delft3D-model van de Waal bevat de langsdammen die in 2015 zijn aangelegd, evenals de geulen die achter de langsdammen zijn aangelegd. Het model is 47 km lang. De bovenrand van het model ligt bij Nijmegen (~km888). De benedenrand bevindt zich ongeveer bij Zaltbommel (~km 934,7). De basisgegevens zijn conform de data in de Baseline-database baseline-rijn-j18\_5-v1. Voor de referentiesituatie is op de locatie waar nu de langsdammen liggen gebruik gemaakt van de Baseline-gegevens uit 2014 (baseline-rijn-j14\_5-v1). De bodemligging in de hoofdgeul is echter voor alle varianten gelijk en conform de ligging in baseline-rijn-j18\_5-v1.

Met het model is een reeks aan afvoeren door gerekend, te weten 800 m<sup>3</sup>/s, 1.020 m<sup>3</sup>/s, 1.500 m<sup>3</sup>/s, 2.500 m<sup>3</sup>/s, 4.000 m<sup>3</sup>/s, 6.000 m<sup>3</sup>/s, 8.000 m<sup>3</sup>/s, 10.000 m<sup>3</sup>/s, 12.000 m<sup>3</sup>/s, 16.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Om het effect van langsdammen op de waterveiligheid te bepalen is vooral gekeken naar het waterstandseffect op de as van de rivier bij hoge afvoeren (i.e. meer dan 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith).

Voor meer informatie over de uitgevoerde berekeningen en de daarbij gehanteerde uitgangspunten wordt verwezen naar Paarlberg et al. (2021).

### 2.2 Effect van langsdammen in het licht van de nieuwe normering

In 2050 moeten alle waterkeringen in Nederland aan de nieuwe beschermingsnormen voldoen. De nieuwe normen voor de Waal (ondergrens) zijn te zien in Figuur 2-1. Langs de Waal varieert de ondergrens norm tussen de 1:3.000 en 1:30.000 per jaar. De meeste trajecten hebben een norm van 1:10.000 per jaar.

---

<sup>2</sup> Er is geen gebruik gemaakt van metingen omdat het aantal metingen bij hoogwater beperkt is en de gemeten waterstanden ook beïnvloed worden door andere maatregelen die in het kader van ruimte voor de rivier zijn uitgevoerd. Bovendien zijn geen metingen beschikbaar voor extreme hoogwaterstanden, omdat zich tijdens de monitoringperiode geen extreme hoogwaters hebben voorgedaan. Gemeten effecten bij matige hoogwaters zijn niet te extrapoleren naar extreme afvoeren, omdat kribverlaging en kribverwijdering bij matige hoogwaters een groter effect op de waterstanden hebben dan bij extreme hoogwaters.

<sup>3</sup> Gemeten verlagingen van hoogwaterstanden zijn niet representatief en niet te extrapoleren naar extreme omstandigheden. De meest betrouwbare conclusies kunnen alleen getrokken worden uit rekenmodellen als WAQUA en Delft3D. Dit is ook de gangbare praktijk. Onzekerheden blijven echter onvermijdelijk. In absolute zin hebben de berekende extreme hoogwaterstanden een onzekerheidsband van  $\pm 0,7$  à  $\pm 0,8$  m (Warmink, 2011; Thijssen et al, 2014), maar de onzekerheid is kleiner voor modeluitkomsten in relatieve zin. Het verschil tussen berekende waterstanden in situaties met en zonder een ingreep is nauwkeuriger te bepalen dan de absolute berekende waterstanden zelf, omdat veel modelonzekerheden bij een vergelijking tegen elkaar wegvallen.



Figuur 2-1 Ondergrens norm per traject (bron: Sloopjes en Van der Most, (2016).

De strenge normen langs de Waal resulteren in een dijkversterkingsopgave. Deze dijkversterkingsopgave wordt nog vergroot door nieuwe inzichten in met name het faalmechanisme piping.

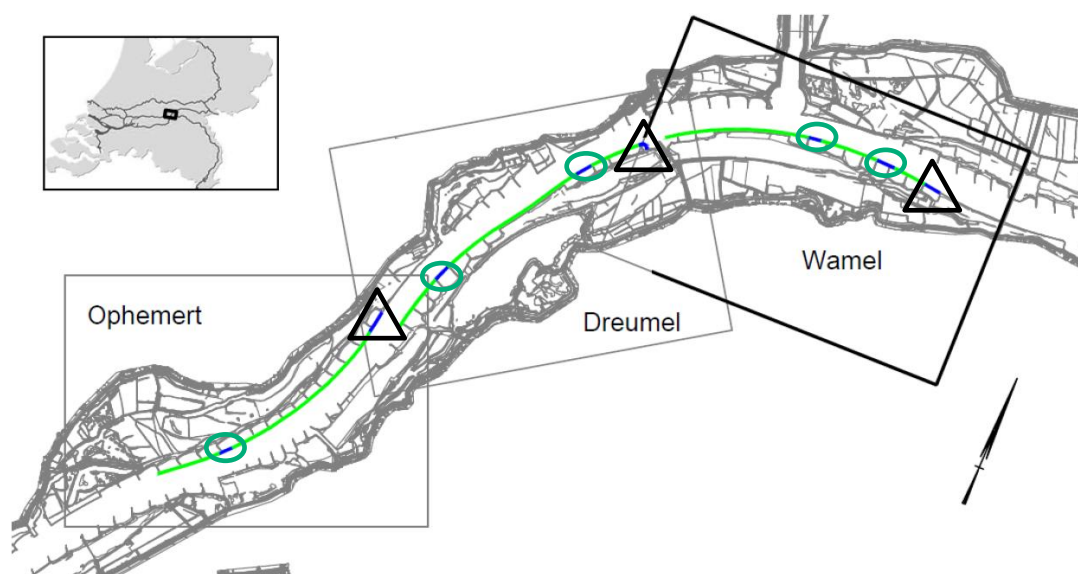
Bevindingen uit eerdere studies die onder andere zijn uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma Rivieren, zijn gebruikt om aan te geven in welke mate de aanleg van langsdammen zoals is gebeurd in de pilot Waal bijdraagt aan het voldoen aan de nieuwe beschermingsnormen.

### 3 Doorgerekende varianten

In 2015 zijn drie langsdammen aangelegd in de Waal, bij Wamel, bij Dreumel en bij Ophemert (Figuur 3-1). De situatie na aanleg in 2018 vormt de basis van variant 1 in deze studie. Naast variant 1, is het effect van een aantal andere varianten verkend. Hierbij is onderscheid gemaakt in een aantal basisvarianten die sterk lijken op variant 1, en een aantal varianten die zijn gericht op de verdere optimalisatie van het ontwerp van de langsdammen voor 1 of meer functies.

De basisvarianten bestaan uit:

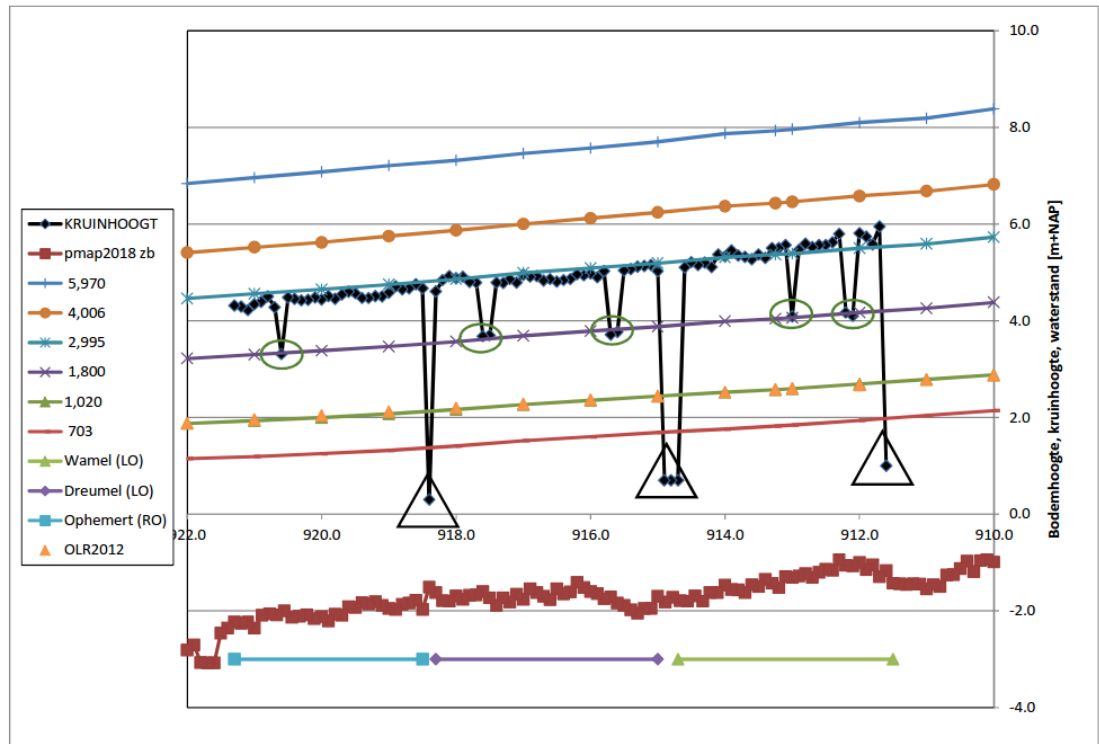
- V0 - referentie situatie: deze variant is gebruikt om de waterstanden voor aanleg van de langsdammen te bepalen.
- V1 - langsdammen met volledig open instroomopening: Er is sprake van 3 langsdammen bij Wamel, Dreumel en Ophemert. In de geul achter de langsdammen bevindt zich aan de bovenstroomse zijde steeds een instroomopening met een overlaat (zie de driehoekjes in Figuur 3-1). In deze variant zijn de instroomopeningen geheel open (OLR-1,75 m<sup>4</sup>). Deze variant is representatief voor de situatie direct na aanleg. In onderstaande tekst wordt deze situatie nader beschreven.
- V2- langsdammen met gesloten instroomopeningen: deze variant komt overeen met V1, alleen zijn de instroomopeningen aan de bovenstroomse zijde van de oevergeul geheel gesloten (ÖLR +1,25 m). Deze variant geeft inzicht in het effect van het sluiten van de instroomopeningen.
- V3 – langsdammen met hoger liggende instroomopeningen: deze variant lijkt op V1, maar de instroomopeningen aan de bovenstroomse zijdes zijn deels gesloten. Deze variant komt overeen met de *huidige* situatie in het veld (na aanleg van de langsdammen is besloten om de instroomopeningen aan te passen). De opening bij Wamel is V-vormig, met het laagste punt op OLR -0,5 m. De instroomopening bij Dreumel en Ophemert is getrapt, met een laagste punt op OLR -1,75 m. Een gedetailleerde beschrijving van de huidige situatie is te vinden in De Jong et al. (2021).



Figuur 3-1 Ligging van de langsdammen in de Waal. Driehoekjes tonen de ligging van de overlaten aan de bovenstroomse zijde van de langsdammen, de cirkels tonen de ligging van de tussenopeningen.

<sup>4</sup> OLR is de overeengekomen lage rivierstand. Deze waterstanden horen bij een afvoer van 1.020 m<sup>3</sup>/s te Lobith.

Alle langsdammen hebben een instroomopening aan de bovenzijde. De instroming wordt bepaald via een overlaat die beneden OLR ligt. In de variant V1 ligt de instroomopening op een hoogte van OLR-1.75 m. De langsdammen bij Wamel en Dreumel hebben 2 tussenopeningen. De langsdam bij Ophemert heeft slechts 1 tussenopening. De hoogteligging van de langsdammen is te zien in Figuur 3-2. De kruinhoogte varieert van OLR +2,35 m tot OLR +2,78 m en stroomt over bij een afvoer te Lobith van ongeveer 3.000 m<sup>3</sup>/s. De tussenopeningen hebben een hoogte van ongeveer OLR +1,25m. Deze stromen over bij een afvoer te Lobith van ongeveer 1.800 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 3-2 Kruinhoogte langsdammen en hoogteligging overlaten instroomopeningen V1. De zwarte driehoeken hebben betrekking op de hoogteligging van de instroomopeningen aan de bovenzijde (ligging zie Figuur 3-1). De groene cirkels tonen de hoogteligging van de tussenopeningen (hoogte ongeveer OLR +1,25 m). Deze stromen over bij een afvoer te Lobith van ongeveer 1.800 m<sup>3</sup>/s. De kruin stroomt over bij een afvoer van ongeveer 3.000 m<sup>3</sup>/s. De gekleurde lijnen tonen de waterstand bij verschillende afvoeren te Lobith.

Naast de basisvarianten, is ook gekeken naar een aantal optimalisatievarianten (zie Zuiderwijk en de Jong, 2021). Het betreft theoretische varianten, die zijn verkend om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de afmetingen van langsdammen voor de hoogwaterveiligheid.

- Voor optimalisatievarianten Vopt\_01 en Vopt\_02 geldt dat deze lijken op basisvariant V1, maar dat de bovenkant van de langsdam is verlaagd met respectievelijk 0,5 en 1,0 m. Deze varianten geven informatie over de gevoeligheid van de hoogte van de langsdammen.
- Voor optimalisatievarianten Vopt\_03 en Vopt\_4 geldt dat ze inzicht geven in het effect van de hoogte van de tussenopeningen. Deze hoogte is verhoogd, zodat het doorstroomoppervlak van de tussenopeningen met 50%, respectievelijk 100% wordt gereduceerd. In dat laatste geval zijn de tussenopeningen dus geheel gesloten.
- Bij optimalisatievarianten Vopt\_05a en Vopt\_05b is gekeken naar het effect van de bodemhoogte in de oevers achter de langsdam. In optie 5a is de bodemligging gelijk gesteld aan OLR. Bij Vopt\_05b ligt de bodem 2.75 m lager dan OLR. Beide varianten bevatten dus een verhoging van de bodem ten opzichte van de basisvariant V1.

- Bij optimalisatievarianten Vopt\_06a t/m Vopt\_06c is de breedte van de oevergeul gevarieerd. Hierbij is aangenomen dat de geul een uniforme bodemligging van 2,75 m beneden OLR heeft. De breedte van de geul is maximaal in Vopt\_06a en bedraagt daar 110 à 120 m. Ter vergelijking: in variant V1 is sprake van oevergeul met variabele breedte, variërend van ongeveer 50 m tot 120 m. In Vopt\_06b is de oevergeul 25% smaller dan in Vopt\_06a. De hoogteligging is ongewijzigd. In Vopt\_06c neemt de breedte met 50% af.
- Bij optimalisatievariant Vopt\_07 is de langsdam verwijderd en vervangen door een verticale damwand. Ter vergelijking, in variant V1 is sprake van een langsdam gemaakt van breuksteen, met een kruinhoogte van OLR+2,75m en een talud van 1:2,5.
- Ook in Vopt\_08 is de langsdam vervangen door een damwand, alleen is de damwand hier poreus.

De samenvattend overzicht van de onderzochte optimalisatievarianten is te zien in Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Varianten die onderzocht zijn In het kader van mogelijke optimalisatie van het ontwerp.

Code	Modelvariant	Omschrijving
Vopt_01	LD_h_min_0p5	De langsdam wordt 0,5 m verlaagd
Vopt_02	LD_h_min_1p0	De langsdam wordt 1,0 m verlaagd
Vopt_03	TO_h_dicht_050p	De drempel in de tussenopeningen wordt verhoogd, zodat de doorstroombopening met 50% afneemt.
Vopt_04	TO_h_dicht_100p	De drempel in de tussenopeningen wordt verhoogd zodat deze volledig worden afgesloten.
Vopt_05a	OG_h_OLR_min_0p00	De minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-0,0 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).
Vopt_05b	OG_h_OLR_min_2p75	De minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-2,75 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).
Vopt_06a	OG_w_100p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt overal 110/120 m en de bodemhoogte ligt overal op OLR-2,75. Bij V1 varieert de breedte (ca 50 tot 120m).
Vopt_06b	OG_w_075p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt 75% van de breedte van optie 6a
Vopt_06c	OG_w_050p_d_OLR_min_2p75	De breedte van de oevergeul bedraagt 50% van de breedte van optie 6a
Vopt_07	V1_no_dam_in_bed_weir	De langsdam wordt verwijderd, er komt een verticale damwand voor in de plaats.
Vopt_08	V1_no_dam_in_bed_ppl	Als optie 7, maar dan met een poreuze verticale damwand.

Het effect van deze optimalisatievarianten op de hoogwaterstanden is alleen bepaald voor opties Vopt\_05 t/m Vopt\_07 en wel bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Voor optimalisatievarianten Vopt\_01, Vopt\_02, Vopt\_03, Vopt\_04 en Vopt\_08 is geen effect op hoogwaterstanden bepaald, omdat de effecten naar verwachting nihil zullen zijn.

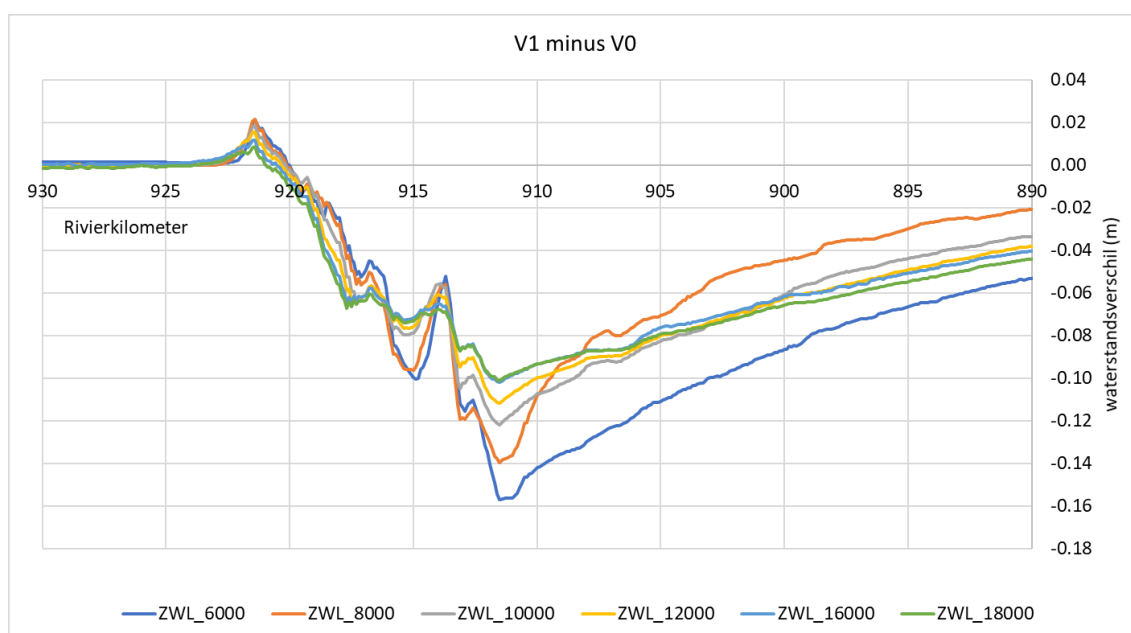
## 4 Resultaten

In dit hoofdstuk wordt de waterstandsdeling beschreven zoals berekend met de modellen voor de pilot langsdammen Waal.

### 4.1 Waterstandsdeling basisvarianten

#### 4.1.1 Variant V1: instroomopeningen geheel open

Voor het effect op hoogwaterstanden is gekeken naar het waterstandsverschil tijdens hoogwater. Figuur 4-1 toont de waterstandsverschillen bij een aantal afvoeren als gevolg van de realisatie van variant V1, dus de situatie in het veld direct na aanleg van de langsdammen. Ofwel: de figuur toont hoe de waterstanden afnemen als gevolg van de aanleg van langsdammen volgens het ontwerp van V1, ten opzichte van een situatie zonder langsdammen. De 3 langsdammen bevinden zich in het traject van km 911,5 tot km 921,5 (zie Figuur 3-2).



Figuur 4-1 Waterstandsdeling door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V1), in vergelijking met een situatie zonder langsdammen.

De grootste waterstandsdeling treedt op aan de bovenstreamse zijde van de meest bovenstreams gelegen langsdam, dit is ongeveer bij km 911,5. In benedenstreamse richting wordt het effect steeds kleiner. Bij het einde van de derde langsdam (km 921,5 ongeveer) is zelfs een kleine toename van de waterstand te zien. Dit effect treedt op bij alle rivierverruimende maatregelen waarbij meer water door de uiterwaard (of in dit geval door een oeversgeul) stroomt. De toename ontstaat op de locatie waar het water terug naar de hoofdgeul stroomt. De verhoging ontstaat waarschijnlijk door een verandering van de lokale stromingscondities. Een vergelijkbaar effect is ook te zien nabij km 914-915, waar de aanwezigheid van een veerdam en veerstoeppen voor verandering van lokale stromingscondities zorgen.

Het effect van de langsdammen is tot ver bovenstreams merkbaar. Bij Nijmegen (bovenrand van het model, km 888) bedraagt de waterstandsdeling nog steeds enige cm.



Het effect is niet bij iedere rivierafvoer even groot. De grootste waterstandsdeling treedt op bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. De waterstandsdeling bij km 912 bedraagt dan bijna 16 cm. Het effect neemt af naarmate de afvoer verder toeneemt. Dit komt doordat er dan meer water door de uiterwaarden wordt afgevoerd. Veranderingen in de hoofdgeul hebben daardoor minder effect op de extremere hoogwaterstanden. Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s of 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith is de maximale waterstandsdeling van variant V1 ongeveer 10 cm.

Bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith bedraagt de maximale waterstandsdeling bijna 16 cm. De halveringslengte is bij deze afvoer ongeveer 14 km (ofwel: 14 km bovenstrooms van km 912 is het waterstandseffect gehalveerd). Wanneer we de stuwkromme op deze manier doortrekken, dan zal bij de Pannerdensche Kop nog steeds sprake zijn van een kleine waterstandsdeling (iets minder dan 2 cm). Bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s is het maximale effect op km 912 kleiner (ongeveer 10 cm), maar lijkt de stuwkromme ook flauwer te verlopen. Ook bij deze afvoer zal de waterstand op de Waal nabij de Pannerdensche Kop dus iets lager uitvallen (orde 1,5 cm). Wanneer de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal niet veranderen, dan kan dit leiden tot een (beperkte) toename van de afvoer over de Waal. Dit effect is niet in het huidige model te zien, omdat de bovenrand zich bij Nijmegen bevindt. Volgens analyses van Breunissen (2018) zou een waterstandsdeling op de Waal bij de Pannerdensche Kop van 2 cm leiden tot een toename van de afvoer op de Waal met ongeveer 30 m<sup>3</sup>/s<sup>5</sup>. Dit leidt op de hele Waal tot iets minder dan 2 cm waterstandsverhoging. Door de instelling van de regelwerken op de splitsingspunten aan te passen kan dit effect worden voorkomen<sup>6</sup>.

### Conclusie

Aanleg van de pilot langsdammen conform variant V1 (situatie in het veld direct na aanleg van de langsdammen) leidt tot maximaal 16 cm waterstandsdeling bij km 911.5 bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Bij hogere afvoeren neemt het maximale effect af tot ongeveer 10 cm.

#### 4.1.2 Variant V2: gesloten instroomopeningen

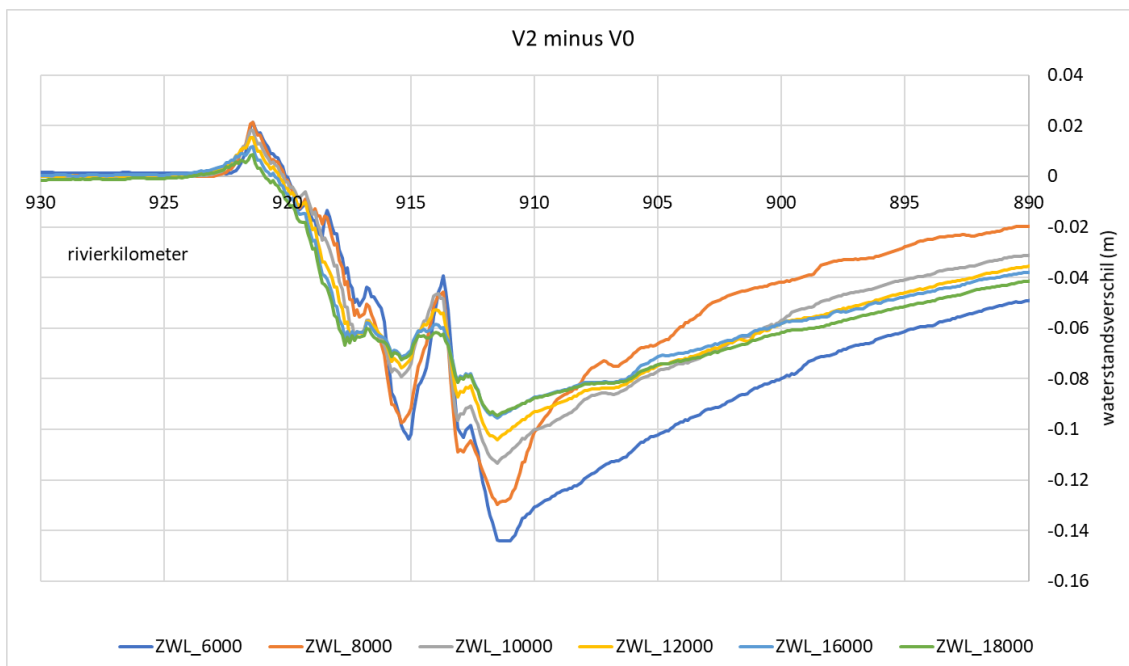
Op het eerste gezicht is het effect van variant V2 vrijwel gelijk aan het effect van variant V1 (vergelijk Figuur 4-2 met Figuur 4-1). Ook bij deze variant is het waterstandseffect maximaal bij de bovenstroomse instroomopening van de eerste langsdam (km 911,5). In benedenstroomse richting wordt het effect steeds kleiner. Bij het einde van de meest benedenstroomse langsdam is een kleine toename van de waterstand te zien. Bovenstrooms van de langsdammen is ook sprake van waterstandsdeling. Dit effect dempt langzaam uit, maar is waarschijnlijk nog licht merkbaar bij de Pannerdensche Kop.

Wanneer we het effect van varianten V1 en V2 onderling vergelijken (Figuur 4-3) dan zien we dat de waterstanden bij het instroompunt van de meeste bovenstrooms gelegen langsdam maximaal 1 cm hoger blijven bij V2 dan bij V1. Dit effect dempt in bovenstroomse richting langzaam uit. Bij de overgangen naar de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> langsdam zijn de effecten tegengesteld. Bij de overgang naar de 2<sup>e</sup> langsdam (km 915) zijn de waterstanden bij V2 maximaal enkele mm lager dan bij V1. Bij de overgang naar de 3<sup>e</sup> langsdam zijn ze maximaal een paar mm hoger. Al met al zijn de verschillen in hoogwaterstanden tussen V1 en V2 gering.

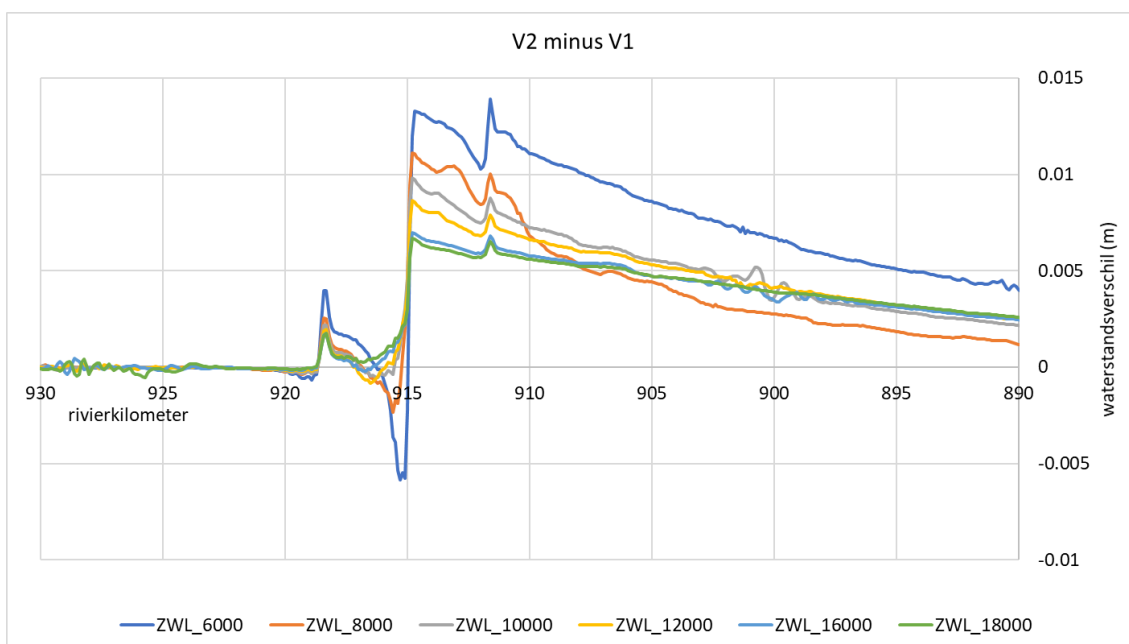
---

<sup>5</sup> Deze berekeningen zijn uitgevoerd bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith

<sup>6</sup> Ieder jaar voorafgaand aan het hoogwaterseizoen wordt de correcte instelling van de regelwerken door RWS bepaald. Zo wordt rekening gehouden met veranderingen in het rivierensysteem door aanlegprojecten of door autonome ontwikkelingen, zoals bodemerrosie.



Figuur 4-2 Waterstandsval door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V2), in vergelijking tot een situatie zonder langsdammen (V0).



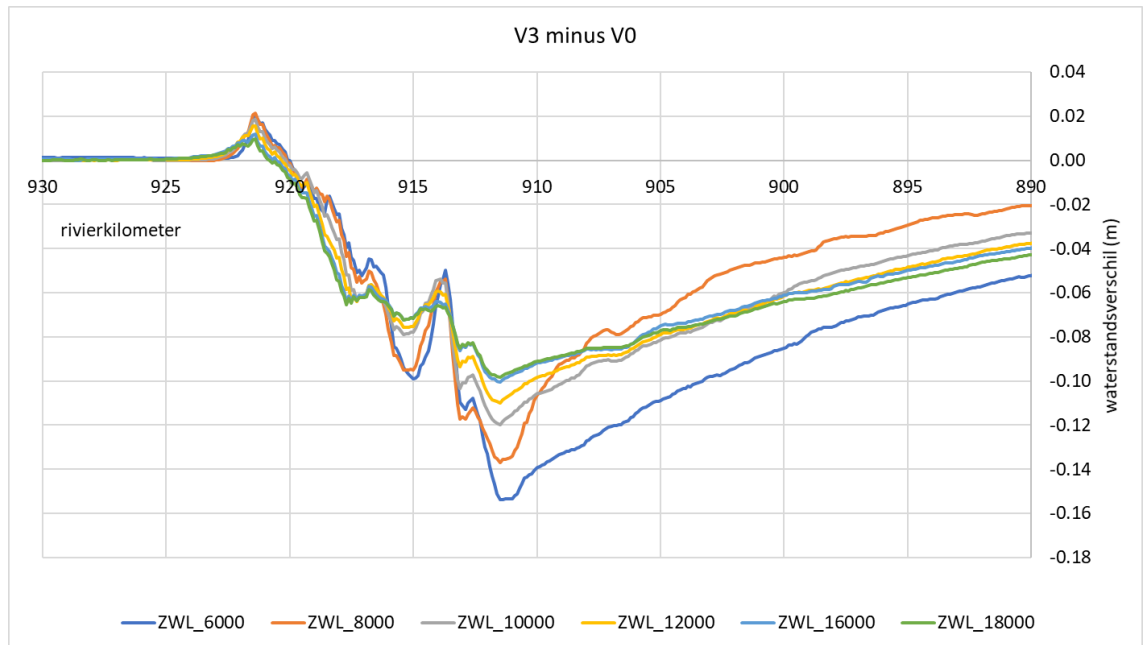
Figuur 4-3 Verschil in waterstandsval tussen langsdammenvarianten V2 en V1.

### Conclusie

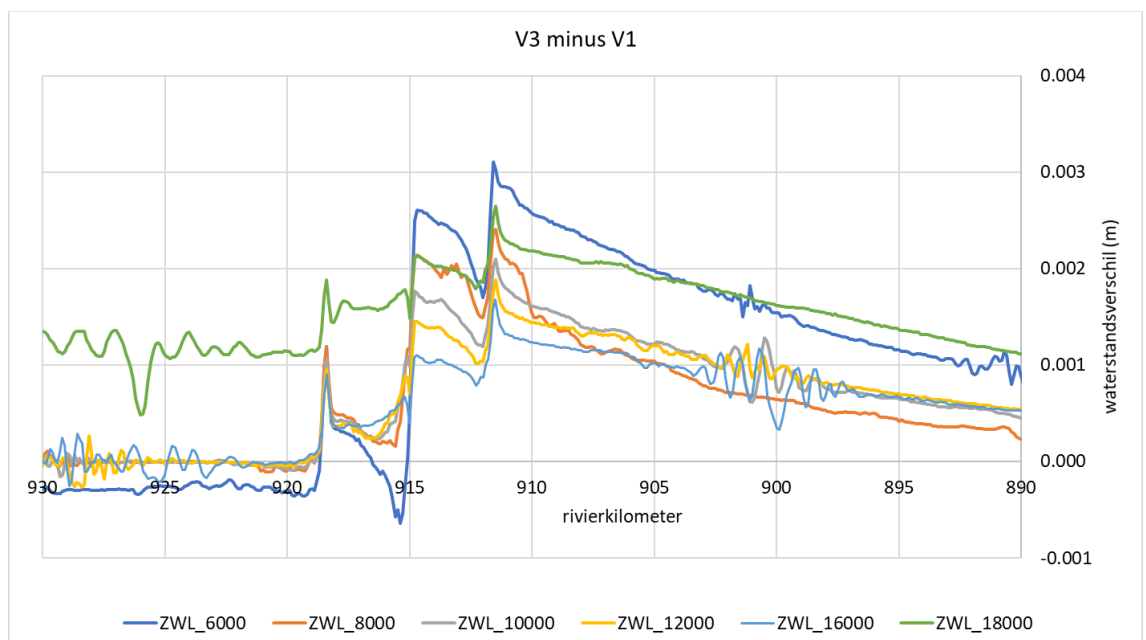
Het afsluiten van de instroomopeningen leidt tot maximaal 1 cm hogere hoogwaterstanden dan een situatie waarbij de instroomopeningen helemaal open zijn (15 cm in plaats van maximaal 16 cm waterstandsval).

### 4.1.3 Variant V3: deels gesloten instroomopening

Het waterstandseffect van variant V3 (de huidige situatie in het veld) lijkt ook sterk op dat van variant V1 (Figuur 4-4). Het maximale waterstandsdalende effect treedt op bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith en bedraagt ruim 15 cm. Bij een afvoer van 16.000 of 18.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith is het waterstandseffect iets kleiner (maximaal 10 cm). Figuur 4-5 bevestigt het beeld dat de waterstandseffecten van V3 sterk lijken op die van V1. Het ophogen van de drempels in de instroomopeningen leidt tot maximaal 3 mm hogere waterstanden.



Figuur 4-4 Waterstandsdaling door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V3), in vergelijking tot een situatie zonder langsdammen (V0).



Figuur 4-5 Verschil in waterstandsdaling tussen langsdammenvarianten V3 en V1.

## Conclusie

Het deels sluiten van de instroomopeningen, zoals enige tijd na aanleg van de langsdammen is gebeurd, heeft een zeer klein effect op de hoogwaterstanden. Het ophogen van de drempels in de instroomopeningen in variant V3 leidt tot maximaal 3 mm hogere waterstanden dan de variant met geheel open instroomopeningen (V1).

## 4.2 Uitvoering over grotere lengte

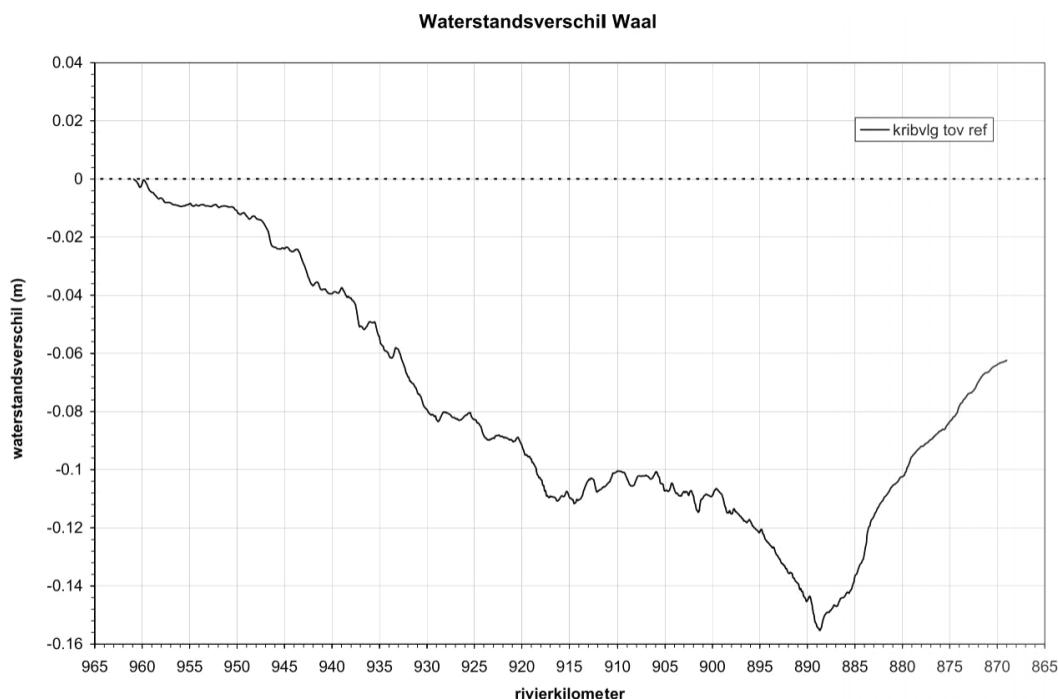
De maximale waterstandsdeling van een maatregel is afhankelijk van de lengte waarover de maatregel wordt uitgevoerd. Dit komt doordat de maximale verlaging volgens een stuwkromme moet worden opgebouwd. De zogenaamde halveringslengte van de stuwkromme is een maat voor hoe snel een effect opbouwt, en voor hoe deze weer aan effect verliest bovenstrooms van de maatregel. Uit gelineariseerde stromingsvergelijkingen volgt dat een maatregel moet worden uitgevoerd over een afstand van ruim vier maal de halveringslengte om maximaal effect te hebben (een maatregel die wordt uitgevoerd over een afstand van 4 maal de halveringslengte resulteert in 95% van het maximaal haalbare effect). De halveringslengte op de Waal varieert van 10 tot 15 km. Dat betekent dat 95% van het maximale effect van langsdammen zou worden bereikt wanneer ze over een lengte van 40 tot 60 km worden gerealiseerd. In de huidige situatie zijn de langsdammen gerealiseerd over een lengte van ongeveer 10 km. Dit komt overeen met maximaal 1 halveringslengte. Het effect bedraagt dan maximaal 50%. Ofwel: wanneer de langsdammen over een grotere lengte worden gerealiseerd (40 tot 60 km op de Waal), dan kan het effect verdubbelen.

## 4.3 Vergelijking met oorspronkelijke taakstelling

Bij de PKB Ruimte voor de Rivieren waren er oorspronkelijk kribverlagingsmaatregelen gepland langs de Waal. Deze zijn vervangen door langsdammen in combinatie met minder omvangrijke kribverlaging. Figuur 4-6 toont de werktaakstelling voor de combinatie van langsdammen en de minder omvangrijke kribverlaging W2, W3 en W4.

De langsdammen hebben nooit een aparte, eigen taakstelling gekregen. Alle uitgevoerde analyses hebben eveneens betrekking op de combinatie van langsdammen en kribverlaging (zie bijvoorbeeld Huthoff et al., 2011).

Een exacte vergelijking tussen het hier berekende effect van de langsdammen en de oorspronkelijke taakstelling is daardoor niet mogelijk. De Programmadirectie Ruimte voor de Rivier (PDR) heeft wel gecontroleerd of de *combinatie* van langsdammen en kribverlaging voldoet aan de taakstelling.

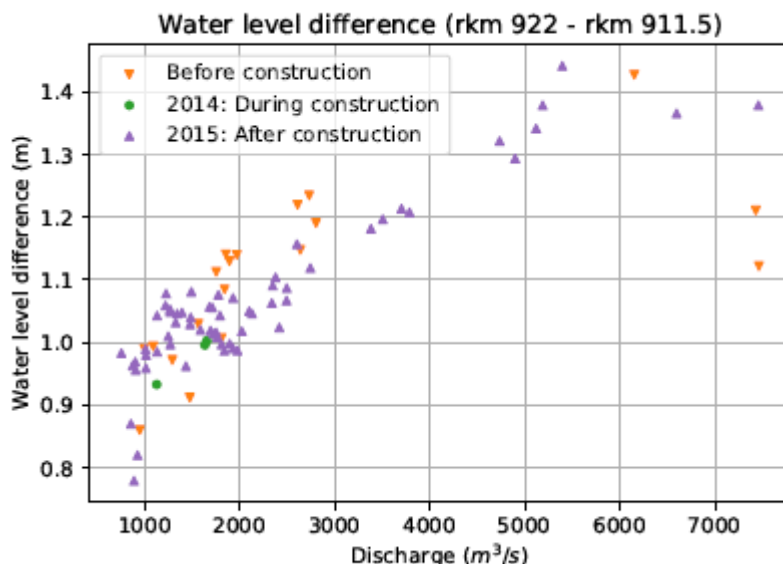


*Figuur 4-6 De taakstelling voor de 'Pilotstudie langsdammen': de waterstandsverlaging bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith, ten gevolge van kribverlaging op de Waal (deeltrajecten W2, W3 en W4). De langsdammen zijn voorzien van kilometer 911 tot 922 (bron: Huthoff et al., 2011).*

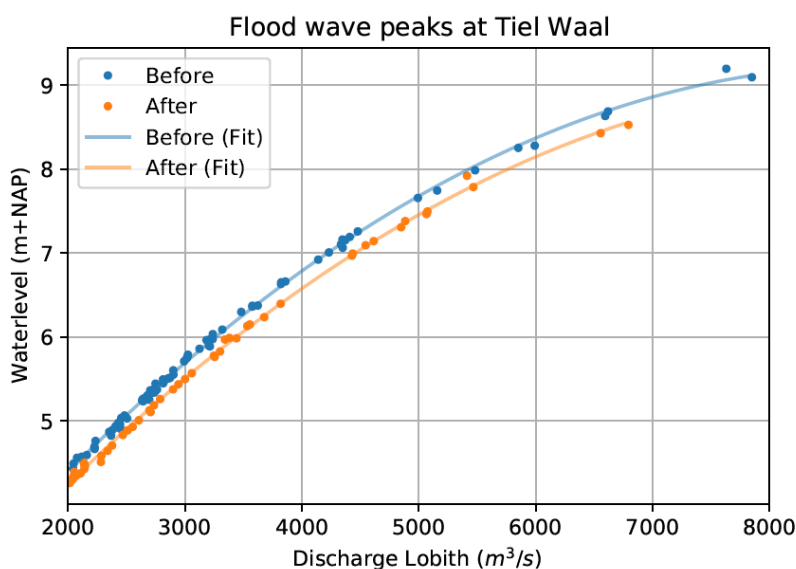
#### 4.4 Vergelijking met metingen

De Jong et al. (2021) hebben op basis van beschikbare metingen gekeken wat het effect is van de pilot langsdammen op hoog- en laagwaterstanden. Figuur 4-7 toont de waterstandsverschillen gemeten ter hoogte van de pilot langsdammen voor, tijdens en na aanleg van de langsdammen. Voor hoogwaterveiligheid zijn vooral de waarnemingen bij afvoeren hoger dan 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith interessant. Op basis van de berekeningen voor basisvariant V3 zou mogen worden verwacht dat de verschillen bij afvoeren tussen de 6.000 en 8.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith ongeveer 12 cm kleiner zouden worden. Dat blijkt niet uit deze figuur. Het aantal waarnemingen bij deze afvoeren is echter te beperkt om conclusies aan te verbinden en bovendien merken De Jong et al. (2021) op dat de twee meetpunten bij een afvoer van 7.500 m<sup>3</sup>/s onbetrouwbaar zijn.

Om te beschikken over meer metingen is door de Jong et al. (2021) gebruik gemaakt van metingen van het Landelijk Meetnet Water (LMW). Figuur 4-8 toont de gemeten waterstandsdingaling bij Tiel. De daling bedraagt ongeveer 20 cm, en is daarmee ruim 1,5 keer groter dan de verwachte waterstandsdingaling in de berekeningen. Echter, de gemeten waterstandsdingaling is het gevolg van de aanleg van de langsdammen, de kribverlaging en de realisatie van maatregelen in uiterwaarden, zoals de nevengeul Passewaaij. Op basis van deze metingen kan dus niet worden geconcludeerd hoe groot het effect van enkel de langsdammen is. Bovendien zijn geen metingen beschikbaar voor afvoeren van meer dan 7.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Het is op basis van de metingen dus ook niet mogelijk om een uitspraak te doen over de waterstandsdingaling bij zeer hoge afvoeren. Om een uitspraak te kunnen doen over welk deel van de gemeten waterstandsverlaging te maken heeft met de langsdammen zouden aanvullende berekeningen nodig zijn, waarbij het waterstandseffect van de maatregelen afzonderlijk wordt berekend. Deze berekeningen zijn op dit moment niet beschikbaar (zie ook de vorige paragraaf).



Figuur 4-7 Waterstandsverschillen tussen rkm 911.5 (begin traject pilot langsdammen) rkm 922 (einde traject pilot langsdammen) gemeten voor, tijdens en na aanleg van de pilot langsdammen op de Waal (bron: De Jong et al., 2021).

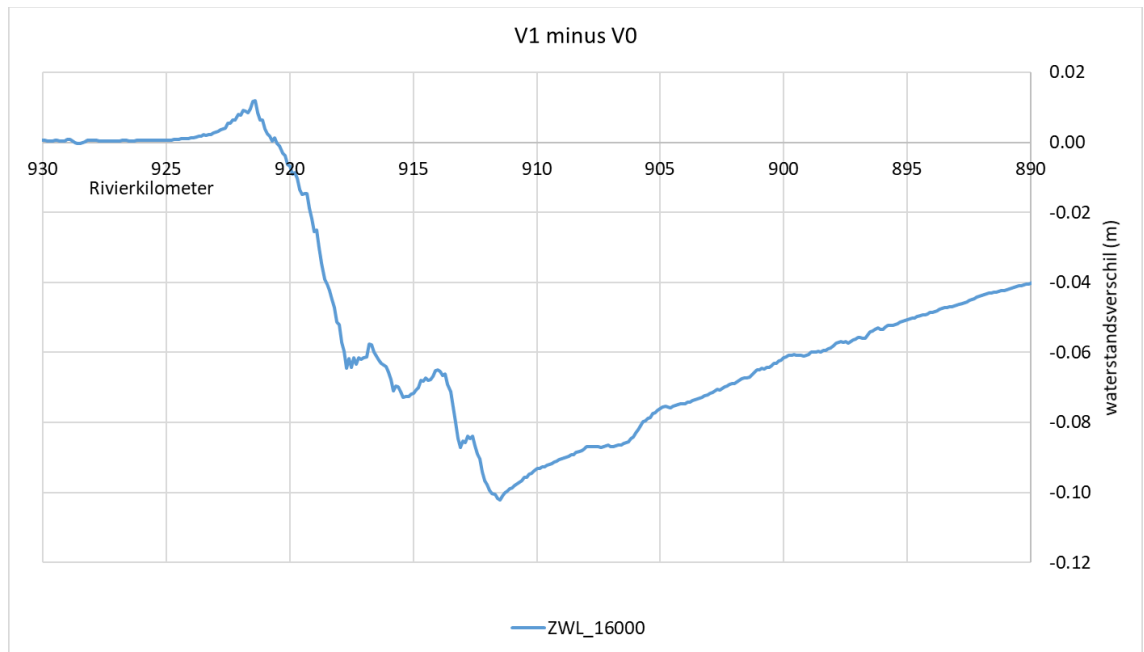


Figuur 4-8 Waterstanden gemeten bij Tiel, voor en na aanleg van de pilot langsdammen op de Waal (bron: De Jong et al., 2021).

## 4.5 Waterstandsdeling optimalisatievarianten

De doorgerekende optimalisatievarianten betreffen alle variaties (optimalisaties) op basisvariant V1. Er is daarom voor gekozen om de waterstandsdeling van de optimalisatievarianten te vergelijken met de waterstandsdeling die is berekend voor basisvariant V1. Het effect op hoogwaterstanden is bepaald voor optimalisatievarianten Vopt\_05 t/m Vopt\_07 en alleen voor een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Voor deze afvoer is gekozen omdat voor veel rivierverruimingsmaatregelen het effect bij deze afvoer is bepaald en omdat met name de effecten bij zeer hoge afvoeren van belang zijn, gezien de strenge beschermingsnormen langs de Waal. De effecten bij 16.000 m<sup>3</sup>/s en 18.000 m<sup>3</sup>/s zijn vergelijkbaar.

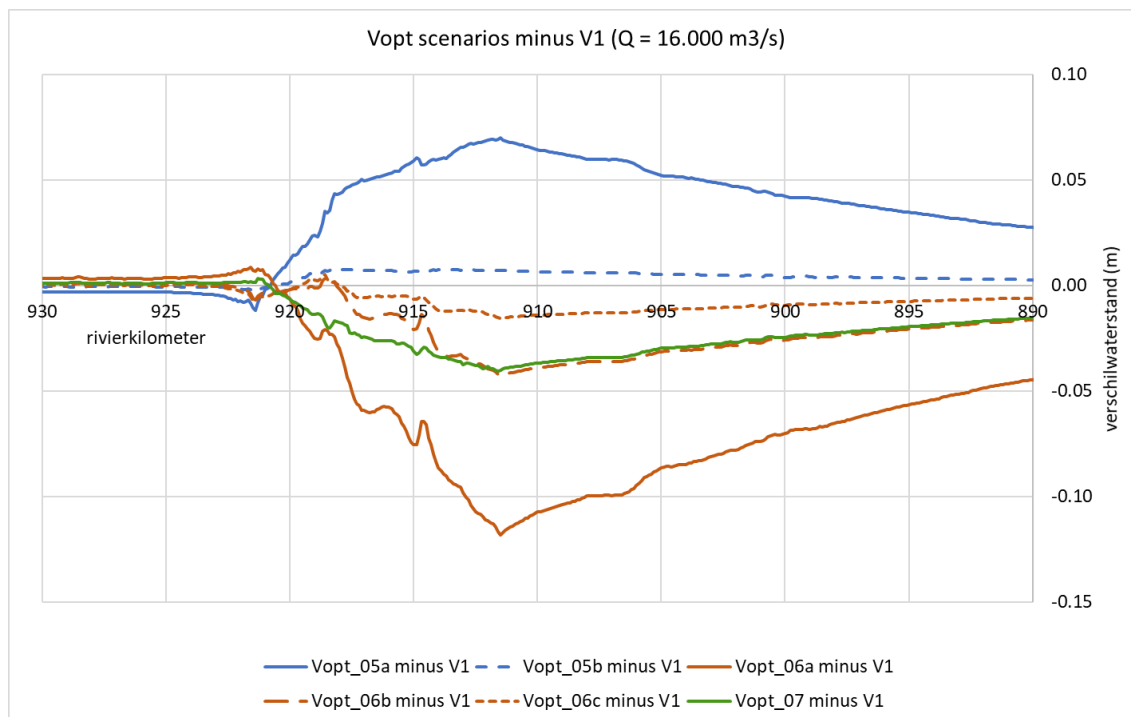
Figuur 4-9 toont de waterstandsding van basisvariant V1 bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Het maximale effect treedt op aan de bovenstroomse zijde van de meest bovenstrooms gelegen langsdam (km 911,5).



Figuur 4-9 Waterstandsding door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V1), in vergelijking met een situatie zonder langsdammen, bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith.

Figuur 4-10 toont in welke mate de hoogwaterstanden bij de optimalisatievarianten Vopt\_05 t/m Vopt\_07 afwijken van die bij basisvariant V1. Uit Figuur 4-10 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De hoogte van de bodemligging in de oevertgeul heeft een relatief groot effect op de hoogwaterstanden. Bij optimalisatievariant Vopt\_05a is de bodemligging gelijk aan OLR, in plaats van OLR -4.75m. De hoogwaterstanden nemen dan met 7 cm toe. Een bodemligging op OLR-2,75 m leidt tot maximaal 1 cm hogere hoogwaterstanden. Opvallend is dat het maximale effect hiervan niet merkbaar is bij km 911,5, maar bij km 918. Dit komt doordat de bodemligging van de oevertgeul achter de eerste langsdam bij variant V1 al ongeveer op OLR-2,75 m ligt. Hier is dus nauwelijks sprake van ophoging. Bij met name de 3<sup>e</sup> langsdam ligt de bodem van de oevertgeul bij V1 wel lager. Hier is de ophoging dus groter, wat resulteert in een iets groter effect.
- De breedte van de oevertgeul heeft ook een relatief groot effect op hoogwaterstanden. Optimalisatievariant Vopt\_06a laat zien dat verbreding van de geul tot een uniforme breedte van 110 à 120 m in plaats van een breedte die varieert van 50 tot 120 m leidt tot 12 cm lagere waterstanden. Bij optimalisatievariant Vopt\_06b is de oevertgeul 25% smaller dan in Vopt\_06a, maar de extra waterstandsding is dan nog maar 1/3 van de waterstandsding van Vopt\_06a (ongeveer 4 cm in plaats van 12 cm). Wanneer de oevertgeul nog verder wordt versmald tot 50% van de breedte in Vopt\_06a, bedraagt de extra waterstandsding nog maar 1/8 deel (1,5 cm in plaats van 12 cm).
- Vervanging van de langsdam door een damwand heeft ook een gunstig effect op hoogwaterstanden. De extra waterstandsding ten opzicht van variant V1 bedraagt ongeveer 4 cm (zie Vopt\_07 in Figuur 4-10). Dit komt doordat de doorstroomprofielen van de hoofdgeul en de oevertgeul worden vergroot en doordat de ruwheid van een damwand lager is.



Figuur 4-10 Waterstandsdeling bij optimalisatie van de langsdammen op de Waal in vergelijking met een situatie met langsdammen conform basisvariant V1.

#### 4.6 Effect van langsdammen in het licht van de nieuwe normering

Om aan de nieuwe normering te voldoen moeten veel dijken in het rivierengebied fors worden versterkt en verhoogd. De waterstandsdeling die veroorzaakt wordt door de aanleg van langsdammen resulteert in een evenredige verandering in de benodigde kruinhoogte van de rivierdijk. Ofwel: wanneer de langsdammen resulteren in maximaal 10 cm lagere waterstanden, dan hoeft de dijk minder te worden verhoogd om aan de nieuwe norm te voldoen. De waterstandsdeling heeft minder effect op de benodigde dijkversterking om aan de faalmechanismen piping en macrostabiliteit te voldoen.

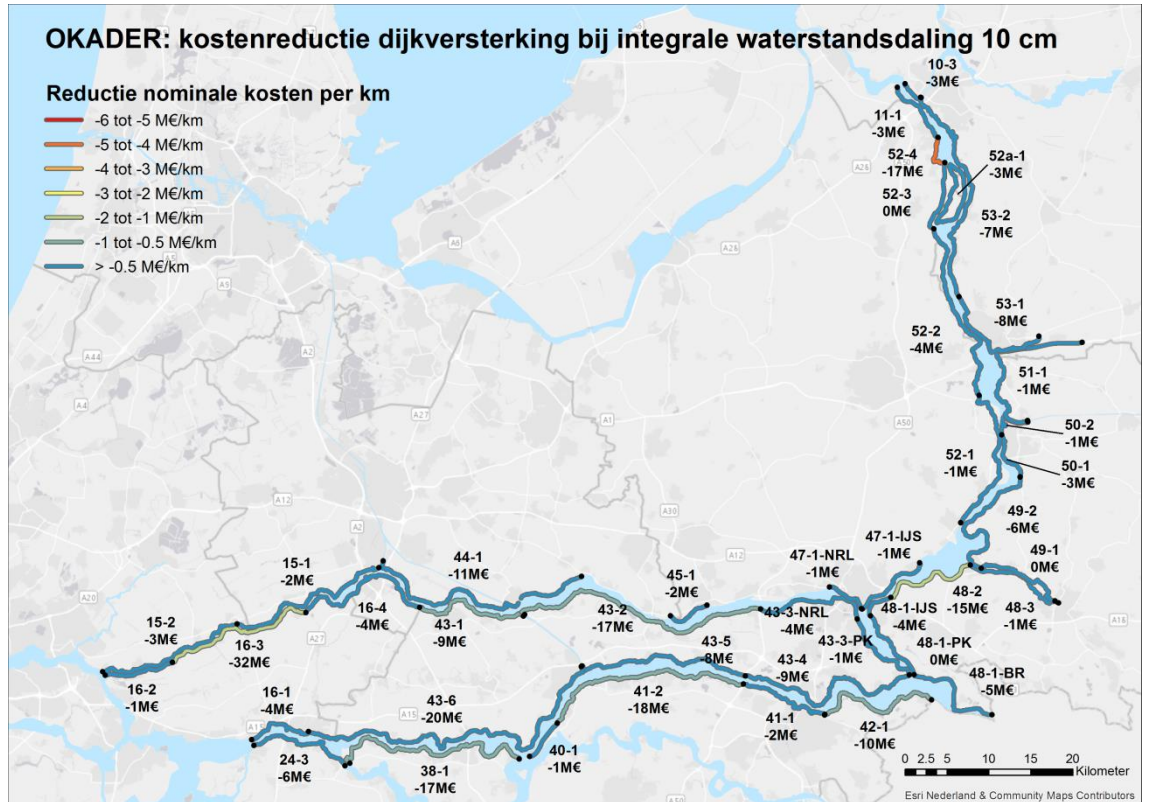
Eerdere analyses die zijn uitgevoerd in het kader van het Deltaprogramma Rivieren lieten zien dat 10 cm waterstandsdeling langs de Waal resulteert in een verkleining van de overstromingskans van ongeveer 15 tot 20%. Ofwel: indien de huidige overstromingskans op een traject 1:1000 per jaar bedraagt, dan leidt 10 cm waterstandsdeling op dit traject tot een overstromingskans van ongeveer 1:1150 per jaar. Bij een waterstandsdeling van 50 cm kan sprake zijn van een halvering van de overstromingskans. Een kans van 1:1000 per jaar wordt dan 1:2000 per jaar<sup>7</sup>.

Hoewel een afname van de overstromingskans met 15% of zelfs 50% een grote afname lijkt, is dit nergens voldoende om aan de nieuwe norm te kunnen voldoen. Een vergelijking tussen de overstromingskansen berekend door VNK en de maximaal toelaatbare overstromingskans volgens de norm laat zien dat op sommige trajecten een afname nodig is met orde van 99% (van 1:100 naar 1:10.000 of zelfs 1:30.000). Omvangrijke dijkversterking zal dus altijd nodig blijven, ook wanneer de langsdammen over grotere lengte worden aangelegd.

<sup>7</sup> Een overzicht van de overstromingskans per dijkvak is te vinden in de eindrapportage van VNK2 'De Veiligheid in Kaart' (Rijkswaterstaat, projectbureau VNK, 2014).



Wanneer een dijk versterkt moet worden kost een aantal cm extra verhogen relatief weinig extra. Zeer grote besparingen zijn te verwachten wanneer dijkversterking voorkomen kan worden. Figuur 4-11 toont de kostenbesparing per normtraject wanneer de waterstanden *overall* (en bij alle afvoeren boven de 6000 m<sup>3</sup>/s te Lobith) met 10 cm omlaag zouden gaan. Op de Waal leidt dat tot een besparing van ongeveer 95 miljoen euro. Op een totale investering van bijna 2,9 miljard euro komt dat neer op een besparing van ongeveer 3%. De in Figuur 4-11 getoonde kostenbesparingen zijn berekend met een eerdere versie van OKADER (augustus 2018). De verwachting is dat de besparingen indien berekend met een recentere versie van de tool OKADER nog lager uit zal vallen.



Figuur 4-11 Verschil in investeringskosten bij 10 cm lagere waterstanden op de rivier (nominale kosten) (Asselman, 2019). De kostenbesparing is berekend met OKADER versie augustus 2018<sup>8</sup>.

## Conclusie

De aanleg van langsdammen zal naar verwachting resulteren in een beperkte afname van de dijkversterkingsopgave en in een zeer beperkte afname van de hiermee gemoeide kosten. Zelfs wanneer de langsdammen over grotere lengte gerealiseerd worden, zal omvangrijke dijkversterking nodig blijven en zal de kostenbesparing beperkt zijn tot maximaal een paar procent van de totale investeringskosten.

## 4.7 Effect van langsdammen op ijsdammen

Het mogelijke ontstaan van ijsdammen in strenge winters vormt een afzonderlijke factor bij de veiligheid tegen overstromingen. Overstromingsrampen door ijsdammen waren in de negentiende eeuw de aanleiding om de Rijntakken grootschalig met kribben te normaliseren.

<sup>8</sup> Een gedetailleerde omschrijving van OKADER is te vinden in Van der Meij et al. (2016). Een beschrijving van de werking van het instrument is te vinden in De Grave et al. (2017). In de in deze figuur getoonde resultaten is uit gegaan van versterking met een levensduur van 50 jaar en klimaatverandering conform het W+ klimaatscenario. Voor overige uitgangspunten wordt verwezen naar Asselman (2019).

De inrichting van de rivier voorkomt zo de stromingsconcentraties en de stroomvertragingen waar ijsdammen plegen te ontstaan. Tegenwoordig treden ijsdammen nauwelijks meer op dankzij deze normaliseringswerken, regionale opwarming van het klimaat, en lozingen van koelwater en afvalwater. Toch verdienen ze blijvende aandacht in het rivierbeheer. Strenge vorst blijft mogelijk en koelwaterlozingen op de Rijn nemen af. Aanpassingen aan het systeem met kribben roepen de vraag op of deze niet weer het gevaar van ijsdammen vergroten.

Vast ijs op rivieren kan optreden als een ijsdek of als een ijsdam. Van der Wal (2011) noemt een ijsdek een "ijsdam van het opvriezende type" en wat strikt genomen een echte ijsdam is een "ijsdam van het opbrekende type":

- Het opvriezende type ontstaat tijdens strenge vorst bij aanvang van het dichtvriezen van de rivier en afnemende rivierafvoeren. Lage stroomsnelheden zijn een belangrijke factor voor het ontstaan van een ijsdek. Deze treden op waar de IJssel uitmondt in het Ketelmeer en waar het getij kentert, vooral stroomafwaarts in de Nederrijn-Lek. Andere locaties voor het begin van een ijsdek zijn rivierbochten, plaatselijke versmallingen met een diepere bodem, samenvloeiingen, en brugpijlers of andere obstakels (Zagonjolli en Mosselman, 2019). Eenmaal gevormd, breidt het ijsdek zich stroomopwaarts uit door aanvoer van drijfijis. Door de afnemende afvoeren is het overstromingsgevaar als gevolg van ijsdammen kleiner dan bij ijsdammen van het opbrekende type.
- Ijsdammen van het opbrekende type ontstaan als bovenstrooms de dooi intreedt. Er kunnen daar stukken ijs loskomen of afbreken. De rivier voert die stukken ijs mee met de stroming. Afhankelijk van de sterkte van de stroming kunnen die stukken een ijsdam vormen wanneer ze stroomafwaarts stuiten op een ijsdek dat nog aanwezig is. Om de kans op dit soort ijsdammen in te schatten wordt vaak gebruik gemaakt van het criterium van Kivisild op basis van het Froudegetal. Is het Froudegetal groter dan 0,08, dan worden de ijsschotsen onder het ijsdek door getransporteerd. Is het Froudegetal kleiner dan 0,08, dan ontstaat een ijsdam.

Voor het gevaar van ijsdammen op de Waal worden ijsdammen van het opbrekende type als meest risicovol gezien. De stroomsnelheden in de hoofdgeul zijn doorgaans te groot voor het ontstaan van een ijsdek. Ophoping van ijsschotsen die bovenstrooms zijn los gebroken zou wel mogelijk kunnen zijn, bijvoorbeeld wanneer drijfijis of kruierend ijs vastloopt op kribben. Gestrekte rivierwerken als de langsdammen lijken ijs echter juist beter te geleiden dan kribben. Bovendien zijn de koppen van de langsdammen voorzien van ijsbrekers.

Wanneer toch sprake is van het ontstaan van een ijsdek waar de ijsschotsen tegenaan kunnen botsen, dan blijkt de ontwikkeling van de ijsdammen afhankelijk van het Froudegetal aan het oppervlak van de stroming tegen dat ijsdek. Als het Froudegetal onder een waarde van 0.08 komt, dan is er bij voldoende ijsaanvoer kans op de ontwikkeling van ijsdammen. Voor de Waal zijn geen hydrodynamische berekeningen met een ijsdek bekend, maar voor het Pannerdensch Kanaal wijzen berekeningen met een ijsdek door Zagonjolli en Mosselman (2019) uit dat het Froudegetal er nooit lager is dan 0,1.

Hoewel de proefondervindelijke ervaring van een strenge winter ontbreekt, valt redelijkerwijs aan te nemen dat de langsdammen de ijsveiligheid niet aantasten.

## 5 Conclusie

Dit rapport maakt deel uit van de eindevaluatie pilot langsdammen. Dit onderdeel binnen de eindevaluatie gaat in op de effecten van langsdammen op de functie waterveiligheid. De volgende vragen zijn beantwoord:

- Wat is het huidige effect van de langsdammen op de hoogwaterstanden?
- In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?
- Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context van de nieuwe normering?
- Zijn langsdammen van invloed op de vorming van ijsdammen?

### Effecten op hoogwaterstanden

Volgens de uitgevoerde modelberekeningen, leiden alle drie de basisvarianten tot een vergelijkbare waterstandsdeling (zie ook Tabel 5-1):

- Aanleg van de langsdammen over een lengte van 10 km leidt bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith tot maximaal 16 cm waterstandsdeling aan de bovenstroomse zijde van de meest bovenstrooms gelegen langsdam. Bij hogere afvoeren (16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith) neemt het maximale effect langs de rivier af tot ongeveer 10 cm.
- Wanneer de langsdammen langs de Waal over een lengte van 40 tot 60 km zouden worden aangelegd, dan kan dit leiden tot een twee keer zo groot waterstandseffect.
- De waterstandsdeling kan leiden tot een kleine verschuiving in de afvoerverdeling, omdat het effect nog merkbaar is bij het splitsingspunt (orde 20 tot 30 m<sup>3</sup>/s meer afvoer naar de Waal). Deze effecten kunnen bij zeer hoge afvoeren echter worden gecorrigeerd met behulp van regelwerk Pannerden.
- Het geheel openen van de instroomopeningen (V1) heeft een zeer klein effect op de hoogwaterstanden. Het verlagen van de drempels in de instroomopeningen in variant V1 leidt tot maximaal 3 mm lagere waterstanden dan de variant die nu aanwezig is in het veld (V3).
- Het afsluiten van de instroomopeningen (variant V2) leidt tot maximaal 1 cm hogere hoogwaterstanden (15 cm in plaats van maximaal 16 cm waterstandsdeling bij een afvoer van 6.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith). Bij hogere afvoeren bedraagt het verschil ten opzichte van variant V1 en V3 minder dan 1 cm.
- Ophoging van de bodem in de oevergeul leidt tot minder waterstandsdeling. Bij ophoging tot OLR-2.75m (ten opzichte van de nu gerealiseerde ~OLR-4.75m), is de waterstandsdeling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith beperkt tot 3 cm (in plaats van 10 cm).
- Verbreding van de oevergeul leidt tot een grotere waterstandsdeling. Wanneer de oevergeul wordt opgehoogd tot OLR-2.75, maar tevens wordt verbreed tot een breedte van 110/120 m (de huidige breedte varieert van 50 tot 120 m), dan leidt dat tot een waterstandsdeling van maximaal 22 cm.
- Het vervangen van de langsdam door een damwand heeft voor waterveiligheid eveneens een gunstig effect. De maximale waterstandsdeling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith bedraagt dan 14 cm in plaats van 10 cm.

Tabel 5-1 Maximale waterstands­daling (cm) per variant bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith (negatieve waarden in de tweede kolom duiden op verhoging van de waterstand t.o.v. basisvariant V1). De pilot langsdammen zoals aangelegd in de Waal komen overeen met variant V3.

Variant	Beschrijving	Ten opzichte van situatie zonder langsdammen (V0)	Ten opzichte van basisvariant V1
V1	Volledig open instroomopening, bodemligging oevergeul varieert (~OLR-4,75 m)	-10	-
V2	Gesloten instroomopeningen	-10	0.7
V3	Met hoger liggende instroomopeningen (situatie in het veld)	-10	0.2
Vopt_05a	Minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-0,0 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).	-3	7
Vopt_05b	Minimale bodemhoogte in de oevergeul bedraagt OLR-2,75 m. In V1 varieert de bodemligging (~ OLR-4,75 m).	-9	1
Vopt_06a	Breedte van de oevergeul bedraagt overal 110/120 m en de bodemhoogte ligt overal op OLR-2,75. Bij V1 varieert de breedte (ca 50 tot 120m).	-22	-12
Vopt_06b	De breedte van de oevergeul bedraagt 50% van de breedte van optie 6a	-15	-4
Vopt_06c	De breedte van de oevergeul bedraagt 25% van de breedte van optie 6a	-12	-2
Vopt_07	Langsdam wordt vervangen door een verticale damwand	-14	-4

### Invloed van de hoogte van de instroomopeningen

Zoals uit bovenstaand overzicht blijkt, leidt het geheel of gedeeltelijk sluiten van de instroomopeningen tot iets minder waterstands­daling. Bij de aanleg van langsdammen over een lengte van 10 km en geheel geopende instroomopeningen, bedraagt de waterstands­daling bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith ongeveer 10 cm. Het ophogen van de drempels in de instroomopening (deels sluiten) leidt tot 2 mm minder waterstands­daling. Wanneer de instroomopening geheel gesloten is, leidt dit tot maximaal 1 cm minder waterstands­daling.

### Langsdammen in de context van de nieuwe normering

De waterstands­daling leidt tot een zeer beperkte afname van de overstromingskans. Bij 10 cm waterstands­daling neemt de overstromingskans met ongeveer 15% af. Echter, om aan de nieuwe beschermingsnormen te voldoen is op veel normtrajecten een veel grotere afname van de overstromingskans nodig (soms met wel 99%). De langsdammen leveren in dat opzicht een beperkte bijdrage aan de waterveiligheid, die zich door vertaalt in een beperkte reductie van de kosten voor dijkversterking.

### Invloed op de vorming van ijssdammen

Hoewel de proefondervindelijke ervaring van een strenge winter ontbreekt, valt redelijkerwijs aan te nemen dat de langsdammen de ijsveiligheid niet aantasten.

## 6 Literatuur

- Asselman, N. (2019) Kostenbeeld waterkeringen. Deltares memo 11202191-000-ZWS-0029\_v0.2
- Breunissen, B. (2018) De afvoerverdelingen op de Pannerdensche Kop en IJsselkop. Bachelor Eindopdracht Civiele Techniek, Universiteit Twente.
- De Grave, P., O. Levelt, J. Pol en G. Pleijter (2017) Gebruikershandleiding Rivierentool Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming. Deltares rapport 11200539-000-ZWS-0001.
- De Jong, J., V. Chavarrías & W. Ottevanger (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Hydromorphological data and observations. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Huthoff, F., A. Paarlberg, H. Barneveld en M. van der Wal (2011) Rivierkundig onderzoek WaalSamen – pilotstudie langsdammen. HKV rapport PR2096.10.
- Omer, A., Ottevanger, W. & Yossef, M. (2019). Modelling the morphological effects of longitudinal dams in the Midden-Waal. Deltares report 11203681-002-ZWS-0001, december 2019.
- Paarlberg, A.J., A.Y.A. Omer & M.F.M. Yossef (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Delft3D simulations. Report HKV Lijn in Water & Deltares, PR4153.10 (HKV), 11204644 (Deltares), Delft, september 2021.
- Rijkswaterstaat projectbureau VNK (2014) De veiligheid van Nederland in kaart. Eindrapportage VNK.
- Slootjes, N. en H. van der Most (2016) Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland – Hoofdrapport. Uitgegeven door Ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Ruimte en Water, Directie Algemeen Waterbeleid en Veiligheid.
- Thijssen, A., A. Becker, D. Stuparu & M. Yossef (2014), Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper River Area. Report 1207807-02, Deltares, Delft, January 2014.
- Van der Meij, R., W. ter Horst, W., S. van Vuren, S., J. Pol, R. Koopmans, O. Levelt, N. Asselman, P. de Grave & A. de Kruif (2016). Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming. Kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming. Deltares, HKV lijn in water, Arcadis en Rijkswaterstaat WVL.
- Van der Wal, M. (2011) De invloed van langsdammen in de Waal op ijs hinder. Deltaresrapport 1204363-000-ZWS-0005-vj42
- Warmink, J.J. (2011), Unraveling uncertainties; The effect of hydraulic roughness on design water levels in river models. PhD thesis, University of Twente, ISBN 978-90-365-3227-3.
- Zagonjoli, M en E. Mosselman (2019) Invloed van de kribverlagingsmaatregel bij het Pannerdensch Kanaal op de ontwikkeling van de ijsdammen. Deltaresrapport 11202188-009-ZWS-00 14

Deltares is an independent institute for applied research in the field of water and subsurface. Throughout the world, we work on smart solutions for people, environment and society.

**Deltares**

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