

## Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Hoofdrapport



# Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

## Hoofdrapport

### **Auteur(s)**

Erik Mosselman  
Tom Buijse  
Eveline van der Deijl  
Jurjen de Jong  
Victor Chavarrias  
Willem Ottevanger  
Nathalie Asselman  
Peter de Grave  
Rolien van der Mark  
Remi van der Wijk  
Frank Collas  
Marnix van der Vat  
Kees Sloff  
Laura Verbrugge  
Riyan Van den Born

Voorkant: langsdam bij Dreumel (foto Frank Collas)

# Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

## Hoofdrapport

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer J. Sieben
<b>Referenties</b>	Eindevaluatie en analyse WaalSamen, pilot Langsdammen, zaaknummer 31154483
<b>Trefwoorden</b>	Langsdammen, Waal, rivieren, hydrodynamica, morfodynamica, waterbouwkunde, ecologie, scheepvaart

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.2
<b>Datum</b>	17-12-2021
<b>Projectnummer</b>	11204644-014
<b>Document ID</b>	11204644-014-ZWS-0010
<b>Pagina's</b>	69
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Erik Mosselman	Rolien van der Mark
	Tom Buijse	Remi van der Wijk
	Eveline van der Deijl	Frank Collas
	Jurjen de Jong	Marnix van der Vat
	Victor Chavarrias	Kees Sloff
	Willem Ottevanger	Laura Verbrugge
	Nathalie Asselman	Riyan Van den Born
	Peter de Grave	

<b>Doc. Versie</b>	<b>Auteur</b>	<b>Controle</b>	<b>Akkoord</b>	<b>Publicatie</b>
0.1	Erik Mosselman	Dirk-Jan Walstra	Bianca Peters	

# Samenvatting

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 het verkrijgen van meer zekerheid 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'. Deze partners zijn Rijkswaterstaat, Koninklijke BLN-Schuttevaer, Sportvisserij Nederland, Hengelsportfederatie Midden-Nederland, de universiteiten van Nijmegen, Wageningen, Delft en Twente, en Deltares. Aan het eind van de pilot rapporteert Rijkswaterstaat Oost-Nederland de opgedane ervaringen en inzichten in een integrale evaluatie voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Rijkswaterstaat DG heeft de in deze evaluatie te beantwoorden vragen gespecificeerd in een opdrachtbrief aan Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Voor een deel van deze vragen heeft Rijkswaterstaat aan Deltares opdracht verleend om een integrale eindevaluatie te verzorgen van de resultaten uit monitoring en onderzoek. Het doel van de eindevaluatie is het met kennis en feiten onderbouwen van een advies dat Rijkswaterstaat moet geven aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat. Hiertoe moeten de volgende hoofdvragen beantwoord worden:

- 1 Werkt het principe van de langsdammen voldoende om de beoogde nuttige toepassingen in de praktijk te realiseren?
- 2 In hoeverre zijn de langsdammen in potentie geschikt om elders te worden toegepast?

Voor het beantwoorden van deze hoofdvragen zijn de gegevens uit het monitoring-programma geanalyseerd en zijn de effecten geëvalueerd op hoogwaterveiligheid, zoetwatervoorziening, morfologie, vaarweg, natuur, beleving en onderhoud. Naast dit hoofdrapport bestaat de eindevaluatie uit deelrapporten en een synthesedocument. De deelrapporten vormen de ondergrond van het hoofdrapport, maar omdat inzichten en conclusies bij het opstellen van de rapportage verder zijn geëvolueerd en verduidelijkt zijn conclusies van het hoofdrapport leidend. Het synthesedocument vult de bevindingen van het hoofdrapport aan met kennisinzichten, lessen van Rijkswaterstaat uit de pilot en een interpretatie van de conclusies met het oog op beheer en toepassing elders.

De herinrichting onderzocht in de pilot biedt perspectief op een integrale oplossing voor meerdere rivierproblemen. Dankzij ruimtelijke diversificatie door scheiding van functies presteert het nieuwe systeem beter dan het oude systeem met kribben. De pilot bevestigt op hoofdlijnen de verwachtingen over de potentie van de systeemwijziging. Er zijn geen onvoorziene nadelen aan het licht getreden. De specifieke uitvoering van de pilot gaat echter niet ver genoeg om rivierproblemen volledig op te lossen. De specifieke uitvoering van de pilot biedt wel mogelijkheden om de inrichting in de toekomst verder te verbeteren. De in de pilot gerealiseerde geleidelijke verandering van het dwarsprofiel tussen de bandijken valt rivierkundig te verkiezen boven een drastische wijziging in één keer. Dankzij de gecreëerde mogelijkheden voor verdere verbetering is het systeem met langsdammen meer toekomstbestendig dan het oude systeem met kribben.

Het systeem met langsdammen biedt de mogelijkheid om de bevaarbaarheid bij lage afvoeren te vergroten indien dit wordt toegepast in de trajecten waar de minst gepeilde diepten optreden. Het houdt tevens de rivier beter duurzaam bevaarbaar door het tegengaan van de bodemerrosie. Na aanleg van de pilot blijft de vaarweg voldoen aan de internationale normen voor bevaarbaarheid. Een paradox is dat het systeem met langsdammen de vaarweg weliswaar verbetert tijdens extreme laagwaters en op lange termijn, maar in de dagelijkse ervaring van schippers toch gezien wordt als een aantasting van de vaarweg.

De pilot heeft de kwaliteit van de natuur in het riviertraject sterk verhoogd. Recent onderzoek over de waarde van nevengeulen voor stroomminnende vissen laat zien dat het behoud van natuurwaarden kan vragen om periodiek onderhoud volgens cycli van gemiddeld 15 jaar, afhankelijk van de beoogde natuurwaarden en de snelheid van erosie- en sedimentatieprocessen.

De langsdammen hebben de maatgevende hoogwaterstanden minstens net zo goed verlaagd als het project kribverlaging. Aan de dijkversterkingsopgave volgens de nieuwe normering leveren de langsdammen een bescheiden positieve bijdrage.

De langsdammen leveren een geringe directe positieve bijdrage aan de zoetwatervoorziening tijdens droogte. Indirect kan het positieve effect toenemen als langsdammen de bodemerrosie tot staan brengen.

Omwonenden en recreatievaarders waren van het begin af aan positief over de komst van de langsdammen. De beleving van de pilot door bewoners en sportvissers is in de loop van de tijd positiever geworden, maar de binnenvaart blijft nog sceptisch. Participatie in monitoring en onderzoek heeft het draagvlak en de waardering van de pilot vergroot.

De instellingen van de instroomopeningen doen er niet toe bij extreme hoogwaters, maar beïnvloeden de afvoerverdeling over hoofdgeul en oevergeul bij lagere afvoeren. Daarmee beïnvloeden ze ook de waterstanden en de door waterafleiding veroorzaakte erosie en sedimentatie. Bij gelijke afvoer naar de oevergeul is er tot nu toe geen afzonderlijke invloed van de instellingen gevonden op het sedimenttransport over de inlaatdempels.

Het principe van twee stroomgeulen met regelmogelijkheden voor de afvoerverdeling over die geulen biedt perspectief voor een integrale herinrichting van de Rijntakken. De specifieke uitvoering van de pilot is nog verder te optimaliseren. Als langsdammen over een grotere lengte worden aangelegd, is hun effect op hoog- en laagwaterstanden groter.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Achtergrond	11
1.2	Bedoeling van het plan WaalSamen	12
1.3	Bedoeling van de pilot Langsdammen	13
1.4	Monitoring, onderzoek en evaluatie	13
1.5	Doelstellingen van de eindevaluatie	14
1.6	Onzekerheden	14
1.7	Organisatie van de eindevaluatie	15
1.8	Colofon	16
1.9	Leeswijzer	16
<b>2</b>	<b>Projectomgeving</b>	<b>18</b>
2.1	De rivier	18
2.2	Organisatie van de pilot	19
2.3	Achterliggende studies	19
<b>3</b>	<b>Hydromorfologische meetgegevens</b>	<b>21</b>
3.1	Hypothese en onderzoeksvragen	21
3.2	Methodiek	21
3.3	Resultaten	23
3.3.1	Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten waterstanden bij verschillende rivierafvoeren?	23
3.3.2	Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten stroomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit bij verschillende rivierafvoeren?	23
3.3.3	Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten bodemligging?	25
3.3.4	Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de waterstanden bij verschillende afvoeren?	25
3.3.5	Wat zijn de boven- en benedenstroomse effecten van de langsdam bij een bepaalde instelling van de instroomopeningen?	27
3.4	Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat	27
<b>4</b>	<b>Hoogwaterveiligheid</b>	<b>28</b>
4.1	Hypothese en onderzoeksvragen	28
4.2	Methodiek	28
4.3	Resultaten	29
4.3.1	Treedt de verwachte verlaging van hoogwaterstanden daadwerkelijk op?	29
4.3.2	Wat is het huidige effect van de langsdam op de hoogwaterstanden?	29

4.3.3	In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?	29
4.3.4	Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context van de nieuwe normering?	30
4.3.5	Zijn langsdammen van invloed op de vorming van ijsdammen?	30
4.3.6	Veranderen de invloeden van langsdam en de instelling trendmatig in de komende 20 jaar? Zo ja, waardoor?	31
4.4	Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat	31
<b>5</b>	<b>Zoetwatervoorziening</b>	<b>32</b>
5.1	Hypothese en onderzoeksvragen	32
5.2	Methodiek	32
5.3	Resultaten	32
5.3.1	Hoe kunnen langsdammen bijdragen aan de nationale zoetwatervoorziening?	32
5.3.2	Welke instelling van de instroomopeningen verhoogt de rivierwaterstand bij het Amsterdam-Rijnkanaal?	34
5.3.3	Hoe beïnvloedt optimalisatie van de zoetwatervoorziening de andere functies en thema's?	34
5.3.4	Wat is met name de invloed van de afvoer over het Amsterdam-Rijnkanaal op de waterstanden in de Waal bij lage rivierafvoer? Wat is de consequentie voor de diepte in de vaarweg?	35
5.4	Conclusie	35
<b>6</b>	<b>Morfologie</b>	<b>36</b>
6.1	Hypothese en onderzoeksvragen	36
6.2	Methodiek	36
6.3	Resultaten	37
6.3.1	Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op trajectschaal?	37
6.3.2	Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op corridorbreedteschaal?	37
6.3.3	Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op dwarsprofielschaal?	38
6.3.4	Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op diepteschaal?	38
6.3.5	Wat zijn de profielveranderingen van de langsdam en het dragend grondmassief?	39
6.3.6	Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de ontwikkeling van de bodemligging?	39
6.4	Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat	39
<b>7</b>	<b>Vaarweg</b>	<b>40</b>
7.1	Hypothese en onderzoeksvragen	40
7.2	Methodiek	40
7.3	Resultaten	41
7.3.1	Wat is de diepte in de vaarweg en beschikbare vaarwegbreedte bij de langsdammen vergeleken met bovenstroomse en benedenstroomse trajecten, bij verschillende afvoeren?	41
7.3.2	Hoe beïnvloedt de instelling van instroomopeningen de waterstanden en dieptes in de vaarweg bij laagwater, en de bodemligging in hoofd- en oevergeul? Hoe ontwikkelt dit zich in de komende 20 jaar?	42
7.3.3	Wat is het vaargedrag ter hoogte van de langsdam? Welk deel van de beschikbare vaarwegbreedte wordt daadwerkelijk benut?	42



7.3.4	Verschilt de reistijd of de vaarsnelheid op het traject van de langsdam van bovenstroomse en benedenstroomse trajecten?	44
7.3.5	Is er sprake van hinderlijke dwarsstroming tussen hoofd- en oevergeul?	44
7.4	Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat	44
<b>8</b>	<b>Natuur</b>	<b>45</b>
8.1	Hypotheses en onderzoeksvragen	45
8.2	Methodiek	45
8.3	Resultaten	46
8.3.1	Wat is de invloed van scheepvaart op de habitatkwaliteit in een oevergeul?	46
8.3.2	Wat is de beschikbare habitat in een oevergeul en hoe ontwikkelt de habitat zich in de tijd?	47
8.3.3	Wat is het verschil in visstand tussen de oevergeul en kribvakken en nevengeulen?	47
8.3.4	Hoe ontwikkelt de macrofauna zich in de oevergeul?	47
8.3.5	Is er vestiging van waterplanten?	50
8.3.6	Bevordert de oevergeul exotische soorten?	50
8.3.7	Wat zijn de mogelijkheden om de oevergeulen ecologisch waardevoller te maken?	50
8.3.8	Wat is het effect van de langsdam op de morfologische en ecologische ontwikkeling van de droge oever?	50
8.4	Conclusie over hypothesen van Rijkswaterstaat	50
<b>9</b>	<b>Beleving en participatie</b>	<b>51</b>
9.1	Hypothese en onderzoeksvragen	51
9.2	Methodiek	51
9.3	Resultaten	51
9.3.1	Hoe beleven bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers de komst van de langsdammen?	51
9.3.2	Hoe beoordelen het Q-team van Ruimte voor de Rivier en het Wereld Natuurfonds de langsdammen?	52
9.3.3	Hoe ervaart de commerciële en recreatieve scheepvaart de versmalde hoofdgeul en de splitsing in hoofd- en oevergeul?	52
9.3.4	Hoe ervaren sportvissers de bevisbaarheid en vangsten in de oevergeul vergeleken met de oorspronkelijke situatie en met verlaagde kribben?	52
9.3.5	Wat waren de ervaringen met de participatieve monitoring waarin belanghebbenden bij de monitoring van de pilot werden betrokken?	52
9.4	Conclusie	54
<b>10</b>	<b>Onderhoud</b>	<b>55</b>
10.1	Hypothese en onderzoeksvragen	55
10.2	Methodiek	55
10.3	Resultaten	55
10.3.1	Wat is de invloed van langsdammen op het beheer en onderhoud van Rijkswaterstaat?	55
10.3.2	Welk baggeronderhoud wordt voorzien op basis van de gemodelleerde ontwikkeling van de bodemligging in hoofdgeul en oevergeul? Verschilt omvang en frequentie van het onderhoud met andere trajecten van de Waal? Kan de instelling van instroomopeningen dit onderhoud verminderen?	57

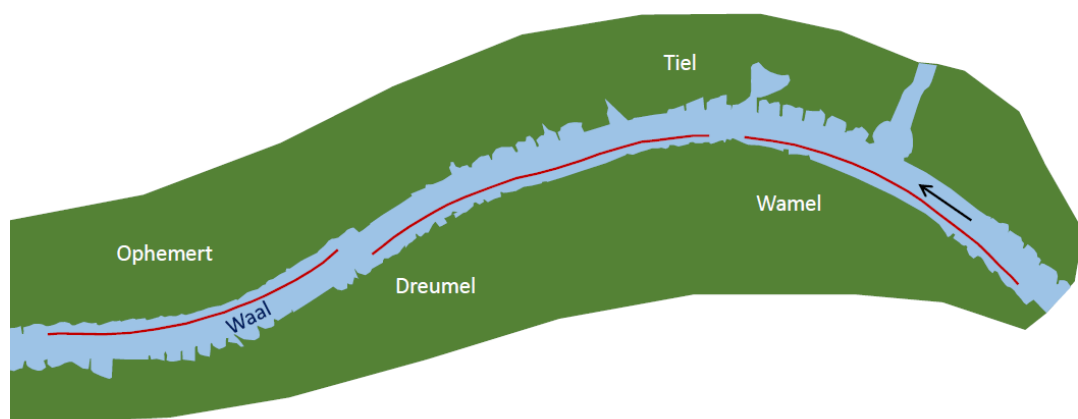
10.3.3	Wat is de vegetatieontwikkeling op de langsdam? Wat is het benodigde beheer en onderhoud wegens voornoemde profielveranderingen en vegetatieontwikkeling? Hoe verhoudt dit zich tot het beheer en onderhoud van kribben?	57
10.4	Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat	57
<b>11</b>	<b>Integrale beantwoording van de hoofdvragen</b>	<b>58</b>
11.1	Werkt het principe van de langsdammen voldoende om de beoogde nuttige toepassingen in de praktijk te realiseren?	58
11.2	In hoeverre zijn de langsdammen in potentie geschikt om elders te worden toegepast?	59
<b>12</b>	<b>Literatuurverwijzingen</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Begrippenlijst</b>	<b>67</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Het riviersysteem van de Rijn, met daarin alle Nederlandse Rijntakken, kent uiteenlopende problemen en onvolkomenheden die de functies van dit systeem belemmeren. Natuurlijke rivierfuncties werken suboptimaal en gebruiksfuncties ondervinden hinder. Sectoraal ontwikkelde maatregelen uit het verleden werken alleen goed voor één of meerdere specifieke functies maar kunnen conflicteren met andere functies. Op termijn worden de hieruit voortvloeiende problemen waarschijnlijk steeds groter. Er zijn daardoor veel inspanningen nodig om het riviersysteem naar behoren te laten functioneren. Problemen doen zich onder meer voor met 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 het verkrijgen van meer zekerheid over de integrale werking en de potenties van een dergelijke systeemwijziging.



Figuur 1-1. Drie langsdammen in de Waal bij Wamel, Dreumel en Ophemert.



Figuur 1-2. Langsdam bij Wamel, met vaarweg, oevergeul, inlaatdempel en tussenopening.

Voor de pilot werd het Waaltraject Wamel-Ophemert (km 911.5-921.5) bij Tiel gekozen (figuren 1-1 en 1-2). 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.

## 1.2 Bedoeling van het plan WaalSamen

De bedoeling van het plan WaalSamen is om rivierproblemen integraal aan te pakken in plaats van sectoraal voor slechts een beperkt aantal functies. Een belangrijk kernpunt is dat conflicterende gebruiksfuncties worden gescheiden. De langsdammen verdelen het zomerbed in twee parallelle stroomgeulen, waarbij de hoofdgeul de functie van vaarweg vervult en de oevergeul optimale omstandigheden biedt voor de natuur. De hoofdgeul ligt in de diepere buitenbochten en de oevergeul in de ondiepe binnenbochten. Daarnaast is het de bedoeling om het systeem beter beheersbaar te maken door het inbouwen van regelopties. Daartoe worden de langsdammen voorzien van eenvoudig aan te passen openingen om de verdeling van water, ijs, sediment en biota over beide geulen te kunnen beïnvloeden.

Rijkswaterstaat formuleerde hierbij de volgende verwachtingen:

- Door een slimme verdeling is de natuurlijke stroomsnelheid van water te beïnvloeden;
- De sedimentverdeling kan worden beïnvloed, met een mogelijk gunstige beïnvloeding van de bodemligging en het waterstandsverschil in de hoofdgeul;
- Door scheiding van beroepsscheepvaart in de hoofdgeul en hoge ecologische waarden in de oevergeul kunnen naar verwachting beide naast elkaar bestaan en in het zelfde gebied samen een hoger niveau bereiken;
- Met de herinrichting en de systeemwijziging van het zomerbed van de Waal kan de som van alle problemen gereduceerd worden;
- Dankzij de flexibele instelmogelijkheden van openingen in de langsdammen kan de rivierbeheerder adaptief reageren op toekomstige klimaatwijzigingen en wijzigingen van het rivierregime.

## 1.3 Bedoeling van de pilot Langsdammen

De bedoeling van de pilot Langsdammen binnen het plan WaalSamen is om met een eenvoudig prototype op beperkte schaal de eigenschappen van de systeemwijziging in de praktijk te laten zien en te onderzoeken. De aldus opgedane praktijkervaring geeft meer inzicht en zekerheid ten aanzien van de volgende verwachte effecten:

- Hoogwaterveiligheid:
  - verlaging van hoogwaterstanden;
  - handhaving van goede ijsgeleiding;
- Natuur:
  - verbetering van habitat voor aquatische flora en fauna in het zomerbed;
  - toename van abundantie en diversiteit in het zomerbed van de doelsoorten voor de Kaderrichtlijn Water;
- Waterhuishouding:
  - verhoging van laagwaterstanden door het stoppen van bodemerosie en het in stand houden van een duurzame bodemhoogte van het zomerbed;
- Scheepvaart:
  - duurzame instandhouding van de diepte in de vaarweg;
  - stoppen van de daling van de vaarweg door bodemerosie;
  - handhaving van verkeersveiligheid en vlotheid;
- Duurzaam beheer:
  - stoppen van bodemerosie tot een gewenste ligging van de rivierbodem;
  - bevordering van minder inspanning voor het vaargeulonderhoud;
- Omgeving:
  - ontwikkeling van een duurzaam bij het rivierbeheer betrokken omgeving met een verbeterde samenwerking;
  - aanbod van leerruimte voor het ontwikkelen van nieuwe vormen van duurzame samenwerking tussen burgers, organisaties, overheden, onderwijsinstellingen en Rijkswaterstaat.

De pilot is bedoeld voor een *proof of concept*. Niet alles is uitgetest. De maximale waterstandsverhoging door afsluiting van alle oevergeulen is bijvoorbeeld niet onderzocht om in de monitoringperiode recreatievaart door deze oevergeulen mogelijk te houden.

## 1.4 Monitoring, onderzoek en evaluatie

Voor, tijdens en na de aanleg van de langsdammen is een uitgebreid monitorings- en onderzoeksprogramma uitgevoerd door de partners van de samenwerkingsovereenkomst 'WaalSamen'. Deze partners zijn Rijkswaterstaat, Koninklijke BLN-Schuttevaer, Sportvisserij Nederland, Hengelsportfederatie Midden-Nederland, de universiteiten van Nijmegen, Wageningen, Delft en Twente, en Deltares. Voor het inwinnen van velddata werden drie fasen onderscheiden:

- Nulfase, voorafgaand aan de aanleg, van 2012 tot eind augustus 2014;
- Bouwfase, van eind augustus 2014 tot eind maart 2016;
- Fase na oplevering van het aangelegde prototype, van eind maart 2016 tot in 2020. In april 2018 werd de instroomopening bij Wamel afgesloten en de inlaatdrempel bij Dreumel verhoogd. In april 2019 werd de inlaatopening bij Dreumel verruimd en bij Ophemert versmald.

Deltares leidde in 2013 het opzetten van het monitoringprogramma tijdens de zogenaamde “Sproksessies”, genoemd naar een uitspanning met vergaderruimtes aan de Waal in Lent. Rijkswaterstaat introduceerde het innovatieve concept van participatieve monitoring waarbij ook belanghebbende partners binnen WaalSamen een deel van het onderzoek voor hun rekening namen. Koninklijke BLN-Schuttevaer inventariseerde de ervaringen van schippers. Sportvisserij Nederland en Hengelsportfederatie Midden-Nederland onderzochten de visstand via het organiseren van viswedstrijden.

Het universitaire onderzoek werd deels geïntegreerd in het programma RiverCare binnen het domein Toegepaste en Technische Wetenschappen van NWO (Collas, 2019; De Ruijscher, 2020; Verbrugge et al., 2019).

Aan het eind van de pilot rapporteert Rijkswaterstaat Oost-Nederland de opgedane ervaringen en inzichten in een integrale evaluatie voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Rijkswaterstaat DG heeft de in deze evaluatie te beantwoorden vragen gespecificeerd in een opdrachtbrief aan Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Voor een deel van deze vragen heeft Rijkswaterstaat aan Deltares gevraagd om een integrale eindevaluatie te verzorgen van de resultaten uit monitoring en onderzoek. Deltares had in 2019 al een plan van aanpak opgesteld en eerste deelanalyses uitgevoerd (Buijse et al., 2019a,b), maar diverse deelanalyses wachtten toen nog op uitvoering. Op 17 januari 2020 verleende Rijkswaterstaat de opdracht tot uitvoering van het project “Eindevaluatie en analyse WaalSamen, pilot Langsdammen”, zaaknummer 31154483.

## 1.5 Doelstellingen van de eindevaluatie

Het doel van de eindevaluatie is het met kennis en feiten onderbouwen van een advies dat Rijkswaterstaat moet geven aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat. Hiertoe moeten de volgende hoofdvragen beantwoord worden:

- 1 Werkt het principe van de langsdammen voldoende om de beoogde nuttige toepassingen in de praktijk te realiseren?
- 2 In hoeverre zijn de langsdammen in potentie geschikt om elders te worden toegepast?

## 1.6 Onzekerheden

De gegevens voor de eindevaluatie zijn met de grootst mogelijke zorgvuldigheid ingewonnen en geanalyseerd. Onzekerheden zijn echter onvermijdelijk. Voor waterbeweging en morfologie worden ze geminimaliseerd door metingen te combineren met modelberekeningen. Afgezien van de inherente onnauwkeurigheden van meetinstrumenten en computermodellen, laten de tekortkomingen van beide hulpmiddelen zich deels opheffen door metingen en berekeningen complementair toe te passen. Globaal geldt daarbij dat metingen beter inzicht geven in processen op kleine schaal, terwijl modellen doorgaans beter inzicht geven in processen op grote schaal die door verschillende factoren beïnvloed worden.

Het meetprogramma is systematisch opgezet volgens het principe van BACI: Before-After-Control-Impact (Buijse et al, 2019b). In het control-impact-deel worden effecten in het traject van de langsdammen (impact) vergeleken met de gelijktijdige situatie in een gebied zonder ingrepen (control). In het before-after-deel worden effecten van de langsdammen vergeleken met de situatie voorafgaand aan de aanleg. Een probleem bij de control-impact-vergelijking is dat het traject met langsdammen ook om andere redenen kan verschillen van het gebied zonder ingrepen. De before-after-vergelijking heeft het probleem dat in dezelfde tijd ook andere veranderingen in de omgeving hebben plaatsgevonden die de resultaten beïnvloeden. In de pilot zijn dat vooral de kribverlaging boven- en benedenstreams van de langsdammen en de aanleg van de meestromende nevengeul Passewaaij.

In situaties met meerdere tegelijkertijd optredende oorzaken van veranderingen maken berekeningen met een computermodel het mogelijk om daarbinnen de effecten van de langsdammen te isoleren.

Voor metingen geldt verder dat niet alle relevante omstandigheden optreden binnen de periode van het monitoringprogramma. Tijdens de monitoring van de pilot zijn bijvoorbeeld wel zeer lage afvoeren opgetreden, tijdens de droogte van 2018, maar geen uitgesproken hoge afvoeren. De extreme afvoeren van maatgevende hoogwaters zijn zelfs zo zeldzaam dat ze nog nooit gemeten zijn. De gangbare praktijk is daarom om effecten op extreme hoogwaterstanden volledig te baseren op berekeningen met computermodellen die zijn gekalibreerd op metingen tijdens minder extreme hoogwaters. Deze extrapolatie is in principe gebaseerd op natuurwetten, maar ontkomt niet aan het doen van aannames over empirische submodellen en de waarden van coëfficiënten daarin.

De gebruikte computermodellen bevinden zich internationaal in de voorhoede en worden algemeen gebruikt bij het bepalen van effecten van ingrepen in de Nederlandse rivieren. Toch ontbreken belangrijke processen, zoals bijvoorbeeld de invloed van varende schepen op sedimenttransport (Eerden & Mosselman, 2020). Daarom vergen rekenresultaten zorgvuldige interpretatie voordat er conclusies aan verbonden kunnen worden. Vaak betekent dit dat absolute getallen geen voorspellende waarde hebben, maar wel de getallen van verschillen tussen de situatie met en zonder ingreep. Voor de voornaamste tekortkoming van het modelinstrumentarium, namelijk het gebrek aan een goede beschrijving van sedimenttransport over inlaatdrempels, is binnen deze eindevaluatie leerruimte gecreëerd om te zijner tijd deze tekortkoming op te heffen (promotieonderzoek Ana Luisa Osorio aan TU Delft).

## 1.7 Organisatie van de eindevaluatie

Het project is onderverdeeld in 15 deelprojecten of werkpakketten, aangeduid met "WP". Tabel 1-1 geeft hiervan een overzicht. Het project werd geleid door een managementteam bestaande uit projectleider Erik Mosselman, plaatsvervangend projectleider Tom Buijse en management-ondersteuner Eveline van der Deijl. Een deel van de werkzaamheden is uitbesteed aan HKV Lijn in Water, Witteveen+Bos, Marin, Bureau Waardenburg en de universiteiten van Nijmegen en Twente. Tevens waren de overige partners binnen WaalSamen betrokken bij de uitvoering. Vanuit Rijkswaterstaat werd het project begeleid door Arjan Sieben, Henk Eerden, Bert van Harmelen, Eric ten Cate, Koen van Korlaar en Hamid Bagher Nezhad Tabassi.

Tabel 1-1. Overzicht van deelprojecten.

WP	Titel	Deelprojectleider	Voornaamste partners	Deelrapport
WP0	Hydromorfologische data	Jurjen de Jong		De Jong et al. (2021)
WP1	Delft3D-berekeningen	Amgad Omer	HKV Lijn in Water (Andries Paarlberg)	Paarlberg et al. (2021)
WP2	Optimalisatie	Jurjen de Jong	Witteveen+Bos (Michel Zuiderwijk)	Zuiderwijk & De Jong (2021)
WP3	Toepasbaarheid elders	Jurjen de Jong	Witteveen+Bos (Bert van den Berg)	Huppes (2021)
WP4	AIS-data	Rolien van der Mark	Marin	Indah-Everts & Hermans (2021)

WP	Titel	Deelprojectleider	Voornaamste partners	Deelrapport
WP5	Webinar-films	Rolien van der Mark		-
WP6	Functie Hoogwaterveiligheid	Nathalie Asselman		Asselman & de Grave (2021)
WP7	Functie Vaarweg	Rolien van der Mark		Van der Mark & Van der Wijk (2021)
WP8	Functie Natuur	Marc Weeber	Radboud Universiteit (Frank Collas)	Collas et al. (2020b)
WP9	Functie Zoetwatervoorziening	Marnix van der Vat		Van der Vat (2021)
WP10	Morfologie en onderhoud	Victor Chavarrías		Chavarrías et al. (2021)
WP11	Beleving	Rolien van der Mark	Universiteit Twente (Laura Verbrugge)	Verbrugge & van den Born (2021)
WP12	Integratie en rapportage	Erik Mosselman		Voorliggend rapport
WP13	Overleg en workshops	Eveline van der Deijl		-
WP14	Management	Erik Mosselman		-
WP15	Leerruimte	Erik Mosselman	TU Delft (Erik Mosselman)	-

Rijkswaterstaat heeft de kosten van aanleg en onderhoud afzonderlijk geëvalueerd en gerapporteerd (Van Hoogenhuizen, 2021).

De deelrapporten vormen de ondergrond van dit hoofdrapport, maar de inzichten en conclusies zijn bij het opstellen van de rapportage nog verder geëvolueerd en verduidelijkt. Waar dat mogelijk tot verschillen heeft geleid, zijn de conclusies van het hoofdrapport leidend.

## 1.8 Colofon

De literatuurverwijzing naar dit rapport luidt:

Mosselman, E., T. Buijse, E. van der Deijl, J. de Jong, V. Chavarrías, W. Ottevanger, N. Asselman, P. de Grave, R. van der Mark, R. van der Wijk, F. Collas, M. van der Vat, K. Sloff, L. Verbrugge & R. van den Born (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Hoofdrapport. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.

## 1.9 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de Waal, de organisatie van de pilot en de achterliggende studies waarvan voor de eindevaluatie gebruik is gemaakt. De daaropvolgende hoofdstukken vatten de resultaten van deelprojecten samen: de analyse van hydromorfologische meetgegevens (WP0) in hoofdstuk 3, hoogwaterveiligheid (WP6) in hoofdstuk 4, zoetwatervoorziening (WP9) in hoofdstuk 5, morfologie (WP10) in hoofdstuk 6, vaarweg (WP7) in hoofdstuk 7, natuur (WP8) in hoofdstuk 8, beleving en participatie (WP11) in hoofdstuk 9, en onderhoud (WP10) in hoofdstuk 10. De Delft3D-berekeningen (WP1) en de analyse van AIS-data (WP4) worden niet afzonderlijk in het hoofdrapport gepresenteerd maar leveren informatie toe aan de wel gepresenteerde deelprojecten.



Op verzoek van Rijkswaterstaat worden de mogelijkheden voor optimalisatie (WP2) en de toepasbaarheid elders (WP3) behandeld als achtergronddocumenten zonder samenvatting in het hoofdrapport. Hoofdstuk 11 sluit het rapport af met een integrale beantwoording van de hoofdvragen. Op basis van dit rapport formuleren Rijkswaterstaat en Deltares gezamenlijk aanbevelingen in een afzonderlijk synthesesedocument.

## 2 Projectomgeving

### 2.1 De rivier

De Waal is de voornaamste tak van de Rijn in de delta (figuur 2-1). De afvoeren door de Waal bedragen circa twee derde van de afvoeren die bij meetstation Lobith Nederland binnenkomen, als overeengekomen in 1745. Gemiddeld is de afvoer bij Lobith circa 2 200 m<sup>3</sup>/s. De hoogste daggemiddelde afvoer ooit bij Lobith gemeten bedraagt 12 280 m<sup>3</sup>/s op 4 januari 1926; de laagste afvoer 575 m<sup>3</sup>/s op 18 februari 1929. Binnen de monitoringperiode van de pilot waren de hoogste en laagste daggemiddelde afvoer respectievelijk 7 553 m<sup>3</sup>/s op 10 januari 2018 en 709 m<sup>3</sup>/s op 24 oktober 2018. De Waal vormt de hoofdscheepvaartverbinding tussen de zeehavens van Rotterdam, Amsterdam en Antwerpen en het Europese achterland. Gemiddeld passeert elke drie minuten een schip de grens bij Lobith, 24 uur per dag en 7 dagen per week. De uiterwaarden van de Waal vormen een Natura 2000-gebied. Dankzij projecten binnen het programma NURG (nadere uitwerking rivierengebied) is de biodiversiteit langs de Waal in de afgelopen 25 jaar aanzienlijk toegenomen.



Figuur 2-1. Ligging van de pilot Langsdammen binnen de Nederlandse Rijntakken.

Na overstromingsrampen door de vorming van ijssdammen in 1784, 1799, 1809 en 1820 werd besloten om de ijsafvoer van de Rijntakken te verbeteren via de aanleg van kribben. De kribben zouden het zomerbed versmallen met als gevolg hogere stroomsnelheden en grotere waterdieptes. Om lokale stroomvertragingen te voorkomen, moest het smallere zomerbed overal dezelfde breedte krijgen, aangeduid als de “normaalbreedte”. De eerste normalisatie om aan deze standaard te voldoen werd tussen 1850 en 1880 uitgevoerd. Om de diepte in de vaarweg bij lage afvoeren nog meer te vergroten, werd de Waal verder versmald in een tweede normalisatie van 1880 tot 1893 en een derde normalisatie van 1910 tot 1916. Sindsdien bezit de Waal haar karakteristieke aanblik van een rivier met kribben en één permanent natte hoofdgeul met een gereguleerde normaalbreedte van ten minste 260 m. De bijbehorende sterkere stroming schuurt echter de rivierbodem uit waardoor deze steeds dieper komt te liggen. Die verdieping kent tegelijkertijd ook andere oorzaken zoals bochtafsnijdingen, grootschalige zand- en grindwinning, en verminderde sedimentaanvoer uit Duitsland.

Ze bedraagt plaatselijk 2 m per eeuw en verlaagt waterstanden, tast natte infrastructuur aan, creëert obstakels voor de scheepvaart en leidt tot verdroging van uiterwaarden (Visser, 2000; Berkhof et al., 2018). De lagere waterstanden maakten bovendien de kribben hoger ten opzichte van de rivier dan in hun oorspronkelijke ontwerp de bedoeling was. Tijdens hoogwaters stuwde dit de waterstanden onnodig omhoog.

Andere grote ingrepen in de Rijntakken vinden hun wortels in de overstromingsramp van 1953. De Minister van Verkeer en Waterstaat stelde na die ramp een Deltacommissie in die voor het eerst een wetenschappelijke methode toepaste om de vereiste veiligheid tegen overstromingen te bepalen. De uitkomsten van deze methode vormden het startsein voor het versterken van honderden kilometers aan rivierdijken. Met de ramp nog vers in het geheugen kenden de dijkversterkingen aanvankelijk een groot draagvlak, maar gaandeweg veroorzaakten de sloop van huizen en de aantasting van het landschap steeds meer weerstand en protesten, vooral iedere keer als nieuwe wetenschappelijke inzichten aangaven dat reeds versterkte dijkvakken nog verder verzaamd moesten worden. Intussen opende een prijswinnend plan voor herstel van natuur en landschap rond de Rijnsplittingsen, het Plan Ooievaar, de ogen voor de alternatieve mogelijkheid om hoogwaterstanden te verlagen door rivieren meer ruimte te geven (De Bruin et al., 1987). Een toetsing van de uitgangspunten van de rivierdijkversterkingen leidde in 1993 tot de conclusie dat rivierverruiming als in het Plan Ooievaar technisch inderdaad een alternatief kan zijn voor rivierdijkversterkingen, maar politiek en bestuurlijk werd dit niet haalbaar geacht. Dat veranderde echter na het hoogwater van 1995 toen 250 000 mensen uit voorzorg geëvacueerd werden uit een gebied achter dijken die nog niet versterkt waren. Het was de impact van deze gebeurtenis die het politieke en publieke draagvlak leverde voor rivierverruiming als nieuwe aanpak voor het vergroten van de veiligheid tegen overstromingen. Na een aantal jaren studie startte zo in 2006 de uitvoering van het programma Ruimte voor de Rivier.

De rivierbodemerose en het programma Ruimte voor de Rivier vormen de context waarbinnen Rijkswaterstaat Oost-Nederland het idee ontwikkelde voor een herinrichting van het zomerbed onder de werknaam WaalSamen. Deze herinrichting verdeelt het zomerbed in twee parallelle stroomgeulen, gescheiden door een langsdam. Het voorliggende rapport evalueert de pilot die volgens dit principe gerealiseerd is in het Waaltraject Wamel-Ophemert (km 911.5-921.5) bij Tiel.

## 2.2 Organisatie van de pilot

De monitoring en het onderzoek zijn uitgevoerd door de partners van de samenwerkingsovereenkomst 'WaalSamen': Rijkswaterstaat, Koninklijke BLN-Schuttevaer, Sportvisserij Nederland, Hengelsportfederatie Midden-Nederland, de universiteiten van Nijmegen, Wageningen, Delft en Twente, en Deltares. Het budget voor de monitoring fungeerde als cofinanciering voor het universitaire onderzoeksprogramma RiverCare met 20 onderzoeksprojecten. Daarbinnen richtten de promotieonderzoeken van Frank Collas en Timo de Ruijscher en het postdoctoraal onderzoek van Laura Verbrugge zich specifiek op de pilot Langsdammen in de Waal.

## 2.3 Achterliggende studies

Voor de eindevaluatie is gebruik gemaakt van:

- Promotieonderzoek van Frank Collas aan de Radboud Universiteit in Nijmegen, binnen het RiverCare-programma (Collas, 2019; Collas et al., 2015, 2016, 2018a,b,c, 2019a,b, 2020a);

- Promotieonderzoek van Timo de Ruijsscher aan de Universiteit van Wageningen, binnen het RiverCare-programma (De Ruijsscher, 2020; De Ruijsscher et al., 2018a,b, 2019, 2020a,b,c,d,e);
- Promotieonderzoek van Le Thai Binh aan de Technische Universiteit Delft (Le, 2018; Le et al., 2018a,b, 2020);
- Postdoconderzoek van Laura Verbrugge aan de Radboud Universiteit in Nijmegen, binnen het RiverCare-programma (Verbrugge, 2018a,b, 2019a,b; Verbrugge & Van den Born, 2015a,b, 2017, 2018a,b; Verbrugge et al., 2016, 2017a,b, 2018, 2019);
- Postdoconderzoek van Matt Czapiga aan de Technische Universiteit Delft (Czapiga et al., 2021);
- Overige onderzoeken aan universiteiten en hogescholen (Lauchlan, 2004; Spies, 2009; Vuijk, 2010; Jammers, 2017; Van Linge, 2017; Van den Heuvel, 2017; Van den Heuvel et al., 2018; Koopman et al., 2018; Marchesin, 2018; Rudolph, 2018; Schlieff, 2018; Van Weerdenburg, 2018; Ganzevoort & Van den Born, 2019; Flores et al., 2020, 2021; Van den Born et al., 2020; Van Os, 2020; Van Os et al., 2020a,b; Osorio et al., 2020; Snoeij, 2021);
- Onderzoeken door ingenieurs- en adviesbureaus (Huthoff et al., 2011; Bergsma et al., 2012; Reeze et al., 2016; Kurstjens, 2016, 2019; Berkhof et al., 2018; Heirbaut & van Noort, 2018; Van Winden, 2020; Van Winden et al., 2018);
- Ontwerp en onderzoeken door Rijkswaterstaat (Eerden et al., 2011; Sieben, 2020; Van Denderen et al., 2020; Havinga, 2020);
- Onderzoeken door Deltares (Buijse et al., 2019a; Omer et al., 2019a,b, 2020; Zagonjoli, 2017);
- Verslagen van de werkgroep Natuur en de werkgroep Techniek van WaalSamen.

## 3 Hydromorfologische meetgegevens

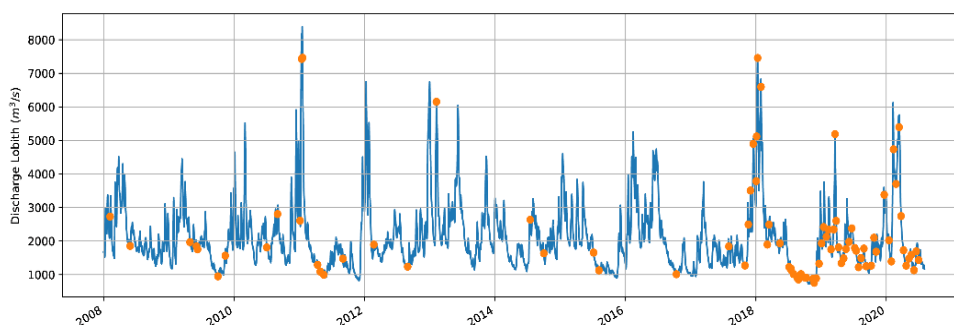
### 3.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat formuleerde de hypothese dat de natuurlijke stroomsnelheid van water te beïnvloeden is door een slimme verdeling bij de regelbare openingen. Binnen de pilot is een meerjarige hydromorfologische meetcampagne uitgevoerd. Deltares heeft deze metingen verder verwerkt en geanalyseerd voor het beantwoorden van de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten waterstanden bij verschillende rivierafvoeren?
- 2 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten stroomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit bij verschillende rivierafvoeren?
- 3 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten bodemligging?
- 4 Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de waterstanden bij verschillende afvoeren?
- 5 Wat zijn de boven- en benedenstroomse effecten van de langsdam bij een bepaalde instelling van de instroomopeningen?

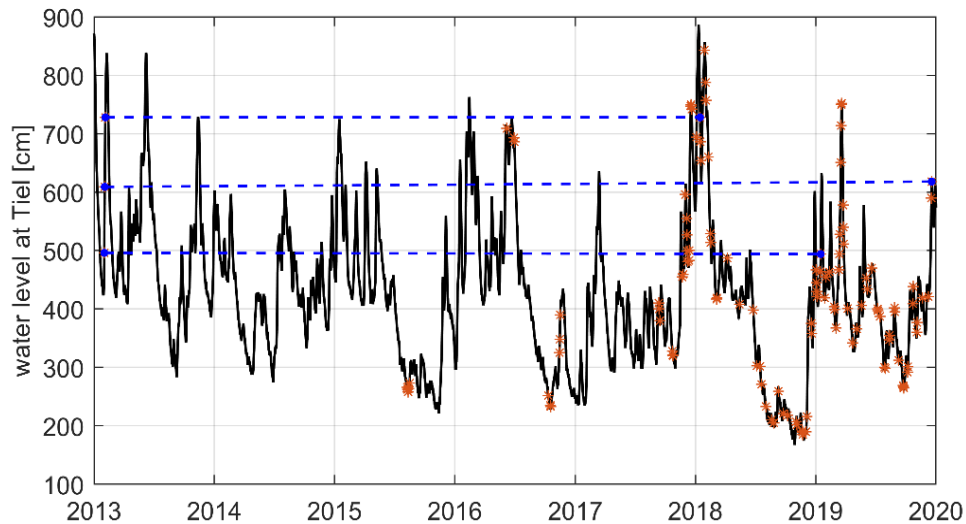
### 3.2 Methodiek

Waterstanden zijn verkregen uit verhanglijnmetingen, reguliere metingen van het LMW-meetnet, waarvan het meetstation bij Tiel deel uitmaakt, en metingen met *divers*. Voor de verhanglijnen zijn vanaf 2018 elke twee weken langsverhangen gemeten. Voorafgaand daaraan gebeurde dat enkele keren per jaar (figuur 3-1). Kleinschalige waterstandseffecten zijn hieruit lastig te analyseren doordat scheepsgolven de verhanglijnmetingen beïnvloeden. Met *divers* zijn waterstanden gemeten bij rkm 911.5 en 922 en op de koppen van de langsdammen. De data van de *divers* bij rkm 911.5 en 922 beslaan de periode van augustus 2013 tot december 2016. Ze bevatten echter geen meetwaarden bij lage waterstanden. Van de *divers* op de koppen van de langsdammen zijn alleen data beschikbaar tussen oktober 2020 en december 2020. De data uit de *divers* zijn onvoldoende gebleken voor de gewenste analyses. Data van het LMW-meetnet zijn geanalyseerd over de periode 2008-2019 om een mogelijke trendbreuk door aanleg van de langsdammen te identificeren.



Figuur 3-1. Verloop van afvoer bij Lobith (blauw) met tijdstippen waarop de verhanglijnmetingen zijn uitgevoerd (oranje). Tot augustus 2017 zijn verhanglijnen alleen in de rivieras gemeten. Vanaf augustus 2017 zijn de metingen ook langs de linkeroever, langs de rechteroever en in de drie oevergeulen uitgevoerd.

Voor stroomsnelheden zijn in vele raaien bij de langsdammen ADCP-metingen uitgevoerd. Vanaf 2018 is de frequentie verhoogd naar tweewekelijkse metingen die samenvallen met de verhanglijnmetingen (figuur 3-2). Bij iedere campagne voer de meetboot langs verschillende raaien in zowel de hoofdgeul als de oevertgeulen, waarbij iedere raai meerdere malen werd ingemeten. Deltares heeft de metingen verwerkt en vergeleken met drie referentiemetingen voorafgaand aan de aanleg van de langsdammen. Daarnaast is het stroombeeld bij de inlaatopeningen beschouwd.

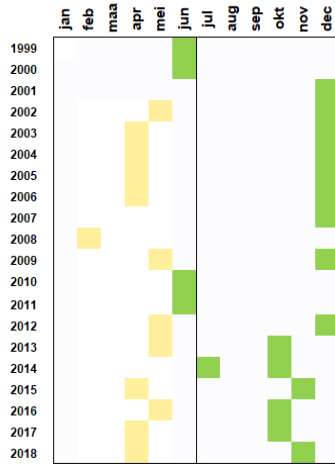


*Figuur 3-2. Verloop van waterstanden bij Tiel (zwarte lijn) met tijdstippen van ADCP-meetcampagnes (rode markeringen). De gestreepte blauwe lijnen verbinden drie referentiemetingen in 2013 met recente metingen bij waterstanden die het beste met de waterstanden van die referentiemetingen overeenstemmen.*

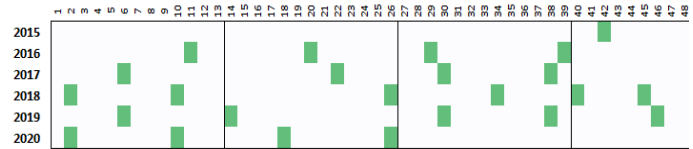
Bodemliggingen zijn beschikbaar uit lodingen van zowel de jaarlijkse bodempeilingen (JMP) als de acht-wekelijkse meetcampagnes van de pilot (figuur 3-3). Iedere meting beslaat zowel de hoofdgeul als de oevertgeulen. De jaarlijkse bodempeilingen maken vergelijking mogelijk met de situatie voorafgaand aan de aanleg. De bodemliggingen zijn geanalyseerd met de P-map-methodiek van Rijkswaterstaat voor zowel vakken van 100 m lengte als lange vakken per langsdam. Vakken van 100 m geven meer inzicht in de dynamiek van de bodem op de ruimteschaal van het dwarsprofiel. De lange vakken geven meer inzicht in de ontwikkeling van het bodemlengteprofiel op de schaal van het riviertraject.

Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door De Jong et al. (2021).

#### Overview of yearly multibeam measurements



#### Overview of eight weekly measurements



Figuur 3-3. Overzicht van bodempeilingen. Links: jaarlijkse bodempeilingen (JMP), vaak twee keer per jaar uitgevoerd. Rechts: acht-wekelijkse meetcampagnes van de pilot.

## 3.3 Resultaten

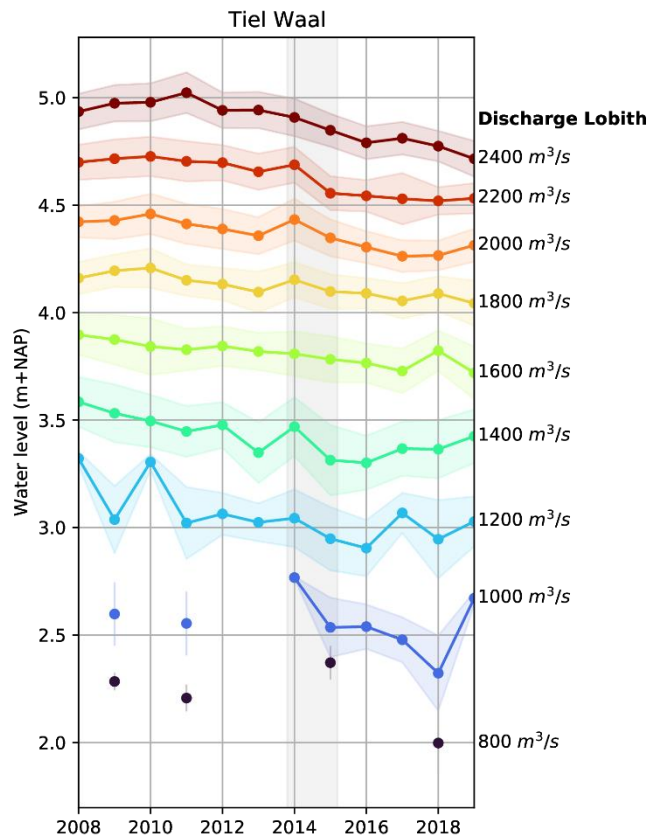
### 3.3.1 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten waterstanden bij verschillende rivierafvoeren?

Metingen bij Tiel laten zien dat de waterstand bij gelijke afvoer ieder jaar enkele centimeters daalde als gevolg van bodemerosie (figuur 3-4). Sinds de aanleg van de langsdammen zijn de waterstanden bij Lobith-afvoeren lager dan 2000 m<sup>3</sup>/s stabiel en nemen ze bij de laagste afvoeren zelfs enkele centimeters per jaar toe. Bij gemiddelde en hoge afvoeren zijn waterstanden sinds de aanleg ongeveer 20 cm lager dankzij het verwijderen van de kribben (figuur 3-5). Bij hoge afvoeren zijn deze lagere waterstanden ook toe te schrijven aan de realisatie van de nevengeul en uiterwaardverlaging Passewaaij aan de rechteroever bij Dreumel en de kribverlaging benedenstreams van de langsdammen.

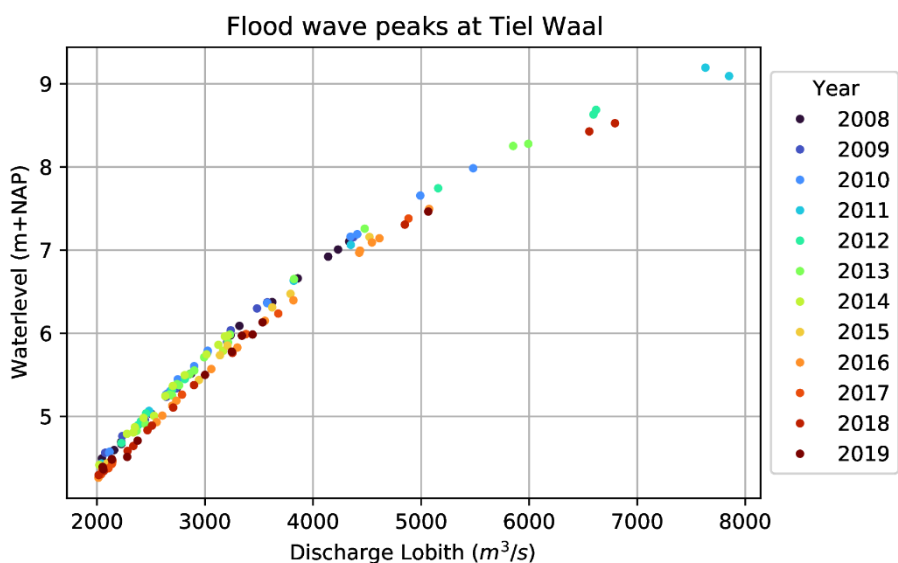
Onttrekkingen uit de Waal bij de Prins Bernhardsluizen vinden plaats bij lagere rivierwaterstanden en hebben een duidelijk waarneembaar effect op de waterstand bij Tiel. De gemeten onttrekkingen bedragen 5 tot 68 m<sup>3</sup>/s, elk bepaald uit meerdere metingen met een standaardafwijking van 11 à 38 m<sup>3</sup>/s. De waterstand daalt daardoor tot maximaal 15 cm.

### 3.3.2 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten stroomsnelheden en sedimenttransportcapaciteit bij verschillende rivierafvoeren?

De ADCP-metingen laten zien dat stroomsnelheden met 2% tot 20% zijn afgenomen (zie bijvoorbeeld figuur 3-6). Te verwachten is dat daarmee de sedimenttransportcapaciteit met circa 40% afneemt. Dit wijst op sedimentatie.

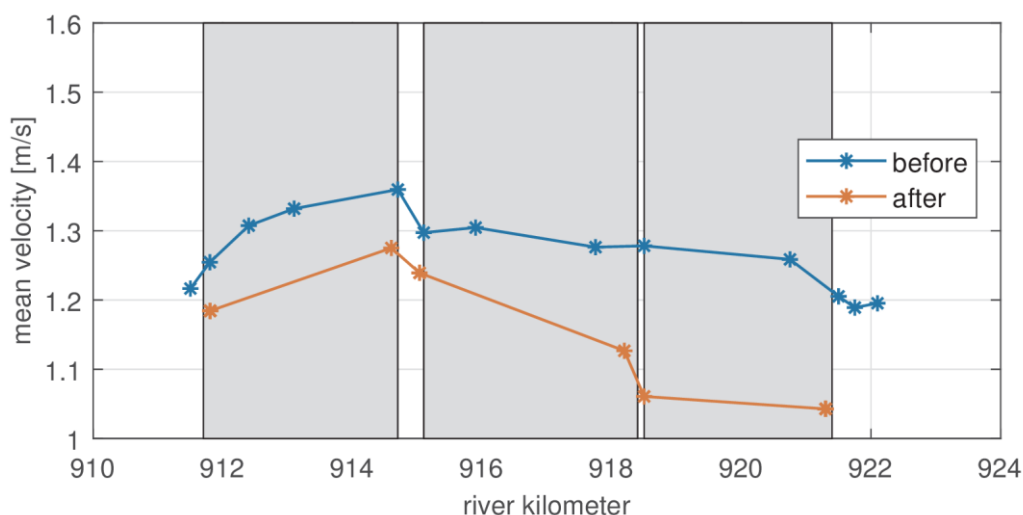


Figuur 3-4. Trends in de waterstand bij Tiel. Weergegeven zijn het gemiddelde (lijnen) en de standaardafwijking (kleurvlakken) per afvoerklasse (+/- 100 m<sup>3</sup>/s). De grijze arcering markeert de periode van de aanleg van de langsdammen.



Figuur 3-5. Verband tussen maximale waterstand bij Tiel en maximale afvoer bij Lobith voor hoogwatergolven.





Figuur 3-6. Gemiddelde stroomsnelheid in hoofdrichting bij Lobith-afvoeren tussen 2500 en 3500 m<sup>3</sup>/s. Het gemiddelde volgt uit alle metingen in de 100 m rondom de rivieras en over de volledige diepte, voor aanleg ("before": 1 februari 2013) en na aanleg ("after": 15 en 16 januari 2019).

### 3.3.3 Wat is de invloed van de langsdam en kribverwijdering op de gemeten bodemligging?

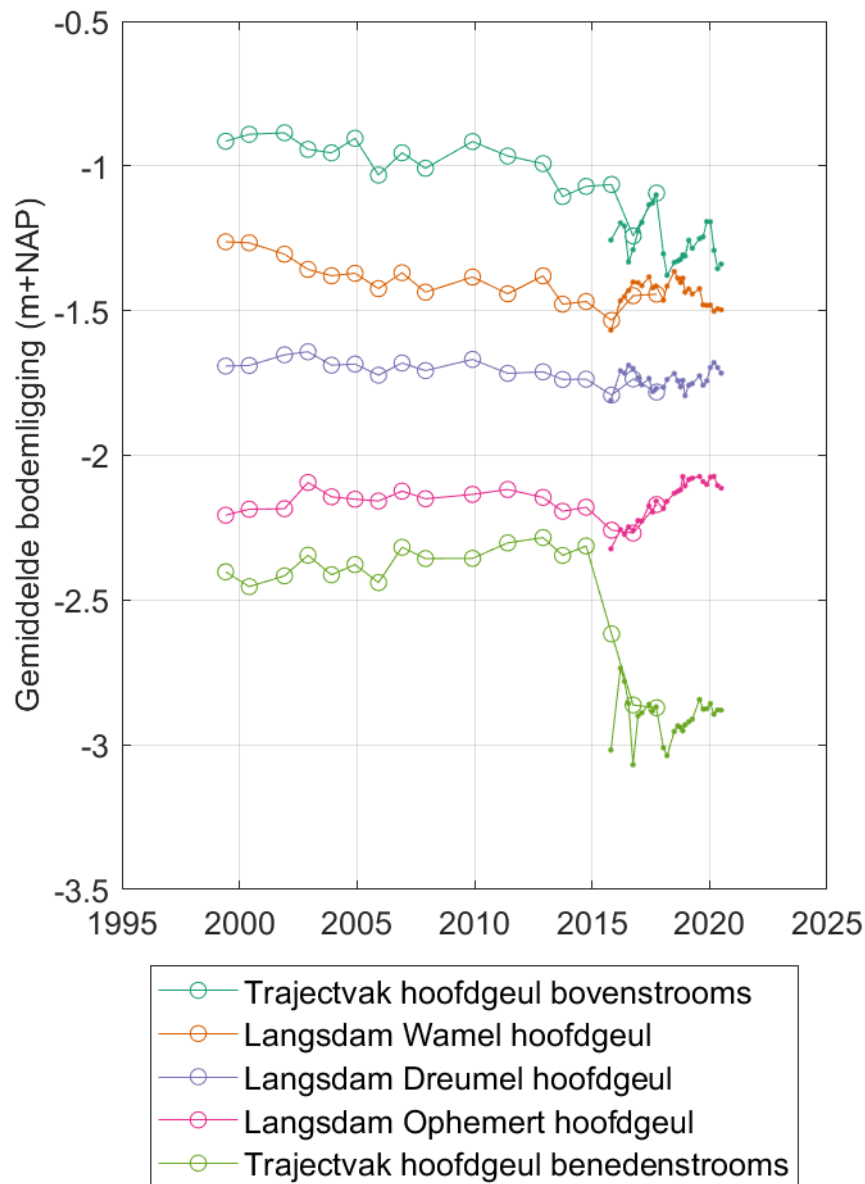
Figuren 3-7 en 3-8 laten de resultaten zien van de P-map-analyse. Voorafgaand aan de aanleg van de langsdammen vertoonde de bodem trends van lichte erosie bij Dreumel, Wamel en bovenstrooms en lichte sedimentatie bij Ophemert en benedenstrooms. Tijdens de aanleg daalde de bodem ter hoogte van Wamel en Ophemert sterk. Na de aanleg blijft bij Ophemert sedimentatie zichtbaar terwijl trajecten van erosie en sedimentatie elkaar afwisselen bij Wamel en Dreumel. Na verhoging van de inlaatdrempel van Wamel in april 2018 nam de sedimentatie in de hoofdgeul bij Wamel af terwijl de bodem bovenstrooms juist aanzandde. Het effect van de kleinere aanpassingen van de inlaatopeningen bij Dreumel en Ophemert was minder waarneembaar in de peilingen. Over het geheel genomen kwam de bodem door sedimentatie omhoog, in lijn met de via ADCP-metingen gevonden afname van de sedimenttransportcapaciteit.

Gecombineerd met de stabilisatie van waterstanden verkleint de hogere gemiddelde bodemligging de waterdiepte. Dat de waargenomen stroomsnelheden desondanks afnemen laat zich verklaren uit de vergroting van de totale breedte door oevererosie langs de oevergeul.

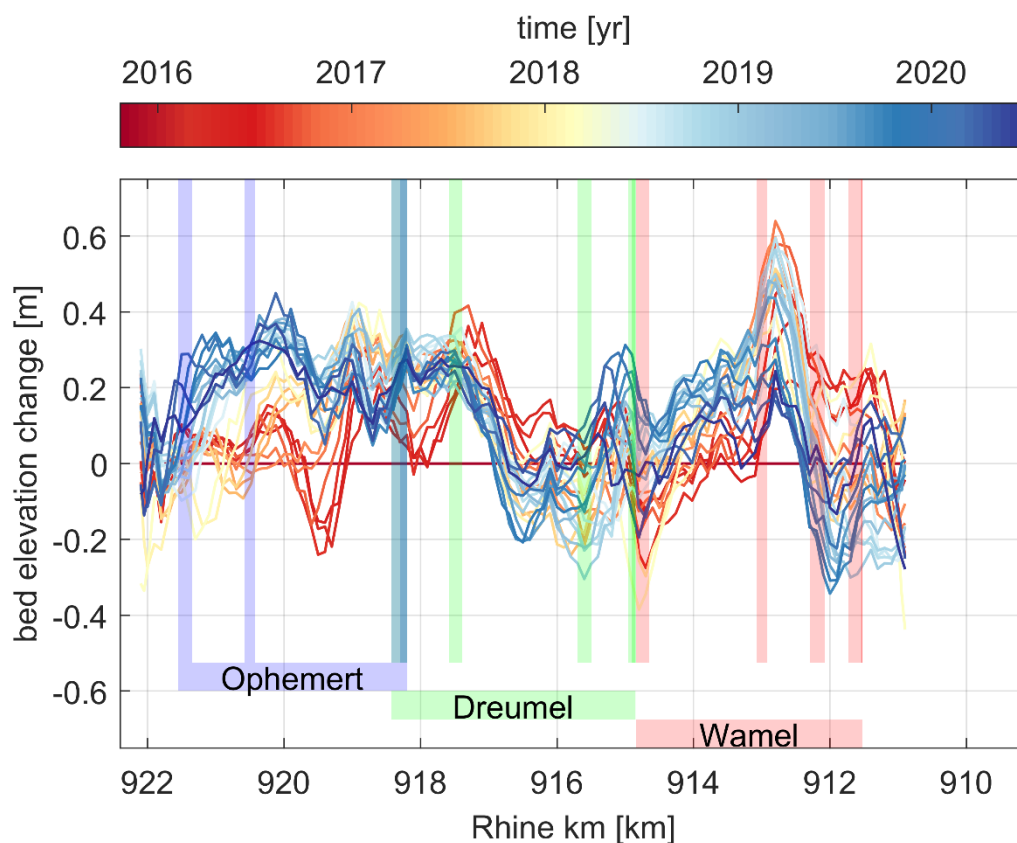
De P-map-analyse van bodemliggingen laat geen conclusie toe over effecten van de langsdammen op de hoogte van onderwaterduinen.

### 3.3.4 Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de waterstanden bij verschillende afvoeren?

Het effect van de instelling van de inlaatopeningen op de waterstand in de hoofdgeul kon niet worden afgeleid uit metingen. Metingen met *divers* waren niet beschikbaar bij de inlaat van Wamel en het effect is te klein om op te merken uit de verhanglijnmetingen.



*Figuur 3-7. Gemiddelde bodemhoogte voor trajectvakken langs iedere langsdam en een vak van circa 1 km direct boven- en benedenstrooms van het langsdammentraject. De grote markeringen geven de jaarlijkse peilingen weer; de kleine markeringen de 8-wekelijkse peilingen.*



Figuur 3-8. Gemiddelde bodemhoogte per hectometervak ten opzichte van week 42 van 2015. Metingen zijn verwerkt met de P-map-analyse en gemiddeld over 250 m boven- en benedenstrooms. Kleuren komen overeen met verschillende tijdstippen volgens de kleurschaal boven de grafiek. Verticale gekleurde banen geven de locaties aan van instroom-, tussen- en uitstroomopeningen.

### 3.3.5 Wat zijn de boven- en benedenstroomse effecten van de langsdam bij een bepaalde instelling van de instroomopeningen?

Er zijn geen waterstanden boven- en benedenstrooms van de pilot gemeten, maar te verwachten is dat de waargenomen effecten bij Tiel doorwerken bovenstrooms. Bij Tiel dalen waterstanden niet langer bij Lobith-afvoeren lager dan 2000 m<sup>3</sup>/s. Bij de laagste afvoeren nemen ze zelfs enkele centimeters per jaar toe. De rivierbodem erodeerde door de langsdammen zowel boven- als benedenstrooms van de pilot.

## 3.4 Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat

Uit de metingen is geen bevestiging af te leiden van de verwachting van Rijkswaterstaat dat de natuurlijke stroomsnelheid van water te beïnvloeden is door een slimme verdeling bij de regelbare openingen.

## 4 Hoogwaterveiligheid

### 4.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Bij aanvang van de pilot werd de hypothese geformuleerd dat de langsdammen de hoogwaterstanden verlagen. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Treedt de verwachte verlaging van hoogwaterstanden daadwerkelijk op?
- 2 Wat is het huidige effect van de langsdam op de hoogwaterstanden?
- 3 In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?
- 4 Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context van de nieuwe normering?
- 5 Zijn langsdammen van invloed op de vorming van ijsdammen?
- 6 Veranderen de invloeden van de langsdam en de instelling trendmatig in de komende 20 jaar? Zo ja, waardoor?

### 4.2 Methodiek

Voor het effect op extreme hoogwaterstanden zijn geen metingen beschikbaar, want tijdens de monitoringperiode hebben zich geen extreme hoogwaters voorgedaan. Uitspraken over dat effect zijn niet af te leiden uit metingen van waterstandsverlagingen bij matige hoogwaters als dat van circa 7 500 m<sup>3</sup>/s in januari 2018. Omdat kribverlaging en kribverwijdering bij matige hoogwaters de waterstand meer verlagen dan bij extreme hoogwaters, is die verlaging niet representatief en niet te extrapoleren naar extreme omstandigheden. Overigens ontbraken ook de meetgegevens om een waterstandsverlaging bij de hoogwaterafvoer van 7 500 m<sup>3</sup>/s te kunnen bepalen.

Meer betrouwbare conclusies kunnen getrokken worden uit het tweedimensionale hydrodynamische rekenmodel van Paarlberg et al. (2021). Hiermee zijn de volgende varianten doorgerekend:

- V0: Referentiesituatie met oorspronkelijke kribben. Deze variant is gebruikt om de waterstanden voorafgaand aan de aanleg van de langsdammen te bepalen;
- V1: Langsdammen met volledig open instroomopeningen aan bovenstroomse zijdes van de oeversgeulen (hoogte OLR-1.75 m);
- V2: Langsdammen met gesloten instroomopeningen aan de bovenstroomse zijdes van de oeversgeulen (hoogte OLR +1.25 m);
- V3: Langsdammen met hoger liggende instroomopeningen in overeenstemming met de situatie in het veld.

Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Asselman & de Grave (2021).

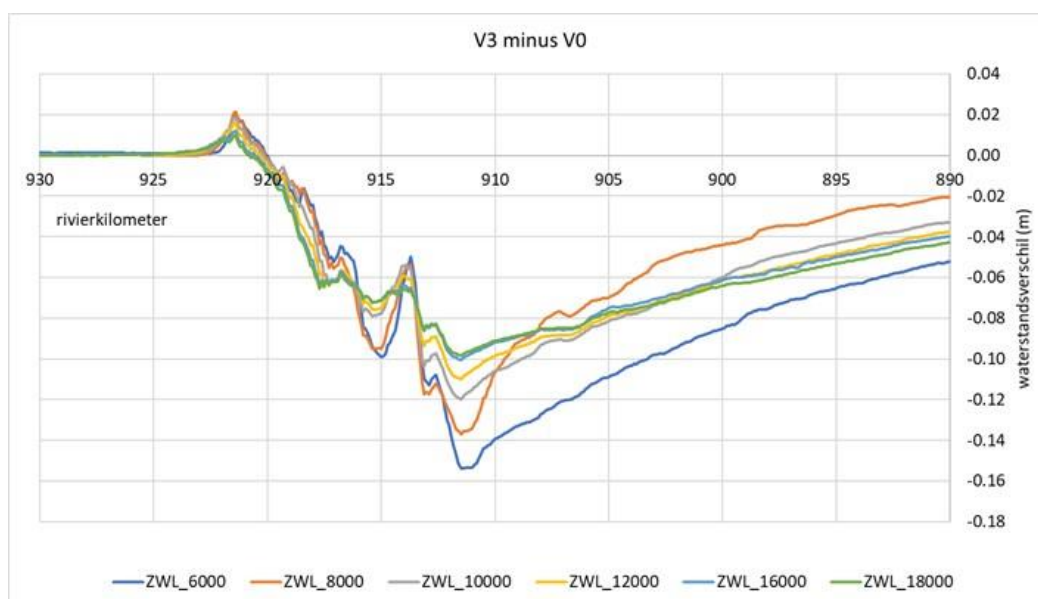
## 4.3 Resultaten

### 4.3.1 Treedt de verwachte verlaging van hoogwaterstanden daadwerkelijk op?

Een verlaging van extremere hoogwaterstanden valt niet uit de metingen af te leiden omdat er geen metingen zijn bij extreme hoogwaters. Modelsimulaties geven echter aan dat de langsdammen en de oevergeulen de hoogwaterstanden omlaag brengen.

### 4.3.2 Wat is het huidige effect van de langsdam op de hoogwaterstanden?

Figuur 4-1 toont de berekende verlaging van de hoogwaterstanden bij verschillende afvoeren als gevolg van de realisatie van variant V3 met gedeeltelijk open instroomopeningen als in het veld. De grootste waterstandsval treedt op aan de bovenstroomse zijde van de meest bovenstrooms gelegen langsdam. Stroomopwaarts en stroomafwaarts wordt het effect steeds kleiner. De waterstand daalt maximaal 16 cm bij een Lobith-afvoer van 6 000 m<sup>3</sup>/s en maximaal 10 cm bij Lobith-afvoeren van 16 000 m<sup>3</sup>/s en 18 000 m<sup>3</sup>/s. Dit illustreert dat de effecten van matige hoogwaters niet geëxtrapoleerd kunnen worden naar extreme hoogwaters waarbij een aanzienlijke hoeveelheid water door de uiterwaarden stroomt. Volgens een schatting op basis van gelineariseerde stromingsvergelijkingen is het effect tweemaal zo groot als de langsdammen niet over 10 km maar over 40 à 60 km worden aangelegd. Het effect van de pilot 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 waterstandsval leiden tot een beperkte verschuiving van 20 à 30 m<sup>3</sup>/s meer afvoer naar de Waal. Dit effect kan gecorrigeerd worden met behulp van regelwerk Pannerden.



Figuur 4-1. Waterstandsval door aanleg van langsdammen op de Waal over een lengte van 10 km (variant V3), in vergelijking tot een situatie zonder langsdammen (V0).

### 4.3.3 In welke mate beïnvloedt de instelling van de instroomopeningen de waterstand bij hoogwater?

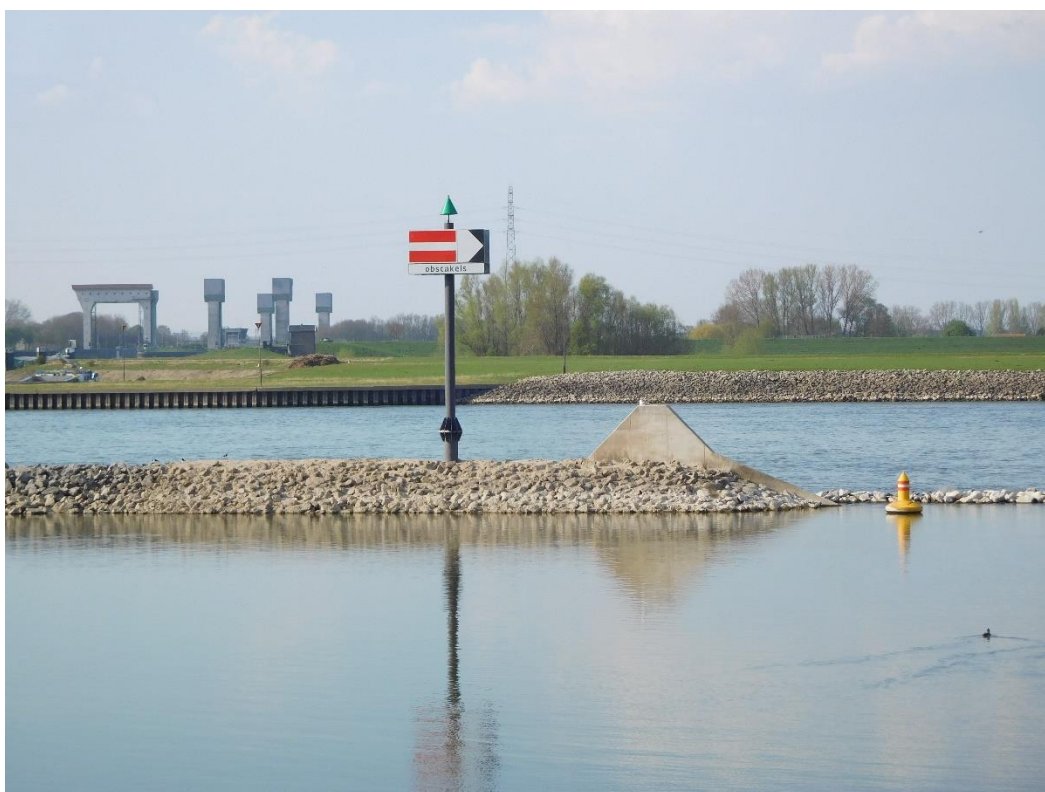
De varianten V1 en V2 geven vrijwel hetzelfde beeld als de grafiek voor V3 in figuur 4-1. Bij volledig open instroomopeningen (V1) is de grootste waterstandsval nog 2 mm groter. Bij volledig gesloten instroomopeningen (V2) is deze 5 mm kleiner.

#### 4.3.4 Hoe vertalen we de bevindingen voor een maatgevende hoogwaterafvoer naar conclusies in de context 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 wordt de dijkverhogingsopgave kleiner. Het effect van de langsdammen zou naar verwachting de totale investeringskosten met minder dan 2% verlagen.

#### 4.3.5 Zijn langsdammen van invloed op de vorming van 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 stromingsconcentraties en de stroomvertragingen waardoor 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 ijsbokken (figuur 4-2). Hoewel de proefondervindelijke ervaring van een strenge winter ontbreekt, valt redelijkerwijs aan te nemen dat de langsdammen de ijsveiligheid niet aantasten.



Figuur 4-2. Ijsbok op langsdam bij Wamel.

#### 4.3.6 Veranderen de invloeden van langsdam en de instelling trendmatig in de komende 20 jaar? Zo ja, waardoor?

Bodemerosie van de Waal verlaagt de waterstanden. Als langsdammen de bodemerosie afremmen, vertraagt ook de verlaging van hoogwaterstanden.

#### 4.4 Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat

Tijdens de monitoring zijn geen hoge of extreme hoogwatergolven opgetreden. Daarom valt uit de metingen niet af te leiden of de verwachte verlaging van hoogwaterstanden daadwerkelijk optreedt. Modellsimulaties geven aan dat de waterstand maximaal 16 cm daalt bij een Lobith-afvoer van 6 000 m<sup>3</sup>/s en maximaal 10 cm bij Lobith-afvoeren van 16 000 en 18 000 m<sup>3</sup>/s. Dit maximum treedt op aan de bovenstroomse zijde van de meest bovenstrooms gelegen langsdam. Stroomopwaarts en stroomafwaarts wordt het effect steeds kleiner. Het effect is naar schatting tweemaal zo groot als de langsdammen niet over 10 km maar over 40 à 60 km worden aangelegd.

# 5 Zoetwatervoorziening

## 5.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Voor zoetwatervoorziening heeft Rijkswaterstaat vooraf geen specifieke hypothese geformuleerd. Verwacht werd echter dat langsdammen de mogelijkheid bieden om de waterstand bij lage afvoeren te verhogen, met positieve effecten op de zoetwatervoorziening. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Hoe kunnen langsdammen bijdragen aan de nationale zoetwatervoorziening?
- 2 Welke instelling van de instroomopeningen verhoogt de rivierwaterstand bij het Amsterdam-Rijnkanaal?
- 3 Hoe beïnvloedt optimalisatie van de zoetwatervoorziening de andere functies en thema's?
- 4 Wat is met name de invloed van de afvoer over het Amsterdam-Rijnkanaal op de waterstanden in de Waal bij lage rivierafvoer? Wat is de consequentie voor de diepte in de vaarweg?

## 5.2 Methodiek

De effecten van de langsdammen op laagwaterstanden zijn geanalyseerd op basis van metingen en modelsimulaties met Delft3D. Het voordeel van numerieke simulaties is dat het geïsoleerde effect van de langsdammen en de verschillende instellingen van de instroomopeningen onderzocht kan worden, zonder dat andere ingrepen of variabiliteit in afvoer of andere grootheden het beeld verstoren. De modelresultaten lijken de gemeten waterstandseffecten van de langsdammen goed weer te geven, alhoewel zij ze mogelijk licht overschatten.

De eerste onderzoeksvraag vormt de hoofdvraag en wordt beantwoord aan de hand van de volgende onderwerpen:

- 1 Aanvoer van zoetwater naar West-Nederland door het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal;
- 2 Effect van wateronttrekking op de diepte in de vaarweg;
- 3 Regionale inlaatpunten;
- 4 Grondwatervoorraad.

Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Van der Vat (2021).

## 5.3 Resultaten

### 5.3.1 Hoe kunnen langsdammen bijdragen aan de nationale zoetwatervoorziening?

De metingen laten zien dat de dalende trend in de waterstand bij Tiel, bij gelijke afvoer, gestopt is na de aanleg van de langsdammen. Dit is positief voor de zoetwatervoorziening.



### *Aanvoer van zoetwater naar West-Nederland door het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal*

Bij droogte wordt zoetwater uit de Waal naar West-Nederland gevoerd via het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal, de stuw Hagestein en de Prinses Irenesluizen. Het verval bij de stuw Hagestein en de Prinses Irenesluizen verandert door de verhoging van de waterstand die een gevolg is van de aanleg van de langsdammen. Dat verval bedraagt bij lage afvoeren circa 2 meter. Een toename van dit verval met maximaal 20 cm als gevolg van de langsdammen zal geen significant effect hebben op de afvoer. Daarom hebben de langsdammen van de pilot geen effect op de watervoorziening voor West-Nederland.

### *Effect van wateronttrekking op de diepte in de vaarweg*

De onttrekking van maximaal 80 m<sup>3</sup>/s zoetwater voor West-Nederland via het Amsterdam-Rijnkanaal verlaagt de afvoer en de waterstand op de Waal benedenstrooms. Bij laagwater vergroot dit de vaarbepalingen. De grootste vaarbepaling bevindt zich bij Sint Andries op rivierkilometer 927. De stroomopwaarts gelegen langsdammen van de pilot hebben op de waterstand daar geen effect. Nader onderzoek zou uit kunnen wijzen of langsdammen ter plaatse bij Sint Andries de vaarbepalingen kunnen verminderen en zo de afname van de diepte in de vaarweg door wateronttrekking voor West-Nederland kunnen beperken.

### *Regionale inlaatpunten*

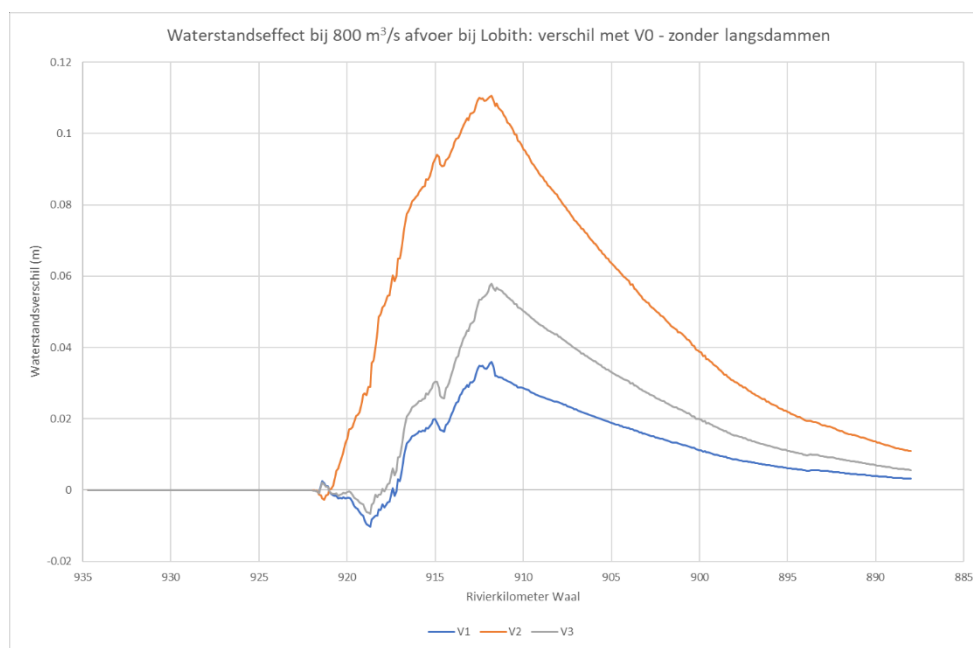
Hogere laagwaterstanden op de Waal bij Tiel, in het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal en in het stuwpand Hagestein van de Nederrijn en de Lek beïnvloeden de regionale inlaatpunten gunstig doordat de drempelwaarden voor het onder vrij verval inlaten van water daardoor minder vaak overschreden worden. Dit is geanalyseerd aan de hand van metingen in het droge jaar 2018 in combinatie met modelsimulaties van de waterstandseffecten van de pilot. De analyse laat zien dat de langsdammen met gedeeltelijk gesloten instroomopeningen voor de regionale inlaatpunten Kromme Rijn, Prins Bernhardsluizen en Tiel geleid hebben tot enkele dagen minder overschrijding ten opzichte van de situatie zonder langsdammen, op een totaal van 25 tot 109 dagen, afhankelijk van het jaar. De maximale waterstandverhoging dankzij geheel gesloten instroomopeningen verkleint het aantal dagen overschrijding met 19 tot 24 dagen.

### *Grondwatervoorraad*

De waterstand op de Waal beïnvloedt de uitwisseling met het regionale grondwater en het grondwater in de uiterwaarden. Bij laagwater is de waterstand in de rivier lager dan de grondwaterstand en zijgt grondwater weg naar de rivier. Er is een inschatting gemaakt van het effect dat een gemiddeld 5 cm hogere rivierwaterstand over een traject van 10 km heeft op de regionale waterbalans van het Land van Maas en Waal. De wegzijging naar de rivier vermindert daardoor met ongeveer 5%. Eerdere studies laten zien dat een hogere grondwaterstand in de uiterwaarden de omstandigheden voor het habitatype vochtige alluviale bossen licht verbetert.

### 5.3.2 Welke instelling van de instroomopeningen verhoogt de rivierwaterstand bij het Amsterdam-Rijnkanaal?

Het blijkt niet mogelijk om op basis van de metingen het waterstandseffect van de verschillen in de instroomopeningen te bepalen, hoewel er wel aanwijzingen zijn dat het gedeeltelijk sluiten van de instroomopeningen geleid moet hebben tot meer afvoer door de hoofdgeul en een hogere waterstand. Volgens de modelresultaten verhogen de langsdammen de waterstand het meest als de instroomopeningen van de oevergeul gesloten zijn. Dit leidt tot een maximale toename van de waterstand bij het Amsterdam-Rijnkanaal van 13 cm bij een Lobith-afvoer van 1 020 m<sup>3</sup>/s en 10 cm bij een Lobith-afvoer van 800 m<sup>3</sup>/s (figuur 5-1).



Figuur 5-1. Effect op waterstand van verschillende instellingen van de instroomopeningen ten opzichte van de situatie zonder langsdammen bij een afvoer te Lobith van 800 m<sup>3</sup>/s. V1 (blauw): geheel open. V2 (oranje): geheel gesloten. V3 (grijs): gedeeltelijk open.

### 5.3.3 Hoe beïnvloedt optimalisatie van de zoetwatervoorziening de andere functies en thema's?

Voor het Deltaprogramma Zoetwater zijn eerder hotspotanalyses uitgevoerd. Deze formuleren voor de hotspot Midden-rivierengebied de volgende keuzes voor waterverdeling die onder het Warm2050-scenario naar verwachting eens in de 5 jaar gemaakt moeten worden:

- Extra wateraanvoer uit de Waal via het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal (negatieve effecten voor de scheepvaartsector);
- Minder water naar de Lek (effecten op de drinkwatersector);
- Minder water naar het Noordpand van het Amsterdam-Rijnkanaal (effecten op regionale watervoorziening, natuur en drinkwatersector);
- Meer water via sluis Driel (effect op IJsselafvoer);
- Minder regionale onttrekkingen vanuit het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal en vanuit de Nederrijn.

Deze lijst geeft een overzicht van de functies en thema's die beïnvloed worden door de optimalisatie van de watervoorziening.

### 5.3.4 Wat is met name de invloed van de afvoer over het Amsterdam-Rijnkanaal op de waterstanden in de Waal bij lage rivierafvoer? Wat is de consequentie voor de diepte in de vaarweg?

Op basis van metingen in het droge jaar 2018 wordt geschat dat een onttrekking van  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  uit de Waal naar het Amsterdam-Rijnkanaal de waterstand met 15 cm verlaagt. Dit komt redelijk overeen met het op basis van modelberekeningen verwachte effect van 2,1 mm per  $\text{m}^3/\text{s}$ . Beleidsmatig wordt nu uitgegaan van een maximale onttrekking van  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , wat dan neerkomt op een waterstandsval van 17 tot 20 cm. Deze waterstandsval verkleint de diepte in de vaarweg met een zelfde aantal centimeters. Sluiting van de instroomopeningen kan hiervan tot 13 cm compenseren.



Figuur 5-2. Inlaatopening van langsdam bij Dreumel tijdens lage afvoer van  $907 \text{ m}^3/\text{s}$  op 4 september 2018.

## 5.4 Conclusie

De langsdammen bij Wamel, Dreumel en Ophemert dragen vooral aan de zoetwatervoorziening bij door de interactie met het regionale watersysteem via inlaten en via het grondwater. Het aanleggen van langsdammen over een langer traject zal naar verwachting leiden tot een grotere waterstandsverhoging over een langer traject dan uit de pilot naar voren is gekomen. Zo zou het benedenstrooms verlengen van de langsdammen uit de pilot tot voorbij Sint Andries de verhoging van de waterstand kunnen versterken. De effecten van onttrekkingen ten behoeve van zoetwatervoorziening zouden hierdoor kunnen verkleinen. Dit zou een bijdrage kunnen leveren aan de nationale zoetwatervoorziening als dit de waterstandsverlaging als gevolg van de extra afvoer via het Amsterdam-Rijnkanaal zou kunnen compenseren.

## 6 Morfologie

### 6.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat formuleerde de hypothese dat de sedimentverdeling met de regelbare openingen kan worden beïnvloed, met mogelijk een gunstige beïnvloeding van de bodemligging en het waterstandverhang in de hoofdgeul. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op trajectschaal?
- 2 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op corridorbreedteschaal?
- 3 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op dwarsprofielschaal?
- 4 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op diepteschaal?
- 5 Wat zijn de profielveranderingen van de langsdam en het dragend grondmassief?
- 6 Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de ontwikkeling van de bodemligging?
- 7 Wat zijn de boven- en benedenstroomse effecten van de langsdam bij een bepaalde instelling van de instroomopeningen?

De consequenties van morfologische effecten voor onderhoud komen aan de orde in hoofdstuk 10.

### 6.2 Methodiek

De morfologische effecten van de pilot Langsdammen worden geanalyseerd op verschillende ruimteschalen volgens de systematiek van Wright & Crosato (2011). Effecten op kleine ruimteschalen treden vrijwel onmiddellijk op terwijl de effecten op de grootste ruimteschalen zich pas na decennia manifesteren. Relevante ruimteschalen voor de pilot in de Waal zijn de trajectschaal, de corridorbreedteschaal, de dwarsprofielschaal en de diepteschaal. De effecten zijn voor iedere schaal in drie stappen geanalyseerd. In de eerste stap zijn verwachte effecten geformuleerd op basis van ervaring, theoretische analyses en een numerieke modelstudie die was uitgevoerd voor de aanleg van de pilot. De tweede stap bestond uit het analyseren van hydromorfologische meetgegevens uit het monitoringprogramma en het simuleren van effecten met een meer verfijnd numeriek model dan wat voorafgaand aan de aanleg gebruikt was. De balans werd opgemaakt in de derde stap door de resultaten uit de analyse van meetgegevens en de numerieke modelsimulaties onderling af te wegen en te vergelijken met de verwachtingen uit de eerste stap.

Het uitgebreide monitoringprogramma van de pilot bestond onder meer uit bodempeilingen met multibeam-echolood, waterstandsregistraties, en ADCP-metingen van stroomsnelheid en stroomrichting. Binnen de relatief korte duur van het programma konden weliswaar geen langetermijneffecten bepaald worden, maar toch konden al eerste ontwikkelingen naar een nieuw dynamisch evenwicht op lange termijn geïdentificeerd worden. In het algemeen geven veldmetingen goed inzicht in processen op kleinere ruimteschalen terwijl numerieke modellen beter inzicht geven in processen op grotere ruimteschalen die door verschillende factoren beïnvloed worden. Zowel veldmetingen als numerieke simulaties kennen onnauwkeurigheden en tekortkomingen. Die zijn te minimaliseren door de methoden complementair toe te passen. Aan de numerieke resultaten van morfologische simulaties wordt alleen betekenis toegekend in termen van verschillen ten opzichte van een referentiesimulatie, niet in termen van absolute waarden, vanwege de onnauwkeurigheden in schematisering en kalibratie.

De hydromorfologische effecten van de langsdammen zijn bepaald door de situaties voor en na de aanleg met elkaar te vergelijken. Deze vergelijking was problematisch voor de veldgegevens, omdat in dezelfde periode tevens kribben boven- en benedenstrooms van de pilot verlaagd waren en tevens de nevengeul van Passewaaij was aangelegd. Het zuivere effect van de langsdammen kon wel in de numerieke berekeningen geïsoleerd worden. Bovendien simuleerde het model de morfologische ontwikkeling over 20 jaar, dus over een langere periode dan de duur van het monitoringprogramma.

Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Chavarrías et al. (2021).

## 6.3 Resultaten

### 6.3.1 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op trajectschaal?

Morfologische effecten op de ruimteschaal van een riviertraject betreffen de ontwikkeling van het bodemlengteprofiel. De voortgaande daling van dit profiel door erosie, als reactie op normaliseringswerken en zandwinning in het verleden, vormt op dit moment een van de grootste uitdagingen voor het rivierbeheer. In theorie zouden de versmalling en de egalisatie van de hoofdgeul en de afleiding van sediment naar de oevergeul deze erosie versterken, terwijl de afleiding van water door de oevergeul deze erosie zou verzwakken of zelfs doen omslaan naar sedimentatie. Verwacht werd dat dit laatste effect zou overheersen, maar niet voldoende zou zijn om de erosietrend volledig te stoppen. Daarom werd in de hoofdgeul een reactie verwacht met lichte erosie bovenstrooms van de pilot, significante sedimentatie bij de inlaten naar de oevergeulen, lichte sedimentatie verder stroomafwaarts en significante erosie bij de uitlaten van de oevergeulen. Peilingen en numerieke simulaties bevestigden de sedimentatie aan de bovenstroomse zijde van iedere langsdam, overeenkomend met een gemiddelde bodemstijging van 10 cm. Hoogwaters produceerden verstoringen van deze bodemreactie die zich voortplantten met een snelheid van ongeveer 1 km/jaar. Peilingen en numerieke simulaties bevestigden ook de erosie van de bodem aan de benedenstroomse uiteinden. Omdat deze bodemreactie vooral het gevolg was van waterafleiding, waren de inlaatopeningen belangrijke factoren.

Een aandachtspunt op trajectschaal is de stabiliteit van het tweegeulensysteem dat ontstaat door de aanleg van de nevengeulen. Deze stabiliteit hangt af van de hoeveelheid sediment die bij verschillende afvoeren in de oevergeulen terecht komt. Er zijn geen uitgebreide metingen van deze hoeveelheid beschikbaar en numerieke modellen kunnen deze hoeveelheid nog steeds niet betrouwbaar reproduceren. De bodemlengteprofielen van de hoofdgeul en de oevergeul hebben echter nog geen tekenen van deze instabiliteit te zien gegeven. Er trad wel aanzienlijke sedimentatie op in de oevergeulen, maar die was hoofdzakelijk het gevolg van de toevoer van geërodeerd oevermateriaal.

### 6.3.2 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op corridorbreedteschaal?

Effecten op de schaal van de riviercorridorbreedte tussen de bandijken betreffen uitwisselingen van sediment tussen de hoofdgeul en de uiterwaarden. Zandafzettingen op uiterwaarden zijn ecologisch waardevol voor stroomdalflora. Tevoren werd niet verwacht dat de langsdammen significante veranderingen zouden veroorzaken in de afzetting van zand, hoewel sommige ecologen toch bezorgdheid hadden uitgesproken dat de langsdammen zandfluxen naar de uiterwaarden zouden blokkeren. Veldwaarnemingen bevestigden dat zich inderdaad zandafzettingen vormden op de uiterwaarden langs de langsdammen, meteen benedenstrooms van de pilot zelfs in aanzienlijke hoeveelheden.

Verwacht werd dat het verwijderen van de kribben de oevers van de oevergeul zou blootstellen aan erosie, maar daarvan waren verder geen kwantitatieve voorspellingen gemaakt. Dergelijke voorspellingen zouden onzeker geweest zijn door factoren als heterogene oeversamenstelling, overblijfselen van de voormalige kribben, begroeiing en de doordringing van golven. De oeverlijnen schreden terug over een afstand van meters. Deze terugschrijding bedroeg 5 m tussen rivierkilometers 912.9 en 914. De aanvankelijk hoge oevererosiesnelheden namen in de tijd af.



*Figuur 6-1. Oevererosie langs de oevergeul bij Wamel (april 2020).*

### **6.3.3 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op dwarsprofielschaal?**

Morfologische verschijnselen op de ruimteschaal van dwarsprofielen betreffen zandbanken en het profiel van de vaargeul. De lokale aanzanding bij een inlaat is te zien als een bank. Er zijn geen effecten waargenomen op het totaalpatroon van de banken in de hoofdgeul. Verwacht werd dat loslatende stroming de vorming van een tweetal alternerende banken zou forceren in de bovenloop van de oevergeul bij zowel Wamel als Ophemert. Deze banken ontstonden inderdaad, zoals met name gedocumenteerd is voor de oevergeul bij Ophemert.

### **6.3.4 Welke morfologische effecten hebben de langsdammen op diepteschaal?**

Morfologische verschijnselen op de ruimteschaal van de waterdiepte omvatten onder meer onderwaterduinen, kribvlammen en lokale erosiegaten. Door de aanleg van de langsdammen zijn op dit traject de kribvlammen verdwenen die de vaargeul ondieper maakten. De rivier heeft geen lokale erosiegaten uitgeschuurd die de stabiliteit van de constructie in gevaar zouden kunnen brengen.

### 6.3.5 Wat zijn de profielveranderingen van de langsdam en het dragend grondmassief?

De profielen van de langsdammen en het dragend grondmassief hebben geen vervormingen ondergaan door zetting of afschuivingen.

### 6.3.6 Wat is de invloed van de instelling van de instroomopening op de ontwikkeling van de bodemligging?

De instelling van de instroomopening bepaalt in principe zowel hoeveel water als hoeveel sediment naar de oevergeul gaat. Een afzonderlijke invloed op de hoeveelheid sediment kon niet uit veldmetingen of laboratoriumonderzoek worden afgeleid, terwijl bestaande numerieke modellen het transport van sediment over inlaatdrempels niet goed kunnen weergeven. In de numerieke simulaties had de instelling van de instroomopening wel duidelijk effect op de hoeveelheid water, en langs die weg ook op de ontwikkeling van de bodemligging. Hoe meer water de oevergeul onttrekt aan de hoofdgeul, des te sterker is de aanzanding in de hoofdgeul. Een hellend verloop van de kruin van de inlaatdrempel bepaalt hoe de stroming zich over die drempel verdeelt. Dat beïnvloedde de vorm van de twee alternerende banken in de bovenloop van de oevergeul, maar had geen waarneembaar effect op de hoeveelheid sediment die in de oevergeul terecht kwam.

## 6.4 Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat

De met langsdammen bereikte rivierverruiming gaat bodemerosie tegen maar lost dit probleem niet volledig op. Het systeem van twee stroomgeulen is in principe instabiel maar de bijbehorende veranderingen verlopen zo traag dat deze instabiliteit beheersbaar is. Vanuit morfologisch oogpunt is een minimum aan in- en uitlaten het gunstigst vanwege de erosie- en sedimentatiegolven die bij deze openingen worden opgewekt. De regelbare instroomopeningen hebben effect op de verdeling van water over de hoofdgeul en de oevergeul. De verdeling van sediment verandert mee als de waterverdeling verandert, maar het was niet mogelijk om bij gelijke waterverdeling effecten te vinden van de regelbare instroomopeningen op de sedimentverdeling. Dat vormt nog een leemte in de bestaande kennis. Het is via wijzigingen in de waterverdeling dat de instellingen van de instroomopeningen de morfologie beïnvloeden. Beslissingen over het bijsturen van langjarige trends in bodemontwikkeling worden het beste gebaseerd op waargenomen trends over de afgelopen 5 à 10 jaar. Voortdurend bijsturen op veranderingen in een kortere periode lijkt niet effectief. Er zijn echter wel andere redenen om vaker de inlaatopeningen aan te passen, zoals bijvoorbeeld het dichtzetten van inlaten tijdens de droogte van 2018.

# 7 Vaarweg

## 7.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat formuleerde de hypothese dat de scheiding van scheepvaart in de hoofdgeul en hoge ecologische waarden in de oevergeul het mogelijk maakt dat hoge ecologische waarde naast scheepvaart kan staan en in hetzelfde gebied een hoger niveau kan bereiken. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Wat is de diepte in de vaarweg en beschikbare vaarwegbreedte bij de langsdammen vergeleken met bovenstroomse en benedenstroomse trajecten, bij verschillende afvoeren?
- 2 Hoe beïnvloedt de instelling van instroomopeningen de waterstanden en dieptes in de vaarweg bij laagwater, en de bodemligging in hoofd- en oevergeul? Hoe ontwikkelt dit zich in de komende 20 jaar?
- 3 Wat is het vaargedrag ter hoogte van de langsdam? Welk deel van de beschikbare vaarwegbreedte wordt daadwerkelijk benut?
- 4 Verschilt de reistijd of de vaarsnelheid op het traject van de langsdam van bovenstroomse en benedenstroomse trajecten?
- 5 Is er sprake van hinderlijke dwarsstroming tussen hoofd- en oevergeul?



*Figuur 7-1. Schepen op de Waal bij Tiel.*

## 7.2 Methodiek

Het functioneren van de vaarweg hangt af van ontwikkelingen in waterdiepte, vaarbreedte, dwarsstroming en vaargedrag. De effecten van langsdammen op de waterdiepte en vaarbreedte zijn geanalyseerd aan de hand van bodempeilingen en Delft3D-berekeningen, maar ook aan de hand van minst gepeilde dieptes (MGD's) die dichterbij de beleving van de gebruikers van de vaarweg staan, en aan de hand van waarnemingen door schippers.



De effecten op dwarsstromingen zijn berekend met Delft3D en afgeleid uit ADCP-stroomsnelheidsmetingen. Effecten op het vaargedrag zijn geanalyseerd aan de hand van AIS-data die informatie bevatten over reistijden, vaarsnelheden en gevolgde vaarbanen. De vaarbanen laten zien welke afstand schippers aanhouden ten opzichte van de langsdammen. Omdat er geen AIS-data beschikbaar waren uit de periode voor de aanleg van de langsdammen, zijn de gegevens ter hoogte van de langsdammen alleen vergeleken met gegevens boven- en benedenstreams van de langsdammen. Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Van der Mark & van der Wijk (2021).

## 7.3 Resultaten

### 7.3.1 **Wat is de diepte in de vaarweg en beschikbare vaarwegbreedte bij de langsdammen vergeleken met bovenstroomse en benedenstroomse trajecten, bij verschillende afvoeren?**

In theorie verhogen de langsdammen de waterstand in de vaargeul bij lage afvoer en verlagen ze die waterstand bij hoge afvoer. Dit effect werkt stroomopwaarts door. Zelfs boven Nijmegen is nog een effect van maximaal enkele centimeters zichtbaar in de modelresultaten. Het omslagpunt tussen verhoging en verlaging ligt rond de gemiddelde afvoer en is afhankelijk van de instelling van de instroomopeningen. Voor de waterdiepte in de vaargeul geldt hetzelfde als voor de waterstand. Deze neemt toe bij lage afvoer en af bij hoge afvoer in vergelijking tot de situatie zonder langsdammen. De maximale toename in waterdiepte is het grootst bij gesloten instroomopeningen en bedraagt 15 à 20 cm bij rivierkilometer 912. De aangelegde langsdammen verhogen de waterstand overigens niet of zeer beperkt op de bestaande scheepvaartknelpunten bij St. Andries en Nijmegen, waardoor de minimale waterdiepte op de corridor naar Duitsland door alleen deze pilot niet of nauwelijks toeneemt.

De verwachte waterstandsopzet bij lage afvoeren is niet terug te zien in de metingen, mogelijk mede door de tegelijkertijd variërende wateronttrekkingen naar het Amsterdam-Rijnkanaal en afwijkingen van het stuwprogramma tijdens de renovatie van de stuwen in de Nederrijn. De metingen laten zien dat de waterstand bij Tiel een dalende trend vertoonde voordat de langsdammen werden aangelegd. Sinds de aanleg lijkt de waterstand te stabiliseren of bij lage afvoeren zelfs licht te stijgen. De stabilisatie lijkt vooral toe te schrijven aan een verhoging van de bodem, in overeenstemming met de metingen en de morfologische simulaties. Deze stabilisatie komt daarom niet per se ten goede aan de diepte in de vaarweg.

Bij Wamel en Dreumel is volgens de metingen sprake van afwisselende deeltrajecten van erosie en sedimentatie. Bij Ophemert vindt over de hele lengte van de langsdam aanzanding plaats, en erosie benedenstreams daarvan. Vooral bij de lagere afvoeren creëert aanzanding problematische ondieptes, omdat de bodem erdoor meer stijgt dan de waterstand.

Aangezien op het langsdammentraject weinig of geen overdiepte aanwezig is, is te verwachten dat aanzanding merkbaar is voor de scheepvaart. Schippers constateren inderdaad meer ondieptes bij de langsdammen. Bij Ophemert is een nieuwe MGD-locatie ontstaan. De gemeten baggervolumes wijzen echter niet op een toename in ondieptes.

De gemiddelde diepte in de vaargeul is ter hoogte van de langsdammen gelijk aan die bovenstreams. Een eventuele toe- of afname in diepte als gevolg van de aanleg van langsdammen verandert dit globale beeld niet.

De vaarweg blijft voldoen aan de internationale afspraak van een 150 m brede en 2,8 m diepe vaargeul ten opzichte van OLR. Wel neemt bij lage afvoer de breedte waarbinnen het overall dieper is dan 2,8 m onder OLR met tientallen meters af. Dat maakt het vaarwater bij de langsdammen minder breed dan op het bovenstroomse traject, in lijn met de 30 m reductie van de normaalbreedte. Een eventueel toekomstige bredere vaargeul van 170 m is maar net in te passen als een afstand van 30 m tussen vaargeul en bakenlijn gehandhaafd dient te blijven.

### **7.3.2 Hoe beïnvloedt de instelling van instroomopeningen de waterstanden en dieptes in de vaarweg bij laagwater, en de bodemligging in hoofd- en oevertgeul? Hoe ontwikkelt dit zich in de komende 20 jaar?**

De instelling van de instroomopeningen is volgens hydrodynamische modelberekeningen van invloed op de waterstanden en daarmee op de waterdieptes in de vaargeul bij laagwater. Simulaties bij lage afvoer laten zien dat gesloten inlaten de grootste toename in waterdiepte realiseren en open inlaten de kleinste. Bij een Lobith-afvoer van 1500 m<sup>3</sup>/s heeft de instelling van de inlaten de grootste invloed. Deze effecten van de instellingen zijn niet goed waar te nemen in de gemeten data.

De morfologische simulaties geven een indicatie van de ontwikkeling in waterdiepte en vaarbreedte in de komende 20 jaar. Bij de langsdammen van Wamel en Ophemert zandt de Waal bij open instroomopeningen op de lange termijn aan. Dit reduceert de bodemerosie bovenstrooms van de pilot in vergelijking met de situatie zonder langsdammen. De gemiddelde vaargeuldiepte bij OLR neemt daardoor op lange termijn af bij Wamel en Ophemert en neemt toe bovenstrooms daarvan. Dit komt ook tot uiting in een toename van de berekende baggervolumes. Dankzij het afremmen van de bodemerosie zullen de voor de corridor naar Duitsland maatgevende harde lagen elders in de Waal minder snel een knelpunt vormen. Bij geheel gesloten instroomopeningen pakt het anders uit. Dan slaat op de lange termijn de balans uit naar erosie bij de langsdammen. Dit leidt ertoe dat de gemiddelde waterdiepte in de vaargeul bij OLR op lange termijn juist toeneemt bij Dreumel en Ophemert.

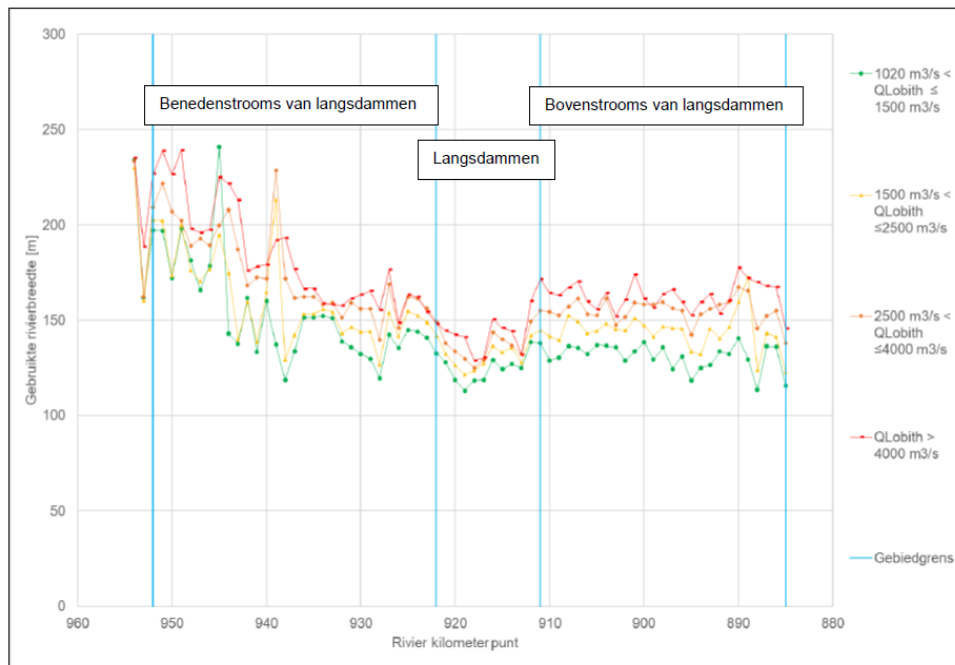
De instelling van de inlaten heeft volgens de berekeningen dus een behoorlijk morfologisch effect. Het verdient aanbeveling de invloed van de openingen nader te onderzoeken en te valideren met metingen. Als die dit modelresultaat bevestigen, kan aanpassing van de instroomopeningen veel effect op de waterdiepte bewerkstelligen. De vaarbreedte bij lage afvoer lijkt in 20 jaar slechts beperkt te veranderen.

### **7.3.3 Wat is het vaargedrag ter hoogte van de langsdam? Welk deel van de beschikbare vaarwegbreedte wordt daadwerkelijk benut?**

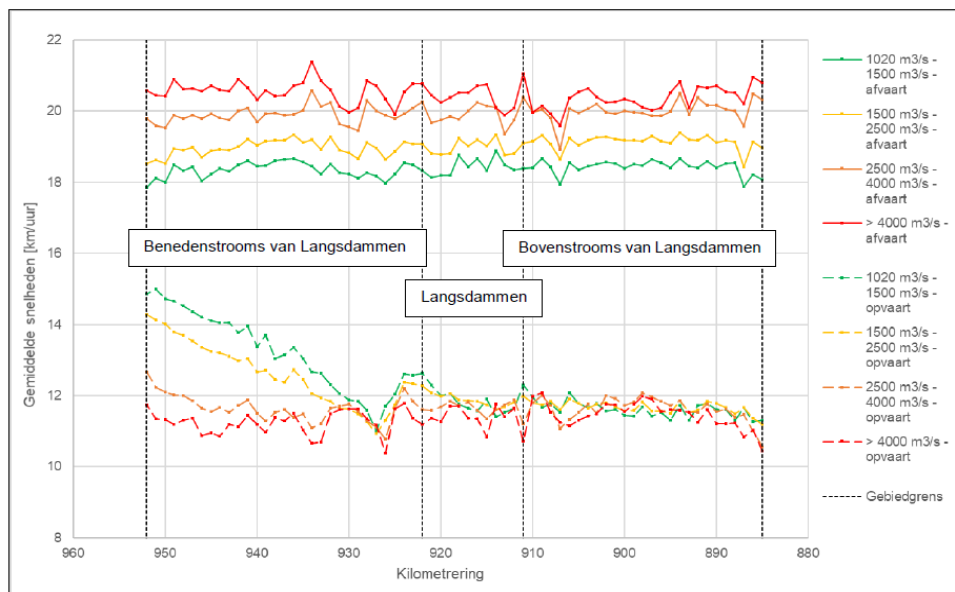
De AIS-analyse naar vaargedrag laat zien dat de gebruikte rivierbreedte voor varen ter hoogte van de langsdammen kleiner is dan bovenstrooms, vooral met toenemende afvoer (figuur 7-2). Bij lage afvoer gebruiken schippers in het langsdammentraject circa 5 meter minder vaarbreedte dan op het bovenstroomse traject. Bij hoge afvoeren wordt de beschikbare ruimte goed benut. Schippers varen dan dicht op de dammen dan bij lage afvoer. Bij alle afvoeren varen ze ook dicht op de dam dan langs bovenstroomse kribkoppen. Bij ontmoetingen ter hoogte van langsdammen varen schepen dicht naar elkaar toe. Niet onderzocht is of dit nautisch onveilige situaties kan opleveren. De genormeerde reistijden en vaarsnelheden zijn vergelijkbaar met die op het bovenstroomse traject. Er zijn geen significante veranderingen zichtbaar in vaarsnelheid en reistijd. Dit betekent dat de beleving van schippers dat het anders varen is langs de dammen niet waarneembaar tot uiting komt.

Een aandachtspunt is wel dat het vaargedrag bij extreem lage afvoeren als in 2018 niet geanalyseerd is door gebrek aan data. Dat was een situatie met een zeer kleine vaarbreedte en tegelijkertijd een grotere drukte qua scheepsbewegingen.

Er zijn uit de monitoringsperiode geen incidenten tussen beroepsvaart en recreatievaart bekend. Enkele recreatievaartuigen hebben wel de langsdam geraakt. Het verdient aanbeveling om het vaarweggebruik door de recreatievaart en de interactie met de beroepsvaart, alsook het gebruik van de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal, goed te monitoren omwille van de nautische veiligheid.



Figuur 7-2. Gebruikte rivierbreedte voor verschillende bereiken van de afvoer, gedefinieerd als de breedte waarbinnen 90% van de schepen vaart (Indah-Everts & Hermans, 2021).



Figuur 7-3. Gemiddelde vaarsnelheid per deelgebied, afvoerbereik en vaarrichting (Indah-Everts & Hermans, 2021).

### **7.3.4 Verschilt de reistijd of de vaarsnelheid op het traject van de langsdam van bovenstroomse en benedenstroomse trajecten?**

De genormeerde reistijden en vaarsnelheden bij op- en afvaart verschillen niet van die op het bovenstroomse traject (figuur 7-3).

### **7.3.5 Is er sprake van hinderlijke dwarsstroming tussen hoofd- en oevergeul?**

De berekeningen laten zien dat de langsstroming in het langsdammentraject toeneemt bij lage afvoeren en afneemt bij hoge afvoeren. Bij de openingen van de langsdammen neemt bij zowel lage als hoge afvoeren de dwarsstroming toe, tot maximaal 0,28 m/s. Deze waarde is hoger dan de maximaal toegestane dwarsstroomsnelheid van 0,15 m/s volgens het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019). De hoogste dwarsstroomsnelheid treedt op bij Dreumel. Op basis van de aanvullende methodiek in de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020) heeft met name deze opening extra onderzoek. De metingen laten over het algemeen een zwakkere dwarsstroming zien dan de modelresultaten. Uit de analyse van de metingen volgt dat de hinder voor de beroepsvaart meevalt. De nauwkeurigheid van de metingen is overigens niet optimaal en het effect van de langsdammen is niet in de meetresultaten te isoleren. Ondanks het overschrijden van de eis uit het beoordelingskader, is de verwachting dat de hinder voor de scheepvaart op langere termijn beperkt zal zijn, ook gezien de stroombeelden op andere delen van de rivier. Ook in situaties zonder langsdammen treden immers dwarsstroomsnelheden op die hoger zijn dan 0,15 m/s.

## **7.4 Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat**

Na aanleg van de langsdammen voldoet de vaarweg nog steeds aan de internationale afspraken van een 150 m brede en 2,80 m diepe vaargeul ten opzichte van OLR. De langsdammen verhogen of stabiliseren de laagwaterstand. Waar de langsdammen niet tevens de bodem in de vaarweg verhogen, vergroot dit de diepte bij laagwater.

## 8 Natuur

### 8.1 Hypotheses en onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat formuleerde bij aanvang van de pilot de volgende hypothesen ten aanzien van de effecten op de natuur:

- In de KRW-toets is geconstateerd dat de aanleg van langsdammen te beschouwen is als de aanleg van een nevengeul en om deze reden enkel positieve gevolgen heeft voor de relevante KRW-kwaliteitselementen. De achter de langsdam liggende oevergeul is goed beschermd tegen de scheepvaartgolven waardoor een goed milieu ontstaat voor stroomminnende vissen en macro-invertebraten.
- De meest relevante beschermde soorten zijn rivierprik en donderpad. Voor deze soorten wordt een positief effect verwacht omdat het leefgebied verbetert. Ook de functie van opgroeigebied verbetert. De biodiversiteit in de oeverzone wordt groter.
- Doordat de maatregel langsdammen naar verwachting tot een toename van dichtheid aan vis leidt, profiteren ook de viseters fuut en aalscholver waarvoor in dit gebied instandhoudingsdoelen gelden.
- Door scheiding van scheepvaart in de hoofdgeul en hoge ecologische waarden in de oevergeul kan hoge ecologische waarde naast scheepvaart staan en in hetzelfde gebied een hoger niveau bereiken.

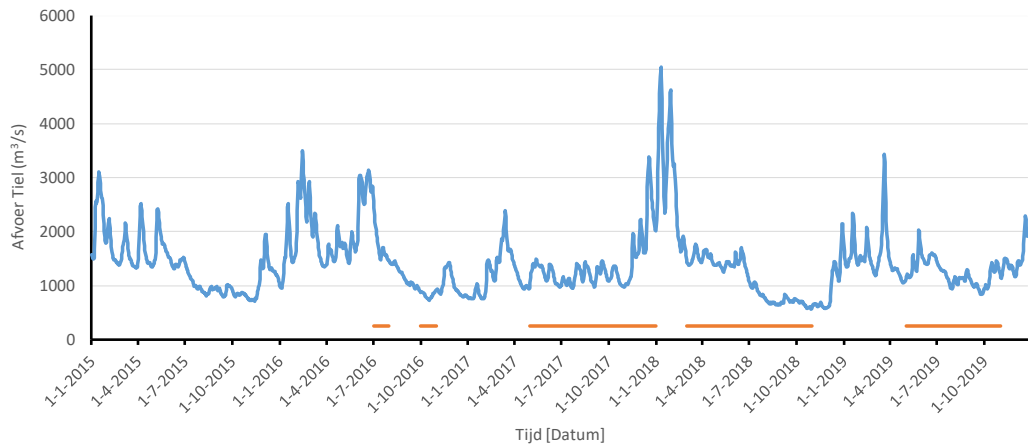
Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Wat is de invloed van scheepvaart op de habitatkwaliteit in een oevergeul?
- 2 Wat is de beschikbare habitat in een oevergeul en hoe ontwikkelt de habitat zich in de tijd?
- 3 Wat is het verschil in visstand tussen de oevergeul en kribvakken en nevengeulen?
- 4 Hoe ontwikkelt de macrofauna zich in de oevergeul?
- 5 Is er vestiging van waterplanten?
- 6 Bevordert de oevergeul exotische soorten?
- 7 Wat zijn de mogelijkheden om de oevergeulen ecologisch waardevoller te maken?
- 8 Wat is het effect van de langsdam op de morfologische en ecologische ontwikkeling van de droge oever?

### 8.2 Methodiek

De effecten van de langsdammen op de habitat en biota zijn in de periode van 2016 tot en met 2019 onderzocht in een veelzijdig meerjarig monitoringsprogramma. In de loop van deze periode zijn de langsdammen licht aangepast door de instroomopening bij Wamel af te sluiten (2018), de instroomopening bij Dreumel te verkleinen (2018) en te verruimen (2019), en de instroomdrempel bij Ophemert te verhogen (2019). De jaren van de monitoring laten zich hydrologisch karakteriseren als een hoge zomerwaterstand in 2016, een gemiddelde afvoer in 2017, een lage afvoer in 2018 en wederom een gemiddelde afvoer in 2019 (figuur 8-1). In januari 2018 veranderde een hoogwater de morfologie van het onderzoeksgebied.

Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Collas et al. (2020b).

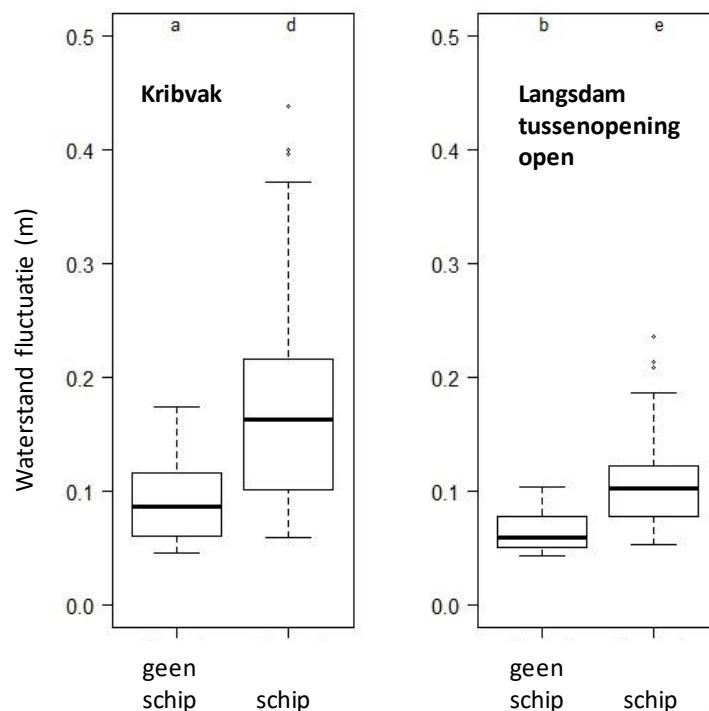


Figuur 8-1. Afvoer van de Waal bij Tiel gedurende de natuurmonitoring. De oranje lijnstukken geven de periodes aan waarin monitoring van vis of macrofauna heeft plaatsgevonden.

## 8.3 Resultaten

### 8.3.1 Wat is de invloed van scheepvaart op de habitatkwaliteit in een oevergeul?

De invloed van scheepvaart op de oeverzone van de rivier neemt sterk af door de aangelegde langsdammen. De golfslag daalt significant en het water wordt stabiel (figuur 8-2). De langsdammen reduceren ook het onderwatergeluid dat een negatieve invloed kan hebben op zowel vis als macrofauna. De waargenomen afname van de geluidslast in de oevergeulen is positief voor deze soortgroepen.



Figuur 8-2. Box-and-whisker-diagram van fluctuatie in waterstand tijdens het passeren van een schip in de hoofdgeul van de Waal in een kribvak (links) en in de oevergeul achter een tussenopening (rechts) (aangepast uit Collas et al., 2018c).

### **8.3.2 Wat is de beschikbare habitat in een oevertgeul en hoe ontwikkelt de habitat zich in de tijd?**

Het substraat verschilt sterk tussen de drie oevertgeulen. Het substraat bij Wamel is stenig en bij Dreumel zandig. Bij Ophemert bestaat het vooral uit grind. De stroomsnelheden zijn in de oevertgeulen bij Wamel en Dreumel vergelijkbaar en bij Ophemert het hoogst. Alle oevertgeulen zijn vrijwel even diep. In de tweede helft van 2020 zijn habitatkaarten gemaakt en vond er een detailanalyse plaats die ook de morfologische ontwikkeling, de sedimentbalans en de lengte van de overgangszone tussen land en water beschrijft. De oevertgeulen beschikken over voldoende connectiviteit met de rivier om ook bij toekomstige lagere waterstanden door klimaatverandering en verdere insnijding van de rivier hun ecologische rol te blijven vervullen.

Oevererosie langs de oevertgeulen heeft steilwanden gecreëerd op locaties waar kleibanken die voorheen onder het zand lagen bloot zijn komen te liggen. Deze steilwanden vormen een habitat voor karakteristieke soorten als de oevertwaluw en de bever. Terrestrische habitatverandering kan optreden door een verandering van de afzetting van zand op de uiterwaarden. Die afzetting blijft plaatsvinden, zowel bij kribvakken als bij de langsdammen. Bijzonder is dat benedenstrooms van de langsdammen ook veel zand wordt afgezet (Reeze et al., 2016; Van Winden, 2018). Het kale zand biedt een habitat voor stroomdalflora en de langsdammen lijken daarop vooralsnog geen negatief effect te hebben (Kurstjens, 2016, 2019). De hydromorfologische activiteit van de bodem van de oevertgeulen suggereert dat de habitatdiversiteit bij uitblijvend onderhoud nog zal toenemen.

### **8.3.3 Wat is het verschil in visstand tussen de oevertgeul en kribvakken en nevertgeulen?**

De oevertgeulen hebben significant grotere dichtheden van reofiele (stroomminnende) vissoorten dan kribvakken. Deze soorten hebben bovendien baat bij de meer permanente stroming van oevertgeulen in vergelijking met de meeste nevertgeulen. De dichtheden van eurytope (weinig kieskeurige) vis zijn significant groter in oevert- en nevertgeulen dan in kribvakken. Inheemse vissoorten hebben baat bij de aanleg van een langsdam, doordat hun soortenrijkdom in de oevertzone toeneemt. Ook uitheemse vissoorten hebben baat bij de aanleg van langsdammen, maar op alle onderzochte locaties zijn de dichtheden van inheemse vissen hoger dan die van uitheemse vissen. De aanpassingen van de instroomopeningen hebben niet geleid tot significante verschillen in soortenrijkdom, dichtheden en de verdeling tussen inheemse en uitheemse soorten. Verder lijkt de aanleg van langsdammen de migratiecapaciteit van diadrome (tussen zoet en zout water migrerende) vis niet te beperken. tabel 8-1 geeft een overzicht van de effecten op de visstand.

### **8.3.4 Hoe ontwikkelt de macrofauna zich in de oevertgeul?**

In het algemeen zijn de effecten van de langsdammen op macrofauna positief, ook voor zeldzame soorten als de rivierrombout en de inheemse zoetwatermossel (figuur 8-3). De oevertgeul Dreumel scoort op totale soortenrijkdom en aantallen soorten waargenomen in zandig substraat beter dan de bemonsterde kribvakken. Ook enkele uitheemse soorten profiteren van de oevertgeul, zoals korfmosselen en Jenkins' waterhorens, maar hun aantallen verschillen niet significant tussen oevertgeulen en kribvakken. Een minder dynamische oevertgeul lijkt de uitheemse Chinese wolhandkrab te bevorderen.

Tabel 8-1. Geaggregeerd overzicht van waargenomen effecten van langsdammen op vis in relatie tot verschillende onderzoeksdoelen.

Onderzoeksdoel	Alle vis	Inheems	Uitheems
Verschil oevergeul en kribvak			
Soortenrijkdom			
Broedzegen	LD = KV	LD = KV	LD = KV
Fuik	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Dichtheden			
Broedzegen	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Fuik	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Temporele ontwikkeling oevergeul			
Soortenrijkdom			
Broedzegen	LD > KV	LD > KV	LD = KV
Dichtheden			
Broedzegen	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Vergelijk oevergeulen			
Soortenrijkdom			
Broedzegen	LD = LD	LD = LD	LD = LD
Dichtheden			
Broedzegen	LD = LD; LD > KV*	LD = LD; LD > KV**	LD = LD; LD > KV**
Aanpassing instroomopening			
Soortenrijkdom			
Broedzegen	W voor < W na	W voor < W na	W voor = W na
Fuik	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Dichtheden			
Broedzegen	W voor = W na	W voor = W na	W voor = W na
Fuik	LD > KV	LD > KV	LD > KV
Diadrome vis oevergeul			
Soortenrijkdom			
Ankerkuil	LD > HG	LD > HG	LD > HG
Dichtheden			
Ankerkuil	LD > HG***; LD = HG****	LD > HG***; LD = HG****	

LD: oevergeul langsdam; KV: kribvak; W: Wamel; HG: hoofdgeul.

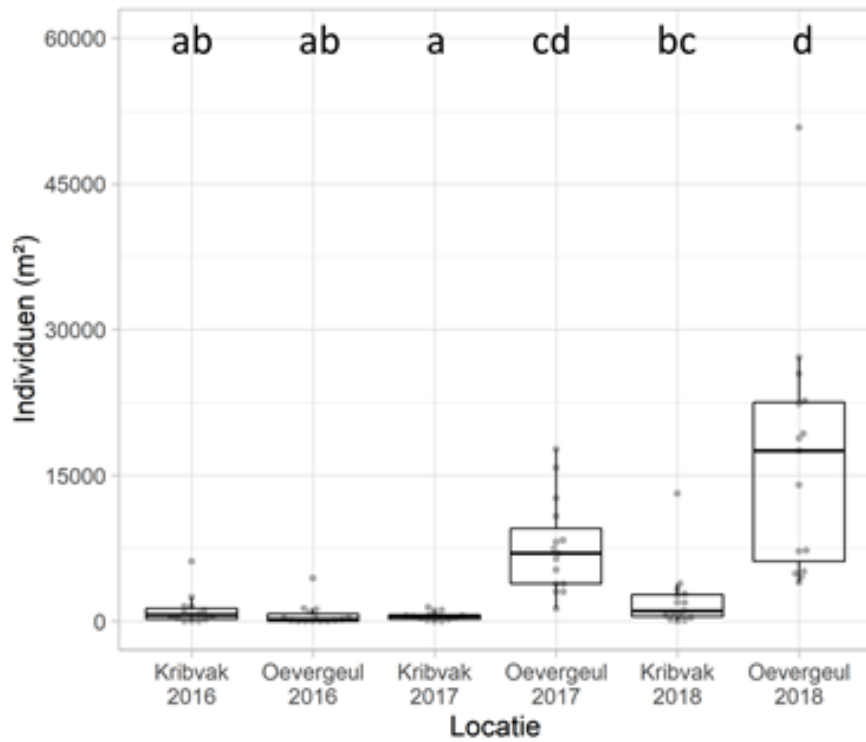
\* één oevergeul verschilt ten opzichte van beide kribvaklocaties

\*\* oevergeulen verschillen alleen ten opzichte van één kribvaklocatie

\*\*\* overdag

\*\*\*\* 's-nachts





Figuur 8-3. Box-and-whisker-diagram van macrofaunadichtheid per steekmonster in de periode 2016-2018 in de oevergeul Dreumel en in een kribvak.



Figuur 8-4. Overzicht van waargenomen waterplanten in (A) 2018 en (B) 2019. Waargenomen soorten zijn: gewoon bronmos (geel), grof hoornblad (groen) en veenwortel (blauw).

### **8.3.5 Is er vestiging van waterplanten?**

In de oevertgeul bij Dreumel werden in 2016 de eerste waterplanten van het langsdammengebied waargenomen, nabij de steile kleioevers. Op hetzelfde traject werden in 2017 slechts beperkt waterplanten aangetroffen, maar in 2018 en 2019 weer een groter aantal. Veel plantfragmenten komen met de stroming mee in de oevertgeulen en kunnen het gebied mogelijk in de toekomst koloniseren. Nu herbergen de oevertgeulen in ieder geval habitat voor de soorten grof hoornblad, gewoon bronmos en veenwortel (figuur 8-4). Dat waterplanten talrijker zijn bij Wamel en Dreumel dan bij Ophemert kan te maken hebben met het vrijkomen van de zaadbank door erosie bij Wamel en Dreumel, of met de hogere stroomsnelheid bij Ophemert. Het voorkomen van veenwortel lijkt sterk gecorreleerd aan eroderende oevers.

### **8.3.6 Bevordert de oevertgeul exotische soorten?**

Zowel uitheemse als inheemse vissen hebben baat bij de aanleg van de langsdammen. maar inheemse vissen profiteren het meest. Uitheemse soorten van macrofauna zoals korfmosselen en Jenkins' waterhorens hebben ook baat bij de aanleg, maar deze baat is gelijk aan die van de aanleg van kribvakken. Een uitzondering op dit gematigde effect is dat het verlagen van de stroomsnelheid in de oevertgeulen de Chinese wolhandkrab lijkt te bevorderen.

### **8.3.7 Wat zijn de mogelijkheden om de oevertgeulen ecologisch waardevoller te maken?**

Ondanks de waargenomen positieve effecten van de aanleg van langsdammen zijn er nog verbeterpunten. Zo zou vervanging van de stortstenen door een andere bekleding, substraat of opvulling kunnen voorkomen dat exoten zich vestigen op de steenpartijen die hier niet van nature aanwezig zijn. Opvulling van het huidige stortsteen met grind zou bijvoorbeeld paaiplekken kunnen creëren voor reofiele vis. Lagere stroomsnelheden in de oevertgeulen zouden de ontwikkeling van waterplanten bevorderen en daarmee de macrofaunadiversiteit. Een meer gevarieerde oevertzone achter de langsdammen, bijvoorbeeld door overstromingsvlakten en lobben aan te leggen, zou de habitat diverser maken en dankzij het ontbreken van scheepsgolven een hogere productiviteit in de vlakten mogelijk maken. De habitatdiversiteit neemt ook toe als de oevertgeul zich natuurlijk kan ontwikkelen, door meandering toe te staan en door de oevertgeul niet te baggeren. Dood hout in de oevertgeulen zou ten gunste komen aan macrofauna- en vissoorten. Beperking van de recreatievaart zou de biota minder verstoren.

### **8.3.8 Wat is het effect van de langsdam op de morfologische en ecologische ontwikkeling van de droge oever?**

Zandafzettingen op de droge oever zijn ecologisch waardevol voor stroomdalflora. De langsdammen hebben deze morfologische en ecologische ontwikkeling niet aangetast.

## **8.4 Conclusie over hypothesen van Rijkswaterstaat**

De waarnemingen bevestigen dat de oevertgeulen dankzij bescherming tegen scheepvaartgolven een goed milieu vormen voor stroomminnende vissen en macro-invertebraten. De dichtheid en soortenrijkdom van vis is vergroot. Naar de vogelstand is geen systematisch onderzoek verricht, maar futen en aalscholvers zijn waargenomen en het is aannemelijk dat deze viseters hebben geprofiteerd van de verbeterde visstand. De ruimtelijke diversificatie door functiescheiding tussen hoofdgeul en oevertgeul maakt het mogelijk dat scheepvaart en hoge ecologische waarde in hetzelfde gebied naast elkaar kunnen staan.

## 9 Beleving en participatie

### 9.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Voor beleving en participatie heeft Rijkswaterstaat vooraf geen specifieke hypothese geformuleerd. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Hoe beleven bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers (figuur 9-1) de komst van de langsdammen?
- 2 Hoe beoordelen het Q-team van Ruimte voor de Rivier en het Wereld Natuurfonds de langsdammen?
- 3 Hoe ervaart de commerciële en recreatieve scheepvaart de versmalde hoofdgeul en de splitsing in hoofd- en oevergeul?
- 4 Hoe ervaren sportvissers de bevisbaarheid en vangsten in de oevergeul vergeleken met de oorspronkelijke situatie en met verlaagde kribben?
- 5 Wat waren de ervaringen met de participatieve monitoring waarin belanghebbenden bij de monitoring van de pilot werden betrokken?



Figuur 9-1. Doelgroepen van het belevingsonderzoek.

### 9.2 Methodiek

Het onderzoek naar de beleving en participatie van bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers is uitgevoerd aan de hand van ingevulde vragenlijsten, meldingen ad hoc, individuele gesprekken en ervaringen tijdens de participatieve monitoring. Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Verbrugge & van den Born (2021).

### 9.3 Resultaten

#### 9.3.1 Hoe beleven bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers de komst van de langsdammen?

Omwonenden en recreatievaarders waren voor de aanleg het meest positief over de komst van de langsdammen en zagen vooral de voordelen voor hoogwaterveiligheid. Dit beeld bleef na aanleg overeind. Het oordeel van bewoners is zelfs iets positiever geworden. Sportvissers waren op voorhand kritischer over de langsdammen dan de recreatievaarders, omdat zij zich zorgen maakten over de toegankelijkheid van het gebied en de mogelijke effecten op de visstand. In vergelijking met de nulmeting zijn sportvissers nu positiever over de langsdammen en de toegankelijkheid van het gebied, maar zij houden zorgen over de beschikbaarheid van goede visstekken en de langetermijneffecten van de langsdammen op de natuur.

Binnenvaartschippers maakten zich op voorhand zorgen over de smallere vaargeul, de reistijd, het brandstofverbruik, en de veiligheid door op- en afvarende recreatievaart.

Zij vinden de rivier met langsdammen minder goed te bevaren en zijn dan ook aanmerkelijk negatiever. De zorgen en het gebrek aan vertrouwen bij de sportvissers en binnenvaartschippers waren de aanleiding om deze doelgroepen actief te betrekken bij het monitoren van de effecten van de langsdammen. Deze participatieve monitoring was een innovatieve vorm van samenwerking.

### **9.3.2 Hoe beoordelen het Q-team van Ruimte voor de Rivier en het Wereld Natuurfonds de langsdammen?**

Het Q-team van het programma Ruimte voor de Rivier (Klijn et al., 2013; Klijn 2019) beoordeelde indertijd alle voorgestelde maatregelen van dat programma op ruimtelijke kwaliteit, dat stond voor een combinatie van multifunctionaliteit, duurzaamheid en schoonheid, in het bijzonder betreffende natuur, landschap en cultureel erfgoed. Voor het Q-team deden de langsdammen afbreuk aan het landschapsbeeld en de unieke identiteit van de Waal als meest dynamische en grootschalige van de Nederlandse grote rivieren.

De langsdammen verstenen de rivier verder en scheiden de gebruiksfuncties in plaats van ze te verweven, met harde scherpe grenzen in plaats van geleidelijke overgangen. Bovendien zijn de karakteristieke kribben en zandstrandjes inmiddels cultuurhistorisch waardevol en onderbreken de langsdammen de visuele samenhang die door de ruim 1000 kribben was ontstaan. Een meer acceptabele uitvoering zou bestaan uit lagere en smallere langsdammen die vaker onder water verdwijnen, niet uit bredere langsdammen in de vorm van langgerekte begroeide eilanden die het zicht op de rivier belemmeren.

Het Wereld Natuur Fonds spreekt eveneens reserves uit. Het fonds heeft zich op de hoogte gesteld van de waargenomen gunstige effecten op de natuur, maar wil pas een definitief oordeel vellen als bekend is hoe deze effecten zich op langere termijn ontwikkelen.

### **9.3.3 Hoe ervaart de commerciële en recreatieve scheepvaart de versmalde hoofdgeul en de splitsing in hoofd- en oevergeul?**

De recreatieve scheepvaart was voor de aanleg al positief over de komst van de langsdammen en is positief gebleven. De commerciële scheepvaart is sceptisch gebleven. De paradox is dat het systeem met langsdammen de vaarweg weliswaar verbetert tijdens extreme laagwaters en op lange termijn, maar in de dagelijkse ervaring van commerciële schippers toch gezien wordt als een aantasting van de vaarweg.

### **9.3.4 Hoe ervaren sportvissers de bevisbaarheid en vangsten in de oevergeul vergeleken met de oorspronkelijke situatie en met verlaagde kribben?**

De beleving van de pilot door sportvissers is in de loop van de tijd positiever geworden, mede dankzij de betrokkenheid in de participatieve monitoring.

### **9.3.5 Wat waren de ervaringen met de participatieve monitoring waarin belanghebbenden bij de monitoring van de pilot werden betrokken?**

De participatieve monitoring bestond uit drie verschillende onderdelen: het vrijwilligersproject Vissen langs de Dam, de samenwerking Varen langs de Dam, en het samenwerkingsverband WaalSamen.

Vissen langs de Dam was een gezamenlijk initiatief van de Radboud Universiteit, Universiteit Twente, Sportvisserij Nederland, Hengelsport Federatie Midden Nederland en Rijkswaterstaat Oost-Nederland.

Het doel was om hengelvangsten van vrijwilligers te registreren en om de ervaringen en belevissen met het vissen bij de langsdammen in kaart te brengen. Deze ervaringen en belevissen werden afgeleid uit ingevulde vragenlijsten, meldingen ad hoc, individuele gesprekken en ervaringen tijdens proefwedstrijden. De meest genoemde ervaringen zijn (i) materiaalverlies door oneffenheden in bodemprofielen, rommel op de rivierbodem en hoge stroomsnelheden in de oevergeul; (ii) wisselend succes met hengelvangsten en de invloed daarvan op motivatie en keuze om wel of niet bij de langsdammen te vissen; en (iii) beperkte toegankelijkheid van goede vislocaties in dit deel van de Waal, met name aan de noordzijde.

De Radboud Universiteit had Varen langs de Dam samen met Rijkswaterstaat Oost-Nederland en Koninklijke BLN-Schuttevaer opgezet om de effecten van de langsdammen op brandstofverbruik en vaargedrag te documenteren. Binnenvaartschippers bleken in de praktijk moeilijker te bereiken en te activeren dan de sportvissers. Het beoogde monitoringsnetwerk kon dan ook maar ten dele opgezet worden. De belangrijkste conclusies over de binnenvaart zijn gebaseerd op de Belevingsmonitor Binnenvaart (Heirbaut & van Noort, 2018; Verbrugge, 2018a). De doelgroep is over het algemeen tevreden over de markering op het langsdamtraject, maar de markering bij hoogwater blijft een aandachtspunt. Binnenvaartschippers zijn verdeeld in hun tevredenheid over de diepte van de vaargeul. Een derde van de respondenten geeft aan op dit traject op grotere afstand van de dammen te varen dan ze in een deel van de Waal met kribben zouden doen. Dit beperkt de ruimte in de vaargeul waardoor deze niet optimaal benut wordt. Schippers ervaren de vaargeul als smaller dan hij in werkelijkheid is en schrijven gevaarlijke situaties toe aan een suboptimaal gebruik van de vaargeul met meer drukte en minder ruimte om andere schepen te passeren. Ook de dwarsstroming bij openingen in de langsdammen speelt een rol.

Binnen WaalSamen werkt Rijkswaterstaat op innovatieve wijze samen met verschillende belanghebbenden om recht te doen aan de verschillende belangen. Alle partijen konden hierdoor hun problemen en aandachtspunten delen met de andere partners. Daarnaast was de mogelijkheid om te leren van andere organisaties een belangrijke motivatie. De partners vonden de samenwerking succesvol omdat deze voldeed aan de kernvoorwaarden vertrouwen, communicatie en leerproces. Een belangrijke factor voor het slagen bleek de ondersteuning. Het creëren en draaiende houden van een samenwerkingsverband als WaalSamen vraagt tijd en capaciteit. Rijkswaterstaat was als coördinator verantwoordelijk om dit te faciliteren. Het was daarom van belang dat het projectteam van Rijkswaterstaat voldoende capaciteit en ruimte kreeg om de werkzaamheden binnen WaalSamen uit te voeren.

De meerwaarde van het belevingsonderzoek en de participatieve monitoring ligt in de opgebouwde relaties en vertrouwensbanden met betrokken partners. WaalSamen bleek een vruchtbare bodem voor samenwerking en het creëren van draagvlak. Dat leverde niet alleen een omvangrijker monitoringsprogramma en grotere betrokkenheid van verschillende organisaties, maar ook concrete resultaten op het gebied van sociaal leren, onderling vertrouwen, duurzame relaties, en concrete adviezen voor de inrichting en het beheer van het gebied. De omstandigheden in de hoofdgeul en de oevergeulen zullen de komende jaren blijven veranderen. Dat beïnvloedt de belevings- en gebruikswaarde van het gebied. Het advies is daarom om de monitoring voort te zetten. Voor de binnenvaart is het belangrijk de vragen over dit Waaltraject ook op te nemen in de volgende Belevingsmonitor Binnenvaart en in op de doelgroep gerichte communicatie. De effecten van de langsdammen op de diepte van de vaargeul zijn een belangrijk onderwerp, net als het starten van een dialoog over vaargedrag en vaarveiligheid. De aanbeveling voor de sportvisserij is het opgebouwde vrijwilligersnetwerk te behouden en de activiteiten te continueren. Duidelijke communicatie via verschillende kanalen is geboden als de oevergeulen voor alle recreatievaart worden opengesteld.

## 9.4 Conclusie

De grote landschappelijke verandering als gevolg van de aanleg van langsdammen is van invloed op de functies die de rivier vervult en de manier waarop mensen het rivierengebied beleven. Als onderdeel van de pilot is daarom een onderzoek uitgevoerd naar beleving en participatie. Dit onderzoek had twee hoofddoelstellingen:

- 1 Het in kaart brengen hoe bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers (Figuur 9-1) de komst van de langsdammen beleven;
- 2 Het opzetten, uitvoeren en evalueren van een pilot voor participatieve monitoring om belanghebbenden bij de monitoring van de pilot langsdammen te betrekken.

Omwonenden en recreatievaarders waren van het begin af aan positief over de komst van de langsdammen. De beleving van de pilot door bewoners en sportvissers is in de loop van de tijd positiever geworden, maar de binnenvaart blijft nog sceptisch. Participatie in monitoring en onderzoek heeft het draagvlak en de waardering van de pilot vergroot.

# 10 Onderhoud

## 10.1 Hypothese en onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat formuleerde bij aanvang van de pilot de hypothese dat het variëren van de instroomopeningen in de langsdammen het mogelijk maakt om te sturen op de baggerinspanning in vaar- en oevergeul en op de autonome bodemdaling van de vaargeul. Hierbij doelt de term “autonome bodemdaling” op de rivierbodemerrosie als gevolg van normalisering en zandwinning. Het plan van aanpak (Buijse et al., 2019b) en aanvullingen tijdens de uitvoering van de evaluatie leiden tot de volgende onderzoeksvragen:

- 1 Wat is de invloed van langsdammen op het beheer en onderhoud van Rijkswaterstaat?
- 2 Welk baggeronderhoud wordt voorzien op basis van de gemodelleerde ontwikkeling van de bodemligging in hoofdgeul en oevergeul? Verschilt omvang en frequentie van het onderhoud met andere trajecten van de Waal? Kan de instelling van instroomopeningen dit onderhoud verminderen?
- 3 Wat is de vegetatieontwikkeling op de langsdam? Wat is het benodigde beheer en onderhoud wegens voornoemde profielveranderingen en vegetatieontwikkeling? Hoe verhoudt dit zich tot het beheer en onderhoud van kribben?

## 10.2 Methodiek

Onderhoud betreft de meer specifieke technische activiteiten om de constructie en het vaarwegprofiel in stand te houden. De effecten van de pilot op onderhoud zijn geëvalueerd op basis van de analyse van morfologische effecten, een inventarisatie van ervaringen binnen Rijkswaterstaat door Koen van Korlaar en gesprekken met Hendrik Havinga, Edo van Riel en Henk Eerden van Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Het volledige onderzoek wordt gepresenteerd in het deelrapport door Chavarrías et al. (2021).

## 10.3 Resultaten

### 10.3.1 Wat is de invloed van langsdammen op het beheer en onderhoud van Rijkswaterstaat?

Het onderhoud aan de langsdammen wordt uitgevoerd volgens een prestatiecontract. Activiteiten hiervoor betreffen het repareren van schade aan de langsdammen, het verwijderen van begroeiing, en het uitvoeren van baggerwerkzaamheden om het vaarwegprofiel in stand te houden. Als onderdeel van het prestatiecontract monitort de aannemer de staat van het onderhoud via jaarlijkse inspecties, gestandaardiseerde conditiemetingen volgens NEN2767 aan het begin en het einde van de looptijd van het contract, en incidentele inspecties na schademeldingen en tips of klachten uit de omgeving. Van Hoogenhuizen (2021) geeft een completer en gedetailleerder overzicht van gemaakte en voorziene onderhoudskosten. Hij concludeert dat aard en omvang van het toekomstig beheer en onderhoud in het traject ook afhankelijk is van de toekomstige functies van oevergeulen en langsdammen.

De profielen van de langsdammen en het dragend grondmassief zijn na aanleg niet vervormd door verzakkingen of afschuivingen. Ook zijn er geen noemenswaardige uitschuringskuilen ontstaan die de constructie aantasten. Volgens jaarlijkse vaststellingen van hun conditie zijn de dammen nog zo goed als nieuw. Voor constructieve aspecten hebben de langsdammen daarom nog geen onderhoud nodig gehad. Verder waarde de slechte toegankelijkheid de langsdammen vrij van vandalisme. Wel hebben aanvaringen schades veroorzaakt.

De kosten van herstel blijken voor een langsdam een veelvoud van die voor een krib. Ook de havenpalen die de in- en uitvaart van de nevengeulen voor recreanten markeren zijn aangevaren. Tabel 10-1 geeft een overzicht van de opgetreden schades. Het herstel van havenpalen kost circa 90 k€ per incident.

Tabel 10-1. Schade door aanvaringen van langsdammen in de Waal (bron: Gerard Wittenberg).

Datum	Schadenummer	Kilometer	Kosten (euro)	Schadebeeld
10-02-2016	7600002044	913,175	3 042	bestorting
26-02-2016	7600002056	918,900	122 446	havenpaal en bestorting
07-10-2017	7600002282	913,150	9 430	bestorting
14-12-2019	7600002621	918,900	raming: 192 000	havenpaal en bestorting

Er zijn geen intrinsieke redenen waarom het herstellen van de bestorting van een langsdam na aanvaring zoveel duurder zou moeten zijn dan het herstellen van kribben of oeververdedigingen. Het verschil komt door de gekozen granulaire opbouw zonder geotextiel. Als een langsdam bij hoogwater wordt aangevaren, ontstaat een gat dat fijner materiaal blootstelt aan de stroming. De stroming spoelt dat materiaal uit en verstoort de sortering van de filterlagen. Om dat te herstellen dient een groot stuk van de dam te worden afgegraven om hem vervolgens weer te kunnen opbouwen. Bij kribben of oeververdedigingen hoeft dat doorgaans niet omdat de stortsteen er op een geotextiel ligt.

Deskundigen van Rijkswaterstaat Oost-Nederland wijten de keuze voor een schadegevoelige granulaire opbouw zonder geotextiel aan de gekozen contractvorm op basis van design & construct (D&C). Hierin is de aannemer niet alleen verantwoordelijk voor de uitvoering maar ook voor het ontwerp. Een voordeel is dat de aannemer zo de ruimte krijgt om ontwerp en realisatie naar eigen inzichten te optimaliseren en innovaties toe te passen. Een nadeel is dat de onderhoudsfase vaak maar beperkt in de optimalisatie wordt meegenomen. De contractvorm wringt met de methodiek van life-cycle costing (LCC) die de totale kosten van assets beschouwt, voor de volledige levenscyclus van aanleg tot afbreken. Een D&C-organisatievorm doet daardoor onvoldoende recht aan de in LCC beoogde optimalisatie van onderhoud. De deskundigen menen dat een andere contractvorm geleid zou hebben tot een minder schadegevoelig ontwerp.

De deskundigen van Rijkswaterstaat Oost-Nederland wijzen ook op een ander nadeel van D&C-contracten. Om de beoogde ruimte voor optimalisatie en innovatie te geven, moet de opdrachtgever de uitvraag functioneel specificeren. Dat wil zeggen dat de opdrachtgever de gewenste prestatie van een systeem vastlegt in eisen op basis van de functies van het systeem. Het is echter niet eenvoudig om alle functie-eisen expliciet te benoemen voor constructies die al zijn uitontwikkeld via eeuwen van proefondervindelijke optimalisaties en innovaties. Eigenschappen van gangbare constructies kunnen zo in de specificatie vergeten worden. Bovendien geven ook aannemers vaak de voorkeur aan concrete uitvragen boven meer abstracte functionele specificaties.

De morfologische berekeningen met Delft3D geven inzicht in het benodigde baggeronderhoud in de hoofdgeul. Daarnaast zijn ook de oevergeulen in 2018 een keer gebaggerd. Circa 30.000 m<sup>3</sup> baggerspecie werd verwijderd, voornamelijk afkomstig van oevererosie.



**10.3.2 Welk baggeronderhoud wordt voorzien op basis van de gemodelleerde ontwikkeling van de bodemligging in hoofdgeul en oevergeul? Verschilt omvang en frequentie van het onderhoud met andere trajecten van de Waal? Kan de instelling van instroomopeningen dit onderhoud verminderen?**

De meetgegevens laten geen harde conclusie toe, maar de numerieke simulaties suggereren dat het baggeronderhoud geen significante veranderingen ondergaat. De gevonden verschillen zijn te verwaarlozen. Eventuele verschillen met andere trajecten van de Waal zijn niet veranderd.

**10.3.3 Wat is de vegetatieontwikkeling op de langsdam? Wat is het benodigde beheer en onderhoud wegens voornoemde profielveranderingen en vegetatieontwikkeling? Hoe verhoudt dit zich tot het beheer en onderhoud van kribben?**

Waargenomen is dat zowel langsdammen als kribben bij lagere afvoeren begroeid raken en dat deze begroeiing weer wegspoelt bij hoogwaters. De vegetatie op de langsdammen was in het algemeen minder dicht dan die op kribben. Bovendien produceert dezelfde biomassa aan vegetatie op langsdammen minder stromingsweerstand dan op kribben omdat de configuratie in stroomrichting georiënteerd is in plaats van loodrecht daarop. Toch is groenonderhoud nodig om de langsdammen vrij te houden van begroeiing. Wortels van begroeiing kunnen namelijk stenen van hun plek duwen. Begroeiing verhoogt bovendien de hoogwaterstanden, beperkt het zicht van schippers op de rivier en belemmert het vanuit landschappelijk oogpunt gewenste weidse uitzicht. Het verwijderen van begroeiing blijkt echter moeilijk uit te voeren. Door de grove sortering van de breuksteen is het lastig en zelfs gevaarlijk om hiervoor personeel over de langsdammen te laten lopen. Onderhoud vanaf het water is kostbaar omdat hiervoor een groot schip met een lange giek moet worden ingezet. Binnen het onderhoudscontract is het groenonderhoud daarom gestaakt. Tot nu toe zijn de dammen desondanks redelijk vrij gebleven van vegetatie omdat ze tijdens hogere afvoeren worden schoongespoeld. Rijkswaterstaat zoekt naar een oplossing voor toekomstig groenonderhoud en raadt aan om hierover bij de bouw van nieuwe langsdammen goed na te denken.

**10.4 Conclusie over hypothese van Rijkswaterstaat**

In principe zijn er geen significante verschillen gevonden tussen het onderhoud bij kribben en bij langsdammen. Wel waren er verschillen als gevolg van de specifieke uitvoering van de langsdammen met een grove sortering van breuksteen zonder geotextiel. De bodemligging wordt beïnvloed doordat de instelling van de instroomopeningen bepaalt hoeveel water door de hoofdgeul stroomt en hoeveel water door de oevergeul. Het principe van sturing werkt echter hoofdzakelijk voor de diepte in de vaarweg bij lage afvoeren, niet voor het reduceren van de baggerinspanning en de bodemerosie (§ 6.4). Vooralsnog zijn er geen effecten van de instellingen van de instroomopeningen gevonden op het sedimenttransport over de inlaatdrempels.

# 11 Integrale beantwoording van de hoofdvragen

## 11.1 Werkt het principe van de langsdammen voldoende om de beoogde nuttige toepassingen in de praktijk te realiseren?

De langsdammen staan voor een herinrichting van het zomerbed die het riviersysteem wijzigt. De pilot Langsdammen vormt een lokale proef voor een meer algehele systeemwijziging. De herinrichting biedt perspectief op een integrale oplossing voor meerdere rivierproblemen. Dankzij ruimtelijke diversificatie door scheiding van functies presteert het nieuwe systeem beter dan het oude systeem met kribben. De pilot bevestigt op hoofdlijnen de verwachtingen over de potentie van de systeemwijziging. Er zijn geen onvoorziene nadelen aan het licht getreden. De specifieke uitvoering van de pilot gaat echter niet ver genoeg om rivierproblemen volledig op te lossen. Dit stemt overeen met eerdere bevindingen van Arcadis (Berkhof et al., 2018), Buijse et al. (2018), Le et al. (2020) en Havinga (2020). De specifieke uitvoering van de pilot biedt wel mogelijkheden om de inrichting in de toekomst verder te verbeteren. De in de pilot gerealiseerde geleidelijke verandering van het dwarsprofiel tussen de bandijken valt rivierkundig te verkiezen boven een drastische wijziging in één keer. Dankzij de gecreëerde mogelijkheden voor verdere verbetering is het systeem met langsdammen meer toekomstbestendig dan het oude systeem met kribben.

Het systeem met langsdammen biedt de mogelijkheid om de bevaarbaarheid bij lage afvoeren te vergroten indien dit wordt toegepast in de trajecten waar de minst gepeilde diepten optreden. Het houdt tevens de rivier beter duurzaam bevaarbaar door het tegengaan van de bodemerrosie. Na aanleg van de pilot blijft de vaarweg voldoen aan de internationale normen voor bevaarbaarheid. Een paradox is dat het systeem met langsdammen de vaarweg weliswaar verbetert tijdens extreme laagwaters en op lange termijn, maar in de dagelijkse ervaring van schippers toch gezien wordt als een aantasting van de vaarweg.

De pilot heeft de kwaliteit van de natuur in het riviertraject sterk verhoogd. Recent onderzoek over de waarde van nevengeulen voor stroomminnende vissen laat zien dat het behoud van natuurwaarden kan vragen om periodiek onderhoud volgens cycli van gemiddeld 15 jaar, afhankelijk van de beoogde natuurwaarden en de snelheid van erosie- en sedimentatieprocessen (Stoffers et al, 2020).

De langsdammen hebben de maatgevende hoogwaterstanden minstens net zo goed verlaagd als het project kribverlaging. Aan de dijkversterkingsopgave volgens de nieuwe normering leveren de langsdammen een bescheiden positieve bijdrage.

De langsdammen leveren een geringe directe positieve bijdrage aan de zoetwatervoorziening tijdens droogte. Indirect kan het positieve effect toenemen als langsdammen de bodemerrosie tot staan brengen.

Omwonenden en recreatievaarders waren van het begin af aan positief over de komst van de langsdammen. De beleving van de pilot door bewoners en sportvissers is in de loop van de tijd positiever geworden, maar de binnenvaart blijft nog sceptisch. Participatie in monitoring en onderzoek heeft het draagvlak en de waardering van de pilot vergroot.

De instellingen van de instroomopeningen doen er niet toe bij extreme hoogwaters, maar beïnvloeden de afvoerverdeling over hoofdgeul en oeversgeul bij lagere afvoeren. Daarmee beïnvloeden ze ook de waterstanden en de door waterafleiding veroorzaakte erosie en sedimentatie. Bij gelijke afvoer naar de oeversgeul is er tot nu toe geen afzonderlijke invloed van de instellingen gevonden op het sedimenttransport over de inlaatdrempels.

## 11.2 In hoeverre zijn de langsdammen in potentie geschikt om elders te worden toegepast?

Het principe van twee stroomgeulen met regelmogelijkheden voor de afvoerverdeling over die geulen biedt perspectief voor een integrale herinrichting van de Rijntakken. De specifieke uitvoering van de pilot is nog verder te optimaliseren (Zuijderwijk & De Jong, 2021). Als langsdammen over een grotere lengte worden aangelegd, is hun effect op hoog- en laagwaterstanden groter. Een vergelijking van afzonderlijke trajecten wijst uit dat de pilot op de Waal stroomopwaarts en stroomafwaarts kan worden uitgebreid, conform het plan WaalSamen. Als ook voor de minder ruime IJssel langsdammen worden overwogen, dan zou het traject tussen km 955 (Olst) en 970 (Herxen) het meest geschikt zijn (Huppes, 2021). De oeversgeul zou dan in de uiterwaard moeten worden uitgegraven.

## 12 Literatuurverwijzingen

- Asselman, N. & P. de Grave (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Hoogwaterveiligheid. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Bergsma, J.H., B. Achterkamp & W.M. Liefveld (2012), Langsdammen Waal; Monitoring nulsituatie vis en macrofauna. Rapport 12-180, Bureau Waardenburg, Culemborg, Nederland.
- Berkhof, A., J. Kabout, R. Loeve, M. van de Paverd & D. Verhoeven (2018), MIRT onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken; Eindrapportage, "De Rivierbodem is de basis van alle belangen". Eindrapport MIRT onderzoek inclusief kostenramingen, Bijlage 1. Arcadis, IenW & Rijkswaterstaat Oost-Nederland, versie 9 mei 2018.
- Buijse, T., F. Klijn, E. Mosselman, H. de Vriend, T. Smits, S. Hulscher, T. Vellinga & H.J. Verhagen (2018), Bevindingen en aanbevelingen Reflectiegroep MIRT onderzoek Duurzame Bodemligging. Memo Deltares, TU Delft, Radboud Universiteit en Universiteit Twente, Delft, 7 mei 2018.
- Buijse, T., E. Mosselman, J. de Jong & M. Weeber (2019a). Langsdammen beoordeling, monitoring en synthese. Rapport 1210432, Deltares, Delft, juni 2019.
- Buijse, T., E. Mosselman, J. de Jong & M. Weeber (2019b). Plan van aanpak voor de pilot langsdammen Waal. Rapport 1210432, Deltares, Delft, juni 2019.
- Chavarrías, V., C.J. Sloff & E. Mosselman (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Morphology and maintenance. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Collas, F. P. L., Buijse, A. D., Hendriks, A. J., & Leuven, R. S. E. W. (2015), The use of species sensitivity distributions and monitoring to predict the ecological effect of longitudinal training dams. Bridging gaps between river science, governance and management, 19.
- Collas, F.P.L., N. van Kessel, L. van den Heuvel, A.D. Buijse & R.S.E.W. Leuven (2016), Langsdammen Waal: Resultaten vismonitoring 2016. Reeks Verslagen Milieukunde, 54, Radboud Universiteit, Deltares en Bureau Waardenburg. 11 oktober 2016.
- Collas, F, T. Buijse & R. Leuven (2018a), Langsdammen in de Waal: kansen voor juveniele vis in druk bevaren rivieren. Visionair Vol.48, pp.9-11.
- Collas, F.P.L., Kessel, N. V., Buijse, A. D., & Leuven, R.S.E.W. (2018b), Maandelijkse vismonitoring oevergeul langsdammen en kribvakken gedurende 2017-2018.
- Collas, F.P.L., A.D. Buijse, L. van den Heuvel, N. van Kessel, M.M. Schoor, H. Eerden & R.S.E.W. Leuven (2018c), Longitudinal training dams mitigate effects of shipping on environmental conditions and fish density in the littoral zones of the river Rhine. Science of the Total Environment 619-620, pp.1183-1193.
- Collas, F.P.L. (2019), Preferences and bottlenecks: Predicting riverine species occurrences under changing abiotic conditions. PhD thesis, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands, 315 pp.
- Collas, F.P.L., N.Y. Flores, M.M. Schoor & R.S.E.W. Leuven (2019a), Substraatkartering van oevergeulen bij langsdammen in de Waal. Verslagen Dierecologie en Fysiologie 2019-3, Radboud Universiteit, Nijmegen.

- Collas, F.P.L., T.V. de Ruijsscher, A.D. Buijse, A.J. Paarlberg, R.S.E.W. Leuven & A.J.F. Hoitink (2019b), Longitudinal training dams — river training of the 21st century. Abstract 6th biennial Symposium of the International Society for River Science (ISRS), Vienna, Austria, 8–13 September 2019, p.263.
- Collas, F.P.L., G.N.L. van Oudenhove, A.D. Buijse, M.M. Schoor & R.S.E.W. Leuven (2020a), Effects of longitudinal training dams on macroinvertebrate assemblages in the river Waal. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.51-52.
- Collas, F.P.L., N.Y. Flores, R. van Aalderen, F. Bosman, M.M. Schoor, L.N.H. Verbrugge, N. van Kessel, W. Romeijn, B. Achterkamp, W. Liefveld, A.D. Buijse & R.S.E.W. Leuven (2020b), Rapportage natuurgegevens langsdammen Waal 2016 – 2020. Rapport Radboud Universiteit, Rijkswaterstaat, Sportvisserij Nederland, Hengelsport Federatie Midden Nederland, Deltares, Bureau Waardenburg en Universiteit Twente, Reeks Verslagen Dierecologie en Fysiologie Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Czapiga, M., A. Blom & E. Viparelli (2021), Efficacy of longitudinal training walls to mitigate riverbed erosion. PowerPoint presentation, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- De Bruin, D., D. Hamhuis, L. van Nieuwenhuijzen, W. Overmars, D. Sijmons & F. Vera (1987), Ooievaar, De toekomst van het riviereengebied. Stichting Gelderse Milieufederatie.
- De Jong, J., V. Chavarrías & W. Ottevanger (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Hydromorphological data and observations. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- De Ruijsscher, T.V., S. Naqshband & A.J.F. Hoitink (2018a), Flow Bifurcation at a longitudinal training dam: a physical scale model. Book of abstracts, NCR Days 2018: The future river, 8-9 February, Delft, Eds. Y. Huismans, K.D. Berends, I. Niesten & E. Mosselman, Netherlands Centre for River Studies publication 42-2018, pp.150–151.
- De Ruijsscher, T.V., S. Naqshband & A.J.F. Hoitink (2018b), Flow Bifurcation at a longitudinal training dam: Effects on local morphology. In A. Paquier & N. Rivière (editors), River Flow 2018 — Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics, Lyon-Villeurbanne, France, 5–8 September 2018, volume 40 of E3S Web of Conferences, page 05020, doi:10.1051/e3sconf/20184005020.
- De Ruijsscher, T.V., A.J.F. Hoitink, S. Naqshband & A.J. Paarlberg (2019), Bed morphodynamics at the intake of a side channel controlled by sill geometry. *Advances in Water Resources*, Vol.134, 103452, doi:10.1016/j.advwatres.2019.103452.
- De Ruijsscher, T.V. (2020), Aligned with the flow; Morphodynamics in a river trained by longitudinal dams. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, April 2020, ISBN 978-94-6395-166-1.
- De Ruijsscher, T.V., B. Vermeulen & A.J.F. Hoitink (2020a), Diversion of flow and sediment toward a side channel separated from a river by a longitudinal training dam. *Water Resources Research*, AGU, Vol.56, No.6, e2019WR026750.
- De Ruijsscher, T.V., S. Naqshband & A.J.F. Hoitink (2020b), Effect of non-migrating bars on dune dynamics in a lowland river. *Earth Surface Processes and Landforms*, doi:10.1002/esp.4807.
- De Ruijsscher, T.V., B. Vermeulen & A.J.F. Hoitink (2020c), Flow bifurcation at a longitudinal training dam: a field study. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.59-60.

- De Ruijsscher, T.V., B. Vermeulen & A.J.F. Hoitink (2020d), Flow patterns at the side channel entrance of a longitudinal training dam. Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2020), Delft, The Netherlands, 7–10 July 2020, Editors W. Uijttewaai, M.J Franca, D. Valero, V. Chavarrías, C. Ylla Arbós, R. Schielen & A. Crosato, CRC Press/Balkema, Leiden, the Netherlands, ISBN 978-0-367-62773-7.
- De Ruijsscher, T.V., S. Naqshband, B. Vermeulen & A.J.F. Hoitink (2020e), Morfodynamische effecten van langsdammen in de Waal. H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling, ISSN 0166-8439, december 2020, pp.20–23.
- Eerden, H., E. van Riel, R. de Koning, E. Zemplak & N. Aziz (2011), Integraal ontwerp pilot langsdammen Waal. Technical report, Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Arnhem, the Netherlands.
- Eerden, H. & E. Mosselman (2020), Effects of navigation on sediment distribution at river bifurcations. In: Managing changing rivers: Proceedings NCR Days 2020, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.35-36.
- Flores, N.Y., F.P.L. Collas, M.M. Schoor, C.K. Feld & R.S.E.W. Leuven (2020), Assessing the potentially occurring fractions of native and alien freshwater mussels in shore channels along longitudinal training dams in the river Waal. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.47-48.
- Flores, N.Y., F.P.L. Collas & R.S.E.W. Leuven (2021), Shore channel sedimentary processes, passability by migrating fish and habitat suitability. Technical report, Radboud University, Nijmegen, the Netherlands.
- Ganzevoort, W. & R.J.G. van den Born (2019), Exploring place attachment and visions of nature of water-based recreationists: the case of the longitudinal dams. Landscape Research, Vol.44, pp.149-161.
- Havinga, H. (2020), Towards sustainable river management of the Dutch Rhine River. Water, 12, 1827.
- Heirbaut, T. & L. van Noort (2018), Belevingsmonitor Binnenvaart. Rapport I&O Research, 2018/201, Enschede, December 2018.
- Huppes, N. (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Toepasbaarheid elders. Rapport Witteveen+Bos, 117822/21-011.411, Rotterdam, juli 2021.
- Huthoff, F., A. Paarlberg, H. Barneveld & M. van der Wal (2011), Rivierkundig onderzoek WaalSamen; Pilotstudie Langsdammen. Rapport PR2096, HKV Lijn in Water & Deltares.
- Indah-Everts, S.N. & M.I. Hermans (2021), Evaluatie pilot Langsdammen Waal; Interpretatie AIS-data. Rapport Marin, 32127-1-MO-rev.1.0, Wageningen, februari 2021.
- Jammers, S.M.M. (2017), Sediment transport over sills of longitudinal training dams. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft, April 2017.
- Klijn, F., D. de Bruin, M.C. de Hoog, S. Jansen & D.F. Sijmons (2013), Design quality of room-for-the-river measures in the Netherlands: role and assessment of the quality team (Q-team). International Journal of River Basin Management, Vol.11, No.3, pp.287-299.
- Klijn, F. (2019), Gezocht: een rivierloods; Om de toekomst van onze rivieren. Intreerede, TU Delft, 30 januari 2019.

- Koopman, K. R., Collas, F. P., Breure, A. M., Lenders, R. H. J., Velde, G., & Leuven, R. S. (2018), Predicting effects of ship-induced changes in flow velocity on native and alien molluscs in the littoral zone of lowland rivers. *Aquatic Invasions*, Vol.13, pp.481-490.
- Kurstjens, G. (2016) Effect van langsdammen op stroomdalflora langs de Waal - 0 situatie na aanleg. Rapport Kurstjens Ecologisch Adviesbureau, Beek-Ubbergen, Nederland.
- Kurstjens, G. (2019) Effect van langsdammen op stroomdalflora langs de Waal vier jaar na aanleg. Rapport Kurstjens Ecologisch Adviesbureau, Beek-Ubbergen, Nederland.
- Lauchlan, C. (2004), Experimental investigation of bed-load and suspended-load transport over weirs. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.42, No.5, pp.549-555.
- Le, T.B., A. Crosato & W.S.J. Uijtewaal (2018a), Long-term morphological developments of river channels separated by a longitudinal training wall, *Advances in Water Resources*, Vol.113, pp.73-85, doi: 10.1016/j.advwatres.2018.01.007.
- Le, T.B., A. Crosato, E. Mosselman & W.S.J. Uijtewaal (2018b), On the stability of river bifurcations created by longitudinal training walls. Numerical investigation, *Advances in Water Resources*, Vol.113, pp.112-125, doi: 10.1016/j.advwatres.2018.01.012.
- Le, T.B. (2018), Training rivers with longitudinal walls: long-term morphological responses. PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 978-94-6384-002-6.
- Le, T.B., A. Crosato & A. Montes Arboleda (2020), Revisiting Waal river training by historical reconstruction. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.146, No.5, 05020002.
- Marchesin, J. (2018), Analysis of data from the longitudinal training dams Waal River. Individual traineeship report, University of Tours, France.
- Omer, A., W. Ottevanger & M. Yossef (2019a), Case study of morphological modelling with Delft3D4 and Delft3D-FM; Longitudinal dams in the Waal River. Report 11202188-004-ZWS-0004, Deltares, Delft, March 2019.
- Omer, A., W. Ottevanger & M. Yossef (2019b), Modelling the morphological effects of longitudinal dams in the Midden-Waal. Report 11203681-002-ZWS-0001, Deltares, Delft, December 2019.
- Omer, A., M. Yossef, K. Stoff, W. Ottevanger, A. van Dongeren, A. Becker & A. Sieben (2020), Modelling the morphological effects of longitudinal dams in the Midden-Waal. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.104-105.
- Osorio, A.L.N.A., E. Mosselman, M. Franca & C. Creech (2020), Longitudinal training walls on the Waal River (Netherlands) as a river training alternative. In: *Transporte de sedimentos: da bacia hidrográfica até a foz*, XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 9-13 November 2020, Campinas, Brazil.
- 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.
- Reeze, B., A. van Winden & D. Oomen (2016), Inventarisatie van zandoverslag op de oeverwal van de Waaltrajecten met langsdammen in het jaar 2016. Bureau Strooming.

- Rijkswaterstaat (2019), Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de grote rivieren, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, versie 5.0, juni 2019.
- Rijkswaterstaat (2020), Richtlijnen vaarwegen 2020. Rijkswaterstaat WVL, redactie O.C. Koedijk, Rijswijk, juli 2020, ISBN 978-90-9033423-3.
- Rudolph, M. (2018), Measures for mitigating the ongoing bed degradation in the German and Dutch Rhine River - An Indicative assessment using idealized models of the Waal Branch. MSc thesis, Delft University of Technology and Aachen University, July 2018.
- Schlieff, D. (2018), Morfologische ontwikkeling langsdam oevergeulen - Onderzoek naar de morfologie van de oevergeulen langsdammen Waal in relatie tot habitatontwikkeling. Stageverslag bij Rijkswaterstaat.
- Sieben, A. (2020), Overzicht afvoermetingen 2016-2019 project monitoring langsdammen. Notitie Rijkswaterstaat WVL, 7 februari 2020.
- Snoeij, G. (2021), De invloed van langsdammen op het scheepvaartverkeer. Afstudeerrapport, Hogeschool Rotterdam in samenwerking met Koninklijke BLN-Schuttevaer, Rotterdam, 12 januari 2021.
- Spies, W.C. (2009), Effects of longitudinal river dams on the hydrodynamics and morphology in the Middle Waal. MSc Thesis, Wageningen University, Wageningen, 23 juli 2009.
- Stoffers, T., F.P.L. Collas, A.D. Buijse, G.W. Geerling, L.H. Jans, N. van Kessel, J.A.J. Verreth & L.A.J. Nagelkerke (2020), 30 years of large river restoration: How long do restored floodplain channels remain suitable for targeted rheophilic fishes in the lower river Rhine? *Science of the Total Environment*.
- Van den Born, R.J.G., L.N.H. Verbrugge & W. Ganzevoort (2020), Assessing stakeholder perceptions of landscape and place in the context of a major river intervention: a call for their inclusion in adaptive management. *Water Policy*, Vol.22, No.1, pp.19-36, <https://doi.org/10.2166/wp.2019.073>.
- Van Denderen, P., E. Kater, L. Jans & R. Schielen (2020), The initial morphological impact of the longitudinal dams. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.41-42.
- Van den Heuvel, L. (2017), Participatieve monitoring en evaluatie in Nederlands waterbeheer: Casus 'WaalSamen'. MSc thesis in Science in Society (supervisie R.J.G. van den Born en L.N.H. Verbrugge), Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Van den Heuvel, L., L.N.H. Verbrugge & R.J.G. van den Born (2018), Collaborative monitoring in Dutch river management: Case study WaalSamen. Book of abstracts, NCR Days 2018: The future river, 8-9 February, Delft, Eds. Y. Huismans, K.D. Berends, I. Niesten & E. Mosselman, Netherlands Centre for River Studies publication 42-2018, pp.74-75.
- Van der Mark, R. & R. van der Wijk (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Vaarweg. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Van der Vat (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Zoetwatervoorziening. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Van Hoogenhuizen, M. (2021), Beheer en onderhoud langsdammen. Document Rijkswaterstaat, registratienummer RWS-2021/31925.



- Van Linge, B.W. (2017), Hydraulic evaluation of longitudinal training dams. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft, June 2017.
- Van Os, W.J. (2020), Bed-load transport over inlet sills of longitudinal training walls; Experimental study. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft, May 2020.
- Van Os, A., L. Lokin, E. Mosselman, W. Uijtewaal, R.J. Labeur & A.L. Osorio (2020a), Experimental study on bed-material transport over entrance sills at longitudinal training walls. Book of abstracts, NCR Days 2020: Managing changing rivers, 13-14 February, Nijmegen, Eds. M.P. Boersema, R.M.J. Schielen, E. van Eijsbergen & J.G. Rinsema, Netherlands Centre for River Studies publication 44-2020, pp.26-27.
- Van Os, W.J., W.S.J. Uijtewaal, R.J. Labeur, A.L. Osorio, E. Mosselman & L.R. Lokin (2020b), Bed-material transport over entrance sills at longitudinal training walls. Proceedings of the 10th Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2020), Delft, The Netherlands, 7–10 July 2020, Editors W. Uijtewaal, M.J. Franca, D. Valero, V. Chavarrias, C. Ylla Arbós, R. Schielen & A. Crosato, CRC Press/Balkema, Leiden, the Netherlands, ISBN 978-0-367-62773-7, pp.389-395.
- Van Weerdenburg, R.J.A. (2018), Measured change in bed elevation and surface texture near longitudinal training dams in the Waal River. Honours Programme master thesis, CIEAESM4015, Delft University of Technology, Delft, 31 May 2018.
- Van Winden, A., B. Reeze, B. & P. Veldt (2018), Inventarisatie van zandoverslag op de oeverwal van de Waaltrajecten met langsdammen in het voorjaar 2018. Bureau Strooming.
- Van Winden, A. (2020), Weinig neerslag in de stroomgebieden en dalende waterstanden. Blog Waterpeilen.nl, Nieuws over waterstanden uit rivierenland, 12 januari 2020, <https://www.waterpeilen.nl/berichten/weinig-neerslag-de-stroomgebieden-en-dalende-waterstanden>.
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2015a), Why social science matters in river management: involvement of local stakeholders in monitoring the effects of room for the river measures in the Netherlands. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Vol.17, EGU2015-12956-1.
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2015b), Belevingsonderzoek langsdammen: nulmeting onder bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers. Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verbrugge, L.N.H., W. Ganzevoort & R.J.G. van den Born (2016), Who's in and why? Stakeholder incentives for participatory monitoring in river management. In: International Conference on Citizen Observatories for Water Management (COWM 2016).
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2017), Vissen langs de dam 2016: Uitkomsten participatieve monitoring langsdammen Waal. Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verbrugge, L.N.H., W. Ganzevoort & R.J.G. van den Born (2017a), Belevingsonderzoek langsdammen Waal: Meting 2016 onder bewoners, sportvissers, recreatievaarders en binnenvaartschippers. Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verbrugge, L.N.H., W. Ganzevoort, J.M. Fliervoet, K. Panten & R.J.G. van den Born (2017b), Implementing participatory monitoring in river management: The role of stakeholders' perspectives and incentives. Journal of Environmental Management, Vol.195, pp.62-69.
- Verbrugge, L.N.H. (2018a), Belevingsmonitor Binnenvaart – samenvatting resultaten langsdammen.

- Verbrugge, L.N.H. (2018b), Vissen langs de dam 2017 - Jaarverslag. Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verbrugge, L.N.H., W. Ganzevoort, & R.J.G. van den Born (2018), Belevingsonderzoek langsdammen Waal. Brochure verschenen in het kader van het onderzoeksprogramma RiverCare. Uitgave Radboud Universiteit, Nijmegen.
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2018a), The role of place attachment in public perceptions of a re-landscaping intervention in the river Waal (The Netherlands). *Landscape and Urban Planning*, Vol.177, pp.241-250.
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2018b), Involving citizens in monitoring river interventions: Lessons learned from a river Waal case study. Book of abstracts, NCR Days 2018: The future river, 8-9 February, Delft, Eds. Y. Huismans, K.D. Berends, I. Niesten & E. Mosselman, Netherlands Centre for River Studies publication 42-2018, pp.62-63.
- Verbrugge, L.N.H., M. Buchecker, X. Garcia, S. Gottwald, S. Müller, S. Præstholt & A.S. Olafsson (2019), Integrating sense of place in planning and management of multifunctional river landscapes: experiences from five European case studies. *Sustainability Science*, Vol.14, pp.669–680.
- Verbrugge, L.N.H. (2019a), Vissen langs de dam 2018 - Jaarverslag. Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat Oost-Nederland, University of Twente, Enschede.
- Verbrugge, L.N.H. (Ed.) (2019b), WaalSamen: Samen werken aan duurzaam leven met water. Brochure verschenen in het kader van het onderzoeksprogramma RiverCare. Uitgave Universiteit Twente, Enschede. Link: <https://bit.ly/2J0bZh0>.
- Verbrugge, L.N.H. & R.J.G. van den Born (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Beleving en participatie. Radboud Universiteit en Universiteit Twente in samenwerking met Deltares, Delft, februari 2021.
- Visser, P.J. (2000), Bodemontwikkeling Rijnsysteem: Een verkenning van omvang, oorzaken, toekomstige ontwikkelingen en mogelijke maatregelen. Rapport van studie voor Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Technische Universiteit Delft, Delft, oktober 2000.
- Vuik, V. (2010), Numerical modeling of sediment transport over hydraulic structures. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft, June 2010.
- Wright, N. & A. Crosato (2011), The hydrodynamics and morphodynamics of rivers. In: *Treatise on water science*, Ed. Peter Wilderer, Vol. 2, Academic Press, Oxford, pp.135–156.
- Zagonjoli, M. (2017), Lowering the flow behind the longitudinal dams; Hydraulic effect of measures. Report 11200536-015, Deltares, Delft, December 2017.
- Zuijderwijk, W.M. & J. de Jong (2021), Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Optimalisatie. Rapport Witteveen+Bos & Deltares, 117743/20-006.749 (Wi+Bo), 11204644 (Deltares), Delft, september 2021.

## A Begrippenlijst

Bakenlijn	Denkbeeldige belijning tussen de bakens op de koppen van kribben of vervangende tonnen, strekdammen en oevers. De bakenlijn ligt op de kruin van de langsdammen.
Bevaarbare breedte	Breedte van het water tussen de denkbeeldige lijnen die op de Bovenrijn en de Waal op 30 meter uit de bakenlijnen of op 5 meter uit de overige drijvende markering liggen.
Gebruikte rivierbreedte	Breedte van het water tussen de 5%- en 95%-percentiellijnen van scheepspassages. Dit betekent dat 90% van de schepen de aldus gedefinieerde rivierbreedte passeren.
Hoofdgeul	Primaire stroomgeul in het zomerbed.
Insteekbreedte	Afstand waarover de normaallijn ten opzichte van de bakenlijn verder de rivier in ligt. Langs de Waal en de Nederrijn is de insteekbreedte dermate klein dat de begrippen "bakenlijn" en "normaallijn" vrijwel samenvallen en door elkaar gebruikt worden.
Nevengeul	Secundaire stroomgeul in het winterbed.
Normaalbreedte	Breedte van de rivier tussen de normaallijnen langs de linkeroever en de rechteroever.
Normaallijn	Denkbeeldige belijning langs de bakens op de koppen van kribben of vervangende tonnen, strekdammen en oevers, op een afstand ter grootte van de insteekbreedte verder de rivier in dan de bakenlijn. Langs de Waal en de Nederrijn is de insteekbreedte dermate klein dat de begrippen "bakenlijn" en "normaallijn" vrijwel samenvallen en door elkaar gebruikt worden. De normaallijn ligt vrijwel op de kruin van de langsdammen.
Oevergeul	Secundaire stroomgeul in het zomerbed, gescheiden van de hoofdgeul door een langsdam.
OLR	Overeengekomen Lage Rivierstand. Dit is de waterstand die 20 ijsvrije dagen per jaar onderschreden wordt en dus in ongeveer 95% van de tijd wordt overschreden. Deze waterstand is in 2012 beleidsmatig vastgesteld en komt momenteel overeen met de waterstand die behoort bij een afvoer van 1 020 m <sup>3</sup> /s bij Lobith.
Stroomgeul	Natte doorsnede binnen het zomerbed.
Vaarbreedte	Met de afvoer variërende breedte waarover de rivier minstens 2,80 m diep is, met een bovengrens die gelijk is aan de afstand tussen de normaallijnen.
Vaargeul	Wettelijk vastgestelde geul van 150 m breed die onderhouden wordt op 2,80 m onder OLR. De geul ligt niet in de as van de rivier, maar volgt de diepe delen (de buitenbochten). Er is ruimte gereserveerd voor mogelijk toekomstige uitbreiding van de vaargeulbreedte van 150 meter naar 170 meter.
Vaarweg	Deel van het zomerbed tussen de bakenlijnen.
Winterbed	Rivierbed tussen de bandijken en eventuele hogere gronden.

Zomerbed

Rivierbed tussen de zomerkades, bestaande uit een hoofdgeul, kribvakken, droogvallende oevers en eventueel een oevergeul.

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

**Deltares**

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