

Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Functie Vaarweg



Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Functie Vaarweg

Auteur(s)

Rolien van der Mark

Remi van der Wijk

Voorkant: Langsdam bij Dreumel (foto door Frank Collas)

Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal

Functie Vaarweg

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	De heer J. Sieben
Referenties	Zaaknummer 31154483
Trefwoorden	Langsdammen, vaarweg, vaargeul, morfologie, waterdiepte, vaarbreedte, dwarsstroming, AIS, vaargedrag

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	30-09-2021
Projectnummer	11204644-009
Document ID	11204644-009-ZWS-0003
Pagina's	86
Status	definitief

Auteur(s)

	R. van der Mark	Deltares
	R. van der Wijk	Deltares

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Rolien van der Mark 	Jurjen de Jong 	Bianca Peters 	

Samenvatting

Langsdammen in een rivier zijn naar verwachting gunstiger voor hoogwaterveiligheid, vaarweg, natuur en zoetwatervoorziening dan kribben. Daarom zijn als een pilot tussen 2014 en 2016 in de Waal bij Wamel, Dreumel en Ophemert (rivierkm 911.5 - 921.5) drie langsdammen aangelegd, onder de vlag van WaalSamen als initiatief vanuit RWS-ON. De pilot moet uitwijzen of de verwachte baten in de praktijk daadwerkelijk behaald worden zonder excessieve toename van beheer en onderhoud. Rijkswaterstaat heeft aan Deltares gevraagd om een integrale eindevaluatie te verzorgen van de pilot langsdammen. Een onderdeel hiervan (voorliggend werkpakket WP7) is de analyse van het effect van langsdammen op de functie Vaarweg.

De bedoeling van de pilot Langsdammen is om via de opgedane praktijkervaring meer inzicht en zekerheid te krijgen van de verwachte effecten. Er wordt verwacht dat door vervanging van kribben door langsdammen (a) de bodemerosie afremt waardoor harde lagen elders in de Waal minder snel een knelpunt vormen, (b) de normaalbreedte verkleint en daarmee in principe de waterstand ten tijde van laagwater opzet, en (c) langsdammen geen kribvlammen (ondieptes) creëren zoals kribben dit wel doen. Deze verwachte effecten zijn positief voor de rivier als vaarweg.

WP7 richt zich op het beoordelen van de ontwikkelingen in waterdiepte, vaarbreedte, dwarsstroming en vaargedrag. Deze parameters karakteriseren het functioneren van de vaarweg. De analyse van waterdiepte, vaarbreedte en dwarsstroomsnelheid is uitgevoerd aan de hand van zowel metingen (WP0) als Delft3D-berekeningen (WP1). Het vaargedrag is geanalyseerd op basis van reistijden en gevolgde vaarbanen uit AIS-data (WP4).

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 benedenstrooms 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 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 m³/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 gemiddelde diepte in de vaargeul is ter hoogte van de langsdammen gelijk aan die bovenstrooms. Een eventuele toe- of afname in diepte als gevolg van de aanleg van langsdammen verandert dit globale beeld niet.

De beschikbare breedte waarbinnen het overal dieper is dan 2,8 m neemt ter hoogte van de langsdammen met tientallen meters af ten opzichte van het bovenstroomse traject. Bij hoge afvoer bedraagt de afname in vaarbreedte 30 m, in lijn met de reductie van de normaalbreedte. Bij lage afvoer en bij de gekozen definitie van vaarbreedte kan de afname lokaal meer dan 30 m bedragen op locaties waar aanzanding heeft plaatsgevonden. De vaarweg blijft voldoen aan de internationale afspraak van een 150 m brede en 2,8 m diepe vaargeul ten opzichte van OLR. 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.

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) behoeft 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.

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.

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. Ondanks dat het gros van de schepen bij lage afvoer binnen de vaargeul vaart, is het ruimtegebruik gereduceerd met circa 5 m. Dit suggereert extra voorzichtigheid van de schippers. De beschikbare ruimte wordt bij hoge afvoer goed benut. De bevaarbare breedte is met 30 m afgenomen ter hoogte van de langsdammen, terwijl het trajectgemiddelde ruimtegebruik bij hoge afvoer met 18 m is afgenomen. Bij hogere afvoer varen schippers dichters op de dammen dan bij lage afvoer. Bij alle afvoeren wordt ook dichters op de dammen gevaren dan langs bovenstroomse kribkoppen. Bij ontmoetingen ter hoogte van langsdammen varen schepen noodgedwongen dichters 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 het vaargedrag in termen van 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, ook na afloop van de monitoringsperiode. Overwogen wordt daarom om de oevergeulen niet meer open te stellen voor recreatievaart. Dit biedt mogelijkheden om de openingen anders in te richten, met meer waterstandsopzet als resultaat. We bevelen aan dit verder te onderzoeken. Het verdient ook 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.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Opdracht en afbakening WP7 – Functie Vaarweg	11
1.3	Begrippenlijst	12
1.4	Aanpak	13
1.5	Overzicht en gebruik van relevante meetdata	13
1.6	Organisatie	14
2	Waterdiepte en vaarbreedte – initiële ontwikkeling	15
2.1	Inleiding	15
2.2	Waterdiepte	15
2.2.1	Theoretisch effect waterstand en waterdiepte (modelberekeningen)	15
2.2.1.1	Modelberekeningen	15
2.2.1.2	Waterstand	15
2.2.1.3	Waterdiepte	17
2.2.2	Evaluatie aan de hand van metingen	20
2.2.2.1	Waterstand	20
2.2.2.2	Bodemligging en diepte t.o.v. OLR	23
2.2.2.3	Minst Gepeilde Diepte (MGD)	27
2.2.2.4	Onderhoudswerkzaamheden	30
2.3	Vaarbreedte	31
2.3.1	Ligging vaargeul in de beschikbare ruimte	31
2.3.2	Beschikbare breedte bij verschillende afvoeren	33
2.4	Conclusies	35
3	Waterdiepte en vaarbreedte – Toekomstige ontwikkeling	37
3.1	Inleiding	37
3.2	Bodemligging	37
3.3	Diepte in de vaargeul bij OLR	40
3.4	Vaarbreedte	41
3.5	Vaargeulonderhoud	41
3.6	Conclusies	43
4	Langs- en dwarsstroming	44
4.1	Inleiding	44
4.2	Aanpak	46
4.3	Interpretatie gesimuleerde dieptegemiddelde stroomsnelheden	46
4.3.1	Langsstroming	46
4.3.2	Dwarsstroming	51
4.4	Beoordeling dwarsstroming conform Richtlijnen Vaarwegen	58
4.5	Conclusies	61
5	Vaargedrag	62
5.1	Inleiding	62
5.2	Afstand tussen schepen en langsdammen gemeten met lasergun	62
5.3	AIS-analyse naar reistijden en ruimtegebruik	63
5.3.1	Reistijd en vaarsnelheid	63

5.3.2	Ruimtegebruik en schrikafstand	64
5.4	Vaarweggebruik door recreatievaart en interactie met beroepsvaart	68
5.4.1	Recreatievaart in de oevergeul	68
5.4.2	Nautische veiligheid en interactie recreatievaart en beroepsvaart	70
5.5	Conclusies	70
6	Conclusies en slotopmerkingen	72
	Referenties	75
A	Visuele interpretatie van de waterdiepte op basis van statistiek	77
B	Bovenaanzichten van binnenbochten tbv beoordeling schrikafstand	81
B.1	Opvaart langs linkeroever	81
B.2	Afvaart langs rechteroever	84

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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

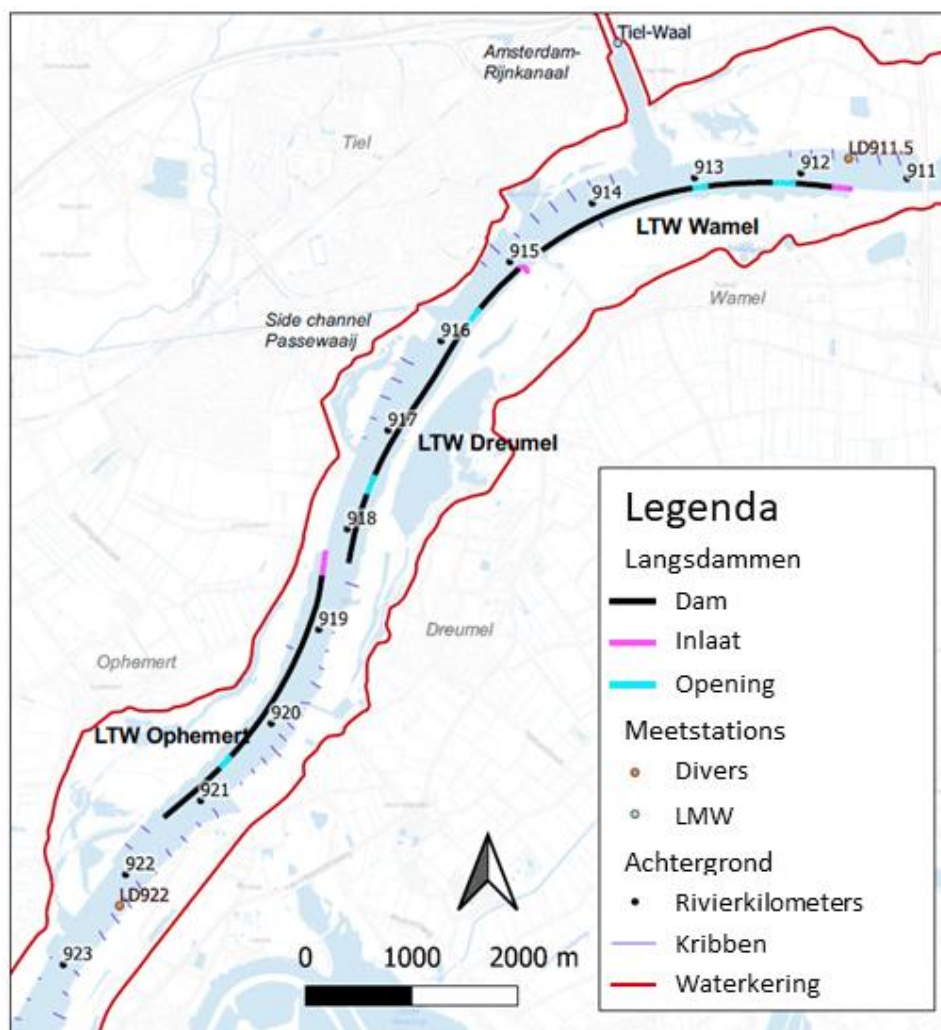
Voor deze integrale aanpak heeft Rijkswaterstaat Oost-Nederland een idee gelanceerd onder de werknaam WaalSamen. Dit is een plan voor herinrichting van het zomerbed in de gehele Waal. De herinrichting wijzigt het principe van het bestaande normalisatiesysteem door het zomerbed te verdelen in twee parallelle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

Voor de pilot werd het Waaltraject Wamel-Ophemert (km 911.5-921.5) bij Tiel gekozen (Figuur 1.1). Om redenen van efficiëntie werd de pilot tegelijk uitgevoerd met Fase III van het project Kribverlaging Waal van het programma Ruimte voor de Rivier. Hiervoor leverde Rijkswaterstaat Oost-Nederland op 30 juni 2011 de producten van een SNIP-3-besluit op aan de Programmadirectie Ruimte voor de Rivier van Rijkswaterstaat, inclusief een omwisselbesluit om geplande kribverlaging te vervangen door langsdammen. De Staatssecretaris van Verkeer en Waterstaat bekrachtigde dit eind 2011. De langsdammen tussen Wamel en Ophemert werden vervolgens in de periode van augustus 2014 tot maart 2016 gerealiseerd.

Voor, tijdens en na de aanleg van de langsdammen is een uitgebreid monitorings- en onderzoeksprogramma uitgevoerd door de partners van de samenwerkingsovereenkomst 'WaalSamen'. Dit programma is afgesloten met een integrale eindevaluatie, onderverdeeld in 12 inhoudelijke deelprojecten (Tabel 1-1) die worden aangeduid met "WP" (werkpakket). Voor u ligt het deelrapport van WP7 over het onderdeel van de evaluatie van het tweegeulensysteem met langsdammen dat gericht is op de functie Vaarweg. De deelrapporten vormen de ondergrond van het hoofdrapport, maar de inzichten en conclusies zijn bij het opstellen van dat hoofdrapport integraler beschouwd, verder geëvolueerd en verduidelijkt. Waar dat mogelijk tot verschillen heeft geleid, zijn de conclusies van het hoofdrapport leidend.

Tabel 1-1 Deelprojecten.

WP	Deelproject
WP0	Hydromorphological data and observations
WP1	Delft3D-berekeningen
WP2	Optimalisatie
WP3	Toepasbaarheid elders
WP4	Interpretatie AIS-data
WP6	Functie Hoogwaterveiligheid
WP7	Functie Vaarweg
WP8	Functie Natuur
WP9	Functie Zoetwatervoorziening
WP10	Morphology and maintenance
WP11	Beleving en participatie
WP12	Hoofdrapport



Figuur 1.1 Overzichtskaart met de locaties van de pilot langsdammen inclusief de inlaten en tussenopeningen. Bron: De Jong et al. (2021).

1.2 Opdracht en afbakening WP7 – Functie Vaarweg

Bij aanvang van de pilot was de verwachting dat “door scheiding van functies, dat wil zeggen scheepvaart in de hoofdgeul en ecologische waarden in de oevergeul, scheepvaart naast ecologische waarde kan staan en in hetzelfde gebied een hoger niveau bereiken”. De analyse van effecten op de vaarweg richt zich op waterdiepte, vaarbreedte, dwarsstroming en vaargedrag. Het doel van de evaluatie van de vaarweg, werkpakket 7, is het beantwoorden van de onderstaande onderzoeksvragen.

Hoofdvraag:

- Wat is de waterdiepte en beschikbare vaarbreedte bij de langsdammen vergeleken met bovenstroomse en benedenstroomse trajecten, bij verschillende afvoeren? (Hoofdstuk 2 en 3).

Deelvragen:

- Hoe beïnvloedt de instelling van instroomopeningen de waterstanden en waterdieptes bij laagwater, en de bodemligging in de hoofdgeul? Hoe ontwikkelt dit zich in de komende 20 jaar? (Hoofdstuk 2 en 3)
- Is er sprake van hinderlijke dwarsstroming tussen hoofd- en oevergeul? (Hoofdstuk 4)
- Wat is het vaargedrag van de beroepsvaart ter hoogte van de langsdam? Welk deel van de beschikbare vaarbreedte wordt daadwerkelijk benut? (Hoofdstuk 5)
- Verschilt de vaarsnelheid op het traject van de langsdam van bovenstroomse en benedenstroomse trajecten? (Hoofdstuk 5)

De vragen die handelen over *beleving* vanuit de scheepvaart zijn in WP11 beschreven (Verbrugge & Van den Born, 2021).

De hoofdvraag benoemt niet expliciet een effectbepaling tussen de situatie vóór en na aanleg. Normaliter is dat de gangbare werkwijze bij voorgestelde maatregelen ten behoeve van vergunningen in planstudies, met behulp van een modelstudie. De langsdammen pilot (geen planstudie, de ingreep is al uitgevoerd) had tot doel het verkrijgen van zekerheid over de integrale werking en de potenties van een dergelijke systeemwijziging. De analyse is om die reden geen effectstudie (modelmatige verschilanalyse), maar een evaluatie waarin ook metingen geanalyseerd zijn om te beschouwen of de verwachte effecten na aanleg zijn opgetreden. Daartoe zijn ook verschilanalyses gedaan (met en zonder langsdammen).

In de afrondende fase van het rapport zijn aanvullende vragen gesteld, die eerder niet geformuleerd waren ten aanzien van nautiek, veiligheid, en operatie (zoals verlichting, bebakening, zicht, bebording, interactie met recreatie, hinder). Deze aspecten maken geen deel uit van voorliggende rapportage, en krijgen een plek in het syntheserapport. Gegevens hierover zijn derhalve niet ontvangen of geanalyseerd.¹

Specifiek met betrekking tot recreatievaart heeft Deltares geen toegang gekregen tot data over recreatievaart.² Analyse van de recreatievaart blijft derhalve buiten beschouwing, de rapportage bevat enkel een beknopte paragraaf waarin enkele aspecten worden benoemd, die tijdens overleg met Rijkswaterstaat besproken zijn.

Informatie over ongevallenregistraties kon ook niet beschikbaar gesteld worden.³

¹ Email van A. Sieben met verzoek om informatie aan verkeerspost Tiel en District d.d. 26 mei 2021. Deze informatie is niet ontvangen.

² Voortgangsverslag van bespreking op 19 november 2020.

³ Email K. van Korlaar aan J. de Jong d.d. 1 september 2020.

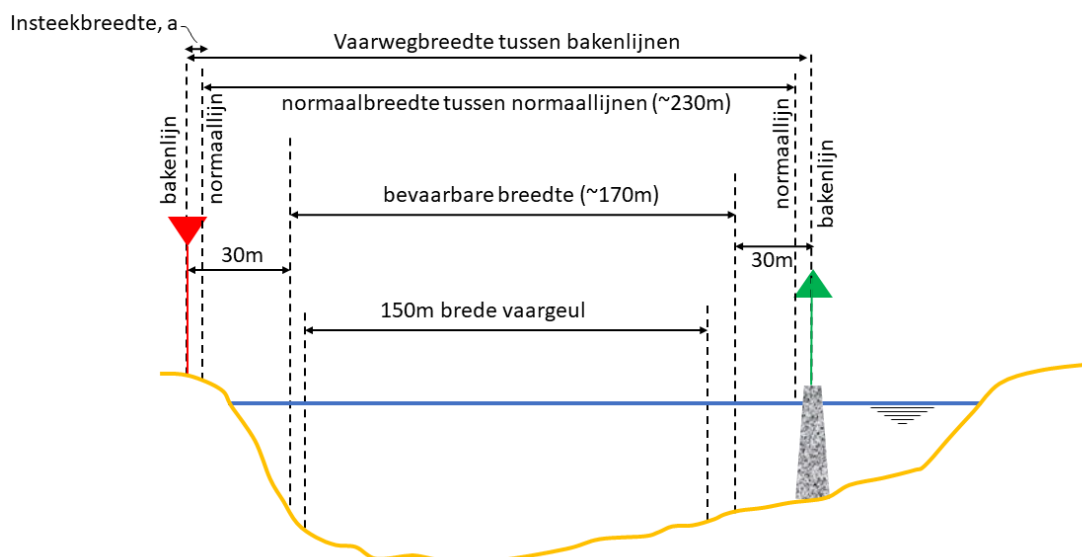
1.3 Begrippenlijst

In deze rapportage hanteren we de onderstaande begrippen (zie ook Figuur 1.2):

Tabel 1-2 Begrippenlijst.

Bakenlijnen (statisch)	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 (waar de bakens staan).
Normaallijnen (statisch)	Langs de Waal en Neder-Rijn vallen de normaallijnen vrijwel samen met de bakenlijnen (Rijkswaterstaat, 2019). Uit figuur 7 van Rijkswaterstaat (2020) kan worden opgemaakt dat de normaallijn op een afstand "a" (insteekbreedte) van de bakenlijn ligt, de rivier in. Hoe groot afstand a is, wordt niet vermeld. Vaak worden de begrippen bakenlijn en normaallijn door elkaar gebruikt, en wordt er geen onderscheid gemaakt.
Normaalbreedte (statisch)	De breedte van de rivier tussen de normaallijnen. De normaalbreedte is verkleind ter hoogte van de langsdammen door de aanleg ervan van circa 260 m naar 230 m.
Vaargeul en vaargeulbreedte (statisch)	Wettelijk vastgestelde geul van 150 m breed en die onderhouden wordt op OLR ⁴ -2,80m. De geul ligt niet in de as van de rivier, maar volgt de diepe delen (de buitenbochten). Er is een ruimtereservering voor mogelijk toekomstige uitbreiding van de vaargeul van 150 meter naar 170 meter. Het begrip vaargeul wordt in Rijkswaterstaat (2020) anders uitgelegd.
Bevaarbare breedte (statisch)	Het water tussen de denkbeeldige lijnen die op de Boven-Rijn en Waal op 30 meter uit bakenlijnen of op 5 meter uit de overige drijvende markering liggen (Rijkswaterstaat, 2020, figuur 7). Voor dit deel wordt de MGD afgegeven (Staatscourant, 2006). De bevaarbare breedte is dus onafhankelijk van de afvoer (er is wel ruimtelijke variatie). Ter hoogte van de langsdammen is de bevaarbare breedte dus circa 230 m minus 2x30 m = 170 m.
Vaarweg en vaarwegbreedte (statisch)	Bij de vrij-afstromende Rijntakken wordt de rand van de vaarweg aangegeven door de bakenlijn (Rijkswaterstaat, 2019).
Waterdiepte (dynamisch)	De verticale afstand tussen waterstand en bodemligging op een bepaalde locatie, bijvoorbeeld op 1 punt, in de as van de rivier, of gemiddeld over een traject of breedte. Als de diepte betrekking heeft op een specifiek deel, dan wordt dit vermeld (bijv. diepte in de geul of minimale diepte op een traject).
Vaargeuldiepte (dynamisch)	De waterdiepte in de 150 m brede vaargeul (gemiddelde of minimum; wordt vermeld indien nodig).
Vaarbreedte (dynamisch)	De beschikbare breedte voor scheepvaart varieert met de afvoer; bij lage afvoer is er minder breedte beschikbaar dan bij hoge afvoer. In deze rapportage is de vaarbreedte bepaald als de afstand waarbinnen de diepte minimaal 2,80 m is met een bovengrens die gelijk is aan de afstand tussen de normaallijnen (circa 230 m ter hoogte van de langsdammen, circa 260 m daarbuiten)

⁴ Overeengekomen Lage Rivierstand; de waterstand, die 20 ijsvrije dagen per jaar onderschreden wordt, dus ongeveer 5% van de tijd voorkomt (bijvoorbeeld Rijkswaterstaat, 2020). De OLR is beleidsmatig vastgesteld in 2012 en komt momenteel overeen met de waterstand behorend bij een afvoer van 1020 m³/s bij Lobith.



Figuur 1.2 Definitie van enkele begrippen.

1.4 Aanpak

De aanpak is globaal als volgt:

- De waterdiepte is geanalyseerd op basis van Delft3D-berekeningen (WP1) en bodempeilingen, maar ook aan de hand van MGD's (Minst Gepeilde Dieptes) die dicht bij de beleving van de vaarweggebruikers staan.
- Dwarsstromingen zijn berekend met Delft3D en aangevuld met de resultaten uit WP0, waarbinnen de ADCP-stroomsnelheidsmetingen zijn geanalyseerd.
- Het vaargedrag volgt uit de analyse van AIS-data (WP4) waarin (a) reistijden, vaarsnelheden en (b) gevolgde vaarbanen die laten zien welke afstand schippers aanhouden ten opzichte van de langsdammen, zijn onderzocht.

1.5 Overzicht en gebruik van relevante meetdata

De onderstaande meetdata zijn gebruikt ten behoeve van deze studie:

- Tweejaarlijkse multibeam-peilingen (JMP's) tussen 2013 en 2018 met als doel om een globaal beeld te krijgen of er hinderlijke ondieptes zijn ontstaan voor de scheepvaart sinds de aanleg. Een grondigere analyse aan de hand van onder andere 8-weekse multibeam-peilingen is uitgevoerd in WP0 en is in deze rapportage overgenomen.
- MGD-registraties tussen 2005 en 2013 en tussen 2015 en 2018.
- Baggergegevens met als doel om een globaal beeld te krijgen of er hinderlijke ondieptes zijn ontstaan voor de scheepvaart sinds de aanleg. Kwantitatieve gegevens over ploegen zijn niet beschikbaar. Er wordt af en toe alleen geploegd vlak naast de langsdam Ophemert (pers. comm. H. Eerden, Rijkswaterstaat, juli 2020).
- Metingen van afstanden tussen oever en schepen (van Frank Collas, Radboud Universiteit).
- AIS-data, geanalyseerd in WP4 en in deze rapportage samengevat en nader geïnterpreteerd.
- ADCP⁵-metingen, geanalyseerd in WP0 en overgenomen in deze rapportage.

⁵ Acoustic Doppler Current Profiler, akoestische dopplerstroommeter

- Diverse waterstandsmetingen met divers, verhanglijnmetingen en waterstanden van LMW-meetstations, geanalyseerd in WPO en overgenomen in deze rapportage.

Er zijn geen metingen beschikbaar gesteld die een beeld geven van de interactie tussen binnenvaart en recreatievaart (en de verandering als gevolg van de aanleg van langsdammen).

Data van ongevallenregistraties zijn niet beschikbaar gesteld; een analyse van ongevallen blijft buiten beschouwing.

1.6 Organisatie

De werkzaamheden binnen dit werkpakket zijn uitgevoerd door Remi van der Wijk en Rolien van der Mark. Leny van Toorenborg en Marleen Buitendijk van Koninklijke BLN-Schuttevaer zijn bij dit onderzoek betrokken geweest als mee-lezer en hebben eerdere versies van dit rapport van commentaar voorzien. De review van deze rapportage is uitgevoerd door Jurjen de Jong. Erik Mosselman treedt op vanuit Deltares als de projectleider van de eindevaluatie van de pilot langsdammen met daarin de 12 inhoudelijke werkpakketten. Vanuit Rijkswaterstaat is de eindevaluatie begeleid door Henk Eerden en Arjan Sieben. Verschillende versies van dit rapport (WP7) zijn vanuit Rijkswaterstaat naast Henk en Arjan ook van commentaar voorzien door Otto Koedijk, Jeroen Wensink en Hans Veldman.

2 Waterdiepte en vaarbreedte – initiële ontwikkeling

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de initiële ontwikkeling in waterdiepte (§2.2) en vaarbreedte (§2.3) nader beschouwd. Paragraaf 2.2.1 richt zich op het theoretische waterstands- en diepte-effect, dat wil zeggen hoe verwachten we dat de waterdiepte initieel verandert door de aanleg van de langsdammen, als verder geen andere maatregelen of wijzigingen in het riviersysteem worden gedaan. Dit laten we zien aan de hand van hydrodynamische modelberekeningen, uitgevoerd in WP1 (Paarberg et al., 2021). Het voordeel van een model is dat het effect van puur de langsdammen in beeld gebracht kan worden.

In paragraaf 2.2.2 beschouwen we aan de hand van gemeten data hoe waterstand, bodemligging, waterdiepte zich in werkelijkheid hebben ontwikkeld. Een analyse op louter data bevat meetfouten, ruis en neveneffecten, die de evaluatie van puur de langsdammen lastiger maken, zoals andere maatregelen genomen gedurende dezelfde periode. Het is daarom goed beide (model en meting) te beschouwen.

2.2 Waterdiepte

2.2.1 Theoretisch effect waterstand en waterdiepte (modelberekeningen)

2.2.1.1 Modelberekeningen

Met behulp van de hydrodynamische simulaties uit WP1 wordt een beeld verkregen van de waterdiepte onder verschillende afvoeren in de situatie met en zonder langsdammen. De varianten die zijn gebruikt, zijn (meer informatie in Paarberg et al., 2021):

- V0+ zonder langsdammen (met kribben op het langsdammen traject), in dit hoofdstuk verkort tot “V0”,
- V1 met langsdammen (geen kribben op het langsdammen traject), volledig geopende instroomopeningen (de toestand zoals de dammen zijn aangelegd),
- V2 met langsdammen (geen kribben op het langsdammen traject), volledig gesloten instroomopeningen,
- V3 met langsdammen (geen kribben op het langsdammen traject), deels gesloten instroomopeningen (de toestand na aanpassing van de openingen bij Wamel en Dreumel in april 2018).

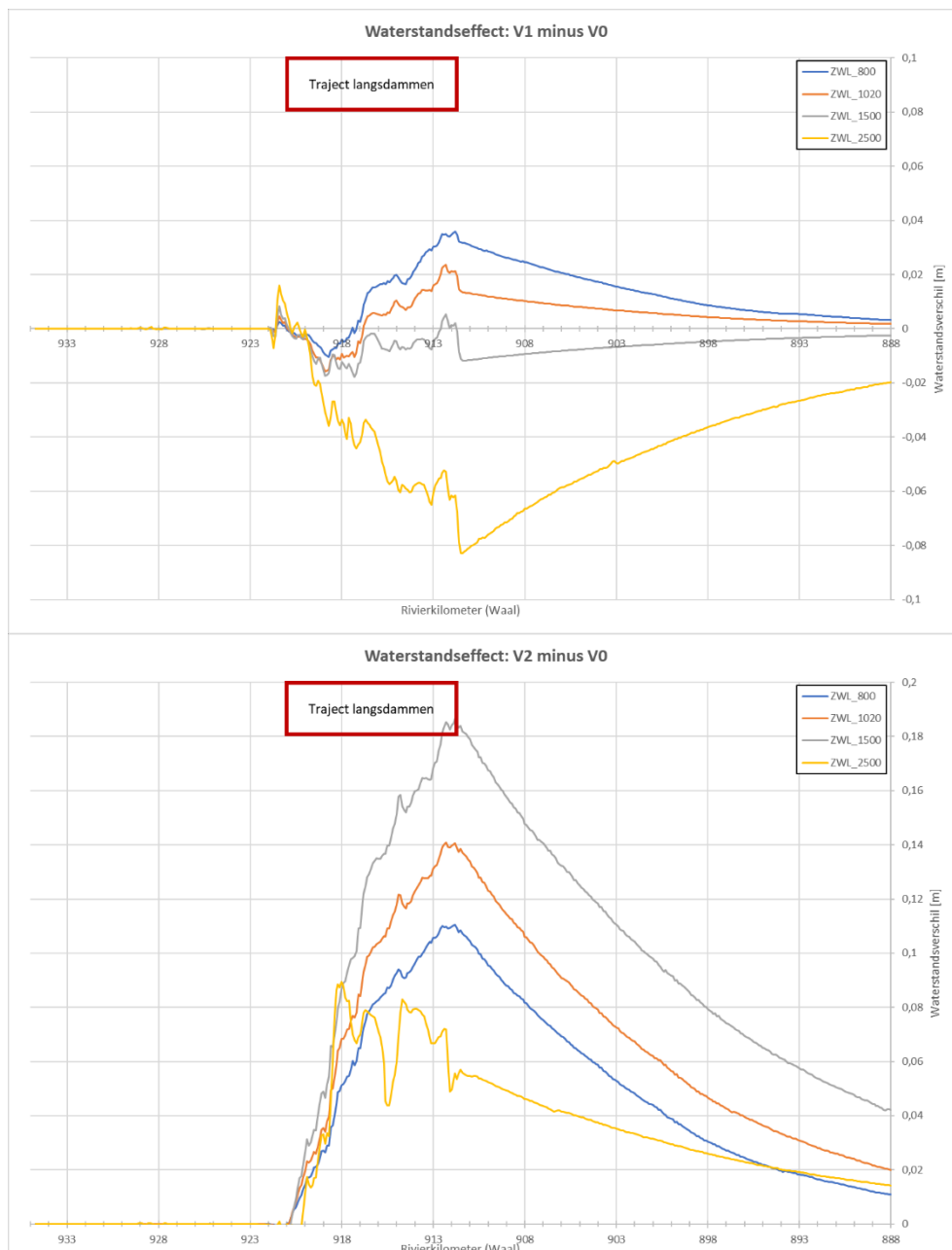
Het modeldomein loopt vanaf benedenstrooms van Nijmegen (km 888) tot Zaltbommel (km 934,7). De topografie van de hoofdgeul, uiterwaarden en oevergeul representeren de situatie van 2018 (Baseline-j18), net voordat de inlaten bij Wamel en Dreumel zijn aangepast (Paarberg et al., 2021). De bodemligging in de hoofdgeul in V0 is dus ook gelijk aan de situatie van 2018.

2.2.1.2 Waterstand

Uit de modelsimulaties volgt dat het vervangen van kribben door de langsdammen zorgt voor een opstuwung van de waterstand bij lage afvoer (kleinere normaalbreedte) en een verlaging van de waterstand bij hoge afvoer (minder blokkade dan kribben). Dit effect vindt plaats ter hoogte van de langsdammen en werkt door naar bovenstrooms; in ieder geval tot voorbij Nijmegen is het effect nog merkbaar (orde 1 centimeter). Het omslagpunt ligt rond de gemiddelde afvoer, en is afhankelijk van de instelling van de instroomopeningen.

In WP1 zijn naast een referentie zonder langsdammen (V0) drie verschillende basisvarianten gesimuleerd (Paarlberg et al., 2021), te weten een variant met geheel open instroomopeningen (V1, de toestand zoals de dammen zijn aangelegd), een variant met geheel gesloten instroomopeningen (V2) en een variant met deels gesloten instroomopeningen (V3, de huidige toestand). De opstuwingswaterstand bij lage afvoer is het grootst bij geheel gesloten openingen (maximaal 20 cm) en het kleinst bij geheel open instroomopeningen (maximaal 4 cm) (Figuur 2.1). Bij geheel open instroomopeningen (V1) treedt alleen een opstuwend effect op bij de laagste gesimuleerde afvoeren ($Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ en $1020 \text{ m}^3/\text{s}$), bij geheel gesloten instroomopeningen (V2) is er tot in ieder geval een afvoer van $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ een opstuwend effect. Bij simulatieresultaten bij een afvoer van $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (hier niet weergegeven) is er in geen van de varianten een opstuwend effect.

De berekende waterstanden geven de gevoeligheid van de waterstand aan voor verschillende instroomopeningen; dit betreft dus het initiële regelbereik in de situatie direct na aanleg, dus zonder bodemontwikkelingen.



Figuur 2.1 Gemodelleerd waterstandseffect voor verschillende lage afvoeren bij Lobith. Boven: effect langsdammen met geopende instroomopeningen (variant V1 minus V0), onder: effect langsdammen met gesloten instroomopeningen (variant V2 minus V0).

2.2.1.3 Waterdiepte

Voor de waterdiepte in de 150 m brede vaargeul geldt hetzelfde als voor de waterstand; deze neemt volgens de modelberekeningen toe bij lage afvoer en af bij hoge afvoer (Figuur 2.2). De maximale toename in waterdiepte is het grootst bij gesloten instroomopeningen (V2), deze bevindt zich ter hoogte van rivierkilometer 912 (bovenstroomse zijde van de meest bovenstroomse langsdam) en ligt in de orde van 15 à 20 cm. De langsdammen zorgen dus, door de verkleining van de normaalbreedte, voor een grotere waterdiepte tijdens lage afvoeren, wat gunstig is voor de scheepvaart. Bijlage A bevat een uitgebreidere analyse van de waterdiepte in de vaargeul; bij lage afvoeren neemt de diepte toe, bij hoge afvoeren neemt de diepte af.

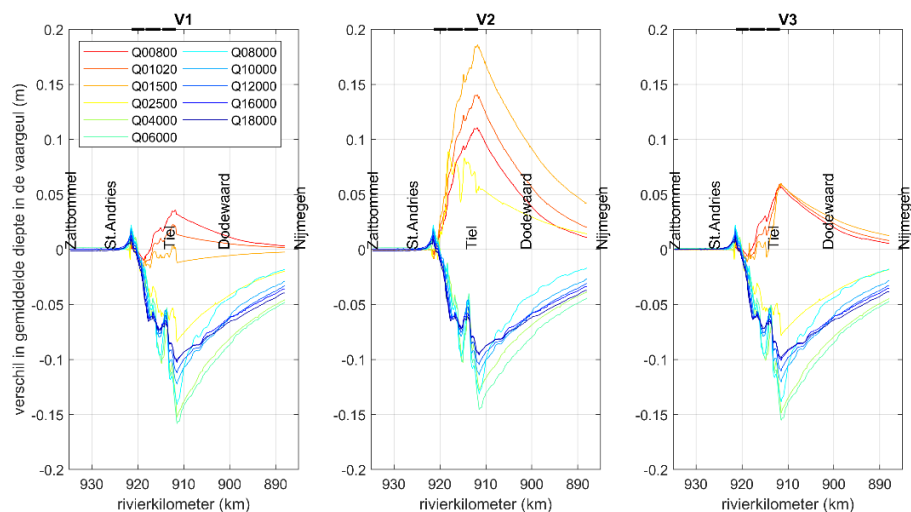
De simulaties nemen de invloed van het getij niet mee. Het getij is alleen merkbaar bij lage afvoeren. Bij zeer lage afvoeren (lager dan 1000 m³/s) is de amplitude van het getij bij Zaltbommel in de orde van 15 cm, en de invloed dooft snel uit stroomopwaarts (tot nauwelijks effect bij Tiel). Bij toenemende afvoer neemt de invloed van het getij af: bij een afvoer van 2000 m³/s is de waterstandsvariatie bij Zaltbommel al gehalveerd. Bij nog hogere afvoeren (hogere dan 5000 m³/s) is ook bij Zaltbommel het getij niet meer zichtbaar. De diepte, net als de waterstand, nabij de langsdammen vertoont dus ook variatie door getij. De langsdammen zullen de amplitude in waterstandsvariatie niet of nauwelijks beïnvloeden, waarmee het voor de vershylanalyse niet nodig is om het getij te simuleren.

De instelling van de instroomopeningen heeft invloed op de waterstanden en daarmee op de waterdieptes bij laagwater. Bij een afvoer van 1500 m³/s is de invloed van de instelling van de instroomopeningen het grootst.

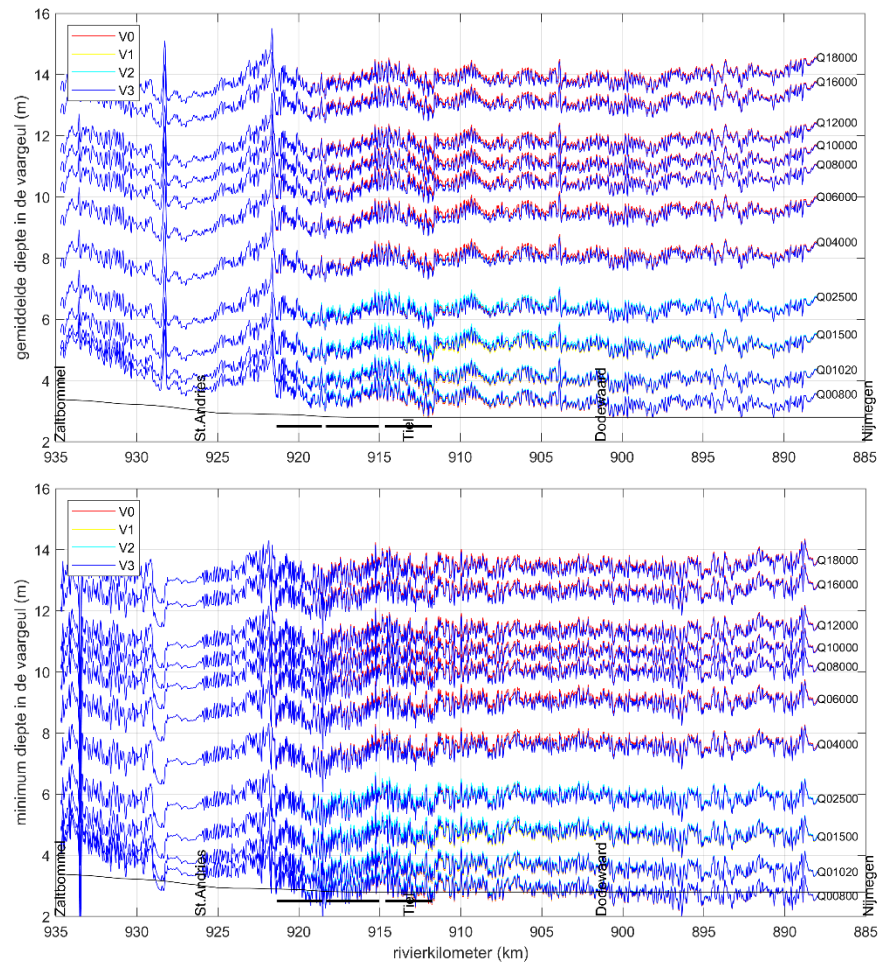
De gemiddelde diepte in de vaargeul ter hoogte van de langsdammen is ruwweg gelijk aan de gemiddelde diepte bovenstrooms (knikbreuk pas benedenstrooms van km 922). De toe- en afname in diepte als gevolg van de langsdammen veranderen dit globale beeld niet (Figuur 2.3). De verandering in gemiddelde diepte in de vaargeul ten gevolge van de langsdammen (lokaal maximaal 20 cm) is een orde kleiner dan de ruimtelijke variatie vanwege de aanwezige bodemvormen en bankenpatronen (bandbreedte van orde 1 m). De figuur geeft een beeld hoe de grootte van de waterdiepte-toename of -afname als gevolg van de aanleg van de langsdammen zich verhoudt tot de waterdiepte en waterdieptevariatie op de gehele Waal. Het maakt voor dit beeld niet uit welke bodemhoogtemeting (welk jaar) wordt gekozen.

Voor het bepalen van de diepte in de vaargeul is gebruik gemaakt van de modelmatig berekende waterstanden en de vergridde bodem in het model. Het rekenrooster van het model is vooral in de hoofdgeul behoorlijk fijn, zodat het voor de analyse niet uitmaakt of een modelbodem of multibeam-bodem gebruikt wordt (Figuur 2.4 toont voor een uitsnede van de rivier beide bodems).

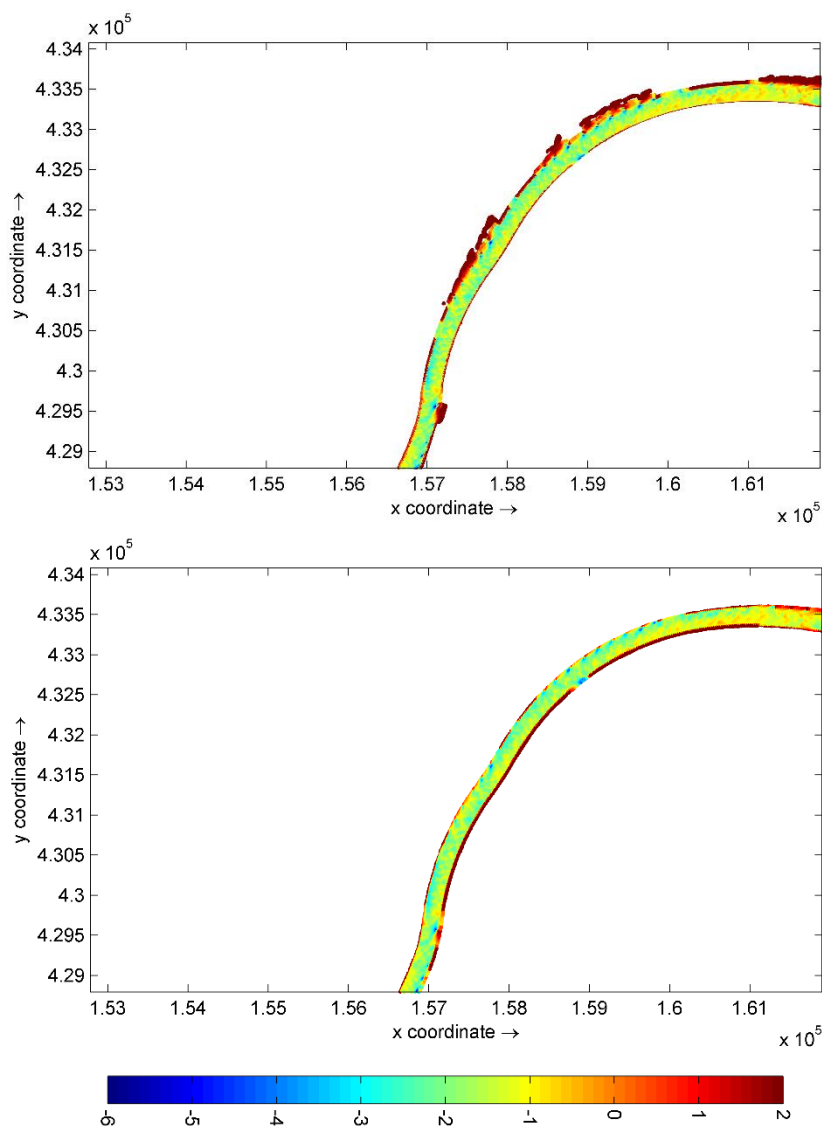
We merken verder op dat met de langsdammen op deze locatie de diepte bij de bestaande scheepvaartknelpunten op de Waal (Sint Andries en Nijmegen, zie ook paragraaf 2.2.2.3 over de MGD) bij laagwater niet of slechts zeer beperkt wordt vergroot, waardoor de minimale waterdiepte op de corridor naar Duitsland niet of nauwelijks toeneemt door de pilot.



Figuur 2.2 Verschil in gemodelleerde gemiddelde diepte in de vaargeul (links: V1 – V0, open instroomopeningen; midden: V2 – V0, gesloten instroomopeningen; rechts: V3 – V0, deels gesloten instroomopeningen) voor verschillende afvoeren bij Lobith. De zwarte lijnen bovenaan geven de posities van de langsdammen weer.



Figuur 2.3 Gemodelleerde diepte in de vaargeul voor de verschillende varianten en voor verschillende afvoeren bij Lobith. Boven: gemiddelde diepte, onder: minimum diepte. De dikke zwarte lijnen geven de posities van de langsdammen weer. De dunne zwarte lijn geeft de eis van de vaargeuldiepte weer zoals deze is opgenomen in het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019). De dieptes zijn afgeleid van hydrodynamische Delft3D-simulaties met fijn rooster, zodat de aanwezigheid van bodemvormen hierin zichtbaar is.



Figuur 2.4 Bodemligging in de hoofdgeul (in m+NAP) in 2018. Boven: multibeam-peiling; onder: vergridde bodem in het Delft3D-model.

2.2.2 Evaluatie aan de hand van metingen

2.2.2.1 Waterstand

Waterstandsmetingen ter hoogte van de langsdammen (voor, tijdens, en na aanleg) zijn geanalyseerd in WPO, om te bepalen wat het effect is van de langsdammen en de instroomopeningen op de waterstand in de hoofdgeul (De Jong et al., 2021). Hiervoor zijn verschillende meetseries beschouwd, te weten verhanglijnmetingen, tijdseries bij meetstations (Landelijk Meetnet Water, LMW) en dieptemetingen met divers.

De metingen laten zien dat voor aanleg van de langsdammen, de waterstand bij Tiel een dalende trend vertoonde. Na aanleg lijkt de trend in waterstanden te stabiliseren voor lage afvoeren (lager dan $1400 \text{ m}^3/\text{s}$), en voor hogere afvoeren lijkt de dalende trend iets sterker te worden (Figuur 2.5). Er wordt in WPO geconcludeerd dat bij hoge afvoeren de waterstand afneemt met 10 à 20 cm bij Tiel als gevolg van de aanleg van de langsdammen. Dit is in overeenstemming met de modelresultaten.

Voor scheepvaart zijn vooral de lage afvoeren van belang. De metingen laten een minder significante verhoging in waterstand zien bij lage afvoer dan volgt uit de modelberekeningen. Dit is mogelijk te verklaren door bodemontwikkelingen die niet in het model zitten, of door de tegelijkertijd variërende wateronttrekkingen naar het Amsterdam-Rijnkanaal of afwijkingen van het stuwprogramma tijdens de renovatie van de stuwen in de Nederrijn. Uitgevoerde maatregelen benedenstrooms (kribverlaging, KRW-maatregel, aanleg nevengeul en uiterwaardverlaging bij Passewaaij), die juist een verlaging realiseren, zijn niet actief bij lage afvoer ($< 2000 \text{ m}^3/\text{s}$), en geven daarmee geen verklaring.

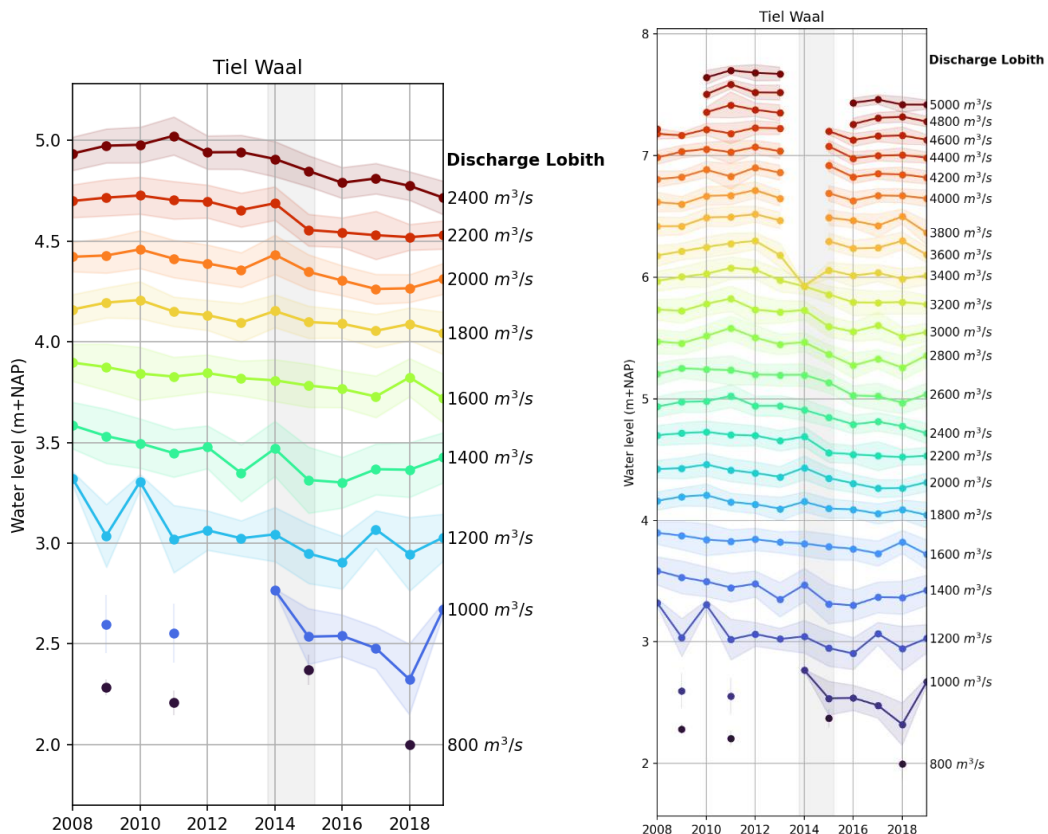
Ook het verloop over de tijd in waterstandsverschil tussen Tiel en St. Andries is beschouwd. Het verloop in waterstandsverschil laat bij lage afvoeren een duidelijke trendbreuk zien (Figuur 2.7). De figuur toont (voor lage afvoeren) vóór aanleg van de langsdammen een geleidelijke afname in waterstandsverschil (verhang wordt flauwer). Na aanleg neemt het waterstandsverschil toe (verhang wordt steiler). Het lijkt erop dat (Figuur 2.5 tot Figuur 2.7):

- bij de laagste afvoeren ($1400 \text{ m}^3/\text{s}$ en lager) de trendbreuk is toe te schrijven aan de stabilisatie (of zelfs lichte toename) in waterstand bij Tiel, terwijl bij St. Andries de dalende trend doorzet. De aanleg van de langsdammen zorgt voor de trendbreuk.
- bij de iets hogere afvoeren (tot $2400 \text{ m}^3/\text{s}$) de trendbreuk is toe te schrijven aan de afname in waterstand bij St. Andries, terwijl bij Tiel de dalende trend doorzet. Maatregelen benedenstrooms van St. Andries zorgen voor de trendbreuk.

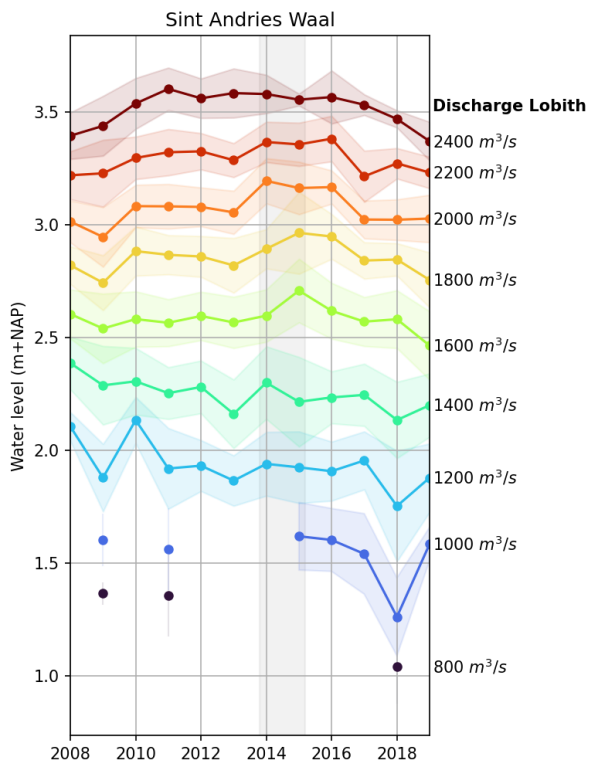
Wat uit de figuren niet valt af te lezen is of de stabilisatie bij Tiel bij de laagste afvoeren vooral het resultaat is van waterstandsopzet door versmalling van de normaalbreedte (conform modelresultaat) of doordat de bodemligging wijzigt. Dit is wel relevant voor scheepvaart; immers, een opzet door versmalling betekent een grotere waterdiepte, terwijl een stabilisatie / toename in waterstand als gevolg van toename in de bodemhoogte niet tot een grotere waterdiepte leidt.

Figuur 2.7 toont daarom ook de gemiddelde bodemligging over het trajectvak van de langsdammen, waaruit een duidelijke correlatie en vergelijkbare orde-grootte tussen waterstandsverschil en bodemligging blijkt. Verandering in bodemligging (zie ook §2.2.2.2) is dus een belangrijke reden voor verandering in waterstand bij de laagste afvoeren. Daarmee kan worden geconstateerd dat de gemodelleerde, verwachte waterstandsopzet bij lage afvoeren door versmalling van de normaalbreedte niet goed is terug te zien in de metingen. Voor scheepvaart lijken de langsdammen daarmee vooralsnog minder effectief te zijn dan verwacht.

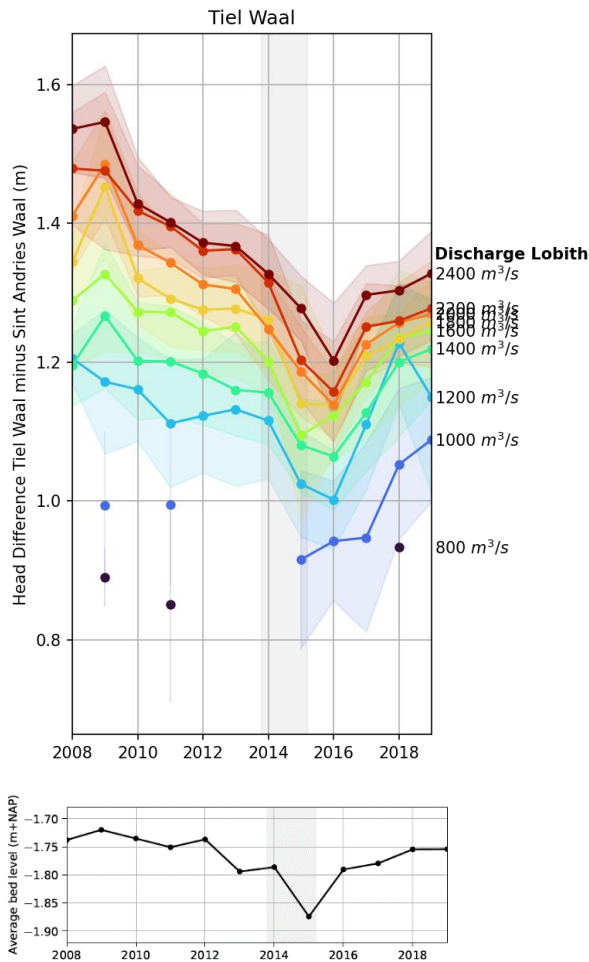
In de metingen is het effect van verandering in de instroomopeningen op de waterstand niet goed zichtbaar door het beperkt aantal metingen en de grote ruis (De Jong et al., 2021). Wel blijkt dat de grote veranderingen in de instroomopeningen (zoals het afsluiten van Wamel in april 2018) effectief zijn in het vergaand reduceren van de afvoer door de oevergeul. Ondanks dat het niet in de metingen is terug te zien, is daarmee wel de verwachting dat hierdoor de waterdiepte toe neemt.



Figuur 2.5 Verloop over de tijd van de waterstand bij Tiel (gemiddelde en standaardafwijking) voor verschillende afvoeren. Links: het verloop voor afvoeren tot 2400 m³/s bij Lobith; rechts: voor afvoeren tot 5000 m³/s bij Lobith. De periode waarin constructie plaatsvond is grijs gemarkeerd.



Figuur 2.6 Verloop over de tijd van de waterstand bij St. Andries (gemiddelde en standaardafwijking) voor verschillende afvoeren tot 2400 m³/s bij Lobith. De periode waarin constructie plaatsvond is grijs gemarkeerd.



Figuur 2.7 Boven: Verloop over de tijd van het waterstandsverschil tussen St. Andries en Tiel (gemiddelde en standaardafwijking) voor verschillende lage afvoeren. Onder: gemiddelde bodemligging op het traject van de langsdammen.

2.2.2.2 Bodemligging en diepte t.o.v. OLR

Op basis van multibeam-peilingen kan geëvalueerd worden hoe de bodem zich heeft ontwikkeld sinds de aanleg van de langsdammen en of er locaties aan te wijzen zijn die mogelijk hinder voor de scheepvaart opleveren. Er wordt opgemerkt dat in WP0 (De Jong et al., 2021) en WP10 (Chavarrías et al., 2021) uitgebreider wordt ingegaan op het effect van de langsdammen op de bodemligging, zowel de hoofdgeul als de oeversgeulen. Hier wordt vooral beschouwd of er sinds de aanleg van de langsdammen ondieptes zijn ontstaan die hinder voor de scheepvaart kunnen opleveren. Er is gebruik gemaakt van de zogenaamde JMP's, multibeam-peilingen, die twee keer per jaar (voorjaar en najaar) over de gehele Boven-Rijn en Waal worden ingewonnen, en 8-weekse multibeam-peilingen, ingewonnen als onderdeel van het monitoringsprogramma van de langsdammen pilot vanaf 2015 tot 2020.

Uit de 8-weekse multibeam-peilingen (vanaf 2015) volgt voor de breedtegemiddelde bodemligging van de hoofdgeul in hoofdlijnen (Figuur 2.8, Figuur 2.9 en De Jong et al., 2021 en Chavarrías et al., 2021):

- Eroderende trend bovenstrooms van Wamel.
- Afwisselende deeltrajecten van erosie en sedimentatie ter hoogte van langsdam Wamel.
- Afwisselende deeltrajecten van erosie en sedimentatie ter hoogte van langsdam Dreumel.
- Sedimentatie over vrijwel het hele traject van langsdam Ophemert.
- Erosie benedenstrooms van Ophemert.

Voor de scheepvaart zijn de aanzandingen problematisch als daardoor de waterdiepte wordt beperkt. Internationaal is afgesproken dat de diepte in de 150 m brede vaargeul minimaal 2,80 m dient te zijn ten opzichte van OLR (waterstand bij een Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) van 1020 m³/s). Zo beschouwd, kan worden gesteld dat bij voldoende overdiepte in de 150 m brede vaargeul (d.w.z., de diepte ten opzichte van OLR is ruimschoots boven de norm⁶) en voldoende ruim dwarsprofiel, aanzanding in de vaargeul niet direct problematisch is voor de scheepvaart. Figuur 2.10 laat echter zien dat op grote delen van het langsdammentraject er geen of weinig overdiepte is. De gegarandeerde diepte in de vaargeul wordt over het hele traject op een aantal plekken onderschreden, gedurende de hele beschouwde periode van 20 jaar⁷. Het kan niet anders dan dat aanzandingen in het langsdammen traject tot hinder leiden vanwege de afwezigheid van overdiepte; dit komt tot uiting ofwel als gemelde ondieptes met name tijdens laagwater, ofwel als extra benodigd baggerwerk (§2.2.2.4) ofwel als frequenter een MGD-registratie in dit traject (§2.2.2.3).

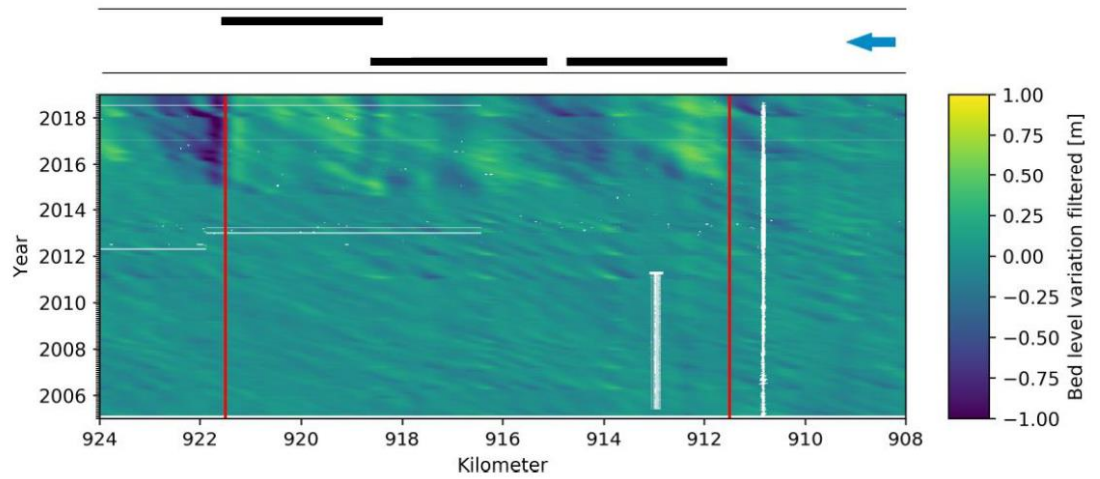
In de praktijk varen schepen ook buiten de 150 m brede vaargeul, en ook bij afvoeren hoger dan OLA ontstaan al beperkingen voor de scheepvaart. Dus strikt genomen is enkel een toets of de gegarandeerde diepte in de vaargeul gehaald wordt wat beperkt bij het beoordelen of de scheepvaart meer hinder ondervindt van aanzandingen als gevolg van de constructie van de langsdammen. Het is waarschijnlijk dat ook schepen varend bij gemiddelde afvoeren of buiten de vaargeul de aanzandingen (orde decimeter) bij de langsdammen zullen bemerken. Dit wordt ook bevestigd door de antwoorden van respondenten ten behoeve van de Belevingsmonitor Binnenvaart (Verbrugge, 2018).

In Figuur 2.11 en Figuur 2.12 gaan we iets verder in op de diepte ten opzichte van OLR door tweedimensionale kaarten te beschouwen, zodat een beter beeld wordt verkregen van de ligging van aanzandingen (links of rechts van de rivier en ten opzichte van de vaargeul). De meest kritische dieptes bevinden zich aan de bovenstroomse zijde van langsdam Wamel (rondom km 912) over de hele breedte, halverwege langsdam Dreumel (tussen km 916 en 917) over de hele breedte, tussen langsdam Dreumel en Ophemert (benedenstrooms van km 918) en bij de langsdam Ophemert (bij km 919) aan de rechterzijde van de vaargeul. De figuren tonen een momentopname (op een ander moment ziet het dieptebeeld er anders uit), en tijdens hogere afvoeren is overschrijding van de norm (2,80 m) toegestaan, maar bijvoorbeeld Rijkswaterstaat (2021) laat zien (a.d.h.v. meerjarige peilingen) dat er structureel sprake is van kritieke dieptes op het langsdammen-traject. Er bevindt zich aldaar een aantal hectometervakken die zijn aangemerkt als zogenaamde MOGD, meest ondiepe delen van de vaarweg.

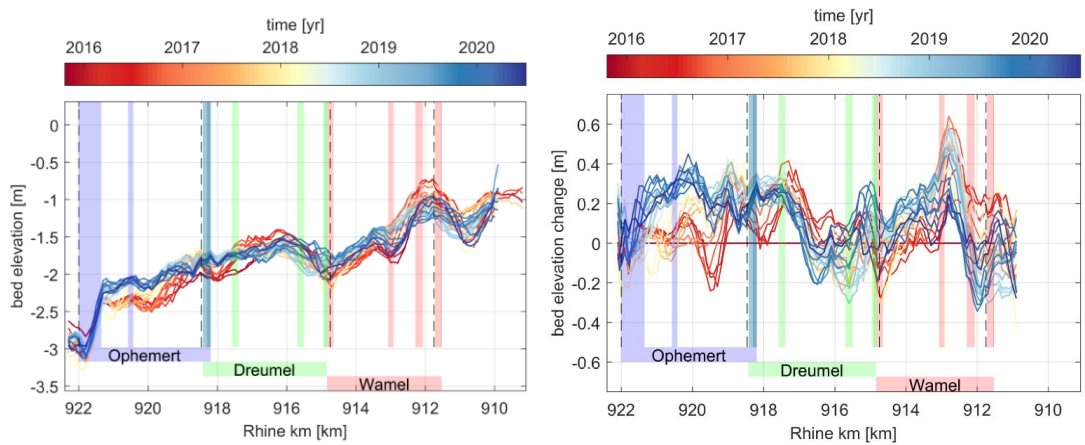
Tot slot, door de vervanging van kribben door langsdammen verdwijnen de kribvlammen (bijv. Chavarrías et al., 2021). Dat is gunstig voor de scheepvaart (minder ondieptes, minder dieptevariatie). Uit de data-analyse (WPO) kon niet geconcludeerd worden of de duinen in hoogte zijn toe- of afgenomen op het langsdammen traject.

⁶ Minimale waterdiepte onder OLR/OLW is 2,80 m bij Tiel en neemt toe naar 3,00 m bij St. Andries volgens het Rivierkundig Beoordelingskader, zie ook Figuur 2.3.

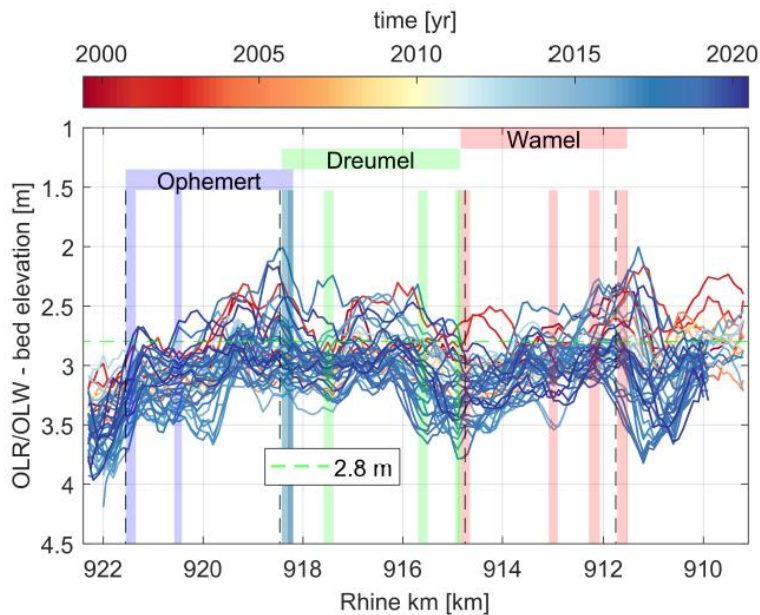
⁷ De bodem mag boven OLR-2,80 m liggen in perioden van voldoende afvoer; de aannemer bepaalt zelf hoe het onderhoud gebeurt binnen de randvoorwaarden van het contract. Op dit traject is structureel weinig tot geen overdiepte, het betreft niet een incidentele gebeurtenis.



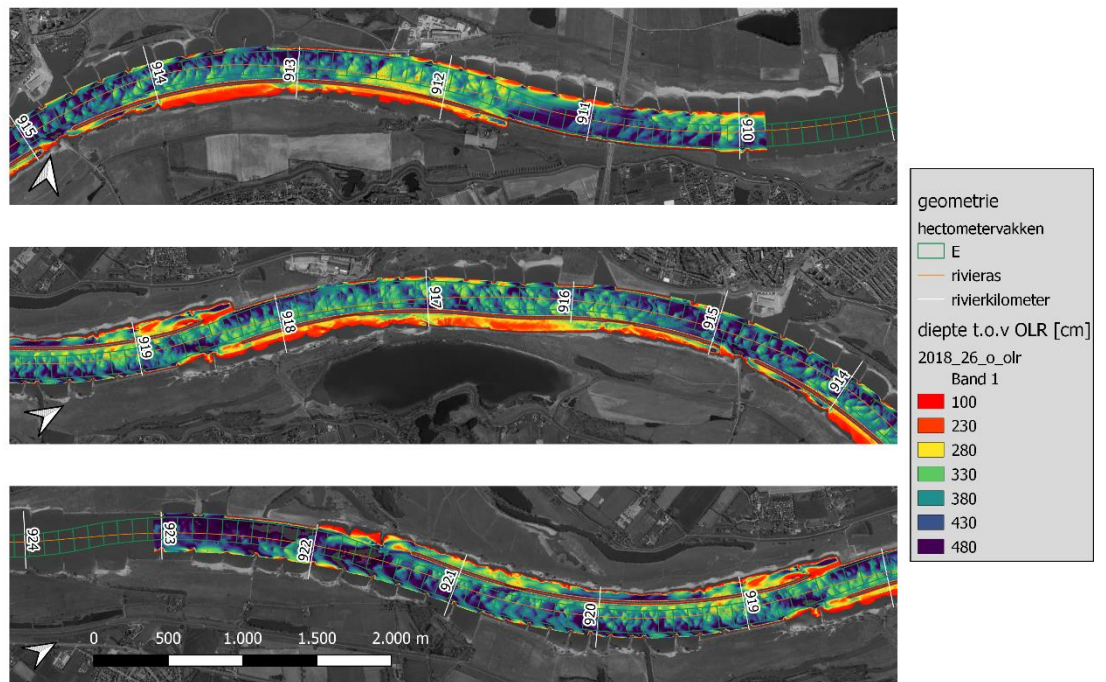
Figuur 2.8 Ontwikkeling in breedtegemiddelde bodemligging in de hoofdgeul (m+NAP) op basis van de 8-weekse peilingen en JMP's. Bron: Van Denderen et al. (2020).



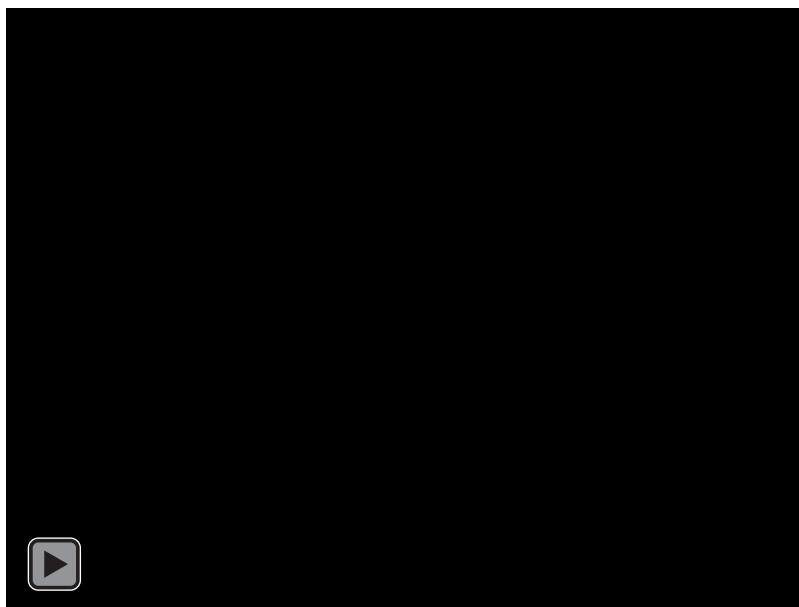
Figuur 2.9 Ontwikkeling in breedtegemiddelde bodemligging in de hoofdgeul (m+NAP) op basis van de 8-weekse peilingen en JMP's. Links: bodemligging; rechts: verschil t.o.v. eind 2015. Bron: De Jong et al. (2020).



Figuur 2.10 Minimale diepte in de 150 m brede vaargeul t.o.v. OLR (vakken van 100 m, en gemiddeld over 500 m). Bron: De Jong et al. (2021).



Figuur 2.11 Diepte ten opzichte van OLR in week 26 van 2018 (afvoer Lobith circa 1400 m³/s).



Figuur 2.12 Animatie van de diepte ten opzichte van OLR.

2.2.2.3 Minst Gepeilde Diepte (MGD)

MGD's op het traject van de langsdammen

Zodra de waterdiepte in de Waal 350 cm of minder is, geeft Rijkswaterstaat 1x per dag de zogenaamde Minst Gepeilde Diepte (MGD) af; dit is de kleinste waterdiepte in de vaargeul op het traject Millingen – Loevestein (en vanaf 2018 is dit traject opgedeeld in 3 stukken). Er worden peilingen verricht om te traceren waar die kleinste waterdiepte zich bevindt. Vaak bevindt zich het ondiepste punt op een van de bekende kritieke locaties, te weten rondom Erlecom, Nijmegen, Dreumel, St. Andries, Zaltbommel en Herwijnen. Waar het ondiepste punt ligt, is onder andere afhankelijk van de heersende condities en al dan niet recent uitgevoerd baggerwerk.

Op basis van een database van MGD-opnames constateren we dat tussen 2005 en 2013 de MGD zich geregeld bij Dreumel bevindt (Figuur 2.13, roze stippen). Tussen 2015 en 2018 (vooral 2017) lijkt het ondiepste punt naar benedenstrooms te zijn verplaatst naar Ophemert (Figuur 2.13, groene stippen), zeer waarschijnlijk als gevolg van de langsdammen. In Rijkswaterstaat (2017) wordt ook geconstateerd dat sinds 2017 bij Ophemert een MGD wordt gemeten. Aandachtspunt is dat zich hier (rkm 919) ook een niet-baggerlocatie bevindt (Rijkswaterstaat, 2017; Figuur A.8 in De Jong et al., 2021) waardoor een mogelijk knelpunt aldaar niet mag worden opgeruimd, in dit geval is het waarschijnlijk een gasleiding. Overigens is de ondiepte bij Dreumel niet verdwenen (zie bijvoorbeeld Figuur 2.13, rechts, waar de bodemligging van 2018 is weergegeven, of Figuur 2.11), maar kennelijk is die bij Ophemert maatgevend en dus aangeduid als de MGD. De MGD-opnames stemmen overeen met §2.2.2.2 waarin diepte t.o.v. OLR is beschouwd.

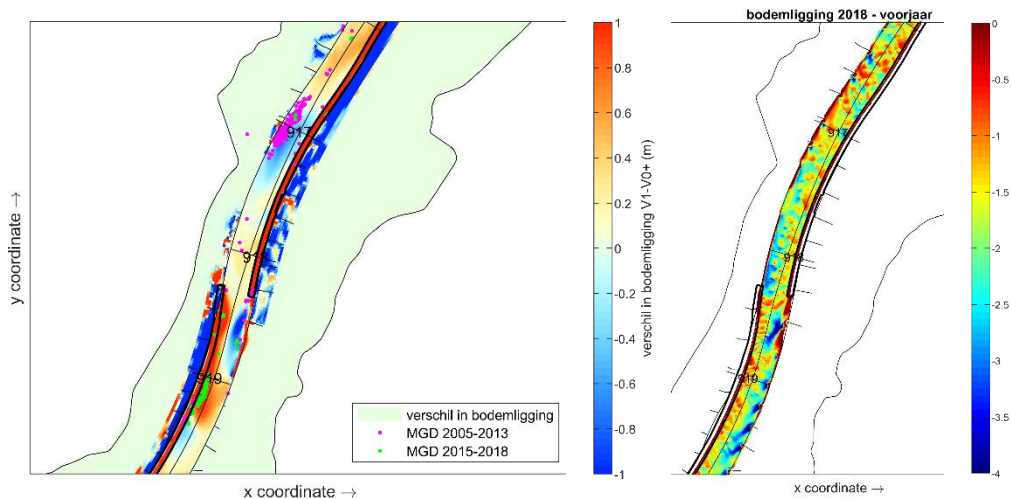
Met deze MGD dataset is geen heel zuivere vergelijking tussen vóór en na aanleg mogelijk (bijv. het aantal jaren en condities is niet gelijk, positiebepaling niet zo nauwkeurig), maar de multibeam metingen en morfologische modelberekeningen (zie ook hierna, Hoofdstuk 3) ondersteunen de constatering dat de kritieke ondiepte verplaatst is. Bij Ophemert is aanzanding te zien ten opzichte van de situatie zonder langsdammen, precies waar de MGD in de recente jaren is gemeten, bij Dreumel erosie ten opzichte van de situatie zonder langsdammen, wat erop duidt dat de ondiepte aldaar minder ondiep wordt (en dientengevolge minder MGD-metingen aldaar).

Het is bekend dat de afvoer door de oevergeul bij Ophemert groter is dan Wamel en Dreumel en dit kan aanleiding zijn voor de grote lokale aanzanding (Sieben, 2020). In april 2018 zijn de instroomopeningen bij Wamel en Dreumel aangepast, niet die bij Ophemert. In april 2019 is de instroomopening van Ophemert versmald naar 85 m (zie Bijlage A.2 van De Jong et al., 2021); een mogelijk effect hiervan is nog niet aanwezig in de beschikbare MGD-registraties.

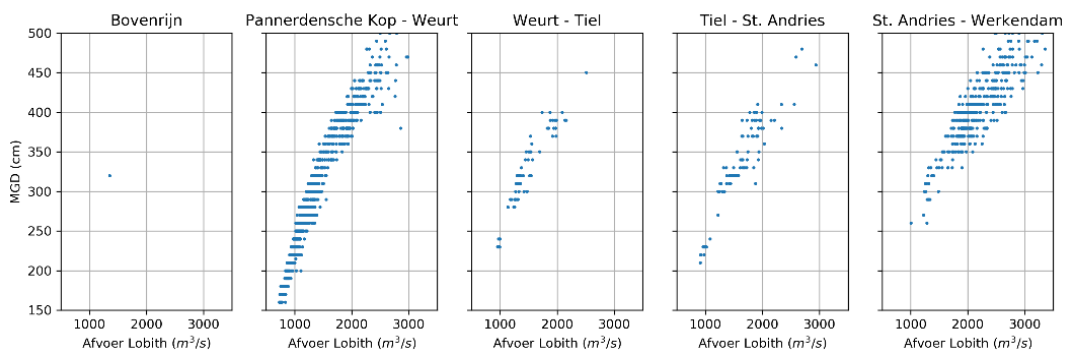
Op de rest van het langsdammen-traject worden vrijwel geen MGD's gemeten.

MGD's bij de langsdammen in relatie tot MGD's op de Boven-Rijn-Waal-corridor

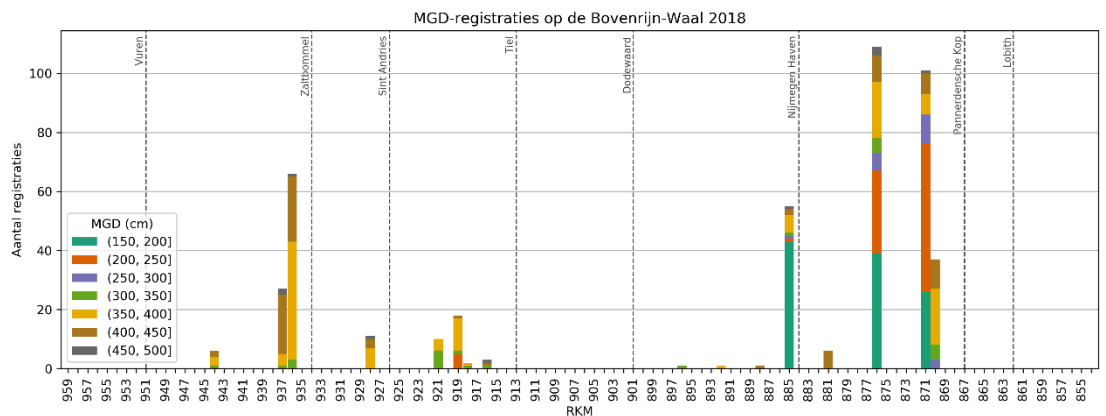
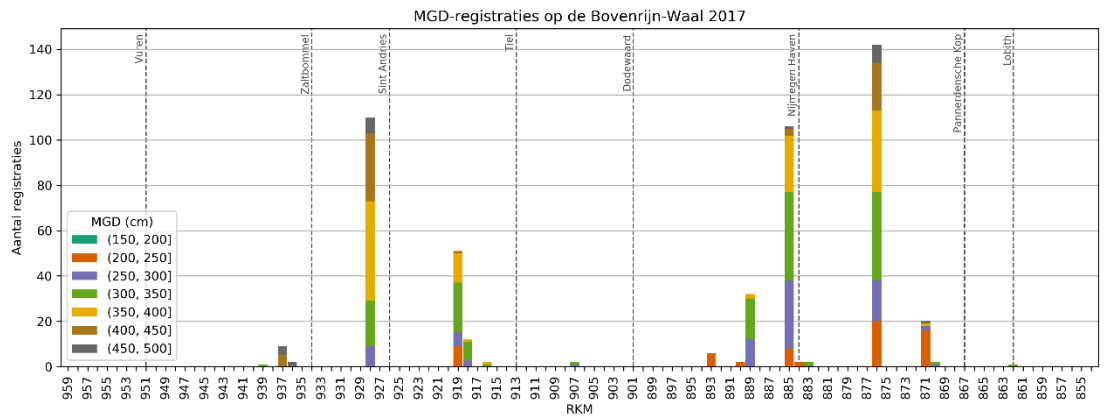
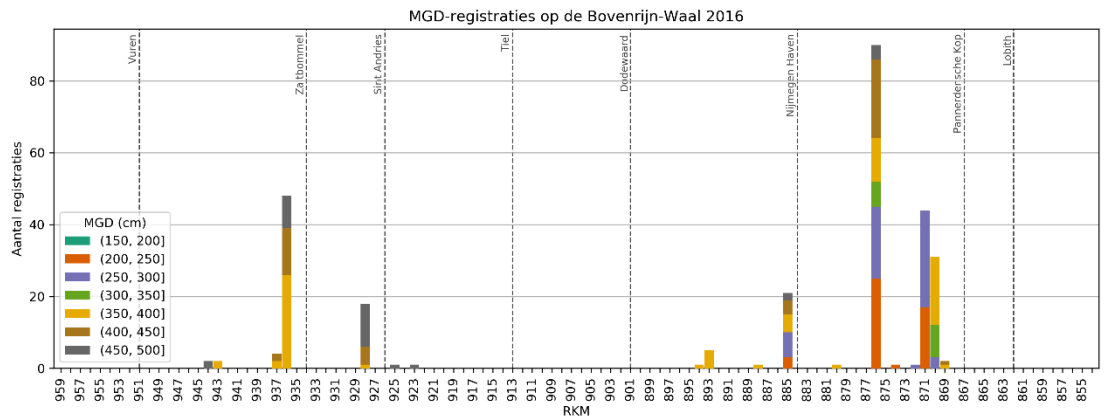
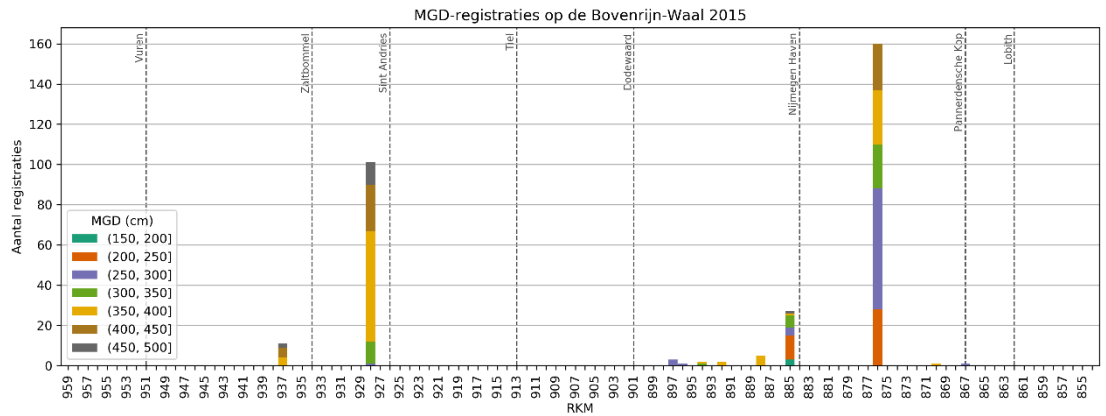
Een nadere inspectie van de recente dataset 2015-2018 (Figuur 2.14 en Figuur 2.15) laat zien dat onder vrijwel alle afvoeren sporadisch een MGD bij de langsdammen voorkomt (traject Tiel – St. Andries), maar dat vaker andere locaties op de corridor maatgevend (het ondiepst) zijn. Bij zeer lage afvoer (lager dan circa 1000 m³/s bij Lobith) zijn de alluviale ondieptes bij Nijmegen of Erlecom vrijwel altijd maatgevend, en de laagste MGD's (klasse 150-200 cm) worden alleen hier gemeten. Grotere MGD's (200-250 cm) komen afwisselend voor op de drie trajecten Pannerdense Kop-Weurt, Weurt-Tiel, Tiel-St Andries met de langsdammen, het vaakst bij eerstgenoemde. Pas bij nog wat hogere afvoer (circa 1300 m³/s bij Lobith) en hogere MGD-klasse (> 300 cm) begint ook knelpunt St. Andries duidelijk mee te spelen (zie ook De Jong & Te Nijenhuis, 2020). Vanaf 2017 staan er soms meerdere MGD's per dag in het databestand vermeld. Als hiervan enkel de minimale MGD over de Boven-Rijn – Waal wordt beschouwd (zie bijlage F van De Jong et al., 2021), komen de laagste MGD's bij de langsdammen (200-250 cm) te vervallen. Erlecom of Nijmegen is op deze momenten nog ondieper.



Figuur 2.13 Links: MGD-registraties (punten) met op de achtergrond het verschil in bodemligging tussen morfologische varianten V1 (zoals aangelegd) en V0 (zonder langsdammen). De positie van de langsdammen is aangegeven met de zwarte omlijnningen. Rechts: bodemligging (JMP) van 2018 in m+NAP.



Figuur 2.14 MGD-registraties voor verschillende trajecten als functie van de afvoer bij Lobith (De Jong & Van der Mark, 2021).

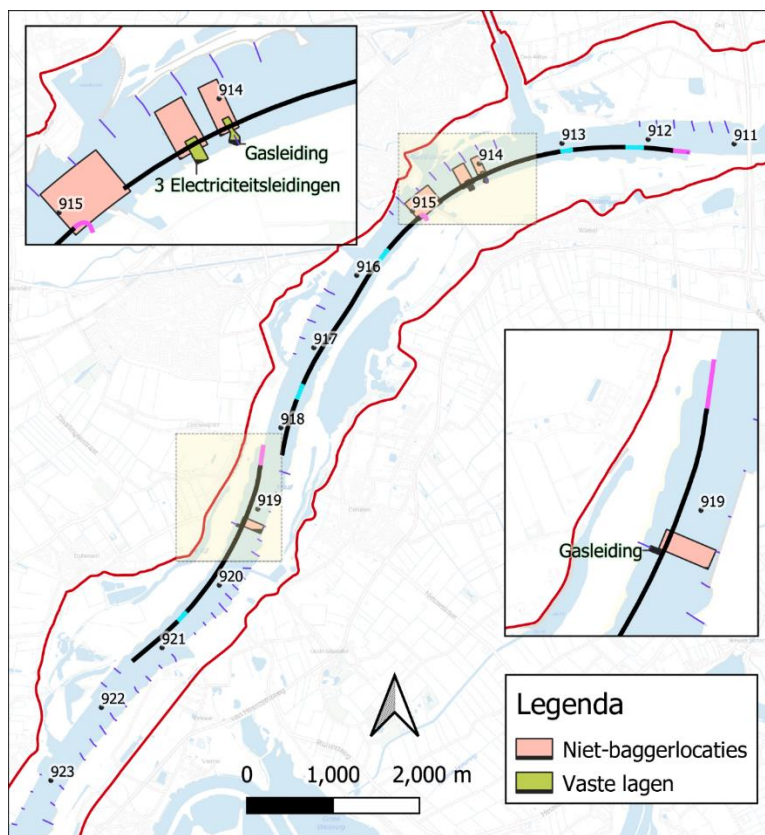


Figuur 2.15 Aantal MGD-metingen per rivierkilometer per jaar. Bron: Bijlage F van De Jong et al. (2021).

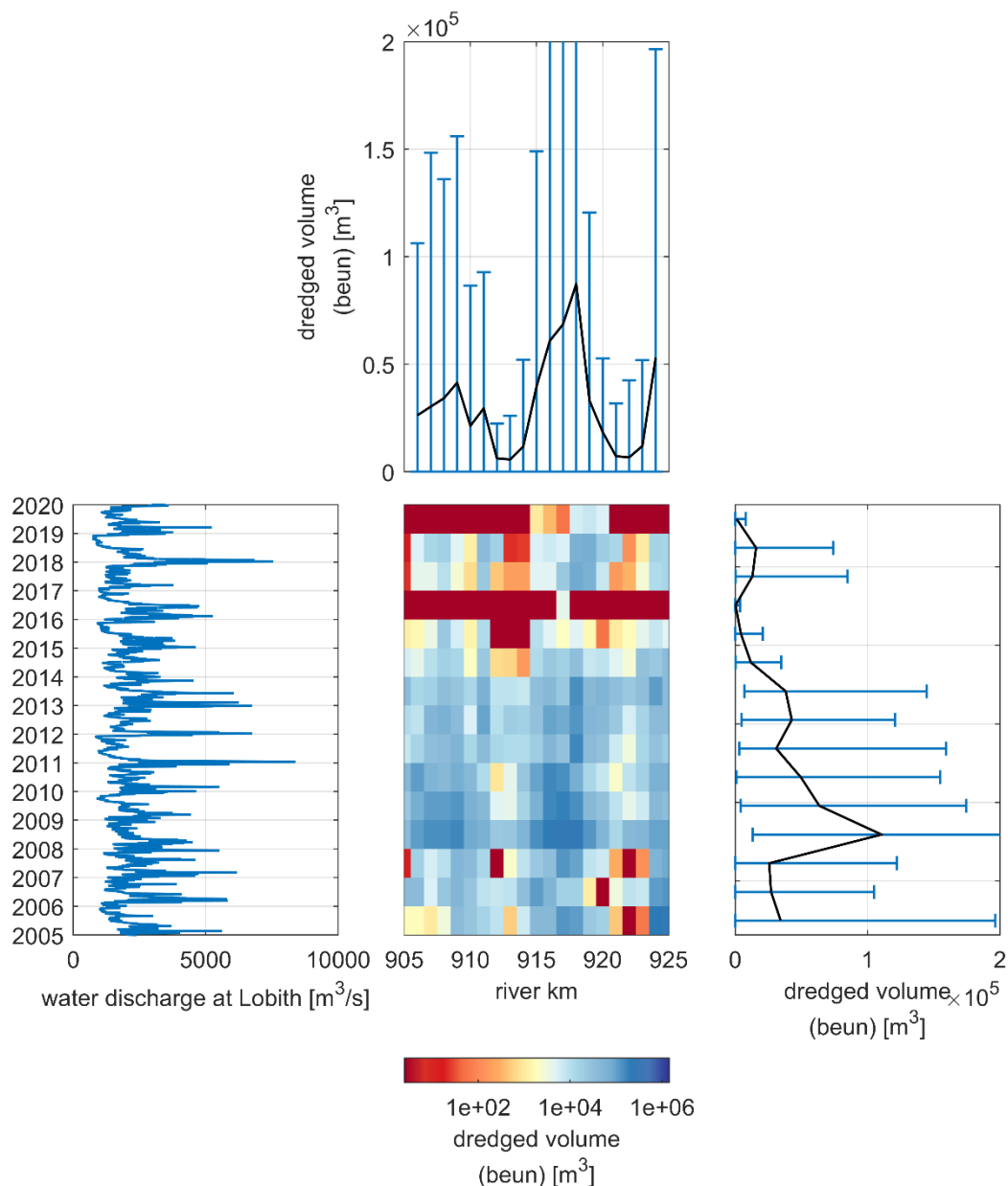
2.2.2.4 Onderhoudswerkzaamheden

Een indicatie dat er extra ondieptes ontstaan zijn als gevolg van de aanleg van de langsdammen kan volgen uit de gegevens over het vaargeulonderhoud (gebaggerde volumes, locaties) over de afgelopen jaren. Er bevinden zich enkele “niet-baggerlocaties” in de rivier (Figuur 2.16) waar geen sediment mag worden weggenomen, dus als de hoeveelheid gebaggerde volumes onveranderd is gebleven of is afgenomen ten opzichte van de situatie vóór aanleg van de langsdammen, betekent dat niet automatisch dat er geen toename in ondieptes is. Ook de praktische invulling van de baggeraar met betrekking tot de baggeroperatie werkt door in de data (ligt er toevallig een beschikbaar baggerschip in de buurt of laat de baggeraar een ondiepte even liggen omdat het toch geen laagwater is).

Figuur 2.17 toont de gemeten baggervolumes, zowel gepresenteerd per jaar als per rivierkilometer. Uit de metingen volgt dat er vanaf 2014 minder gebaggerd is op het langsdammen-traject dan in de jaren daarvoor. De reden hiervoor is onbekend en niet direct verklaarbaar vanuit de multibeam-peilingen. De peilingen wijzen niet uit dat er beduidend minder ondieptes aanwezig waren in de recentere jaren, eerder juist meer. Mogelijk dat de invulling van het onderhoudscontract nog een rol speelt. Zo'n contract ligt voor 5 jaar vast; iedere 5 jaar een andere baggeraar, andere afspraken en prestatie-eisen spelen mogelijk een rol.



Figuur 2.16 Overzicht van niet-baggerlocaties en locaties met bodembescherming (vaste lagen). Bron: De Jong et al. (2021).



Figuur 2.17 Baggervolumes per jaar en per rivierkilometer. Bron: Chavarrías et al. (2021).

2.3 Vaarbreedte

2.3.1 Ligging vaargeul in de beschikbare ruimte

Na aanleg van de langsdammen zijn de normaallijnen (bakenlijnen) gewijzigd (Figuur 2.18). Ter hoogte van de langsdammen is de normaalbreedte 30 m kleiner geworden: van circa 260 m naar 230 m.

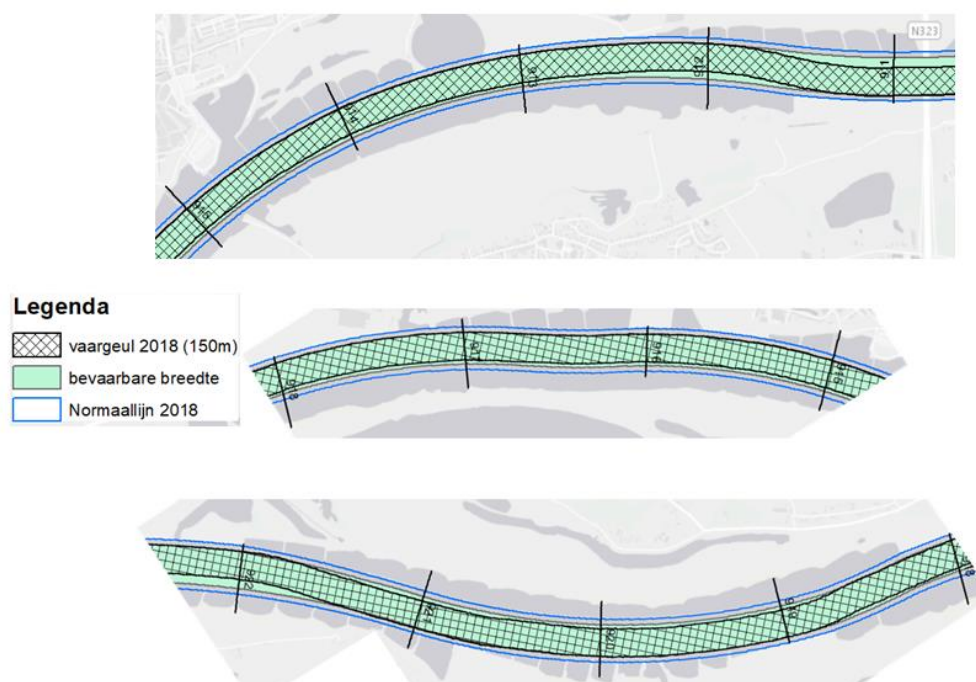
Dit betekent dat ook de “bevaarbare breedte” kleiner is geworden. Volgens Rijkswaterstaat (2020) is de bevaarbare breedte het water tussen de denkbeeldige lijnen die op de Boven-Rijn en Waal op 30 meter uit bakenlijnen liggen. Dit betekent dat de bevaarbare breedte ter hoogte van de langsdammen circa 170 m bedraagt. Hoewel niet vermeld in de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020), zal deze 30 m aan weerszijden van de bakens gehanteerd worden vanuit nautische veiligheidsoverwegingen (met het oog op vaarsnelheid, wind, zuiging, golven).

De vastgestelde vaargeul van 150 m breed "slingert" door de bevaarbare breedte heen, volgt de diepe delen (buitenbochten) van de rivier, en ligt dus niet precies in het midden tussen de normaallijnen/bakenlijnen. Er kan worden vastgesteld dat de vaargeul (150 m) op dit moment binnen of op de grenzen van de bevaarbare breedte ligt, en net bovenstrooms van km 921 en km 922 zelfs iets daarbuiten (zeer beperkt, orde meter) (Figuur 2.19). Er is dus weinig marge in het langsdammen-traject, en een eventueel toekomstige bredere vaargeul van 170 m (onder de aanname van 10 m erbij aan beide zijden) is niet in te passen indien een afstand van 30 m tussen vaargeul en bakenlijn gehandhaafd dient te blijven. De bredere vaargeul van 170 m zou gelijk moeten worden aan de bevaarbare breedte.

Voor de volledigheid wordt vermeld dat ondanks de versmalling, de officiële vaargeulbreedte van 150 m nog steeds onveranderd is gebleven, en er aan de internationale afspraken wordt voldaan.



Figuur 2.18 Oude (rood) en nieuwe (blauw) normaallijnen.



Figuur 2.19 Ligging van de vaargeul binnen de “bevaarbare breedte”. Randen van de bevaarbare breedte liggen ten opzichte van de normaallijnen 30 m naar binnen verschoven.

2.3.2 Beschikbare breedte bij verschillende afvoeren

De beschikbare breedte voor scheepvaart varieert in principe met de afvoer; bij lage afvoer is er minder breedte beschikbaar dan bij hoge afvoer. In deze rapportage is de vaarbreedte gedefinieerd als de afstand waarbinnen de diepte minimaal 2,80 m is met een bovengrens die gelijk is aan de afstand tussen de normaallijnen (circa 230 m ter hoogte van de langsdammen, circa 260 m daarbuiten). Buiten de normaallijnen/bakenlijnen wordt immers niet gevaren.

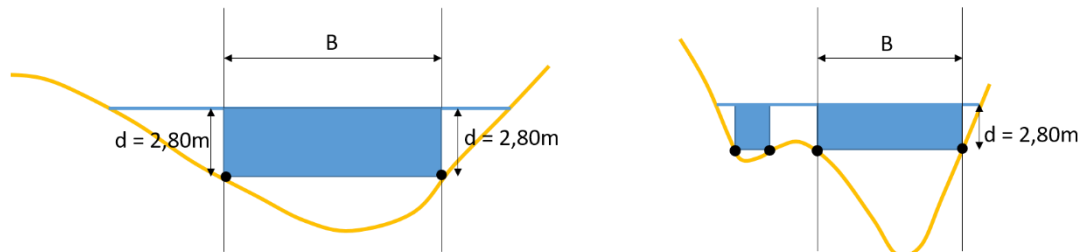
In deze paragraaf is bekeken hoe de vaarbreedte varieert bij veranderende afvoer. Voor de waterstanden zijn de hydrodynamische simulaties uit WP1 gebruikt. Voor de bodemhoogte zijn bodemhoogte-peilingen gebruikt (TIN⁸ in de Baseline-schematisaties van 2014 en 2018). De langsdammen zijn als bodemhoogte opgenomen in de TIN. Voor iedere rivierkilometer is een dwarsprofiel geconstrueerd voor de bodemhoogte en de waterstand bij verschillende afvoeren. Vervolgens zijn de twee posities aan de linker- en rechterzijde van de rivier bepaald waarbij de diepte gelijk is aan 2,80 m, en de afstand daarbinnen is gedefinieerd als de vaarbreedte (Figuur 2.20).

Figuur 2.21 toont een visuele weergave van het proces voor één dwarsprofiel. Het eindresultaat is zichtbaar in Figuur 2.22. De breedtes zijn per kilometer bepaald, zodat het beeld wat puntig oogt. Verder moet bedacht worden dat de bodemligging van 2014 en 2018 niet identiek zijn en ook de normaallijnen buiten het langsdammen-traject niet identiek zijn, wat er mede voor zorgt dat er verschillen ontstaan buiten het langsdammen-traject. Desalniettemin geeft de figuur globaal een betrouwbaar beeld. De vaarbreedte neemt toe met toenemende afvoer (Figuur 2.22). Op een zeker moment, bij verder toenemende afvoer, bereikt de vaarbreedte de bovengrens (= afstand tussen normaallijnen), zodat de lijnen bij afvoeren tussen 10000 en 18000 m³/s bovenop elkaar liggen. Bij deze hoge afvoeren is het verschil in vaarbreedte per definitie maximaal 30 m, gelijk aan de afstand waarover de normaallijnen zijn verlegd.

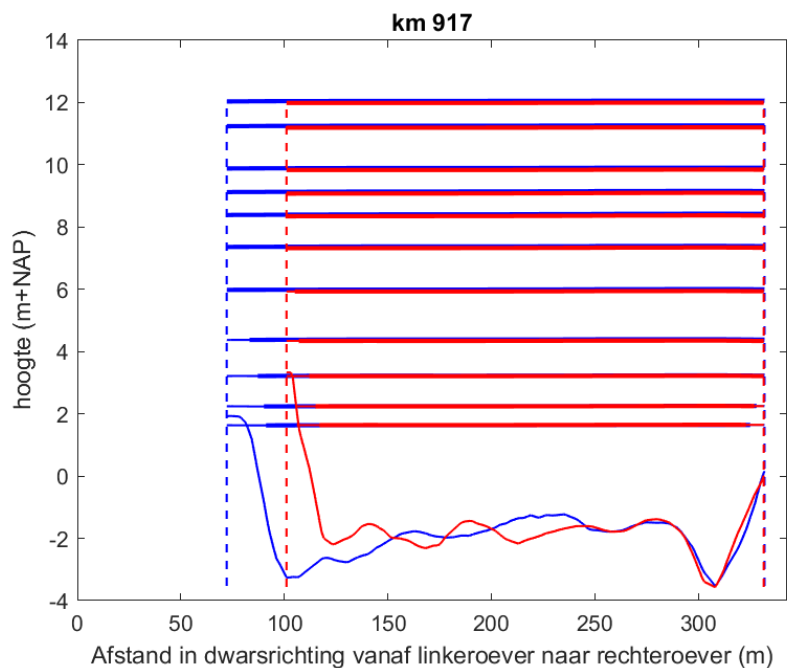
⁸ Triangulated Irregular Network (TIN) is een vector representatie van een bodemoppervlak.

Bij lagere afvoeren kan het verschil in vaarbreedte meer dan 30 m bedragen. Dit is toe te schrijven aan een hogere bodemhoogte in 2018 dan 2014 nabij de dammen/oevers, zodat de positie vanaf waar het ondieper wordt dan 2,80 m verder naar het midden van de rivier ligt. Deze vergelijking is gemaakt op basis van de multibeam-peilingen van 2014 en 2018 (TIN). Hoewel dit slechts twee momentopnames zijn, is het wel heel aannemelijk dat de vaarbreedte met meer dan 30 m afneemt bij lage afvoer op locaties waar aanzanding is ontstaan als gevolg van de langsdammen.

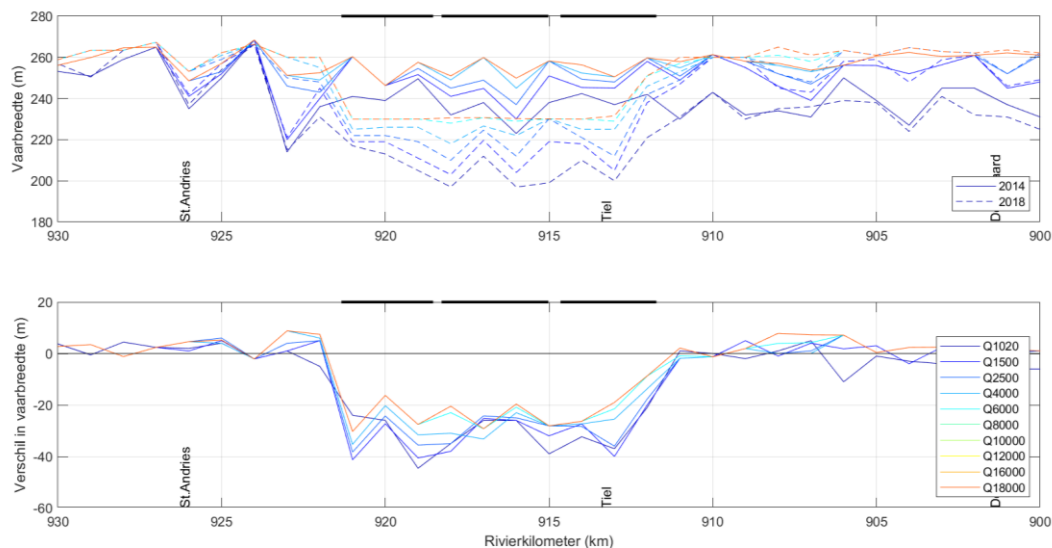
Hoe de scheepvaart reageert op de kleinere vaarbreedte wordt behandeld in §5.3 en in Indah-Everts & Hermans (2021).



Figuur 2.20 Wijze van bepaling van de beschikbare vaarbreedte.



Figuur 2.21 Illustratie van de wijze waarop de vaarbreedte wordt bepaald voor km 917. In blauw wordt de situatie 2014 weergegeven, in rood de situatie 2018. De verticale stippellijnen zijn de normaallijnen (in 2018 verlegd met 30 m aan de linkerszijde). Onderin wordt de bodemhoogte weergegeven, de horizontale lijnen zijn de gesimuleerde waterstanden bij afvoeren van 800 t/m 18000 m³/s bij Lobith (Paarlberg et al., 2021). Deze lijnen zijn dikker getekend op het traject waar de diepte groter is dan 2,80 m en dunner waar de diepte kleiner is (met name duidelijk zichtbaar in blauw nabij linkeroever voor de laagste waterstanden).



Figuur 2.22 Boven: Vaarbreedte in langsrichting van de rivier. Onder: verschil in vaarbreedte tussen 2014 en 2018.

2.4 Conclusies

Ten aanzien van de waterdiepte en vaarbreedte zijn de volgende conclusies getrokken:

- De langsdammen hebben in theorie bij lage afvoer een opstuwend effect door de kleinere normaalbreedte. De verwachte waterstandsopzet bij lage afvoeren door versmalling is echter niet terug te zien in de metingen. Voor scheepvaart lijkt deze pilot langsdammen daarmee vooralsnog minder effectief te zijn dan verwacht.
- Over het algemeen is de gemiddelde waterdiepte in de vaargeul (combinatie van meting en modelresultaat) ter hoogte van de langsdammen gelijk aan de gemiddelde waterdiepte bovenstrooms. De aanleg van de langsdammen verandert dit beeld niet.
- Bij Wamel en Dreumel is sprake is van afwisselende deeltrajecten van erosie en sedimentatie in de metingen. Bij Ophemert vindt over de hele lengte aanzanding plaats, en erosie benedenstrooms van de dam.
- Vooral bij de lagere afvoeren zorgt aanzanding voor hinder door ondieptes (gemeten aanzanding bedraagt meer dan de waterstandsopzet). Aangezien op het langsdammen-traject weinig tot geen overdiepte aanwezig is, zal aanzanding merkbaar zijn voor de scheepvaart. Schippers constateren meer ondieptes ter hoogte van de langsdammen. Er is een MGD-locatie bij gekomen ter hoogte van Ophemert. De gemeten baggervolumes wijzen echter niet op een toename in ondieptes.
- De beschikbare vaarbreedte (bepaald door combinatie van metingen en modelresultaten) ter hoogte van de langsdammen neemt (conform ontwerp) af met tientallen meters (hier gedefinieerd als de breedte van de vaarweg waar de diepte groter is dan 2,80 m). Dat geeft bij de langsdammen een kleinere breedte van het vaarwater dan op het bovenstroomse traject. Bij hoge afvoer bedraagt de afname in vaarbreedte 30 m, in lijn met de reductie van de normaalbreedte. Bij lage afvoer en bij de gekozen definitie van vaarbreedte kan de afname meer dan 30 m bedragen op locaties waar aanzanding heeft plaatsgevonden. De vaarweg voldoet na aanleg van de langsdammen nog steeds aan de internationale norm (een vaargeul van 150 m breed en 2,8 m diep). Een eventueel bredere vaargeul van 170 m is precies in te passen (de vaargeul is dan gelijk aan de bevaarbare breedte), indien een afstand van 30 m tussen vaargeul en bakenlijn gehandhaafd dient te blijven.

- De instelling van de instroomopeningen heeft volgens de hydrodynamische modelberekeningen een significant effect op de waterstanden. Afhankelijk van de instelling van de instroomopening, kunnen bij afvoeren van 1500 m³/s bij Lobith de langsdammen leiden tot zowel een daling als stijging van de waterstand. Dit werkt uiteraard door in de waterdiepte (afname of toename). In de gemeten data is het effect van de instelling van de openingen niet goed waar te nemen.

3 Waterdiepte en vaarbreedte – Toekomstige ontwikkeling

3.1 Inleiding

De toekomstige ontwikkeling volgt uit morfologische berekeningen. De morfologische simulaties uit WP1 geven een beeld van de toekomstige ontwikkeling in waterdiepte en vaarbreedte. In deze paragraaf komen achtereenvolgens de gesimuleerde toekomstige ontwikkeling in bodemligging, waterdiepte, vaarbreedte en vaargeulonderhoud (baggerwerkzaamheden) aan bod. De varianten die zijn beschouwd zijn (meer informatie in Paarlberg et al., 2021):

- V0+ zonder langsdammen, situatie 2014 in het langsdammen-traject met niet verlaagde kribben,
- V1 situatie 2018 met langsdammen, met volledig geopende instroomopeningen,
- V2 volledig gesloten instroomopeningen, verder gelijk aan V1.

Er zijn zowel simulaties met als zonder vaargeulonderhoud uitgevoerd; de verschillen tussen beide zijn klein en de conclusies zijn hetzelfde (Chavarrías et al., 2021). Hier zijn de simulaties met onderhoud gebruikt, omdat hierin de OLR wordt berekend en steeds geactualiseerd, waarmee dieptes ten opzichte van toekomstige OLR kunnen worden bepaald.

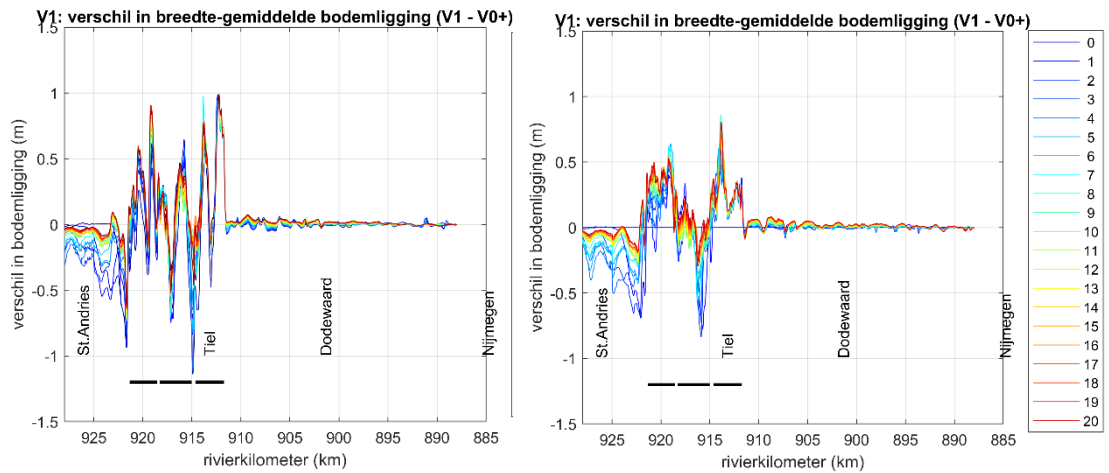
Het voordeel van numerieke simulaties is dat het geïsoleerde effect van puur de langsdammen onderzocht kan worden, zonder dat andere effecten zoals andere (toekomstige) ingrepen of variabiliteit in afvoer of andere variabelen het beeld verstoren. De situatie met en zonder langsdammen kan gemodelleerd worden ver in de toekomst, waarbij alle andere condities gelijk blijven. Het toegepaste model van Paarlberg et al. (2021) is gekalibreerd aan de hand van metingen voor aanvang van de evaluatie van de pilot langsdammen (Omer et al., 2019a; Omer et al., 2019b). Modeluitkomsten van morfologische berekeningen in termen van absolute stroomsnelheden, bodemliggingen, afvoerverdelingen en baggervolumes zijn onnauwkeurig. Daarom wordt voor zover mogelijk alleen een relatieve vergelijking gedaan. Veranderingen in stroomsnelheid in de hoofdgeul (en sedimenttransport capaciteit) worden naar verwachting goed gereproduceerd.

3.2 Bodemligging

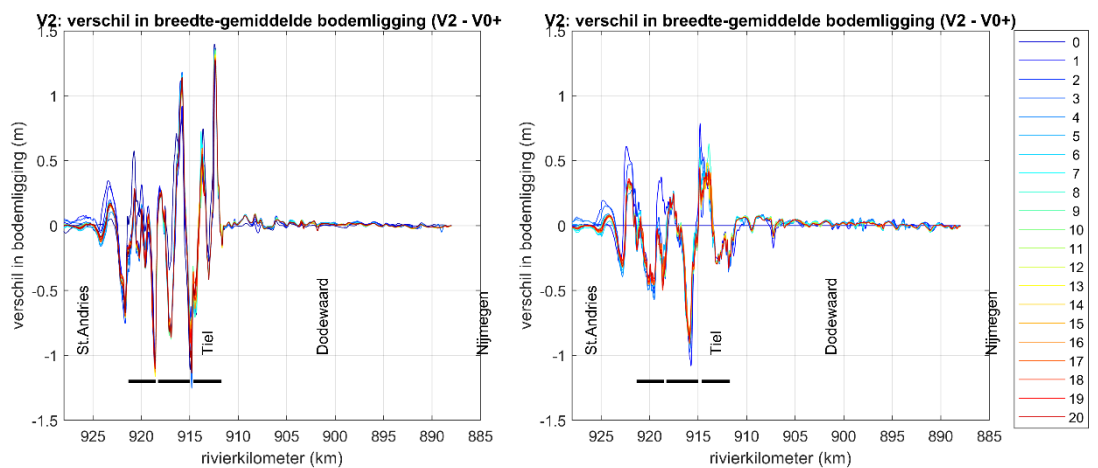
Bij de morfologisch relevante (gemiddelde en hoge) afvoeren neemt, bij open instroomopeningen (V1), de waterstand af ter hoogte van de langsdammen, doorwerkend naar bovenstrooms (afname waterstand bij $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en hoger). Dit zorgt bovenstrooms op de korte termijn voor bodemerosie ten opzichte van de situatie zonder langsdammen. Ter hoogte van de langsdammen Wamel en Ophemert vindt aanzanding plaats (Figuur 3.1 en Figuur 3.3). Dit zorgt ervoor dat op de langere termijn de waterstanden verder opgestuwd zullen worden en daardoor volgens de simulaties bovenstrooms de bodem minder snel erodeert (relatieve aanzanding) (Figuur 3.1). 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.

In de situatie met geheel gesloten instroomopeningen (V2) pakt het anders uit. Hier nemen de waterstanden bij de morfologisch relevante afvoeren zowel af ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ en hoger) als toe ($Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ en lager), zie ook §2.2.1.2 (sectie over waterstanden volgens hydraulisch model). Waarschijnlijk slaat hierdoor op de lange termijn de balans nu uit richting erosie ter hoogte van de langsdammen, en minder relatieve aanzanding bovenstrooms (Figuur 3.4). De berekeningen laten dus zien dat de instelling van de inlaten een behoorlijk morfologisch effect hebben.

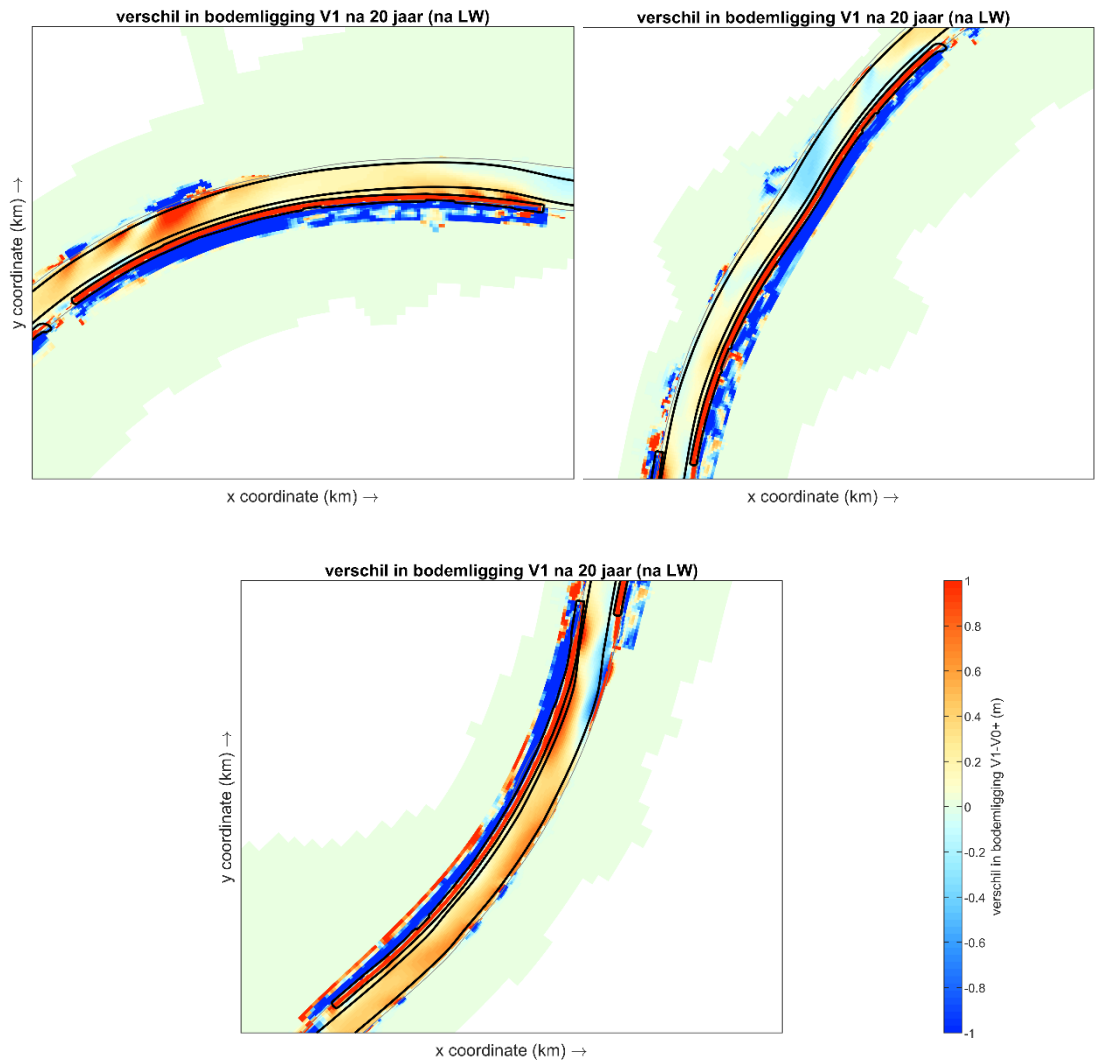
Het is aan te bevelen de invloed van de instroomopeningen nader te onderzoeken (de modelresultaten blijvend te toetsen met metingen). Als de berekeningen kloppen is er veel effect op de waterdiepte te bereiken met aanpassing van de instroomopeningen, maar heeft de instelling ook effect op de bodemontwikkeling en vaargeulonderhoud (zie hierna).



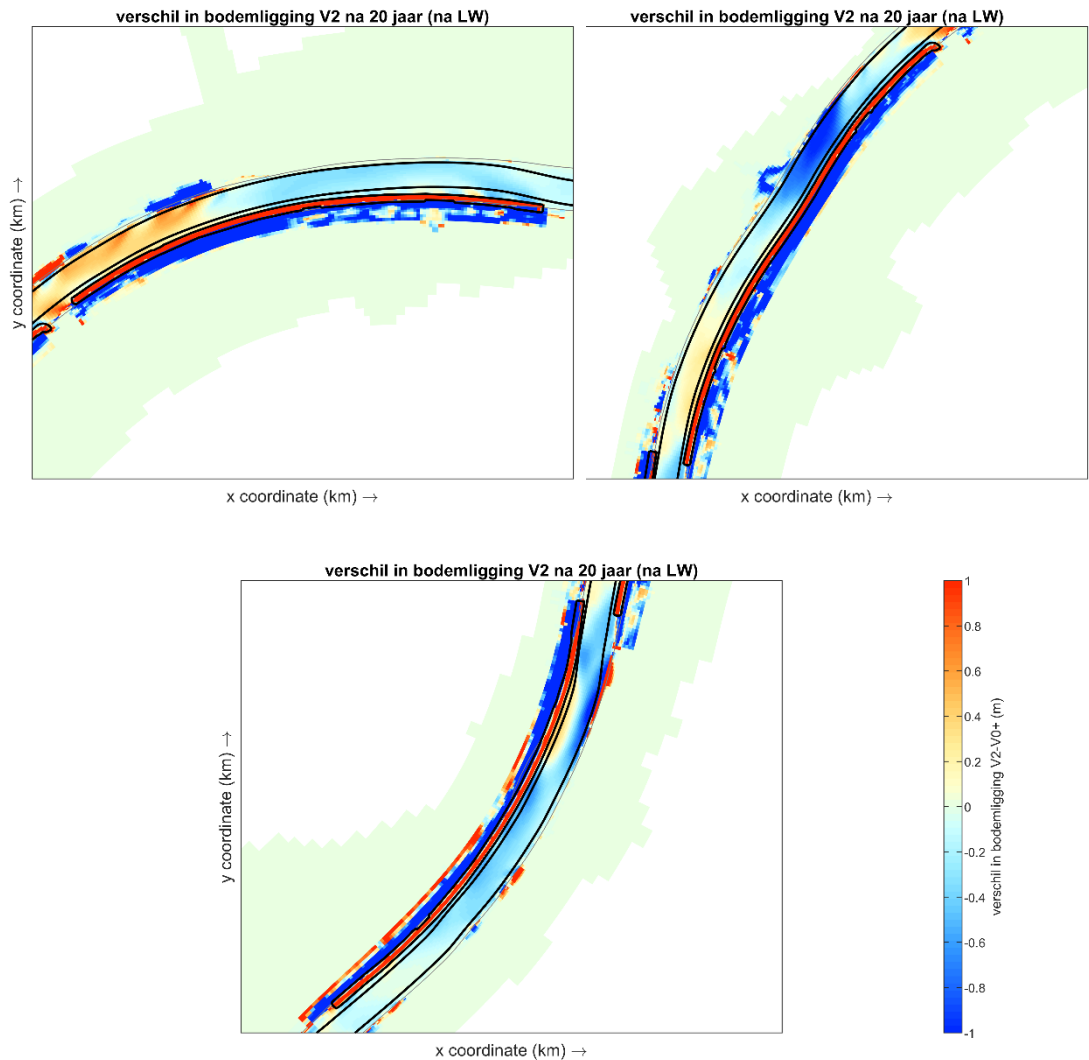
Figuur 3.1 Verschil in breedte-gemiddelde bodemligging over 20 jaar (variant V1 minus V0+). Links: na periode van hoogwater; rechts: na periode van laagwater (na baggerwerk).



Figuur 3.2 Verschil in breedte-gemiddelde bodemligging over 20 jaar (variant V2 minus V0+). Links: na periode van hoogwater; rechts: na periode van laagwater (na baggerwerk).



Figuur 3.3 Verschil in bodemligging na 20 jaar (variant V1 minus V0+) bij de langsdammen Wamel (linksboven), Dreumel (rechtsboven) en Ophemert (onder).



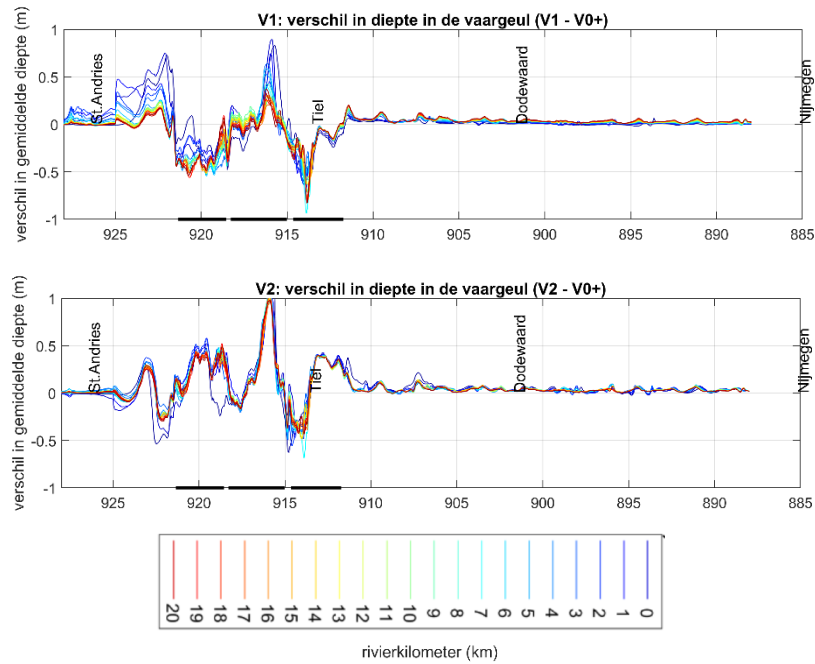
Figuur 3.4 Verschil in bodemligging na 20 jaar (variant V2 minus V0+) bij de langsdammen Wamel (linksboven), Dreumel (rechtsboven) en Ophemert (onder).

3.3 Diepte in de vaargeul bij OLR

In de morfologische berekeningen wordt ieder jaar een hydrodynamische berekening met een afvoer van 1020 m³/s uitgevoerd om een nieuwe OLR (waterstand bij een afvoer van 1020 m³/s) te bepalen. De OLR wordt beperkt beïnvloed door de morfologische veranderingen. Dat betekent dat een ontwikkeling in bodemligging vrijwel rechtstreeks vertaald kan worden naar een ontwikkeling in waterdiepte (d.w.z., wat we in het model zien aan trends in bodemligging geldt ook voor trends in diepte).

Voor de gemiddelde diepte in de vaargeul bij OLR bij variant V1 is te zien dat op de lange termijn in vergelijking met de situatie zonder langsdammen de diepte afneemt ter hoogte van de langsdammen (met name bij Wamel en Ophemert) en de diepte beperkt toeneemt bovenstrooms ervan (Figuur 3.5). De diepte in de vaargeul neemt ter hoogte van de langsdammen af doordat de aanzanding ter plaatse van de langsdammen groter is dan de verandering in OLR. In variant V2 neemt de diepte toe ter hoogte van de langsdammen (met name bij Dreumel en Ophemert), enerzijds door de toename in waterdiepte en waterstand (zie §2.2.1.2), anderzijds door de toename in bodemerosie (zie §3.2). De verschillen tussen de varianten zijn groot en vragen nadere analyse.

Een afname in diepte in de vaargeul ter plaatse van de langsdammen van circa 0,5 m à 1,0 m (Figuur 3.5) zal zeker merkbaar zijn voor de binnenvaart.



Figuur 3.5 Verschil in diepte, gemiddeld over de vaargeul, over 20 jaar (varianten V1 en V2 minus V0+). De kleuren geven de jaren weer (van blauw naar rood).

3.4 Vaarbreedte

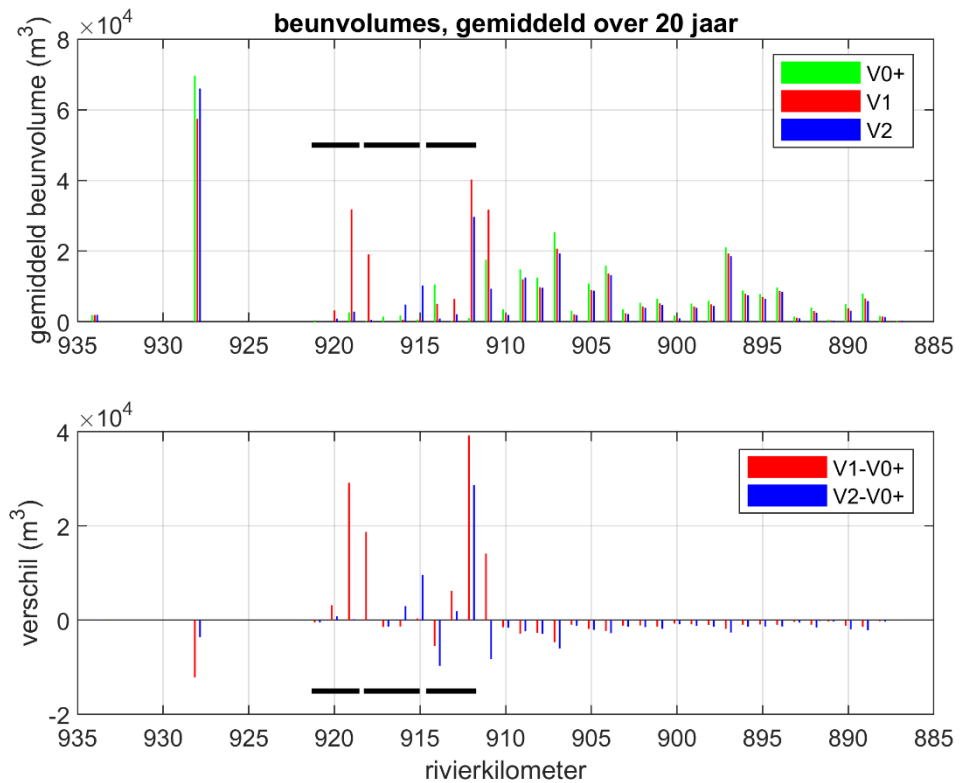
Vaarbreedte definiëren we hier als de afstand waarbinnen de diepte minimaal 2,80 m is met een bovengrens die gelijk is aan de afstand tussen de normaallijnen. De afname in vaarbreedte is initieel tientallen meters, conform de afname in normaalbreedte en het vorige hoofdstuk. De toekomstige ontwikkeling in vaarbreedte bij lage afvoer (OLA) lijkt beperkt, dat wil zeggen er is weinig verschil (geen significante afnemende of toenemende trend) over de jaren. Echter, de bepaling van vaarbreedte waarbinnen het overall dieper is dan 2,8 m aan de hand van modelresultaten op een rooster (i.p.v. gedetailleerd TIN) bevat onnauwkeurigheden en er kunnen geen harde conclusies getrokken worden.

3.5 Vaargeulonderhoud

In de morfologische berekeningen wordt gebaggerd in de 150 m brede vaargeul voor een diepte van 2,80 m ten opzichte van OLR en teruggestort binnen de normaallijnen. In Paarlberg et al. (2021) wordt in meer detail toegelicht op welke wijze dit is geïmplementeerd.

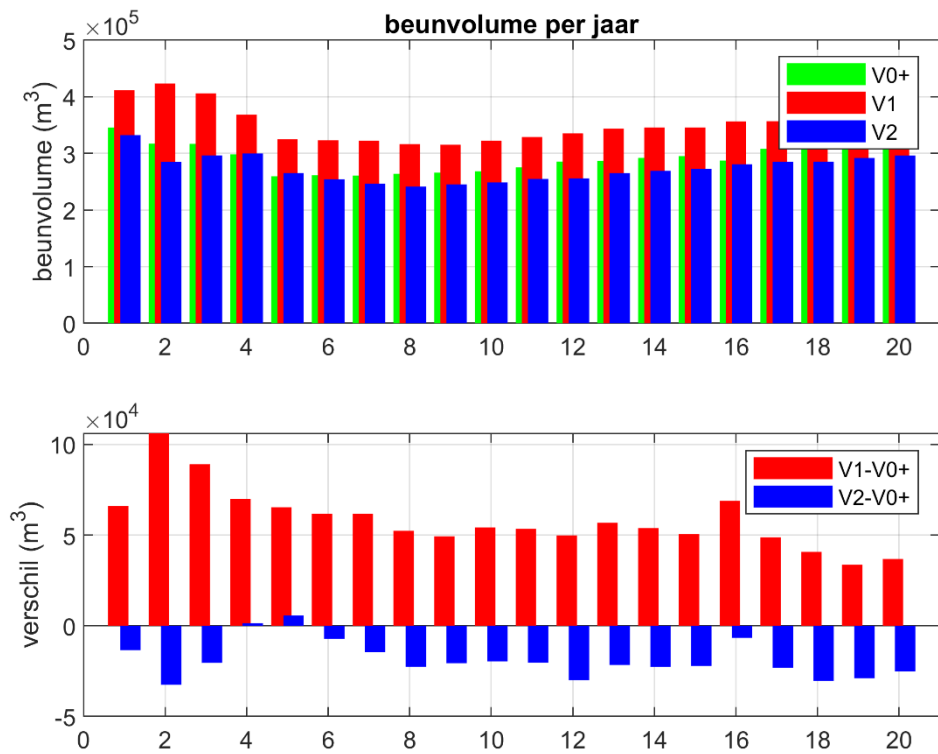
Er is een toename berekend in baggerinspanning ter hoogte van de langsdammen (met name bij de instroomopeningen) en een afname op het bovenstroomse traject (Figuur 3.6). Dit is in lijn met de berekeningen van ontwikkeling in bodemligging en waterdiepte; de diepte neemt af ter hoogte van de langsdammen en neemt toe bovenstrooms ervan. Bij variant V2 is de toename bij de langsdammen beperkter dan bij V1, met name ter hoogte van Ophemert. Netto, gesommeerd over het gehele traject Nijmegen-Zaltbommel, leidt dit er toe dat er in V1 een toename in totaal baggerwerk is ten opzichte van V0+, en in V2 een afname ten opzichte van V0+ (Figuur 3.7).

Extra baggeractiviteiten leiden tot een toename van hinder voor het scheepvaartverkeer. Onder de aanname dat 7.500 m³ per jaar per 15 km in 5 dagen kan worden weggebaggerd⁹, lijken deze volumes (in V1 orde 30.000 à 50.000 m³ toename baggervolume) bij de langsdammen hinder te zullen gaan veroorzaken. Bovendien zal de kleinere normaalbreedte door aanleg van de langsdammen met verminderde manoeuvreerruimte de impact van baggerwerkzaamheden nog verder vergroten.



Figuur 3.6 Gesimuleerde baggervolumes per rivierkilometerblok, gemiddeld over 20 jaar, voor de varianten V0+, V1 en V2 (boven), en het verschil ten opzichte van V0+ zonder langsdammen (onder).

⁹ Deze aanname komt uit Van der Mark et al. (2011), en geldt voor de IJssel, mogelijk kan meer worden gebaggerd in de Waal.



Figuur 3.7 Ontwikkeling in totale hoeveelheid baggervolumes per jaar (jaar 1 t/m 20) voor de varianten V0+, V1 en V2 (boven), en het verschil ten opzichte van V0+ zonder langsdammen (onder).

3.6 Conclusies

Ten aanzien van de toekomstige ontwikkeling in waterdiepte en vaarbreedte de komende 20 jaar zijn de volgende conclusies getrokken op basis van de morfologische modelberekeningen:

- Bij variant V1 (volledig geopende instroomopeningen) is te zien dat, ten gevolge van lange-termijn morfologische ontwikkelingen, in vergelijking met de situatie zonder langsdammen de diepte bij OLR afneemt ter hoogte van de langsdammen (met name bij Wamel en Ophemert) en de diepte beperkt toeneemt bovenstrooms ervan. In variant V2 (volledig gesloten instroomopeningen) neemt de diepte toe ter hoogte van de langsdammen (met name bij Dreumel en Ophemert).
- Extra baggeractiviteiten leiden tot een toename van hinder voor het scheepvaartverkeer. Er is in V1 een toename in baggerinspanning gemodelleerd bij de langsdammen (met name bij de instroomopeningen van Wamel en Ophemert) en een afname op het bovenstroomse traject. Over het gehele traject Nijmegen-Zaltbommel leidt dit in V1 tot een toename in baggerwerk ten opzichte de situatie zonder langsdammen, en in V2 juist tot een afname.
- Op de langere termijn ontwikkelt de vaarbreedte (breedte waarbinnen het dieper is dan 2,8 m) bij lage afvoer zich volgens de berekeningen niet significant, maar deze conclusie is onzeker doordat het niet goed mogelijk is een nauwkeurige breedtebepaling te doen waarbinnen het dieper is dan 2,8 m vanwege het rekenrooster.
- De instelling van de instroomopeningen lijkt een significant effect te hebben op de ontwikkeling in bodemligging en waterdiepte in de komende 20 jaar. Om het daadwerkelijke effect van de instroomopeningen te bepalen is nader onderzoek nodig. De potentiële effecten op de waterdiepte als gevolg van de morfologische ontwikkelingen zijn groot.

4 Langs- en dwarsstroming

4.1 Inleiding

Onderdeel van de evaluatie van de pilot langsdammen is het onderzoeken van de dwarsstroming rondom de langsdammen. Voor de functie vaarweg moet er worden bepaald of er sprake is van hinderlijke dwarsstromen bij de samenvloeiing van hoofd- en oevergeul en op andere delen van het langsdammen-traject. Om deze vraag te kunnen beantwoorden wordt eerst vastgesteld wat er onder hinderlijke dwarsstromen wordt verstaan. Daarna wordt de aanpak op een rij gezet. Aan het einde van dit hoofdstuk wordt uiteengezet of er sprake is van hinderlijke dwarsstromen voor de scheepvaart.

Dwarsstromen zijn de stromingen haaks op de vaarweg en worden normaliter bepaald op de rand van de vaarweg of op de bakelijijn. Sterke stromingen haaks op de vaarweg verminderen de bevaarbaarheid of manoeuvreerbaarheid en kunnen leiden tot gevaarlijke situaties doordat schepen gaan drijven op de rivier.

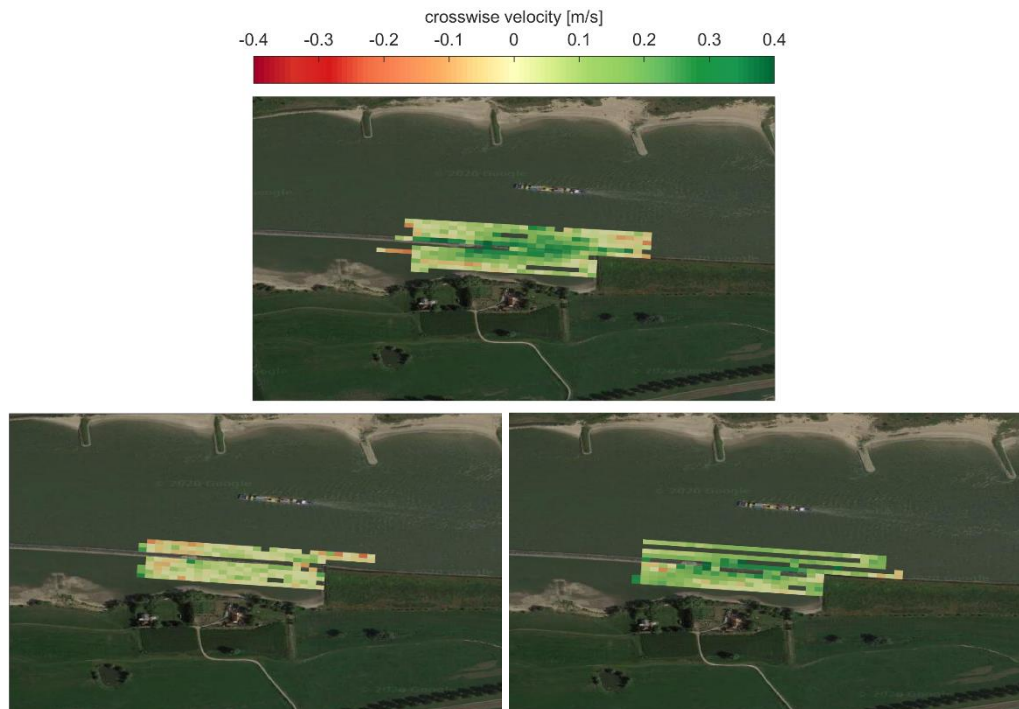
In het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK; Rijkswaterstaat, 2019) wordt onder meer rekening gehouden met dwarsstroming en is gesteld dat elke ingreep in de rivier niet mag resulteren in een absolute dwarsstroming van meer dan 0,15 m/s bij dwarsstroomdebieten hoger dan 50 m³/s (bij een lager debiet is een dwarsstroming van maximaal 0,30 m/s acceptabel; veelal is het debiet echter hoger dan 50 m³/s). Deze absolute dwarsstroming moet worden bepaald op de bakelijijn in de rivier (zie de definitie in de begrippenlijst, paragraaf 1.3), omdat deze meestal de rand van de bevaarbare rivier aangeeft. Bij extreme Boven-Rijn afvoeren is het RBK niet meer van toepassing¹⁰.

Het criterium uit het RBK biedt de mogelijkheid om de verandering in dwarsstroming te kwantificeren. Echter ontstaat er ook een aantal uitdagingen in het beoordelen van de dwarsstroming puur op basis van het RBK:

- Ten eerste is het bekijken van de absolute dwarsstroming zonder het algehele stroombeeld mee te nemen niet wenselijk. Bij het toenemen van de longitudinale stromingen zal een vergelijkbare toename in absolute dwarsstroming relatief minder effect hebben op de bevaarbaarheid. Bij een hogere stroomsnelheid op de rivier worden schepen meer in de langsrichting gestuurd. Daarom zal er ook worden gekeken naar de stroompatronen op de rivier rondom de langsdammen om het verwachte effect op de bevaarbaarheid te beoordelen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het numerieke model een indicatie, maar niet een volledig beeld zal geven van het werkelijke stroombeeld.
- Daarnaast verandert is na aanleg van de langsdammen de locatie van de bakelijijn veranderd ten opzichte van de referentie (de situatie voor aanleg). Er is daarom besloten om zowel de referentie als de nieuwe situatie te vergelijken op de buitenvoet van de langsdammen (conform het RBK voor de nieuwe situatie). In de referentiesituatie zal de werkelijke bakelijijn zich dichterbij de oevers bevinden, waar over het algemeen de dwarsstroming hoger is. De dwarsstroming van de referentie wordt in deze vergelijking dus onderschat.

¹⁰ Tabel 4 uit het RBK: "De ingreep mag niet resulteren in een absolute dwarsstroming in de vaarweg groter dan 0,15 m/s bij een geconcentreerde dwarsstroming met een debiet groter dan 50 m³/s. Of het moet aantoonbaar zijn dat de toename padbreedte schip t.g.v. dwarsstroom kleiner is dan ½B; De ingreep mag niet resulteren in een absolute dwarsstroming in de vaarweg groter dan 0,3 m/s bij een geconcentreerde dwarsstroming met een debiet kleiner dan 50 m³/s; Bij extreme Boven-Rijn afvoeren is dit beoordelingscriteria niet van toepassing."

Lokale stromingsmetingen geven het meest accurate beeld over daadwerkelijk opgetreden dwarsstromingen bij de in- en uitlaten. Om die reden zijn in WP0 de ADCP-metingen rondom de inlaatopeningen geanalyseerd. Er is geconstateerd dat in deze metingen de dieptegemiddelde dwarsstroming in de vaargeul niet groter is dan 0,3 m/s bij de inlaten van de oevergeulen. De gemeten dwarsstromingen zijn soms in kleine gebieden wel hoger dan 0,3 m/s, maar dit treedt op boven de inlaatdrempel en in de oevergeulen. Richting de hoofdgeul (vaargeul) nemen de dwarsnelheden snel af.



Figuur 4.1 ADCP-metingen ter hoogte van de inlaatopening Wamel op 2 februari 2018 (4700 m³/s bij Lobith), 4 januari 2019 (1800 m³/s bij Lobith) en 20 maart 2019 (5000 m³/s bij Lobith). Bron: De Jong et al. (2021).

De geanalyseerde dataset heeft echter ook beperkingen. Zo is het afvoerbereik waarbinnen de metingen zijn uitgevoerd beperkt, gevaren raaien niet altijd op dezelfde locatie, lijken de verticale en dwarsnelheden onrealistisch, en is er een beperkt aantal metingen beschikbaar van de situatie voor aanleg van de langsdammen. Om die redenen is in deze rapportage, aanvullend op de uitgevoerde ADCP-analyse, een aanpak gekozen die aansluit op het Rivierkundig Beoordelingskader. Hierbij wordt, conform het Rivierkundig Beoordelingskader, gebruik gemaakt van modelresultaten. Dit biedt de mogelijkheid om onder verschillende condities (van extreem lage tot hoge afvoer) een globaal beeld te krijgen van de dwarsstromingen, een goede vergelijking te maken tussen voor en na aanleg en zo een indicatie te geven van de effecten van de langsdammen.

In de Richtlijnen Vaarwegen (2020) wordt de beoordeling van de dwarsstroming nader uitgewerkt met behulp van de langsstroming en scheepslenkte. Daarnaast wordt er een onderscheid gemaakt tussen het voor- en tegenstrooms varen. De aanvullende overwegingen worden meegenomen in de analyse.

Deze evaluatie richt zich dus in eerste instantie op de normen uit het Rivierkundig Beoordelingskader. Vervolgens zullen deze resultaten met behulp van stroompatronen in een bredere context worden geplaatst ten behoeve van de evaluatie van de langsdammen. Als laatste worden deze bevindingen naast de Richtlijnen Vaarwegen gelegd.

4.2 Aanpak

Er zijn vier verschillende analyses uitgevoerd voor het beoordelen van de dwarsstroming op basis van de hydrodynamische modelresultaten:

- 1 Langsprofiel van de verandering in dieptegemiddelde stroomsnelheid op de rivieras;
- 2 Ruimtelijk stroombeeld van de veranderingen in dieptegemiddelde stroomsnelheid;
- 3 Langsprofiel van de dwarsstroming aan beide kanten van de vaargeul;
- 4 Ruimtelijk stroombeeld van de veranderingen in absolute dwarsstroming;

De eerste twee stappen geven een globaal beeld van de impact van de langsdammen op de (langs)stroming in dit deel van de Waal (sectie 4.3.1). De resultaten van stap 3 worden beoordeeld met behulp van het criterium uit het RBK en met de stap 4 wordt gekeken of er sprake is van hinderlijke dwarsstroming in relatie tot de heersende stroompatronen (sectie 4.3.2). Aanvullend op deze stap worden de overwegingen uit Richtlijnen Vaarwegen meegenomen (sectie 4.4). Vervolgens worden de resultaten van al deze stappen gecombineerd in conclusies van de dwarsstroming (sectie 4.5).

De verschillende varianten van de hydrodynamische simulaties zijn reeds geïntroduceerd in sectie 2.2.1.1.

4.3 Interpretatie gesimuleerde dieptegemiddelde stroomsnelheden

4.3.1 Langsstroming

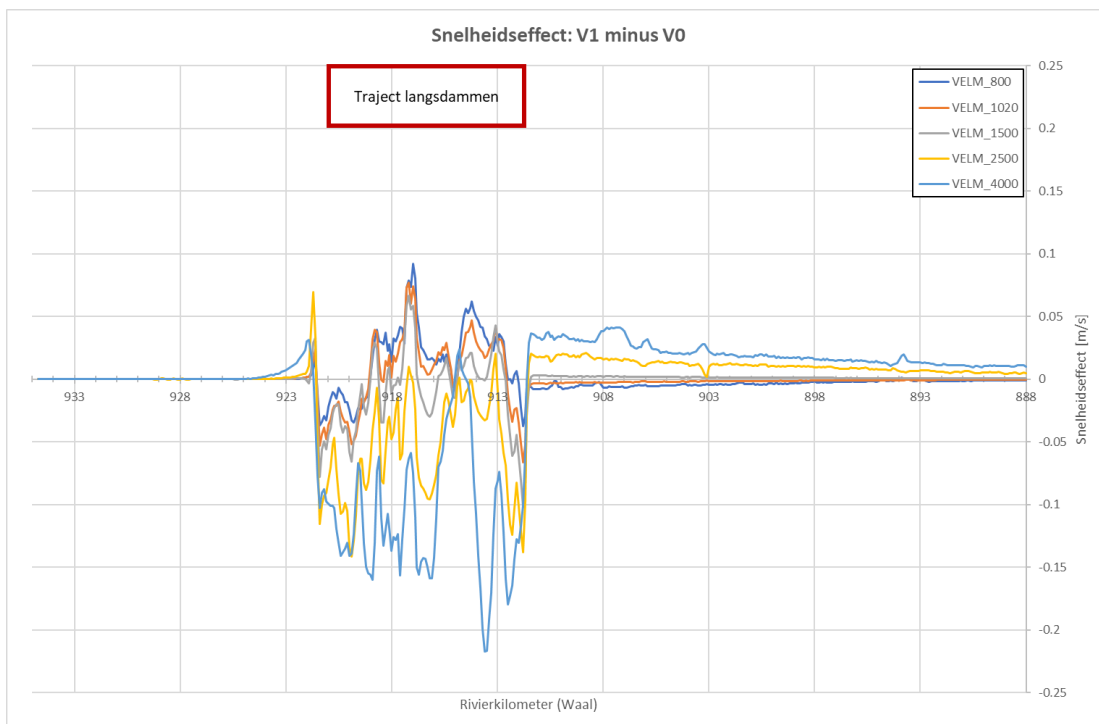
In Figuur 4.2 t/m Figuur 4.9 is achtereenvolgens weergegeven: de verandering in langsstroming op de rivieras (afvoeren tot 4000 m³/s voor hydrodynamische simulaties V1, V2 en V3 t.o.v. V0), de absolute stroomsnelheid in de rivieras (dezelfde afvoeren, enkel voor V2), en een ruimtelijk beeld van de verandering in stroomsnelheid (V1 bij 800 m³/s; V2 bij 2500 m³/s; en V3 bij 800 en 1500 m³/s).

Bij lage afvoeren (tot 1020 m³/s) is het doorstroomd dwarsprofiel afgenomen na aanleg van de langsdammen waardoor de stroomsnelheid bij gelijke lage afvoeren toeneemt. Bij hogere afvoeren (4000 m³/s en hoger) is de weerstand als gevolg van het weghalen van de kribben afgenomen en is het stroomprofiel juist toegenomen waardoor de stroomsnelheid daalt. Bij tussenliggende afvoeren is de verandering in stroomsnelheid afhankelijk van de instellingen van de inlaatdrempels.

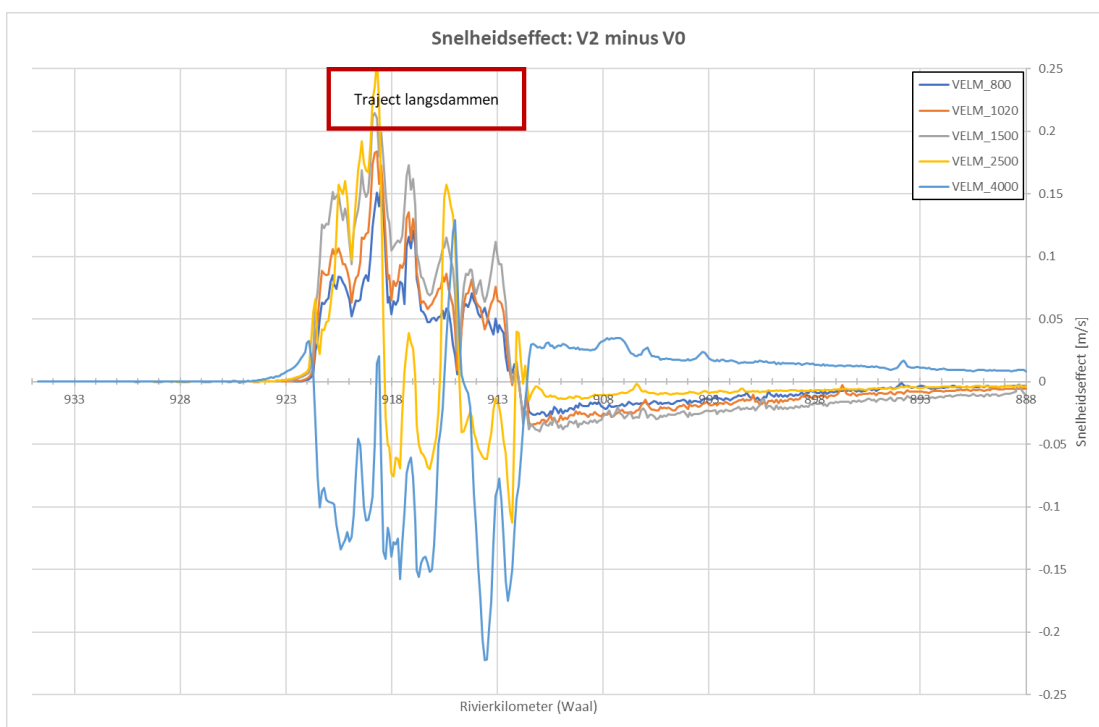
Bij variant V2 (gesloten openingen) neemt de stroomsnelheid ter hoogte van Ophemert nog sterk toe bij een afvoer van 2500 m³/s waar deze bij andere varianten dan al afneemt (Figuur 4.3 en Figuur 4.7). Over het gehele traject van de langsdammen is in deze variant de stroomsnelheid (tot Q=4000 m³/s) circa 5 à 10% hoger ten opzichte van het bovenstroomse deel van de Waal (Figuur 4.5). Dit is het gevolg van het afnemen van het stroomoppervlak bij gelijke afvoer. De toename in stroomsnelheid is redelijk gelijkmatig verdeeld over de vaargeul (Figuur 4.7) wat de impact op de bevaarbaarheid van de rivier beperkt.

Bij de varianten met volledig of deels geopende inlaten (V1, V3) is de toename van de stroomsnelheid het grootst bij respectievelijk 800 m³/s en 1500 m³/s. Deze toename is veel kleiner dan in variant V2. Voor alle hogere afvoeren blijkt bij (deels) geopende inlaten juist een afname in de stroomsnelheden.

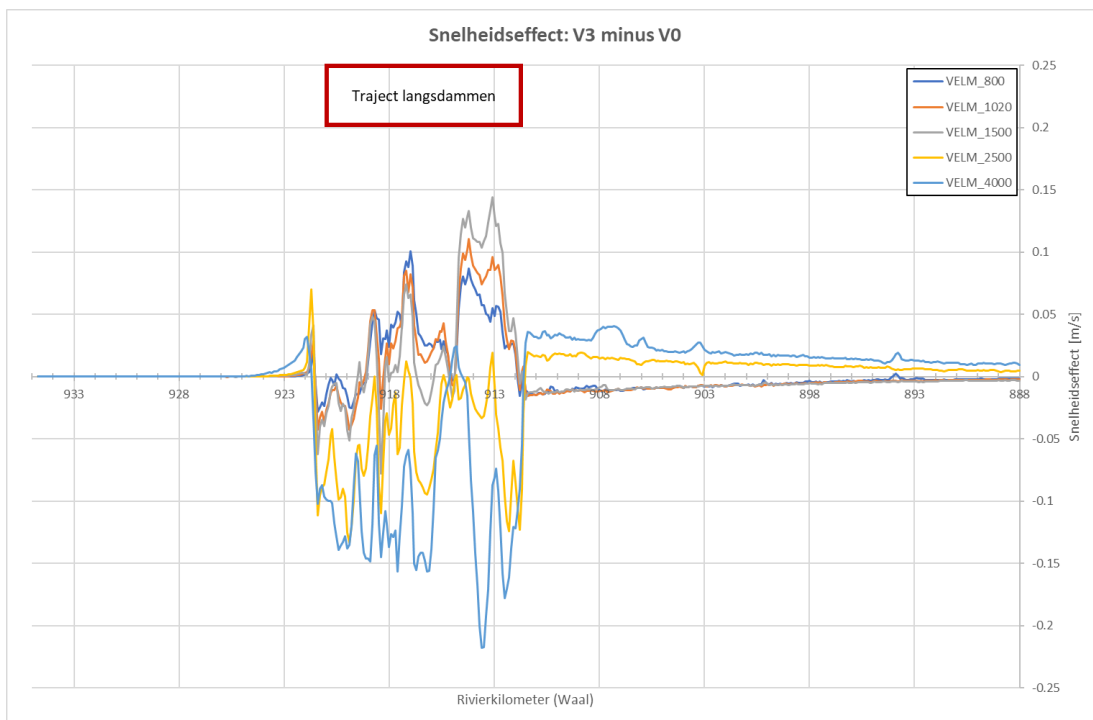
Samengevat leiden de langsdammen bij lage afvoer tot een verhoging van de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de vaargeul en bij hogere afvoeren juist tot een verlaging. Het omslagpunt is afhankelijk van de instellingen van de inlaatopeningen. Een hogere stroomsnelheid kan voor opgaande scheepvaart negatieve gevolgen hebben voor het brandstofverbruik.



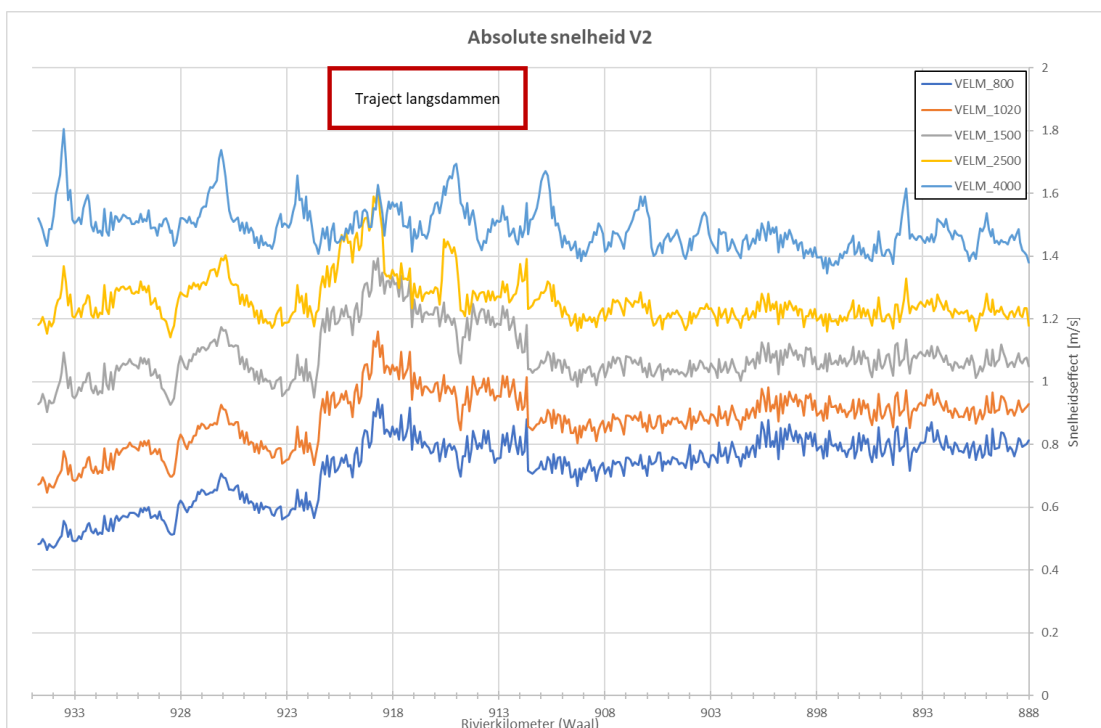
Figuur 4.2 Langsprofiel van de verandering in het dieptegemiddelde stroomsnelheid (langsstroming) op de rivieras door aanleg van langsdammen met open instroomopeningen (variant V1 t.o.v. de referentie V0) voor afvoeren tussen 800 en 4000 m³/s op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



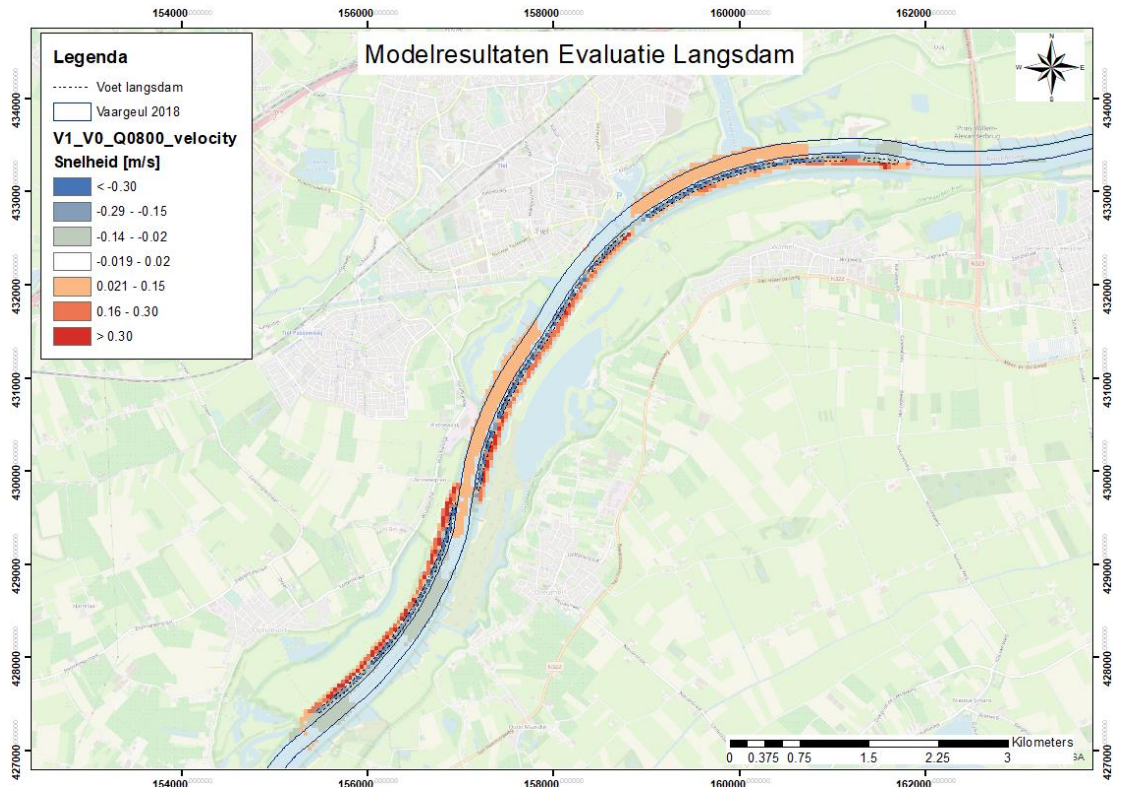
Figuur 4.3 Langsprofiel van de verandering in het dieptegemiddelde stroomsnelheid (langsstroming) op de rivieras door aanleg van langsdammen met gesloten instroomopeningen (variant V2 t.o.v. referentie V0) voor afvoeren tussen 800 en 4000 m³/s op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



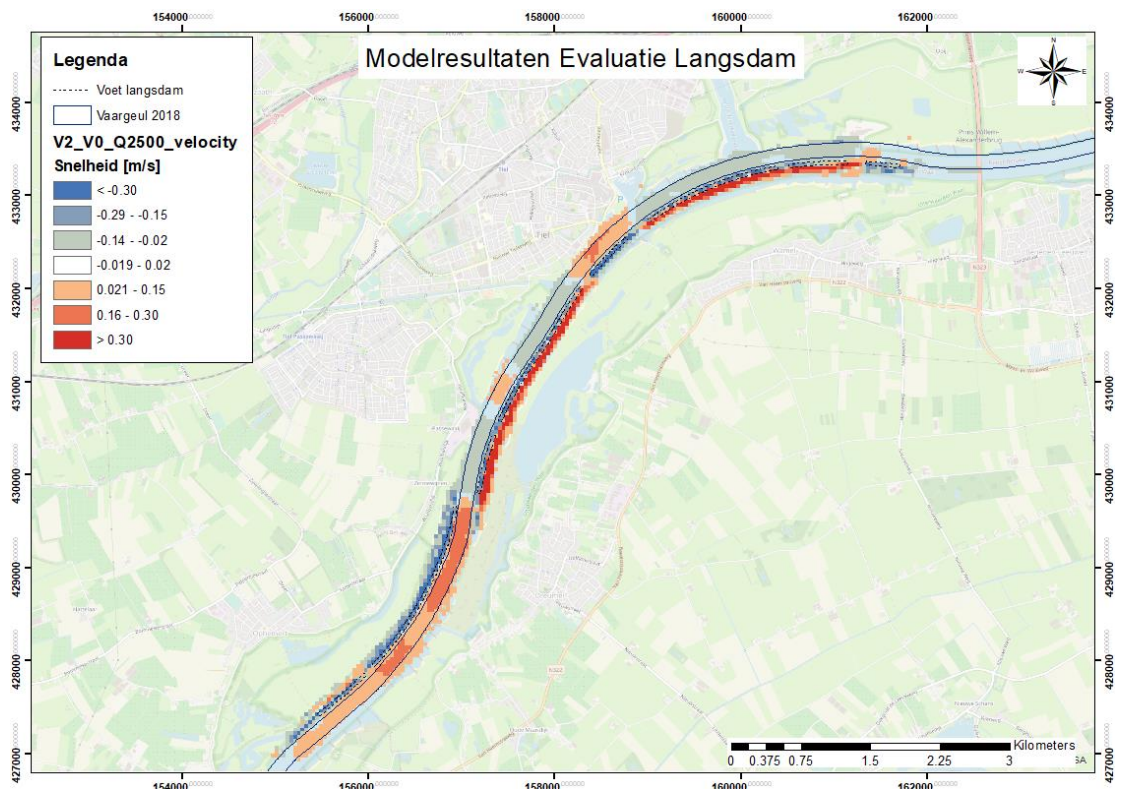
Figuur 4.4 Langsprofiel van de verandering in het dieptegemiddelde stroomsnelheid (langsstroming) op de rivieras voor deels geopende instroomopeningen (variant V3 t.o.v. de referentie V0) voor afvoeren tussen 800 en 4000 m³/s op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



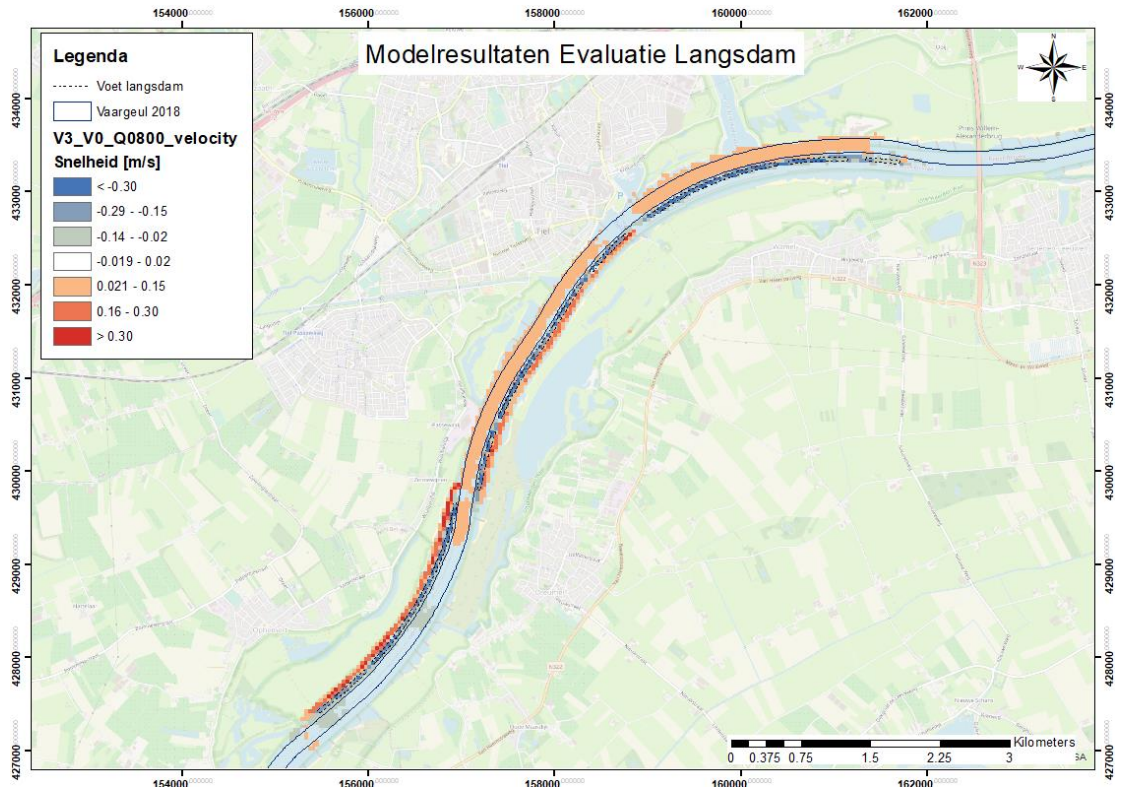
Figuur 4.5 Langsprofiel van de dieptegemiddelde snelheid op de rivieras (langsstroming) voor variant V2 voor afvoeren tussen 800 en 4000 m³/s op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



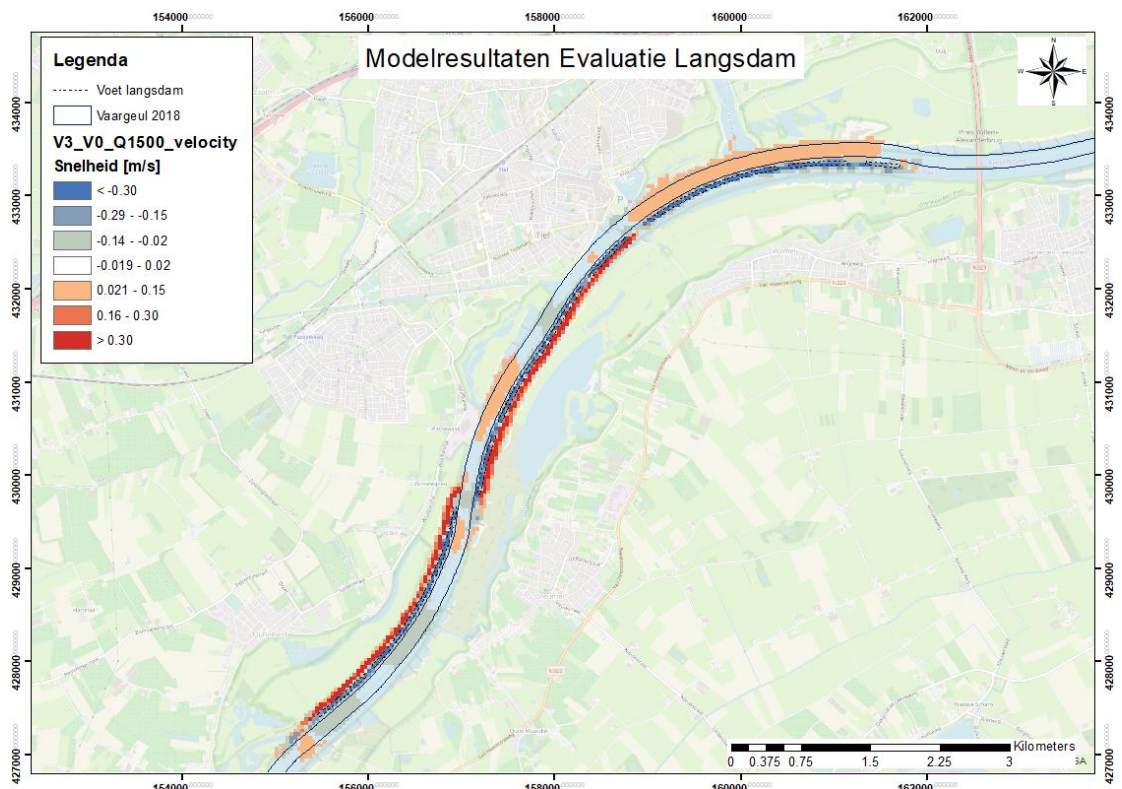
Figuur 4.6 Dieptegemiddeld verschil in stroomsnelheid (langsstroming) tussen variant V1 en de referentie (V0) rondom de langsdammen voor $800 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



Figuur 4.7 Dieptegemiddeld verschil in stroomsnelheid (langsstroming) tussen variant V2 en de referentie (V0) rondom de langsdammen voor $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



Figuur 4.8 Dieptegemiddeld verschil in stroomsnelheid (langsstroming) tussen variant V3 en de referentie (V0) rondom de langsdammen voor $800 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.



Figuur 4.9 Dieptegemiddeld verschil in stroomsnelheid (langsstroming) tussen variant V3 en de referentie (V0) rondom de langsdammen voor $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de hydrodynamische Delft3D-berekeningen.

4.3.2 Dwarsstroming

In deze paragraaf wordt er gekeken naar de stroomsnelheid loodrecht aan de vaarrichting. In Figuur 4.10 t/m Figuur 4.17 zijn langsprofielen opgenomen van de dwarsstroming (telkens rechter- en linkeroever van: V1 bij 800 m³/s; V3 bij 1500 m³/s; V2 bij 2500 m³/s; V3 bij 4000 m³/s) en in Figuur 4.18 t/m Figuur 4.22 ruimtelijke stroombeelden (V3 bij 1500 m³/s op diverse locaties).

Over het algemeen is er bij de opening van de langsdammen sprake van een toename in dwarsstroming (Figuur 4.10 t/m Figuur 4.17) met een maximum toename van 0,28 m/s (V2 bij 4000 m³/s; Figuur 4.16). De maxima in dwarsstroming bevinden zich bij de openingen tussen de langsdammen (zie ook Figuur 4.18 t/m Figuur 4.22). Op deze locaties voegt de afvoer door de oevergeulen zich weer bij de hoofdgeul en ontstaat er een dwarsstroming. Met name bij de opening bij Dreumel (meest benedenstroomse opening van de langsdammen aan de linkeroever in stroomafwaartse richting) is de dwarsstroming hoger in de situatie met langsdammen.

De eis van het RBK (maximaal 0,15 m/s) wordt op deze locaties overschreden bij afvoeren van 2500 en 4000 m³/s: afvoeren waarbij de oevergeul actief mee stroomt en de langsdam net wel of net niet helemaal verdronken is. Hierbij wordt opgemerkt dat de richtlijn van het RBK ook in de referentiesituatie wordt overschreden.

De langsdammen hebben op delen van het traject met langsdammen een reducerend (positief) effect op de dwarsstroming. Met het optimaliseren van het ontwerp is het mogelijk om de dwarsstroming te beperken, maar er zal bij de in- en uitlaat van de langsdammen altijd een locatie zijn met hogere dwarsstromingen. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat de eis van het RBK wordt gehaald over het gehele traject en voor alle afvoeren.

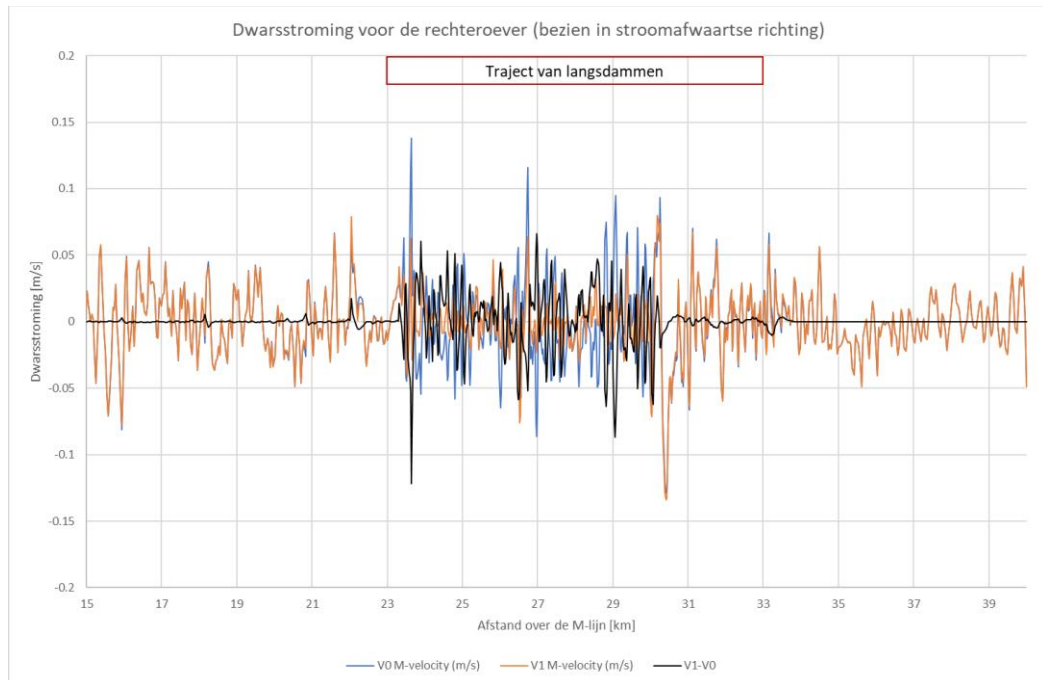
In kaarten van het stroombeeld (Figuur 4.18 t/m Figuur 4.22; 1500 m³/s, variant V3) is te zien dat de dominante stroming in de langsrichting is, met een beperkte variatie in de langsrichting bij de openingen. Dit betekent dat ondanks de hoge toename in dwarscomponent van de stroomsnelheid (bollen, minimaal 0,05 m/s toename) er geen sprake is van een sterke dominante dwarsstroming.

Overigens kan bij (niet verdronken) kribben de dwarscomponent van de stroming veel hoger worden, maar is daarentegen de totale stroomsnelheid lager. Dit kan mogelijk als hinderlijk worden ervaren door schippers als de vaargeul zich dicht bij de kribkopen bevindt.

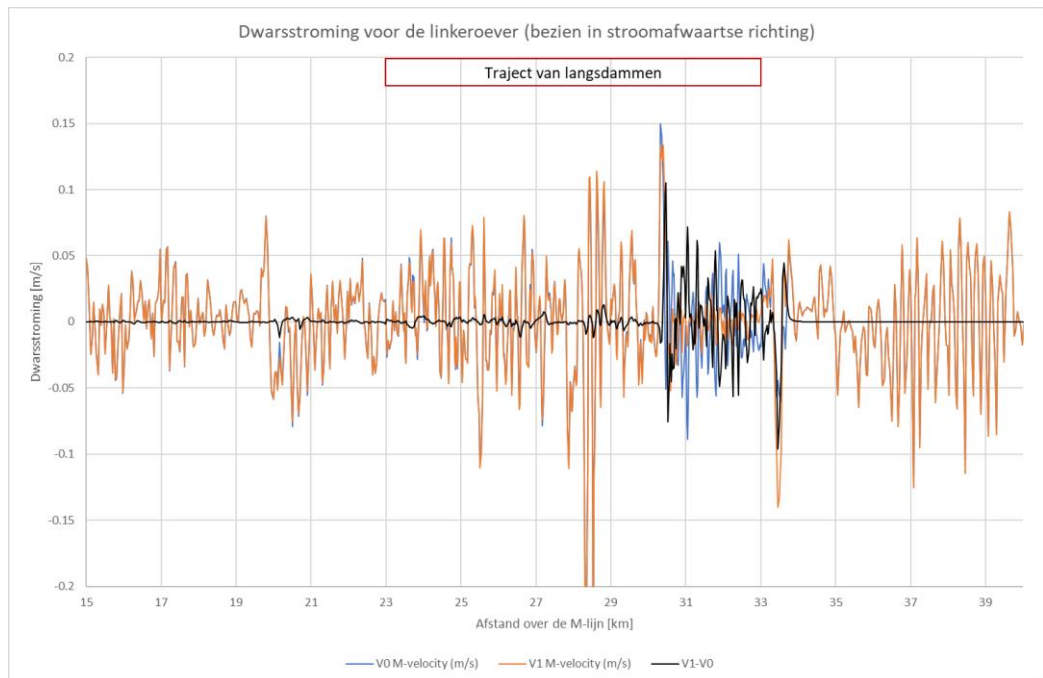
Bij het bekijken van de figuren dient er rekening mee gehouden te worden dat het hier modelresultaten betreft. De dieptegemiddelde stroomsnelheid geeft een indicatie van de stroming en zal bij grote lokale veranderingen in de stroming zeker rondom constructies en inlaten niet altijd een directe representatie zijn van complexe driedimensionale stroompatronen van de werkelijkheid. Uit schaalmodelexperimenten blijkt bijvoorbeeld dat de dwarsstroming bij de inlaten het sterkst is bij het wateroppervlak (Van Os, 2020). De ADCP metingen laten ter hoogte van de inlaten een redelijk uniforme dwarsstroming zien over de diepte, en geven geen reden om aan te nemen dat hierdoor opvallende hinderlijke stromingen ontstaan (De Jong et al., 2021).

Samenvattend is te concluderen dat er sprake is van een toename in dwarsstroming bij de langsdammen. Deze is hoger dan de gestelde eis in het RBK. Dit sluit aan bij de beleving van de scheepvaartsector (Verbrugge & van den Born, 2021). Tegelijkertijd wordt opgemerkt dat er geen sprake is van een sterke netto dwarsstroming in de vaargeul en dat de dominante stroming duidelijk in de langsrichting van de vaargeul is. Ten slotte wordt geconstateerd dat het stromingspatroon rondom kribben niet per se lagere dwarsstromingen laat zien (maar wel een duidelijk ander stroombeeld).

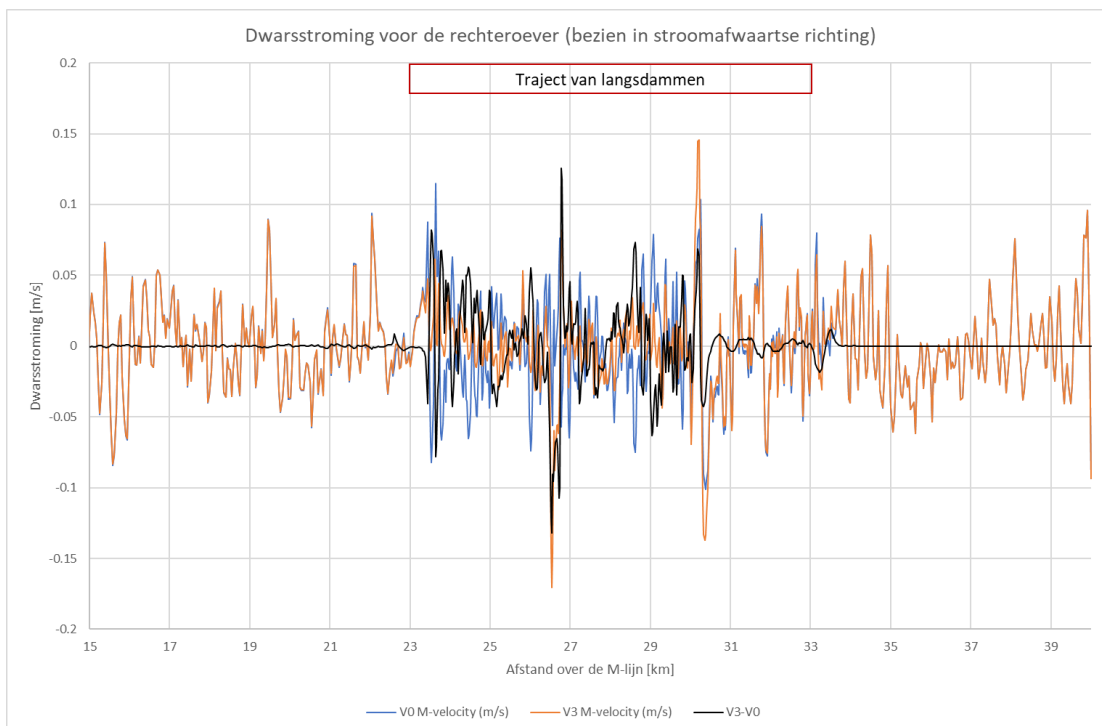
Hoewel de eis van het beoordelingskader wordt overschreden, is onze verwachting dat de hinder voor de scheepvaart redelijk beperkt zal zijn. Ook in andere situaties (zonder langsdammen, met kribben) en op andere locaties op de reis zijn er dwarsstroomsnelheden hoger dan 0,15 m/s aanwezig. We verwachten dat met behulp van voorlichting en gewenning hinder voor de scheepvaart verder kan worden beperkt.



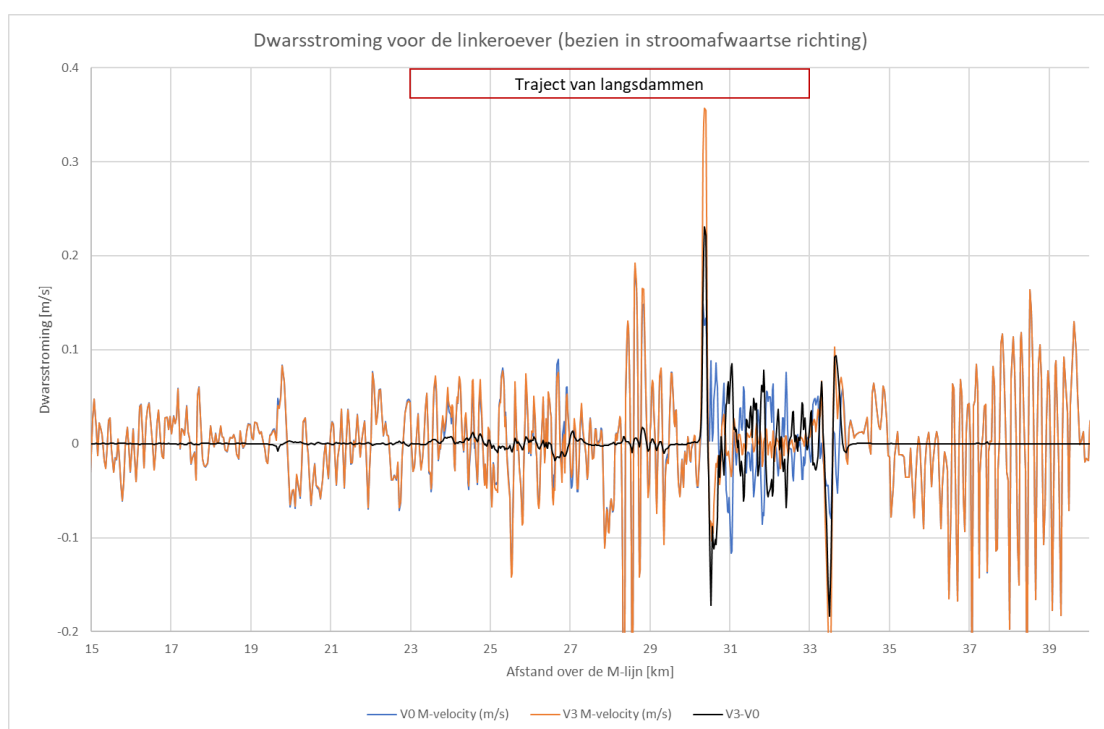
Figuur 4.10 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de rechteroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V1 (oranje) en het verschil (zwart) voor 800 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



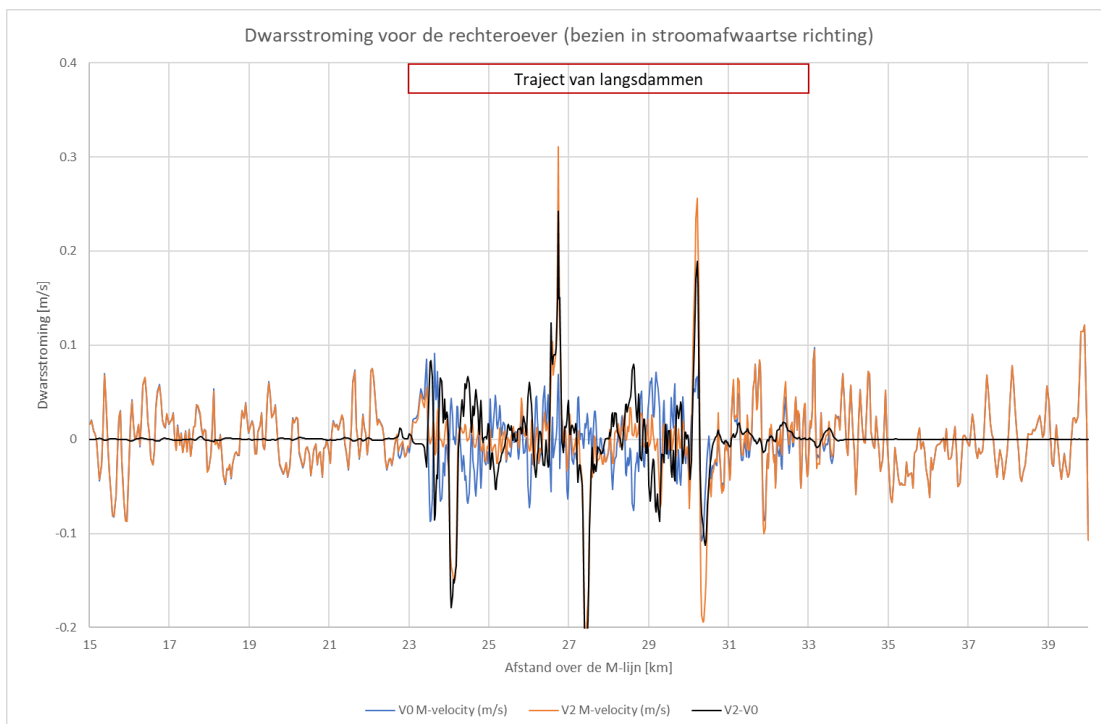
Figuur 4.11 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de linkeroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V1 (oranje) en het verschil (zwart) voor 800 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



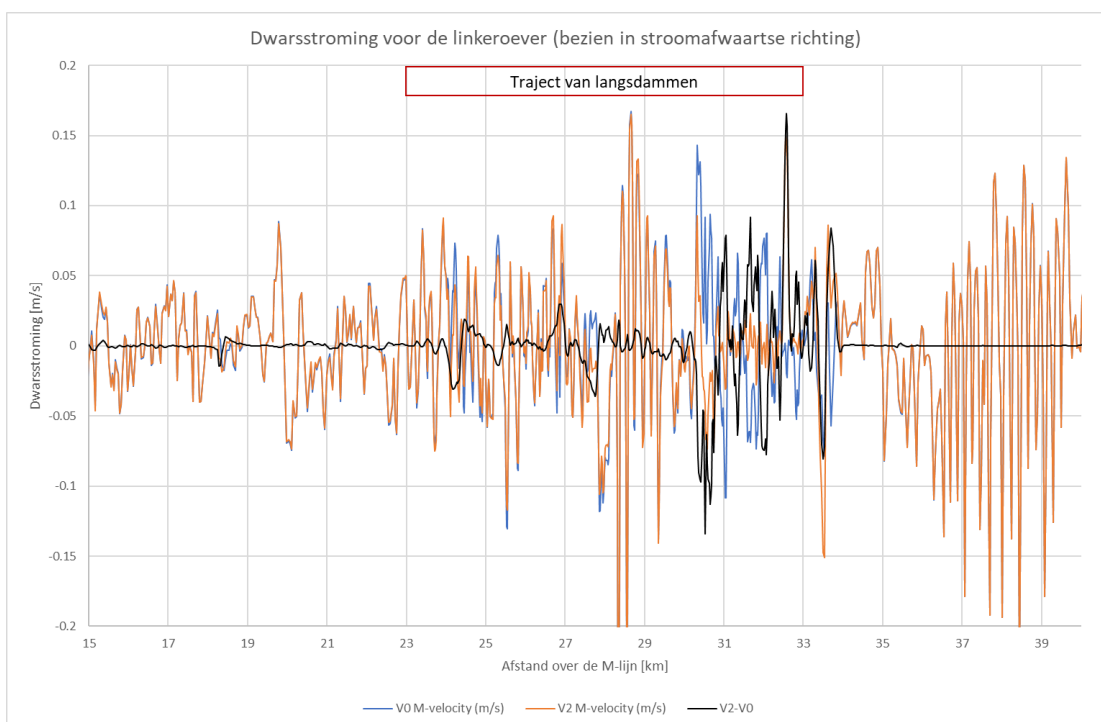
Figuur 4.12 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de recheroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V3 (oranje) en het verschil (zwart) voor $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert. Deze situatie is ook opgenomen in de ruimtelijke stroombeelden van Figuur 4.18 t/m Figuur 4.22.



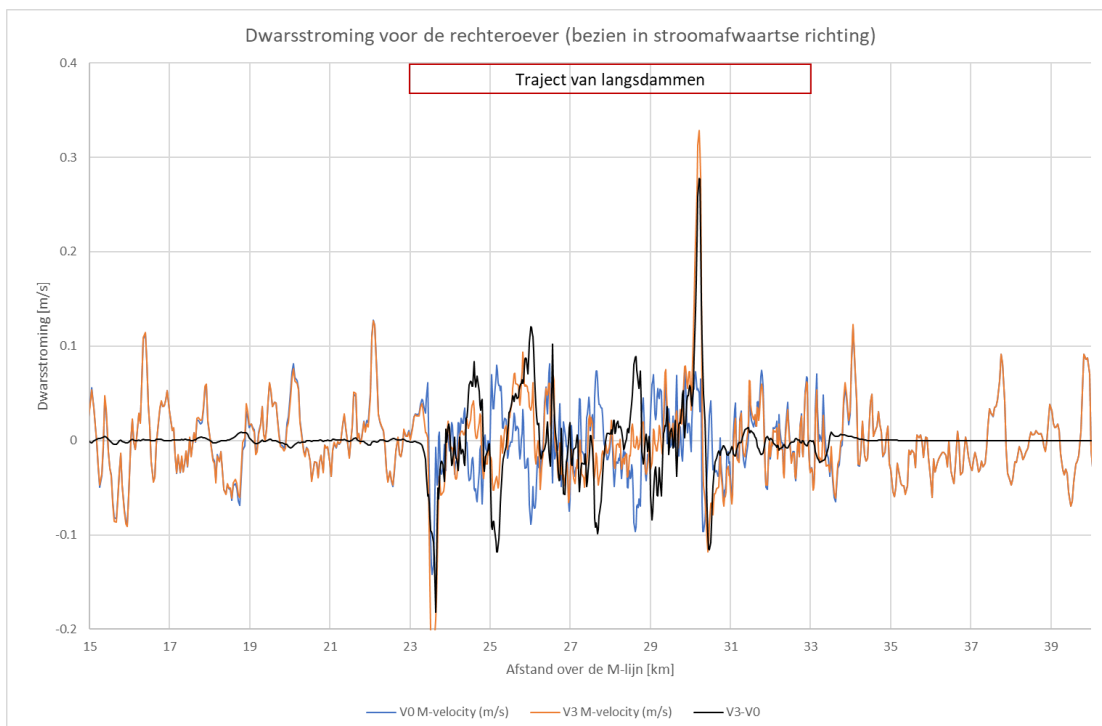
Figuur 4.13 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de linkeroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V3 (oranje) en het verschil (zwart) voor $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert. Deze situatie is ook opgenomen in de ruimtelijke stroombeelden van Figuur 4.18 t/m Figuur 4.22.



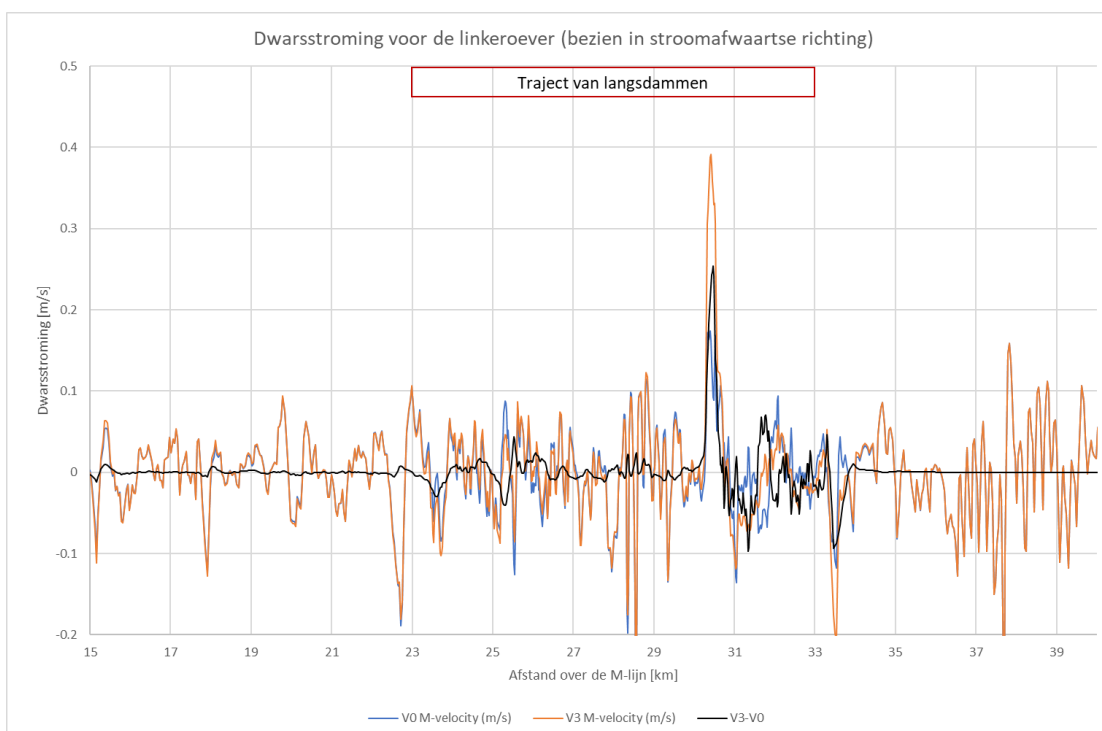
Figuur 4.14 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de rechteroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V2 (oranje) en het verschil (zwart) voor 2500 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



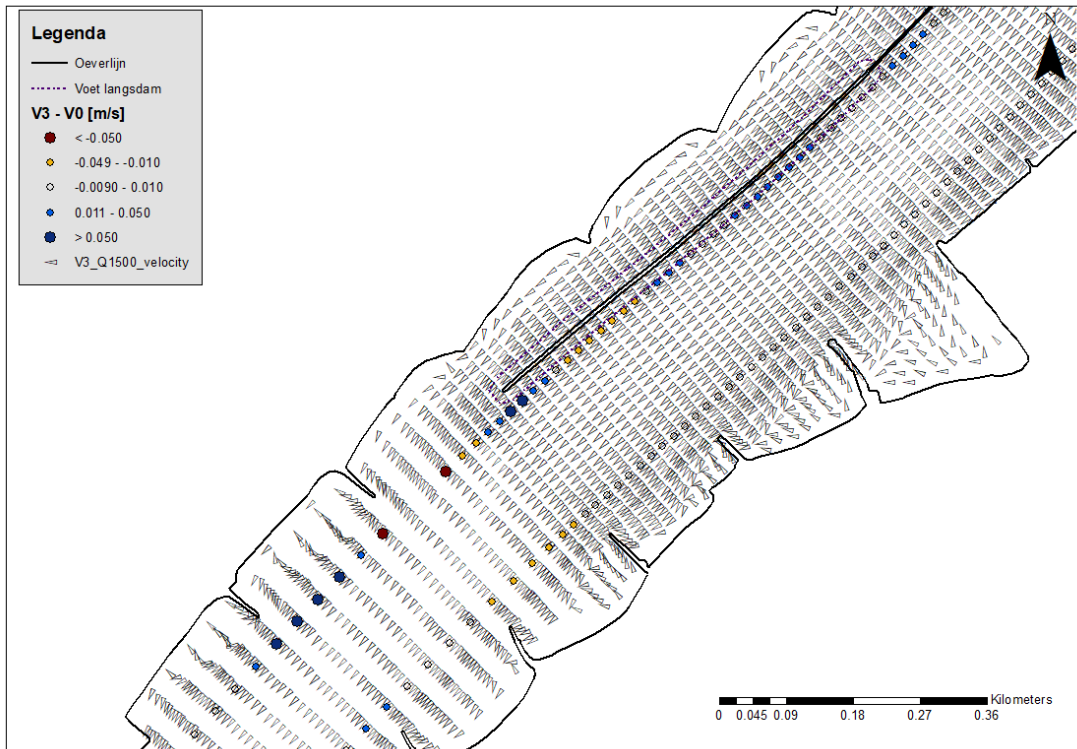
Figuur 4.15 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de linkeroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V2 (oranje) en het verschil (zwart) voor 2500 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



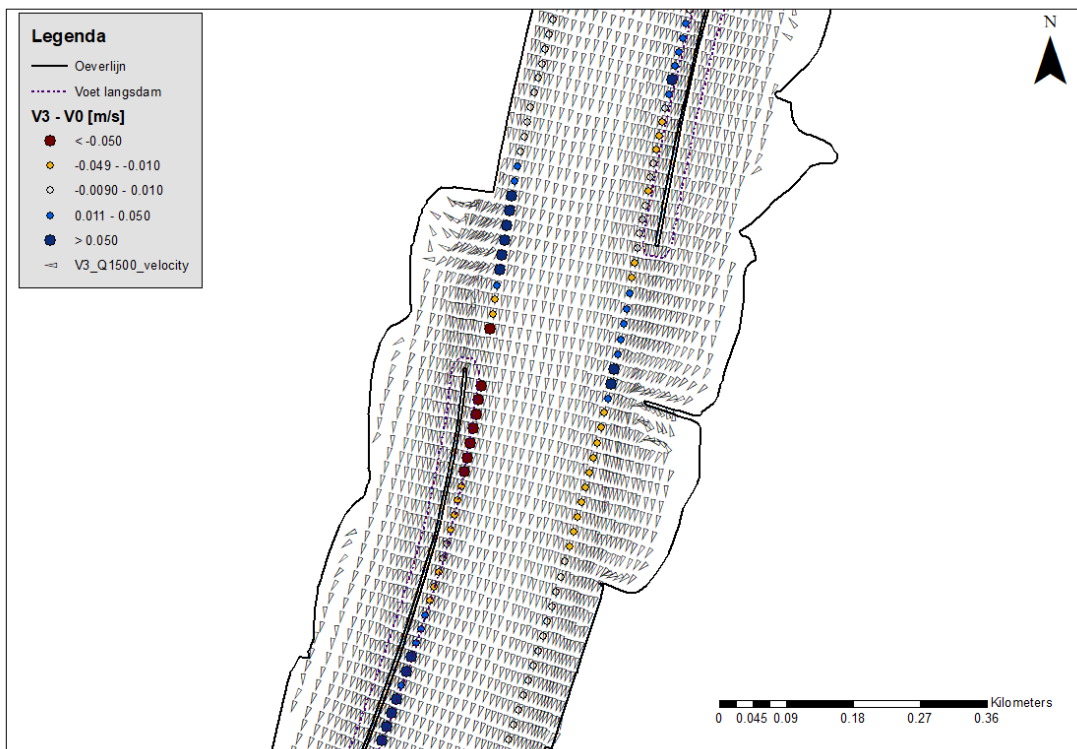
Figuur 4.16 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de rechteroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V3 (oranje) en het verschil (zwart) voor 4000 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



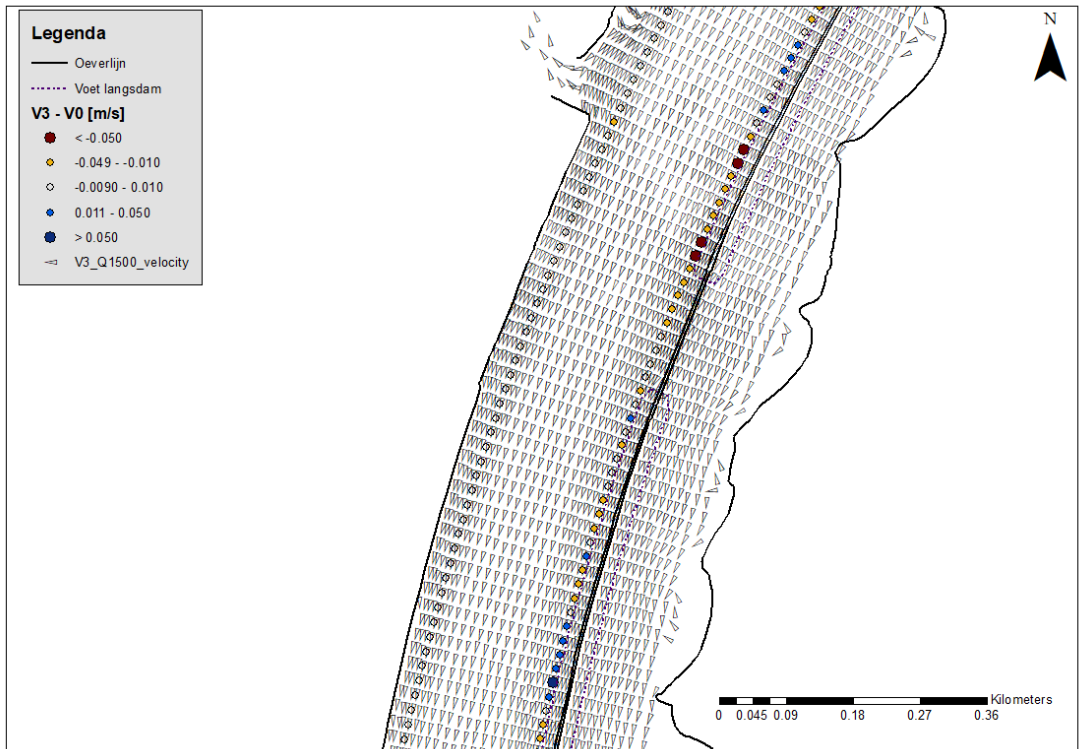
Figuur 4.17 Absolute dwarsstroming op de bakenlijn van de linkeroever (stroomafwaarts) voor de referentie (V0, blauw) en variant V3 (oranje) en het verschil (zwart) voor 4000 m³/s. Km 23 ligt bij inlaat Wamel en km 33 bij uitlaat Ophemert.



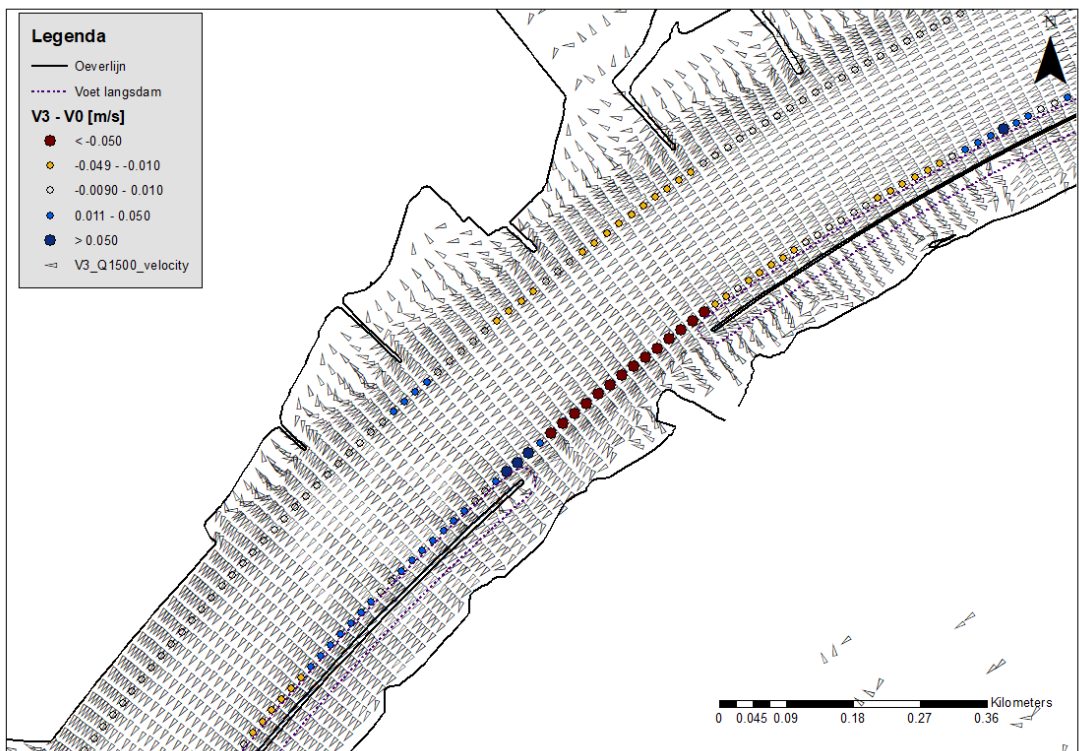
Figuur 4.18 Stroombeeld van variant V3 bij 1500 m³/s (pijlen) en verschil in absolute dwarsstroming ten opzichte van de referentie (bollen) bij de uitlaatopening Ophemert.



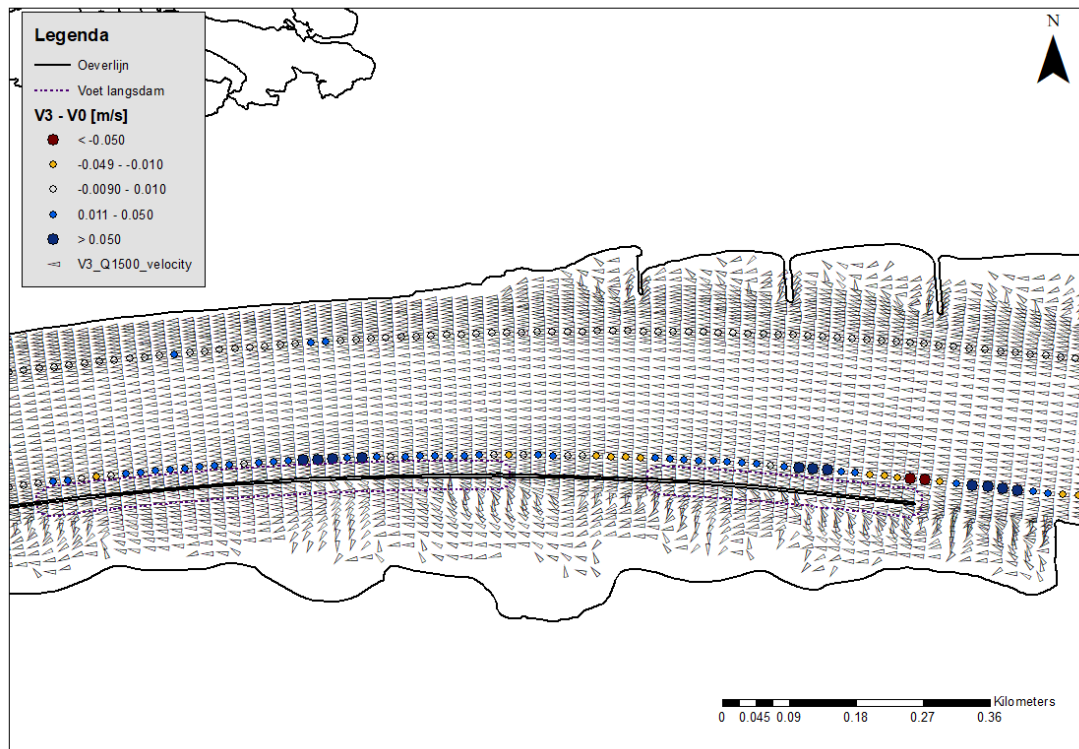
Figuur 4.19 Stroombeeld van variant V3 bij 1500 m³/s (pijlen) en verschil in absolute dwarsstroming ten opzichte van de referentie (bollen) bij de uitlaatopening Dreumel en inlaatopening Ophemert.



Figuur 4.20 Stroombeeld van variant V3 bij 1500 m³/s (pijlen) en verschil in absolute dwarsstroming ten opzichte van de referentie (bollen) bij de tweede opening van de langsdam Dreumel.



Figuur 4.21 Stroombeeld van variant V3 bij 1500 m³/s (pijlen) en verschil in absolute dwarsstroming ten opzichte van de referentie (bollen) bij de pont van Wamel (tussen langsdam Wamel en Dreumel).



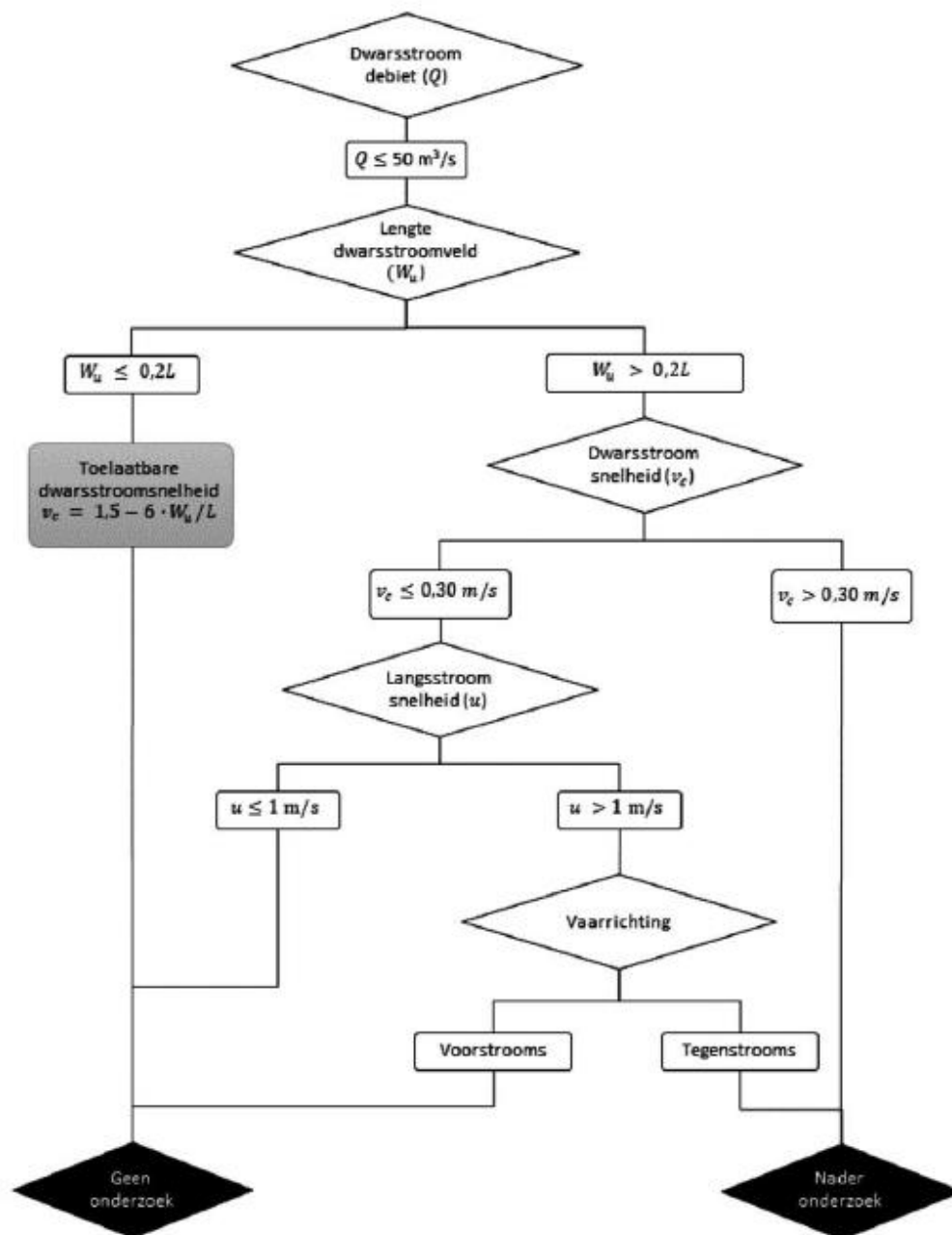
Figuur 4.22 Stroombeeld van variant V3 bij 1500 m³/s (pijlen) en verschil in absolute dwarsstroming ten opzichte van de referentie (bollen) bij het bovenstroomse deel van de langsdammen (inlaatopening Wamel).

4.4 Beoordeling dwarsstroming conform Richtlijnen Vaarwegen

In de voorgenoemde resultaten zijn de analyse van de langsstroming en dwarsstroming van elkaar gescheiden. In de stroomschema's hieronder (Figuur 4.23 en Figuur 4.24) is de evaluatie van Richtlijnen Vaarwegen gegeven. In deze aanpak wordt het onderscheid gemaakt tussen de vaarrichting en wordt de langsstroming expliciet meegenomen bij het beoordelen van de dwarsstroming. In deze paragraaf worden deze stroomschema's doorlopen aan de hand van de resultaten van de voorgaande paragrafen.

Als het dwarsstroomdebiet lager is dan 50 m³/s wordt er als eerste gekeken naar de grootte van het stromingsveld (Figuur 4.23). Bij de langsdammen is dit ongeveer gelijk aan de breedte van de instroomopeningen en is altijd groter dan een vijfde van de scheepslengte (0,2L). Bij debieten hoger dan 1020 m³/s is de langsstroming hoger dan 1 m/s. Aangezien meerdere openingen in de langsdammen zich aan de zijde bevinden van de opvaart zou er nader onderzoek nodig zijn als de dwarsstroming hoger zou zijn dan 0,30 m/s. Deze conclusie kan ook worden getrokken op basis van het stroomschema voor dwarsstroomdebieten hoger dan 50 m³/s (Figuur 4.24), mede omdat de instroomopeningen ook groter zijn dan een halve scheepslengte.

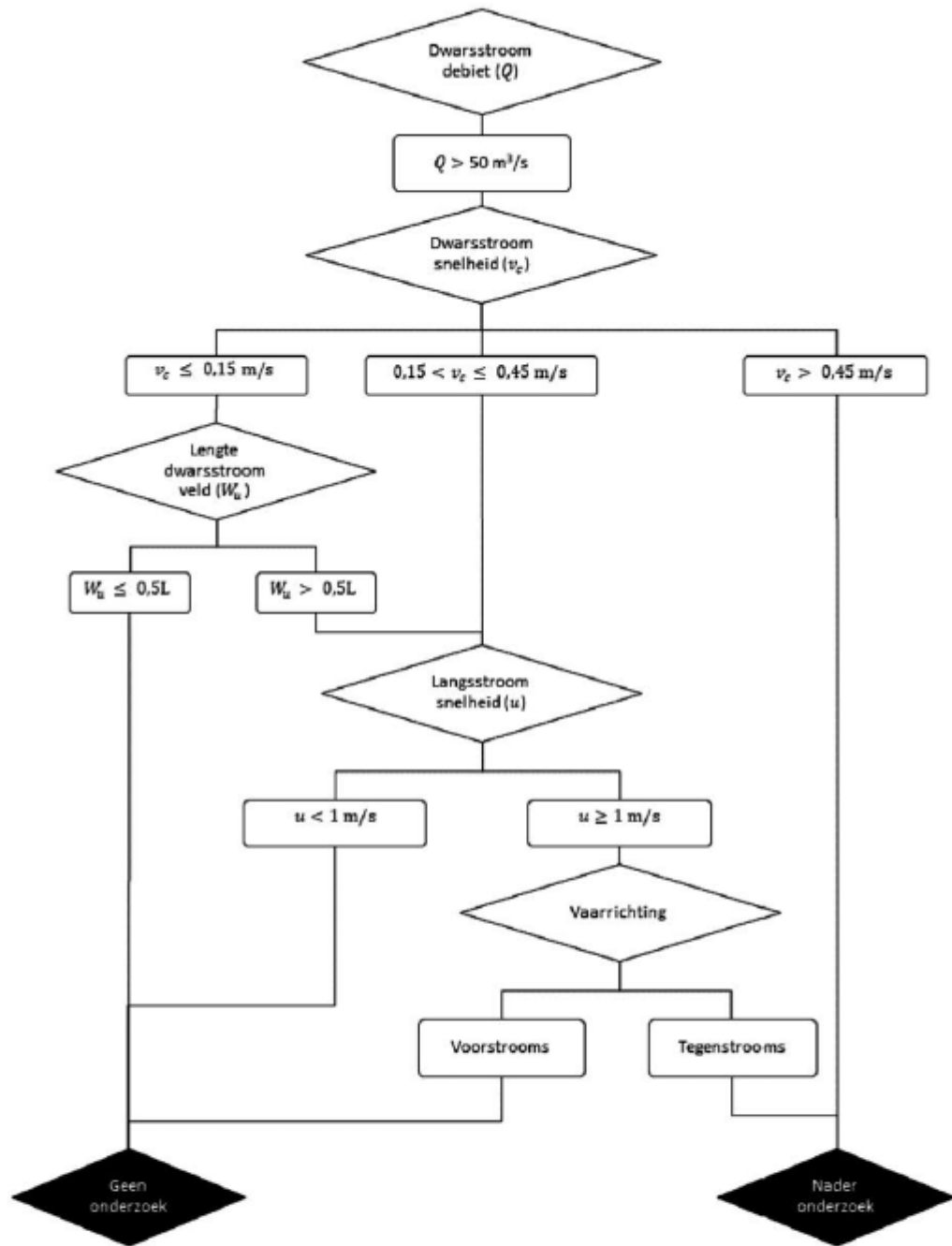
Als we dit stroomschema uit de Richtlijnen Vaarwegen volgen voor de bevindingen van de pilot langsdammen op basis van modelresultaten, dan volgt hieruit 1 locatie die nader onderzoek behoeft. Vanaf 1020 m³/s is de langsstroming groter dan 1 m/s zodat nader onderzoek nodig is om het effect op de scheepvaart te beoordelen. Daarbij hoeft er alleen gekeken te worden naar de dwarsstroming bij de linkeroever omdat zich hier de opvaart bevindt. Bij de linkeroever is er één locatie waar de stroomsnelheid groter is dan 0,3 m/s en dat is de opening nabij Dreumel. Op deze locatie zal op basis van de richtlijnen vaarwegen nader onderzoek nodig zijn.



Figuur 3: Stroomschema voor $Q \leq 50 \text{ m}^3/\text{s}$

- Q: dwarsstroomdebiet (m^3/s)
- W_u : lengte van het dwarsstroomveld (m)
- v_c : dwarsstroomsnelheid (m/s)
- u: langsstroomsnelheid (m/s)

Figuur 4.23 Stroomschema voor lagere dwarsstroomdebieten (Figuur 3 uit Richtlijnen Vaarwegen 2020).



Figuur 4: Stroomschema voor $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$

- Q: dwarsstroomdebiet (m^3/s)
- W_u : lengte van het dwarsstroomveld (m)
- v_c : dwarsstroomsnelheid (m/s)
- u: langsstroomsnelheid (m/s)

Figuur 4.24 Stroomschema voor hogere dwarsstroomdebieten (Figuur 4 uit Richtlijnen Vaarwegen 2020).

4.5 Conclusies

Ten aanzien van de dwarsstroming zijn de volgende conclusies getrokken:

- Er is over het algemeen sprake van een toename in dwarsstroming bij de opening van de langsdammen. De gemodelleerde maxima in dwarsstroomsnelheid zijn hoger dan de gestelde eis in het Rivierkundig Beoordelingskader. De hoogste dwarsstroomsnelheid wordt bereikt bij de inlaat Dreumel. Dit is de enige locatie die op basis van de Richtlijnen Vaarwegen nader onderzoek behoeft bij afvoeren hoger dan 1020 m³/s (een langstroming groter dan 1 m/s).
- De ADCP-metingen laten over het algemeen een lagere dwarsstroming zien dan de modelresultaten. Op basis van de metingen lijkt de hinder voor de beroepsvaart mee te vallen. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat er kanttekeningen zijn geplaatst bij de nauwkeurigheid van de metingen en is het effect van de langsdammen niet te isoleren.
- De verwachting op basis van expert judgement is dat de hinder voor de scheepvaart beperkt zal zijn op langere termijn. Ook op andere locaties (zoals langs kribben) zijn er dwarsstroomsnelheden hoger dan 0,15 m/s aanwezig. Schippers zijn op dit moment gewend aan neren bij kribben en anticiperen op de stroming, met gewenning kunnen de schippers ook anticiperen op de nieuwe stromingspatronen ter hoogte van de openingen in de langsdammen.

5 Vaargedrag

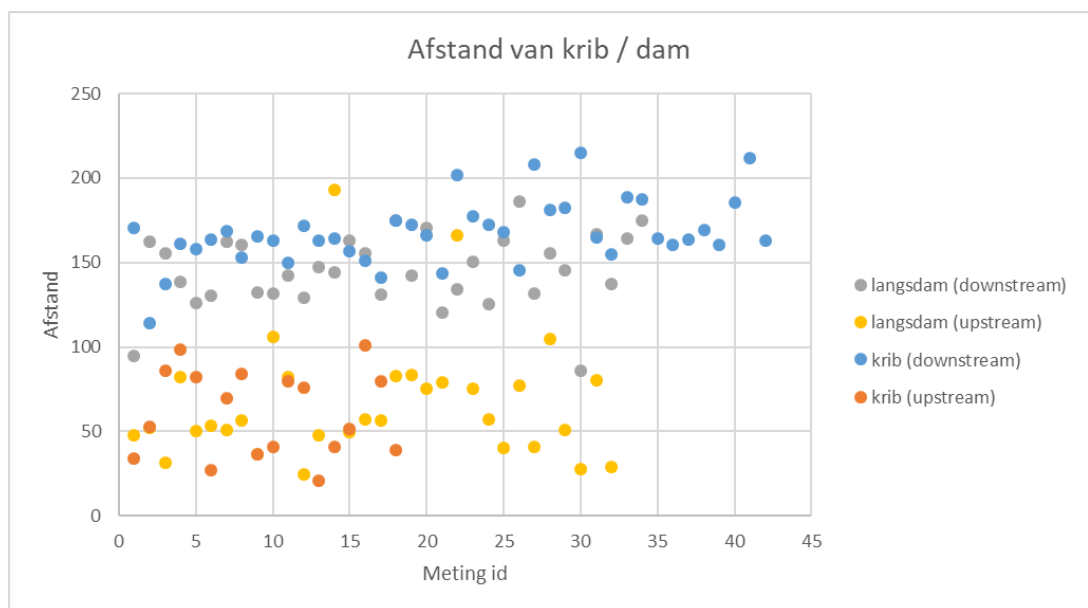
5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het vaargedrag behandeld aan de hand van de metingen van de afstand tussen passerende schepen en een krib of langsdam (sectie 5.2), en analyses van AIS-data volgend uit WP4 (sectie § 5.3). Ten slotte wordt het vaarweggebruik door recreatievaart kort besproken (sectie 5.4).

5.2 Afstand tussen schepen en langsdammen gemeten met lasergun

Door Frank Collas (Radboud Universiteit) zijn enkele metingen uitgevoerd (niet elders gedocumenteerd) met behulp van een lasergun van de afstand tussen passerende schepen en de langsdammen en de afstand tussen schepen en kribkoppen. De meting werd gedaan vanaf de kribkop of langsdam. Deze resultaten zijn gegeven in Figuur 5.1. Hieruit valt op te maken dat er geen groot verschil is tussen de afstand die schepen houden ten opzichte van een kribkop of langsdam. Mogelijk is voor de afgaande vaart de afstand tot de langsdam zelfs iets kleiner dan bij kribben (de grijze bolletjes liggen iets lager dan de blauwe bolletjes).

Het is niet mogelijk om op basis van enkel deze data, waarvan de betrouwbaarheid onbekend is, een conclusie voor het hele traject te trekken, aangezien op slechts 2 locaties is gemeten op 4 verschillende dagen, de ligging krib/langsdam ten opzichte van de vaargeul niet beschouwd is, het type schepen onbekend is (zoals leeg of niet), en het effect van afvoer niet beschouwd is. De data zijn hier met name opgenomen ter vastlegging; de analyse van de AIS-data in de volgende paragraaf biedt de mogelijkheid om over het hele traject conclusies te trekken over afstanden tot de dammen en kribben.



Figuur 5.1 Gemeten afstanden tussen schip en kribkop en langsdam. Data uit 2016. Ingewonnen en beschikbaar gesteld door Frank Collas.

5.3 AIS-analyse naar reistijden en ruimtegebruik

Een uitgebreidere analyse naar vaargedrag volgt uit de analyse van AIS-data (WP4) waarin reistijden en gevolgde vaarbanen (die laten zien welke afstand schippers aanhouden ten opzichte van de langsdammen) worden onderzocht. De data zijn als bulk geanalyseerd, individuele vaartracks zijn nu niet beschouwd. In de analyse is waar mogelijk of relevant onderscheid gemaakt tussen verschillende scheepstypes, verschillende afvoerranges, verschillende diepgangen, en de vaarrichting (opvaart of afvaart). De AIS-analyse is gerapporteerd in Indah-Everts & Hermans (2021), en de belangrijkste bevindingen zijn hier samengevat en nader geïnterpreteerd.

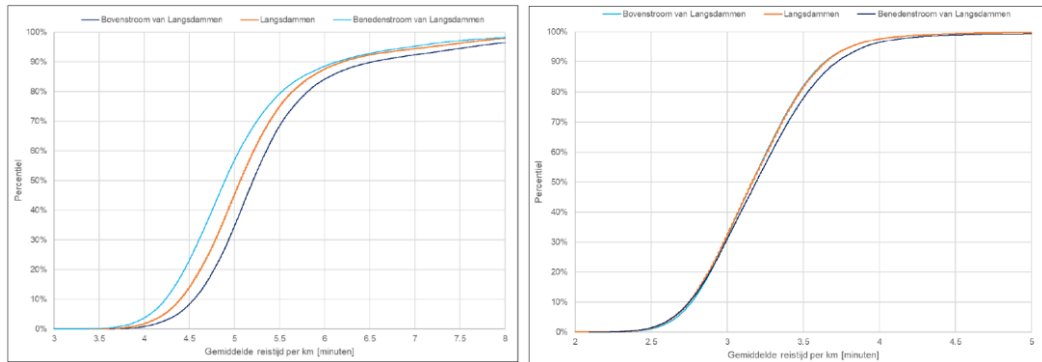
Het beschouwde traject loopt van Nijmegen (km 885) tot Dalem (km 952). De door Rijkswaterstaat beschikbaar gestelde dataset bevat geanonimiseerde AIS-data voor de periodes januari t/m juni 2018, heel 2019 en januari t/m mei 2020. Dit betekent dat een vergelijking tussen de situaties voor en na aanleg van de langsdammen met deze data niet mogelijk is. Er is daarom een vergelijking gemaakt met een oudere bewerkte dataset van 2012, aangeleverd door Arjan Sieben (Sieben, 2013). Eventuele gewenning door schippers aan het varen langs de dammen in de loop der tijd kan niet zichtbaar gemaakt worden; verondersteld mag worden dat in 2018 de schippers inmiddels gewend zijn aan de nieuwe situatie. Er wordt nog opgemerkt dat het vaargedrag bij extreem lage afvoeren niet onderzocht is, omdat de laagwaterperiode in de 2^e helft van 2018 niet in de database zit. Tijdens die periode vonden aanzienlijk meer vaarbewegingen plaats; een dikkere vaarweg in combinatie met een versmalling kan tot onveiligere situaties leiden, en het zou goed zijn dit te onderzoeken, mochten de data er zijn.

5.3.1 Reistijd en vaarsnelheid

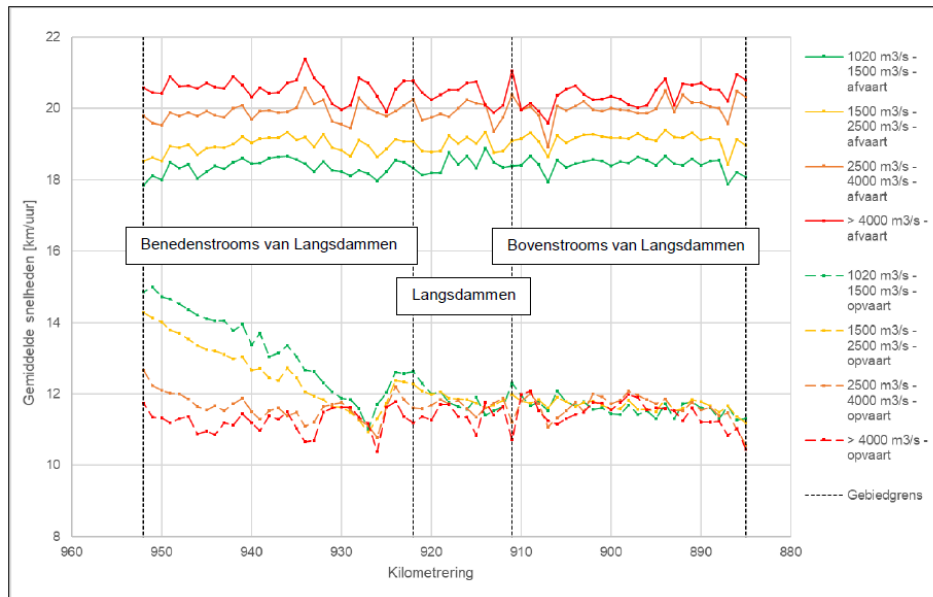
Figuur 5.2 toont de genormaliseerde reistijd (aantal minuten per km) van alle scheepstypes en afvoerranges. Dit is de gemiddelde tijd die een schip nodig heeft om door een gebied te varen. Hieruit blijkt dat het gemiddelde van de opvarende schepen (waarden overgenomen van tabel uit Indah-Everts & Hermans, 2021) minder dan circa 5,3 minuten per km nodig heeft om door het langsdammen-traject te varen. Bovenstrooms is dit circa 5,7 minuten en benedenstrooms 5,2 minuten. In de afvaart is er nauwelijks verschil tussen de trajecten en is de reistijd korter. De kortere reistijd komt doordat de schepen stroomafwaarts harder varen.

Stroomafwaarts van Zaltbommel (km 932) neemt de normaalbreedte toe en nemen stroomsnelheden geleidelijk af (bijv. Sieben, 2013). Hier wordt de invloed van stroming op de vaarsnelheden zichtbaar; de opgaande vaart kan er sneller varen omdat er minder tegenstroom is; de afgaande vaart verplaatst niet langzamer ondanks minder meestroom (Figuur 5.3). De vaarsnelheid van de opvaart ligt bovenstrooms gemiddeld net iets lager dan op het langsdammen-traject, wat de kortere reistijd op laatstgenoemde verklaart.

De langsdammen lijken er dus niet voor te zorgen dat er opeens langzamer gevaren wordt, zodra dit gebied ingevaren wordt. Ook op basis van een vergelijking met de door Arjan Sieben bewerkte AIS-dataset uit 2012, kan geconcludeerd worden dat er geen waarneembaar effect is in vaarsnelheid als gevolg van de aanleg van de langsdammen.



Figuur 5.2 Genormaliseerde gemiddelde reistijd per deelgebied; links de opvaart, rechts de afvaart (bron: Indah-Everts & Hermans, 2021).



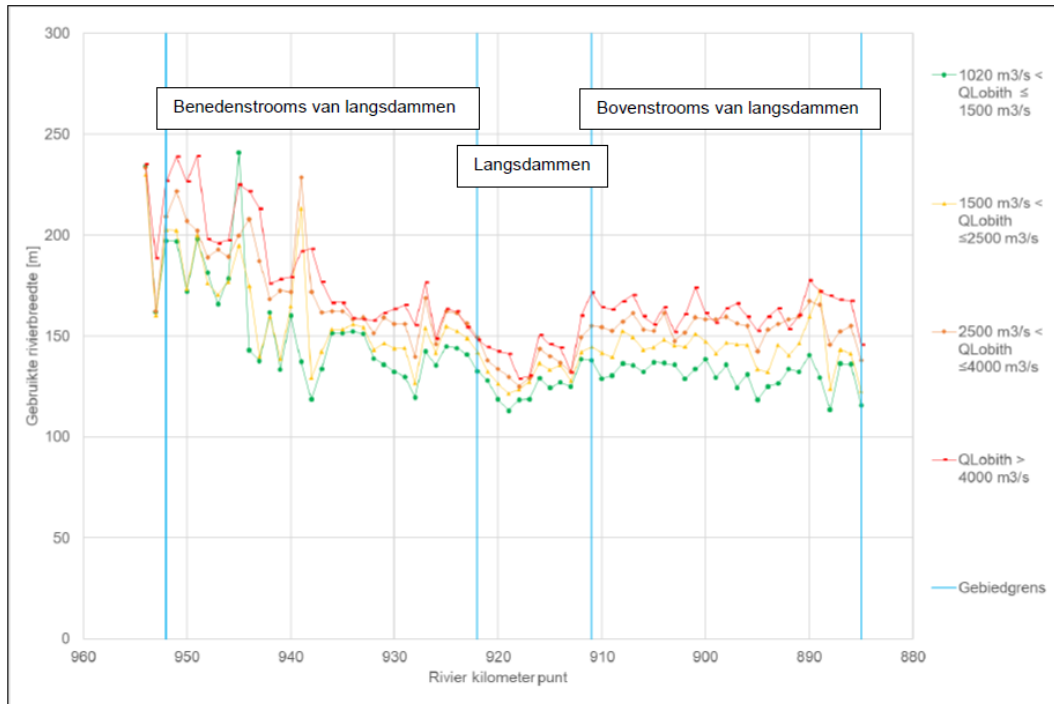
Figuur 5.3 Gemiddelde vaarsnelheid per deelgebied, afvoerrange en vaarrichting (bron: Indah-Everts & Hermans, 2021).

5.3.2 Ruimtegebruik en schrikafstand

Het ruimtegebruik is gepresenteerd met behulp van verschillende percentiellijnen waarbinnen een zeker percentage van de schepen vaart. Naarmate de afvoer toeneemt gaat een steeds groter percentage buiten de 150 m brede vaargeul varen. De resultaten laten zien dat de gebruikte ruimte ter hoogte van de langsdammen kleiner is dan boven- en benedenstrooms (Figuur 5.4).

- Bij lage afvoer (groen) is er weinig verschil in gebruikte breedte tussen het langsdammen-traject en bovenstrooms hiervan (trajectgemiddeld 131 m versus 126 m, gemiddelde afname van circa 5 m). Dit is een vergelijking van gemiddelde waarden; lokale omstandigheden beïnvloeden het ruimtegebruik. Zo is op andere locaties bovenstrooms (tussen rkm 885 – 900) het ruimtegebruik (ondanks de grotere normaalbreedte) vergelijkbaar met het langsdammen-traject. Bij lage afvoer wordt overal zo veel mogelijk binnen de 150 m brede vaargeul gevaren (aanvullende figuren in Indah-Everts & Hermans (2021) ondersteunen dit). Men zou dus kunnen stellen dat ondanks een gelijkgebleven vaargeul van 150 m, bij lage afvoer het ruimtegebruik gereduceerd is met circa 5 m. Hieruit blijkt extra voorzichtigheid bij schippers (een kleiner deel van de vaargeul wordt gebruikt).

- Bij toenemende afvoer gaan schepen de grotere ruimte benutten, blijven niet perse in de vaargeul, en juist dan is een vergelijking tussen het langsdammen-traject en bovenstreams relevant. De beschikbare breedte is met 30 m afgenomen ten opzichte van bovenstreams, en de gebruikte ruimte bij hoge afvoer (rood) is met circa 18 m afgenomen (trajectgemiddeld 163 m versus 145 m bij de hoogste afvoerklasse). Procentueel wordt bovenstreams en bij de langsdammen ongeveer evenveel (63%) van de beschikbare ruimte benut (163/260 versus 145/230 m), in absolute zin wordt er bij de langsdammen minder afstand tot de oever (normaallijn) gehouden. Dit suggereert dat schippers bij hoog water geen hinder ondervinden van de versmalling. De ruimte ter hoogte van de dammen wordt bij hoog water goed benut.



Figuur 5.4 Gebruikte rivierbreedte voor verschillende afvoerranges. 90% van de schepen vaart binnen deze breedte (bron: Indah-Everts & Hermans, 2021).

De analyse van passeerafstanden, dat wil zeggen de afstand van de schepen tot de normaallijn (bakenlijn) bevestigt dit beeld. Voor het beoordelen van de (schrik)afstand die wordt aangehouden tot de dammen, is het relevant om de verschillende bochtsoorten (binnen-, buitenbocht, overgang) en op- of afvaart te onderscheiden (Figuur 5.5). De meeste schepen houden stuurboordswal aan (Indah-Everts & Hermans, 2021), uiteraard zijn er uitzonderingen en locaties waar hiervan soms wordt afgeweken. De meeste opvaart vaart dus langs de linkeroever, zal in een binnenbocht wat van de oever gaan afvaren om de diepere buitenbocht te zoeken, en zal in een buitenbocht juist dicht langs de linkeroever blijven varen. Als er een sterke stroming in de buitenbocht is, wordt ook wel wat verder richting de binnenbocht gevaren. Idem dito, de meeste afvaart vaart langs de rechteroever, zal in een binnenbocht wat van de oever gaan afvaren om de diepere buitenbocht te zoeken, en zal in een buitenbocht dicht langs de rechteroever blijven varen. Hierbij zal een volgeladen schip (opvaart) eerder genoodzaakt zijn de diepere buitenbocht te zoeken (geen bocht afsnijden) dan een leeg schip (afvaart). Bij bochtovergangen wordt de oever aangehouden en is er vanuit diepte-overwegingen geen noodzaak om dicht op de oever te varen. Een schipper zal in principe stuurboord aanhouden en zoeken naar een optimum tussen enerzijds een korte route en anderzijds een voldoende diepe route, waarbij een leeg schip een andere keuze kan maken dan een volgeladen schip.

Bij de “*schrikafstand*” gaat het erom welke afstand de schippers minimaal “durven” aan te houden tot een dam of kribkop. Hierbij zou idealiter dus de situatie beschouwd moeten worden waar schepen graag dicht langs de oever varen en niet daarvan afsturen omwille van diepte-overwegingen; oftewel het varen in de buitenbocht. De langsdammen liggen echter in binnenbochten. Schepen zullen niet allemaal dicht op de dam willen varen (de kortste weg), sommige schepen zullen wat uitwijken richting de diepere buitenbocht. Ongeladen schepen zullen waarschijnlijk eerder de kortste weg (d.w.z. dicht op de dam) kiezen. Voor de beoordeling van schrikafstand tot de dammen en tot kribkoppen vergelijken we:

- opvaart langs linkeroever in de binnenbocht bij de langsdammen (Wamel, Dreumel) met opvaart langs linkeroever in vergelijkbare binnenbochten met kribben bovenstrooms (en benedenstrooms);
- afvaart langs de rechteroever in de binnenbocht bij de langsdam (Ophemert) met afvaart langs de rechteroever in vergelijkbare binnenbochten met kribben bovenstrooms (en benedenstrooms).

De vergelijking richt zich op scheepvaart in binnenbochten, omdat de langsdammen zich daar bevinden. Geen enkele bocht is uiteraard helemaal hetzelfde (bijvoorbeeld qua bochtstraal of wijze van aanvaren); in Bijlage B staan de bovenaanzichten van de bochten (kilometerraaien) die onderling vergeleken worden. Benedenstrooms van de langsdammen wordt de normaalbreedte groter en voor een vergelijking waarschijnlijk minder geschikt. Het vergelijken van scheepvaart in buitenbochten is ten behoeve van de schrikafstand weinig relevant.



Schipper zoekt voor zijn schip balans tussen kortste en diepste route, waarbij tevens rol speelt:

- Onbeladen schip minder noodzaak dan volgeladen schip om diepte te zoeken (blijft dicht langs oever)
- Bij voldoende hoge waterstand minder noodzaak om diepte te zoeken (blijft dicht langs oever)
- Aanwezigheid brugpijlers

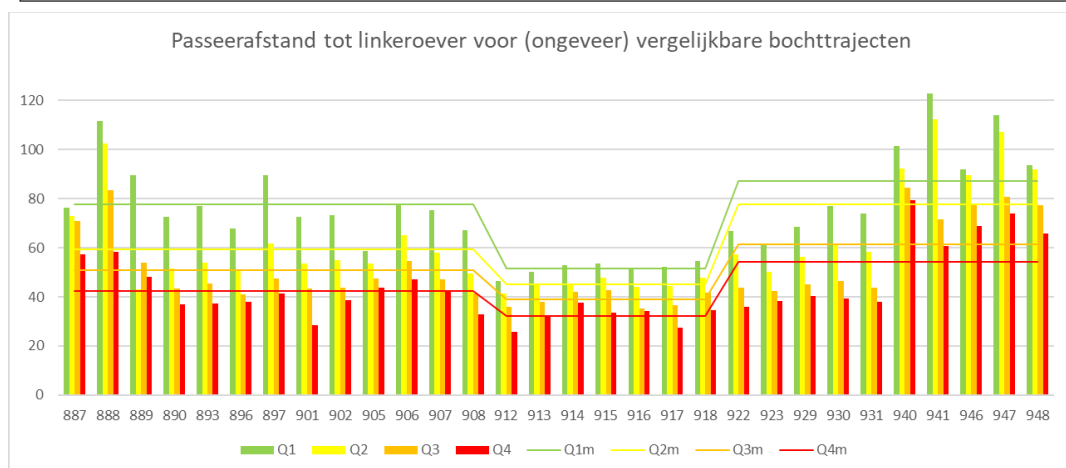
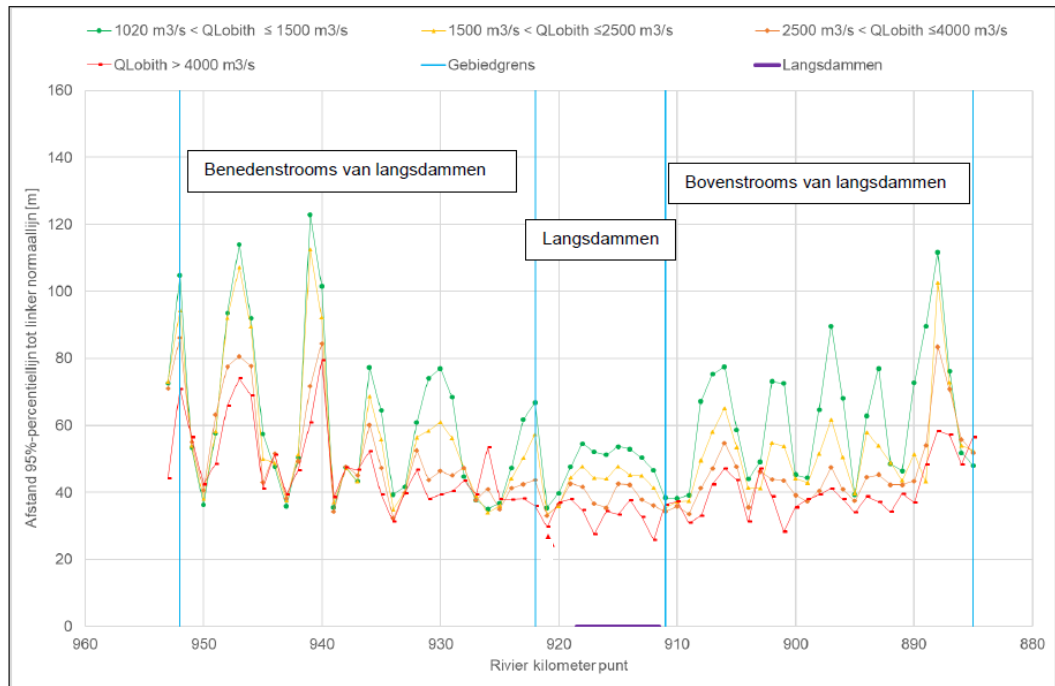
Figuur 5.5 Voor de beoordeling van schrikafstand is onderscheid in verschillende bochtsoorten en op- of afvaart van belang. In blauw de 150 m brede vaargeul.

Figuur 5.6 en Figuur 5.7 tonen de passeerafstanden tot de linker- en rechteroever, boven voor het gehele Waal-traject en onder voor enkel de vergelijkbare bochttrajecten. Hieruit volgt:

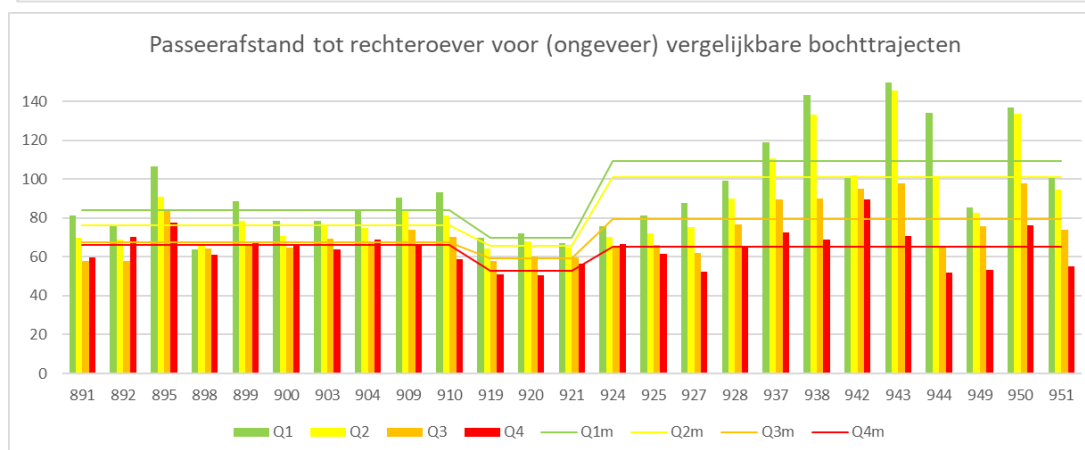
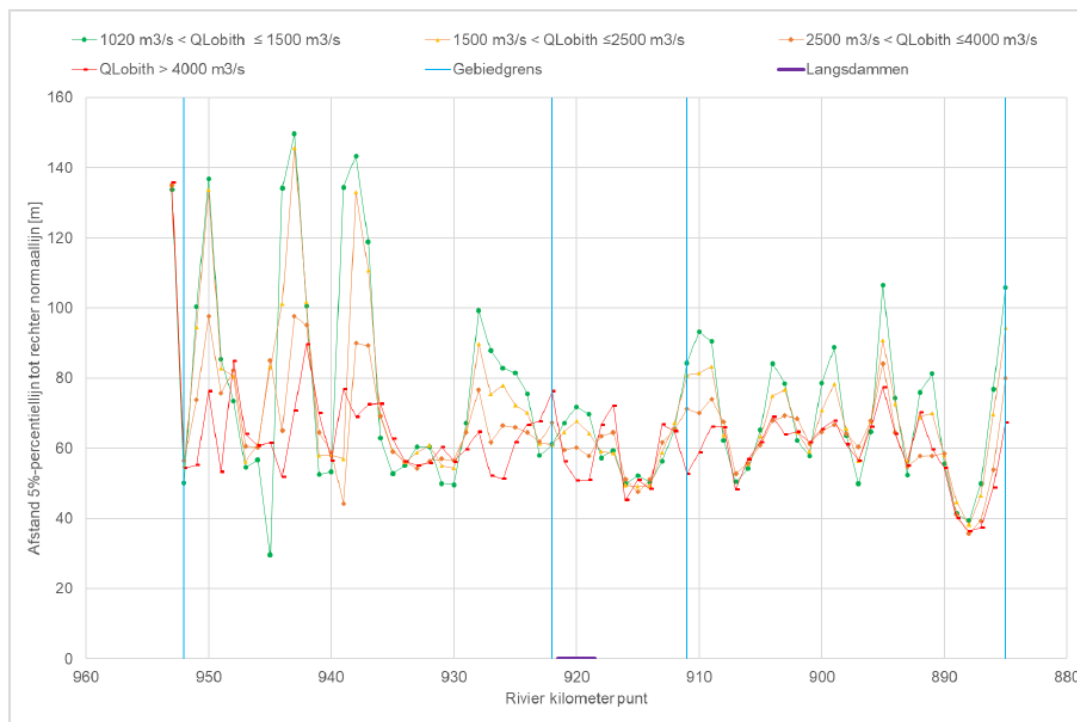
- Bij hoge afvoer wordt er bijna 20 meter dicht op de langsdammen gevaren dan bij lage afvoer, dit geldt zowel voor de dammen aan de linker- als rechteroever.
- Bij lage afvoer wordt er dicht op de langsdammen gevaren dan langs kribkoppen of gestrekte oever bovenstrooms (en benedenstrooms), dit geldt zowel voor de dammen aan de linker- als rechteroever. Dit is triviaal als wordt bedacht dat bij lage afvoer vrijwel alle schepen binnen de 150 m brede vaargeul varen. De rand van de vaargeul ligt dicht op de langsdammen dan op de kribkoppen vanwege de kleinere normaalbreedte.

- Bij hoge afvoer wordt er dichter op de langsdammen gevaren dan langs kribkoppen of gestrekte oever bovenstrooms (en benedenstrooms), dit geldt zowel voor de dammen aan de linker- als rechteroever.
- Bij de vergelijking tussen opvaart en afvaart (resp linker- en rechteroever) valt op dat de afvaart meer afstand houdt tot de oever dan de opvaart, dit geldt zowel bij lage afvoer als bij hoge afvoer en zowel bij de langsdammen als bovenstrooms. Mogelijk varen schippers verder van de oever vanwege de grotere vaarsnelheid.

De schepen varen ter hoogte van de langsdammen en bij laagwater dichter bij elkaar wat tot nautisch onveilige situaties zou kunnen leiden. Dit aspect is niet onderzocht of bevestigd.



Figuur 5.6 Passeerafstand tot de linker normaallijn. Boven: passeerafstand voor het hele beschouwde Waal-traject (bron: Indah-Everts & Hermans, 2021). Onder: passeerafstand enkel voor vergelijkbare bochttrajecten. De kleuren groen, geel, oranje en rood corresponderen met de vier beschouwde afvoerclassen. De lijnen in de onderste figuur zijn de gemiddelden van de staven in de drie trajecten (bovenstrooms, langsdammen, benedenstrooms).



Figuur 5.7 Passeerafstand tot de rechter normaallijn. Boven: passeerafstand voor het hele beschouwde Waal-traject (bron: Indah-Everts & Hermans, 2021). Onder: passeerafstand enkel voor vergelijkbare bochttrajecten. De kleuren groen, geel, oranje en rood corresponderen met de vier beschouwde afvoerclassen. De lijnen in de onderste figuur zijn de gemiddelden van de staven in de drie trajecten (bovenstrooms, langsdammen, benedenstrooms).

5.4 Vaarweggebruik door recreatievaart en interactie met beroepsvaart

5.4.1 Recreatievaart in de oevergeul

Recreatievaart op het deel van de Waal met langsdammen is belangrijk vanwege de Noord-Zuid corridor van St. Andries naar het Amsterdam-Rijnkanaal en de haven van Tiel. De binnenvaart wil graag dat recreatievaart in de oevergeul vaart. Koninklijke BLN-Schuttevaer hecht aan het uitvoeren en handhaven van de gemaakte bestuurlijke afspraken hierover. Het scheiden van de beroeps- en recreatievaart door het gebruik van de oevergeul voor de recreatievaart zou in principe tot een veiligere vaargeul moeten leiden (minder interactie). Ook is er dan praktisch gezien meer vaarweg beschikbaar voor de beroepsvaart.

Tijdens de monitoringsperiode heeft Rijkswaterstaat (Varen doe je samen) daarom de recreatievaart aanbevolen in de oevergeulen te varen als dit mogelijk was. Met dynamische borden werd aangegeven of een oevergeul toegankelijk of gesloten is. Overigens is er tijdens de monitoringsperiode in werkelijkheid weinig recreatievaart in de oevergeulen geweest, omdat deze vaak gesloten waren.

Gedurende de zomermaanden juni-augustus 2021 en ook al eerder hebben zich meerdere ongevallen met recreatievaartuigen voorgedaan bij de langsdammen. Rijkswaterstaat heeft daarom het voornemen de oevergeulen voorlopig gesloten te houden voor recreatievaart. Er zijn geen incidenten tussen beroepsvaart en recreatievaart bekend. De ongevallen betroffen eenzijdige aanvaringen van recreatievaart op de drempels onder water bij de inlaat en tussenopeningen.

Ook Koninklijke BLN-Schuttevaer geeft aan dat, gezien de ervaringen van de afgelopen jaren, waarbij de oevergeul niet de veilige vaart aan de recreatie garandeert, het aspect van scheiden en de wenselijkheid ervan nader onderzocht moeten worden, en dat bij eventueel nieuw aan te leggen langsdammen dit per dam nader beschouwd zou moeten worden.

Ten tijde van de monitoringsperiode, toen de geulen enkele tijd open waren voor recreatie en de ambitie bestond dit in de toekomst ook te blijven faciliteren, was er het volgende streefbeeld ten aanzien van de condities (pers. comm. H. Eerden, Rijkswaterstaat, juli 2020):

- In het onderhoudscontract wordt de oevergeul ook opgenomen om die op diepte te houden (1,50 m).
- Recreatievaart met een diepgang van 1,20 m kan in de oevergeul, diepere schepen (ervaren schippers) varen in de hoofdgeul.
- De streef-stroomsnelheid is maximaal 1,5 m/s in de vernauwde inlaatopeningen, af te regelen met de drempels. Het toestaan van recreatie in de geul beperkt daarmee het regelbereik voor de waterverdeling tussen hoofdgeul en oevergeul.

Alleen als blijkt dat het veilig is, kunnen de geulen opengesteld worden voor recreatievaart. Mocht hiertoe in de toekomst besloten worden, dan zijn er de volgende aandachtspunten:

- Het in- en uitvaren van de oevergeulen kan gevaarlijke situaties opleveren door de relatief hoge stroomsnelheden, vooral voor onervaren schippers.
- Om de haven van Tiel en het Amsterdam-Rijnkanaal te kunnen bereiken, dient de recreatievaart de Waal over te steken. Het is onduidelijk of dit tot gevaarlijke situaties zal leiden.
- Recreanten blijken vaak onbekend te zijn met de reglementen en tekens. Aanvullende voorlichting kan hierbij mogelijk helpen.

Door het voornemen om de geulen dicht te zetten voor recreatie, ontstaan er meer mogelijkheden ten aanzien van het regelbereik van de inlaatopeningen. Geheel gesloten openingen zorgen voor de gewenste grotere waterstandsopzet in de vaarweg bij laagwater. Hoeveel opzet er werkelijk te realiseren is, is tijdens de pilot nog niet bemeaten. Het wordt aanbevolen dit te doen.

Omdat in beginsel de ambitie was om de oevergeulen open te stellen voor recreatievaart, en tegelijkertijd de instelling van de openingen het regelbereik beperkt, is het belangrijk om duidelijkheid te hebben over de toekomstige ambitie hieromtrent (is het voornemen permanent, of kunnen de geulen in de toekomst alsnog open onder voorwaarden). Daartoe is analyse van de opgetreden ongevallen, onderzoek naar de veiligheid/wenselijkheid/beschikbaarheid van recreatie in de oevergeul, en overleg met de georganiseerde recreatievaart aan te bevelen.

5.4.2 Nautische veiligheid en interactie recreatievaart en beroepsvaart

De vorige sectie ging specifiek over recreatie in de oevergeul. Hier geven we tenslotte nog de volgende aandachtspunten en aanbevelingen ten aanzien van nautische veiligheid en de *interactie* tussen beroepsvaart en recreatievaart:

- Er is mogelijk een risico dat er nautisch onveilige situaties ontstaan bij de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal, omdat de manoeuvreerruimte op de kruising kleiner is geworden door de aanleg van de langsdam Wamel.
- De recreatie vaart in de hoofdgeul dicht tegen de langsdammen (pers. comm. J. Wensink, Rijkswaterstaat), waarmee het risico ontstaat dat (a) er niet naar stuurboord uitgeweken kan worden indien nodig, en (b) de recreatievaart plots opzij gezet wordt door dwarsstroming ter hoogte van de openingen in de dammen. Dit kan nautisch onveilige situaties opleveren als er beroepsvaart in de buurt is.
- Als de oevergeulen open zijn voor recreatievaart, dan kan in- en uitvaren van de oevergeulen gevaarlijke situaties opleveren door de relatief hoge stroomsnelheden, vooral voor onervaren recreatievaarders.
- Het is aan te bevelen incidenten, bijna-incidenten en overige meldingen en bevindingen te registreren in nauwe samenspraak met de verkeerspost Tiel.

5.5 Conclusies

Ten aanzien van vaargedrag zijn de volgende conclusies getrokken:

- Doordat de beschikbare rivierbreedte ter hoogte van de langsdammen kleiner is, is ook de door scheepvaart gebruikte rivierbreedte kleiner dan bovenstrooms, vooral met toenemende afvoer.
- Bij lage afvoer wordt vrijwel alleen in de 150 m brede vaargeul gevaren, zowel op het langsdammen-traject als bovenstrooms ervan, zodat er weinig verschil is in gebruikte breedte tussen het langsdammen-traject en bovenstrooms. Een afname in ruimtegebruik van circa 5 m ondanks een gelijk gebleven vaargeulbreedte suggereert dat schippers voorzichtigheid betrachten (ze gebruiken een kleiner deel van de vaargeul). Bij hogere afvoer wordt de beschikbare ruimte goed benut. De bevaarbare breedte is met 30 m afgenomen ter hoogte van de langsdammen, terwijl het trajectgemiddelde ruimtegebruik bij hoge afvoer met 18 m is afgenomen.
- Bij hogere afvoer wordt dicht op de dammen gevaren dan bij lage afvoer.
- Bij zowel lage als hoge afvoer wordt dicht op de dammen gevaren dan langs bovenstroomse kribkoppen.
- De schepen varen ter hoogte van de langsdammen en bij laagwater dicht bij elkaar wat tot meer nautisch onveilige situaties zou kunnen leiden. Maar of de nautische veiligheid onvoldoende is in de nieuwe situatie is niet onderzocht of bevestigd.
- De reistijd en vaarsnelheid zijn vergelijkbaar met het bovenstroomse traject, en er is geen bewijs gevonden dat schepen snelheid verminderen ter hoogte van de langsdammen. Ook ten opzichte van de situatie voor aanleg van de langsdammen (2012) zijn geen effecten zichtbaar.
- Dit betekent dat, ondanks dat schippers meer stroming, ondieptes en beperkte ruimte ervaren en aangeven dat het anders varen is langs de dammen (zie ook Snoeij (2021) en Verbrugge & Van den Born (2021)), dit nauwelijks tot uiting komt in het vaargedrag in termen van vaarsnelheid en reistijd.
- Er zijn geen incidenten tussen beroepsvaart en recreatievaart bekend, wel incidenten met enkel recreatievaart.
- We bevelen aan te bemeten hoeveel waterstandsopzet er werkelijk te realiseren is, zodra besloten is dat de oevergeul niet voor recreatie wordt opengesteld. Ook is analyse en een toekomstig beeld over de veiligheid/wenselijkheid/beschikbaarheid van recreatie in de oevergeul aan te bevelen.

- We bevelen aan het vaarweggebruik door de recreatievaart en de interactie met de beroepsvaart, alsook het gebruik van de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal goed te monitoren/registreren omwille van de nautische veiligheid.

6 Conclusies en slotopmerkingen

In voorliggend rapport zijn relevante aspecten van de rivier als vaarweg beschouwd in de situatie dat kribben vervangen worden door langsdammen. Dit is gedaan ten behoeve van de integrale eindevaluatie van de pilot Langsdammen in de Waal. De bevindingen hebben betrekking op deze specifieke pilot en gelden niet per definitie overal waar kribben worden vervangen door langsdammen. Immers, lokale condities, ontwerp (hoogte, vorm, openingen), lengte van het langsdammen-traject bepalen mede in hoeverre de condities van de vaarweg veranderen.

In de evaluatie zijn zowel metingen als modelresultaten gebruikt. Beide hebben voor- en nadelen, en het is daarom verstandig om beide naast elkaar te beschouwen, en de evaluatie niet puur aan de hand van metingen uit te voeren. Morfologische prognoses voor de verre toekomst kunnen het beste met een morfologisch model gedaan worden. Hydrodynamische modellen zijn het geëigende instrument om waterstandseffecten van ingrepen in de rivier te bepalen en te optimaliseren, en er is geen aanleiding om te twijfelen aan met name de relatieve waterstandseffecten. Het waterstandseffect dat volgt uit modellen kan worden gezien als het theoretische effect. De metingen kunnen hiervan afwijken, aangezien in de werkelijkheid het effect van puur de aanleg van de langsdammen niet geïsoleerd kan worden; er zijn ook andere ingrepen in de rivier uitgevoerd. Ook ontwikkeling in de bodem, gefaseerde aanleg, meetfouten, een beperkt meetbereik, variabiliteit in afvoer of andere variabelen, kunnen aanleiding geven tot ruis in de data en verschillen tussen model en meting. Een validatie van het model aan de hand van metingen maakte geen onderdeel uit van de opdracht. Het toegepaste model is gekalibreerd aan de hand van metingen voor aanvang van de evaluatie langsdammen. Modeluitkomsten van morfologische berekeningen in termen van absolute stroomsnelheden, bodemliggingen, afvoerverdelingen en baggervolumes kunnen onnauwkeurig zijn. Daarom worden resultaten zo veel mogelijk in relatieve zin beschouwd, dat wil zeggen in vergelijking met de situatie zonder langsdammen of vergelijking tussen varianten.

Conclusies over waterdiepte en vaarbreedte, dwarsstroming en vaargedrag zijn getrokken in de desbetreffende hoofdstukken. Hier herhalen we nogmaals die conclusies, die antwoord geven op de onderzoeksvragen.

Wat is de waterdiepte en beschikbare vaarbreedte bij de langsdammen vergeleken met bovenstroomse en benedenstroomse trajecten, bij verschillende afvoeren?

- De langsdammen hebben in theorie bij lage afvoer een opstuwend effect door de kleinere normaalbreedte. De verwachte waterstandsopzet bij lage afvoeren door versmalling is echter niet terug te zien in de metingen. Voor scheepvaart lijkt deze pilot langsdammen daarmee vooralsnog minder effectief te zijn dan verwacht.
- Over het algemeen is de gemiddelde waterdiepte in de vaargeul (combinatie van meting en modelresultaat) ter hoogte van de langsdammen gelijk is aan de gemiddelde waterdiepte bovenstrooms. De aanleg van de langsdammen verandert dit beeld niet.
- Bij Wamel en Dreumel is sprake van afwisselende deeltrajecten van erosie en sedimentatie in de metingen. Bij Ophemert vindt over de hele lengte aanzanding plaats, en erosie benedenstrooms van de dam.
- Vooral bij de lagere afvoeren zorgt aanzanding voor hinder door ondieptes (gemeten aanzanding bedraagt meer dan de waterstandsopzet). Aangezien op het langsdammen-traject weinig tot geen overdiepte aanwezig is, zal aanzanding merkbaar zijn voor de scheepvaart. Schippers constateren meer ondieptes ter hoogte van de langsdammen. Er is een MGD-locatie bij gekomen ter hoogte van Ophemert. De gemeten baggervolumes wijzen echter niet op een toename in ondieptes.

- De beschikbare vaarbreedte (bepaald door combinatie van metingen en modelresultaten) ter hoogte van de langsdammen neemt (conform ontwerp) af met tientallen meters (hier gedefinieerd als de breedte van de vaarweg waar de diepte groter is dan 2,80 m). Dat geeft bij de langsdammen minder breedte van het vaarwater dan op het bovenstroomse traject. Bij hoge afvoer bedraagt de afname in vaarbreedte 30 m, in lijn met de reductie van de normaalbreedte. Bij lage afvoer en bij de gekozen definitie van vaarbreedte kan de afname meer dan 30 m bedragen op locaties waar aanzanding heeft plaatsgevonden. De vaarweg voldoet na aanleg van de langsdammen nog steeds aan de internationale norm (een vaargeul van 150 m breed en 2,8 m diep). Een eventueel bredere vaargeul van 170 m is precies in te passen (de vaargeul is dan gelijk aan de bevaarbare breedte), indien een afstand van 30 m tussen vaargeul en bakenlijn gehandhaafd dient te blijven.

Hoe beïnvloedt de instelling van instroomopeningen de waterstanden en waterdieptes bij laagwater, en de bodemligging in de hoofdgeul? Hoe ontwikkelt dit zich in de komende 20 jaar?

- De instelling van de instroomopeningen heeft volgens de hydrodynamische modelberekeningen een significant effect op de waterstanden. Afhankelijk van de instelling van de instroomopening, kunnen bij afvoeren van 1500 m³/s bij Lobith de langsdammen leiden tot zowel een daling of stijging van de waterstand. Dit werkt uiteraard door in de waterdiepte (afname of toename). In de gemeten data is het effect van de instelling van de openingen niet goed waar te nemen.
- Bij variant V1 (volledig geopende instroomopeningen) is te zien dat, ten gevolge van lange-termijn morfologische ontwikkelingen, in vergelijking met de situatie zonder langsdammen de diepte bij OLR afneemt ter hoogte van de langsdammen (met name bij Wamel en Ophemert) en de diepte beperkt toeneemt bovenstrooms ervan. In variant V2 (volledig gesloten instroomopeningen) neemt de diepte toe ter hoogte van de langsdammen (met name bij Dreumel en Ophemert).
- Extra baggeractiviteiten leiden tot een toename van hinder voor het scheepvaartverkeer. Er is in V1 een toename in gemodelleerde baggerinspanning bij de langsdammen (met name bij de instroomopeningen van Wamel en Ophemert) en een afname op het bovenstroomse traject. Over het gehele traject Nijmegen-Zaltbommel leidt dit in V1 tot een toename in baggerwerk ten opzichte de situatie zonder langsdammen, en in V2 juist tot een afname.
- Op de langere termijn ontwikkelt de vaarbreedte (breedte waarbinnen het dieper is dan 2,8 m) bij lage afvoer zich volgens de berekeningen niet significant, maar deze conclusie is onzeker.
- De instelling van de instroomopeningen lijkt een significant effect te hebben op de ontwikkeling in bodemligging en waterdiepte in de komende 20 jaar. Om het daadwerkelijke effect van de instroomopeningen te bepalen is nader onderzoek nodig. De potentiële effecten op de waterdiepte als gevolg van de morfologische ontwikkelingen zijn groot.

Is er sprake van hinderlijke dwarsstroming tussen hoofd- en oeversgeul?

- Er is over het algemeen sprake van een toename in dwarsstroming bij de opening van de langsdammen. De gemodelleerde maxima in dwarsstroomsnelheid zijn hoger dan de gestelde eis in het Rivierkundig Beoordelingskader. De hoogste dwarsstroomsnelheid wordt bereikt bij de inlaat Dreumel. Dit is de enige locatie die op basis van de Richtlijnen Vaarwegen nader onderzoek behoeft bij afvoeren hoger dan 1020 m³/s (een langsstroming groter dan 1 m/s).
- De ADCP-metingen laten over het algemeen een lagere dwarsstroming zien dan de modelresultaten. Op basis van de metingen lijkt de hinder voor de beroepsvaart mee te vallen. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat er kanttekeningen zijn geplaatst bij de nauwkeurigheid van de metingen en is het effect van de langsdammen niet te isoleren.
- De verwachting op basis van expert judgement is dat de hinder voor de scheepvaart beperkt zal zijn op langere termijn. Ook op andere locaties (zoals langs kribben) zijn er dwarsstroomsnelheden hoger dan 0,15 m/s aanwezig. Schippers zijn op dit moment gewend aan neren bij kribben en anticiperen op de stroming, met gewenning kunnen de schippers ook anticiperen op de nieuwe stromingspatronen ter hoogte van de openingen in de langsdammen.

Wat is het vaargedrag ter hoogte van de langsdam? Welk deel van de beschikbare vaarbreedte wordt daadwerkelijk benut?

- Doordat de beschikbare rivierbreedte ter hoogte van de langsdammen kleiner is, is ook de gebruikte rivierbreedte kleiner dan bovenstrooms, vooral met toenemende afvoer.
- Bij lage afvoer wordt vrijwel alleen in de 150 m brede vaargeul gevaren, zowel op het langsdammen-traject als bovenstrooms ervan, zodat er weinig verschil is in gebruikte breedte tussen het langsdammen-traject en bovenstrooms. Een afname in ruimtegebruik van circa 5 m ondanks een gelijk gebleven vaargeulbreedte suggereert dat schippers voorzichtigheid betrachten. Bij hogere afvoer wordt de beschikbare ruimte goed benut. De bevaarbare breedte is met 30 m afgenomen ter hoogte van de langsdammen, terwijl het trajectgemiddelde ruimtegebruik bij hoge afvoer met 18 m is afgenomen.
- Bij hogere afvoer wordt dichter op de dammen gevaren dan bij lage afvoer.
- Bij zowel lage als hoge afvoer wordt dichter op de dammen gevaren dan langs bovenstroomse kribkoppen.
- De schepen varen ter hoogte van de langsdammen en bij laagwater dichter bij elkaar wat tot meer nautisch onveilige situaties zou kunnen leiden. Maar of de nautische veiligheid onvoldoende is in de nieuwe situatie is niet onderzocht of bevestigd.

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

- De reistijd en vaarsnelheid zijn vergelijkbaar met het bovenstroomse traject, en er is geen bewijs gevonden dat schepen snelheid verminderen ter hoogte van de langsdammen. Ook ten opzichte van de situatie voor aanleg van de langsdammen (2012) zijn geen effecten zichtbaar.

Er worden aanvullend nog enkele slotopmerkingen gemaakt:

- Afhankelijk van het ontwerp en keuzes ten aanzien van openingen, kunnen de langsdammen de bodemerrosie remmen (zie morfologische variant V1), waarmee vaste lagen in de rivier (zoals bij Nijmegen) minder snel een obstakel worden. Hier heeft de scheepvaart baat bij.
- De langsdammen verkleinen de normaalbreedte, zodat in principe de waterstand wordt opgezet en het initieel dieper is tijdens lage afvoeren, wat gunstig is voor scheepvaart. Het is wel zaak de morfologische ontwikkeling goed te monitoren. Op de lange termijn kan het juist ondieper worden. De instelling van de instroomopening op de morfologie lijkt erg groot en het effect op scheepvaart kan zowel gunstig als ongunstig uitpakken.
- Kribben hebben als morfologisch effect dat er zich kribvlammen ontwikkelen, die ondieptes vormen in de vaarweg. Bij langsdammen gebeurt dit niet, wat positief is voor de scheepvaart.
- In het optimaliseren van de instelling van de instroomopening voor de functie vaarweg is er sprake van een afweging tussen verschillende componenten. Een gesloten opening leidt tot grotere waterdieptes op het traject, maar verhindert het gebruik van de oevergeul voor de recreatievaart. Op dit moment is Rijkswaterstaat voornemens de geulen vanwege incidenten gesloten te houden voor recreatievaart. Het is niet bekend of dit een permanent voornemen is.
- In de toekomst zal vermoedelijk vaker en meer extreem laagwater optreden als gevolg van klimaatverandering. Dit is niet meegenomen in de prognoses (bijvoorbeeld met een aangepaste afvoerhydrograaf); het morfologisch effect hiervan is niet bepaald. Periodes met laagwater zullen langer duren. Voor scheepvaart is het daarom des te meer van belang om ingrepen te doen zoals de langsdammen, die een gunstige uitwerking hebben op de beschikbare waterdiepte bij laagwater.
- Koninklijke BLN-Schuttevaer is bij dit onderzoek betrokken als mee-lezer en onderschrijft op veel deelonderwerpen de uitkomsten van dit onderzoek. Zij geven aan dat met de juiste aanpassingen en een bredere uitrol, het systeem van langsdammen wellicht wel kan leiden tot betere vaarcondities.

Referenties

- Chavarrías, V., C.J. Sloff & E. Mosselman (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Morphology and maintenance. Deltares rapport met kenmerk 11204644, september 2021.
- De Jong, J. & A. te Nijenhuis (2020). Probleembeschrijving en oplossingsrichtingen voor de ondiepte bij St. Andries. Deltares memo met kenmerk 11205271-009-ZWS-0001.
- De Jong, J., V. Chavarrías & W. Ottevanger (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Hydromorphological data and observations. Deltares rapport met kenmerk 11204644, september 2021.
- De Jong, J. & R. van der Mark (2021). Toestand van het systeem en kwetsbaarheid gebruiksfunctie. KBN-HVWN – Stresstest droogte Rijntakken. Deltares rapport met kenmerk 11205274-0040BGS-022, 7 mei 2021.
- Indah-Everts, S.N. & M.I. Hermans (2021). Evaluatie pilot Langsdammen Waal; interpretatie AIS-data. MARIN rapport met kenmerk 32127-1-MO-rev.1.0. Februari 2021.
- Omer, A., W. Ottevanger, M. Yossef & F. Buschman (2019a). Case study of morphological modelling with Delft3D4 and Delft3D-FM (longitudinal dams in the Waal River). Deltares rapport met kenmerk 11202188-004-ZWS-0004, maart 2019.
- Omer, A., W. Ottevanger & M. Yossef (2019b). Modelling the morphological effects of longitudinal dams in the Midden-Waal. Deltares rapport met kenmerk 11203681-002-ZWS-0001, december 2019.
- Paarlberg, A.J., A.Y.A. Omer & M.F.M. Yossef (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Delft3D simulations. Report HKV Lijn in Water & Deltares, PR4153.10 (HKV), 11204644 (Deltares), september 2021.
- Rijkswaterstaat (2017). Advies Baggeren en terugstorten sediment Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal - en Nederrijn-Lek voor PC-NAT 2019-2026. Memo RWS Informatie Document versie 0.9, d.d. 5 juli 2017, Rico Tönis.
- Rijkswaterstaat (2019). Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Versie 5.0.
- Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. 31 juli 2020.
- Rijkswaterstaat (2021). Beoordeling waterdiepte-effecten door rivierprojecten in de hoofdvaarwegen in de Rijntakken. Versie 1.0. RWS Informatie RWS-ON, 1 juni 2021.
- Sieben, A. (2013). Overzicht karakteristieken vaargeulgebruik 31 Mei-10 Juni 2012 tussen Nijmegen en Vuren, door scheepvaart met meer dan 3.5 m diepgang, notitie d.d. 21-05-2013.
- Sieben, A. (2020). Overzicht afvoermetingen 2016-2019 project monitoring langsdammen, notitie Arjan Sieben RWS –WVL, d.d. 07-02-2020.
- Snoeij, G. (2021). De invloed van langsdammen op het scheepvaartverkeer. Afstudeerrapportage Hogeschool Rotterdam ism Koninklijke BLN-Schuttevaer, d.d. 12 januari 2021.
- Staatscourant (2006). Bekendmaking aan de Rijnscheepvaart nr.5/2006. Minste waterdiepte Waal.

Van Denderen, P., E. Kater, L. Jans & R. Schielen (2020). The initial morphological impact of the longitudinal dams. In M. Boersema, R. Schielen, E. van Eijsbergen & J. G. Rinsema, eds., Proceedings of the NCR days, Nijmegen, the Netherlands, 13–14 February, 44-2020, pages 41–42. Netherlands Center for River studies.

Van der Mark, R., R. van der Sligte, A. Becker, E. Mosselman & H. Verheij (2011). Morfologische effectstudie KRW-maatregelen IJssel. Deltares rapport met kenmerk 1204855-000-ZWS-0029.

Verbrugge, L. (2018). Belevingsmonitor Binnenvaart – Samenvatting resultaten langsdammen.

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, februari 2021.

A Visuele interpretatie van de waterdiepte op basis van statistiek

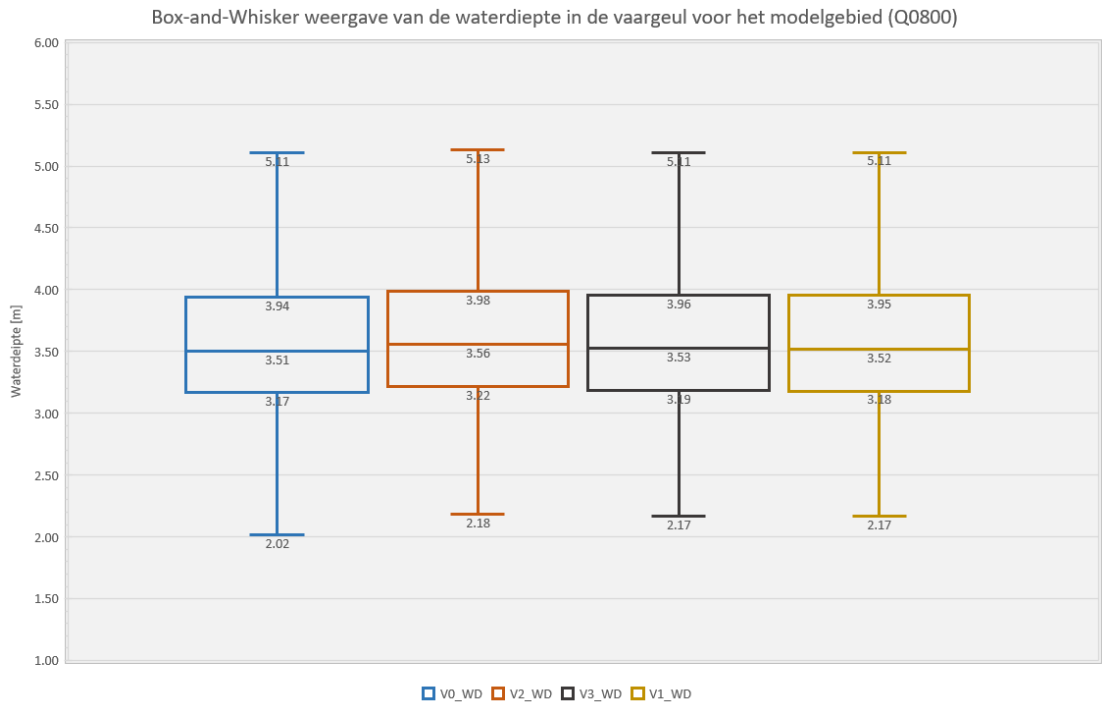
In figuur A.1 t/m figuur A.4 zijn Box-and-Whisker plots te vinden met de waterdiepte in de vaargeul¹¹ voor het gehele modelgebied Nijmegen-Zaltbommel. In een Box-and-Whisker plot geven de “Whiskers” het maximum en minimum weer exclusief outliers. De randen van de Box geven het 1^e en 3^e kwartiel weer, de lijn in het midden is de mediaan.

Bij 800 m³/s neemt het minimum met 15 cm toe bij alle gesimuleerde varianten. Het eerste kwantiel en mediaan schuiven slechts enkele centimeters op ten opzichte van de referentie. Bij iets hogere afvoeren (1020 en 1500 m³/s) neemt de waterdiepte meerdere centimeters toe bij variant V2, 1-2 centimeter bij variant V3 en blijft gelijk bij variant V1. Bij gemiddelde afvoeren (2500 m³/s) neemt de waterdiepte af bij varianten V1 en V3 en neemt deze iets toe bij variant V2.

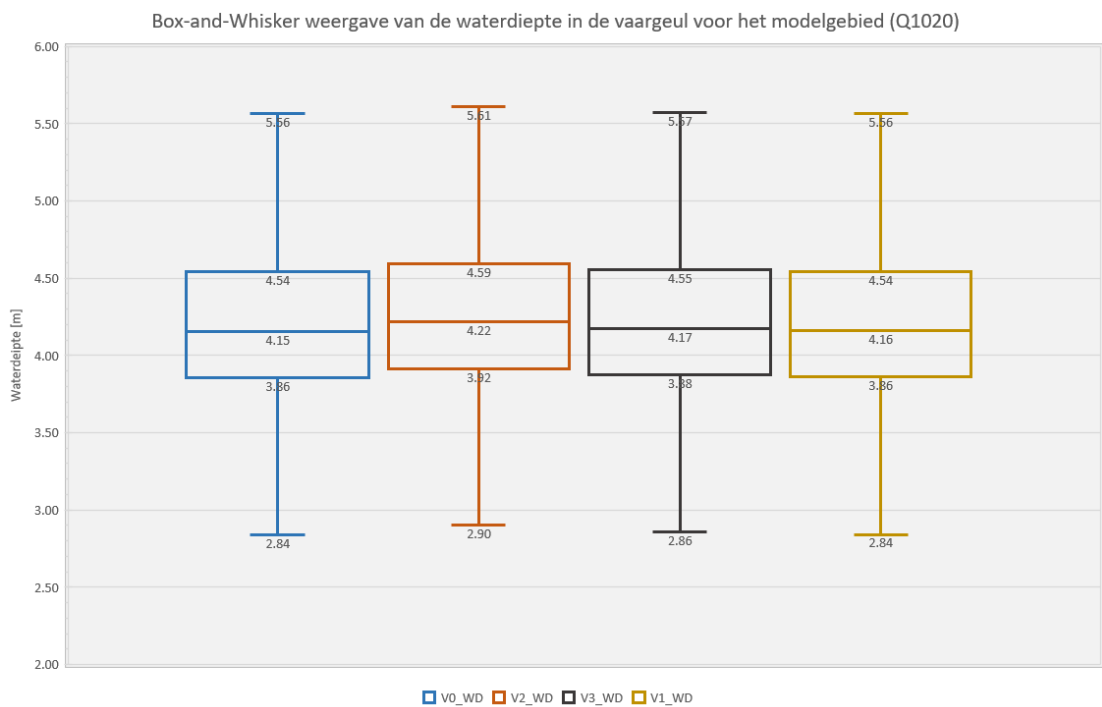
In de bar plot (figuur A.5) is te zien dat bij 800 m³/s bij alle varianten knelpunten blijven bestaan in de vaargeul (Sint Andries). Het belangrijkste knelpunt op de Waal (Nijmegen) is niet opgenomen in het model. Over het algemeen is te zien dat door aanleg van de langsdammen deze histogram verplaatst naar rechts, waardoor op grotere delen van de vaargeul een grotere waterdiepte aanwezig is.

Samenvattend is te concluderen dat de waterstand en daarmee waterdiepte bij lagere afvoeren toeneemt. Echter zal met langsdammen op alleen deze locatie de minimale waterdiepte op het traject Nijmegen – St. Andries niet toenemen, doordat de waterstand bij bestaande knelpunten (St. Andries en Nijmegen) nauwelijks wordt beïnvloed door de langsdammen. Bij hogere afvoeren neemt de waterdiepte af, ook dit is van beperkte invloed op de minimaal beschikbare waterdiepte over het gehele traject.

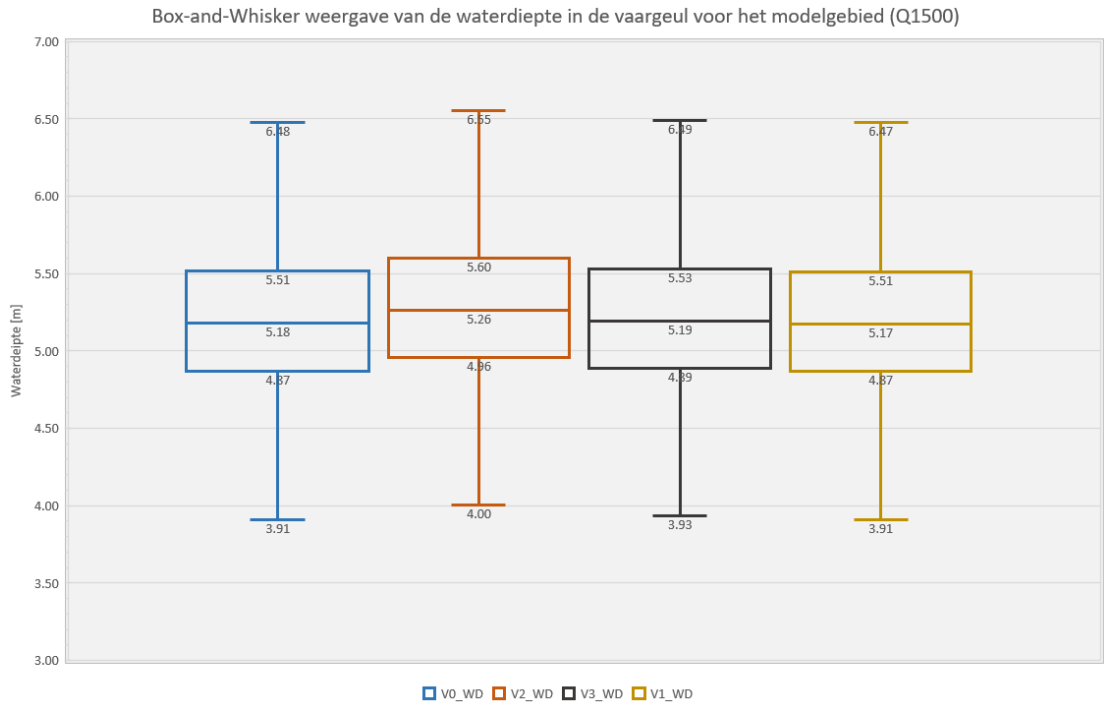
¹¹ Na aanleg van de langsdammen is de vaargeul verplaatst. Gebruik is gemaakt van de locatie van de vaargeul na aanleg van de langsdammen.



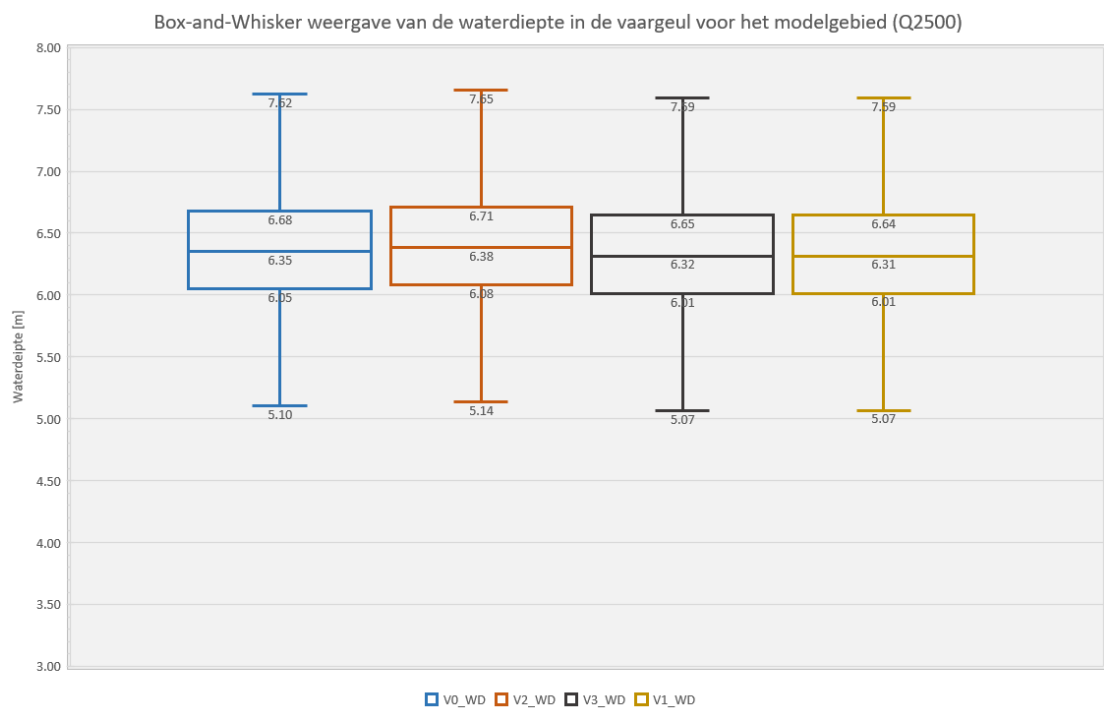
Figuur A.1 Box-and-Whisker plot met de waterdiepte voor de 4 varianten bij $800 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de waterdiepte uit hydraulische Delft3D-berekeningen.



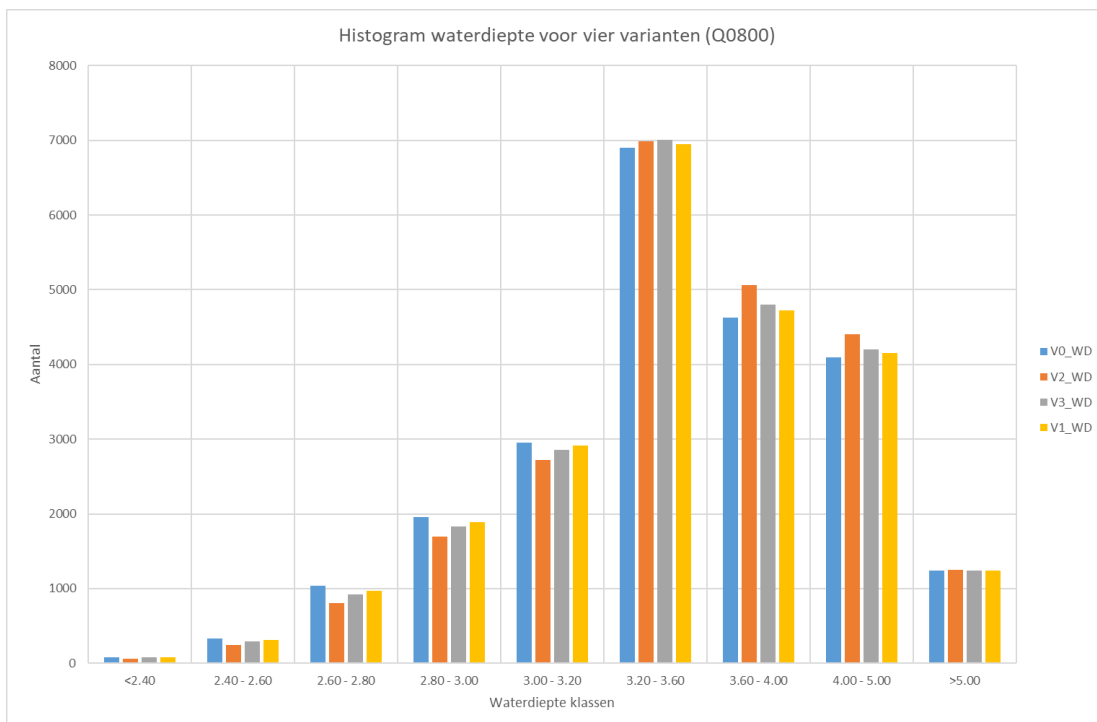
Figuur A.2 Box-and-Whisker plot met de waterdiepte voor de 4 varianten bij $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ op basis van de waterdiepte uit hydraulische Delft3D-berekeningen.



Figuur A.1 Box-and-Whisker plot met de waterdiepte voor de 4 varianten bij 1500 m³/s op basis van de waterdiepte uit hydraulische Delft3D-berekeningen.



Figuur A.2 Box-and-Whisker plot met de waterdiepte voor de 4 varianten bij 2500 m³/s op basis van de waterdiepte uit hydraulische Delft3D-berekeningen.



Figuur A.3 Bar plot met verschillende waterdiepte-klassen voor de vier varianten bij 800 m³/s op basis van de waterdiepte uit hydraulische Delft3D-berekeningen. Gegeven is het aantal gridcellen in de vaargeul dat in iedere klasse valt.

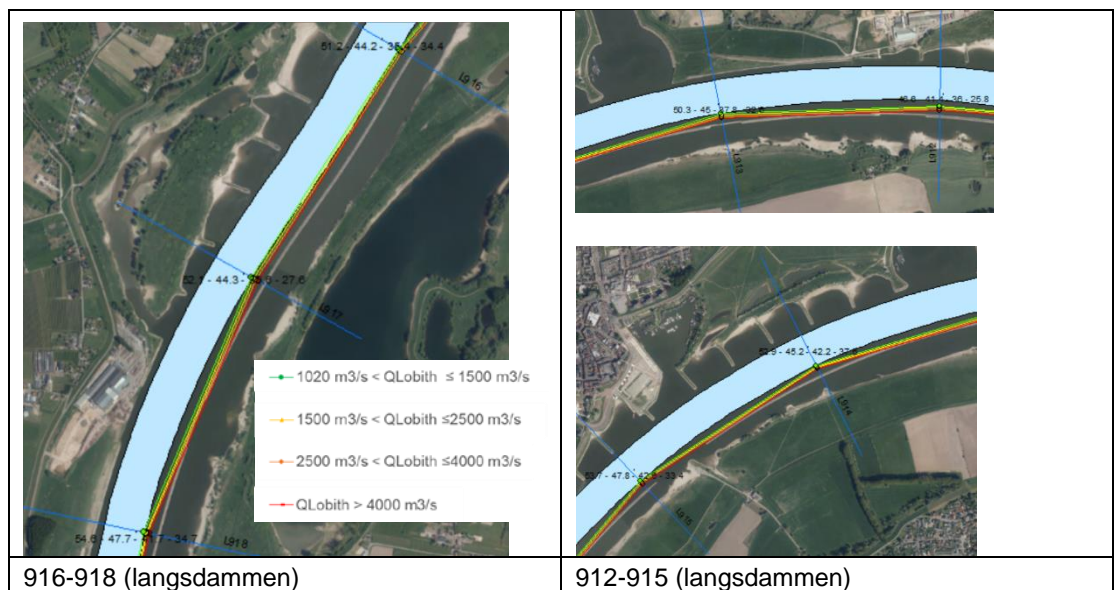
B Bovenaanziichten van binnenbochten tbv beoordeling schrikafstand

B.1 Opvaart langs linkeroever

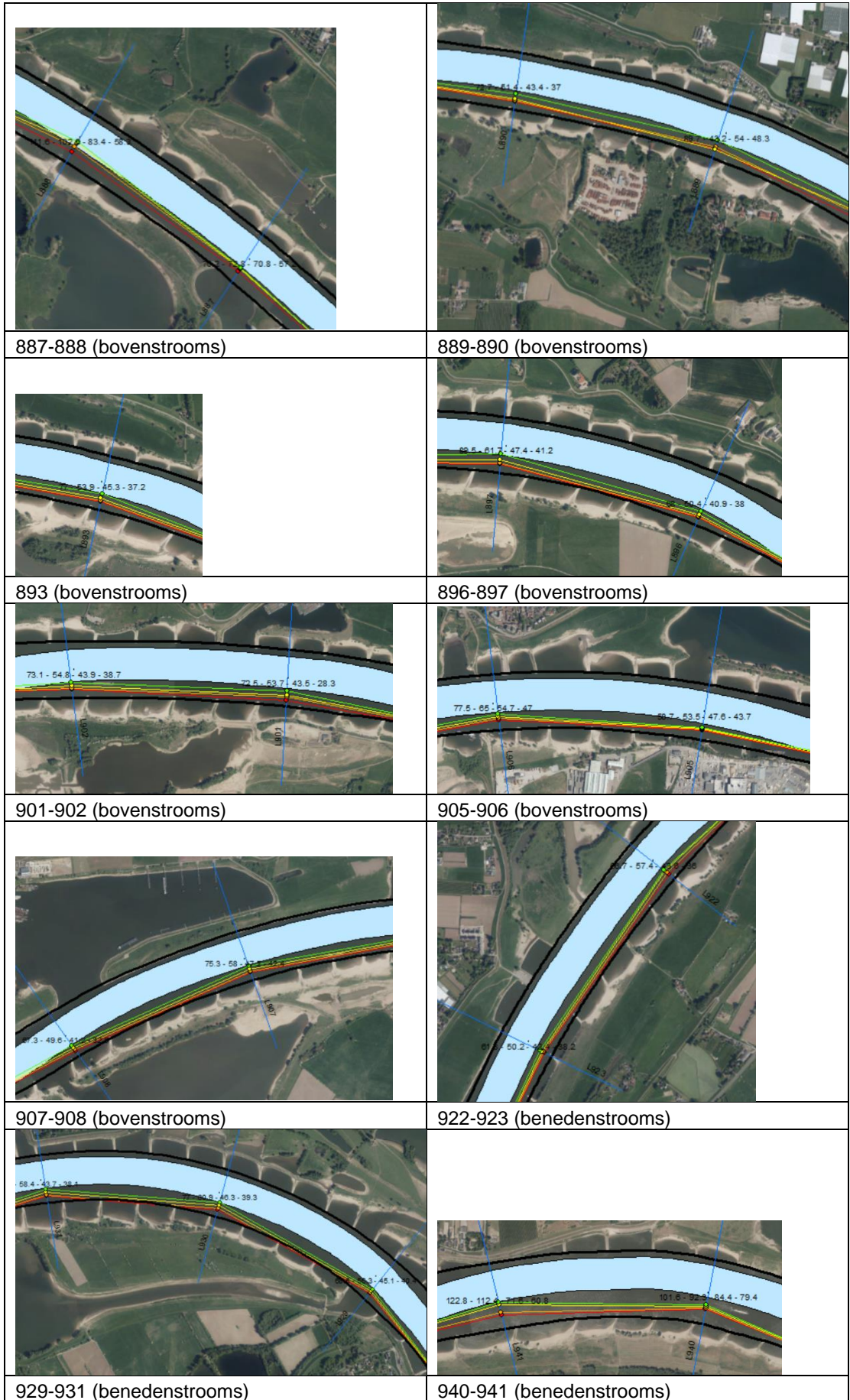
Passeerafstanden¹² van schepen varend langs de langsdammen aan de linkeroever (Wamel, Dreumel) worden vergeleken met schepen varend langs kribben aan de linkeroever. Een vergelijking van rivierkilometers 912 t/m 918 vindt plaats met de volgende (enigszins) vergelijkbare binnenbochttrajecten:

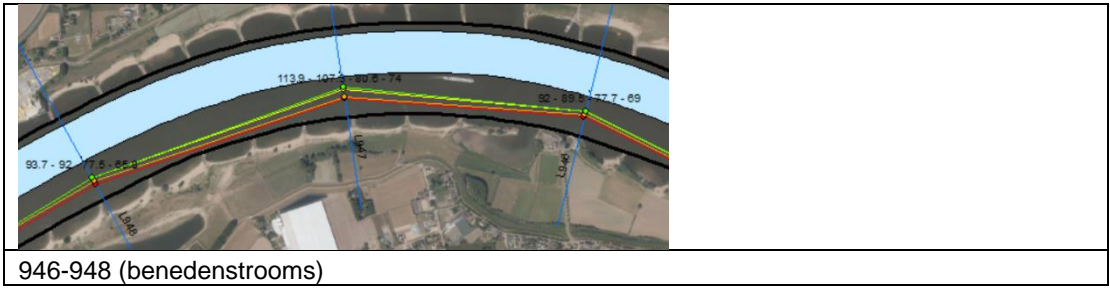
- 887 t/m 890 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 893 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 896 t/m 897 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 901 t/m 902 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 905 t/m 908 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 922 t/m 923 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 929 t/m 931 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 940 t/m 941 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 946 t/m 948 (benedenstrooms van de langsdammen)

De kleuren groen, geel, oranje en rood corresponderen met passageafstanden bij de vier gehanteerde afvoerniveaus.



¹² Passeerafstanden zijn in de AIS-analyse alleen op rivierkilometers bepaald, niet op de tussenliggende punten. Beschouw in de figuren de punten, niet de lijnen.





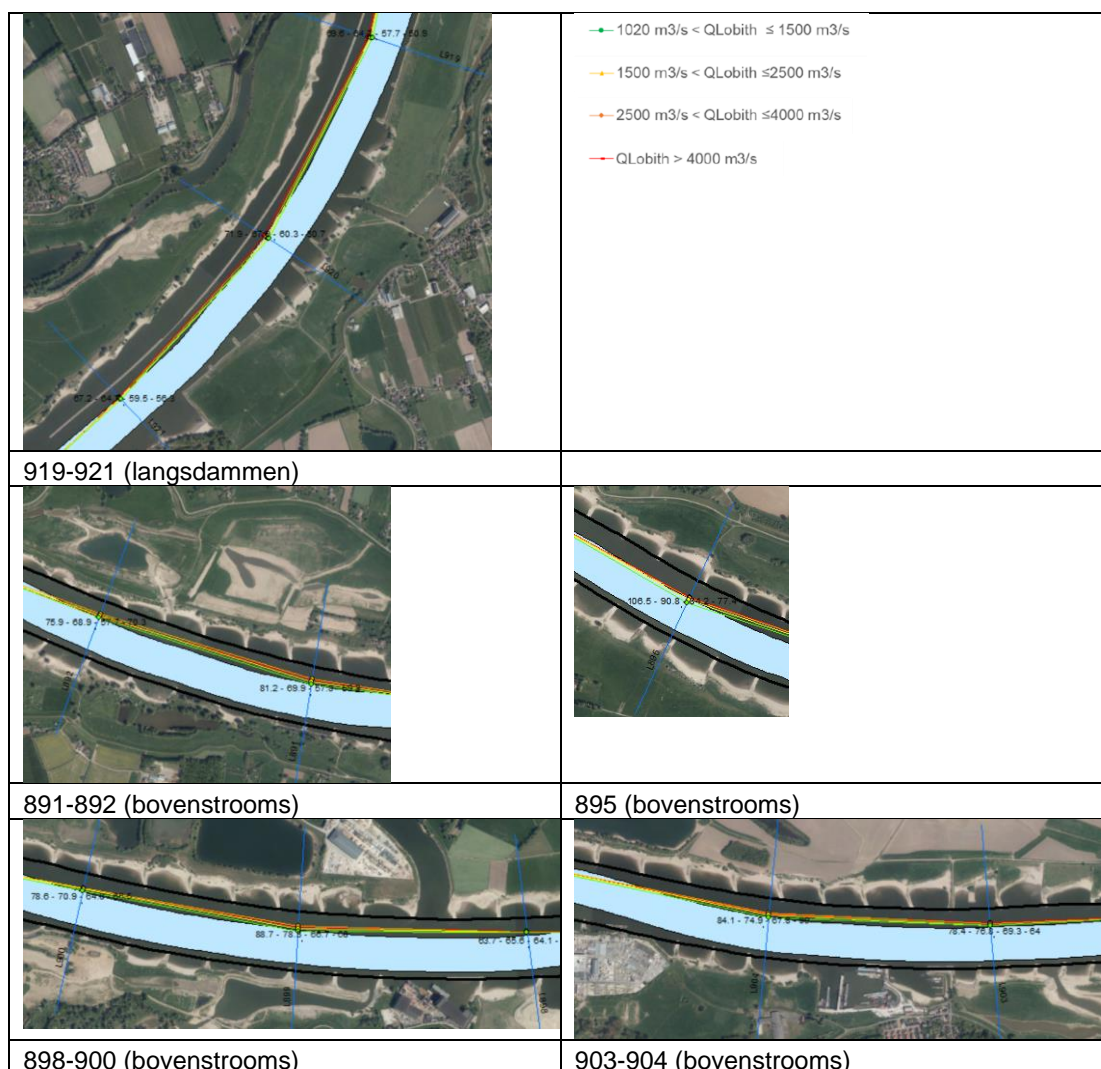
946-948 (benedenstrooms)

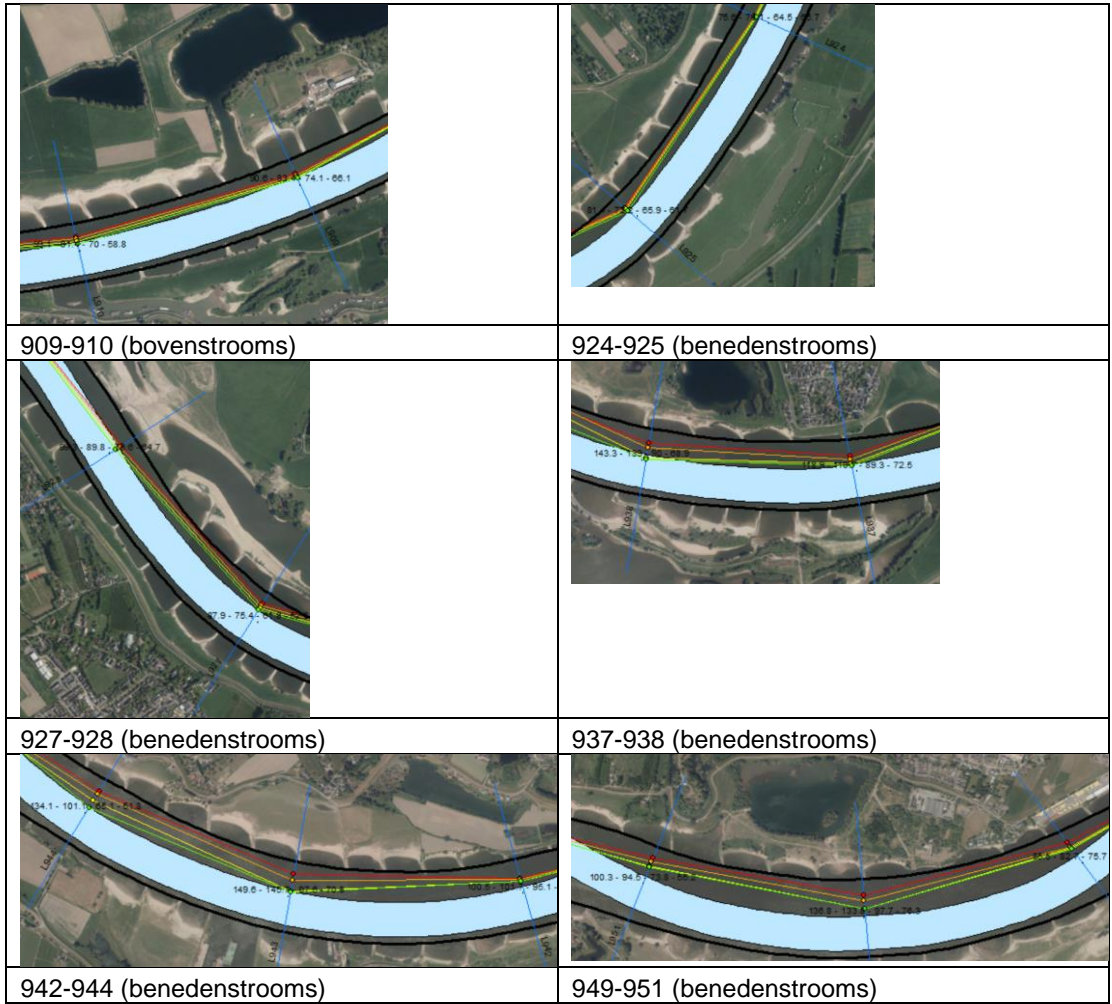
B.2 Afvaart langs rechteroever

Passeerafstanden¹² van schepen varende langs de langsdam aan de rechteroever (Ophemert) worden vergeleken met schepen varende langs kribben aan de rechteroever. Een vergelijking van rivierkilometers 919 t/m 921 vindt plaats met de volgende (enigszins) vergelijkbare binnenbochttrajecten:

- 891 t/m 892 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 895 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 898 t/m 900 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 903 t/m 904 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 909 t/m 910 (bovenstrooms van de langsdammen)
- 924 t/m 925 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 927 t/m 928 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 937 t/m 938 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 942 t/m 944 (benedenstrooms van de langsdammen)
- 949 t/m 951 (benedenstrooms van de langsdammen)

De kleuren groen, geel, oranje en rood corresponderen met passageafstanden bij de vier gehanteerde afvoerniveaus.





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