

## Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn

Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties



# Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn

## Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties

### **Auteur(s)**

Anke Becker  
Rolien van der Mark  
Remi van der Wijk  
Erik Mosselman

## Eindevaluatie suppleties Boven-Rijn

### Deelrapport 2: Invloed op rivierfuncties

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Laurens Jansen, Henk Oskam, Arjan Sieben
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	

#### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	08-03-2023
<b>Projectnummer</b>	11208437-000
<b>Document ID</b>	11208437-000-ZWS-0010
<b>Pagina's</b>	79
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

#### Auteur(s)

	Anke Becker	
	Rolien van der Mark	
	Remi van der Wijk	
	Erik Mosselman	

# Samenvatting

Van 2014 tot 2022 is door RWS een proef uitgevoerd met het suppleren van sediment in de Boven-Rijn, om te leren of en hoe de rivierbodem en rivierwaterstand middels suppletie verantwoord op een niveau gehouden kan worden die de bevaarbaarheid van de vaarweg in het grensgebied in stand houdt. Daarbij is uitgebreide monitoring uitgevoerd. Deze eindevaluatie van de suppleties in de Boven-Rijn moet inzichtelijk maken welk effect met suppletie kan worden bereikt, welke neveneffecten daarbij ontwikkelen en wat van de proef geleerd kan worden voor nieuwe suppleties in de Boven-Rijn of in andere trajecten. Specifiek moeten daarbij de volgende vragen worden beantwoord:

- a) hoe en met welke afwegingen de suppleties in 2016 en 2019 zijn ontworpen en gemonitord;
- b) hoe en met welke afwegingen beide suppleties zijn uitgevoerd en wat daarvan geleerd kan worden;
- c) welke effecten door de suppleties zijn ontwikkeld en wat nog kan worden verwacht;
- d) wat de impact van c) is voor de rivierfuncties;
- e) wat hiervan geleerd kan worden voor ontwerp, uitvoering en monitoring van nieuwe suppleties, ook in andere trajecten van de Rijntakken.

De afwegingen voor het ontwerp en monitoring van de suppleties en reeds uitgevoerde analyses over de effecten en het gedrag van de suppleties (vraag a) en de invloed van de suppleties op de bodemligging, bodemsamenstelling en waterstanden op de Boven-Rijn (vraag c) zijn gerapporteerd in deelrapport 1 (Becker et al., 2023). Tot zover zijn de conclusies in dat rapport gebaseerd op beschikbare gegevens. Waar nodig is de analyse ondersteund door resultaten van numerieke modelberekeningen, die ook in Becker et al. (2023) staan beschreven.

In voorliggend rapport (deelrapport 2) wordt de invloed van de suppleties op de rivierfuncties hoogwaterveiligheid, vaargeulonderhoud en MGDs, gebruik van de vaarweg en stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen onderzocht (vraag d).

De eindevaluatie zal worden afgerond met een hoofdrapport met een samenvatting van de resultaten uit de deelrapporten, de afwegingen en leerpunten over de uitvoering (vraag b), een samenvattende beschrijving van de dynamiek van de suppleties en de “lessons learned” voor toekomstige suppleties (vraag e).

Voor de invloed van de suppleties op rivierfuncties worden de volgende conclusies getrokken.

## Hoogwaterveiligheid

- Op basis van modelberekeningen veroorzaken beide suppleties samen, direct na aanleg van de tweede suppletie, bij maatgevende afvoer maximaal 1,5 cm opstuwung op de as van de rivier. Dit effect neemt zeer langzaam af, het zal naar verwachting nog 10-20 jaar vanaf heden zichtbaar zijn.
- Het maximale waterstandseffect wordt direct bovenstrooms van de suppleties bereikt, aan de linkerkant van de rivier. Langs de bandijken (winterdijk) wordt de opstuwung bij maatgevende afvoer maximaal 1 cm.
- Bij de Rijnbrug bij Emmerich (rkm 853) is nog ongeveer de helft van het waterstandseffect te zien.

### Scheepvaart:

- Wat betreft de functie scheepvaart moet er rekening mee worden gehouden dat de bestaande al kritische diepteknelpunten in de Boven-Rijn benedenstreams van de suppleties (rkm 864,1 en 866,5) in de toekomst kritischer worden als gevolg van de uitgevoerde suppleties, er wordt een beperkte bodemstijging van 5-10 cm bij rkm 866,5, en 25-30 cm bij rkm 864,1 verwacht in de komende 10-20 jaar. De verondieping bij het knelpunt bij rkm 864,1 is het gevolg van de 2D-reactie van de bodemligging op de aanleg van de suppleties en is gesignaleerd in de bodempeilingen en de modelberekeningen. De verondieping bij het knelpunt bij rkm 866,5 is alleen in de modelberekeningen te zien, maar pas op een moment in de prognose waarvoor nog geen peilingen beschikbaar zijn. Deze kan dus niet worden geverifieerd.
- De suppleties hebben weinig invloed op de dwarsstroming op de bakelijijn. Ze zorgen voor een beperkte toename in stroomsnelheid in de vaargeul. Als gevolg hiervan zal de weerstand voor de opvaart licht toenemen.
- De door een beperkt aantal schippers gerapporteerde bijzonderheden in het gedrag van hun schepen bij een vaart over de Boven-Rijn zijn zeer waarschijnlijk niet door de suppleties veroorzaakt.
- Aan de hand van de CoVadem-data kan geconstateerd worden dat er geen significante verandering waarneembaar is in de ruimtelijke verdeling van scheepvaart als gevolg van de suppletie. De beschikbare ruimte wordt in alle periodes goed benut.
- De CoVadem-data wijzen ook niet op een duidelijke invloed van de suppleties op de reistijden van de scheepvaart. De gemiddelde reistijden van de opvaart in het suppletietraject lijken tussen de Periodes 0 en 4 zeer licht te zijn toegenomen (met minder dan 1 minuut per kilometer), maar of dit door de beperkt toegenomen stroomsnelheid komt, is niet met zekerheid te zeggen.
- Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat er in de toekomst significante verandering in de ruimtelijke verdeling of reistijd optreedt als gevolg van de suppleties.
- Om het belang van de bevaarbaarheid ook bij toekomstige suppletie-initiatieven mee te nemen wordt aanbevolen om rekening te houden met de wat vaardiepte betreft meest kritische delen in de vaarweg. Dit kan door de invloed van de suppleties op de bodemligging van tevoren in te schatten en een niet kritische locatie en geometrie (lengte, dikte, breedte) te kiezen. In Becker et al. (2023) is dit verder uitgewerkt.

### Vaargeulonderhoud en MGDs:

- De suppleties op de Boven-Rijn hebben tot en met 2021 geen effect gehad op het vaargeulonderhoud. De bank aan de rechterkant bij rkm 864,1 zou in de komende jaren wel extra onderhoudsbaggerwerk kunnen vragen vanwege een verwachte (beperkte, orde enkele dm) verhoging van de bodemligging veroorzaakt door de tweede suppletie.
- De aanleg van de suppleties heeft geen nieuwe locaties van Minst Gepeilde Diepte laten ontstaan of de frequentie van MGDs op de Boven-Rijn verhoogd.

### Stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen:

- De suppleties hebben geen effect gehad op de stabiliteit van (krib)constructies en de kruising van kabels en leidingen bij Millingen. Omdat het effect van de suppleties geleidelijk verdwijnt, geldt deze conclusie ook voor de komende 10 jaar.
- Mogelijk ligt er op de Boven-Rijn nog een tweede kruising van kabels en leidingen bij Tuindorp. Op dat traject erodeert de rivierbodem in de rechterhelft van de rivier als gevolg van zowel de suppleties als de vaste laag bij Spijk. Bovendien lijkt er een kans op vorming van diepe erosiekuilen door aansnijden van erosiegevoelige lagen in de ondergrond. Als hier kabels of leidingen in de grond liggen wordt aanbevolen om na te gaan hoe diep deze liggen. Als ze net als de kruising bij Millingen meerdere meters onder NAP liggen is het risico op instabiliteit alsnog gering.

Samengevat kan gezegd worden dat de suppleties op de Boven-Rijn een beperkte invloed op de rivierfuncties hebben gehad. Dit is mede te danken aan de gekozen locatie die weinig kritiek is wat betreft vaargeulonderhoud en constructies en vanwege de diepteligging voldoende ruim onder de vaargeul. Er wordt aanbevolen om bij het plannen van toekomstige suppleties de verwachte ontwikkeling van de rivierbodem te bepalen en te analyseren of deze een probleem zou kunnen vormen voor de rivierfuncties. De geobserveerde bodemdynamiek na aanleg van de Boven-Rijn suppleties (zie Becker et al., 2023) kan daarvoor een eerste handreiking geven. Er moet echter rekening mee gehouden worden dat suppleties op een andere locatie (bijvoorbeeld verder benedenstrooms op een zandige rivierbedding) of met een andere geometrie een afwijkende dynamiek kunnen veroorzaken.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1	Aanleiding	9
1.2	Achtergrond van de suppletieproef	9
1.3	Korte beschrijving van de suppletie	10
1.4	Doelstellingen van de eindevaluatie	11
1.5	Leeswijzer	11
<b>2</b>	<b>Hoogwaterveiligheid</b>	<b>13</b>
2.1	Onderzoeksvragen	13
2.2	Overwegingen wat betreft hoogwaterveiligheid vóór aanleg van de suppleties	13
2.3	Aanpak evaluatie	14
2.4	Inloed op de waterstanden bij hoogwater (in ruimte en tijd)	14
2.4.1	Berekend effect van de suppleties op waterstanden bij lagere hoogwaters	14
2.4.2	Vertaling waterstandseffect naar de hoogwaterreferentie ( $Q_{\text{Lobith}} = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ )	16
2.5	Conclusies	18
<b>3</b>	<b>Gebruik van de vaarweg</b>	<b>19</b>
3.1	Onderzoeksvragen	19
3.2	Minimale diepte in de vaargeul	19
3.2.1	Aanpak	19
3.2.2	Resultaten	20
3.3	Langs- en dwarsstroomsnelheden	25
3.3.1	Aanpak	25
3.3.2	Resultaten dwarsstroming	27
3.3.3	Resultaten langsstroming	35
3.3.4	Conclusie	42
3.4	Ervaring van schippers	42
3.5	Ruimtelijke verdeling van de scheepvaart	43
3.5.1	Aanpak	43
3.5.2	Resultaten	45
3.6	Reistijd van de scheepvaart	49
3.6.1	Aanpak	49
3.6.2	Resultaten	49
3.7	Conclusies	50
<b>4</b>	<b>Vaargeulonderhoud en MGD's</b>	<b>52</b>
4.1	Onderzoeksvragen	52
4.2	Aanpak	52

4.3	Vaargeulonderhoud	52
4.4	MGD	55
4.5	Conclusies	55
<b>5</b>	<b>Stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen</b>	<b>57</b>
5.1	Onderzoeksvragen	57
5.2	Welke conclusies zijn op basis van de antwoorden op voorgaande vragen te trekken over de invloed van suppleties op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen? Locaties en dieptes van kabels en leidingen	57
5.2.1	Aanpak	57
5.2.2	Resultaten	57
5.3	Locaties van kribben en andere constructies	58
5.3.1	Aanpak	58
5.3.2	Resultaten	58
5.4	Beoordeling van de stabiliteit	59
5.4.1	Aanpak	59
5.4.2	Resultaten	59
5.5	Samenstelling van de ondergrond	61
5.5.1	Aanpak	61
5.5.2	Resultaten	61
5.6	Ligging en ontwikkeling van de rivierbodem	62
5.6.1	Aanpak	62
5.6.2	Resultaten	62
5.7	Conclusies	63
5.7.1	Aanpak	63
5.7.2	Resultaten	63
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Literatuurverwijzingen</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Ruimtelijke verdeling van de scheepvaart</b>	<b>69</b>
A.1	Ruimtelijke verdeling per 250 m in suppletietraject	69
A.2	Ruimtelijke verdeling met onderscheid in afvoerclassen	70
A.2.1	Traject 1: Boven-Rijn (km 858-867)	70
A.2.2	Traject 1: Boven-Rijn (ingezoomd op km 862-865)	71
A.2.3	Traject 2: Boven-Waal (km 872-882)	72
A.2.4	Traject 3: Midden-Waal (km 900-910)	73
A.3	Ruimtelijke verdeling met onderscheid in scheepstype	74
A.3.1	Traject 1: Boven-Rijn (km 858-867)	75
A.3.2	Traject 1: Boven-Rijn (ingezoomd op km 862-865)	76
A.3.3	Traject 2: Boven-Waal (km 872-882)	77
A.3.4	Traject 3: Midden-Waal (km 900-910)	78



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Van 2014 tot 2022 is door RWS een proef uitgevoerd met het suppleren van sediment in de Boven-Rijn, om te leren of en hoe de rivierbodempland en rivierwaterstand middels suppletie verantwoord op een niveau gehouden kan worden die de bevaarbaarheid van de vaarweg in het grensgebied in stand houdt. Dit gesuppleerde sediment zal voortdurend in beweging zijn en de natuurlijke dynamiek van de rivier volgen. De proef maakt deel uit van een gezamenlijk grensproject met Duitsland. In het verlengde hiervan heeft RWS de Suppletie Boven-Rijn aangebracht op Duits grondgebied.

De twee suppleties (in 2016 en in 2019) in de Boven-Rijn zijn bedoeld om te leren hoe effectief suppletie is voor het ondersteunen van de rivierbodempland en waterstanden in de Rijntakken en wat daarvan de neveneffecten zijn. De vragen zijn dus:

- a) Welk effect kan met suppletie worden bereikt?
- b) Welke neveneffecten ontwikkelen zich daarbij?
- c) Wat kan hiervan geleerd worden voor nieuwe suppleties in de Boven-Rijn of in andere trajecten?

Dit inzicht is van belang omdat het tegengaan van rivierbodempland in de Rijntakken een rode draad is in het huidige programma Integraal Rivier Management bij het ontwikkelen van duurzaam beheer van een toekomstbestendige rivier. Riviersuppleties kunnen daar een belangrijke rol in gaan spelen. De ervaringen in de Boven-Rijn moeten daarom niet alleen inzicht geven in de werking van suppletie op de Boven-Rijn, maar zo mogelijk ook in de verwachte werking van suppleties op andere locaties in de Rijntakken.

Dit jaar wordt de periode van monitoring (januari 2014 tot eind juni 2022) afgesloten en de balans opgemaakt voor boven genoemde vragen. De in dit document beschreven studie betreft een eerste stap in de eindevaluatie waarin boven genoemde vragen worden uitgewerkt en beantwoord.

## 1.2 Achtergrond van de suppletieproef

In 1992/1993 voerden RWS en WSD West het Grensproject uit, een gemeenschappelijk onderzoek dat heeft bijgedragen aan een gegarandeerde waterdiepte van 2,80 m bij OLR in een geul van 150 m breedte op het traject Rotterdam – Duisburg vanaf 2007. Een ander onderwerp uit dit Grensproject was rivierbodempland. Duitsland heeft vanwege de meedalende waterstanden veel maatregelen getroffen (kribaanpassingen, vaste lagen, zand- en grindsuppleties) om afnemende bevaarbaarheid, schade aan natte infrastructuur, problematiek van aansluitingen van regionale wateren op de Rijn en dalende grondwaterstanden het hoofd te bieden. In het grensgebied en bovenstrooms ervan is dat niet mogelijk als in Nederland de rivierbodempland niet stopt. In het Grensproject heeft Nederland zich nog niet gebonden aan het stoppen van de bodempland maar hooguit aan het niet verder versterken daarvan. Dit kreeg vorm in het bagger- en terugstortbeleid dat in 1992 is ingevoerd t.b.v. het vaarwegonderhoud (Sieben, 2009).

Dit bagger- en terugstortbeleid, waardoor de winning van zand uit de eroderende trajecten duidelijk teruggebracht is, heeft de bodemerosie niet tot stilstand gebracht, en in de MIRT verkenning Duurzame Vaardiepte Rijndelta (2007), DVR2 (2016), MIRT--onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken (2018) en het huidige programma Integraal Rivier Management (IRM) komt rivierbodembeheer door suppletie ook voor de Rijntakken in beeld.

In 2008 hebben RWS en WSD West als uitloper van het Grensproject een overeenkomst (Behördenvereinbarung) gesloten om onderhoudswerkzaamheden in het gemeenschappelijk grenstraject van de Rijn van km 857,667 tot km 865,515 te coördineren. Dat betrof de aanleg van een vaste laag door WSD West en uitvoering van een sedimentsuppletie door RWS. Middels deze overeenkomst investeren beide landen in gelijke mate in bevaarbaarheid van het grenstraject. In 2012 is de vaste laag bij Spijk opgeleverd, het eerste deel van de suppletie op Boven-Rijn is in 2016 uitgevoerd en het tweede in 2019.

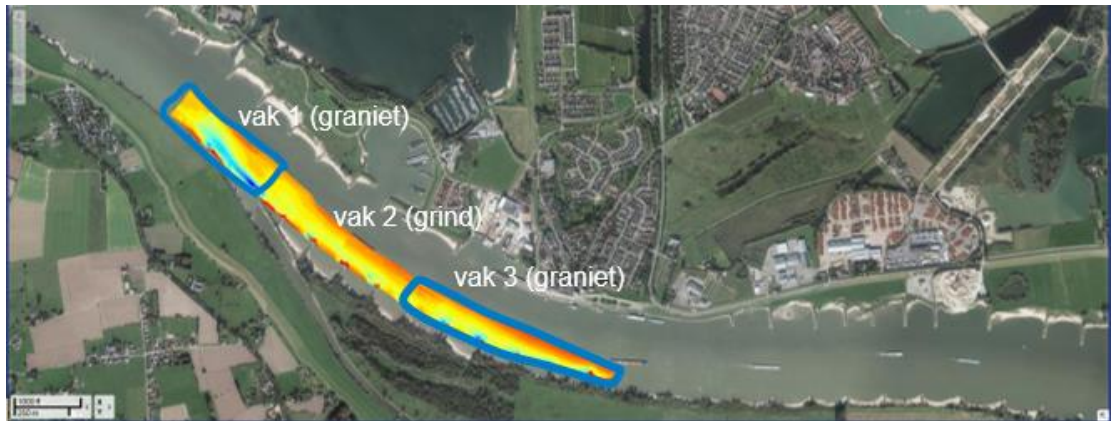
### 1.3 Korte beschrijving van de suppletie

De suppletie in de Boven-Rijn is in twee delen uitgevoerd in 2016 en 2019. Beide keren ging het om een volume van grofweg 70.000 m<sup>3</sup> met voorgeschreven samenstelling, gestort door onderlossers in de linkerbuitenbocht tussen km 862 en 864 op minstens 25 m afstand van en binnen de normaallijnen (Figuur 1 en Figuur 2).

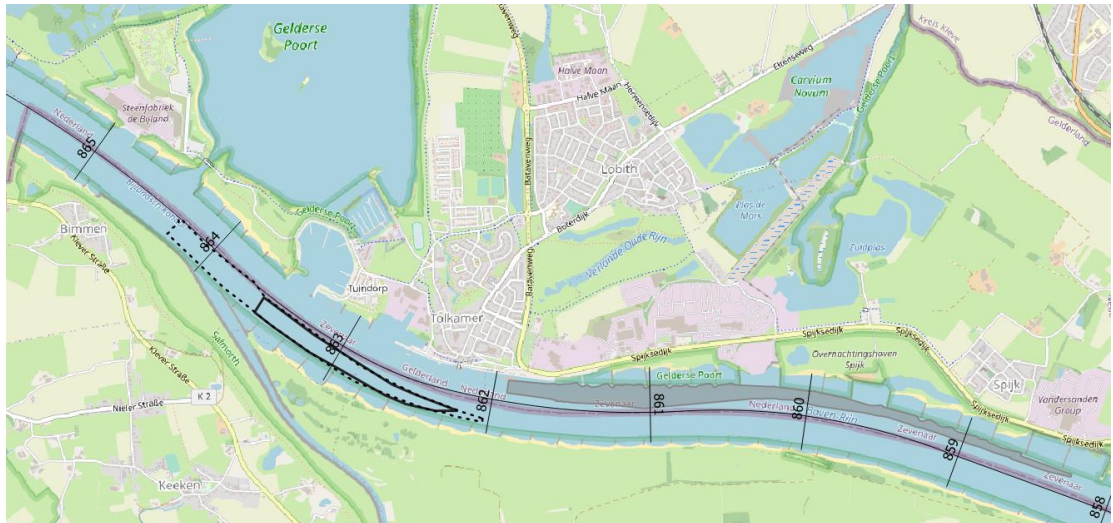
Het eerste deel van de suppletie is in 2016 uitgevoerd als een aaneengesloten, relatief dunne constante stortlaag van 0,3 m dikte op de rivierbodem onder OLR-4,0 m. Deze vorm is gekozen om te onderzoeken of hierdoor versterking van ondiepten stroomafwaarts van de suppletie kan worden voorkomen. Om de dynamiek van de suppletie te onderzoeken is 50% van het suppletievolume als tracer uitgevoerd door gebruik van graniet uit een groeve.

Met het behoudende ontwerp en de strak geregisseerde uitvoering in 2016 bleek de bodem te ontwikkelen zoals verwacht en zonder stroomafwaarts voor problemen te zorgen. Omdat het perspectief daarvan voldoende ruimte bood is het tweede deel in 2019 vervolgens gericht op de vraag wat effecten en neveneffecten zijn van een suppletie in een rivierstuk met resten van een voorgaande suppletie.

Dit deel in 2019 betrof het opvullen tot OLR-3,7 m (excl. 0,2 m uitvoeringstolerantie en met een maximale dikte van 1 m). Dus, een stort in een dikkere laag dan de eerste keer en bovendien op hogere delen van de rivierbodem. Hierdoor vermindert de ruimte voor retourstroming onder passerende schepen meer dan in het ontwerp voor de suppletie in 2016 en dit kan voor de scheepvaart aanleiding zijn om na suppletie andere banen te varen. Daarnaast kan dit de manoeuvreerbaarheid van schepen beperken en het brandstofverbruik lokaal laten toenemen dan wel de reistijd lokaal laten toenemen. Met de evaluatie van de suppletie dient daarom tevens inzichtelijk te worden gemaakt hoe als gevolg van de suppletie de vaargeul wordt gebruikt (waar en hoe snel wordt gevaren) en hoe schippers de suppletie ervaren.



Figuur 1 Ligging eerste suppletiepijlot in de buitenbocht bij Lobith, en indeling in drie vakken.



Figuur 2 Ligging tweede suppletie (doorgetrokken zwarte lijn) ten opzichte van de eerste (zwarte stippellijn) en ligging (globaal) van de vaste laag bij Spijk (grijs polygoon).

## 1.4 Doelstellingen van de eindevaluatie

Deze eindevaluatie van de suppleties in de Boven-Rijn moet inzichtelijk maken welk effect met suppletie kan worden bereikt, welke neveneffecten daarbij ontwikkelen en wat van de proef geleerd kan worden voor nieuwe suppleties in de Boven-Rijn of in andere trajecten.

Daarbij moeten de volgende vragen worden beantwoord:

- hoe en met welke afwegingen de suppleties in 2016 en 2019 zijn ontworpen en gemonitord;
- hoe en met welke afwegingen beide suppleties zijn uitgevoerd en wat daarvan geleerd kan worden;
- welke effecten door de suppleties zijn ontwikkeld en wat nog kan worden verwacht;
- wat de impact van c) is voor de rivierfuncties;
- wat hiervan geleerd kan worden voor ontwerp, uitvoering en monitoring van nieuwe suppleties, ook in andere trajecten van de Rijntakken.

## 1.5 Leeswijzer

De afwegingen voor het ontwerp en monitoring van de suppleties (vraag a) zijn, samen met een overzicht van de beschikbare monitoringsgegevens en reeds uitgevoerde studies,

beschreven in het eerste deelrapport van deze eindevaluatie (Becker et al., 2023). Hetzelfde geldt voor de antwoord op vraag c). Dit deelrapport gaat over vraag d), de impact van de suppleties op de rivierfuncties. Vragen b) en e) worden in een volgend rapport, het hoofdrapport, beantwoord.

Dit rapport presenteert de invloed van de suppleties op:

- de hoogwaterveiligheid (hoofdstuk 2),
- het gebruik van de vaarweg (hoofdstuk 3),
- vaargeulonderhoud en MGDs (hoofdstuk 4) en
- de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen (hoofdstuk 5).

Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

Voor Hoofdstuk 3 over het gebruik van de vaarweg is door 2 deskundigen bij het MARIN een kwaliteitsborging uitgevoerd.

## 2 Hoogwaterveiligheid

### 2.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk wordt beantwoord is:

*Hoe beïnvloeden de suppleties de rivierfunctie hoogwaterveiligheid?*

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

1. Wat is de invloed van de suppleties op de waterstanden bij hoogwater?
2. Hoe verloopt het waterstandseffect in de tijd, en welke invloed is in de toekomst nog te verwachten?

Voor de suppleties is in de voorbereidingsfase van de aanleg besloten hoe om te gaan met de eisen aan de hoogwaterveiligheid. De overwegingen zijn beschreven in paragraaf 2.2. In voorliggend rapport wordt op basis van de na afloop van de monitoringsperiode verzamelde informatie en inzichten geëvalueerd wat de invloed op de hoogwaterveiligheid geweest is. De aanpak daarvoor staat beschreven in paragraaf 2.3 en de resultaten in paragraaf 2.4.

### 2.2 Overwegingen wat betreft hoogwaterveiligheid vóór aanleg van de suppleties

De suppletie behoeft geen formele vergunning in het kader van de Waterwet, aangezien de suppletie op Duits grondgebied wordt uitgevoerd. Vanuit de zorgplicht is het effect op hoogwaterveiligheid wel overwogen en inzichtelijk gemaakt.

Voor aanleg van de eerste suppletie in 2016 is daarom besloten om de hoogwaterveiligheid te garanderen door te waarborgen dat het gemiddelde bodemniveau binnen de contouren van het stortgebied het gemiddelde bodemniveau van oktober 2002, dat is de referentiebodempligging in de hoogwatermodellen van het WT12006, niet overschrijdt (Sieben, 2013).

Vanuit de zorgplicht is besloten om de effecten ten gevolge van de 2019 suppletie inzichtelijk te maken volgens de Waterwet procedure (IJmker et al., 2018 en Tuijnder, 2018). Deze procedure geldt voor aanpassingen in de rivier waarbij volgens het Rivierkundig Beoordelingskader (RBK) versie 5.0 (Rijkswaterstaat, 2019) aangetoond moet worden dat in de as van de rivier geen waterstandsverhoging van meer dan 1 mm wordt veroorzaakt bij de hoogwaterreferentie. Daarnaast moet de waterstandsverhoging langs de primaire kering bij de hoogwaterreferentie inzichtelijk worden gemaakt. Voor de Rijntakken wordt op dit moment een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s gehanteerd als hoogwaterreferentie. De invloed van de tweede suppletie is onderzocht met behulp van een officiële modelschematisatie van RWS, voor deze maatregel was een 5<sup>e</sup> generatie schematisatie in WAQUA van toepassing.

Voor de tweede suppletie in 2019 is in de voorbereidingsfase daarom wel gerekend en bepaald in hoeverre deze een negatief effect op de hoogwaterveiligheid heeft.

De berekende verhoging van hoogwaterstanden (max. 1 cm langs de as van de rivier, zie paragraaf 2.4.2 voor meer detail) is geaccepteerd, vanuit de verwachting dat het gestorte sediment zich door het systeem verspreidt, de verhoging van de bodempligging en daarmee van de waterstanden is dus tijdelijk.

## 2.3 Aanpak evaluatie

Omdat de invloed van de suppleties op de hoogwaterstanden relatief klein en bovendien maar tijdelijk is, is besloten om in deze evaluatie geen aparte modelberekeningen volgens de eisen in het RBK uit te voeren. In plaats daarvan wordt gekeken naar de invloed van de suppleties op waterstanden bij lagere hoogwaters rond de 8.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en worden die op basis van expert judgement vertaald naar de hoogwaterreferentie.

Sinds de aanleg van de suppleties zijn enkele hoogwaters tussen de 6.000 en 8.000 m<sup>3</sup>/s opgetreden. De analyse van waterstandsgegevens in Becker et al. (2023) heeft echter laten zien dat op basis van de meetgegevens geen eenduidige conclusie over het waterstandseffect getrokken kan worden. Dit komt vanwege de kleine invloed van de suppleties op waterstanden in verhouding tot de grote variatie in de meetgegevens. Daarom wordt voor de analyse van de invloed op de hoogwaterveiligheid teruggevallen op de berekeningen met het morfologische model (Becker et al., 2023), dat ook voor de beoordeling van de effecten op andere rivierfuncties in dit rapport is gebruikt. Bijkomende voordelen van het gebruik van de modelresultaten zijn dat 1) de invloed van de suppleties geïsoleerd kan worden van overige ontwikkelingen op het suppletietraject door de berekeningen met en zonder suppleties te vergelijken, en 2) er een voorspelling van de ontwikkeling van het waterstandseffect in de toekomst gemaakt kan worden.

## 2.4 Invloed op de waterstanden bij hoogwater (in ruimte en tijd)

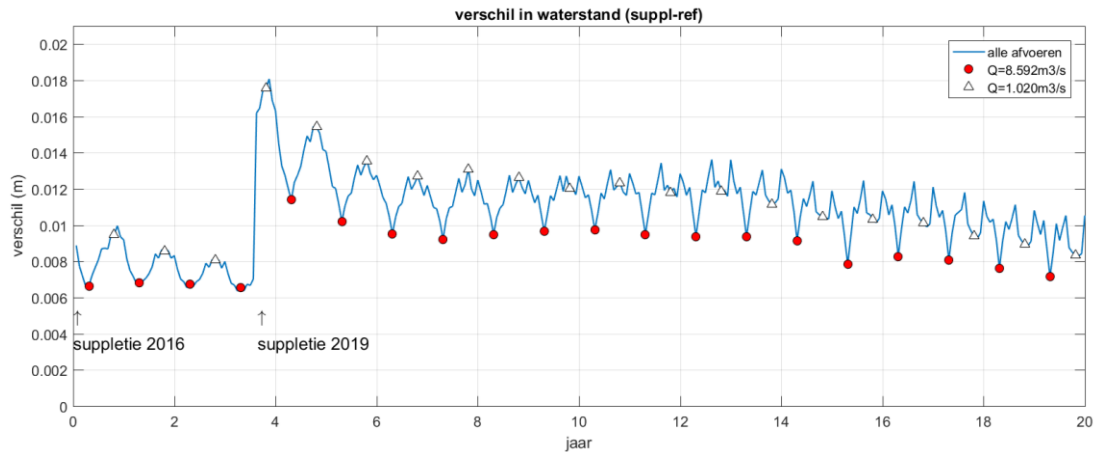
### 2.4.1 Berekend effect van de suppleties op waterstanden bij lagere hoogwaters

Het waterstandseffect van de suppleties is bepaald als het verschil in waterstand tussen de modelberekeningen met en zonder suppletie. Figuur 3 toont het verloop van dat verschil in de tijd voor rkm 862,3 op de rivieras. Dat is net bovenstrooms van de tweede suppletie, waar het maximale effect op de waterstanden wordt verwacht<sup>1</sup>. Bij de hoogste doorgerekende afvoer, 8.592 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, is het waterstandseffect na aanleg van de eerste suppletie orde 7 mm, na aanleg van de tweede suppletie komen er nog ongeveer 6 mm bij. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de hoogste afvoer niet direct na aanbrengen van de suppleties doorgerekend wordt. De suppleties zijn dus al iets afgevlakt bij de eerste hoge afvoer. Direct na aanbrengen zou het waterstandseffect iets hoger liggen (ongeveer 7 mm voor de eerste suppletie, en daar nog ongeveer 8 mm bovenop voor de tweede).

Het opstuwende effect van de suppleties werkt door naar bovenstrooms, bij de Rijnbrug bij Emmerich (rkm 853) is nog ongeveer de helft van het effect zichtbaar.

---

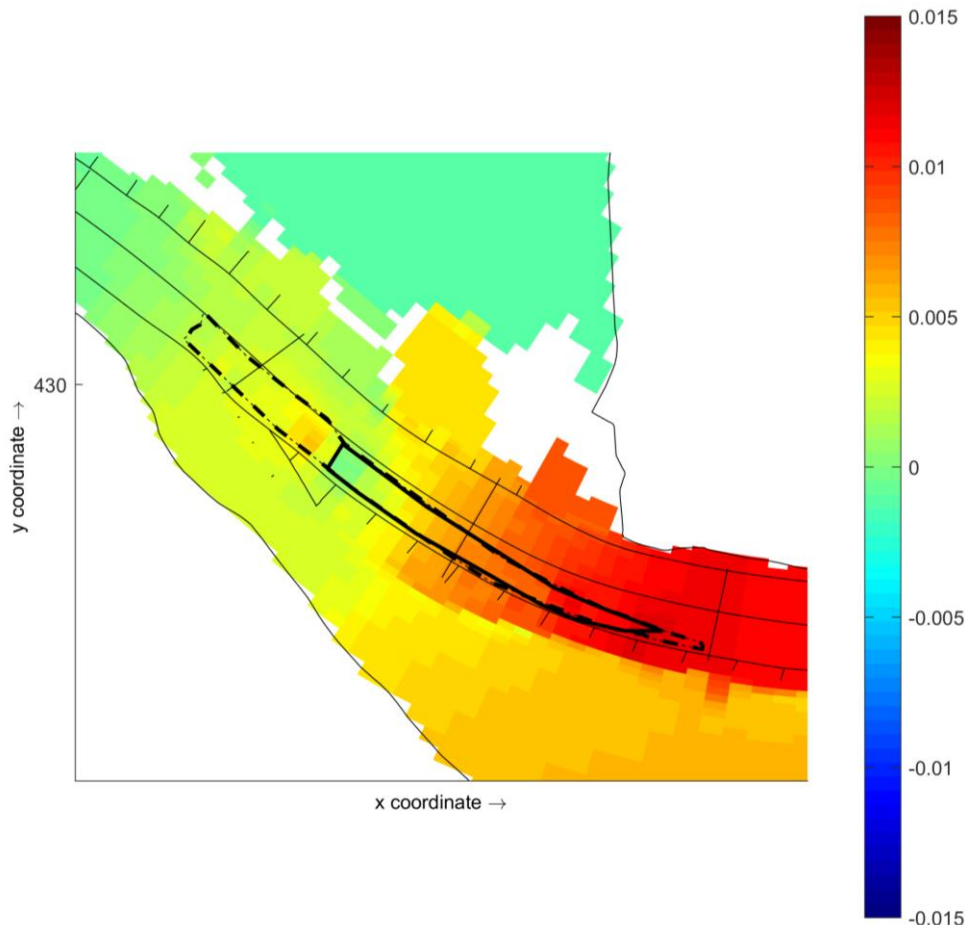
<sup>1</sup> Om precies te zijn wordt het maximale effect verwacht links van de rivieras, op de bovenstroomse rand van de tweede suppletie, maar het RBK schrijft voor om het effect op de rivieras te beoordelen. N.B.: Het verschil in waterstand wordt veroorzaakt door opstuwning vanwege de suppletie plus het verschil in de bodemligging, die door de invloed van de suppleties in de berekening met suppleties anders ontwikkelt dan in de berekening zonder.



Figuur 3 Verloop van het verschil in waterstand tussen de berekeningen met en zonder suppleties in de tijd voor rkm 862,3 op de rivieras (berekeningen van 20 jaar). De blauwe lijn toont de resultaten voor de hele afvoerhydrograaf, de rode stippen geven de momenten van de hoogste doorgerekende afvoer ( $Q = 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$ ) aan, de witte driehoeken de momenten van de laagste doorgerekende afvoer ( $Q = 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$ ). De pijltjes geven aan op welk moment de suppleties worden aangebracht in de berekening.

Figuur 3 geeft aan dat het afvlakken van het waterstandseffect in het model zeer langzaam gaat. De vergelijking van modelresultaten met bodempeilingen heeft laten zien dat de suppletie in het model iets sneller afvlakt dan in werkelijkheid. Dit is echter sterk afhankelijk van de stromingscondities. In jaren met hoogwater zal dit sneller gaan dan in jaren met alleen lagere afvoeren. Voor het verloop in tijd kan daarom alleen de grove schatting gegeven worden dat het waterstandseffect nog orde 10-20 jaren zichtbaar zal zijn, maar continu zal afnemen.

Figuur 4 toont het waterstandsverschil tussen de berekeningen met en zonder suppleties aan het einde van de eerste rekenstap met de hoogste doorgerekende afvoer na aanbrengen van de tweede suppletie (dus na ca. 3,7 jaar in de berekening) op een kaart. Het grootste effect van ruim 1 cm wordt bereikt aan de bovenstroomse punt van de suppletie 2019. Langs de bandijk aan de rechterkant wordt de waterstand met maximaal 1 cm verhoogd, aan de linkerkant zijn dat 5-8 mm (bij rkm 857, niet in de figuur te zien).



Figuur 4 Kaart van het waterstandsverschil aan het einde van de eerste rekenstap met een afvoer van 8.592 m<sup>3</sup>/s na aanleg van de tweede suppletie in het morfologische model. Doorgetrokken zwarte lijn: tweede suppletie, zwarte stippellijn: eerste suppletie.

#### 2.4.2 Vertaling waterstandseffect naar de hoogwaterreferentie ( $Q_{\text{Lobith}} = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Figuur 3 geeft ook aan dat het waterstandseffect bij hogere afvoeren enkele millimeters kleiner is dan bij lage afvoeren. Dit is naar verwachting. Een extrapolatie naar de hoogwaterreferentie moet dus een nog lager waterstandseffect leveren dan bij de afvoeren uit paragraaf 2.4.1.

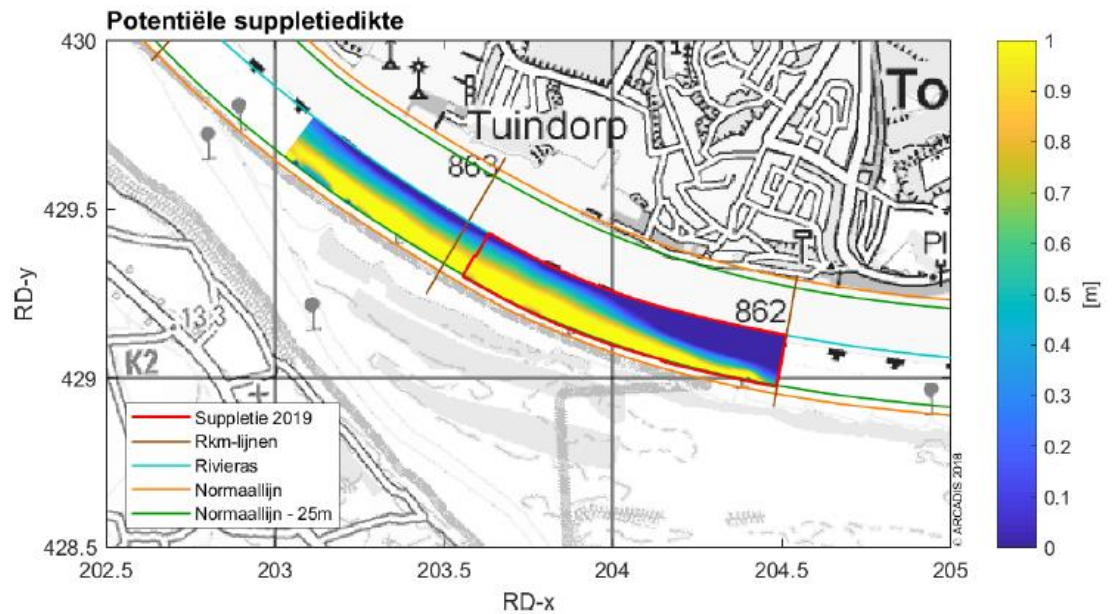
Tuijnder (2018) heeft in de voorbereidingsfase van de tweede suppletie het waterstandseffect van een potentiële suppletie, die het geometrische ontwerp exact volgt, onderzocht met het officiële modelinstrumentarium en voor de hoogwaterreferentie. De maximale waterstandsverhoging direct na aanleg van deze potentiële suppletie 2019 bedroeg in zijn berekeningen 1 cm op de rivieras, bij het bovenstroomse einde van de suppletie, voor enkel de tweede suppletie<sup>2</sup>. De potentiële suppletie in het model was echter korter en dikker dan de daadwerkelijk aangelegde suppletie (vergelijk Figuur 5 met Figuur 6), en uiteindelijk is in 2019 minder materiaal aangebracht in de rivier (55.000 m<sup>3</sup> in werkelijkheid tegenover 70.000 m<sup>3</sup> in de berekeningen van Tuijnder, 2018). Een waterstandseffect van maximaal 1,5 cm bij de hoogwaterreferentie, direct na aanleg van de tweede suppletie en voor beide suppleties samen, lijkt daarom een realistische schatting.

<sup>2</sup> De eerste suppletie was in de berekeningen van Tuijnder al verwerkt in de bodem van de referentie.

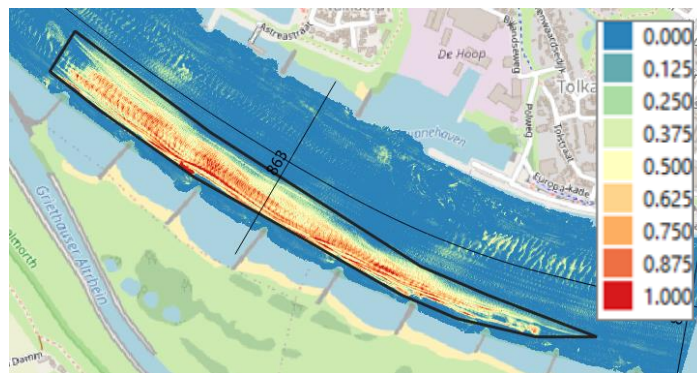


De berekeningen van Tuijnder (2018) lieten zien dat een steiler uiteinde van de suppletie resulteert in een grotere benedenstroomse dip in het waterstandseffect, waardoor de opstuwung bovenstrooms enkele mm naar beneden getrokken kan worden. Dit geldt voor suppleties met een duidelijke front benedenstrooms en is mogelijk interessant voor de dimensionering van toekomstige suppleties.

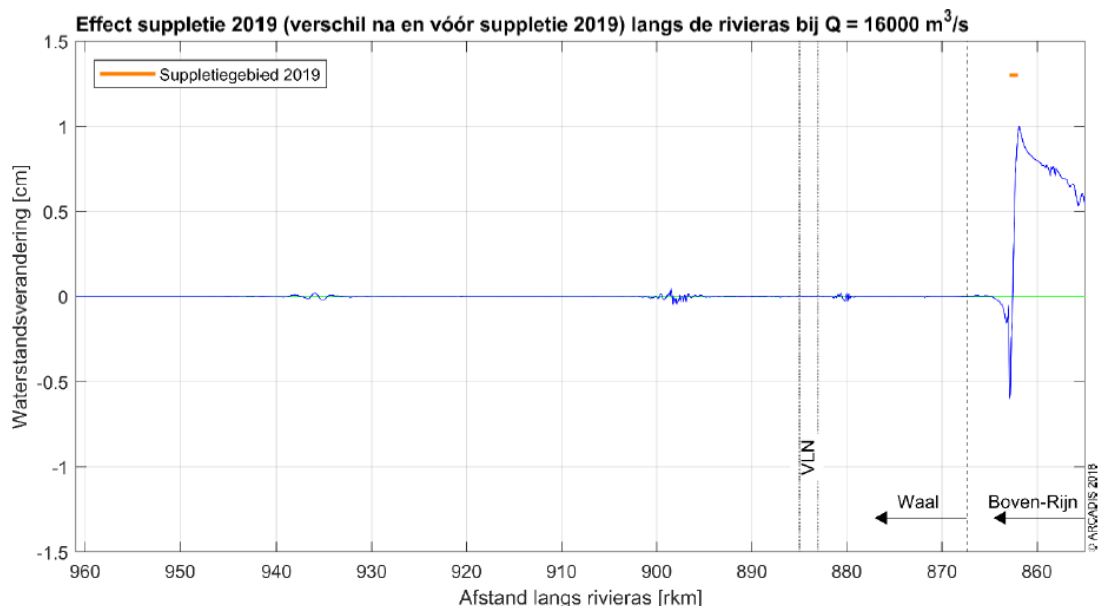
Verder benedenstrooms heeft de suppletie 2019 volgens de berekeningen van Tuijnder (2018) geen invloed op de waterstanden en daarmee ook niet op de afvoerverdeling over het splitsingspunt (Figuur 7).



Figuur 5 Locatie (rood polygoon) en dikte van de potentiële suppletie in het model van Tuijnder (2018) (uit: Tuijnder, 2018).



Figuur 6 Locatie (zwart polygoon) en dikte van de daadwerkelijk aangelegde suppletie in 2019.



Figuur 7 Door Tuijnder (2018) berekende verandering in de hoogwaterstand langs de rivieras van de Boven-Rijn en Waal tussen de situatie in 2019 vóór en de situatie direct na de (potentiele) suppletie. Positieve waarden duiden op hogere waterstanden in de situatie na de suppletie dan voor de suppletie. VLN = vaste laag bij Nijmegen. Bron: Tuijnder (2018).

## 2.5 Conclusies

Op basis van modelberekeningen wordt geconcludeerd dat beide suppleties (aangelegd in 2016 en 2019) afzonderlijk voor een opstuwung van iets minder dan 1 cm op de as van de rivier zorgen direct na aanleg en bij een hoogwaterafvoer van orde 8.500 m<sup>3</sup>/s te Lobith. Samen hebben ze een waterstandseffect van maximaal iets minder dan 2 cm bij deze afvoer. Bij maatgevende afvoercondities zal dit effect kleiner zijn, de schatting is maximaal 1,5 cm op de as van de rivier. Dit effect neemt zeer langzaam af, het zal naar verwachting nog 10-20 jaar vanaf heden zichtbaar zijn.

Direct bovenstrooms van de suppleties, aan de linkerkant van de rivier, is het waterstandseffect nog enkele mm groter dan op de as. Langs de bandijken is de opstuwung maximaal 1 cm.

## 3 Gebruik van de vaarweg

### 3.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk wordt beantwoord is:

*Hoe beïnvloeden de suppleties het gebruik van de vaarweg?*

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

Ten aanzien van veranderde vaarwegcondities:

- Hoe verandert de verwachte minimale diepte van de vaargeul als gevolg van de suppleties (toets op de CCR-norm van 2,80m waterdiepte bij OLR<sup>3</sup> zoals beschreven in het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019))? (Zie §3.2)
- Hoe veranderen de dwarsstroomsnelheid en langsstroomsnelheid door de suppleties, en geeft dit hinder voor de scheepvaart? (Zie §3.3)
- Hoe wordt de invloed van de suppleties op de vaarweg ervaren door schippers (aan de hand van interviews met schippers die Rijkswaterstaat heeft afgenomen)? (Zie §3.4)

Ten aanzien van het gebruik van de vaarweg door de scheepvaart:

- Wat is het vaargedrag van schepen voor, tijdens en na de suppleties (beeld aan de hand van historische data)? Is een invloed van de suppleties zichtbaar? Met betrekking tot vaargedrag worden de volgende aspecten beschouwd:
  - de ruimtelijke verdeling van de schepen over de breedte van de rivier (zie §3.5), en
  - de reistijd van de schepen (zie §3.6).

Voor de volledigheid wordt nog vermeld dat de suppleties plaatsvonden in de diepe buitenbocht, en dat door de suppleties de bodem omhoog is gebracht tot een niveau ruimschoots onder OLR minus 2,80 m, de norm voor de scheepvaart. De verondieping als zodanig creëert ter plaatse dus geen dieptebeperking voor de scheepvaart.

### 3.2 Minimale diepte in de vaargeul

#### 3.2.1 Aanpak

Voor het beoordelen van de rivierfunctie scheepvaart wordt, conform het Rivierkundig Beoordelingskader (Rijkswaterstaat, 2019), naar de ontwikkeling van de waterdiepte in de vaargeul gekeken bij OLR. In dit Beoordelingskader wordt gesteld dat, vanwege een vlot en veilig vaarweggebruik, ingrepen in de rivier er niet toe mogen leiden dat de bodem in de vaargeul in de toekomst hoger komt te liggen dan het niveau "OLR minus de gegarandeerde waterdiepte". Voor het interessegebied, de Boven-Rijn/Waal, is deze gegarandeerde, minimale waterdiepte onder OLR gelijk aan 2,80 m. Op plaatsen waar de bodem nu al hoger ligt dan dit niveau mag de waterdiepte door ingrepen/maatregelen niet verder afnemen.

Als onderdeel van de studie zijn Delft3D-berekeningen uitgevoerd met en zonder suppleties op de Boven-Rijn om de langjarige (neven)effecten van de suppleties in beeld te brengen (Becker et al., 2023).

---

<sup>3</sup> Overeengekomen Lage Rivierstand, de waterstand die hoort bij een Overeengekomen Lage Afvoer van 1.020 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

De simulaties zijn te onderscheiden in een hindcast en een prognose voor de komende 20 jaar. Door verschillende modelaannames en uitgangspunten (Becker et al., 2023) is de prognose van de toekomstige ontwikkeling in waterdiepte bij OLR, zoals berekend met Delft3D, in absolute zin niet direct bruikbaar, omdat (1) de bodem in het model lager ligt dan in werkelijkheid en (2) de berekende (toekomstige) OLR afwijkt van de beleidsmatige, internationaal vastgestelde (toekomstige) OLR. Het advies is om de resultaten van het model te gebruiken door relatieve verschillen (tussen scenario's of ontwikkeling in de tijd) te beschouwen.

Een eventueel effect op bestaande knelpunten, of het ontstaan van nieuwe knelpunten, is daarom niet bepaald door rechtstreeks de waterdiepte bij OLR uit het model te gebruiken (minder geschikt), maar door de gemodelleerde bodemstijging te vergelijken met de waterdiepte bij OLR, die is afgeleid van metingen (waterdieptekaart RWS Oost-Nederland (Jans, 2018)). De berekende ontwikkeling in waterdiepte over de tijd (dus los van OLR) is ook beschouwd.

Voor het beoordelen van de toekomstige minimale diepte zijn dus de volgende aspecten beschouwd:

- 1 Verwachte ontwikkeling van de kleinste waterdiepte in de vaargeul voor de komende 20 jaar,
- 2 Verwachte maximale bodemstijging als gevolg van de suppleties in ruimte en tijd (de komende 20 jaar), welke wordt vergeleken met de werkelijke, gemeten waterdiepte bij OLR. De bodemstijging als gevolg van de suppleties is bepaald door de simulaties met en zonder suppleties op elk moment van elkaar af te trekken. De beoordeling van de modelprestatie aan de hand van gemeten bodemliggingen door Becker et al. (2023) heeft laten zien dat dit een goed beeld geeft van de invloed van de suppleties op de bodemligging.

### 3.2.2 Resultaten

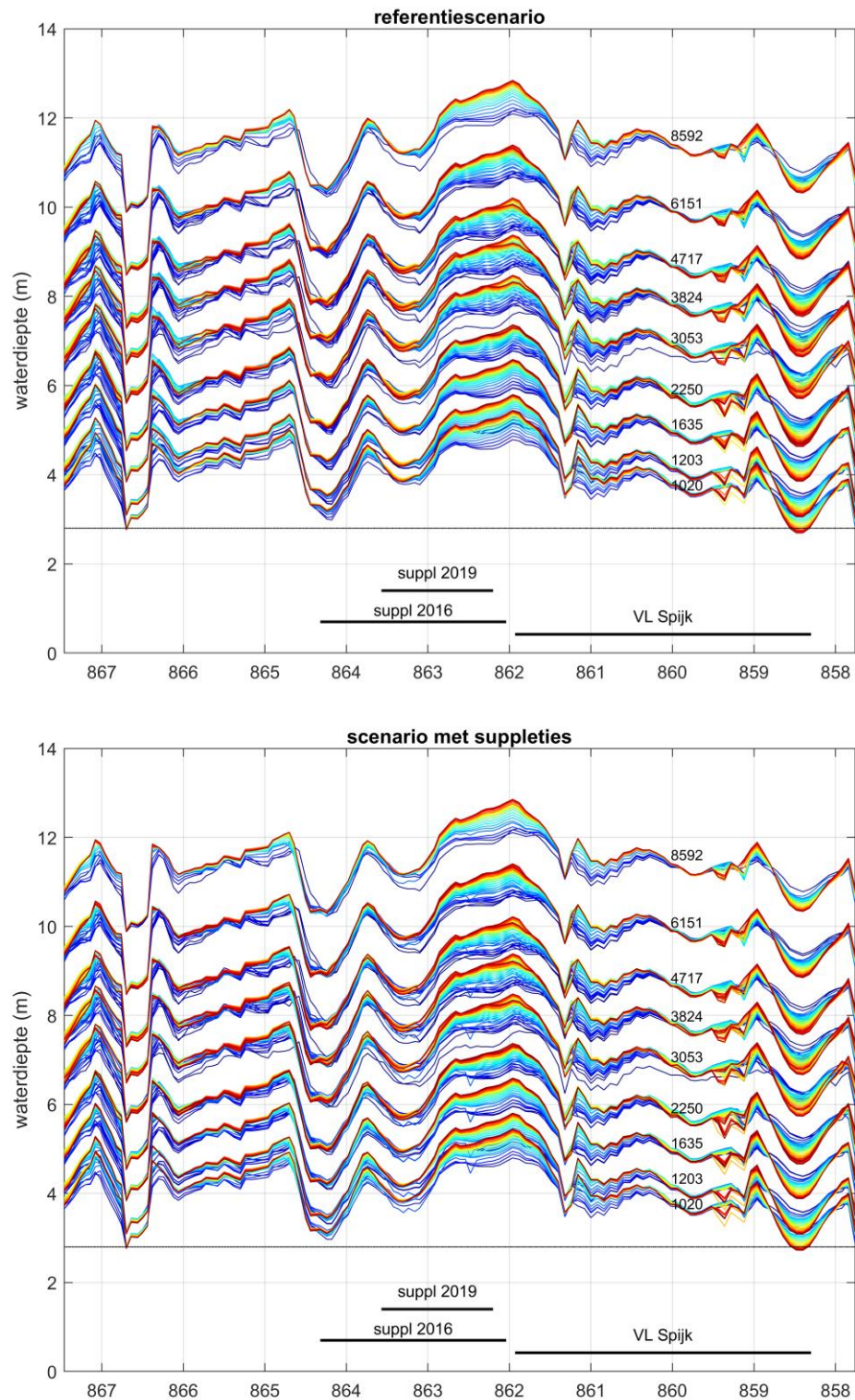
Figuur 8 geeft voor zowel het referentiescenario als het scenario met suppleties voor ieder dwarsprofiel uit het rekenrooster (ongeveer iedere 100 m een dwarsprofiel, aangezien de rekencellen zo lang zijn) de prognose in kleinste waterdiepte binnen de vaargeul weer voor de komende 20 jaar. Figuur 9 toont het verschil tussen beide scenario's en Figuur 10 toont voor enkele afvoerniveaus beide scenario's bij elkaar geplote. Uit de figuren kan worden vastgesteld dat:

- er zich in het interessegebied drie kritische locaties bevinden, waar de waterdiepte de norm nadert of zelfs net onderschrijft, namelijk nabij rivierkilometers 858,5; 864,1 en 866,5. Deze locaties worden in Rijkswaterstaat (2021) ook aangemerkt als meest ondiepe delen van de vaarweg (MODV); een afname van de waterdiepte in de "meest ondiepe delen van de hoofdvaarweg" is ongewenst want dit heeft een negatieve invloed op de doelstelling van vlot en veilig scheepvaartverkeer in het hoofdvaarwegennet.
- de waterdiepte in de toekomst volgens de prognoseberekening bij die locaties beperkt verandert als gevolg van de uitgevoerde suppleties.
- er geen kritische locaties bij komen als gevolg van de uitgevoerde suppleties.

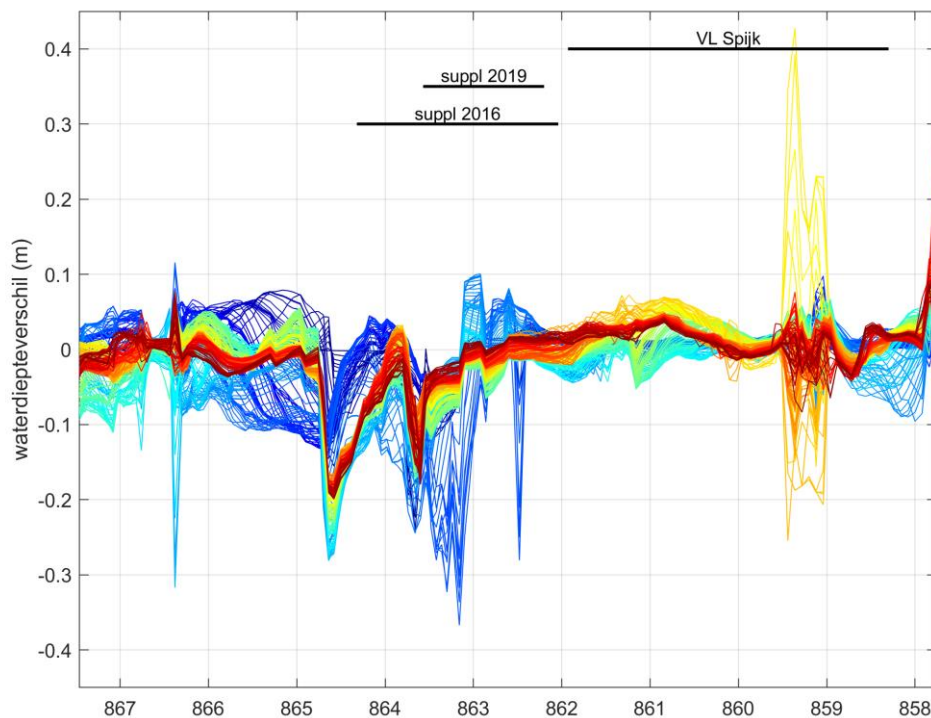
De voor de evaluatie relevante genoemde kritische ondieptes in de vaargeul benedenstrooms van de uitgevoerde suppleties (rkm 864,1 aan de rechterzijde en 866,5 aan de linkerzijde) zijn duidelijk terug te zien in de tweedimensionale (2D), van metingen afgeleide, waterdieptekaart (Figuur 11a).

De ondiepte rondom rkm 858,5 aan de linkerzijde is overigens niet meer zo prominent aanwezig, getuige ook de ééndimensionale dieptefiguren (Figuur 8) en de analyse van bodempeilingen in Becker et al. (2023); dit knelpunt is minder geworden door de aanleg van de vaste laag bij Spijk (de 2D waterdieptekaart is gebaseerd op oudere data).

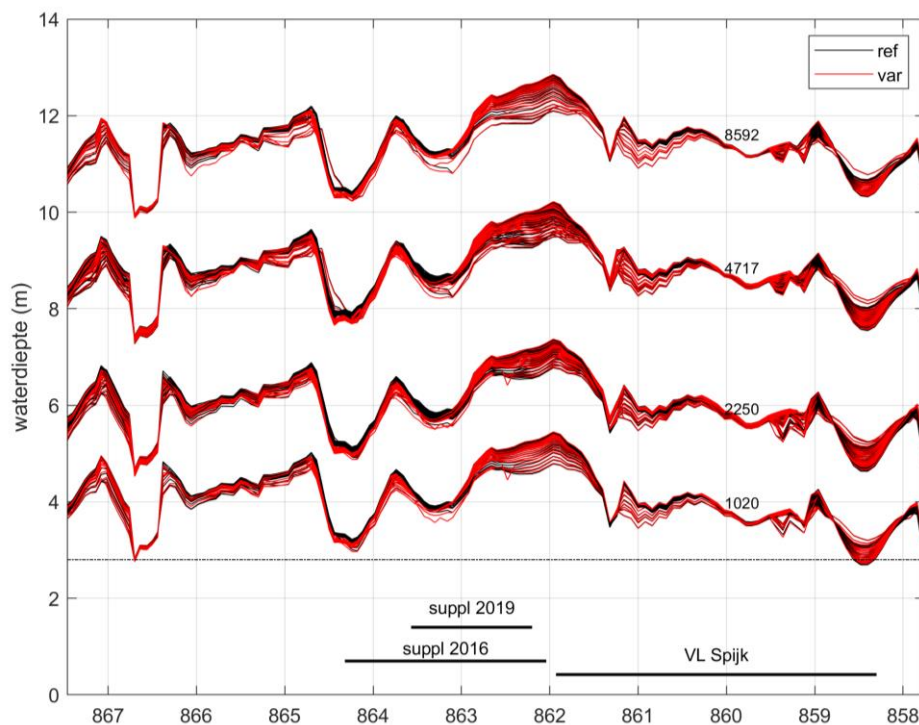
De maximale relatieve bodemstijging door de uitgevoerde suppleties gedurende de simulatieperiode van 20 jaar is weergegeven in Figuur 11b. Door de maximale bodemstijging te vergelijken met (op te tellen bij) de van metingen afgeleide waterdiepte bij OLR kan worden geconcludeerd dat ermee rekening moet worden gehouden dat de bestaande knelpunten, die nu al de norm onderschrijden, in de toekomst kritischer worden als gevolg van de uitgevoerde suppleties. Voor het knelpunt bij rkm 864,1 bedraagt die extra verondieping maximaal ordegrootte 25 à 30 cm, en bij rkm 866,5 ordegrootte 5 à 10 cm. Het eerstgenoemde diepteknelpunt bij rkm 864,1 is een aandachtspunt, omdat deze locatie samenvalt met de relatief plaatsvaste aanzanding als gevolg van de suppleties, die in de bodempeilingen is vastgesteld (Figuur 11c en Becker et al., 2023). De berekende verondieping bij rkm 864,1 is consistent met de verondieping die in de peilingen wordt gezien (Becker et al., 2023). De verondieping bij het knelpunt bij rkm 866,5 is door Becker et al. (2023) niet aan de hand van metingen vastgesteld. In het model treedt deze verondieping echter pas ongeveer 6 jaar na aanleg van de eerste suppletie op, dat valt net buiten de periode waarvoor bodempeilingen beschikbaar waren in de analyse van Becker et al. (2023). Wel is in de beschikbare peilingen te zien dat de bodem op deze locatie na hoogwaters (bijvoorbeeld die van 2018 en 2021) tijdelijk 10-20 cm omhoog komt. Daarbij is echter geen verband met de suppleties te leggen.



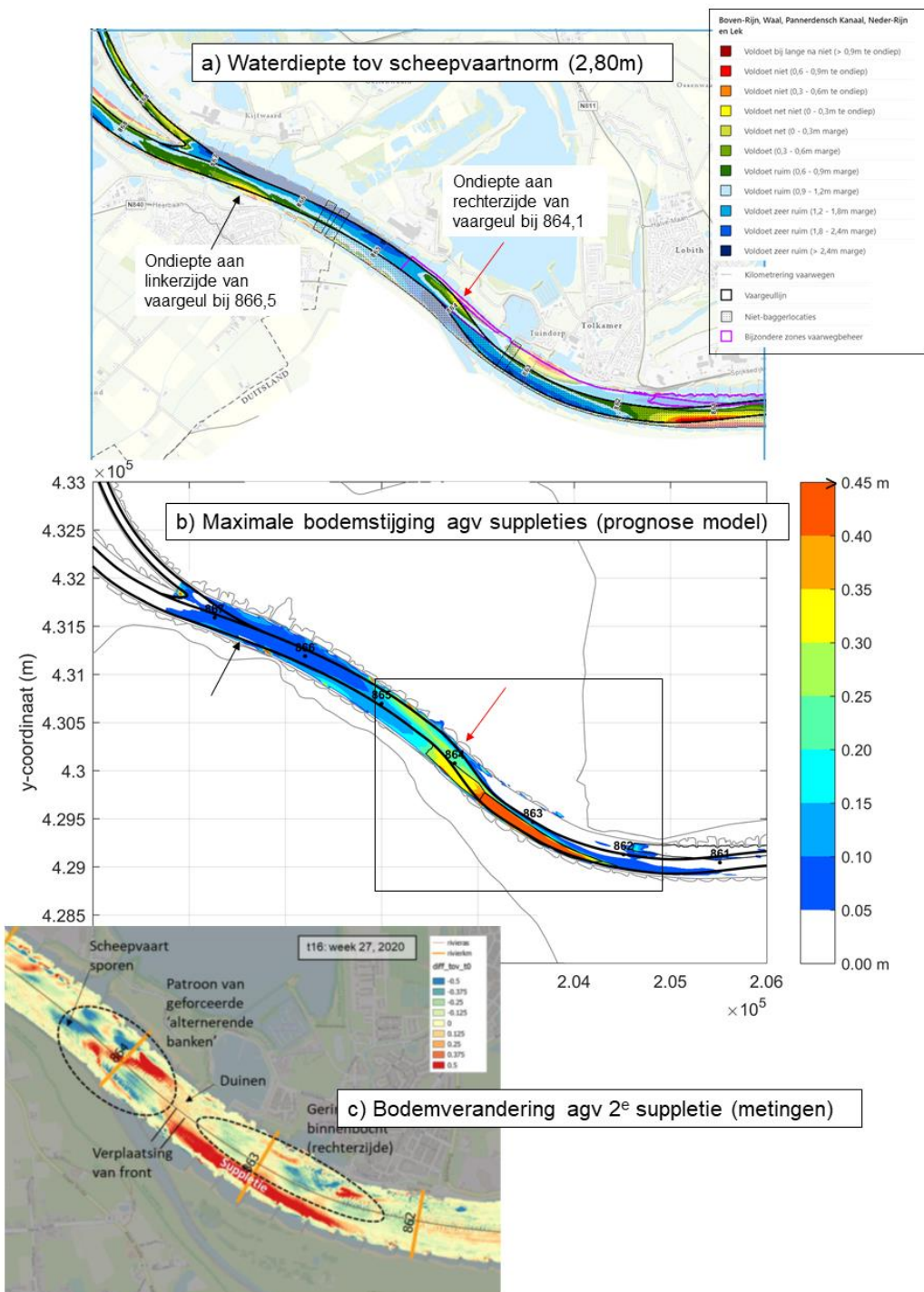
*Figuur 8 Kleinste waterdiepte per dwarsraai als functie van de rivierkilometer voor het referentiescenario (boven) en het scenario met suppleties (onder) voor de verschillende afvoerniveaus uit het model. Bij ieder afvoerniveau zijn 20 jaren simulatie weergegeven. De bundel lijnen onderin komt overeen met de laagst doorgerekende Lobith-afvoer (1020 m<sup>3</sup>/s); hoe hoger de afvoer des te groter de waterdiepte. De kleuren geven het verloop over de tijd weer: blauw aan het begin van de simulatie (jaar 1), verlopend naar groen, geel en rood aan het einde van de simulatie (jaar 20). De horizontale lijn geeft de streefwaterdiepte van 2,8 m bij OLR weer.*



Figuur 9 Verschil in kleinste waterdiepte per dwarsraai als functie van de rivierkilometer tussen het scenario met suppleties (Figuur 8, onder) en het referentiescenario (Figuur 8, boven). De kleuren geven het verloop over de tijd weer: blauw aan het begin van de simulatie (jaar 1), verlopend naar groen, geel en rood aan het einde van de simulatie (jaar 20). Alle afvoerniveaus uit de berekening zijn meegenomen in dit figuur.



Figuur 10 Kleinste waterdiepte per dwarsraai als functie van de rivierkilometer voor het referentiescenario en het scenario met suppleties voor enkele afvoerniveaus uit het model. Gelijk aan Figuur 8, maar beide scenario's in 1 figuur geplot en slechts voor 4 in plaats van 9 afvoerniveaus.



Figuur 11 a) Waterdieptekaart RWS Oost-Nederland (Jans, 2018). Deze kaart is gemaakt op basis van een reeks aan historische bodempeilingen van 1999 t/m 2012 (de suppleties en vaste laag bij Spijk zitten hier dus niet in). b) Maximale bodemstijging ten gevolge van de suppleties binnen een simulatieperiode van 20 jaar. Het oranje gebied is betreft de suppletielocatie. c) Bodemverandering als gevolg van de 2<sup>e</sup> suppletie, verschil in bodemligging tussen maart 2019 (voor de 2<sup>e</sup> suppletie) en juli 2020 (na suppletie en hoogwaterperiode).



## 3.3 Langs- en dwarsstroomsnelheden

### 3.3.1 Aanpak

Onderdeel van de evaluatie van de suppleties Boven-Rijn is het onderzoeken van de verandering in stroomsnelheden rondom de suppletie. De functie scheepvaart kan hinder ondervinden als de dwarsstroming op de rand van de vaarweg toeneemt. Binnen de evaluatie van de langsdammen is de dwarsstroming ook geanalyseerd (Van der Mark en Van der Wijk, 2021). In dit project is de analyse op vergelijkbare manier uitgevoerd. De belangrijkste punten uit de methodiek worden hier herhaald. Daarnaast wordt er gekeken of er in de vaargeul veranderingen in de stroompatronen ontstaan als gevolg van de suppletie.

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 voorspelbaarheid van de baan van het schip en kunnen leiden tot gevaarlijke situaties doordat schepen onverwacht 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 m<sup>3</sup>/s (bij een lager debiet is een dwarsstroming van maximaal 0,30 m/s acceptabel; veelal is het debiet hoger dan 50 m<sup>3</sup>/s). Deze absolute dwarsstroming moet worden bepaald op de bakelijijn in de rivier, omdat deze meestal de rand van de bevaarbare rivier aangeeft. Bij extreme Boven-Rijn afvoeren is het RBK niet meer van toepassing<sup>4</sup>.

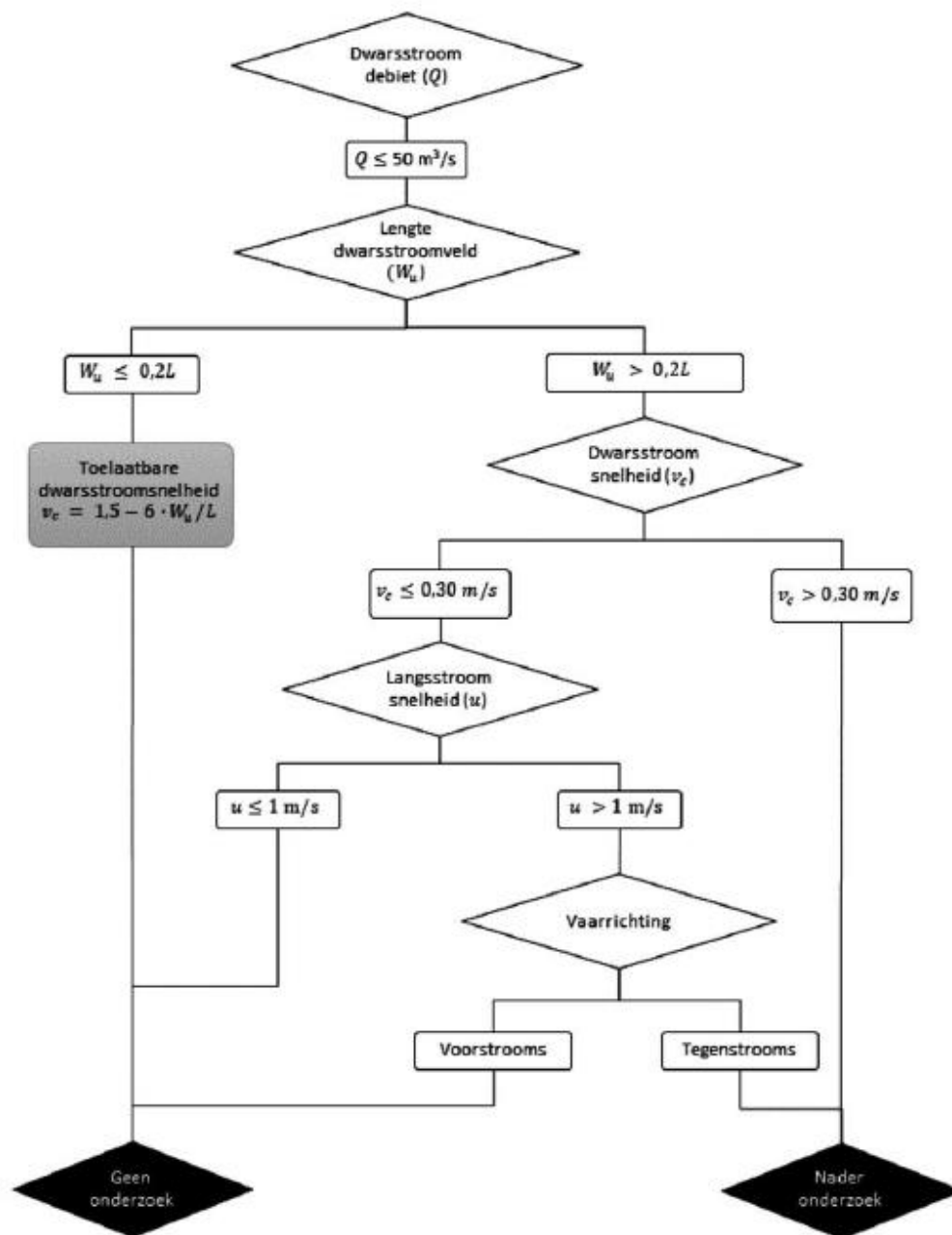
In de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020) wordt de beoordeling van de dwarsstroming nader uitgewerkt met behulp van de langsstroming en scheepslengte (Figuur 12). Daarnaast wordt er een onderscheid gemaakt tussen het voor- en tegenstrooms varen. De aanvullende overwegingen worden meegenomen in de analyse.

Naast de dwarsstroming wordt er gekeken naar de dieptegemiddelde stroming in de Boven-Rijn. Er wordt bekeken of er noemenswaardige verschillen zijn tussen de situatie voor en na de suppletie. De resultaten van dit onderdeel worden ook meegenomen in de beoordeling op basis van de Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020).

Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de berekeningen met het numerieke model, die gerapporteerd zijn in Becker et al. (2023). Er is gebruik gemaakt van de berekeningen met en zonder suppleties. In beide berekeningen is er gekeken naar hetzelfde moment, namelijk direct na (voor verschillende afvoercondities) de suppletie. Er wordt altijd gekeken naar dezelfde hydrodynamische situatie in de twee berekeningen.

---

<sup>4</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s; Bij extreme Boven-Rijn afvoeren is dit beoordelingscriteria niet van toepassing."



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

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

Figuur 12 Stroomschema voor lagere dwarsstroomdebieten (Figuur 3 uit Richtlijnen Vaarwegen 2020).

### 3.3.2 Resultaten dwarsstroming

In Figuur 13, Figuur 14 en Figuur 15 zijn voor drie verschillende afvoerniveaus (laag, gemiddeld, hoog: 1.020, 2.250 en 8.592 m<sup>3</sup>/s) de dwarsstromingen op basis van modelberekeningen weergegeven. Het verschil tussen de afvoerniveaus is beperkt, maar er kan geconcludeerd worden dat voor het afvoerniveau 8.592 m<sup>3</sup>/s de dwarsstroming het hoogste is, met name voor de rechteroever. In de referentie overschrijdt de dwarsstroming op enkele plekken de norm van het RBK van 0,15 m/s (vooral bij de linkeroever). De normering uit de Richtlijn Vaarwegen van 0,30 m/s wordt alleen op de linkeroever overschreden voor de tegenstroomse (opvaart) vaarrichting.

In Figuur 16 is te zien waar de dwarsstroming hoger is dan 0,15 m/s. Bij de linkeroever gaat het om de aanmeerplaats bij de chemische fabriek van Spyck, de samenvloeiing van de Griethauser Altrhein met de Rijn en het veerhoofd van Millingen aan de Rijn. Met name bij een hoge Rijnafvoer zijn er enkele plaatsen op de rechteroever die de norm van 0,15 m/s overschrijden. De pieken in dwarsstroming worden gesimuleerd tussen de overnachtingshaven en de Pannerdensche Kop rondom de kribben. De pieken in dwarsstroming zijn lager op de rechteroever dan de linkeroever en overschrijden nooit de 0,30 m/s.

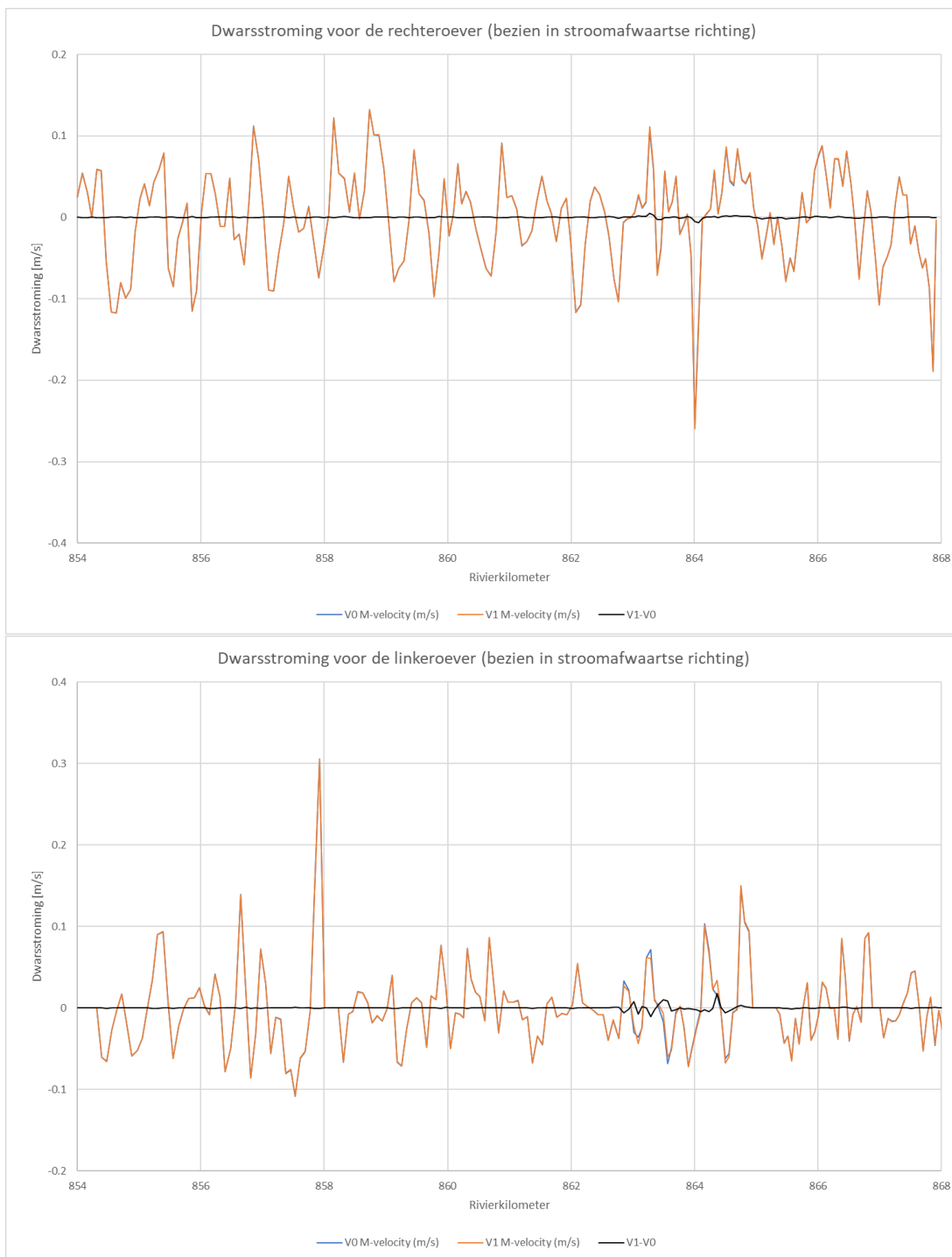
Er zijn slechts zeer geringe verschillen in dwarsstroming *op de bakenlijn* tussen de referentie en de situatie met suppleties. Dit is conform de verwachting dat een suppletie op de bakenlijn geen of amper invloed heeft op de dwarsstroming.

Naast de dwarsstroming op de bakenlijn is er ook gekeken naar de dwarsstroming in de gehele vaargeul. De dwarsstromingen zijn te zien in Figuur 17 en Figuur 18. In deze figuren is zichtbaar dat de dwarsstroming in de vaargeul hoger kan zijn dan op de bakenlijn. Op het eerste oog is er geen verschil in dwarsstroming te zien tussen de situatie met en zonder suppletie. In Figuur 19 is het verschil tussen de situatie met en zonder suppletie getoond. Tussen de simulaties is over een groter deel van het model een verschil zichtbaar, maar deze blijft beperkt tot maximaal  $\pm 0,05$  m/s. De grootste verschillen in dwarsstroming zijn zichtbaar aan rand van de suppletie in het midden van de vaargeul, maar uit de figuren met de absolute dwarsstroming (Figuur 18) blijkt dat de laterale component van de stroming beperkt blijft.

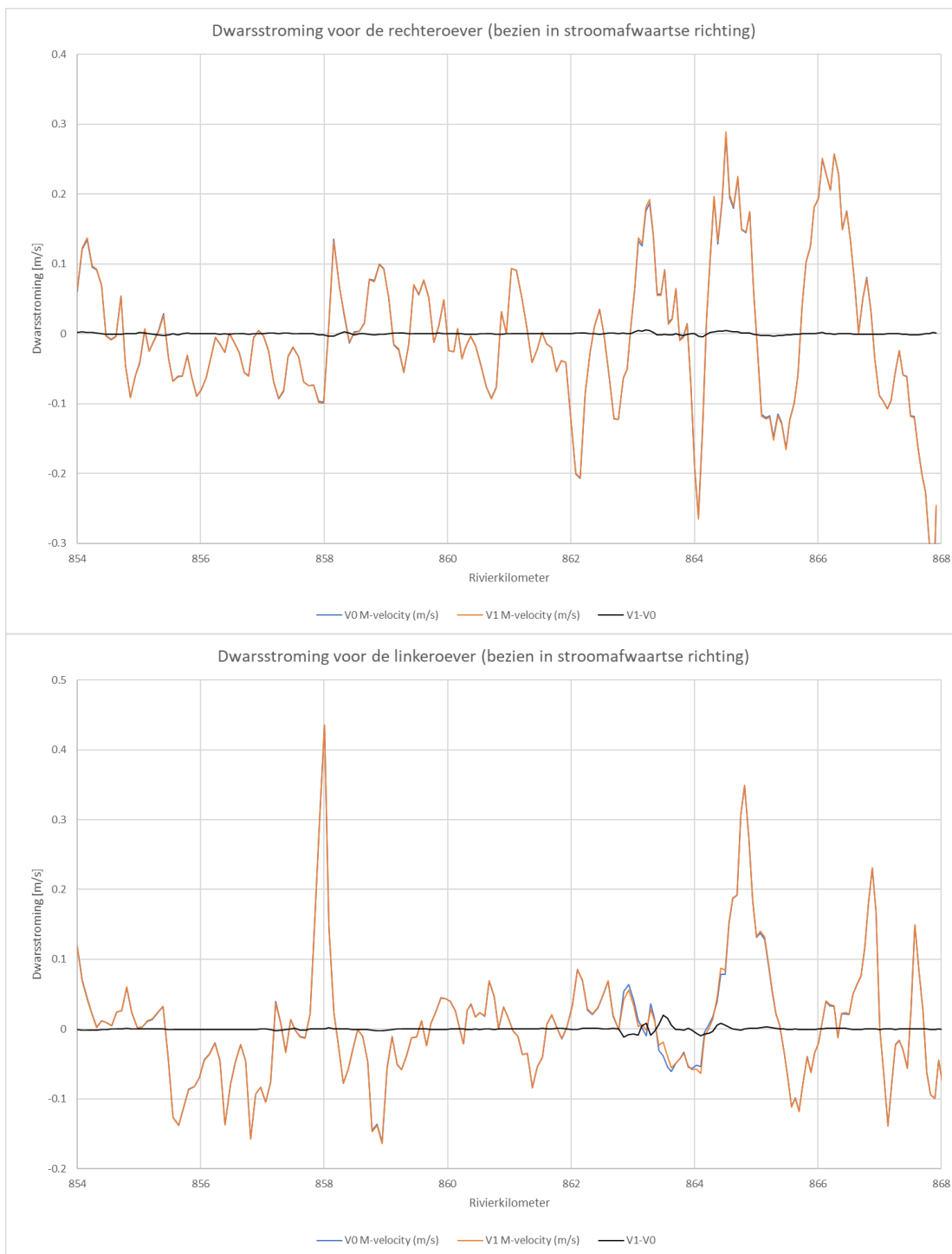
Figuur 19 toont de herverdeling van de stroming die plaatsvindt vanwege de suppleties. Tussen rkm 862 en rkm 862,5 duwen de suppleties de stroming iets meer naar de rechterkant van de rivier dan in de situatie zonder suppleties (blauw-groene kleuren in Figuur 19). De rood-oranje kleuren bij rkm 863,5-864 laten zien dat er bij het benedenstroomse einde van de tweede suppletie de stroming weer terug naar de oorspronkelijke situatie (meer naar links) gaat.



**Figuur 13** Dwarsstroming op de bakenlijn voor de rechteroever (boven) en linkeroever (onder), de blauwe lijn is de situatie zonder suppletie en de oranje lijn is de situatie met suppletie (beide). De zwarte lijn geeft het verschil in dwarsstroming weer. De data zijn afkomstig uit de prognose berekening na een simulatieperiode van 3 jaar (direct na de 2<sup>e</sup> suppletie) voor het afvoerniveau 1.020 m<sup>3</sup>/s.



*Figuur 14 Dwarsstroming op de bakenlijn voor de rechteroever (boven) en linkeroever (onder), de blauwe lijn is de situatie zonder suppletie en de oranje lijn is de situatie met suppletie (beide). De zwarte lijn geeft het verschil in dwarsstroming weer. De data zijn afkomstig uit de prognose berekening na een simulatieperiode van 3 jaar (direct na de 2<sup>e</sup> suppletie) voor het afvoerniveau 2.250 m<sup>3</sup>/s.*



Figuur 15 Dwaarsstroming op de bakelijns voor de rechteroever (boven) en linkeroever (onder), de blauwe lijn is de situatie zonder suppletie en de oranje lijn is de situatie met suppletie (beide). De zwarte lijn geeft het verschil in dwarsstroming weer. De data zijn afkomstig uit de prognose berekening na een simulatieperiode van 3 jaar (direct na de 2<sup>e</sup> suppletie) voor het afvoerniveau 8.592 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 16 Dwarsstroming bij een gemiddelde Rijnafvoer ( $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$ ) voor de situatie zonder suppleties (boven) en met suppleties (onder). Gegevens uit de prognose berekening na een simulatieperiode van 3 jaar (direct na de 2<sup>e</sup> suppletie).



Figuur 17 Dwarsstroming (M-component) voor de referentiesituatie voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s.





Figuur 18 Dwarsstroming (M-component) voor de situatie direct na de suppletie voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 19 Verschil in dwarsstroming (referentie – situatie met suppletie) voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s.

### 3.3.3 Resultaten langsstroming

Uit §7.5.4. van het deelrapport “Data en effecten” (Becker et al., 2023) blijkt dat de suppleties in de modelsimulaties in beperkte mate invloed hebben op de stroming in de vaargeul, het grootste verschil is zichtbaar op het deel lateraal aangrenzend aan de suppletie in de vaargeul. Maar dit verschil in stroming neemt verder van de suppletie sterk af en is vrijwel nihil op de bakelijlijn. De beschouwde verandering in stroomsnelheid is niet de dwarsstroming, maar de netto stroomsnelheid. De longitudinale component van de stroming is in principe vele malen hoger dan de laterale component (1,5 m/s ten opzichte van ~0,1 m/s). Dat betekent dat een verandering van maximaal 0,10 m/s in de vaargeul procentueel leidt tot een beperkt verschil in stroomsnelheid.

In Figuur 20 en Figuur 21 is de stroomsnelheid te zien uit de modelsimulaties voor een gemiddelde afvoer in de referentie en de situatie met suppleties. Figuur 22 toont het verschil tussen beide. Rondom de suppletie zijn verschillen te zien, de stroomsnelheid naast de suppletie is iets hoger (maximaal 0,07 m/s) in de situatie met suppletie vanwege de herverdeling van de stroming, en op de suppletie wordt de stroomsnelheid iets verlaagd.

In Figuur 23 en Figuur 24 zijn de stroomsnelheden voor een hoge afvoer (8.592 m<sup>3</sup>/s) getoond. Logischerwijs is de stroomsnelheid hoger dan voor de situatie met een gemiddelde afvoer. De verschillen in stroomsnelheid tussen de twee situaties zijn vergelijkbaar als voor de gemiddelde afvoer (Figuur 25).

Er kan geconcludeerd worden dat de suppleties een beperkte invloed hebben op de stroomsnelheden in de vaargeul. De suppleties zorgen voor een lagere waterdiepte waardoor de stroomsnelheid toeneemt bij gelijke condities. Als gevolg hiervan kan de weerstand voor de opvaart licht toenemen. Voor de afvaart zal de hogere stroomsnelheid resulteren in een lichte afname in weerstand, al zal de kleinere kielspeling dit deels tegen gaan.



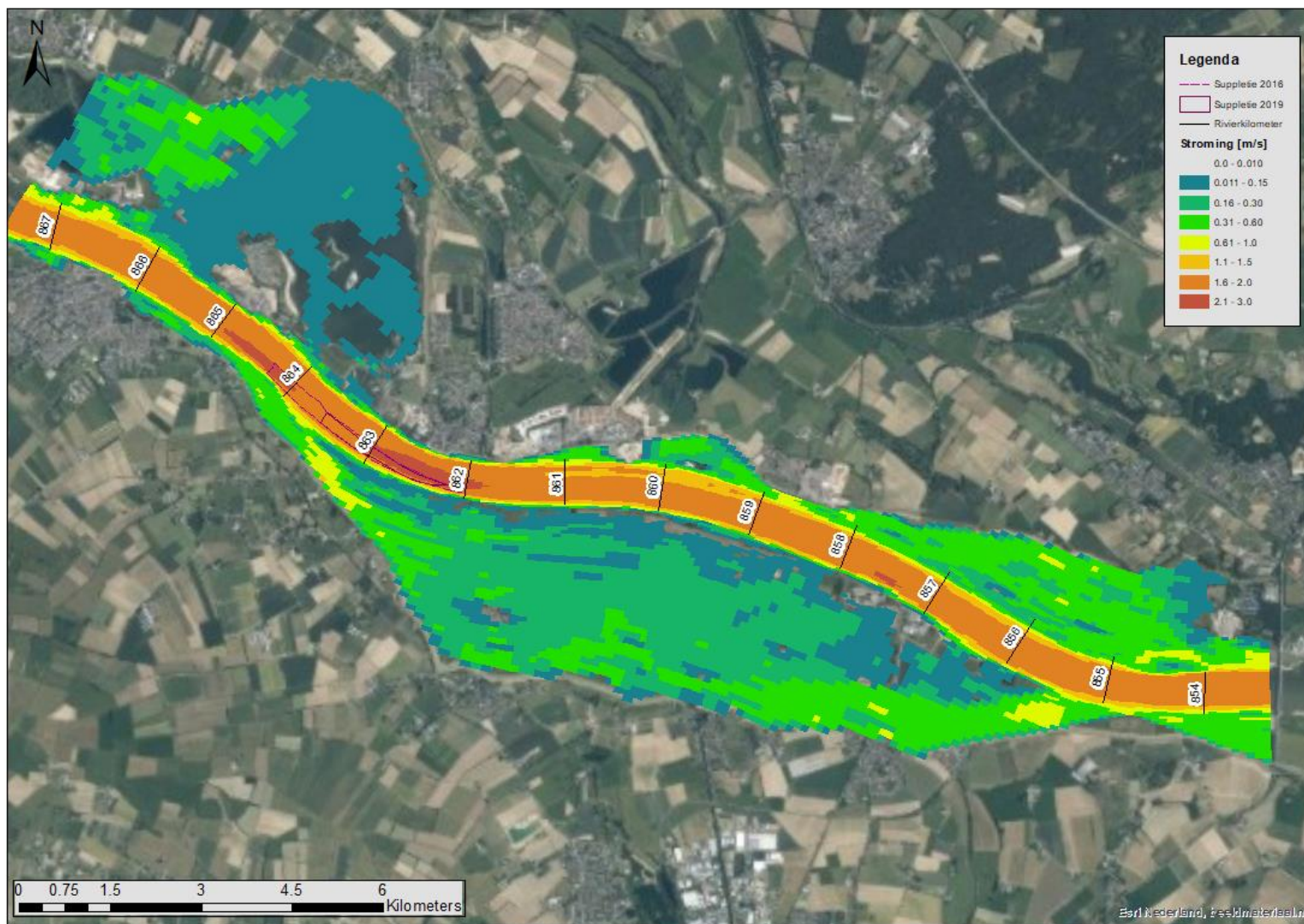
Figuur 20 Stroomsnelheid [m/s] voor de referentiesituatie na 3 jaar voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening.



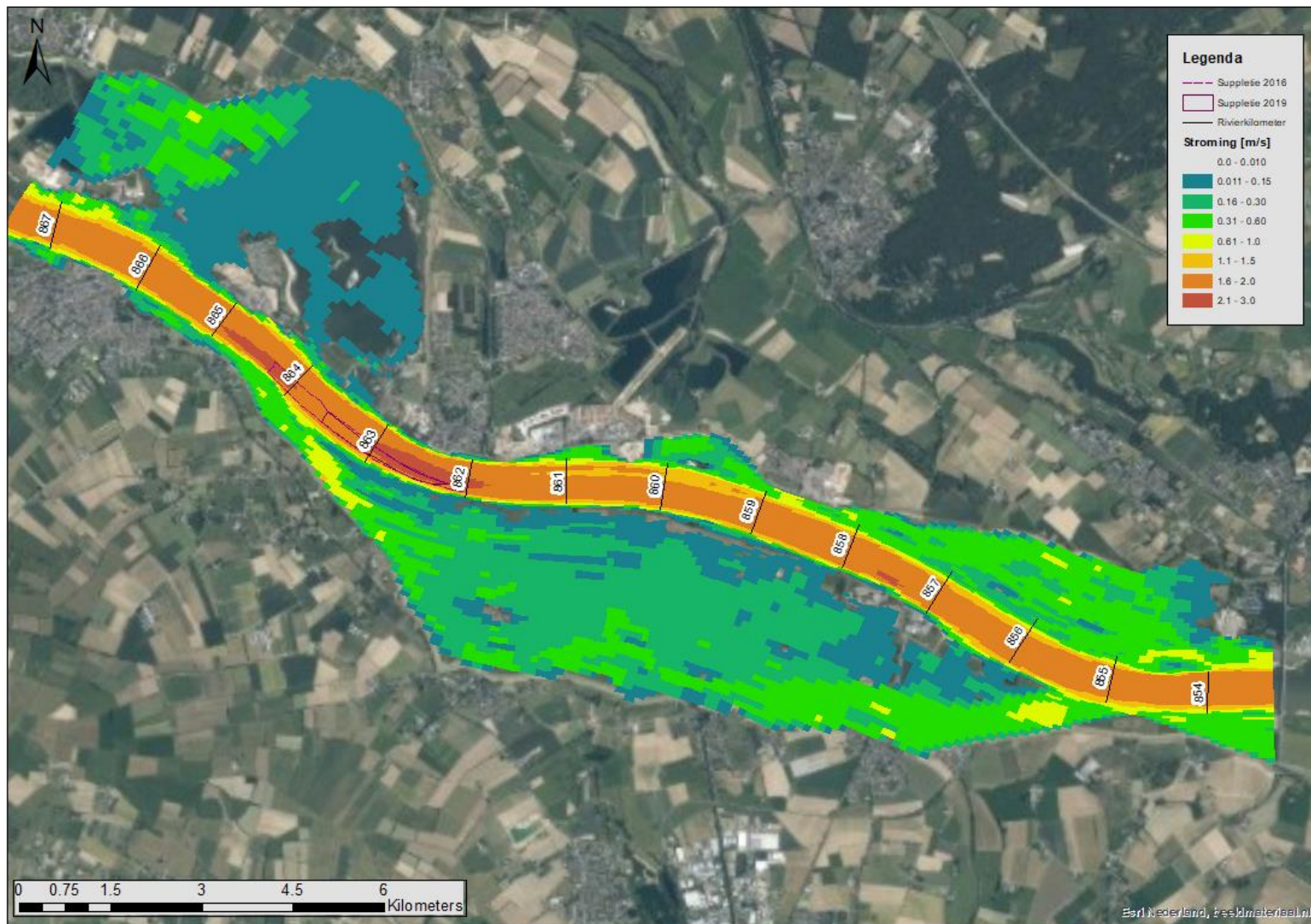
Figuur 21 Stroomsnelheid [m/s] voor de situatie na suppleties na 3 jaar voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening.



Figuur 22 Verschil in stroomsnelheid (referentie – situatie met suppletie) tussen situatie met en zonder suppleties voor een afvoer van 2.250 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening

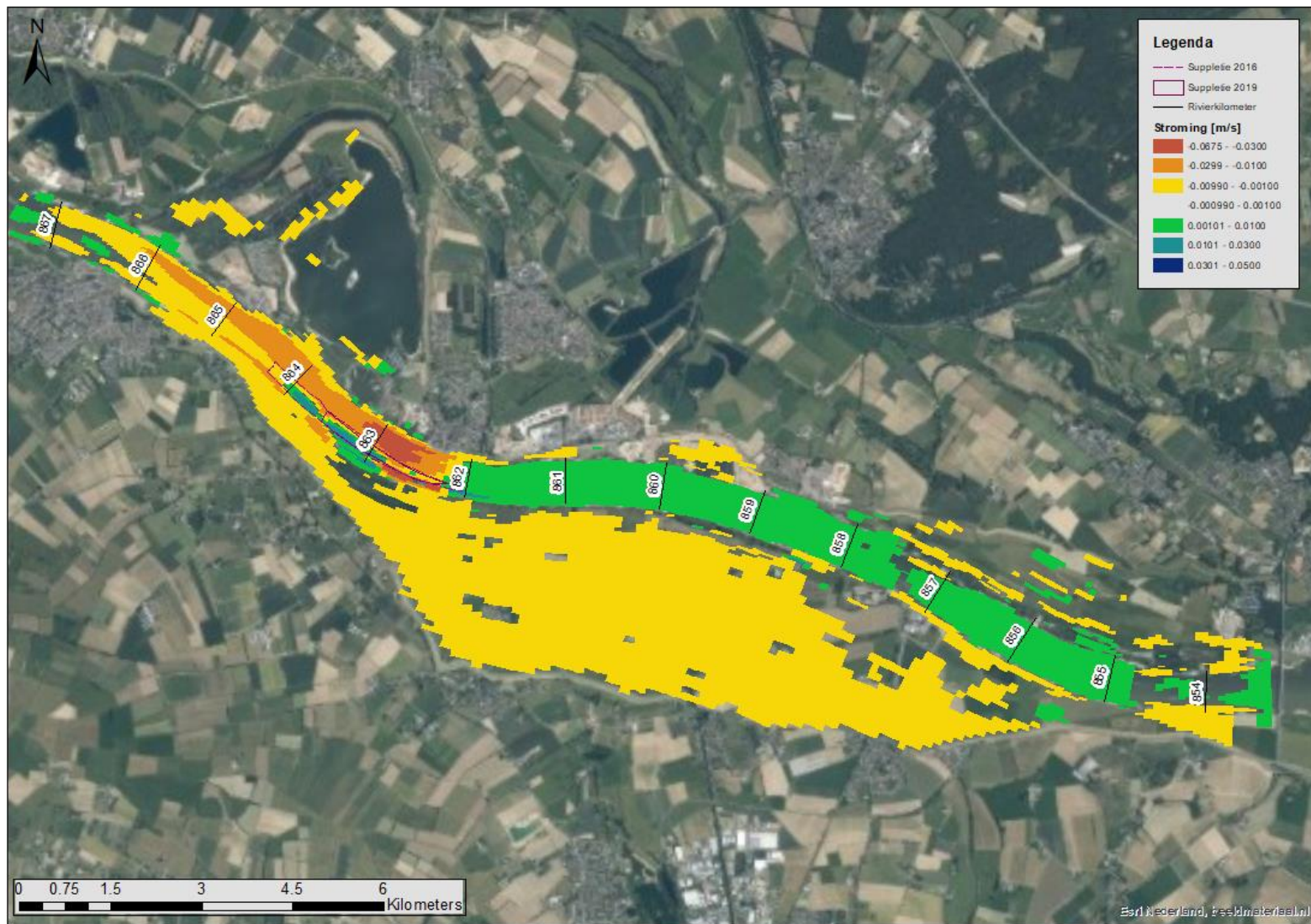


Figuur 23 Stromingsnelheid [m/s] voor de referentiesituatie na 3 jaar voor een afvoer van 8.592 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening.



Figuur 24 Stroomsnelheid [m/s] voor de situatie na suppleties na 3 jaar voor een afvoer van 8.592 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening.





Figuur 25 Verschil in stroomsnelheid (referentie – situatie met suppletie) tussen situatie met en zonder suppleties voor een afvoer van 8.592 m<sup>3</sup>/s uit de prognoseberekening

### 3.3.4 Conclusie

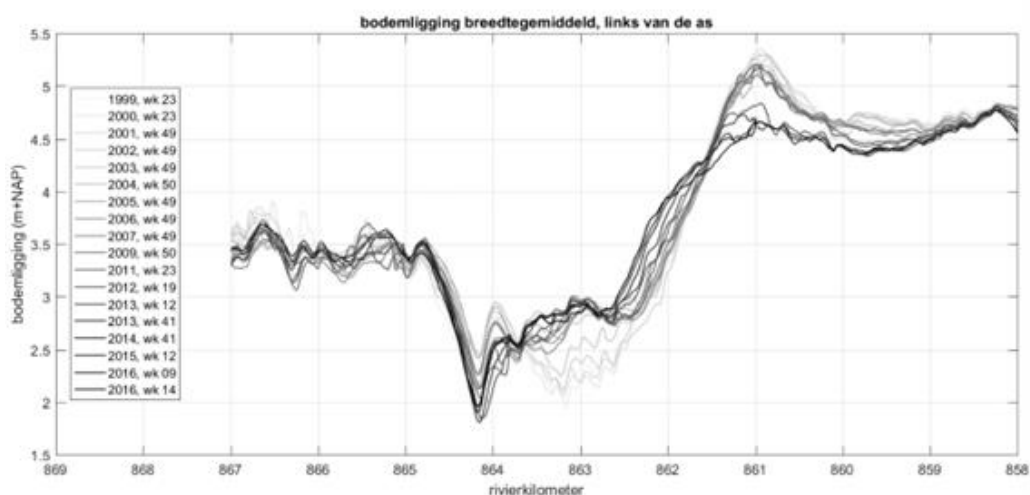
Er zijn slechts zeer geringe verschillen in dwarsstroming op de bakelijns tussen de referentie en de situatie met suppleties. Dit is conform de verwachting dat een suppletie op de bakelijns geen of amper invloed heeft op de dwarsstroming. De suppleties zorgen voor een beperkte toename in stroomsnelheid in de vaargeul. In combinatie met de kleinere kielspeling ter plaatse van de suppletie kan de weerstand licht toenemen voor de opvaart. De afvaart kan een iets geringere weerstand ervaren ter plaatse van de suppletie.

## 3.4 Ervaring van schippers

Rijkswaterstaat heeft interviews met schippers afgenomen om te achterhalen hoe de invloed van de suppleties op de vaarweg wordt ervaren door schippers. De ontvangen gegevens (een A4 met respons op vragen over gasolieverbruik en een bijbehorend spreadsheet met bijgehouden verbruik en vaarsnelheid van 5 reizen op 5 dagen) bieden weinig inzicht in de ervaringen van schippers. Het is onbekend hoeveel schippers bevroegd zijn, het vermoeden bestaat dat de respons van één onderneming/schipper komt.

Er wordt in de respons aangegeven dat niet gezegd kan worden of het gasolieverbruik is toegenomen als gevolg van de suppleties. De spreadsheet biedt inderdaad geen houvast, de reizen zijn allen van na aanleg van de suppleties en bij verschillende waterstanden. Bovendien spelen naast de waterstand meerdere aspecten een rol bij het verbruik, zoals de exacte locatie in de vaargeul, kielspeling, vaarrichting, het vast- of losmaken van de bunkerboot of interactie met andere schepen.

In de respons (januari 2019) wordt wel vermeld dat de snelheid licht afneemt bij rkm 866 en dat het schip (4- of 6-baksduwvaart) onrustig wordt of gaat rammelen bij de overgang van rkm 862 naar 861. Het is niet aannemelijk dat dit veroorzaakt wordt door de suppleties; deze locaties zijn respectievelijk benedenstreams en bovenstreams van de suppletielocatie. Waarschijnlijk wordt de ondiepte rondom rkm 866,5 en de ondiepte met vrij sterke bodemgradiënt bij Spijk (overgang rkm 862 en 861) gevoeld in de opvaart (Figuur 26). De waterstand bij Lobith was gedurende deze periode rond de 9 m+NAP met een korte piek van 11 m+NAP. Voorafgaand aan de suppleties lag de bodem bij km 866,5 ongeveer op 3,75 m + NAP ( $OLR_{2012} - 3,43$  m) en tussen km 862 en 861 op ongeveer 4,6 m + NAP ( $OLR_{2012} - 2,84$  m). Wat bij 9 m + NAP waterstand bij Lobith zou duiden op lichte bodeminvloed ("lichte vertraging en onrust") bij 5,25 m waterdiepte en duidelijke hinderlijke bodeminvloed ("rammelen") bij 4,4 m waterdiepte.



Figuur 26 Bodemligging voorafgaand aan de aanleg van de suppleties, gemiddeld over de linkerhelft van het zomerbed (overgenomen uit Becker et al., 2023).

## 3.5 Ruimtelijke verdeling van de scheepvaart

### 3.5.1 Aanpak

Voor de kwantitatieve analyse naar het gebruik van de vaarweg door de scheepvaart (zowel ruimtelijke verdeling als reistijd in de volgende paragraaf) is door Rijkswaterstaat gekozen om gebruik te maken van CoVadem data, die vanaf 2014 beschikbaar zijn. Hiertoe is besloten, omdat op voorhand de verwachting was dat de invloed van de suppletie op het ruimtelijk gebruik van de vaarweg niet groot was, en dus dat met een eenvoudiger maar mogelijk minder nauwkeurige analyse (CoVadem i.p.v. AIS) kan worden volstaan. Tijdens het langsdammen-evaluatieproject (Indah-Everts & Hermans, 2021) is gebleken dat AIS-data pas vanaf 2018 beschikbaar kon worden gemaakt en dat de tweede helft van 2018 in de AIS-data ontbreekt, wat tevens een reden is om CoVadem data te gebruiken.

CoVadem Services BV<sup>5</sup> creëert en ontwikkelt een meetnetwerk van varende schepen, logt de gemeten waarden (o.a. positie, kielspeling) van die schepen, en biedt na aggregatie en verrijking van die data een actueel en verwacht dieptebeeld van de rivier aan binnenvaartondernemers. Rijkswaterstaat is launching customer van CoVadem, een aantal schepen van RWS maakt deel uit van de vloot. Van der Mark et al. (2014) presenteert een toelichting en validatie van de data. Van der Mark en Lemans (2020) beschrijft het operationele model dat aan de hand van de data en verwachte waterstanden het dieptebeeld bepaalt. In de voorliggende studie worden enkel de positie-gegevens van CoVadem gebruikt (x-y-t data; positie van een schip op een bepaald tijdstip). De door CoVadem van kielspeling afgeleide waterdiepte en bodemligging zijn niet gebruikt. Bodemontwikkeling is in deelrapport 1 (Becker et al., 2023) geanalyseerd met behulp van multibeam bodempeilingen.

In overleg met Rijkswaterstaat is gekomen tot de volgende aanpak:

- Er worden drie trajecten beschouwd. In de eerste plaats het gebied van de suppleties zelf, en tevens een vergelijkbaar gebied zonder bochten in de Midden-Waal, waarmee het ruimtegebruik en reistijd kan worden vergeleken. Daarnaast een scherpe bocht in de Boven-Waal, om inzicht in het vaargedrag te krijgen, aangezien hier ook overwogen wordt een suppletie toe te passen.
  - Traject 1: Boven-Rijn rkm 858-867,
  - Traject 2: Boven-Waal rkm 872-882,
  - Traject 3: Midden-Waal rkm 900-910.
- Er wordt onderscheid gemaakt in 5 verschillende periodes, die als volgt zijn gekozen:
  - Periode 0: Voor suppletie 1 (1 jan 2014 - 31 mrt 2016)
  - Periode 1: Tijdens suppletie 1 (1 apr 2016 - 31 jul 2016)
  - Periode 2: Tussen suppletie 1 en 2 (1 aug 2016 - 23 apr 2019)
  - Periode 3: Tijdens suppletie 2 (24 apr 2019 - 19 aug 2019)
  - Periode 4: Na suppletie 2 (20 aug 2019 - 1 apr 2022)
- De ruimtelijke verdeling voor, tijdens en na de suppleties wordt als volgt gepresenteerd. Voor elke rivierkilometer (en tussen Boven-Rijn-km 862 en km 865 elke 250 m) worden histogrammen van het aantal passerende schepen per segment van 20 m gemaakt voor de periodes voor, tijdens, tussen en na de aanbreng van de suppleties. Daarbij wordt zo mogelijk ook onderscheid gemaakt in scheepstype en vaarrichting (opvaart/afvaart). Als er duidelijke verschillen te herkennen zijn in de histogrammen voor de verschillende periodes duidt dat op een verandering van de ruimtelijke verdeling van de schepen. Als een verandering niet waarneembaar is op het benedenstroomse traject en er zijn geen duidelijke verschillen in vlootsamenstelling of vaarrichting tussen de periodes, dan is de verandering waarschijnlijk toe te schrijven aan de suppleties.

---

<sup>5</sup> [www.covadem.com](http://www.covadem.com)

- Er wordt onderscheid gemaakt in de afvoer, aangezien het ruimtegebruik hierdoor beïnvloed wordt. Bijvoorbeeld bij laagwater varen vrijwel alle schepen binnen de 150 m brede vaargeul, en bij toenemende afvoer wordt een grotere breedte benut (Indah-Everts & Hermans, 2021). Dezelfde indeling in afvoerclassen wordt gehanteerd als in Indah-Everts & Hermans (2021): (1)  $Q \leq 1.020 \text{ m}^3/\text{s}$ , (2)  $1.020 < Q \leq 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , (3)  $1.500 < Q \leq 2.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , (4)  $2.500 < Q \leq 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , (5)  $Q > 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Op voorhand zijn enkele aandachtspunten te plaatsen bij het gebruik van CoVadem-data:

- Er vindt voor deze studie geen validatie<sup>6</sup> plaats van de CoVadem data die hier gebruikt zijn (enkel x-y-t data, de positie van een schip op een bepaald tijdstip). Het heeft geen meerwaarde om te valideren of te filteren op de kielspeling-gegevens in de dataset, aangezien die met andere meetapparatuur worden verkregen (een schip kan een haperend echolood, maar goed functionerend GPS-systeem hebben).
- Ook een goed functionerende GPS kan horizontale afwijkingen in het horizontale vlak van 10-15m vertonen (pers. comm. Michiel Reneerkens). Waar beschikbaar, is de parameter "horizontal dilution of precision" (HDOP), die een indicatie geeft van de nauwkeurigheid van de GPS-bepaling, gebruikt als filter (maximale waarde HDOP = 2,5).
- Een consequentie van de keuze om CoVadem data te gebruiken is dat slechts een subset van de gehele vloot in beschouwing wordt genomen. Strikt genomen kan alleen geconcludeerd worden of een subset representatief is voor de gehele vloot als beide sets met elkaar vergeleken worden; dat vraagt een grondige analyse inclusief AIS-data. Er wordt verondersteld dat het aantal scheepspassages voldoende is om een globale inschatting te krijgen van de ruimtelijke verdeling. Waar mogelijk vergelijken we met de AIS-analyse, die is uitgevoerd voor de evaluatie van de langsdammen (Indah-Everts & Hermans, 2021).
- De CoVadem-box is vooral geïnstalleerd op CEMT-klasse IV schepen en groter en op containerschepen, omdat die vaak zijn uitgerust met een beladingsmeter die nodig is om diepgang en trim van het schip te meten. Hiermee blijft mogelijk onduidelijk of andere typen schepen ander gedrag als gevolg van de suppleties vertonen.
- Op dit moment zijn circa 250 schepen uitgerust met een zogenaamde CoVadem-box, waar dit er in 2014 nog circa 50 waren, en in 2018 circa 80. Dit betekent dat het aantal tracks per dag over de tijd toeneemt en dat de database vóór de suppleties aanzienlijk minder scheepsbewegingen bevat dan erna. Dit beïnvloedt mogelijk de analyse.
- Een volgeladen schip zal eerder hinder ondervinden van een verondieping in de rivier en het vaargedrag aanpassen (bijvoorbeeld een ander pad overwegen) dan een leeg schip. De beladingsgraad maakt echter geen onderdeel uit van de CoVadem-dataset. Het is daarom niet mogelijk om in te zoomen op een subset van schepen waarvan eerder verwacht mag worden dat het gedrag verandert als gevolg van de suppletie. Overigens wordt in Chang (2021) geconcludeerd dat ook de beladingsgraad in de AIS-data niet altijd betrouwbaar is.

Hoewel de data genoemde beperkingen heeft, zal deze een inzicht geven in het ruimtegebruik. Als het beeld bij de suppleties consistent is met de trajecten benedenstrooms, met het gedrag bij verschillende afvoerclassen, tussen de verschillende periodes, en als de vlootsamenstelling niet significant verandert, dan kan wel vastgesteld worden dat de ruimtelijke verdeling niet grootschalig beïnvloed wordt door de suppleties.

---

<sup>6</sup> Het is overigens ook niet mogelijk om een validatie uit te voeren; dit zou moeten gebeuren met AIS-gegevens. Deze zijn deels niet beschikbaar en bovendien is het vanwege privacy waarschijnlijk niet toegestaan deze sets qua posities aan elkaar te koppelen.

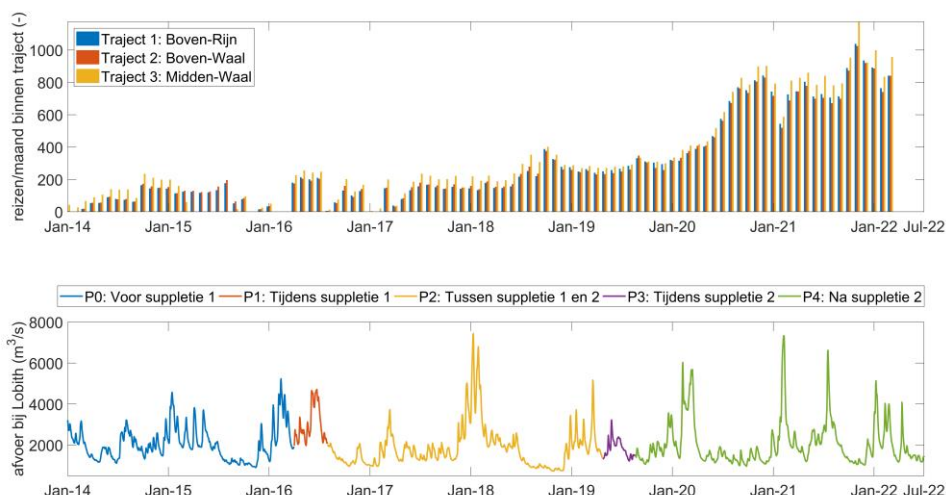
### 3.5.2 Resultaten

De CoVadem data van de drie trajecten zijn geleverd in twee aparte opleveringen:

- Begin 2019 zijn de data van de periode 1 januari 2014 t/m 31 maart 2016 en 1 augustus 2016 t/m 30 september 2018 door CoVadem geleverd aan Rijkswaterstaat (Wirdum, 2019; Niesten, 2019). Deze set bevat x-y-coördinaten en de data zijn voorzien van een zogenaamd tripid; een trip of reis is gedefinieerd als een set meetpunten van hetzelfde schip waar geen tijdsinterval zit groter dan een uur. Wanneer er in de tijdgegevens een sprong zit van meer dan één uur, wordt een nieuwe reis gestart. Hoewel het criterium van één uur tamelijk arbitrair is, blijkt uit eerdere analyses in het verleden en uit een visuele steekproef dat dit goed werkt (Niesten, 2019).
- Ten behoeve van deze eindevaluatie zijn deze data aangevuld tot 1 april 2022 en is tevens het tijdgat in de data gevuld. Deze dataset (1 april 2016 t/m 1 augustus 2016 en 1 oktober 2018 t/m 1 april 2022) is door CoVadem geleverd aan Rijkswaterstaat; op 19 oktober kregen we bericht dat de volledige dataset beschikbaar stond in de Amazon cloud.

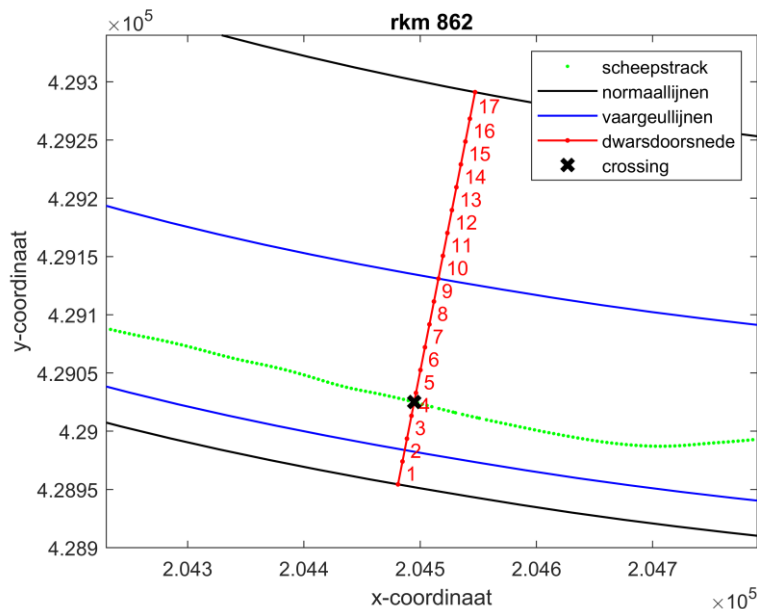
De tweede set bevatte lat-lon coördinaten (geen x-y coördinaten) en geen tripid. Deze zijn toegevoegd op dezelfde wijze als is gedaan bij de eerste levering (Niesten, 2019).

In totaal bevat de dataset per traject rond de 30.000 trips, waarbij er een duidelijke toename in reizen vanaf 2014 tot 2022 te zien is (Figuur 27). Het is onduidelijk waarom van enkele maanden helemaal geen data beschikbaar zijn.



Figuur 27 (boven) Aantal reizen per traject per maand gedurende de beschouwde periode. (onder) Afvoer verloop bij Lobith.

Voor iedere rivierkilometer (en tussen Boven-Rijn-km 862 en km 865 elke 250 m) binnen de drie beschouwde trajecten is een dwarsprofiel opgedeeld in segmenten van 20 m, waarbij de segmenten precies binnen de normaallijnen liggen. Het laatste (noordelijke) segment is iets meer of iets minder dan 20 m, zodat de normaalbreedte precies gevuld is. Vervolgens is voor iedere individuele scheepstrack bepaald waar (door welk segment) deze de dwarsdoorsnede passeert (Figuur 28).



Figuur 28 Voorbeeld van schipstrack die rkm 862 passeert door segment 4. Passagetijd en -locatie is aldus bepaald voor iedere track en iedere dwarsdoorsnede in de beschouwde trajecten.

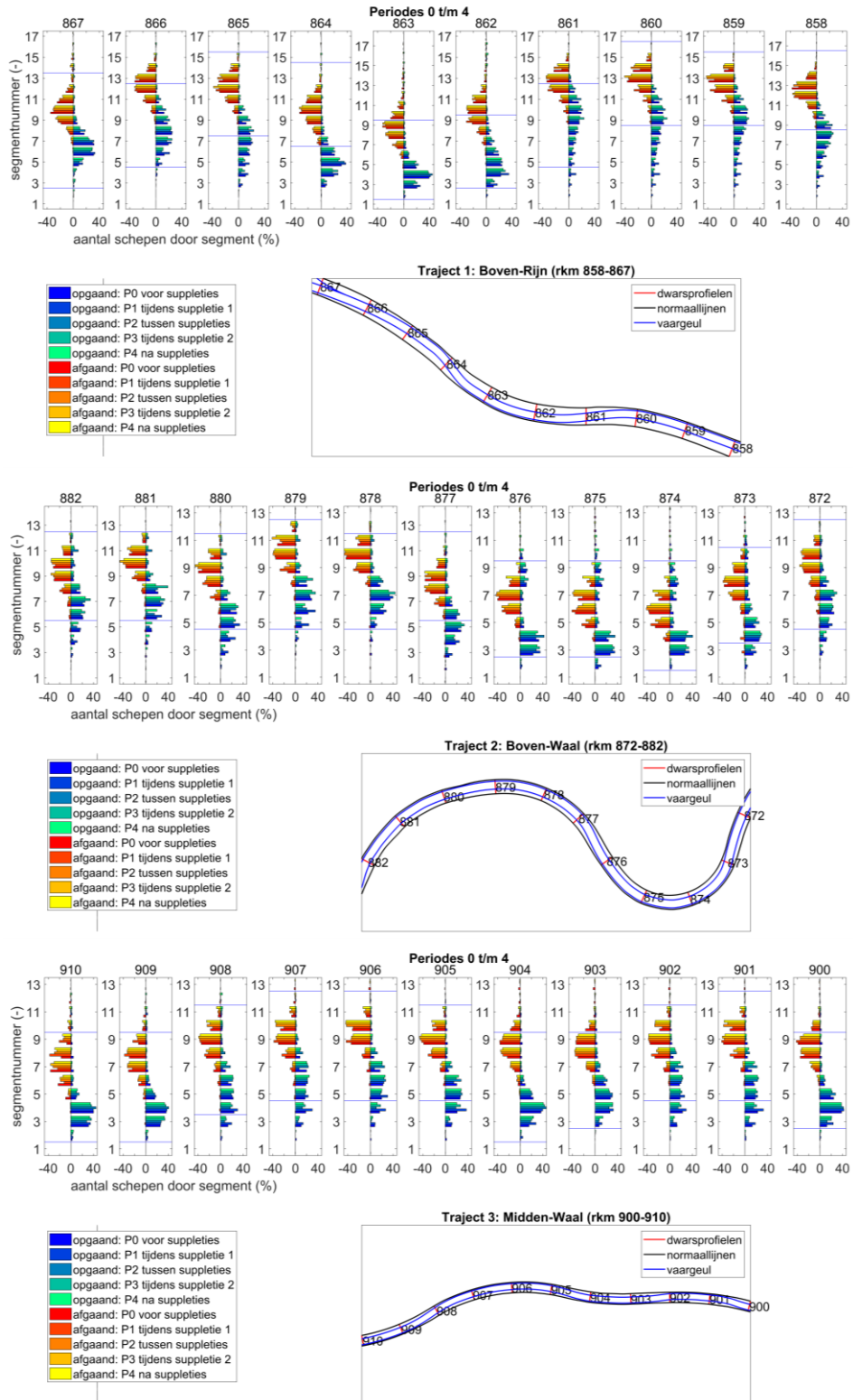
Vervolgens zijn alle doorkruisingen geaggregeerd per traject, periode, afvoerklasse, scheepstype en vaarrichting. De resultaten per rivierkilometer zijn weergegeven in Figuur 29 (en per 250 m in het suppletietraject tussen rkm 862 en 865 in Bijlage A.1). Tevens zijn in de bijlage resultaten opgenomen waarin onderscheid gemaakt wordt tussen afvoerclassen (Bijlage A.2) en scheepstype (Bijlage A.3). Het aantal schepen door een segment is procentueel gepresenteerd ten opzichte van het totaal aantal schepen door het hele dwarsprofiel, aangezien de aantallen niet gelijk zijn per periode. De verdeling over de breedte laat tussen de periodes en tussen Trajecten 1 en 3 een consistent beeld zien. Op de relatief rechte trajecten 1 en 3 (Boven-Rijn en Midden-Waal) houdt het merendeel van de opvaart links aan en de afvaart rechts. Bij hogere afvoer wordt een breder deel van de rivier benut dan bij lagere afvoer. Deze gedragingen werden ook gezien in Indah-Everts & Hermans (2021). Bij de bocht van Erlecom (Traject 2 Boven-Waal) wordt niet altijd de rechteroever aangehouden.

Kleine verschillen tussen de periodes zijn uiteraard te verwachten, enerzijds omdat de afvoeren in de beschouwde periodes en de duur van de periodes verschilt (en daarmee ook het aantal reizen) en anderzijds omdat de CoVadem-vloot groeit in de tijd.

Er is een lichte verandering zichtbaar in de figuur voor opgaande vaart in Periode 1 (tijdens suppletie 1) tussen rkm 858 en 863. In die periode varen relatief meer schepen in de opvaart dichters langs de linkeroever waar de suppletie heeft plaatsgevonden (door segmenten 3-5; buitenbocht) dan in de andere periodes, en daarmee relatief minder schepen door de segmenten 10-12 (in de vaargeul). Deze periode is maar kort, dus enkele schepen die een afwijkende baan kiezen, zijn sneller zichtbaar in de histogrammen. Dit kan een mogelijke verklaring zijn. Uitwijken voor materiaal van de aannemer kan ook een verklaring zijn. Ook speelt een rol dat deze periode enkel reizen bevat bij relatief hoge afvoerclassen, waarbij verder buiten de vaargeul wordt gevaren (Bijlage A.2). Bovendien passeerden in deze periode relatief veel schepen, die door CoVadem aangeduid zijn als type CEMT VIb/VIc/VIIa (Bijlage A.3). Deze types (duwkonvoeien) zijn minimaal 22,8 m breed (Rijkswaterstaat, 2020) en zullen enkel het kortste pad (nabij de oever) kiezen als er geen twijfel bestaat dat de diepte niet toereikend is. Dat deze schepen de locatie van de suppletie passeren duidt erop dat er destijds ter plaatse geen hinder werd verwacht.

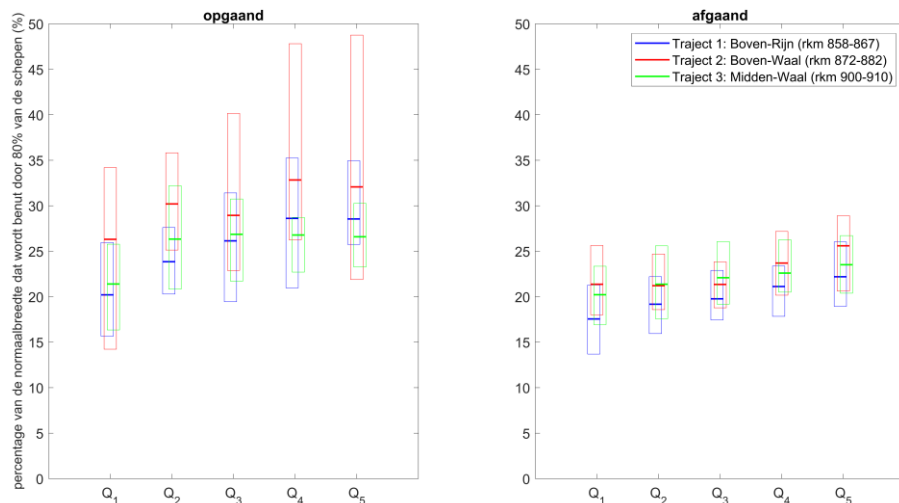
Figuur 30 toont een onderlinge vergelijking in ruimtegebruik tussen de verschillende trajecten. Aangezien er veel variatie is in de data, is een aggregatie via bijvoorbeeld middeling niet altijd zinvol. Het ruimtegebruik neemt toe met toenemende afvoer, is anders voor de opvaart dan voor de afvaart, varieert per rivierkilometer (zoals door bocht aansnijden, harde lagen). Ook is het aantal passerende schepen bij de diverse beschouwde periodes en afvoerclassen niet gelijk (bijvoorbeeld geen laagwater in Periode 1). Uit Figuur 30 kan geconstateerd worden dat de benutting van de vaarweg in Traject 1 vergelijkbaar is met het eveneens relatief rechte Traject 3. In het bochtige Traject 2 wordt meer ruimte gebruikt door de opvaart.

Aan de hand van de data kan geconcludeerd worden dat er geen significante verandering in ruimtebenutting waarneembaar is als gevolg van de suppletie. De beschikbare ruimte wordt in alle periodes goed benut. Voor de toekomst worden geen veranderingen in ruimtegebruik verwacht aangezien het effect van de suppletie op de bodem voor de toekomst niet toeneemt (Becker et al., 2023).



Figuur 29 Ruimtelijke verdeling van de schepen voor de drie trajecten, waarbij onderscheid is gemaakt in de verschillende periodes en opvaart/afvaart. De ligging van de vaargeul is met blauwe lijnen aangegeven in de histogrammen.





*Figuur 30 Benutting van de vaarweg bij de 5 verschillende afvoerclassen voor de 3 trajecten; links: opvaart, rechts: afvaart. Benutting is gedefinieerd als het percentage van de normaalbreedte dat wordt gebruikt door 80% van de passerende schepen. De dikke lijnen representeren de gemiddelde benutting binnen het traject (middeling over de rivierkilometers), de blokken geven de minimale en maximale benutting weer binnen het traject.*

## 3.6 Reistijd van de scheepvaart

### 3.6.1 Aanpak

Voor de bepaling van reistijd wordt eveneens gebruik gemaakt van de CoVadem data. De reistijd is voor iedere individuele scheepstrack bepaald door het verschil te berekenen tussen de tijdstippen waarop de dwarsdoorsneden doorkruist worden aan het begin en einde van het betreffende traject (km 858 en 867 voor Traject 1, km 872 en 882 voor Traject 2 en km 900 en 910 voor Traject 3). De trajecten zijn niet alle drie even lang, en daarom is vervolgens de reistijd per kilometer bepaald door te delen door de lengte van het traject.

### 3.6.2 Resultaten

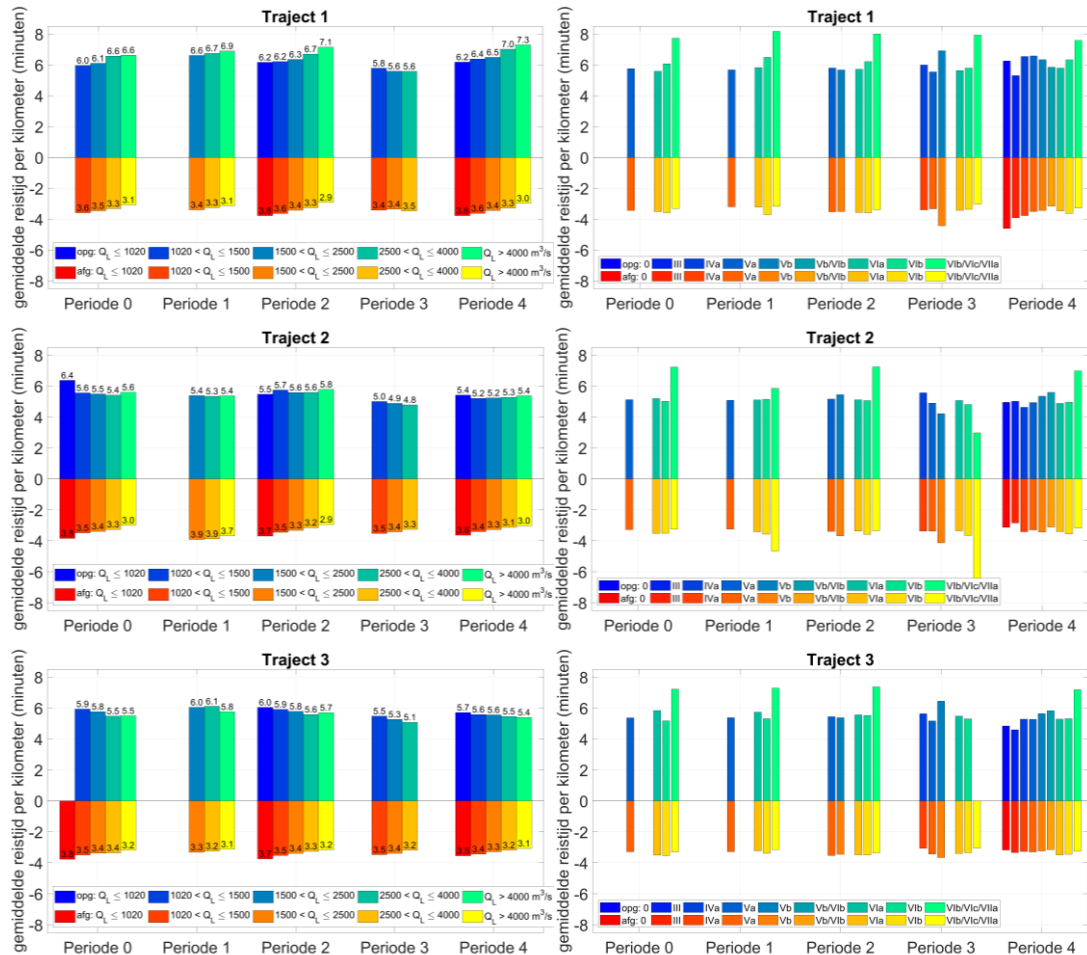
Figuur 31 toont de gemiddelde reistijd per kilometer voor de drie trajecten, waarbij onderscheid is gemaakt in afvoer en scheepstype. De resultaten stemmen overeen met de gemiddelde reistijden, gepresenteerd in Indah-Everts & Hermans (2021), afgeleid van AIS-gegevens. Dit geeft vertrouwen in de data, die een subset van de gehele vloot is.

De opvaart vaart langer over een kilometer dan de afvaart vanwege de tegenstroom. Hoe hoger de afvoer, des te langzamer vaart de opvaart en sneller de afvaart. De reistijden verschillen weinig over de onderscheiden periodes, en ook tussen de verschillende trajecten is geen noemenswaardig verschil te zien. De gemiddelde reistijd per kilometer voor de opvaart en alle afvoerclassen is in Traject 1 consequent iets langer (6 tot 7 minuten) dan in de Trajecten 2 en 3 (5,5 tot 6 minuten). Dit kan verklaard worden doordat bij gelijke afvoer de stroomsnelheid in de Boven-Rijn (Traject 1) hoger is dan in de Waal (Trajecten 2 en 3).

De data wijzen niet op een duidelijke invloed van de suppleties op de reistijden van de scheepvaart. De gemiddelde reistijden van de opvaart in Traject 1 lijken tussen de Periodes 0 en 4 zeer licht te zijn toegenomen (uitgezonderd Periode 3), en dit is niet waarneembaar in het vergelijkbare Traject 3. Het zou kunnen dat dit veroorzaakt is door de beperkt toegenomen stroomsnelheid (zie §3.3.3), maar dit kan niet met zekerheid uit de data worden geconcludeerd. Namelijk, meerdere factoren, die de berekende gemiddelde reistijd kunnen beïnvloeden, spelen een rol.

Zo wordt de vaarsnelheid bepaald door het type schip en de afvoer, maar ook door brandstofprijzen. Ook wordt in Traject 1 vaak door schepen gebunkerd en vanaf 2021 is gestart met de aanleg van de overnachtingshaven bij Spijk; dergelijke aspecten kunnen de reistijd in Traject 1 ook beïnvloeden. Daarnaast is de toename in stroomsnelheid beperkt en juist waar de opgaande schepen varen is die toename nog minder groot. Het is concluderend daarom niet met zekerheid te zeggen dat de zeer beperkte toename in gemiddelde reistijd, vanwege variabiliteit en overige factoren, te verklaren valt door de suppleties.

Voor de toekomst worden geen veranderingen verwacht.



Figuur 31 Gemiddelde reistijd per kilometer van de schepen in opgaande en afgaande vaart voor de drie trajecten, waarbij onderscheid is gemaakt in (links) de afvoer en (rechts) de CEMT scheepsklasse.

### 3.7 Conclusies

Ten aanzien van de Functie scheepvaart zijn de volgende conclusies getrokken:

- Er moet rekening mee worden gehouden dat de bestaande al kritische dieptekelpunten in de Boven-Rijn benedenstrooms van de suppleties (rkm 864,1 en 866,5) in de toekomst kritischer worden als gevolg van de uitgevoerde suppleties. Volgens de waterdieptekaart voldoen deze locaties nu al net niet aan de norm van 2,80 m diepte bij OLR, en zal hier volgens de prognoseberekeningen een beperkte bodemstijging optreden in de komende 20 jaar als gevolg van de suppleties. De bodemstijging bij rkm 864,1 is ook in de beschikbare bodempeilingen te zien (Becker et al., 2023).

Die bij rkm 866,5 is in de bodempeilingen niet te zien maar treedt in het model ook pas na langere tijd op, deze is dus niet te verifiëren.

- Er zijn slechts zeer geringe verschillen in dwarsstroming *op de bakenlijn* tussen de referentie en de situatie met suppleties. Dit is conform de verwachting dat een suppletie op de bakenlijn geen of amper invloed heeft op de dwarsstroming. De suppleties zorgen voor een beperkte toename in stroomsnelheid in de vaargeul. Als gevolg hiervan zal de weerstand voor de opvaart licht toenemen.
- Aan de hand van de CoVadem-data kan geconstateerd worden dat er geen significante verandering waarneembaar is in de ruimtelijke verdeling van scheepvaart als gevolg van de suppletie. De beschikbare ruimte wordt in alle periodes goed benut.
- De CoVadem-data wijzen niet op een duidelijke invloed van de suppleties op de reistijden van de scheepvaart. De gemiddelde reistijden van de opvaart in het suppletietraject lijken tussen de Periodes 0 en 4 zeer licht te zijn toegenomen, maar of dit door de beperkt toegenomen stroomsnelheid komt, is niet met zekerheid te zeggen.
- De analyse naar ruimtegebruik en reistijd werd gebaseerd op data uit het verleden. Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat er in de toekomst significante verandering in de ruimtelijke verdeling of reistijd optreedt als gevolg van de suppleties.

## 4 Vaargeulonderhoud en MGD's

### 4.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk wordt beantwoord is:

*Hoe beïnvloeden de suppleties het benodigde vaargeulonderhoud en de locatie van de Minst Gepeilde Diepte (MGD)?*

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

- Op welke locaties op de Boven-Rijn zijn in de afgelopen jaar MGDs opgetreden?
- Op welke locaties op de Boven-Rijn is in de afgelopen jaar gebaggerd, en hoeveel?
- Zijn de hoeveelheden onderhoudsbaggerwerk en de MGD-locaties en frequentie van optreden veranderd door de aanleg van de suppleties?

Het beantwoorden van deze vragen geeft een indicatie of de suppleties een negatief effect hebben op de scheepvaart. Als er meer onderhoud nodig is aan de vaarweg ondervindt de scheepvaart hier hinder van. De MGD bepaalt in principe de beschikbare vaardiepte op het traject en heeft daarmee een directe relatie met de hoeveelheid vracht die meegenomen kan worden.

### 4.2 Aanpak

Voor het vaargeulonderhoud is er gekeken naar het baggervolume op de Rijn en specifiek naar de rivierkilometers om en nabij de suppletie. Er is in dit onderzoek bekeken of er trends of wijzigingen in de geregistreerde baggervolumes zijn die kunnen corresponderen met de aanleg van de suppleties.

Voor de MGD wordt als eerste gekeken naar de locatie van de registratie. Als er een verschil in locatie van de MGDs zichtbaar is voorafgaand en na de suppleties op de Boven-Rijn wordt nader bekeken wat de waterdiepte is op de verschillende locaties.

### 4.3 Vaargeulonderhoud

Door Rijkswaterstaat zijn de geregistreerde baggervolumes<sup>7</sup> vanaf 2014 beschikbaar gesteld aan Deltares. De registratie wordt gedaan door de aannemer (baggeraar). Van 2020 zijn er geen baggervolumes aangeleverd. Na 2020 is het onderhoudscontract aan een andere aannemer gegund. De registratie van de baggervolumes is verschillend tussen de twee aannemers, hieronder is de beschikbare data per periode op een rij gezet:

- 2014 – 2020
  - Datum per dag;
  - Rivierkilometer (van – tot);
  - Baggervolume;
  - Alleen hopperzuigers.
- 2020
  - Geen gegevens na februari

---

<sup>7</sup> Het Duitse deel is buiten beschouwing gelaten. De Duitse WSV heeft aangegeven dat er in het Duitse deel rondom de suppletie geen onderhoud heeft plaats gevonden in de jaren sinds 2000 (persoonlijke communicatie R. Weisenburger, WSV)

- 2021 – 2022
  - Datum over enkele weken;
  - Vak (Lobith tot Nijmegen);
  - Baggervolume;
  - Gesplitst tussen hopperzuigers en ploegen.

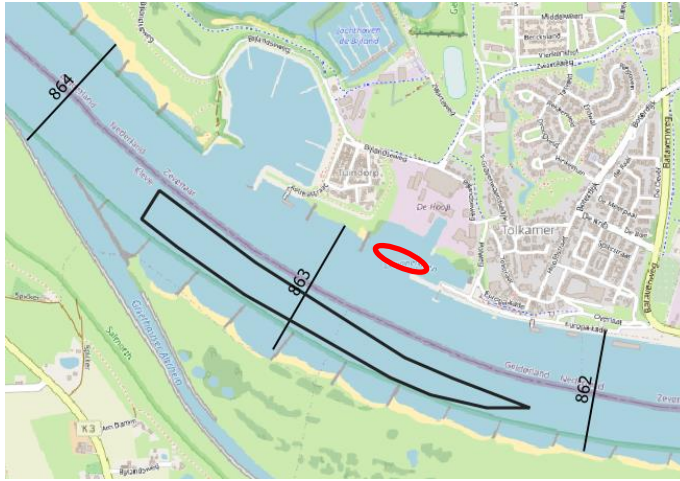
Als gevolg van het verschil in registratie is het moeilijker om de data op een vergelijkbare manier te analyseren en naast elkaar te leggen. Belangrijker is dat vanaf 2021 de baggervolumes over een lange periode en lang traject worden samengenomen. De suppleties hebben slechts op een beperkt deel van dit traject invloed. Het analyseren van het traject Lobith – Nijmegen om het effect van de suppleties te bepalen heeft hierdoor slechts beperkt nut. De analyse van de gegevens richt zich daarom op de periode van 2014 – 2020 (Q1). Wel is er bij Rijkswaterstaat bekend dat er op de Boven-Rijn in 2020-2021 maar één keer onderhoudsbaggerwerk heeft plaatsgevonden, en dat was bij de autosteiger bij Lobith<sup>8</sup> (Figuur 32). Deze locatie ligt in een gebied waarin de suppleties, en ook de vaste laag bij Spijk, voor lichte erosie zorgt. Het is daarom niet aannemelijk dat deze baggerwerkzaamheden in verband staan met de suppleties.

In Figuur 34 zijn de geregistreerde baggervolumes voor het Nederlandse deel tussen 2014 en 2020 te zien op de Boven-Rijn. De rest van Rijn en Waal wordt niet geanalyseerd omdat de suppleties na enkele jaar nog geen invloed hebben op het vaargeulonderhoud een paar kilometer benedenstrooms. Er is geen toename in baggervolume te zien direct na aanleg van de suppleties in 2016 en 2019. Direct stroomafwaarts van de suppleties (rkm 864,55-866,55) is er in alle jaren slechts een beperkte baggerlast in de vaargeul. Op het traject van de suppleties (rkm 862,55-864,55) wordt met enige regelmaat gebaggerd, ook al vóór aanleg van de suppleties. De exacte locatie hiervan is niet nader bekend, maar het is aannemelijk dat dit onderhoud heeft plaatsgevonden bij de eerste van de twee grotere “verhogingen” in de bodem aan de rechterkant van de rivier, bij rkm 863, zie Figuur 33. Becker et al. (2023) geven aan dat de sedimentatie bij rkm 863 tijdens het hoogwater van 2018, van sediment uit de erosiekuil bovenstrooms, waarschijnlijk is verwijderd door te baggeren. Ook zijn er in de jaren voorafgaand bodemveranderingen die kunnen wijzen op onderhoudsbaggerwerk (Becker et al., 2023).

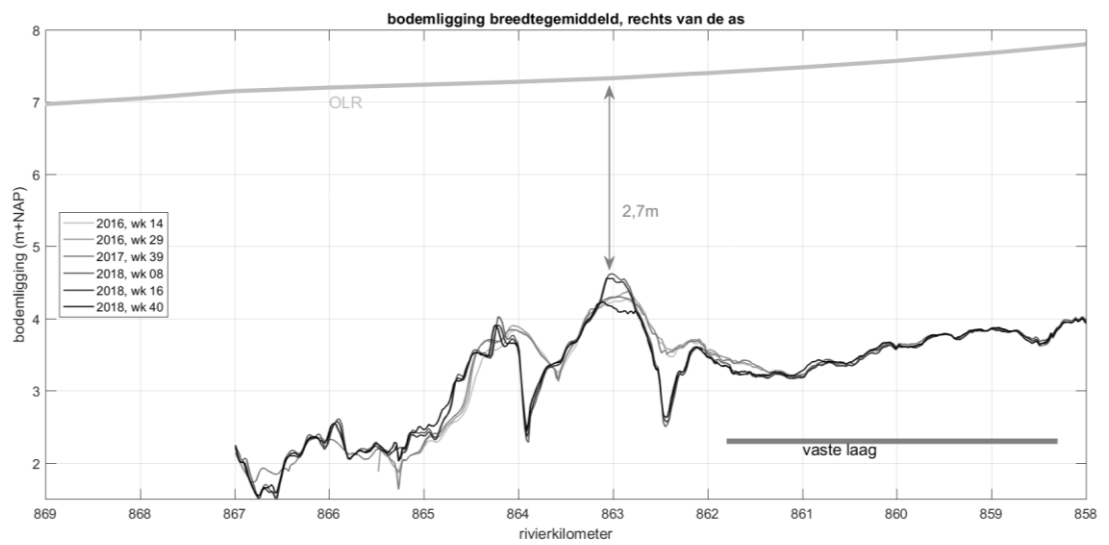
Op basis van de metingen is te concluderen dat deze suppleties tot en met 2021 geen effect hebben gehad op het vaargeulonderhoud. De bank aan de rechterkant bij rkm 864,1 zou in de komende jaren wel extra onderhoudsbaggerwerk kunnen vragen. Hier wordt namelijk een verhoging van de bodemligging verwacht die veroorzaakt wordt door de tweede suppletie (paragraaf 4.3.5 uit Becker et al., 2023, en zie ook paragraaf 3.2 van voorliggend rapport).

---

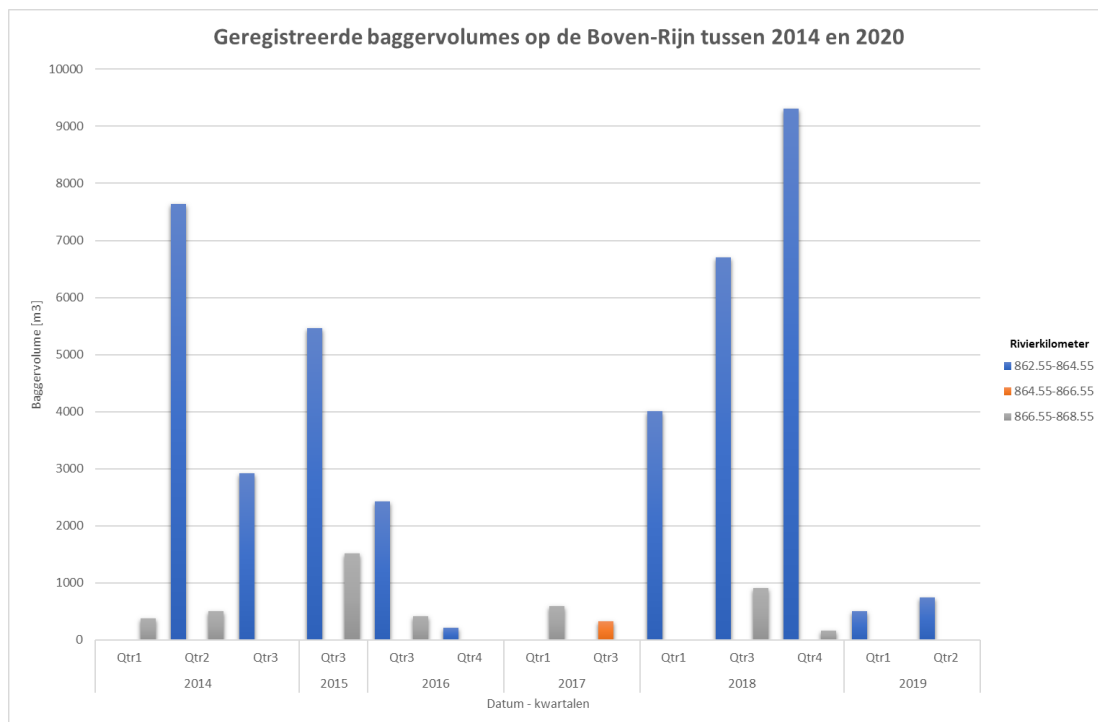
<sup>8</sup> Mondelinge communicatie Henk Oskam, november 2022



Figuur 32 Locatie baggerwerkzaamheden nabij autosteiger Lobith (rood) en tweede suppletie uit 2019 (zwart) (kaart: OSM).



Figuur 33 Ontwikkeling van de bodemligging tussen de aanleg van de eerste en na het hoogwater 2018, gemiddeld over de rechterhelft van het zomerbed (120 m rechts van de as tot aan de as). Week 14 uit 2016 is nog voor aanleg van de eerste suppletie, ter referentie.



Figuur 34 Geregistreerde baggervolumes per kwartaal op de Boven-Rijn tussen 2014 en 2020, de kleuren geven de verschillende vakken aan op de Boven-Rijn. De suppletie bevindt zich tussen rivierkilometer 862 en 864.

#### 4.4 MGD

In Figuur 35 is de locatie van de MGD tussen 2004 en 2022 te zien. In dit figuur zijn de verschillende datasets van de MGD-registraties samengevoegd. Daarnaast heeft Rijkswaterstaat in de loop van de tijd het aantal trajecten waarop de MGD wordt geregistreerd uitgebreid. Als gevolg hiervan zullen in de laatste jaren meer punten zichtbaar zijn.

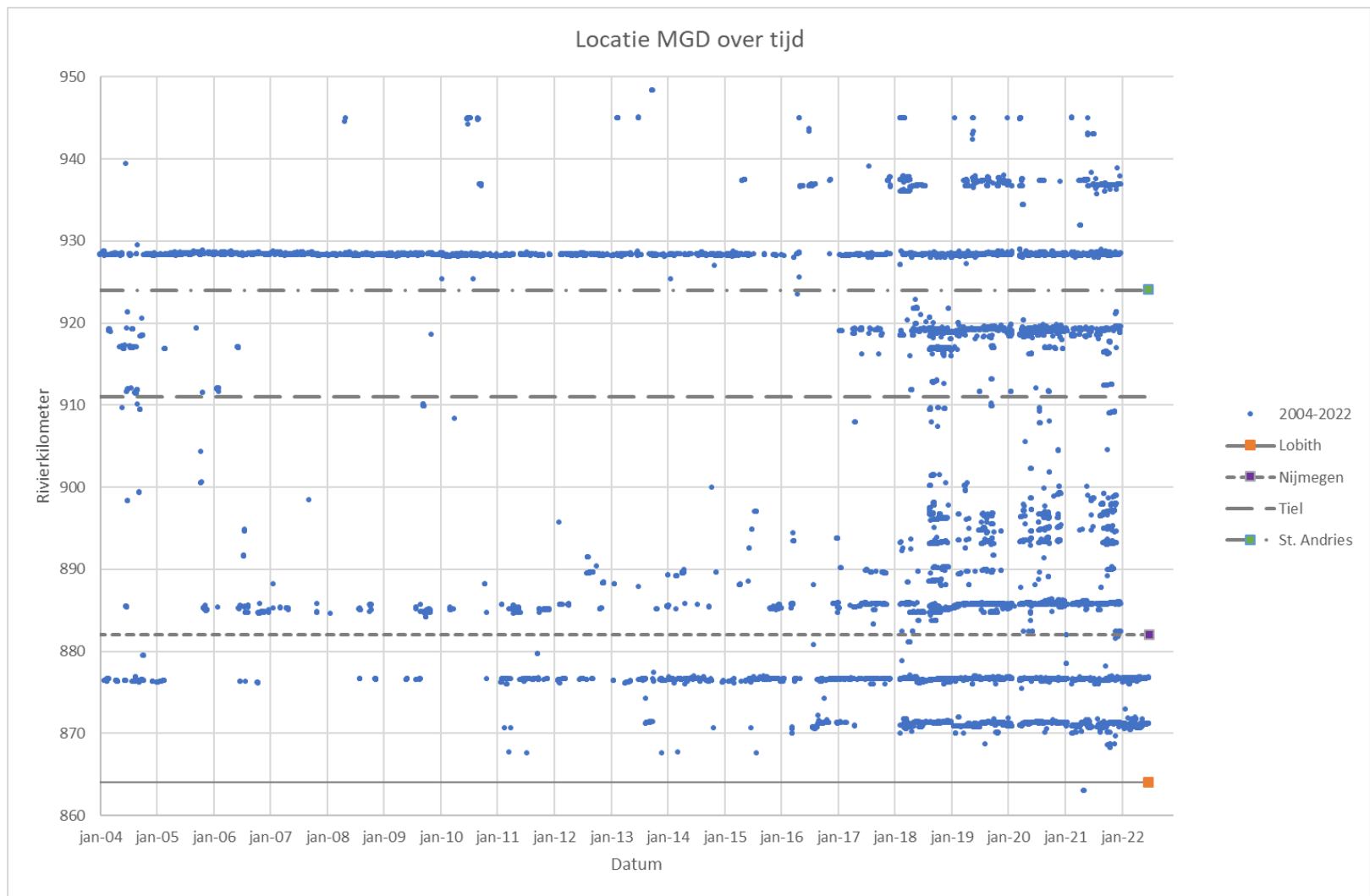
De suppleties zijn aangebracht ter hoogte van Lobith en hebben in de afgelopen jaren de bodemligging benedenstrooms beïnvloed, maar niet verder dan tot de Pannerdensche Kop (rkm 867,3) (Becker et al., 2023). Er zijn in Figuur 35 enkele trends over tijd zichtbaar, met name dat er locaties bij zijn gekomen waar de waterdiepte het laagste is. Er is echter geen verandering in registratie van de MGD te zien op het traject rondom de suppleties en benedenstrooms, zowel ruimtelijk als op een temporele schaal.

De suppleties op de Boven-Rijn hebben geen meetbare invloed op de Minst Gepeilde Diepte, dit komt overeen met de resultaten uit de modellering (Becker et al., 2023). Op het moment dat een toekomstige suppletie wordt uitgevoerd nabij een maatgevende waterdiepte op de Rijn kan het uiteraard wel een effect hebben op de MGD.

#### 4.5 Conclusies

De suppleties op de Boven-Rijn hebben tot en met 2021 geen effect gehad op het vaargeulonderhoud. De bank aan de rechterkant bij rkm 864,1 zou in de komende jaren wel extra onderhoudsbaggerwerk kunnen vragen. Hier wordt namelijk een beperkte verhoging van de bodemligging verwacht die veroorzaakt wordt door de tweede suppletie.

De aanleg van de suppleties heeft geen nieuwe locaties van Minst Gepeilde Diepte laten ontstaan of de frequentie van MGDs op de Boven-Rijn verhoogd.



Figuur 35 Locatie geregistreerde MGD's tussen 2004 en 2022, elke punt is 1 geregistreerde MGD. De grijze lijnen geven enkele locaties weer om de registraties te koppelen aan een locatie. De suppletie is ter hoogte van Lobith



# 5 Stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen

## 5.1 Onderzoeksvragen

De hoofd-onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk wordt beantwoord is:

*Hoe beïnvloeden de suppleties de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen?*

Daaruit zijn de volgende deelvragen afgeleid:

- Op welke locaties en op welke dieptes bevinden zich kabels en leidingen?
- Op welke locaties bevinden zich kribben en andere constructies?
- Hoe wordt de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen beoordeeld?
- Wat is de samenstelling van de ondergrond van het rivierbed?
- Wat is de bodemligging van de rivier en hoe ontwikkelt zich deze?

## 5.2 Welke conclusies zijn op basis van de antwoorden op voorgaande vragen te trekken over de invloed van suppleties op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen? Locaties en dieptes van kabels en leidingen

### 5.2.1 Aanpak

Informatie over locaties en dieptes van kabels en leidingen is afgeleid uit de online waterdieptekaarten van de Rijntakken ([https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON\\_Waterdieptekaarten\\_Rijntakken.Webviewer](https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_Waterdieptekaarten_Rijntakken.Webviewer)) en een objectcodelijst verstrekt door Rijkswaterstaat.

### 5.2.2 Resultaten

De online waterdieptekaarten suggereren twee kruisingen van kabels en leidingen (gebaseerd op de gedefinieerde niet-baggerlocaties, zie Figuur 36):

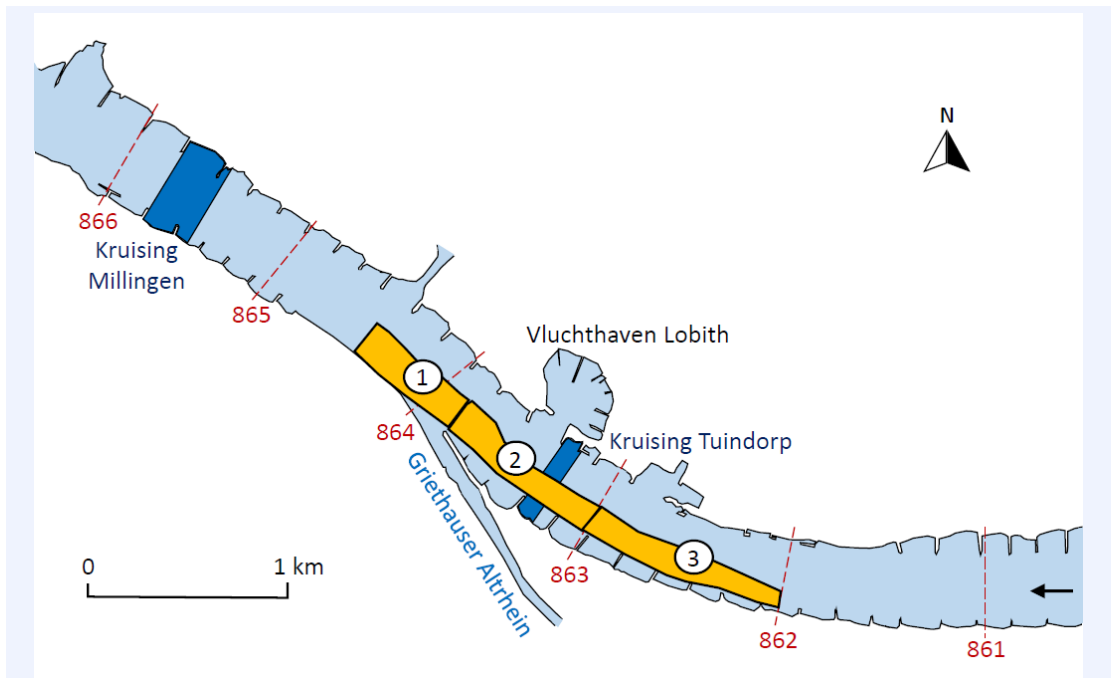
- bij Tuindorp tussen km 863,2 en km 863,3<sup>9</sup>;
- bij Millingen tussen km 865,5 en 865,9.

De objectcodelijst bevat echter uitsluitend informatie over de kruising bij Millingen die op ruim 1 km afstand van de suppleties ligt. Er is geen informatie over een eventuele kruising bij Tuindorp die onder de suppleties ligt en het meest direct wordt beïnvloed door erosie als gevolg van die suppleties.

Voor de kruising bij Millingen geeft de objectcodelijst aan dat de datatransportkabels onder beheer van Alliander, Teleman Nijmegen, Rijkswaterstaat Oost-Nederland en Ziggo (km 865,86) zich bevinden op -11,34 m+NAP. De diepteliggingen van de elektriciteitskabels van Liander (km 865,62 en 865,71) en de datatransportkabels van KPN (km 865,76) zijn onbekend.

---

<sup>9</sup> In de zoektocht naar het wel of niet bestaan van deze kruising werd gesuggereerd dat de niet-baggerlocatie bij Tuindorp gedefinieerd kon zijn vanwege het meetstation Lobith haven. Dat station ligt echter benedenstrooms van de haveningang, terwijl de niet-baggerlocatie bovenstrooms daarvan ligt.



Figuur 36 Ligging van kabelkruising bij Millingen (km 865,5-865,9) en vermoedelijke ligging van kruising van kabels of leidingen bij Tuindorp (km 863,2-863,3) ten opzichte van de drie vakken van de eerste suppletie.  
Bron: Online waterdieptekaarten van de Rijntakken  
([https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON\\_Waterdieptekaarten\\_Rijntakken.Webviewer](https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_Waterdieptekaarten_Rijntakken.Webviewer)).

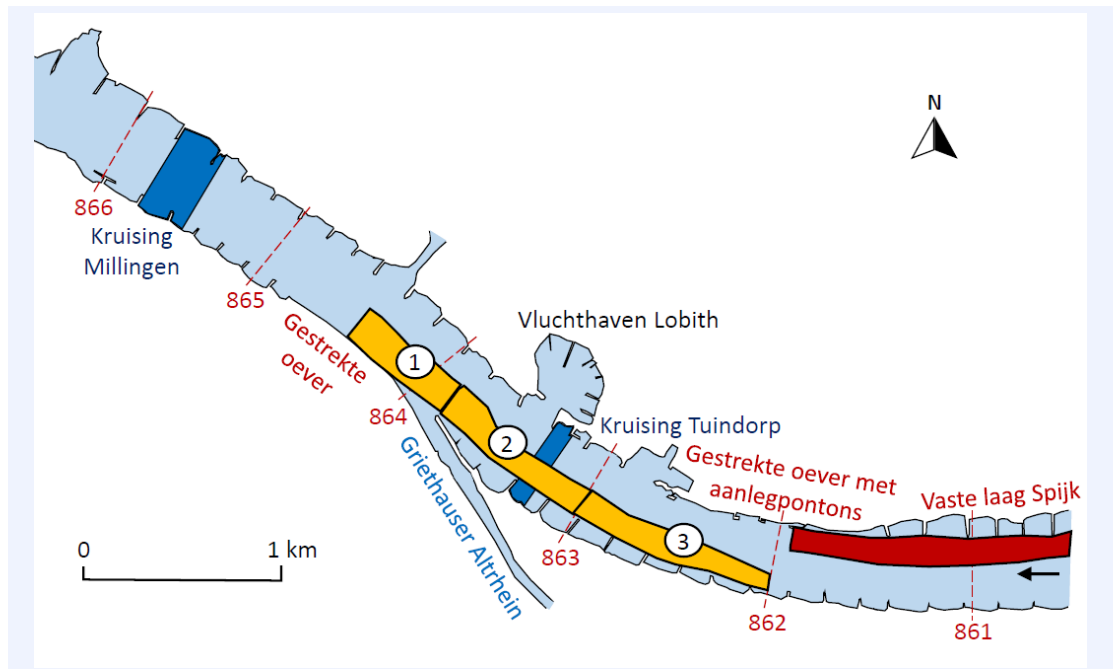
## 5.3 Locaties van kribben en andere constructies

### 5.3.1 Aanpak

De locaties van kribben en andere constructies zijn afgeleid uit Google Earth en topografische kaarten. De ligging van de vaste laag bij Spijk is afgeleid uit beschrijvingen van de laag in openbare bronnen en uit binnen Deltares bekende informatie over de feitelijke staat waarin de laag verkeert.

### 5.3.2 Resultaten

Kribben liggen langs beide oevers van vrijwel het gehele Bovenrijntraject tussen de meest stroomopwaartse grens met Duitsland (km 857,8) en de Pannerdense Kop (km 867,5), met uitzondering van een gestrekte linkeroever beneden de monding van de Griethauser Altrhein (km 864-865) en een gestrekte rechteroever met aanlegpontons bij Tolkamer (km 861,5-862,7). De vaste laag strekt zich langs de rechteroever uit van km 858,3 tot 861,7 à 861,9. De benedenrand is niet scherp begrensd omdat over een afstand van circa 200 m nog verspreid stenen liggen die echter de bodem niet volledig afdekken. Figuur 37 geeft een overzicht van de constructies ten opzichte van de drie vakken van de eerste suppletie.



Figuur 37 Locaties van drie vakken van de eerste suppletie, kribben, gestreckte oevers en de vaste laag bij Spijk.

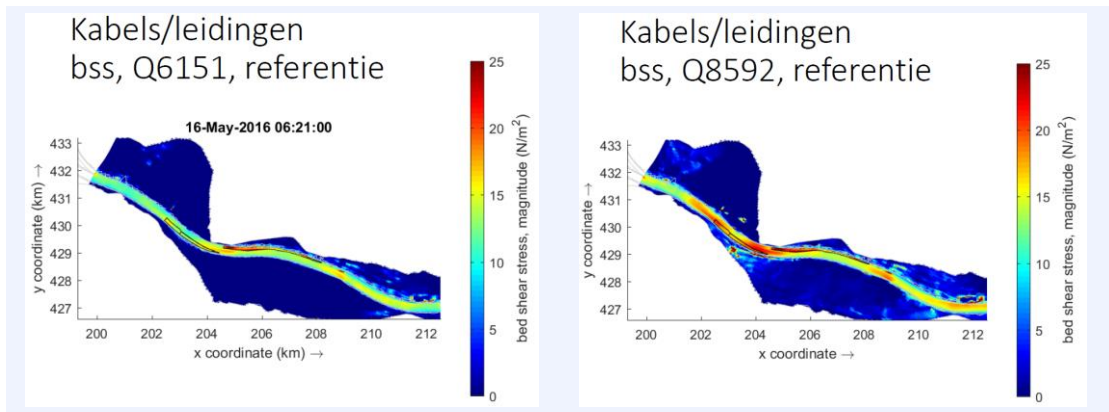
## 5.4 Beoordeling van de stabiliteit

### 5.4.1 Aanpak

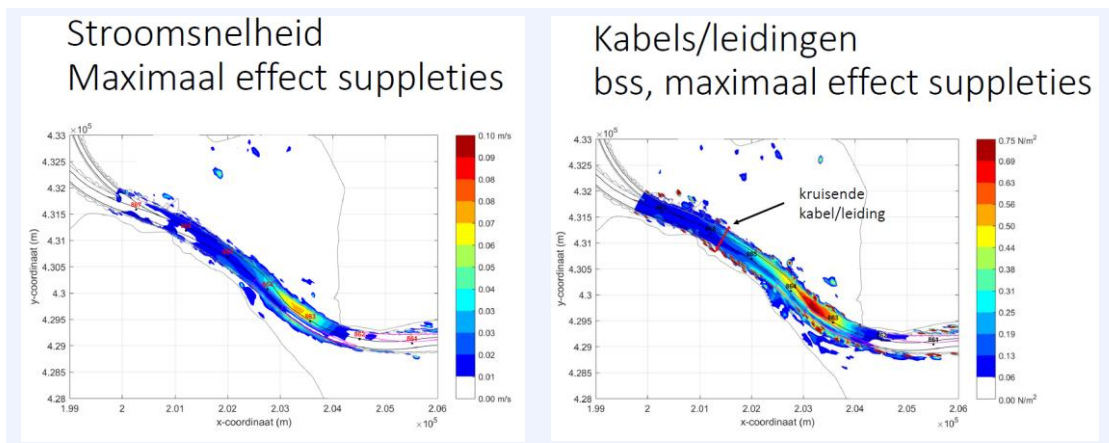
De stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen komt in het geding als de suppleties leiden tot sterkere stromingen en tot extra erosie ten opzichte van de natuurlijke morfodynamiek. Het effect van mogelijke sterkere stromingen is geëvalueerd aan de hand van Delft3D-berekeningen van de bodemschuifspanningen die optreden in zowel een prognose van 20 jaar aan variërende afvoeren als bij hoogwaterafvoeren van  $6.151 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $8.592 \text{ m}^3/\text{s}$ . De effecten van extra erosie zijn beoordeeld volgens de methodiek uit recent KPP-onderzoek naar de benodigde dekking op buisleidingen in rivieren (Mosselman, 2022).

### 5.4.2 Resultaten

Bij waterdieptes van 10 à 12 m en een verhang van  $0,14 \text{ m}/\text{km}$  valt te verwachten dat bodemschuifspanningen bij de berekende hoogwaterafvoeren gemiddeld  $14$  à  $17 \text{ N}/\text{m}^2$  bedragen. Bij gelijke stroomsnelheden is verder te verwachten dat de bodemschuifspanningen op de vaste laag bij Spijk (met Chézy-coëfficiënt  $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  volgens Mosselman et al, 2007) 65% tot 100% hoger zullen zijn dan op de alluviale rivierbodem (met Chézy-coëfficiënt  $45$  à  $50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ). Dit is terug te zien in de berekende bodemschuifspanningen voor de referentiesituatie zonder suppleties (Figuur 38). Deze liggen rond  $15 \text{ N}/\text{m}^2$  met uitschieters tot circa  $20 \text{ N}/\text{m}^2$  op de alluviale bodem en circa  $25 \text{ N}/\text{m}^2$  op de vaste laag. In de langjarige prognoseberekening verhogen de suppleties de bodemschuifspanningen met maximaal  $0,75 \text{ N}/\text{m}^2$ , hetgeen overeenkomt met maximaal  $0,08 \text{ m}/\text{s}$  hogere stroomsnelheden (Figuur 39). Deze verhogingen treden op rond km 863,4 waar de hoogste bodemschuifspanningen en stroomsnelheden in de referentiesituatie juist lager zijn dan verder stroomopwaarts of stroomafwaarts (Figuur 38). Ze geven daarom geen aanleiding tot schuifspanningen die vallen buiten het bereik waarop de kribben ter plaatse zijn berekend.

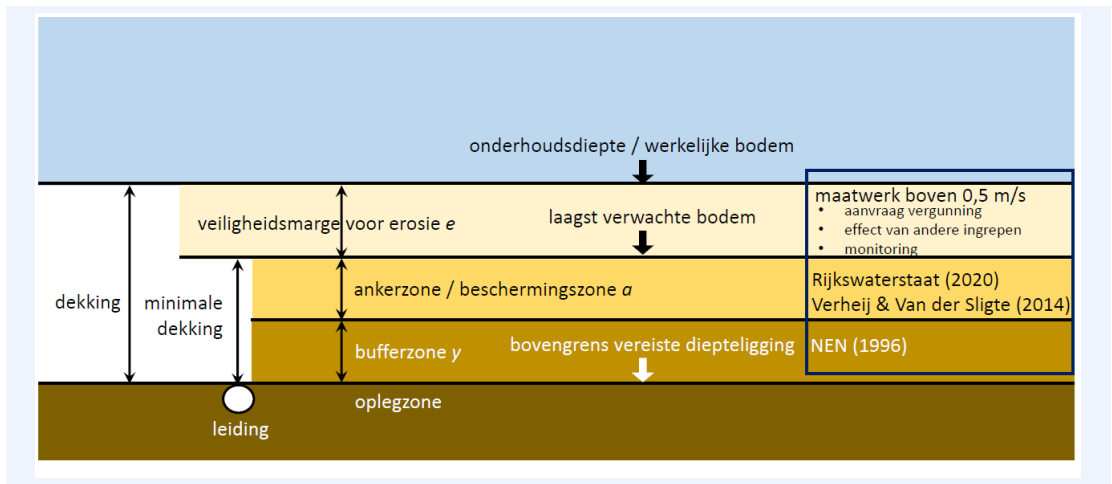


Figuur 38 Berekende bodemschuifspanningen in de referentiesituatie zonder suppleties bij hoogwaters van 6.151 m<sup>3</sup>/s (links) en 8.592 m<sup>3</sup>/s (rechts).

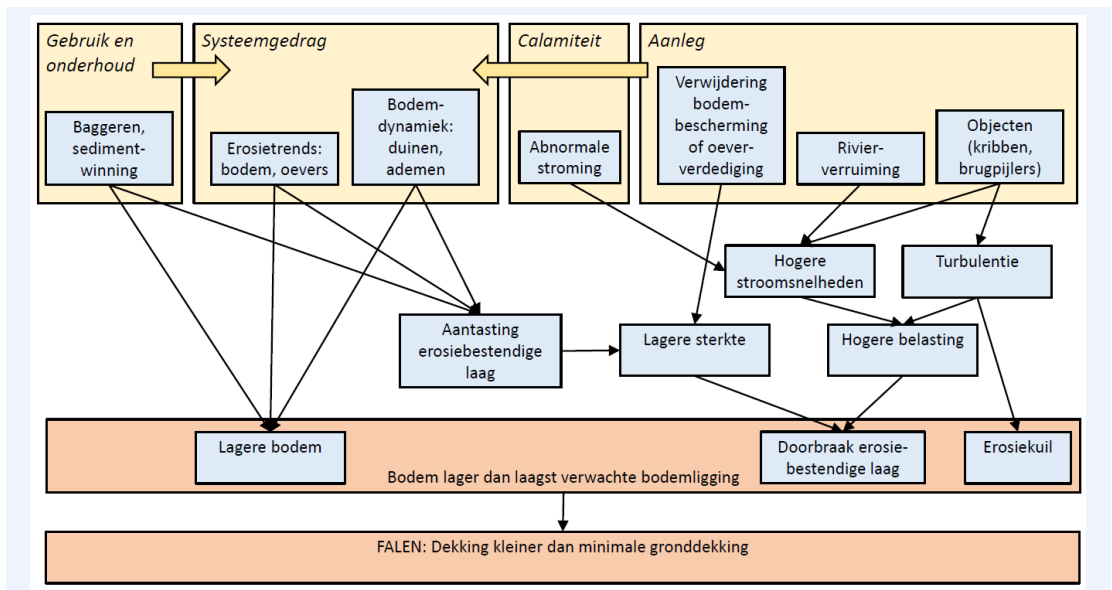


Figuur 39 Berekend maximaal effect van suppleties op stroomsnelheden (links) en bodemschuifspanningen (rechts) voor een prognose van variërende afvoeren over een periode van 20 jaar.

De methodiek voor het bepalen van de benodigde dekking op buisleidingen in rivieren onderscheidt verschillende verticale zones (Figuur 40). Omdat echter aard en diepteligging van de mogelijke kabels of leidingen bij Tuindorp onbekend zijn, zijn de benodigde diktes van de ankerzone (Rijkswaterstaat, 2020; Verheij & Van der Sligte, 2014) en de bufferzone (NEN, 1996) niet berekend. De beoordeling beperkte zich tot de veiligheidsmarge voor erosie. Hiervoor onderscheidt de methodiek verschillende faalpaden (Figuur 41). Enerzijds kunnen de suppleties leiden tot falen doordat zij een effect hebben op het systeemgedrag van langjarige erosietrends en kortdurende morfodynamische variaties. Anderzijds kunnen de suppleties leiden tot falen doordat zij een erosiebestendige laag doorbreken en zo onderliggende lagen van fijn sediment aan stroomerosie blootstellen. Relevant zijn hiervoor de samenstelling van de ondergrond (paragraaf 5.5) en de ligging en de ontwikkeling van de rivierbodem (paragraaf 5.6).



Figuur 40 Definitie van zones voor benodigde dekking boven kabels en leidingen (Mosselman, 2022), samengesteld via combinatie van definities in Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2020), NEN 3651:2020 (NEN, 2020) en NPR 3659:1996 (NEN, 1996).



Figuur 41 Schematisch overzicht van faalpaden (Mosselman, 2022).

## 5.5 Samenstelling van de ondergrond

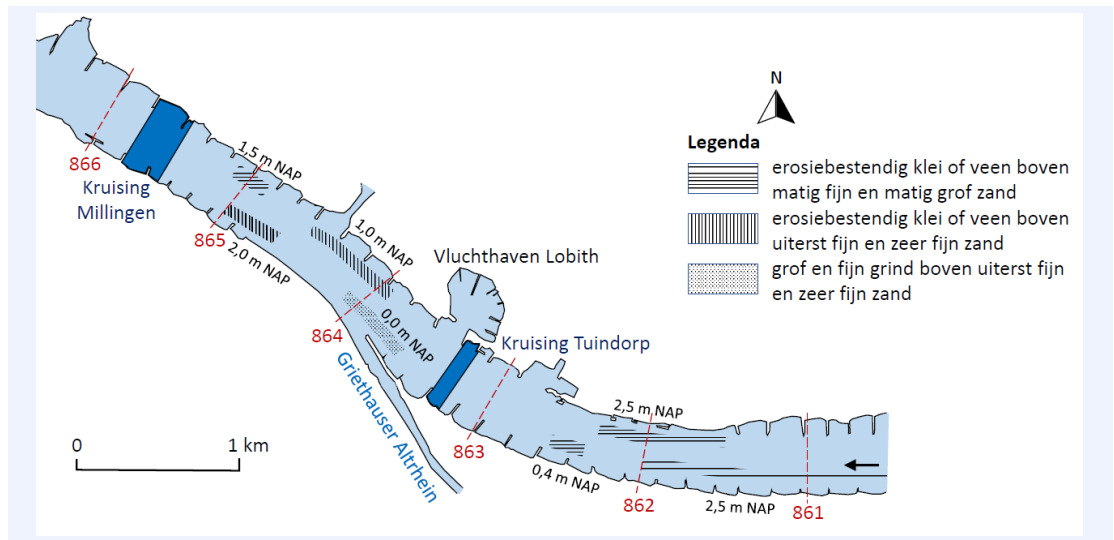
### 5.5.1 Aanpak

De samenstelling van de ondergrond is bestudeerd aan de hand van de geologische lengteprofielen, 70 m links en rechts uit de rivieras, in bijlage K van Gruijters et al. (2001), met speciale aandacht voor mogelijke lagen van fijn sediment onder erosiebestendige lagen met een kans op doorbreken. Als namelijk fijn sediment na een doorbraak wordt blootgesteld aan de stroming, kunnen zich in de bodem plotselinge diepe kuilen vormen (cf. Becker et al., 2023).

### 5.5.2 Resultaten

Over het gehele traject van de Boven-Rijn bevindt zich een actieve laag van grind boven fijnere onderlagen. Het sediment van die onderlagen is echter niet altijd zo fijn dat zij na blootstelling aan erosie door stroming diepe kuilen vormen.

Slechts in een aantal zones is sprake van matig fijn, zeer fijn of uiterst fijn zand onder een bovenlaag van grind of erosiebestendig klei of veen. Deze zones zijn weergegeven in Figuur 42. De verschillen tussen de geologische profielen op 70 m links en rechts van de rivieras laten overigens zien dat de variaties in dwarsrichting groot zijn. Dat betekent dat gemakkelijk locaties met fijn zand onder een erosiebestendige laag over het hoofd gezien kunnen worden. Becker et al. (2023) vinden hiervoor aanwijzingen (zie ook paragraaf 5.6.2).



Figuur 42 Locaties van fijne zandlagen onder meer erosiebestendige lagen. De top van de fijne zandlagen is bij benadering aangegeven in meters ten opzichte van NAP. Bron: geologische lengteprofielen van Gruijters et al. (2001) op 70 m links en rechts van de as (km 857,3-865,3).

## 5.6 Ligging en ontwikkeling van de rivierbodembodem

### 5.6.1 Aanpak

De ligging en de ontwikkeling van de bodem zijn afgeleid uit een reeks multibeam-bodempeilingen uit de periode 1999-2021 en uit de resultaten van langjarige morfologische berekeningen met Delft3D.

### 5.6.2 Resultaten

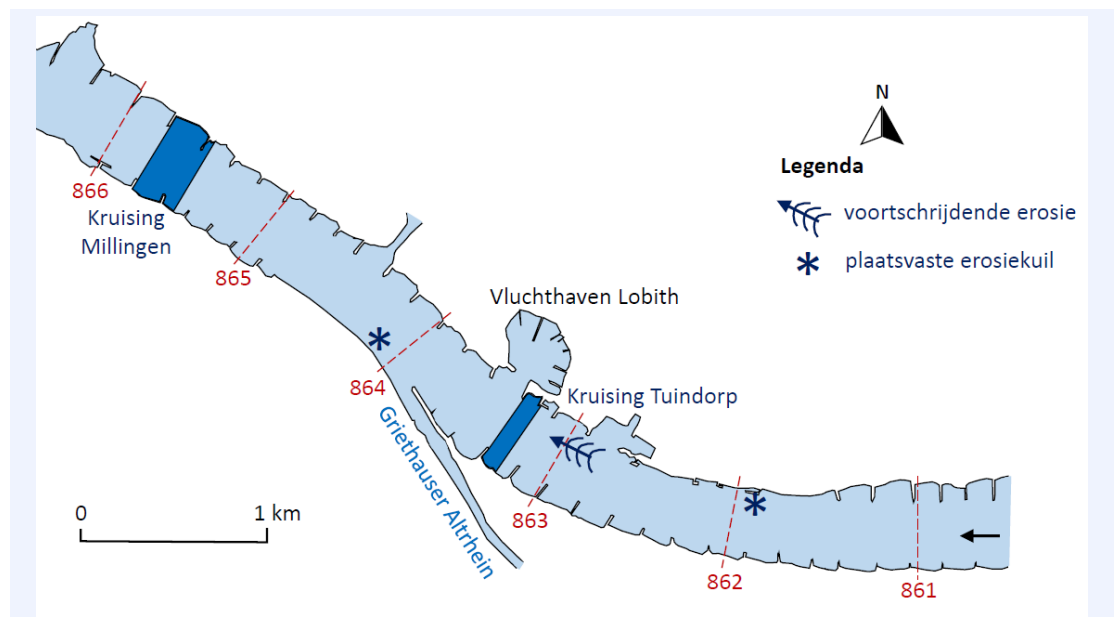
De tijdreeks van multibeam-bodempeilingen laat zien dat de bodem in de linkerhelft van de rivier ter plaatse van de suppleties circa 1 m hoger is komen te liggen, en in de rechterhelft door erosie circa 1,5 m lager. Deze erosie betreft een ondiepte die aanvankelijk op 4 à 5 m+NAP lag. Lokaal reikte de erosie dieper dan 2,5 m+NAP in week 38 van 2019, maar 2 jaar later kwam de bodem al niet meer onder dit niveau. De erosie in de rechterhelft van de rivier begon op km 862, naast het bovenstroomse deel van de suppleties, en breidt zich sindsdien geleidelijk stroomafwaarts uit (Figuur 43). Door natuurlijke morfodynamiek fluctueert de bodemligging verder met amplitudes van 0,5 m bij frequente afvoeren tot 1 m bij hoogwaters. Enkele waargenomen markante erosieverschijnselen zijn weergegeven in Figuur 43.

Uit de morfologische berekeningen volgt een maximale erosie van minder dan 0,1 m ter plaatse van de kruising bij Millingen (km 865,5-865,9). De berekende erosie bedraagt maximaal 0,4 m boven de mogelijke kruising bij Tuindorp (km 863,2-863,3). Dat is minder dan de 1,5 m aan waargenomen erosie in de rechterhelft van de rivier stroomopwaarts van deze kruising. Dit komt doordat het grootste deel van de waargenomen erosie plaatsgevonden heeft in de eerste jaren na aanleg van de vaste laag bij Spijk (Becker et al., 2023) en al in de startbodem van het model is verwerkt.

De erosie is slechts voor een deel het gevolg van de suppleties, voor een ander deel wordt deze veroorzaakt door de vaste laag. In de peilingen is verder te zien dat de voortschrijdende erosie hier vooral plaatsvindt bij hoogwater, en dat er diepe kuilen kunnen ontstaan tot dicht bij de mogelijke kruising bij Tuindorp. Dit wijst ondanks de bevindingen in paragraaf 5.5 op de aanwezigheid van erosiegevoelige lagen in de ondergrond.

Erosie boven de kruising bij Millingen brengt geen significante risico's met zich mee. Alleen erosie boven de vermoedelijke kruising bij Tuindorp lijkt mogelijk van belang. Er bevindt zich hier mogelijk fijn zand onder een kwetsbare erosiebestendige laag. Als er hier een kruising ligt verdienen dus de vorming van erosiekuilen en de voortschrijdende erosie aandacht.

De vermoedelijke kruising bij Tuindorp ligt ook binnen het invloedsgebied van de schroefstralen van schepen die manoeuvreren bij de toegang tot de Vluchthaven Lobith. Deze schroefstralen laten duidelijke sporen na in de bodem maar deze sporen zijn ondiep (Becker et al., 2023).



Figuur 43 Locaties van markante erosieverschijnselen: erosiekuil aan de benedenrand van de vaste laag bij Spijk, erosiekuil bij de samenvloeiing met de Griethauser Altrhein, en voortschrijdende erosie langs de rechteroever ter hoogte van Tuindorp.

## 5.7 Conclusies

### 5.7.1 Aanpak

Conclusies over de invloed van suppleties op de stabiliteit van (krib)constructies en kabels en leidingen zijn getrokken door de antwoorden op de voorgaande onderzoeksvragen in samenhang te beschouwen.

### 5.7.2 Resultaten

De kabelkruising bij Millingen ligt te ver van de suppleties om een significante invloed te ondergaan. De vermoedelijke kabels of leidingen bij Tuindorp daarentegen kruisen de rivier pal onder de suppleties. In de rechterhelft van de rivier erodeert de bodem hier mede als gevolg van de suppleties. Dit betreft erosie van een bank die als gevolg van voortschrijdende erosie vanuit bovenstrooms hooguit net zo diep reikt als de oorspronkelijke bodemligging in de linkerhelft van de rivier.

De geologische lengteprofielen suggereren dat zich hier geen fijnzandige lagen bevinden waarin zich bij blootstelling aan stroomerosie diepe kuilen zouden kunnen vormen. Tijdens het hoogwater 2021 hebben zich echter diepe kuilen gevormd vrij dicht bij de vermoedelijke kruising, wat wel de aanwezigheid van fijn, erosiegevoelig materiaal suggereert.

Niet bekend is hoe diep eventuele kabels of leidingen bij Tuindorp liggen. Als aangenomen mag worden dat ze net zo diep liggen als de kabelkruising bij Millingen op -11,34 m+NAP, zullen de suppleties de kruising bij lange na niet beïnvloed hebben. Omdat het effect van de suppleties geleidelijk verdwijnt, geldt deze conclusie ook voor de komende 10 jaar.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van modelberekeningen kan geconcludeerd worden dat beide suppleties samen, direct na aanleg van de tweede suppletie, bij maatgevende afvoer maximaal 1,5 cm waterstandsverhoging op de as van de rivier konden veroorzaken. Dit effect neemt zeer langzaam af, het zal naar verwachting nog 10-20 jaar vanaf heden zichtbaar zijn. Het maximale waterstandseffect wordt direct bovenstrooms van de suppleties bereikt, aan de linkerkant van de rivier. Langs de bandijken wordt de opstuwing bij de hoogwaterreferentie maximaal 1 cm.

Wat betreft de functie scheepvaart moet er rekening mee worden gehouden dat de bestaande al kritische diepteknelpunten in de Boven-Rijn benedenstrooms van de suppleties (rkm 864,1 en 866,5) in de toekomst kritischer worden als gevolg van de uitgevoerde suppleties, er wordt een beperkte bodemstijging verwacht in de komende 20 jaar. De suppleties hebben weinig invloed op de dwarsstroming op de bakelijijn. Ze zorgen voor een beperkte toename in stroomsnelheid in de vaargeul. Als gevolg hiervan zal de weerstand voor de opvaart licht toenemen. De door schippers gerapporteerde bijzonderheden in het gedrag van hun schepen bij een vaart over de Boven-Rijn zijn zeer waarschijnlijk niet door de suppleties veroorzaakt.

Aan de hand van de CoVadem-data kan geconstateerd worden dat er geen significante verandering waarneembaar is in de ruimtelijke verdeling van scheepvaart als gevolg van de suppletie. De beschikbare ruimte wordt in alle periodes goed benut. De CoVadem-data wijzen ook niet op een duidelijke invloed van de suppleties op de reistijden van de scheepvaart. De gemiddelde reistijden van de opvaart in het suppletietraject lijken tussen de Periodes 0 en 4 zeer licht te zijn toegenomen, maar of dit door de beperkt toegenomen stroomsnelheid komt, is niet met zekerheid te zeggen. Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat er in de toekomst significante verandering in de ruimtelijke verdeling of reistijd optreedt als gevolg van de suppleties.

De suppleties op de Boven-Rijn hebben tot en met 2021 geen effect gehad op het vaargeulonderhoud. De bank aan de rechterkant bij rkm 864,1 zou in de komende jaren wel extra onderhoudsbaggerwerk kunnen vragen. Hier wordt namelijk een beperkte verhoging van de bodemligging verwacht die veroorzaakt wordt door de tweede suppletie. De aanleg van de suppleties heeft geen nieuwe locaties van Minst Gepeilde Diepte laten ontstaan of de frequentie van MGDs op de Boven-Rijn verhoogd.

De suppleties hebben geen effect gehad op de stabiliteit van (krib)constructies en de kruising van kabels en leidingen bij Millingen. Omdat het effect van de suppleties geleidelijk verdwijnt, geldt deze conclusie ook voor de komende 10 jaar. Mogelijk ligt er op de Boven-Rijn nog een tweede kruising van kabels en leidingen bij Tuindorp. Op dat traject erodeert de rivierbodem in de rechterhelft van de rivier als gevolg van zowel de suppleties als de vaste laag bij Spijk. Bovendien lijkt er een kans op vorming van diepe erosiekuilen door aansnijden van erosiegevoelige lagen in de ondergrond. Als hier kabels of leidingen in de grond liggen wordt aanbevolen om na te gaan hoe diep deze liggen. Als ze net als de kruising bij Millingen meerdere meters onder NAP liggen zijn de risico's door bodem-instabiliteit alsnog gering.

Samengevat kan gezegd worden dat de suppleties op de Boven-Rijn een beperkte invloed op de rivierfuncties hebben gehad. Dit komt doordat de suppletie:

- 1) is aangebracht op een weinig kritieke locatie:
  - geen MGD-locaties in de buurt en weinig baggeronderhoud nodig op en rond het suppletietraject
  - waarschijnlijk geen kritieke kabels en leidingen aanwezig
- 2) qua diepte voldoende ruim onder de vaargeul geplaatst is.

Er wordt aanbevolen om bij het plannen van toekomstige suppleties de verwachte ontwikkeling van de rivierbodem te bepalen en te analyseren of deze een probleem zou kunnen vormen voor de rivierfuncties. De geobserveerde bodemdynamiek na aanleg van de Boven-Rijn suppleties (zie Becker et al., 2023) kan daarvoor een eerste handreiking geven. Er moet echter rekening mee gehouden worden dat suppleties op een andere locatie (bijvoorbeeld verder benedenstrooms op een zandige rivierbedding) of met een andere geometrie een afwijkende dynamiek kunnen veroorzaken.

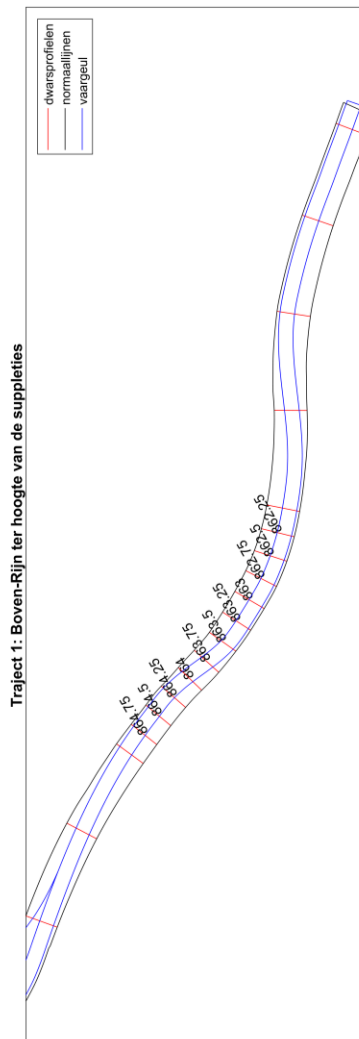
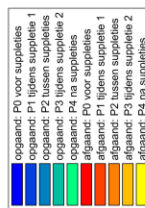
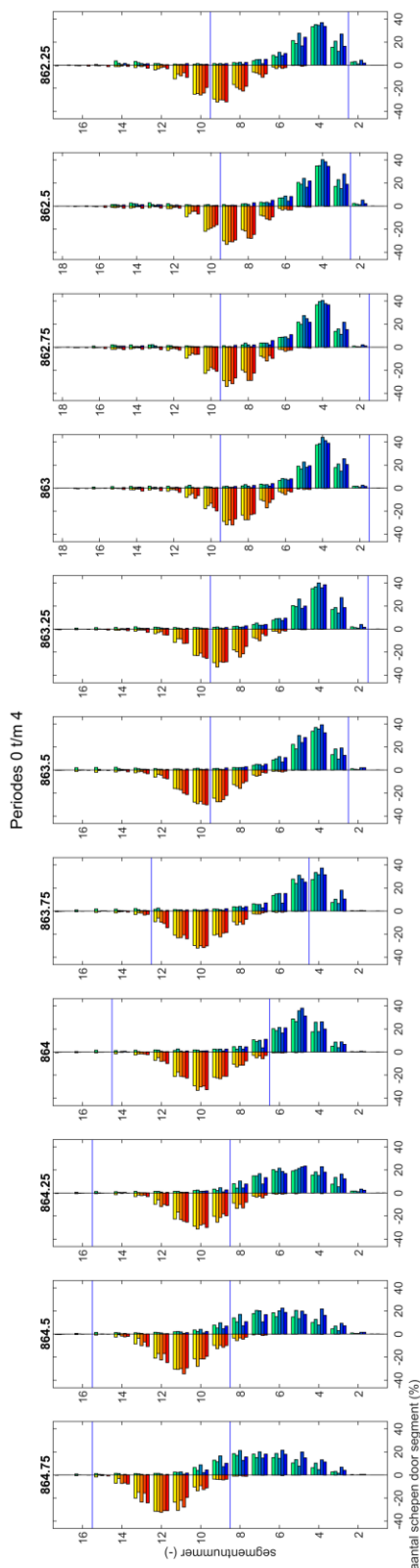
## 7 Literatuurverwijzingen

- Becker, A. (2022). Tweede suppletie Boven-Rijn: tussenevaluatie 2021. Memo 11207908-000-ZWS-0001, Deltares, Delft, februari 2022.
- Becker, A., S. Giri, A. Paarlberg, K. Sloff, P. van Denderen & M. Zagonjolli (2023). Eindevaluatie suppletie Boven-Rijn; Deelrapport 1: Data en effecten. Deltares rapport met kenmerk 11208437-000-ZWS-0007.
- Chang, Chia-Yun (2021). Identify and visualize Dutch inland waterways vessel movement anomalies during low water levels. Master thesis Delft University of Technology, February 2021.
- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink & J.H.A. Bosch (2001). De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Bovenrijn / Niederrhein: Interpretatie van de meetresultaten. Rapport NITG 01-167-B, TNO-NITG, Zwolle, eindrapport november 2001.
- Ijmker, E. S. Quartel, A. Sieben, J. Wensink, W. Peters . (2018): Advies 2de Sedimentsuppletie Boven-Rijn 2019. Memo RWS Oost-Nederland, 9 januari 2018.
- 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.
- Mosselman, E., S. van Vuren, M. Yossef, W. Ottevanger & K. Sloff (2007). Case studies Duurzame Vaardiepte Rijndelta. Rapport Q4245, WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Mosselman, E. (2022). Dekking op buisleidingen in rivieren. Rapport 11208033-007, Deltares, Delft, concept augustus 2022.
- NEN (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut) (1996). Ondergrondse pijpleidingen - Grondslagen voor de sterkteberekening / Underground pipelines - Basic principles for strength calculation. Norm NPR 3659:1996 nl.
- NEN (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut) (2020). Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken. Norm NEN 3651:2020 nl.
- Niesten, I., W. Ottevanger, A. Becker (2017): Riviersuppleties in de Rijntakken. Conclusies 1e suppletie Boven-Rijn en advies voortzetting monitoring. Deltares-rapport 11200877-000-ZWS-0005, september 2017.
- Niesten, I (2019). Kwaliteitscontrole CoVadem-data Bovenrijn. Deltares-memo met kenmerk 11203378-000-ZWS-0002, d.d. 11 februari 2019.
- Rijkswaterstaat (2019). Rivierkundig Beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren. Versie 5.0.
- Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020. Rijkswaterstaat-WVL, redactie O.C. Koedijk, 31 juli 2020, ISBN 78-90-9033423-3.
- Rijkswaterstaat (2021). Beoordeling waterdiepte-effecten door rivierprojecten in de hoofdvaarwegen in de Rijntakken versie 1.0. RWS Informatie memo Rijkswaterstaat ON, 1 juni 2021.
- Sieben, A. (2013): Informatiebehoefte en raming monitoring sedimentsuppletie Bovenrijn. Memo Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving. 11 april 2013.

- Tuijnder, A. (2018): Analyse hoogwaterveiligheid sedimentsuppletie Boven-Rijn. Eindrapport. Arcadis, 15 juni 2018.
- Van der Mark, C.F., T Vijverberg & W. Ottevanger (2014). Validation of Actual Depth Measurements by Inland Vessels. Smart Rivers 2015 Conference.
- Van der Mark, C.F. & M. Lemans (2020). Operational 2D water depth prediction using echo sounder data of inland ships. Proc River Flow 2020. ISBN 978-0-367-62773-7.
- Van der Mark, R. & R. van der Wijk (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Vaarweg. Rapport Deltares, 11204644, Delft, september 2021.
- Van Wirdum, M. (2019). Oplevering data ter ondersteuning monitoring sedimentsuppletie. Opleverbrief d.d. 15 februari 2019.
- Verheij, H. & R. van der Sligte (2014). Gronddekking op kabels en leidingen in Rijkswateren; Advies aan RWS voor nieuwe normen en een studie naar de achtergronden van de huidige normen. Rapport 1208358, Deltares, Delft, augustus 2014.

# A Ruimtelijke verdeling van de scheepvaart

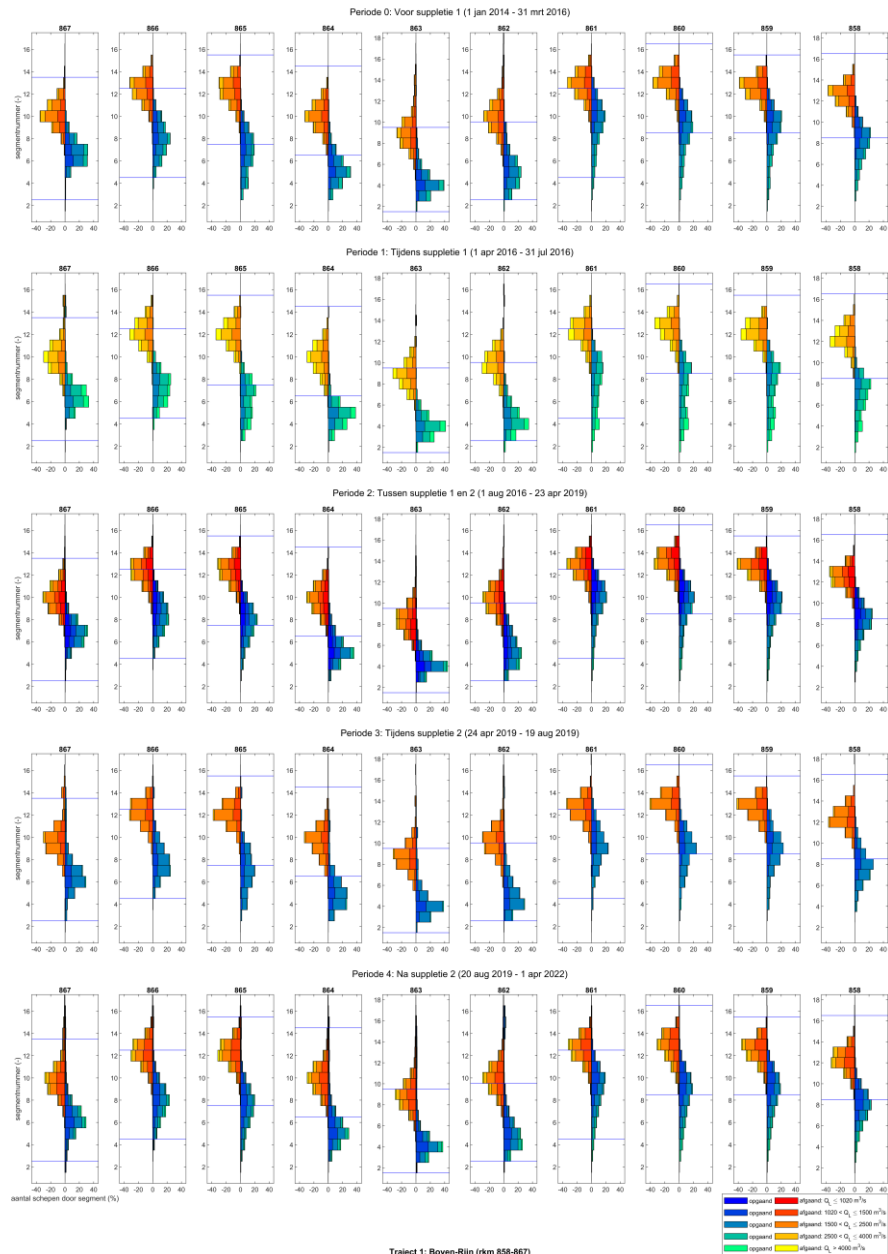
## A.1 Ruimtelijke verdeling per 250 m in suppletietraject



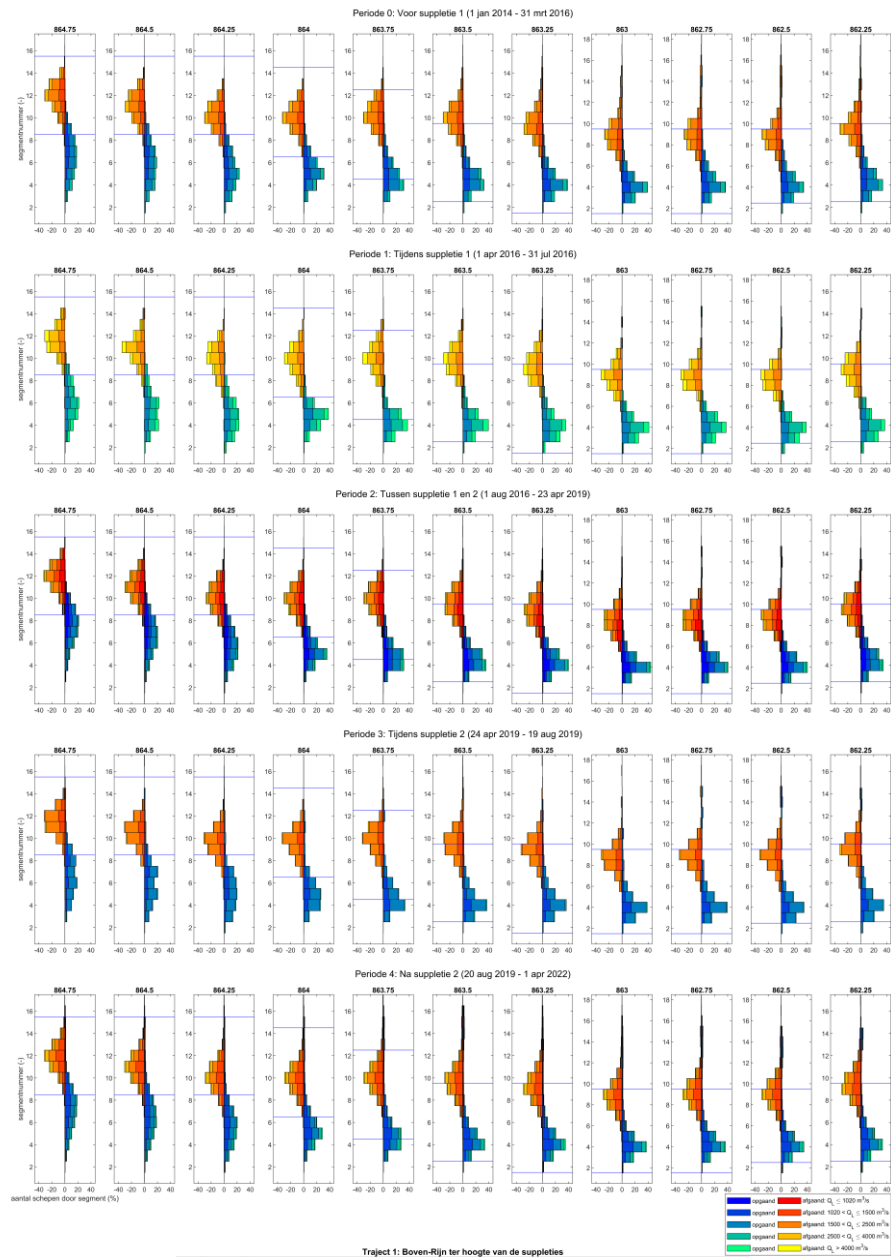
Traject 1: Boven-Rijn ter hoogte van de suppleties

## A.2 Ruimtelijke verdeling met onderscheid in afvoerclassen

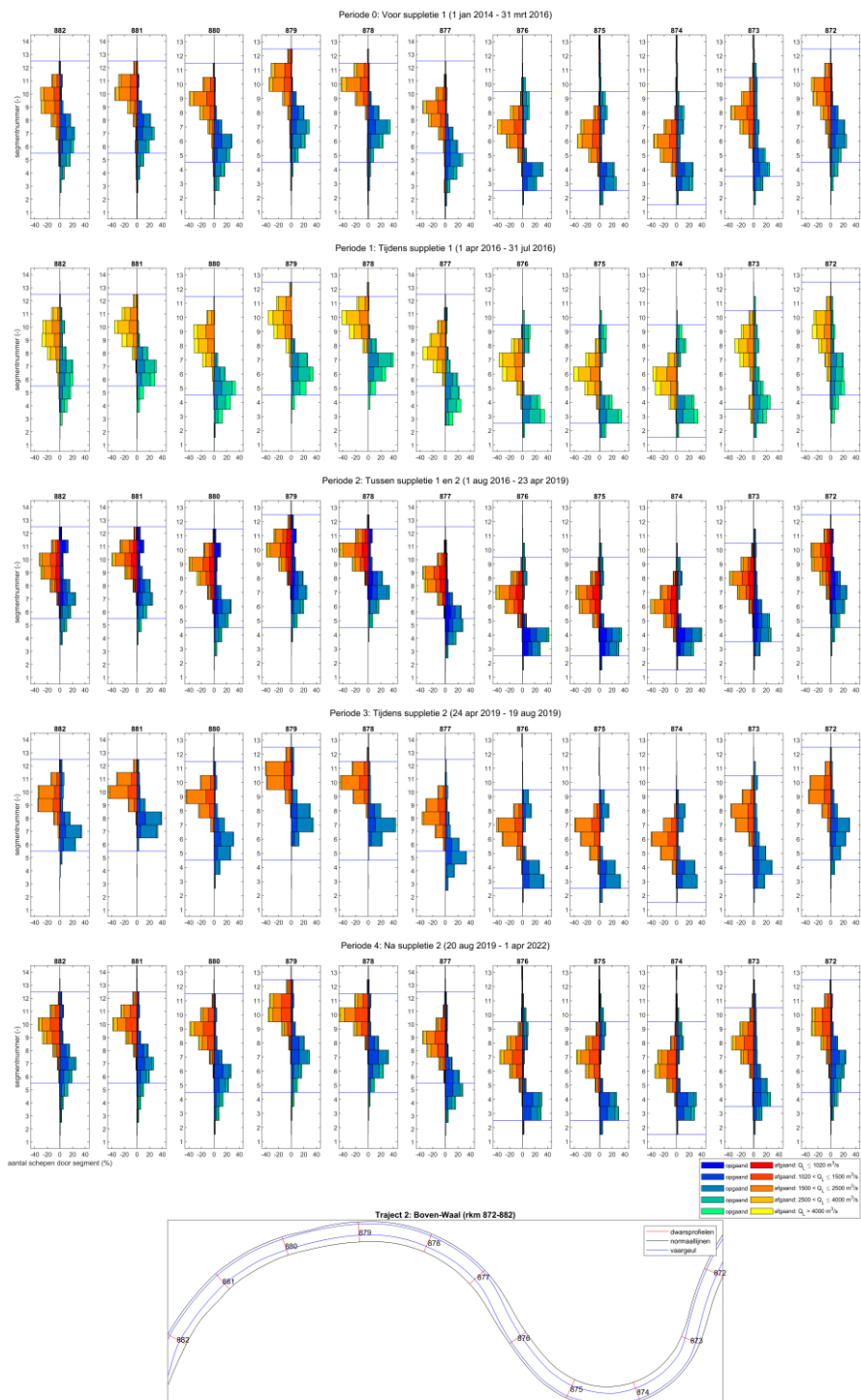
### A.2.1 Traject 1: Boven-Rijn (km 858-867)



## A.2.2 Traject 1: Boven-Rijn (ingezoomd op km 862-865)

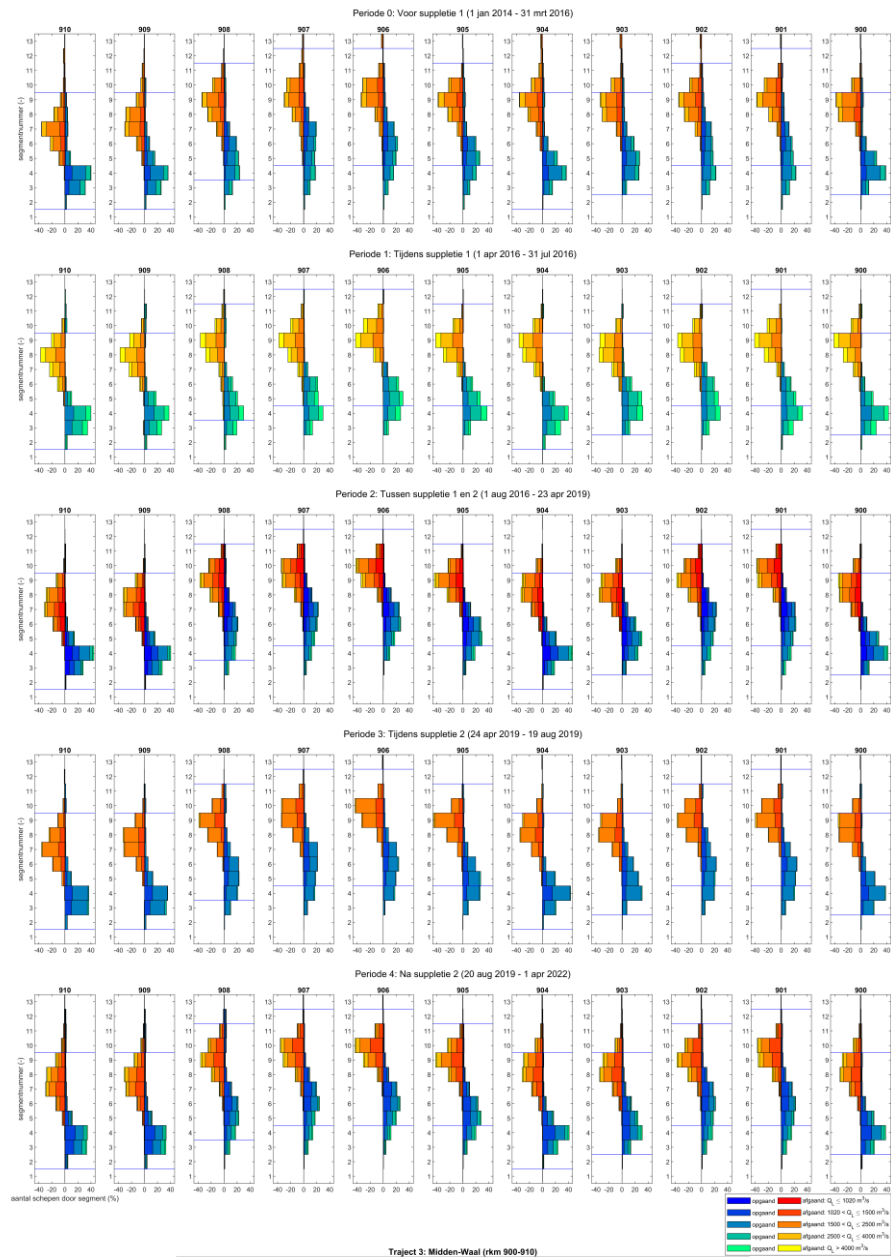


## A.2.3 Traject 2: Boven-Waal (km 872-882)





## A.2.4 Traject 3: Midden-Waal (km 900-910)



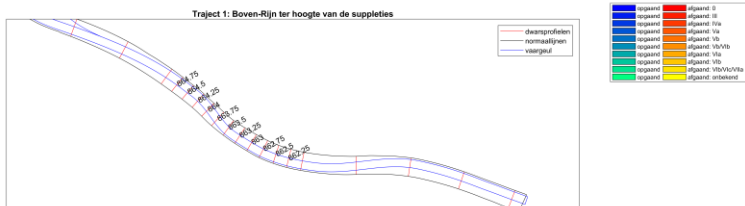
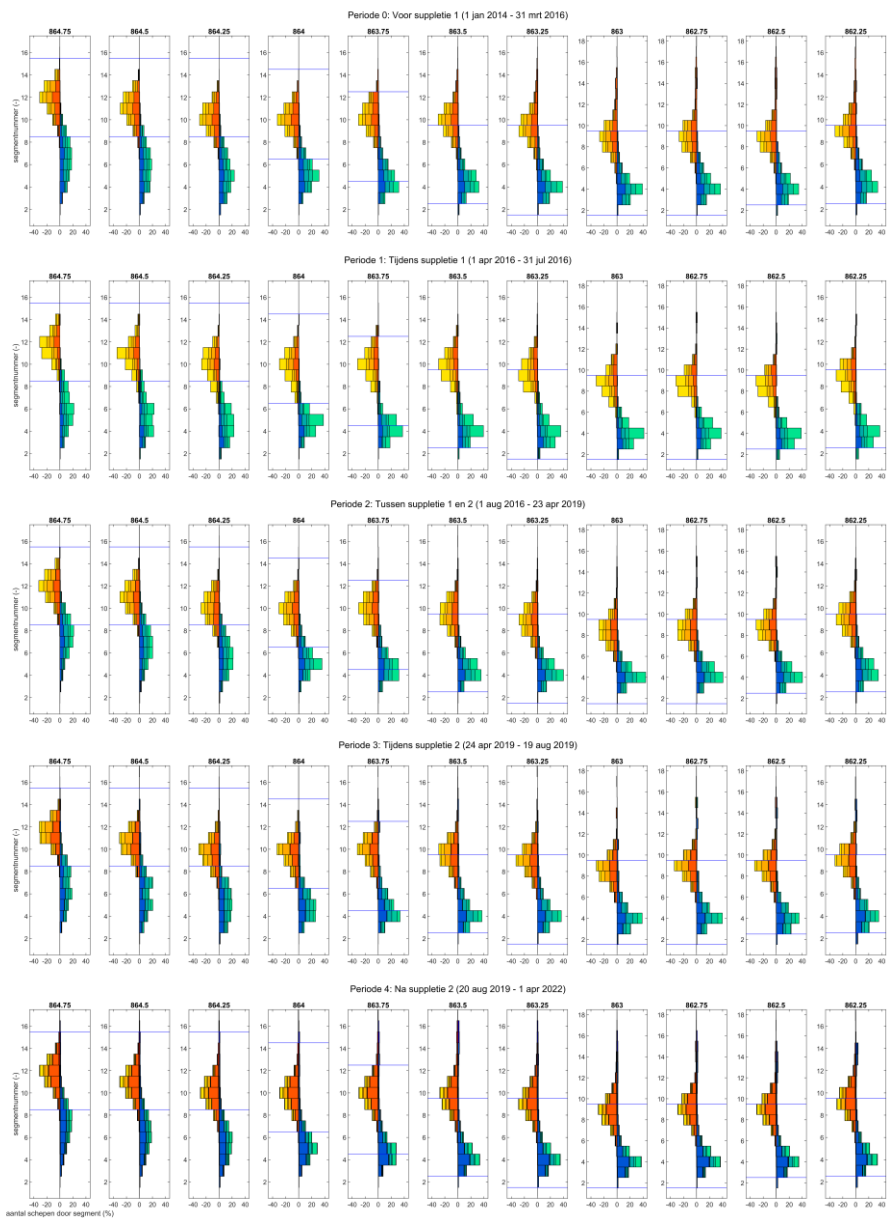
### A.3 Ruimtelijke verdeling met onderscheid in scheepstype

CoVadem classificeert de aangesloten schepen volgens onderstaande CEMT-indeling (uit de Richtlijnen Vaarwegen, 2011).

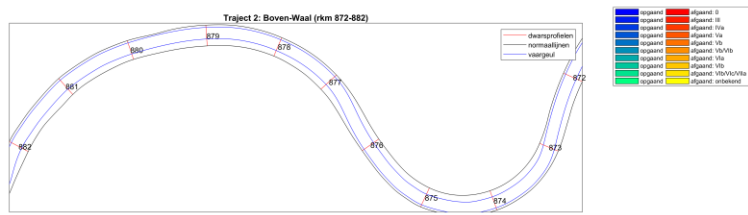
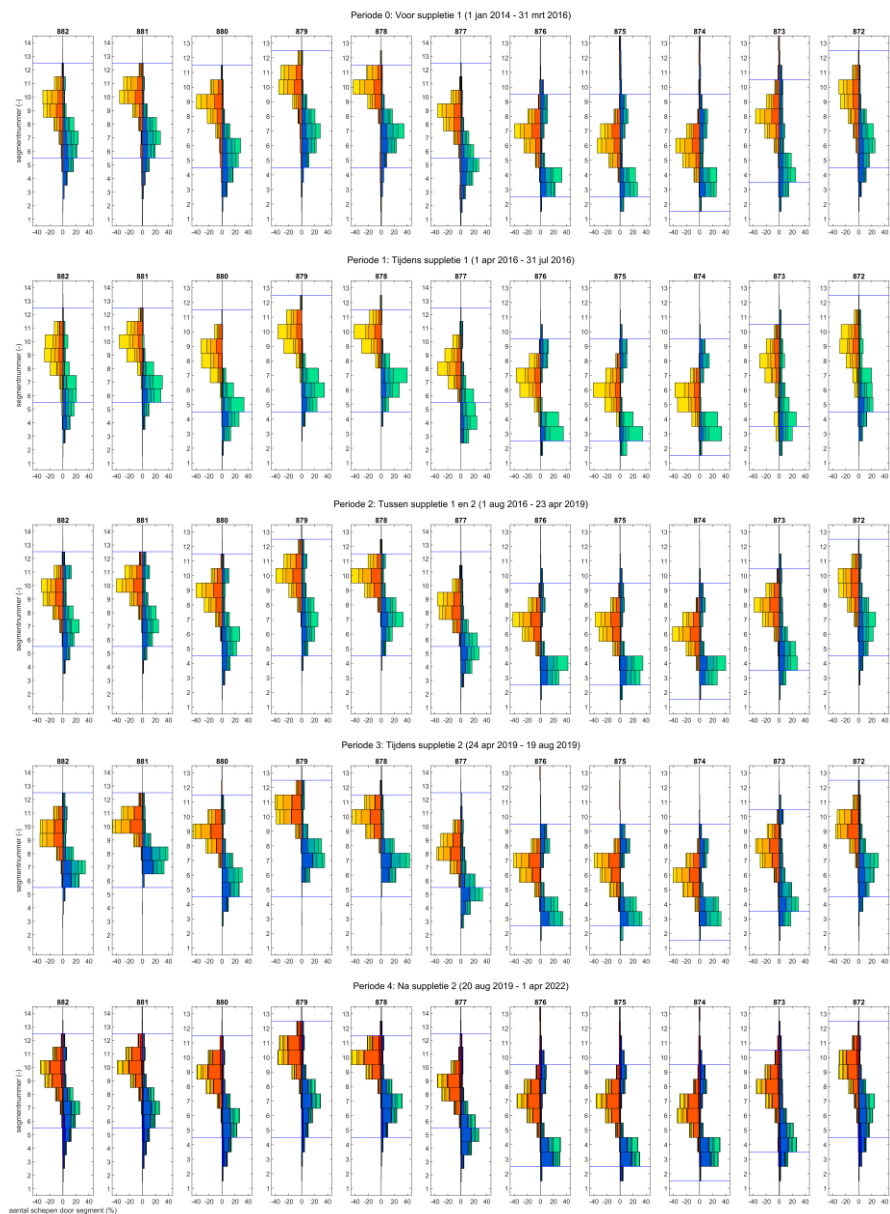
CEMT-klasse	RWS-klasse	type	lengte	breedte	diepgang geladen	strijkhoogte leeg/geladen	laadvermogen (ton)
0	M0	Kleinere vaartuigen					<250
I	M1	Spits	38,50	5,05	2,5	4,65/3,35	251-400
II	M2	Kempenaar	50-55	6,6	2,6	5,8/4,6	401-650
III	M3	Hagenaar	55-70	7,2	2,6	6,3/5,1	651-800
III	M4	Dortmund-Eemskanaalschip	67-73	8,2	2,7	6,3/5,1	901-1050
III	M5	Verl. Dortmund-Eemskanaalschip	80-85	8,2	2,7	6,3/5,1	1051-1250
IVa	M6	Rijn-Hernekanaalschip	80-105	9,5	2,9	6,7/5,3	1251-1750
IVa	M7	Verl. Rijn-Hernekanaalschip	105	9,5	3,0	6,7/5,3	1751-2050
Va	M8	Groot Rijnschip	110	11,4	3,5	7,1/5,4	2051-3300
Va	M9	Verl. Groot Rijnschip	135	11,4	4,0	7,1/5,4	3301-4000
Vb		Duwkonvooi met 1x2 bakken in de lengte	170-190	11,4	3,5-4,0	9,1	3951-7050
Vla	M10	Maatgevend schip	110	13,5	4,0	7-9,1	4001-4300
Vla	M11	Maatgevend schip	135	14,20	4,0	7-9,1	4301-5600
Vla	M12	Rijnmax schip	135	17,0	4,0	7-9,1	>5601
Vlb		Duwkonvooi met 2x2 bakken naast elkaar	185-195	22,8	3,5-4,0	7-9,1	6400-12000
Vlc		Duwkonvooi met 3x2 bakken naast elkaar	270	22,8	3,5-4,0	9,1	9600-18000
Vlla		Duwkonvooi met 2x3 bakken naast elkaar	195	34,2	3,5-4,0	9,1	14500-27000



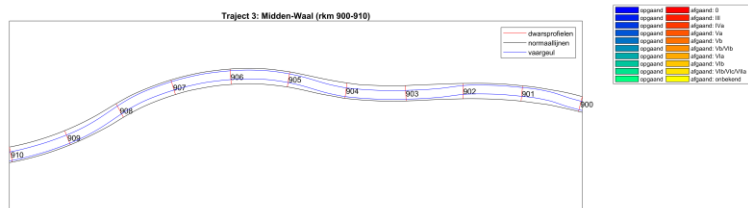
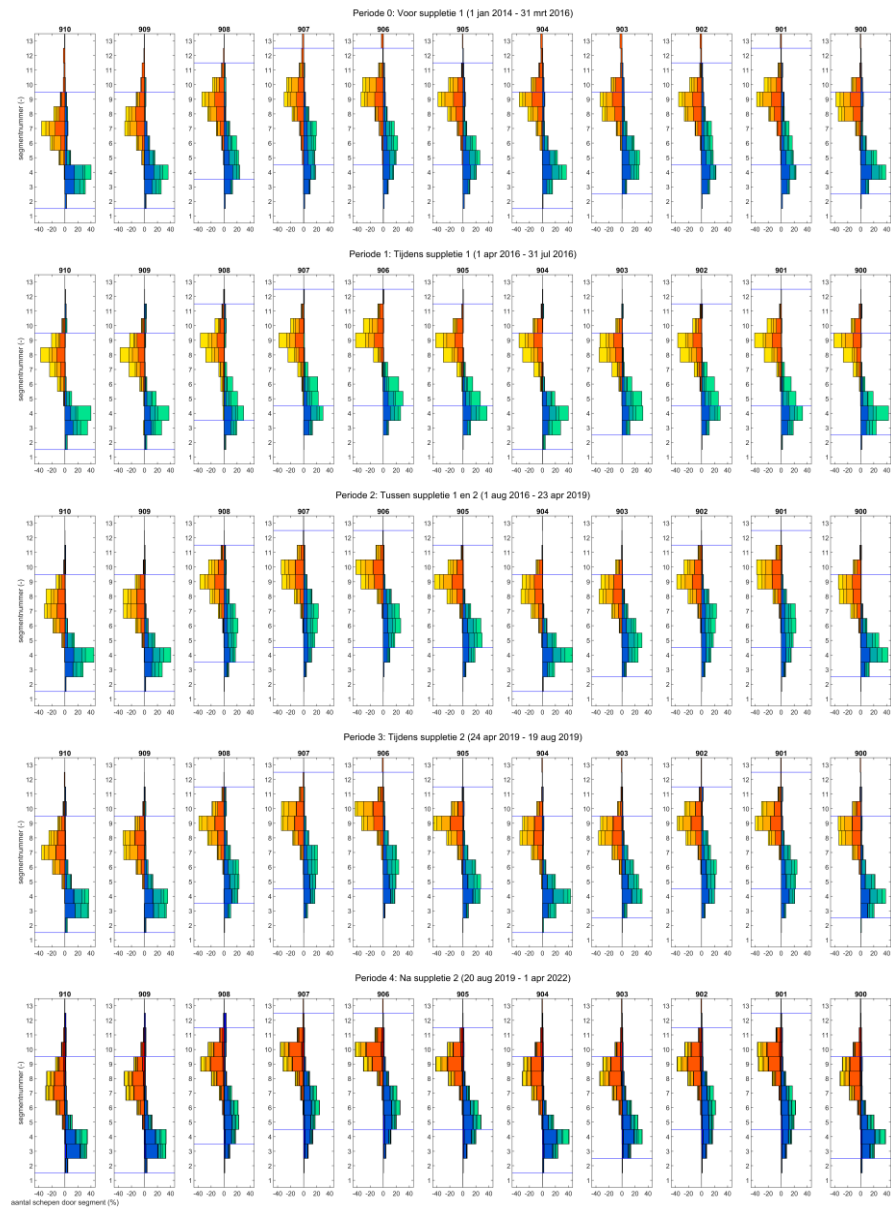
Traject 1: Boven-Rijn (ingezoomd op km 862-865)



### A.3.3 Traject 2: Boven-Waal (km 872-882)



### A.3.4 Traject 3: Midden-Waal (km 900-910)



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

**Deltares**

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